

日本応用地質学会
応用地質学における地下水問題研究小委員会報告

平成 17 年 10 月

日本応用地質学会
応用地質学における地下水問題研究小委員会

目 次

1. はじめに	1
2. 委員会の目的	1
2-1 WG1 都市域の地下水上昇が地盤に与える影響	2
2-2 WG2 割れ目系岩盤の地下水流れ	2
3. 委員会の構成	3
4. 委員会活動	4
4-1 小委員会の活動状況	4
4-1-1 WG1活動成果	4
4-1-2 WG活動成果	5
4-2 現地見学会	7
4-2-1 平成14年度：徳山ダム、根尾谷断層	8
4-2-2 平成15年度：広神ダム、付け替え八ツ場トンネル、八ツ場ダム	12
4-2-3 平成16年度：大滝ダム、大戸川ダム	18
5. 第二期小委員会の活動の必要性和活動方針	21
5-1 WG1	21
5-2 WG2	21
6. おわりに	22

付 録

1. 委員会等スケジュール	23
2. 議事録(第1回目から第15回目)	24
3. 平成16年度特別講演及びシンポジウム 予稿集	61
3-1 目次	62
3-2 特別講演 大阪平野に見られる地下水問題	橋元 正 63
3-3 シンポジウム1 応用地質における地下水問題と小委員会の取り組み	徳永朋祥 70
3-4 シンポジウム2 首都圏の広域地下水流動系把握の現状と応用地質的課題	斉藤 庸 72
3-5 シンポジウム3 建設工事、地下構造物に見られる地下水問題	清水 満 88
3-6 シンポジウム4 地下水流動系に関わる岩盤割れ目の見方と評価	奥田英治 96
3-7 シンポジウム5 割れ目系に着目したダムサイトにおける透水性評価の試み	川越 健 101
3-8 総合討論(地質スケールに応じた地下水流動問題とその応用地質学的アプローチ)	コーディネーター：嶋田 純 110
4. 平成16年度 日本応用地質学会研究発表会	113
4-1 P42 首都圏の地下水位上昇問題に係る広域地下水流動系について	113
4-2 P43 水質・同位体組成からみた関東平野における広域地下水流動系	117
4-3 P44 地下温度分布からみた関東平野における広域地下水流動系	121
4-4 P45 東京沖積低地を主とした最近の地下水水頭ポテンシャルの状況	125
4-5 P46 建設工事・地下構造物と地下水	129
4-6 P47 地下水流動系に関わる岩盤割れ目の見方と評価	133
4-7 P48 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(1)	137
4-8 P49 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(2)	141
4-9 P50 グラウチング実績とダム初期湛水時の水質データによる透水性の評価	143

1. はじめに

日本応用地質学会では、1995年に発生した兵庫県南部地震後に設立された阪神・淡路大震災調査特別委員会第三分科会とそれに引き続く地下水変動研究小委員会において、応用地質学的な観点から地下水問題を整理し、検討するための活動が行われてきた。そこでは、地下水の挙動に関する様々な事象に関する事例紹介や現地見学会等を通して、「応用地質学における地下水問題」をどのように捉えるべきかについて議論がなされてきた。その中で主に議論の対象となったのは、地下水変動を捉える上での時間・空間スケール、水循環の中での地下水流動の位置付け、自然・人為作用に対するレスポンスとしての地下水変動の理解、“質的な”地下水変動、地盤・岩盤に対するセンサーとしての地下水変動、であった。これらの議論の結果として、地下水変動を議論するにあたって、地下水流動系を念頭において事象を見ることの重要性が示されたが、一方で、この概念が、地質の分布やその成因、地質分布から推定される物性分布のような、今まで応用地質学分野で活躍してきた人たちが得意にしていたものの考え方とは一見違ったものの捉え方であり、それらを融合することの必要性が明らかとなった。

本報告書は、上記のような問題意識に基づき、より具体的なテーマを設定し、応用地質学における地下水問題を議論し、成果をあげることを目的として設置された「応用地質学における地下水問題研究小委員会（第一期）」の成果を取りまとめたものである。本小委員会では、2つのワーキンググループ「都市域の地下水上昇が地盤に与える影響」「割れ目系岩盤の地下水流れ」による具体的な問題を対象とした議論に基づき、応用地質学的視点から、地下水問題を捉え、地下水問題の取り扱い方のより適切な整理及び、地下水管理・利用に向けた提言を取りまとめることを目的としたものである。最終的な成果に到達するためには、今後更なる検討を行なう必要があるが、ここでは、現時点までに当小委員会で議論された内容及び次期小委員会への課題の提示に関して取りまとめ、報告書とした。

2. 委員会の目的

日本応用地質学会では、阪神・淡路大震災調査委員会第三分科会とそれに引き続く地下水変動研究小委員会で、応用地質学における地下水問題に関する活動が行われてきた。そこでは、地下水流動系を念頭において事象を見ることの重要性が示されたが、一方で、この概念が、地質の分布やその成因、地質分布から推定される物性分布のような、今まで応用地質学分野で活躍してきた人たちが得意にしていたものの考え方とは一見違ったものの捉え方であり、それらを融合することの必要性が明らかとなった。

本小委員会では、このような目的に対して具体的なテーマを提示して検討を進めることとし、「都市域の地下水上昇が地盤に与える影響」と「割れ目系岩盤の地下水流れ」の2つ

のワーキンググループ（WG）を活動の主体とし、各々の課題に関して、主に地下水流動系の概念から現象を見ている技術者と、その入れ物である地質・地盤構造を主に検討を行ってきた技術者の両者にメンバーとなってもらい、応用地質学における地下水問題の取り扱いのより適切な整理及び、地下水管理・利用に向けた提言を取りまとめることを目的とした。なお、当然ながら、応用地質学における地下水問題は、上述の2つに集約されるものではなく、「斜面問題と地下水」「河川と地下水の相互関連」など、様々な問題があることは認識している。これらのテーマに関しては、将来的な小委員会のテーマとして取り上げられることも検討されるべき内容であろう。

以下に、各WGの設立時の目的を述べる。

WG 1 都市域の地下水上昇が地盤に与える影響

日本の都市の多くは平野部に発達しており、その被圧地下水は、地盤沈下対策として取られた昭和40年代の揚水規制以降上昇を続けている。そのために、被圧地下水が上昇する前に構築された既存の地下構造物では、地下水の回復による浮力対策が必要となっている。都市域における被圧地下水位の上昇が今後も続くとすると、地下のインフラ整備に及ぼす影響はさらに甚大となることが予想される。一方、地下水位の上昇は、地震時の液状化危険域の増大等、都市の自然災害に対する脆弱さを増長させている可能性が高い。

当WGでは、このような社会的な背景を踏まえ、主として下記の活動を行う。

- ①被圧地下水の上昇が実際にどのように起こってきており、それが、地質・地盤構造とどのような関連をもっているかについて既存の調査・研究成果を取りまとめる。
- ②被圧地下水の上昇が、地下構造物・地下インフラにどのような影響を与えているのかについての実態を整理し、検討する。
- ③地下水の上昇が進んだ後に大きな地震を被った都市域（阪神地区、仙台、北海道など）における被害状況と地下水位分布との関連について既存の調査・研究成果の整理を行う。
- ④上述の3つの検討をもとに、地下水資源の保全・利用を含めた都市域における適切な地下水管理に向けた提言を取りまとめる。

WG 2 割れ目系岩盤の地下水流れ

割れ目系岩盤内の地下水流れは、ダム・トンネルなどの施工を行う上では、その取り扱いが重要な問題となってくる。また、最近特に問題となっている高レベル放射性廃棄物の地層処分においても、その安全評価においては、割れ目系を通る地下水流動・核種移行は、重要な課題と考えられる。一般に、割れ目系岩盤内の流れは、「みずみち」という概念で捉えられているが、それが、地質学的にはどのように理解され、また、地下水流動や水収支を考える上ではどのように取り扱われているのかは、今一度整理してみる必要があると考

えられる。特に、実際の割れ目系の流れを現地で観測・計測する作業と、それをモデル化し、地下水流れの解析を行う作業との間には、大きなギャップがあることは多くの技術者の認めるところであろう。

本WGでは、今までに多くの実績があるダムを割れ目系岩盤内の地下水流れを検討する上での代表例と考え、具体的には以下の作業・検討を行い、古くて新しい問題である割れ目系の地下水問題について下記の活動を行う。

- ①割れ目系を通じた地下水流れが問題となった事象について整理を行う。
- ②割れ目系岩盤の記載・観測・計測の現状の整理を行い、それが割れ目系を通じた地下水流れの評価の中でどのような役割を果たしてきているのかを再検討する。
- ③割れ目系岩盤のモデル化の現状の整理を行い、そのモデル化に現地での観測・計測がどのように貢献してきているか再検討を行う。
- ④現地での観測・計測とモデル化の橋渡しをするための方法論に関する提案を行う。

これらの目的を達成するために、小委員会では、いくつかの研究紹介をしていただくとともに、実際にデータを収集・検討することにより、課題の解決に努めた。また、現地見学会も実施し、議論を深めた。これらの活動の結果得られた知見を会員各位に還元することを目的とし、平成 16 年度学会シンポジウムの立案・企画に積極的に参加した。さらに、平成 16 年度日本応用地質学会研究発表会にも、ポスター発表として参加し、成果の報告を行った。

3. 委員会の構成

当小委員会は、平成 13 年 10 月に設立された。以下のメンバーが小委員会構成である。また、小委員会の議論内容によっては、専門の方にオブサーバ・話題提供としてご参加いただいた。

名前	所属（小委員会設立時の所属）
徳永朋祥	東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻
斎藤 庸	日本工営（株）首都圏事業部地質部
奥田英治	アイドルエンジニアリング（株）地質部
あべ松保貴	（株）建設技術研究所
石橋弘道	スイモンリサーチ（株）
伊藤一誠	ローレンスパークレイ研究所
長田昌彦	埼玉大学
川越 健	（株）熊谷組 土木本部土木設計部地質グループ
川島眞一	東京都土木技術研究所

木谷日出男	(財)鉄道総合技術研究所防災技術研究部地質研究室
齋藤和春	(株)建設技術研究所
佐々木崇二	(株)地水環境研究所
塩崎 功	(株)間組 技術・環境本部原子力部
嶋田 純	熊本大学理学部地球科学科
田中和広	山口大学理学部化学・地球科学科
谷口真人	奈良教育大学教育学部地球物理学教室
平山利晶	国際航業(株)技術サービス事業本部東日本事業部
広瀬 誠	東亜建設工業(株)
細谷真一	(株)ダイヤコンサルタント
松浦 努	(株)建設技術研究所
三宅紀治	清水建設(株)技術研究所
宮島吉雄	日特建設(株)
森口安宏	川崎地質(株)営業本部
柳田三徳	日本工営(株)首都圏事業部地質部
横山尚秀	神奈川県温泉地学研究所
脇坂安彦	独立行政法人土木研究所材料地盤グループ

4. 委員会活動

4. 1 小委員会の活動概況

当小委員会では、二つのWGをあわせた全体としての小委員会を2ヶ月に1回程度の割合で開催してきた。初期には、委員メンバーもしくは外部から講演者を招待し、研究紹介をしてもらうとともに、その内容に関する議論を行った。小委員会の開催に関する詳細は、巻末資料の議事録・議事メモに記されている。また、中盤から後期にかけては、各WGグループで議論すべき内容も整理されてきたこともあり、各WGで個別に検討を実施するスタイルを取ることにした。これらの途中経過は省略するが、各々の活動成果は下記のとおりである。

WG 1 活動成果

WG1のテーマとする地下水問題は、問題の顕在化している局所を注視することで済むことなく、関連する地下水流動系全体を俯瞰し、把握することでその実像が理解できまた対策等の評価も可能になると考えられる。広域地下水流動は、その規模や形態が降雨(気象)並びに地形・地

質に支配されて決まるため、地域性の大きい自然現象といえる。このことを踏まえ WG1としては、特定の地域を研究対象フィールドに選んで検討を進めていくこととしたが、一方、研究フィールドを多数選んだ場合、議論が散漫となり活動成果のとりまとめに支障を来す懸念があった。

こうした事情から、上記①と②に関連した地下水問題が顕在化し社会的にも注目されている首都圏沖積低地下の地盤・地下水とそれに関わる広域地下水流動系に着目して活動を進めていくこととした。なお、③に関しては、主に阪神地区における既往の調査・研究成果等のレビューを通して可能な限りの情報収集に努めることとした。

その成果内容は主に、首都圏沖積低地下の地下水に係る関東地下水盆規模の広域地下水流動系の概要の提示、当該地における地下水問題の具体的内容の提示、そして、地下水位変化と地盤沈下動態の関係など地下水管理に向けて必要な学術的・技術的な検討手法の提示、であり、真に目指す「地下水管理に向けた提言のとりまとめ」には至っていない。

WG活動成果

WG2では、割れ目系岩盤の地下水流動に関連したいくつかの事例を集めるとともに、割れ目系岩盤の地下水流動に共通した現象を抽出することを試みた。その結果、地質構造とその成因・時間的な前後関係を解釈することによって、地下水流動を支配するメインフレーム、サブフレームからなる水理地質構造図を構築し、これと同時に実施される試験・調査の結果を統一的に説明できる仮説を構築・検証してゆくことが重要であることを再認識した。

このような方法論の妥当性を検討するために、1つのダムサイトを取り上げて集中的に議論した。その結果、水理地質構造の唯一解を求めることはできないが、地質構造を適切に解釈することによって、ルジオン値などの試験データを統一的に解釈することができる仮説を導くことができることが示された。そのような仮説では、構造の空間的な連続性が地質の論理に従っており、単に試験データを空間的につないだものと比べると蓋然性が高いと考えられる。このようなアプローチは、地質条件などに依存するため、すべてのサイトに対して汎用的なものではないが、このようなアプローチが徐々に浸透することによって、割れ目系岩盤の地下水流動をより現実的に理解できるようになることが期待された。

これらのより詳細なまとめは、平成16年度日本応用地質学会シンポジウム「地質スケールに応じた地下水流動問題とその応用地質学的アプローチ」においてその概要のまとめがなされており、また、平成16年度日本応用地質学会研究発表会に下記ポスターを発表することにより、その詳細を公表した。

P42: 斎藤庸・林武司・宮越昭暢・三宅紀治・廣瀬誠、首都圏の地下水位上昇に係る広域地下水流動について

この報告では、首都圏の被圧地下水上昇問題について、地下水ポテンシャル、水素同位体比、地下温度分布について解析結果を提示し、最近の被圧地下水動態変化、地下水位上昇による建設分野への影響と対策、今後の地下水位変化予測と地下水位の適正管理について論じた。今後は、深部地盤構造との関連を精査し更に定量的な水収支解析も並行して検証を進めることが重要であることを示した。

P43: 林武司・宮越昭暢, 水質・同位体組成からみた関東平野における広域地下水流動系

この報告では、関東平野後期地下水流動系の研究手法として一般水質と酸素・水素同位体比・溶存有機炭素中の ^{13}C , ^{14}C の分析・測定を行い、平面・鉛直分布および時間軸での水質・水頭の整理によって、水理水頭分布と地下水質・同位体比分布の比較及び地下水流動を検討した結果をまとめた。

P44: 宮越昭暢・林武司, 地下温度分布からみた関東平野における広域地下水流動系

この報告では、関東平野広域地下水流動系の研究手法として地下水位および地下温度の測定を行い、平面・鉛直分布の整理によって、地下温度と地下水流動との関係を明らかにし、低温域の規模が大きい武蔵野台地の特殊性を指摘し、今後、土地利用・揚水の影響も併せて精密に検討していく必要があることを明らかにした。

P45: 三宅紀治・斎藤庸, 東京沖積低地を主とした最近の地下水水頭ポテンシャルの状況

この報告では、東京沖積低地における地下水水頭の上昇について、1992年、2002年時間面における地下水水頭ポテンシャルの平面・鉛直分布を整理し、1984～2002年の間について地下水頭と揚水量との関係を検討し、さらに地下水上昇プロセスに関する検討を行なった。

P46: 廣瀬誠・川越健・木谷日出男, 建設工事・地下構造物と地下水

この報告では、東京下町、武蔵野台地東部を例に地下水位変化と地盤・構造物のかかわりについて、既存の観測データ等を用いて検討した結果を、1) 地下水位上昇が構造物に与える影響、2) 沖積粘土層、洪積層上部における間隙水圧変動、3) 沖積粘土層、洪積層以深の沈下・リバウンドに整理して検討を行なった。

P47: 奥田英治, 地下水流動系に関わる岩盤割目の見方と評価

この報告では、岩盤地下水流動を規制する割目系を現場でどう認識するかの方法についてまとめている。まず、実証データから地質構造形成史を検討し、個々の割目の「氏と育ち」を整理し、割目系の透水構造・遮水構造についてメインフレーム・サブフレームの構造を構築すれば、岩盤地下水流動について、より精密な定量化ができる可能性を示した。

P48: 川越健・長田昌彦, 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(1)
 ー割れ目系の構造発達史から読み取れる透水性評価ー

この報告では、「割れ目系の構造発達史を考えた水理地質構造のモデル」とそこから導かれた「地下水の流動規制の差によるメイン・サブフレームの概念」を合わせることにより、掘削面の岩盤状況、湧水点の位置およびグラウチング時のルジオン値の分布が合理的に説明できることを示した。

P49: 長田昌彦・川越健・Aung Ko Ko Soe, 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(2)
 ーカーテングラウチング結果を取り入れた三次元的な透水性評価ー

この報告では、カーテングラウチング結果を取り入れた三次元的割れ目系透水性モデルを構築することにより、対象領域の主要な割れ目系とルジオン値との関係を考察している。三次元モデルを構築することにより、割れ目系の交線方向に対する透水性の一般的な傾向を明らかにしていく手立てとなることが期待されることを示した。

P50: 村上晃生・塩崎功・川越健, グラウチング実績とダム初期湛水時の水質データによる透水性の評価

この報告では、湛水時におけるダム基礎岩盤を経由する浸透水の水質調査結果（イオン濃度）をグラウチング実績データ（単位注入セメント量）と併せて評価することにより、単位注入セメント量が多い領域は、湛水時における浸透流量が多く、流速も大きいことを示した。

4. 2 現地見学会

応用地質学における地下水問題に関する課題の一つに、地下水流動系を念頭に置いた事象と、その器である成因を含めた地質の分布を融合した考え方を検討することがあげられる。この点を含め応用地質学における地下水問題について各視点から現場にて議論する機

会を得るために、委員会では地質構造および透水性について比較的良くデータが得られ、また地質状況を実際に見ながら議論できるダムサイトを中心として、以下に示すように年1回の現地見学会を行った。

- (1) 平成14年度：徳山ダム、根尾谷断層
- (2) 平成15年度：広神ダム、付け替え八ツ場トンネル、八ツ場ダム
- (3) 平成16年度：大滝ダム、大戸川ダム

各見学会の概要は、以下の通りである。なお、各見学会で現地にて配布された資料の一部を、参考資料として添付する。

(1) 平成14年度：徳山ダム、根尾谷断層

日時：平成14年9月24日（木）～9月25日（金）

場所：水資源開発公団（現：水資源機構）徳山ダム、根尾谷断層

（ダム概要と見学会実施時点での現場状況）

徳山ダムは揖斐川上流に建設中のダムで、堤高161m、堤頂長415m、堤体積1,390万 m^3 の中央遮水壁型ロックフィルダムである。地質は美濃帯に属し、河床部にはチャート、粘板岩、輝緑凝灰岩が分布している。

見学会時点では、河床部までの掘削がほぼ終了し、試験グラウトなどが実施されている段階であった。

参加者：委員9名、学生1名

行程：

9月24日（木）

11：40 岐阜羽島駅集合

移動途中、奥田幹事より徳山ダムの地質概要についての説明

13：00 水資源開発公団 徳山ダム建設所（揖斐郡揖斐川町）

徳山ダムの調査時代から経緯を含め、プロジェクト全体の概要を説明を受ける

14：30 J V事務所着

事務所にて工事進捗状況、地質状況の説明を受けた後、右岸天端（ダム本体の概観を見学）、ダム堤敷河床部（断層の性状と水理地質についての討議）、原石山などを見学した。



写真 実施状況（１）
ダム堤敷河床（左岸側）にて



写真 実施状況（２）
原石山にて

9月25日（金）

9：00～10：30 検討会（水資源開発公団会議室）

調査時代からの経緯を踏まえ、ルジオンマップをテーマに水理地質構造の把握、表現方法について討議がなされた

10：30～12：00 ボーリングコア観察

コアから読み取れる地下水の情報について、徳山ダムの実際のコアを見ながら討議を行う

14：00～15：00 根尾谷断層（水鳥地区ほか）の変位地形を見学

16：00頃 岐阜羽島駅にて解散

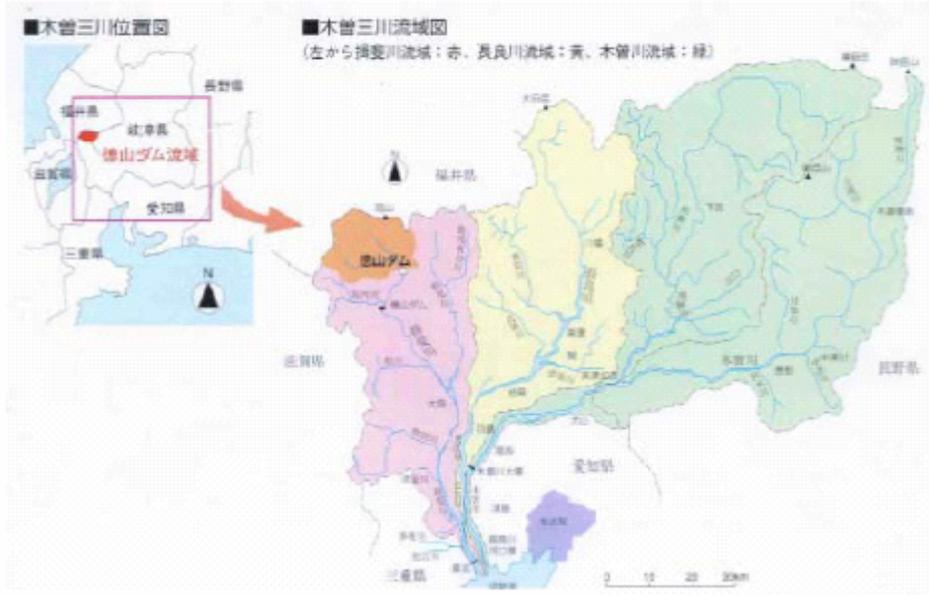


写真 実施状況（３）
ボーリングコア観察



写真 実施状況（４）
水鳥地区での根尾谷断層変位地形の見学

【参考資料】



■ダム平面図



貯水池計画の概要

貯水池面積	約254.9km ²	貯水池築水位	標高407.0m
湖床面積	約13.0km ²	湖底築水位	標高400.0m
総貯水容量	約880,000,000m ³	洪水調節水位	標高393.0m
有効貯水容量	約221,400,000m ³	最低水位	標高307.5m

■貯水池縦断図(分層)



(2) 平成15年度：広神ダム、付け替え八ッ場トンネル、八ッ場ダム

日時：平成15年11月17日（月）～18日（火）

場所：新潟県 広神ダム、JR東日本 付け替え八ッ場トンネル、国土交通賞 八ッ場ダム

参加者：委員10名、学会員6名、学生：6名

工程：

11月17日（月）

8:30 JR北浦和駅西口集合

13:00 JV事務所にて工事・地質概要説明

13:45 現場見学（地質の説明をINA太田氏より受ける）

11月18日（火）

8:45～9:15 JR東日本長野原工事区

八ッ場トンネル（TBM）の工事概要の説明を受ける

9:30～11:45 八ッ場トンネル（TBM）、川原湯トンネル坑口周辺（NATM工法）
の見学

13:00～14:30 八ッ場ダム広報センター「やんば館」

国土交通省八ッ場ダム工事事務所調査設計課によるダム計画の説明を
受けた後、予定サイト（ダム軸付近）の見学

15:00～15:40 河川沿いの露頭を巡検

19:00 JR北浦和駅にて解散

[3] 透水性

(1) 地下水位

右岸部：地形沿いの地下水位の上昇が認められる。右岸取付部から約 80m の地点で、サーチャージ水位標高以上

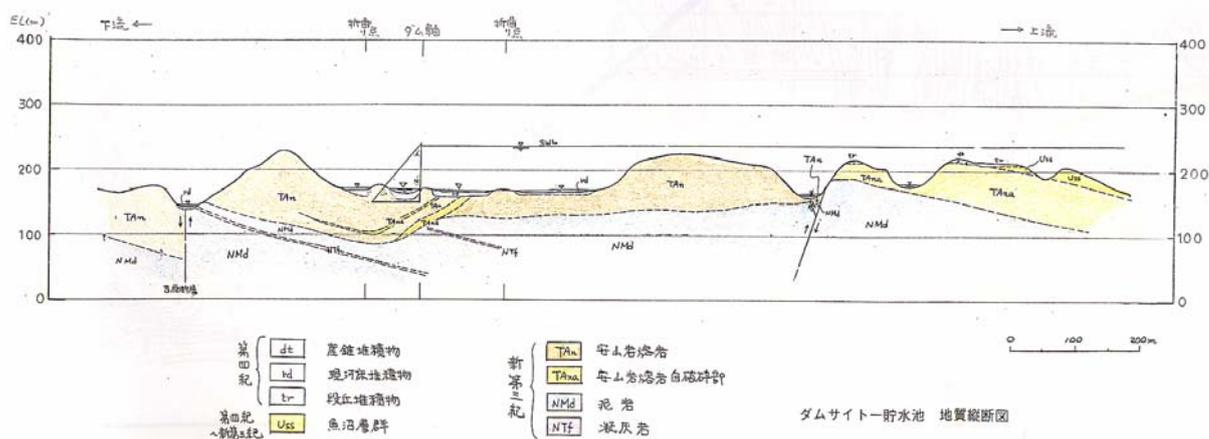
左岸部：全体に地下水位が低い。左岸取付部から約 160m(2H)の地点で、常時満水位標高程度

(2) ルジオン値

右岸部：地表から深度 40m に 5Lu 以下の低ルジオン値ゾーンが広がり、深部に高透水性を示す部分は認められない。

河床部：岩着部から 10~20m 以深に 2Lu 以下の難透水部が広がっており、深部に高透水性を示す部分は認められない。

左岸部：河床付近から中位標高部付近とダム取付部から奥の部分に深部まで高透水ゾーンの存在が認められる。→左岸はダム軸方向に伸びるやせ尾根となっており、かつ、安山岩熔岩に高角度の冷却割れ目が発達することから、地表からの風化が深部まで及び易い条件が重なったためと推定される。



ダムサイトー貯水池地質縦断図

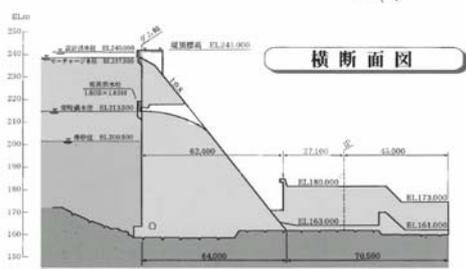
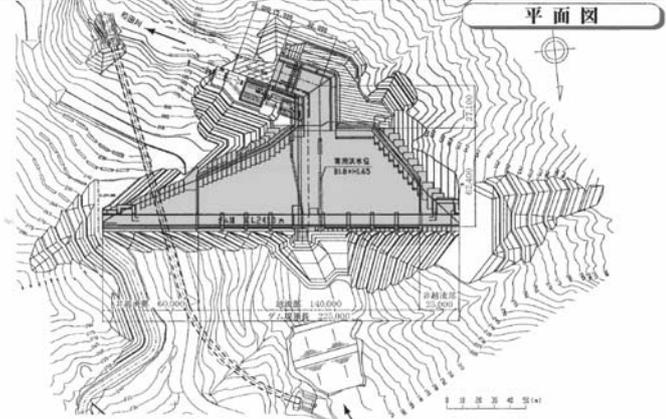
ダムサイトの地質層序

地質時代		地質名		記号	岩相・層相		
新 紀 代 紀	第 四 紀	完新世	崖錐堆積物		dt	未固結の礫混じり土砂	
			現河床堆積物		rd	未固結の円礫～亜円礫、砂	
		更新世	段丘堆積物		tr	未固結の円礫～亜円礫、砂	
			魚沼層群		Uss	未固結～半固結の砂層、シルト層、礫層	
	新 生 代	鮮新世	椎 谷 階	鳥屋ヶ峰 安山岩類	安山岩熔岩*	TAn	堅硬で節理の発達する輝石・角閃石安山岩。ゼノリスを多量に含み、所々、多孔質となる。
					安山岩熔岩 自破碎部	TAna	中硬～軟質で、節理は少ないが脆弱で、一部は角礫状～砂状を呈する。安山岩熔岩の基底部中間部に分布する。層厚は2～20m
		第三紀	新 鮮 世	貫入岩	流紋岩	Lp	白色を呈し、非常に硬い岩片と粘土化した部分よりなる。B-36孔のみに認められる。
				七 谷 階	西 名 層	泥岩	NMd
		凝灰岩	NTf			泥岩中に挟まれる軟質な砂質凝灰岩～凝灰岩。しばしば、粘土化する。スレーキングが強い。	

* 柳沢ほか(1986)によるK-Ar年代は6.4 ± 0.3 Ma

** 村松(1986)によるフィッシュトラック年代は13 Ma

■ダムの形状・諸元



発電所の諸元

発電方式	ダム式(ダム放流に完全従属)
取水位	EL.200.50~213.50m
最大有効落差	40.20m
最大使用水量	5.00m ³ /s
最大出力	1,600kW
取水口	形式:取水塔方式(ダム付属型)
水圧鉄管	形式:埋設管(鉄管)
発電所	形式:地上式

ダム諸元

ダム	
型式	重力式コンクリートダム
堤頂標高	EL.241.00m
堤頂長	225.0m
ダム高	83.0m
堤体積	320,000m ³
放流設備	
常用洪水吐き	自然調節方式 幅18m×高1.65m×1門
非常用洪水吐き	クレスト自由越流 幅13.5m×高2.5m×8門
計画高水流量	410m ³ /s
設計洪水流量	960m ³ /s
低水放流設備	既得用水補給等
貯水地	
湛水面積	0.65km ²
総貯水容量	12,400,000m ³
有効貯水容量	10,700,000m ³
サーチャージ水位	EL.237.50m
常時満水位	EL.213.50m
最低水位	EL.200.50m

◆付替八ッ場トンネル

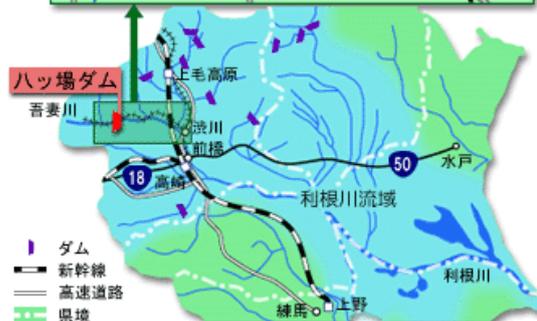
	吾妻線岩島・長野原付替八ッ場トンネル新設工事
工事概要	鉄道付替トンネル：TBM4160m、NATM185m
発注者	東日本旅客鉄道（株） 上信越工事事務所
現場状況	TBM&NATM で掘削中



TBM現地組立状況

◆八ッ場ダム

	八ッ場ダム建設工事
発注者	国土交通省八ッ場ダム工事事務所
住所	群馬県吾妻郡長野原町
目的	洪水調節、利水
型式	重力式コンクリートダム
堤高等	堤高131m、堤頂長336m、有効貯水容量9000万トン
地質	新第三紀から第四紀更新世のものであり、火山起源の堆積物及びマグマが地下で固まった貫入岩（安山岩）からなる。また、これらを覆って第四紀完新世の堆積物が見られる。
現場状況	周辺工事実施中。ダム本体は未着手。



(3) 平成 16 年度：大滝ダム、大戸川ダム

日時：平成 16 年 10 月 14 日（木）～10 月 15 日（金）

場所：国土交通省 大滝ダム、大戸川ダム

参加者：委員 8 名、学会員 8 名、学生 11 名

行程：

10 月 14 日（木）

11:10 京都駅集合

14:00～14:20 国土交通省紀ノ川ダム統合管理事務所白屋地区対策室
概要説明を受ける

14:20～16:30 白屋地区巡検
白屋地区対岸より全体を展望、
白屋地区ボーリングコア観察（大滝ダム本体 J V 事務所）

16:30 J V 事務所出発 宿舎（石山）へ移動

10 月 15 日（金）

8:30 宿舎（石山）出発

9:00～10:00 国土交通省大戸川ダム工事事務所
概要説明を受ける

10:30～12:30 現場にて横坑観察ほか

13:30～14:30 事務所にてボーリングコア観察

15:00 瀬田駅観察

【参考資料】

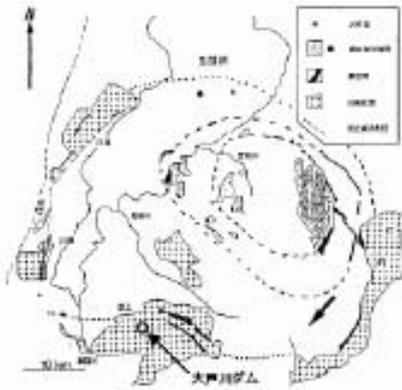
（以下の文章は、奥田主査からの事前資料：一部抜粋）

大滝ダムでは、大規模地すべりのボーリングコアで浅部破壊現象を見るというテーマが面白いと思われま。地質が違う（大戸川は花崗岩、大滝は中古生層のメランジュ）のですが、大戸川ダムで見ることの出来る大規模変質帯形成の元となった深部変形破壊現象としてのカタクレーサイト帯と対で見ると深さによる変形破壊構造の差が歴然とあります。両者を神様がやってくれた側圧を大きく変化させた高圧三軸破壊実験の結果として見ればいいでしょう。また、大滝ダムの地すべり地のコアは、塊状岩における巨大岩すべりにはおそらく共通の破壊現象と思われるものが見て取れます。

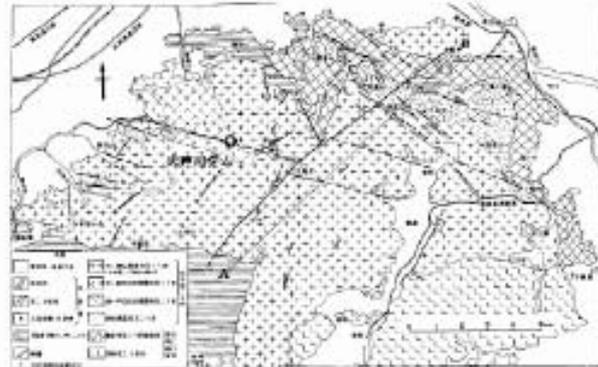
大戸川ダムでは、ダム基礎に熱水変質帯が幅 50～60m にわたって分布しており、現在ダムサイトを代えて下流側で座取りを検討中です。但し地質的には大変興味深いところで、岩盤の破壊現象とその後の熱水による劣化現象が重なった形が横坑で観察されます。当地でのテーマは、岩盤の深部変形破壊現象でブリットルな破壊ではないのもかかわらず、破壊部の平面的な連続性は大きく雁行することに注目してください。流体の通り道という目でも見て下さい。



大戸川ダム位置図



長野県南部における白堊紀～古第三紀火成岩類の分布
 (長野県博物館学芸調査報告第15号, 2001)



田上花崗岩体および周辺地域の地質
 (長野県花崗岩体研究グループ, 2000)

大戸川ダム周辺地質図

5. 第二期小委員会の活動の必要性と活動方針

今までに述べてきたように、日本応用地質学会では、平成13年度に「応用地質学における地下水問題研究小委員会」を立ち上げ、二つのワーキンググループ(WG)、すなわち「都市域の地下水上昇が地盤に与える影響(WG1)」と「割れ目系岩盤の地下水流れ(WG2)」での議論を中心として活動し、その成果を平成16年5月の総会後のシンポジウム並びに平成16年10月の研究発表会において公表してきた。ここでは、地下水流動系と、地質条件や割れ目系との関係の重要性が再認識されたが、最終目標としていた「都市域における地下水管理に向けた提言のとりまとめ」や、「割れ目系岩盤中の地下水流動に関する調査・解析の方法論の提案」などが、十分に達成できたとは言い難い面があった。

これらの課題の解決を目指すためには、これまでの研究小委員会をさらに発展させる形で、「応用地質学における地下水問題研究小委員会(第二期)」を立ち上げることが望ましいと考えている。となりました。

ここでは、第二期小委員会の活動方針を下記に示す。2つのWGで取り扱っている対象は異なるものの、地下水流動をグローバルに見たときとローカルに見たときの取り扱い方には、実はかなりの類似点がある。これがこの2つのWGを同じ委員会内に設置する理由である。以下、各WGの活動方針である。

WG1

第二期では、引き続き首都圏沖積低地下の地下水を対象にして、次のような活動を行うこととする。

- ①関東地下水盆規模の広域地下水流動系の実態について、既存の調査・研究成果(水位・水頭、水温・水質などの地下水流動の指標となるデータ)に基づいて、整理・検討する。
- ②これまでの被圧地下水の変動が地盤の圧密特性にどのような影響を与えたかについて既存の調査・研究成果の整理を行う。
- ③これまでの揚水量の変化と地下水位・水頭の変化の相関関係を、既存の調査・研究成果に基づいて、区市町村レベルで整理する。
- ④第一期の活動成果並びに上述の検討をもとに、地下水資源の保全・利用を含めた都市域における適切な地下水管理に向けた提言の取りまとめを行う。

WG2

日本のような様々な成因を有する地質条件に対して、「このようにすればよい」といった統一的な方法論は示すことは到底不可能である。しかし日本応用地質学会に属する技術者にとっては、地質条件を的確に把握することにより、割れ目系岩盤の地下水流動に対して、

あるいはダム基礎でいえばグラウトの配置などの対策法に対して、より合理的で経済的な方法を提案することが可能となる。したがって、様々な地質条件に対してこのような方法論が適用可能であることを示すために、より多くの解釈事例を増やしておくことが是非とも必要であり、これがWG2の第二期の活動方針である。最終的にはこれらの事例をまとめて、事例集を作成する。

第二期の活動としては、上述の活動の結果得られる研究成果を踏まえ、社会的なニーズに応える何らかのアクションをするところまで到達したいと考えている。具体的には、社会的な提言やマニュアル、事例集の作成といったところまでを目指したいと考えている。

6. 終わりに

本小委員会は、日本応用地質学会内部に設立された地下水関連の委員会として2つ目のものであった。最初に立ち上げられた「地下水変動研究小委員会」では、地下水に対する応用地質学的なものの見方のスペクトルの広さが認識され、小委員会参加者個人にとって有益な場であったことが報告書に記されている。本小委員会は、前小委員会の成果に基づき、より具体的な問題を抽出し、それに対する検討を実際に行うことにより、「応用地質学における地下水問題」の一つの考え方を構築することを目的としたものであった。本報告書に記されているように、WG1では、首都圏における地下水ポテンシャル回復に伴う構造物への影響が、地盤構造とそれに応じた構造物設計に依存している可能性が示され、また、WG2では、構造地質学的なアプローチを適用した水理地質構造評価の方法に関して、現実のデータを用いた検討が行なわれ、その適用性が示された。このように、本小委員会では、いくつかの興味深い成果が得られたことは確かであるが、それらを取りまとめ、学会員各位、また、社会に対して情報を発信するところまでたどり着くことができなかった。幸い、第二期小委員会の設立も実現することとなり、今後の新しい小委員会での活動を継続することにより、本小委員会の当初の目的である社会への還元を可能にすることを期待し、委員会報告書の結びとしたい。

地下水問題研究小委員会

回数	開催日	主な議題	
第1回	2001/10/23	委員自己紹介、委員会の活動方針、運営方法	
第2回	2001/12/11	研究紹介(長田委員)、WGの活動方針	
第3回	2002/2/5	WGの活動方針	
第4回	2002/4/24	研究紹介(あべ松委員)	
第5回	2002/5/29	研究紹介(平山委員、伊藤委員)	
第6回	2002/11/12	研究紹介(宮越氏、林氏)、現地検討会報告	
第7回	2003/1/23	研究紹介(長田委員)、WGの活動方針	
第8回	2003/4/23	研究紹介(岡本氏)、WG1とWG2の活動方針	
第9回	2003/6/25	研究紹介(竹内氏、三枝氏)	
第10回	2003/8/19	WGの活動報告・方針	
第11回	2003/12/19	WGの活動報告・方針、今後の運営方針	
第12回	2004/1/27	シンポジウムの準備	
第13回	2004/3/2	シンポジウムの準備	
第14回	2004/5/11	シンポジウムの準備	
第15回	2005/4/22	報告書作成方針、第二期委員会の活動方針	

地下水問題研究小委員会現地検討会

回数	開催日	見学場所	担当委員
第1回	2002/9/24～25	徳山ダム、根尾谷断層	奥田主査、川越委員
第2回	2003/11/17～18	広神ダム、ハッ場トンネル、ハッ場ダム	塩崎委員
第3回	2004/10/14～15	大滝ダム、大戸川ダム	奥田主査

地下水問題研究小委員会関連イベント

	開催日	イベント内容	
	2004/5/28	シンポジウム「地質スケールに応じた地下水流動問題とその応用地質学的アプローチ」	
	2004/10/28～29	平成16年度研究発表会 ポスターセッション	

地下水問題研究小委員会:研究紹介

回数	開催日	話題	話題提供者
①	2001/12/11	岩盤割れ目系の“水みち”の関係を考えるときのコンセプト	長田委員
②	2002/4/24	Hダム尾根部における亀裂性高透水岩脈の調査・評価事例	あべ松委員
③	2002/5/29	地下水に関わる情報について	平山委員
④	2002/5/29	不飽和帯の割れ目研究の事例について	伊藤委員
⑤	2002/11/12	地下温度分布からみた関東平野の地下水流動	宮越昭暢氏(千葉大)
⑥	2002/11/12	関東平野の地下水流動に関する地球化学的研究	林武司氏(千葉大)
⑦	2003/1/23	スウェーデン、スイスの地層処分関連施設の紹介と蒸発量測定の実験計画	長田委員
⑧	2003/4/23	岩盤地下石油備蓄事業における割れ目系岩盤内地下水流動の調査と評価	岡本明夫氏(日本地下石油備蓄株式会社)
⑨	2003/6/25	核燃料サイクル開発機構における岩盤割れ目系地下水流動に関する調査・モデル化に関する研究	竹内真司氏、三枝博光氏(核燃料サイクル開発機構)

第1回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2001年10月23日 15:35～18:00

場所：日本工営本社 3階B会議室

委員出席者：徳永朋祥、奥田英治、斎藤庸、石橋弘道、広瀬誠、三宅紀治、塩崎功、長田昌彦、佐々木崇二、あべ松保貴、川越健、川島眞一、木谷日出男、斎藤和春、細谷眞一、柳田三徳、糸賀浩之（森口安宏の代理）

- 議題：1. 委員自己紹介
2. 委員会の方針
3. WG 1、2の活動内容について
4. 具体的な作業の進め方について
5. フリーディスカッション
6. その他

配布資料：

1. 斎藤庸委員からの e-mail送付資料

議事

1. 委員自己紹介
 - ・各委員の自己紹介を行う。
 - ・委員の委嘱状は後日渡す。
 - ・名簿訂正・付加あり。
2. 委員会の方針
 - ・委員長から設立と趣旨等に関する説明が行われる。
 - ・小委員会は刺激的でおもしろい場になるように期待する。
3. WG 1、2の活動内容について
 - ・委員長からWG 1、2の活動内容の説明が行われる。
4. 具体的な作業の進め方についておよびフリーディスカッション
 - ・斎藤委員よりWG 1のこれまでの内容についてメール送付資料をもとにした説明がなされた。
 - ・目標として、①首都圏の地下水現状を整理し、そして②管理基準の案をまとめる。
 - ・対象は東京都、神奈川県、埼玉県とする。
 - ・地下水実態把握は対象スケールをローカルか広域か、対象深度はどうするかなどの意見が出されたが、地下水流動系を考えてやる。
 - ・地下水位上昇現象にこだわる必要はない。
 - ・応用地質学的な見方を考慮していつてはという意見もあった。

- ・埼玉の方を委員にということについては長田委員が適切な方を当てる。
 - ・奥田委員よりWG2のこれまでに出了された内容、考え方について述べられ、さらにOHP資料をもとにした具体的な現場の説明がなされた。
 - ・これまでのダム現場でのデータが集められたので、整理してワーキングにかけたい。
 - ・割れ目から地下水がでている事実データも求められる。
 - ・これまでの割れ目系の記載データでは十分でないので、今までのデータを検討してどうしていくかまとめる。
 - ・現状のダムでのキレツの記載からモデル化できないので、目標はモデル化するために必要なレベルのデータの取り方を示すことであり、それが何にでも適用できるものであるといえる。
 - ・今後のWGの日程はそれぞれの主査に任せる。
 - ・今後の委員会の進め方は事例紹介とディスカッションとする。
 - ・次回の話題提供は長田先生が行う。
5. その他
- ・次回の委員会は、12月11日 14:00 日本工営第一会議室。

第2回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2001年12月11日 14:00～17:00

場所：日本工営本社 3階第一会議室

委員出席者：徳永朋祥、斎藤庸、石橋弘道、広瀬誠、三宅紀治、長田昌彦、佐々木崇二、木谷日出男、斎藤和春、細谷真一、柳田三徳、森口安宏、松浦努、宮島吉雄

議題：1. 運営グループの決定

2. 長田委員の話題提供

3. WG 1、2の活動内容について

4. 技術講習会開催に関する現状と変更案の比較概念図の説明

5. その他

配布資料：

1. 長田委員のOHP資料

2. 木谷委員からの技術講習会開催に関する現状と変更案の比較概念図

議事

1. 運営グループの決定

- ・ 徳永委員長からの提案で、運営グループを作ることとなり、佐々木委員(WG1中心)と細谷委員(WG2中心)が担当することとなった。

2. 長田委員の話題提供

「岩盤割れ目系の“水みち”の関係を考えるときのコンセプト」というテーマで、約1時間の話題提供をいただいた。割れ目内部に“水みち”が存在するというコンセプトを提示され、これに関して坑道内の観察、室内試験などからその構造と形成過程を考察した結果を説明いただいた。

- ・ WG2の活動方針を考えたときに、以下のような議論がなされた。
- ・ 問題設定(ダムのような風化帯or深部岩盤、物性中心or流動系の中での位置付け)をどのように絞るか
- ・ ボーリングコアでどこまでわかるのか
- ・ “水みち”の定義とは

3. WG 1、2の活動内容について

- ・ WG2については、奥田主査、長田委員を中心に具体的な進め方を検討し、メールリストor次回の委員会で議論する。
- ・ WG1については、実態を知ることが最初に行うべきことである。
- ・ 斎藤主査が担当を整理して、検討できるデータor事例を提供していただく
- ・ 次回委員会において、三宅委員に背景を含めた問題の整理を行っていただく

- ・ 次回委員会において、柳田委員、佐々木委員に検討データの概要を説明していただく
4. 技術講習会開催に関する現状と変更案の比較概念図の説明
- ・ 木谷委員から、「技術講習会開催に関する現状と変更案の比較概念図」について、説明いただいた。学会の法人化に向けて、総務委員会、行事委員会との連携を強化し、研究小委員会を常設にするという案を説明いただいた。
5. その他
- ・ 次回の委員会は、2月5日 14:00 日本工営本社3階第一会議室。
 - ・ 話題提供は、三宅委員、柳田委員、佐々木委員
 - ・ 議題は、WG1,2の具体的な進め方

以上

第3回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2002年2月5日 14:00～17:30

場所：日本工営本社 3階第一会議室

委員出席者：大島学会長、徳永委員長、斎藤庸主査、石橋委員、広瀬委員、三宅委員、佐々木委員、斎藤和春委員、川越委員、松浦委員、柳田委員、長田委員、細谷委員

議題

1. WG-2の今後の進め方について
2. 地下水観測データの現状について

配布資料

1. 地下水問題研究委員会 W-2 資料
2. 首都圏の地下水位、地盤変動等観測資料
3. 地下水問題研究委員会 WG1 担当テーマ(案)

議事

1. WG2の活動方針について

配布資料1に基づいて、奥田主査作成の「今後のWG2活動方針」及び、1/17に実施したワーキングの議事内容を、細谷委員が説明し、長田委員、石橋委員に補足いただいた。これに対して以下のような議論がなされた。

- ・ 地質学的な観点から、記載方法を整理するという考え方に対して、“職人的”な方法ではなく、多くの人が記載・理解できるような方法でないと多くの人に受け入れてもらえないという意見が出された
- ・ 成果イメージとして、事例を集約する方向性、体系化する方向性、マニュアル化する方向性について、それぞれの長短について議論がされた。

これらを踏まえて、以下のような方針で作業を進める方向が示された。

- ・ 事例を具体的に検討することをはじめ
- ・ 対象を考えながら検討を行う
- ・ 地質データだけではなく、別の角度からの情報(たとえば、地下水観測データなど)も加えることが望ましい。

2. 地下水位、地盤沈下量のデータの現状について(WG1の活動内容)

配布資料2及びOHP資料に基づいて佐々木委員から、地下水位、地盤沈下量に関する観測データの現状(どの都県のデータが利用できるか)について説明いただいた。さらに、OHP資料に基づいて、柳田委員に補足いただいた。

両委員から紹介された「利用可能なデータ量」は、当面の作業を進める上で、十分であるとの発言がWG1の担当委員からあった。

3. WG1が対象とする問題の概観

WG1が取り扱う問題に関して、概観を三宅委員から説明いただいた。関東平野のポテンシャル分布を、深度100m以浅と以深に区分して揚水量との関係やその特徴を説明された。さらに、未解明な点を説明いただき、地質学的な考察の可能性や現在でも地下水位が上昇しているか否かについて、見解が分かれていることなどを紹介いただいた。

これに対して、以下のような議論があった。

- ・ ポテンシャル分布図に関して、いくつかの解釈が可能であるとの意見が出され、対象とするスケールを考えることが重要であるとの意見が示された。
- ・ ポテンシャル分布に関して、地質学的にはいろいろな解釈が考えられるので、その情報と合わせて検討することが重要であるとの意見が出された。

4. WG1の作業分担

資料3に基づいて、WG1の作業分担に関して斎藤主査から分担案の紹介をいただいた。これに対して、以下のような意見があった。

- ・ 首都圏の水文環境に関しては、平山委員とともに佐々木委員が情報を多くもたれているので、担当していただく
- ・ 地質情報については、徳永委員長、長田委員に担当していただく
- ・ 液状化の取り扱いについては、全体の中での構成を代えることも考えながら、作業を進める。

5. その他

- ・ 次回の委員会は、4月24日 14:00 日本工営本社 第一会議室
- ・ 話題提供は、平山委員、あべ松委員の予定
- ・ 議題は、WG2の活動内容、WG1の活動内容

以上

第4回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2002年4月24日 14:00～18:00

場所：日本工営本社 3階 B会議室

委員出席者：大島学会長、徳永委員長、斎藤庸主査、石橋委員、広瀬委員、佐々木委員、斎藤和春委員、松浦委員、長田委員、宮島委員、嶋田委員、あべ松委員、平山委員、細谷委員

議題

1. あべ松委員からのWG-2に関する話題提供（事例紹介）

*）当初予定されていた平山委員からの話題提供及びWG-1関係の議題は時間の都合によって、次回(5月29日)の順延することとなった。

配布資料

1. 地下水に関わる情報について（平山委員）
2. 平成14年4月24日応用地質学における地下水問題研究小委員会WG2資料(三宅委員)
3. WG1の担当テーマ、担当者など

*）配布資料はすべてWG-1に関する資料であり、今回の委員会では時間の都合で議論には用いなかった。

議事

1. あべ松委員からの話題提供について

あべ松委員から「Hダム尾根部における亀裂性高透水岩脈の調査・評価事例」と題して約2時間半の話題提供をいただいた。話題提供の概要をあべ松委員からの事前の案内メールを一部参照して以下に示す。

[話題提供概要]

Hダムの左岸取り付け山体は、長さ800m、幅200mの尾根状をなす。尾根の地質は古生代付加型堆積岩類から構成され、透水度的に（ダム貯水池周辺の遮水性能上）大きな問題はない。ただし、尾根の中央付近を斜めに横切る幅30mの石英斑岩岩脈が貫入しており、この岩脈が50ルジオン以上と極めて高い透水性を示す。

古生層・石英斑岩ともに岩盤状況は良好であり、地山の浸透破壊等については何ら懸念はないが、漏水が生じた場合の、1)下流の崖錐斜面の安定性への影響、2)漏水量が貯水池運用に与える影響、を検討し、遮水対策の要否を判断する必要性が生じた。

石英斑岩の透水性については、ダムの一般的な透水試験であるルジオンテストの摘要限界を超えており、別途の調査・評価手法が求められ、以下のような検討を行った。

- ・孔内水位の降雨応答に基づく透水性の推定

- ・段丘堆積物をはがしたトレンチ面での亀裂の詳細な観察・記載
- ・方解石の溶脱と開口幅に着目した各亀裂の水理的な重み付け
- ・単一(に近い)亀裂を対象とした、短区間での水理試験
- ・亀裂分布を考慮した透水テンソルの推定
- ・注水試験を利用した透水性の評価

話題の主な点は、おおよそ以下の通り、実務進捗に沿ったダイジェスト版のような構成として説明いただいた。

- ・一般的なダム地質調査でどこまでのことが言えるのか？言えないのか？
- ・割れ目系の調査手法と記載方法の一事例
- ・割れ目系調査だけで透水性評価を行う上での限界点（妥当性の不安）
- ・それを相互検証する水理試験のトライアルとその結果

この話題提供に対して、約1時間の議論を行った。いくつかの論点を以下に示す。

- ・ 降雨応答のようなマクロなデータでもっと議論ができるのではないだろうか（マクロに捉えるとポアラスと考えられることが多いので、目標に応じたスケール設定が重要というような意見もあった）
- ・ 成因をきちんと調べるのが地質屋の重要な仕事であって、これに工学的な情報を併せて議論すべきである
- ・ 通常は、河川流量など地上のデータに基づいて本話題提供の目的のような考察がなされるが、この話題提供は地下の情報を多く収集していることが興味深い

WG2の進め方に関しては、

- ・ 亀裂性岩盤を対象としたこのような事例は、コンパイルすることすらされていないので、集めることだけでも意義がある
- ・ もともとの考えが、色々なデータを持ち寄って議論をしようというのがこの委員会の趣旨である

という意見が出され、次回以降も話題提供や見学会を材料に、個別の事例に基づいて議論すべきという意見が多かった。

2. その他

- ・ 次回の委員会は、5月29日 14:00から 日本工営本社 3B会議室
- ・ 話題提供は、平山委員の予定
- ・ 委員長から、秋の応用地質学会の発表の締め切りが5月24日となっているので、本委員会関係でも、今までの話題提供などをまとめて発表して欲しいとのコメントがあった。

以上

第5回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2002年5月29日 14:00～18:00

場所：日本工営本社 3階 B会議室

委員出席者：徳永委員長、斎藤庸主査、奥田主査、三宅委員、平山委員、広瀬委員、嶋田委員、横山委員、宮島委員、塩崎委員、川越委員、柳田委員、森口委員、斎藤和春委員、松浦委員、長田委員、伊藤委員、あべ松委員

議題

1. 第4回委員会議事録（案）（メールで送付済み）確認
2. 嶋田委員からオーストラリアの国際水文地質学会報告（嶋田委員）
3. 地下水に関わる情報について ー話題提供ー （平山委員）
4. 地下水に関する文献の紹介（三宅委員）
5. 不飽和帯の割れ目研究の事例について（伊藤委員）

配布資料

1. オーストラリアの国際水文地質学会講演要旨抜粋（嶋田委員）
2. 地下水に関わる情報について ー話題提供資料ー （平山委員）
3. 2002年度日本水文地質学会学術大会・総会プログラム（三宅委員）
4. 地下水関連文献一覧（三宅委員）

議事

1. 第3回委員会議事録（案）（メールで送付済み）確認について
内容について問題があれば細谷委員まで連絡する。
2. 嶋田委員からの学会報告について
嶋田委員から、オーストラリア、ダーウィンにて今年5月14～17日に開催された「国際水文地質学会」で発表された内容について概要報告を頂いた。

【概要報告概要】

●中国：華北平原

- ・地下水のくみ上げによって1992年までの約30年間で40m位の地下水低下が生じ、地下水面が海拔ゼロメートル以下となる地域が相当内陸まで分布するに至っている。
- ・黄河からの取水は、伏流～断流の影響で年間200日はできない状況である。
- ・水位低下を生じている箇所の地下水は、C¹⁴によれば1～3万年の年代を示し、同位体比で見ても寒冷期（氷期）にかん養されたものと考えられる。

●関東平野

- ・1970年代に大量の地下水開発により低下し、その後の対策で90年代に回復してい

る。

- ・地下水回復がすべて利益をもたらしたわけではなく、地下構造物等への悪影響も同時に生じている例がある。

● 華北平原における対策について

- ・関東平野では、気候的（年間降雨量 1,400mm）に 2～3mm/日程度の地下水かん養力があり、対策後 20 年くらいで回復している。一方、華北平原では気候的（年間降水量は 600mm）に地下水かん養力は低いと考えられ、対策を行っても容易には水位は回復しないであろう。
- ・考えられる対策は、ソフト対策，規制，代替水源があり、現在、南方の揚子江からの導水事業が着工されている。それでも（地下水くみ上げへの依存を大幅に緩和するには）量的に不十分と見られている。
- ・アメリカ、カンザス州では、**Balance of Groundwater** という考えがあるが、他に問題を生じたり、実現性に乏しい内容のものもある。
- ・学術的な検討を学会～行政が行い、判断材料を地域住民に提供し、住民が決定権を持つという考え方がある。

3. 平山委員からの話題提供について

平山委員から「地下水に関わる情報について」と題して、地下水データを収集・利用する上でのデータの種別・形態・所轄管理・入手の難易等について話題提供をいただいた。

[話題提供概要]

● 「地下水マップ」とは？

- ・地下水情報は深度 30m 以上の深井戸のデータを中心にまとめられている。
- ・国土交通省都市局が刊行し、官公庁・研究機関等へ無償配布してきた。「伊勢湾」，「新潟」，「筑後・佐賀」，「静岡」，「埼玉・群馬」，「富山」，「茨城・栃木」，「石川」，「千葉・東京・神奈川」，「近畿」の 10 地域がある。今後増発予定はない。
- ・地下水マップの内容は、水文地質区分，主要地層の等高線，観測井位置，湧出量分布，深井戸分布，水頭平面図，水質，塩水化，利用量，気象などを含んでいる。

● 情報基盤整備について

- ・e-Japan 戦略として、行政の情報化，公共分野の情報技術など（河川 GIS など）の動きがある。

● 地下水に関する情報ソース

以下のような情報ソースがある。

- ・法律に基づく調査：国土調査法(S.26) 地下水，水系，土地分類，地籍
：水質汚濁防止法

：統計法

・公開情報：地図情報（国土地理院）、地下水情報（各自治体が調査）、地下水質情報（水質年表）、井戸・地下水利用情報、地下水障害情報、全国地盤環境データ

[この話題提供に対する議論]

- ・地下水マップの元データは何か？マップには「説明書」が添付されているが、この説明書からスタートしても、生データまで遡れない種類のデータが多いと見られる。
- ・地下水データに関しては、孫引き収集ではどこかで行き詰まる可能性はある。特に農業関係の「利用量」については守秘義務等の関係で個別データまでさかのぼれない可能性が高い。工業関係も企業ごとの利用量まで遡るのは難しいかもしれない。
- ・地形・地質情報については埼玉を含む首都圏であれば、収集可能な範囲のデータでも、精度的、量的には充分と考えて良いのではないか。
- ・地盤沈下データは都道府県レベルでとりまとめられたものはほぼ公開されている。
- ・学会として研究する立場を考えると、はじめから完全公開データに限る必要はない。
- ・公開データは印刷物というケースが多く、利用しづらい。元データは電子化されているものが多いと考えられるため、電子化されたものを収集するのは不可能ではない。
- ・「地下水マップ」に関しては、徳永委員長、長田委員が学会名で資料入手に動く。
- ・電子化されたデータが入手できた場合は、埼玉大学資料センターに委員会で利用可能なデータベースとして設置できるよう、長田委員に調査していただく。
- ・収集対象データのリストを平山委員に作成いただき、ML上に配信いただく。

4. 三宅委員からの文献紹介について

三宅委員から、WG1に関して、「1990年前後の地下水ポテンシャル～沈下に関連するもの」、「東京都土木技術研報告」をはじめとした文献紹介を頂いた。

[この文献紹介に対する議論]

- ・こういった文献をレビューすることで、前段の部分はかなり整理できる。
- ・文献ではポテンシャルのみの基づいた議論が多いが、帯水層や同位体を含む流動系としての総合的検討が必要。
- ・地下水盆を（基盤岩を含む）構造盆地としてとらえる立場からは、深度方向についての大局的な地質情報について、地質専門の研究者の方に紹介頂くことは重要と考える。適任の研究者を調査し、委員会での講演を依頼する方向で考える。

5. 伊藤委員からの研究事例紹介について

伊藤委員から、「不飽和帯の割れ目研究の事例について」と題して、事例紹介を頂いた。

[事例紹介概要]

- ・使用済核燃料地層処分場の正式サイトとなっている、アメリカ：ネバダ州ユッカマ

ウンテンにおける研究で、不飽和帯の亀裂～基質浸透性の岩盤に対するブロック試験～浸透シミュレーションの事例。

- ・サイトの地質は溶結・非溶結の凝灰岩で、貯蔵坑は溶結部。計画地点は地表下 200～425m、地下水面上 175～365m にある。計画地点は不飽和帯(60～90%の飽和度)。
- ・基質の空隙率は 10%前後と大きい、透水係数(飽和)は 10^{-7} ～ 10^{-9} cm/sec と小さい。
- ・水の移動は割れ目、基質の両者を考えたモデルとしている。
- ・割れ目は、Active fracture model として、選択的に見ずを通す割れ目とそうでない割れ目を区別している。
- ・割れ目と基質間の水の移動は、割れ目内で水の占める面積を設定し、その部分でのみ基質との移動が行われるものとしている。
- ・シミュレーションは、1m 角のサンプルを基準モデルとし、様々な条件で水を加えた場合のブロック内の移動を解析している。解析には TOUGH2 というソフトを使用。

[この事例紹介に対する議論]

- ・水の移動量が少ない条件の解析では、大部分が基質中に入ってしまう。直感的には不自然であるが、理論上は起こり得る。
- ・このサイトは不飽和領域が 400m と深く、気候も乾燥しており蒸発が浸透を上回っている。不飽和領域を研究するそもそもの動機は？
- ・溶結凝灰岩は開口割れ目を含んでいるのではないか？選択的に水を通る割れ目と、そうでない割れ目をどのように区別したのか？

6. 学会の法人化について

奥田主査(WG2)から、学会の法人化と、それに伴う研究資金の調達等について発議された。

- ・応用地質学会が法人化した場合、この委員会をもっとアピールする必要がある。
- ・今回の活動の中、あるいは延長上として、都市の地下水変動をシミュレーションまで実施し、将来予測してアクセクタブル・レベル(揚水量の規制緩和の程度)を提言する活動を行えば良いのではないか。
- ・ファンドを取ってやっていくべきであろう。法人化することによって可能になる。

7. 現地見学会について

奥田主査(WG2)から、徳山ダムが河床の基礎掘削が終わり、ちょうど見学に最適との提案があり、7月初旬ということで調整を開始することとされた。

3. その他

- . 次回の委員会は、7月26日 14:00 から 日本工営本社 3B 会議室とするが、現場見学会と近いことから、現場見学会時に変更も念頭において再度調整する。
- . 次回は WG2 の活動を主体とした委員会とする。
- . 話題提供は、現場見学会時に検討・決定する。

以上

第6回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2002年11月12日 14:00～18:00

場所：日本工営本社 3階会議室

委員出席者：徳永委員長、斎藤庸主査、奥田主査、広瀬委員、佐々木委員、長田委員、嶋田委員、平山委員、川越委員、柳田委員、川島委員、塩崎委員、三宅委員、横山委員、細谷委員、宮越昭暢氏(千葉大)、林武司氏(千葉大)

議題

1. 徳山ダム見学会報告
2. 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動(宮越昭暢氏(千葉大))
3. 関東平野の地下水流動に関する地球化学的研究(林武司氏(千葉大))

配布資料

1. 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動(宮越昭暢氏(千葉大))：講演資料
2. 関東平野の地下水流動に関する地球化学的研究(林武司氏(千葉大))：講演資料

議事

1. 徳山ダム見学会報告

WG2の奥田主査から、9/24～25に実施した徳山ダム見学会の報告および別のダムの事例を紹介いただいた。

徳山ダムでは、団子状のルジオンマップから盲目的にグラウチング計画を行うのではなく、地質学的考察、水理試験結果などを総合して水理地質構造を把握した後に適切なグラウチング計画を行うべきである、という見識に基づいた説明をされた。

また、別の事例でも、割れ目系の分類、地質学的な考察を踏まえて水理地質構造を把握することの重要性を述べられた。

2. 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動(宮越昭暢氏(千葉大))

千葉大学の宮越昭暢氏から、標記のテーマについて講演いただいた。涵養域と流出域の温度分布の特徴を理論及び小規模な事例に基づき紹介された後に、関東平野の地盤沈下観測井で測定した温度分布およびそれから推定される流動系について説明された。その結果、埼玉県北東部において相対的に温度が高く、流出域になっているという結論が示された。その理由については、揚水による可能性と自然状態において流出域となる可能性があると考えられ、議論が交わされた。また、地表面温度変化の影響についても、研究結果を紹介された。

3. 関東平野の地下水流動に関する地球化学的研究(林武司氏(千葉大))

千葉大学の林武司氏から、標記のテーマについて講演いただいた。水質組成と酸素・水素同位体比を利用する特徴を説明された後、関東平野の地盤沈下観測井で採取した地下水の分析結果およびそれから推定される地下水流動について説明された。特に酸素同位体比に着目すると、地域間でその特徴が明瞭になり、平野中央部で小さく、霞ヶ浦周辺で大きくなる傾向が示された。この解釈について、地下水の押し出し、涵養域の違いなど様々な議論が交わされた。特に、 ^{14}C による年代測定が重要ではないかという意見が述べられた。

2の講演と併せて、特にWG1関係者からは、非常に有益な研究であるとの意見が述べられた。

4. その他

- ・ 次回の委員会は、1月23日(木) 14:00から 日本工営本社 会議室
- ・ WG1については、三宅委員から土木学会関西支部の研究報告
- ・ WG2については、長田委員からヨーロッパの放射性廃棄物研究事例の報告

以上

第7回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2003年1月23日 14:00～18:00

場所：日本工営本社 3階会議室

委員出席者：徳永委員長、斎藤庸主査、奥田主査、広瀬委員、佐々木委員、長田委員、柳田委員、塩崎委員、三宅委員、齋藤和春委員、細谷委員、宮越昭暢氏(千葉大)、林武司氏(千葉大)

議題

1. WG1 及び WG2 の成果イメージと活動方針
2. スウェーデン、スイスの地層処分関連施設の紹介と蒸発量測定の実験計画（長田委員）
3. 地下水制御が地盤環境に及ぼす影響の内容紹介（三宅委員）

配布資料

1. 2003年度 多摩川およびその流域の環境浄化に関する調査・試験研究助成金交付要望申請書（徳永委員長）
2. 東京都土木技研年報からの抜粋（データ取得位置について）（広瀬委員）

議事

1. WG1 及び WG2 の成果イメージと活動方針

WG1 については、徳永委員長から研究助成金を申請したとの報告があった。また、広瀬委員から東京都土木研究所年報の資料を収集したとの報告があった。これについては、佐々木委員から提供いただいた資料と合わせて、斎藤主査の方でとりまとめを行う。また、今後の作業は、斎藤主査から分担案を発信していただき、これを叩き台として、作業を進めることとした。

WG2 については、奥田主査から飽和領域の事例を調査したいとの意見があり、石油備蓄、処分関係などから話題提供者を探すこととして、細谷委員から適切な事例及び話題提供者の募集を発信することとした。事例については、公表できるかどうかの問題は徐々に調整を進めることとして、委員会では勉強会風の実態を提供していただくことで、割れ目岩盤の地下水流動を把握するための共通する考え方、見方を考えてゆくという方針とした。

2. スウェーデン、スイスの地層処分関連施設の紹介と蒸発量測定の実験計画（長田委員）

長田委員が昨年夏～秋にスウェーデン、スイスの放射性廃棄物処分関連施設に見学に行ったときの写真などが紹介された。

スウェーデンでは、高レベル放射性廃棄物の最終処分のために2ヶ所でサイト調査が

行われており、これらの状況が写真で説明された。紹介されたコア写真によると、結晶質な岩盤であるにもかかわらず、割れ目は少ない点の特徴である。スイスではモンテリの地下実験場及びそこでの試験状況を写真で御説明いただいた。特に、EDZ（掘削影響領域）における透水性の変化を把握するために、孔内において蒸発量を測定することによって透水性を把握する装置と実験計画が紹介された。対象とする岩盤（オパリナスクレー）の透水係数は $10^{-13}(\text{m/s})$ のオーダーであるとされている一方、水を付けるとスレーキングしてしまうため、通常の透水試験が不可能であり、蒸発量測定を利用することを考えているとのことであった。

3. 「地下水制御が地盤環境に及ぼす影響」の内容紹介（三宅委員）

WG1の活動方針と似た趣旨の「地下水制御が地盤環境に及ぼす影響」という土木学会関西支部の委員会（京大岡委員長）の報告書について、三宅委員から説明いただいた。報告書では、大阪地域について高地下水位による地下構造物や地盤環境への悪影響（特に、液状化を考慮）を回避するために、地下水位及び沈下のデータ整理、地下水利用の現況と法制度の整理、再び地下水位を下げたときの圧密沈下量の見積もり、地下水位低下シミュレーション、地下水制御が社会環境に与える影響について検討している。そして、最終的には、沈下量のある管理値に設定した場合の、許容される地下水位低下量を求めて、提言している。

この報告書については、提言まで行っているところが有意義であるとの評価が高い一方、WG1ではより適切な検討を含んだものになりたいとの意見があった。また、地下水位上昇に伴って設計の考え方も変わってきており、このような考え方を学会としてアピールしてはどうか、という意見も出された。大阪地域に比べると、関東はデータがより充実しており、これを利用して地下水管理に向けた提言を行いたいという意見に集約された。

4. その他

- ・ 次回の委員会は、4月23日(水) 14:00から 日本工営本社 会議室

以上

第8回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2003年4月23日(水) 14:00～18:00

場所：スクワール麹町 5階会議室(栄の間)(千代田区麹町6-6)

委員出席者：徳永委員長、広瀬委員、佐々木委員、長田委員、柳田委員、塩崎委員、三宅委員、平山委員、横山委員、木谷委員、細谷委員、宮越氏(千葉大)、林氏(千葉大)、梶野尚之氏(東京大)、岡本明夫氏

議題

1. 話題提供

岩盤地下石油備蓄事業における割れ目系岩盤内地下水流動の調査と評価

(日本地下石油備蓄株式会社 岡本明夫様)

2. WG1の活動方針(徳永委員長)

3. WG2の活動方針(徳永委員長)

配布資料

1. 岡本氏 講演内容レジュメ

議事

1. 話題提供「岩盤地下石油備蓄事業における割れ目系岩盤内地下水流動の調査と評価」

岡本明夫氏(日本地下石油備蓄株式会社)から、標記の内容で話題提供をいただいた。はじめに、OHPを用いて岩盤タンクの概要に関する説明を、次に断層、亀裂と地下水の関係について7つの事例を紹介していただいた。

岩盤タンクは、久慈、菊間、串木野の深度100～200m(天端標高-20～-35m)に位置しており、高さが22～30m、幅が18～20.5mに及ぶトンネル状の空洞である。地下水面を空洞天端よりも20m程度高い位置に維持することによって、内部の石油の漏出を防ぐ水封方式による備蓄方式を取っており、すでに稼動している。運用中はもちろん建設中にも地下水位が一定レベルよりも低下してはいけないという条件下で施工されており、この点での水みちの調査、対策の事例、重要性が述べられた。なお、建設中に地下水位が低下してはいけない理由は、一度不飽和状態となった岩盤を完全に飽和状態に戻すことが困難だという理由による。

断層、亀裂と地下水の関係については、湧水量が長期的に減少する計測データや、隣接坑道の掘削によって周辺の地下水がほぼ抜けてしまった事例、掘削前に先進ボーリングを行ってプレグラウトを行う必要性、周辺の鉱山における揚水によって不飽和領域が広がった事例などが紹介され、議論が交わされた。

2. WG1の活動方針

徳永委員長（および三宅委員）から、今後の作業の進め方について、サイスミックやシーケンス層序学的な考え方を取り入れた地質構造の解釈を行い、これを踏まえてポテンシャル分布を見直す方針案が示された。

これに対して、以下のような議論がなされた。（→の後は、議論後のコンセンサス）

- ・ 徳永案では、検討できるスケールが限られることが気になる。より大きな関東平野全域を考えることも重要ではないか。→まずは、限定的なスケールでも、データが集められる領域を対象として作業を進める。
- ・ 地下水流動モデルを作ることを目的としたいという意見もある。→必ずしも、それを目的とする必要性はない。
- ・ アウトプットとして、地下水位管理の手法や適正值を出すという考えもあったが、そのような以前の路線とは路線変更したのか。→路線変更ではなく、目玉としてやるべきことを明確にした。

基本的には、徳永案に基づいて作業を進めることとし、①地質及び水理地質構造把握（徳永委員長）、②水循環系からのアプローチ（斉藤主査）、③地下水変動に伴う地盤変形の評価（三宅委員）、に分かれてサブグループで作業を進めることとした。（カッコ内はサブグループのチーフ案）

3. WG2の活動方針

徳永委員長から、2004年5月の応用地質学会シンポジウムで割れ目系岩盤の地下水流動に関するシンポジウムを開催することを目標として、作業を進めるという方針の提案があった。ここでは、地下石油備蓄関係者や核燃料サイクル機構、電力中央研究所、埼玉大学などにも参加いただくことを考えるとともに、学会ではダムを中心として、現地において割れ目系に関して計測すべき点・注目すべき地質構造等に関する整理を行い、水理地質構造として計測・観測を整理するための方向性（案）を提示することを目標とする。この目標を達成するために、ダムの地質調査結果に関して具体的なデータ整理を行うためのサブワーキングチームを作り、作業を行う。

これに対して、反対意見は示されなかったが、WG2主査の奥田委員が欠席されたため、次回の委員会までに奥田主査を交えて上記の方針の議論を固め、具体的な作業に入ることにした。

4. その他

次回の委員会は、6月25日(水) 14:00から 日本工営本社 会議室で予定する。

議題は以下のとおり。

- 1) 話題提供 核燃料サイクル機構の方を予定（WG2に関連）
- 2) WG1に関して、三宅委員からポテンシャル分布に関する状況説明

- 及び 検討状況の報告
- 3) WG2 に関して、作業方針と検討状況の報告

以上

第9回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2003年6月25日(水) 14:00～19:20

場所：日本工営（株） 半蔵門オフィス9F会議室

委員出席者：徳永委員長、斉藤主査、広瀬委員、長田委員、柳田委員、塩崎委員、三宅委員、石橋委員、川越委員、森口委員、細谷委員、竹内真司氏（核燃料サイクル開発機構）、三枝博光氏（核燃料サイクル開発機構）、梶野尚之氏（東京大）、芝田氏（埼玉大）、石原氏（日本工営）、田中氏（日本工営）

議題

1. 話題提供

核燃料サイクル開発機構における岩盤割れ目系地下水流動に関する調査・モデル化に関する研究（核燃料サイクル開発機構 竹内真司様、三枝博光様）

2. WG1の活動方針と活動状況

3. WG2の活動方針と活動状況

4. 現地見学会について

5. 応用地質学会から一般への発信について

*）1の話題提供及びそれに関する議論を19時前まで行ったため、2以降については概要の報告とし、決定事項を含む議題については次回の委員会で決定することとした。

配布資料

1. WG1 作業分担案（斉藤主査）

2. WG1 地下水管理に関わる圧密沈下の課題について（三宅委員）

3. ダム現場見学会メモ（塩崎委員）

議事内容

1. 話題提供「核燃料サイクル開発機構における岩盤割れ目系地下水流動に関する調査・モデル化に関する研究」

竹内真司氏からは調査関連について、三枝博光氏からはモデル化・解析関連について紹介いただいた。話題提供内容のメニューの概要は以下のとおり。

- ・ 調査・モデル化のスケールの区分と考え方
- ・ 体系的な調査の考え方とデータフローダイアグラムによる繰り返しアプローチの紹介
- ・ 水みちを把握するための流体検層（特に、電気伝導度検層）
- ・ 単孔式透水試験方法と結果の例
- ・ 孔間透水試験方法と断層の遮水性についての評価事例

- ・ 長期間隙水圧モニタリングと測定事例
- ・ 広域スケールの地下水流動のモデル領域を決めるための感度解析
- ・ ローカルスケールの地下水流動（移行時間、移行経路）の不確実性を評価するための複数のコードによる比較検討

これらについて、以下のような議論がなされた。

- ・ 繰り返しアプローチに、地質学的な情報をどのように取り込むべきか
- ・ 広域スケールの地下水流動モデルにおける地表面の境界条件の与え方と、それを推定する考え方について
- ・ 物質移行を表現するパラメータである有効空隙率とトレーサー試験について
- ・ 全体を通じて、地質屋の役割をどのように求めるべきか

2. WG1 の活動方針と活動状況

WG1 については、斉藤主査の作業分担案について、以下のように進める方針として、調整を行うこととした。

- ①地質及び水理地質構造把握（徳永委員長）
 - ②水循環系からのアプローチ（斉藤主査）
 - ③地下水変動に伴う地盤変形の評価（三宅委員）
 - ④構造物（建設工事）と地下水（廣瀬委員・川越委員）
- （カッコ内はサブグループのチーフ案）

3. WG2 の活動方針と活動状況

WG2 については、サブワーキングを 5/7、6/11 に開催した旨の報告が長田委員からあった。

4. 現地見学会について

現地見学会については、塩崎委員からハザマで施工している広神ダム、滝川ダムについての紹介があった。秋に見学会を行うのであれば、10 月末に基礎岩盤掘削が終了予定の広神ダムがより適切であるとの意見が出された。奥田主査に両ダムの地質的な背景を調べていただき、次回の委員会で決定することとした。

5. 応用地質学会から一般への発信について

10/16～17 に札幌で行われる研究発表会のときに、講習会あるいはもっと簡単な集会を開催して、応用地質学会から一般市民への発信を行ってはどうか、という提案が徳永委員長、石橋委員から出された。この件については、次回の委員会で決定することとした。

6. その他

次回の委員会は、8月19日(火) 14:00 から 日本工営本社 第一会議室
議題は以下のとおり。

- 1) WG1 の活動状況
- 2) WG2 の活動状況
- 3) 現地見学会について
- 4) 応用地質学会から一般への発信について

以上

第 10 回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2003 年 8 月 19 日(水) 14:00～17:20

場所：日本工営（株） 本社第一会議室

委員出席者：大島会長、徳永委員長、斉藤主査、広瀬委員、長田委員、柳田委員、塩崎委員、三宅委員、細谷委員

議題

1. WG1 の活動方針と活動状況
2. WG2 の活動方針と活動状況
3. 現地見学会について
4. 応用地質学会から一般への発信について
5. その他

配布資料

1. 地質文献リスト+メール（林氏（千葉大））
2. WG 1 地下水管理に関わる圧密沈下の課題について（三宅委員）
3. 銀座構想打ち合わせ概要記録（案）（斉藤主査）
4. ダム現場見学会メモ（塩崎委員）
5. WG 2 議事録（案）他（長田委員）

議事内容

1. WG1 の活動方針と活動状況

WG1 については、4つのグループに分かれて作業を進めることとしているので、それぞれのチーフから状況を報告していただいた。

①地質及び水理地質構造把握（徳永委員長）

林氏（千葉大）から文献リスト（資料-1）をいただいた。まずは、これらについて検討を行う予定としている。この他にも、有効な資料があれば、紹介いただきたい。

②水循環系からのアプローチ（斉藤主査）

特に、新たに報告すべき事項はない

③地下水変動に伴う地盤変形の評価（三宅委員）

三宅委員から資料-2に基づいて作業方針を説明いただいた。入手可能なデータから、地下水位の変動と圧密・リバウンドの関係をどこまで論理的に説明できるか、が課題であることが述べられた。これについて、エリアを絞り込んで検討する方針と、間隙水圧の静水圧分布とのずれを利用して検討する方針が示された。

揚水規制を行ってきた経緯があるので、地下水位の回復に伴う問題を回避するため

に適度な揚水を行うべき、というメッセージには抵抗感もあると思われる（特に行政サイドから）。このような状況に対して、問題提起をすることを目標としたい、との方針が述べられた。

④ 構造物（建設工事）と地下水（廣瀬委員）

建設工事の事例としては、現状では、上野駅、東京駅の事例がある。この他にあれば、紹介していただきたい。

この他に、銀座を対象に地下水を親水公園やヒートアイランド対策として利用する構想「銀座構想」（資料－４）について、斉藤主査から紹介があった。これは、基本的には学会外の活動として、資金提供いただくことを目標に提案するものであるが、技術的な側面において、本委員会を対象としている事項と関連するため、紹介いただいた。

WG1 については、次回の委員会までに、サブワーキングを開催して、「具体的に何をやるか」を詰めておき、できれば作業を始めることとした。サブワーキングの具体的な日時などについては、斉藤主査の方で調整していただきこととした。

2. WG2 の活動方針と活動状況

WG2 については、長田委員から以下の状況を報告していただいた。（資料－４ 参照）

- ・ サブワーキングを 5/7、6/11、7/23 に開催し、具体的な検討を始めている。
- ・ 奥田主査が示している仮説を具体例を通じて検証することを方針として、作業を行っている
- ・ 具体的には、K ダムについて、地質観察マップと一次孔のルジオンマップを同じ図面上に描いて、関係を考察する作業を行っている。
- ・ 次回のサブワーキングを 9/3(水) 18 時 アイドールエンジニアリングにて、行う予定としている。

これらの報告について、以下のような議論がされた。

- ・ 水理地質構造を的確に把握することによって、効率的な（狭い範囲の）グラウチングが可能になる、というような工学的メリットを提示できる形でまとめてはどうか。
- ・ 個別の地質条件を前提として水理地質構造解釈の事例を整理することを最低の目標とするが、大胆な一般化を行って手法の提案を行うべきだ、という意見があった。
- ・ ダムを対象とした検討だけではなく、広域流動系に発展させてほしい、という意見も出された。これについては、次の段階（来年のシンポジウムを含めて）で議論することとしている。
- ・ 来年のシンポジウムの可否を判断するためには、そろそろデータを公開できるかどうかを検討する必要がある、という意見が出された。

3. 現地見学会について

現地見学会は、塩崎委員から提案いただいた広神ダム（新潟県北魚沼郡広神村：資料－5）を見学地とすることとした。日程は、11/17～19のうち1泊2日として、具体的な行程案を塩崎委員に作成していただくこととした。

また、合わせて群馬県のTBM鉄道トンネル and/or 鍋立山を見学候補地として、塩崎委員に関係者と調整を行っていただくこととした。

広神ダムの地質情報については、アイ・エヌ・エーに徳永委員長から依頼することとし、9/3のWG2にアイ・エヌ・エー担当者に参加いただき、次回（10月ごろ）のWGで紹介していただくこととした。この事前検討会については、全委員に案内を発信することとした。

4. 応用地質学会から一般への発信について

10/16～17に札幌で行われる研究発表会のときに、応用地質学会から一般市民への発信を行ってはどうか、という提案については、現地（札幌）での支援者の協力が得られず、今回は断念することとした。

5. その他

次回は、11/17～19の現地見学会時に、お互いのWGの進捗を確認することとした。さらに、次々回を以下のように仮予定した。

12月5日(金) 14:00から 日本工営本社
議題は以下のとおり。

- 5) WG1の活動状況
- 6) WG2の活動状況

以上

第 11 回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2003 年 12 月 19 日 14:00～17:00

場所：弘済会館 梅西

委員出席者：徳永委員長、広瀬委員、塩崎委員、川越委員、細谷委員、斎藤庸主査、柳田委員

議題

1. 前回委員会議事録確認
2. WG2 の活動状況報告
3. WG1 のうち、「建設工事、地下構造物と地下水」に関する活動状況報告
4. 春のシンポジウム、秋の学会、小委員会報告書、学会誌特集号に関して

配布資料

1. 平成 15 年度第 5 回地下水問題検討小委員会(12 月 19 日)議題 (徳永委員長)
2. 地下水問題研究小委員会 WG1 「建設工事、地下構造物と地下水」SWG 第 1 回議事録 (案) ほか (徳永委員長)
3. 第 10 回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録 (案) (細谷委員)
4. WG2 の活動状況 (細谷委員)

議事

2. 第 10 回委員会議事録 (案) (メールで送付済み) 確認について
内容について修正などがあれば細谷委員まで連絡する。
2. WG2 の活動状況報告 (細谷委員)
WG2 では、5 月以降 6 回の検討会(WG)を開催して、特に K ダムの水理地質構造について作業を進めている状況が報告された。
3. WG1 の、「建設工事、地下構造物と地下水」に関する活動状況報告 (川越委員、廣瀬委員)
WG1 の「建設工事、地下構造物と地下水」の Sub-WG では、10/6 に検討会を開催し、まとめの方向性と事例の収集分担を議論したことが報告された。
事例を収集して、被害箇所を地形・地質的な特徴を表現した 2 もしくは 3 次元マッピングをしてはどうか、というアイデアが示された。
まとめを行うにあたって、事例をどの程度細かく記述するかは小委員会のまとめの方針に依存するため、小委員会のまとめの方針を先に決めるべきという意見が出された。

「建設工事、地下構造物と地下水」の Sub-WG と WG1 のその他の SWG の連携について、「建設工事、地下構造物と地下水」の Sub-WG がメッセージを示しやすいようにまとめて欲しいという意見が出された。また、WG1 内部のストーリーの再確認と作業分担（作業量）の見直しが必要であるという意見が出された。

4. 春のシンポジウム、秋の学会、小委員会報告書、学会誌特集号に関して

WG1 及び WG2 の活動状況報告と並行しながら、標記まとめの方針を議論した。その結果、表-1 のような方針（案）を作成した。1月に次回の小委員会を開催して、表-1 の方針（案）について議論するとともに、まとめの方針を確定することとした。

表-1 小委員会のまとめの方針（案）

方針(案)		2004年											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
シンポジウム	WG1と2ともに発表を行う。特別講演は、立場を異にする(例えば、理学系と工学系)2人の講師に依頼する。	タイトル → 原稿 開催 ↓ (点線) 申込 → 原稿 → 開催											
研究発表会(新潟)	委員会報告+数件の成果発表をポスターで行う。	申込 → 原稿 → 開催											
「応用地質」特集号	2005/2の特集号は時間的に厳しいので、4ヶ月後の号に成果を発表する。これを報告書に代える。	申込 → 原稿											

*) 点線は成果が完成してゆく流れを示す。

5. その他

次回は、1月26日(月) or 27日(火) or 28日(水)の17:30頃から開催する予定として、各委員のご都合をメールで確認した後に決定することとした。

議題は、小委員会のまとめの方針及び各WGのまとめのストーリーについて

以上

第 12 回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2004 年 1 月 27 日 17:30～20:30

場所：東京大学工学部 4 号館

委員出席者：徳永委員長、斉藤主査、奥田主査、三宅委員、廣瀬委員、川越委員、平山委員、嶋田委員、長田委員、木谷委員、細谷委員

配布資料

1. 第 12 回応用地質学における地下水問題研究小委員会一議題、議事録等一（徳永委員長）
2. 小委員会設立趣意書、メンバー（斉藤主査）

議事内容

1. 今後の方針について

今後のスケジュールについて、以下の方針を確認した。

- ・ 総会時のシンポジウム（5 月）で、問題提起、活動状況の報告を行い、参加者と議論を行う。
- ・ 研究発表会（11 月）で、活動状況を報告し、参加者と議論する。
- ・ 学会誌に成果を報告し、報告書は作成しない。

学会誌への発表については、以下の方針とする。

来年 2 月の特集号（テーマ：地下水）では、委員長、WG の主査で原稿を作成し、何らかの報告を行う。（この原稿の締め切りは今年 8 月末の予定）

最終的な成果報告については、今年末に原稿を編集委員会に提出し、ある号に集中して掲載されるように依頼する。

学会誌の規定では、委員会の成果は委員会名（代表者名は脚注に記載）での掲載となるので、総説的な成果報告についてはこのような形態で提出し、事例報告については通常の論文と同様に個人名で提出する。（ただし、同じ号に掲載されるように依頼する）

また、本小委員会の設置期間は平成 16 年 10 月末までなので、シンポジウムの終了後に新たな委員会の設立趣意書を作成する。並行して、常設的な委員会への移行を研究企画委員会へ提案し、本小委員会の名称は変更せずに、活動内容を更新するという形態を検討する。

2. 総会時のシンポジウムについて

シンポジウムのプログラムを以下のようにすることとした。

11:00～12:00 特別講演

既に、学会が依頼していないようであれば、橋本氏（(財) 地域地盤研究所）にお願いする。

13:00～17:00 シンポジウム

はじめに 徳永委員長

WG1 の活動内容に関して

齊藤主査（首都圏の地下水と応用地質的な見方）

木谷委員に適切な方を紹介していただく（建設工事と地下水について）

WG2 の活動内容に関して

奥田委員（割れ目系岩盤の見方について）

川越委員（割れ目系岩盤の検討事例）

パネルディスカッション 司会 嶋田委員

総括 徳永委員長

*）パネルディスカッションと総括の内容については次回、次々回の委員会で議論する。

WG1 と WG2 の関連性（共通のメッセージ）を意識した議論を行う。

3. シンポジウムに向けた準備作業

2月10日までに、シンポジウムのテーマ、主旨、各講演のタイトルを決める必要があるため、以下のように進めることとした。（講演者と講演順は決定済み）

- ・ テーマ・主旨：徳永委員長に案を作成していただき、これについてメールで意見交換を行う。
- ・ 各講演のタイトル：講演者に案を作成していただき、これについてメールで意見交換を行う。意見交換では、各講演者のタイトルがシンポジウムの主旨に沿って一貫しているかどうか留意する。

次回小委員会 3月2日（火）18:00～ 東京大学工学部4号館

議題：WG1 と WG2 のそれぞれで、シンポジウムでの講演予定内容（ストーリー）を紹介して、WG1 と 2 を包括した総括の方向性を議論する。

注）WG1 と WG2 の内容に関連性がないと受け取られる懸念があるため、包括的なメッセージが出せるかどうかについて議論することとした。

次々回小委員会 5月のシンポジウム前に開催予定

議題：パネルディスカッションと総括の方向付けを議論する。

パネルディスカッションに必要な図、キーワードを予稿集に入れておくというアイデアも出された。

4. その他

WG1 と WG2 の共通のメッセージについて議論した。例えば、「広域流動系」というようなキーワードが出されたが、今回はコンセンサスには至らなかった。次回の委員会におい

て、各 WG のストーリーを聞いた後に議論することとした。

次回の小委員会までに、少なくとも各 WG 内では、一貫性のあるストーリーを作成することとした。

次回は 3 月 2 日（火）18:00～ 東京大学工学部 4 号館

以上

第 13 回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事メモ

日時：2004 年 3 月 2 日(金) 18:00～20:00 ごろ

場所：東京大学工学部 4 号館

委員出席者：徳永委員長、奥田主査、嶋田委員、平山委員、広瀬委員

議事内容

1. シンポジウムについて

(1) WG 2

・WG 2 の奥田主査のシンポジウムでの講演内容は、以下のことを想定している。

1. 研究コンセプト

広域流動系の一側面としてのサイトスケールでの岩盤内地下水流れをどう捉えるか、またその時流れを支配する割れ目をどう見、どう評価するか

2. 地下水流れのメインフレーム推定方法

3. 現場への適用—割れ目を現場でどう見るか—

・広域流動系の中でサイトスケールの流動を考慮するように意識している

・割れ目系が流れやすさを決定しており、その成因・その後の変遷を評価することが重要である

・割れ目系の評価を行なうにあたっては、現場データに基づいた詳細かつステップを踏んだ検討を行なうことが必要である

・上述のことを、事例に基づいて説明を行なう。

・川越委員の講演は、上述のスタンスに基づいて検討を行なった例としての発表が行なわれる

(2) WG 1

・斎藤主査が提出してくださった資料について議論を行なった

・斎藤主査の講演のストーリー (案)

1. 観測態勢、データ及びデータベースの現状

2. 関東平野規模の広域地下水流動系把握の現状とその課題

3. 首都圏都心部の地下水動態変化と地下水問題

4. まとめと提言

・3. について、広瀬委員から、事例紹介があり、地下水位上昇が構造物に影響を与えている地点は、埋没段丘があり、そこに基礎を置いている地点に多いことが紹介された。厚い沖積層中の構造物で、地下水に伴って顕著な問題が発生しているものは報告されていない。

・上述のような視点からは、広域・サイトスケールでのものの捉え方という、WG 2 と同じような視点での整理ができそうであり、シンポジウムの総合討論の方向付けもできそう

である。

・WG 1 の斎藤主査の講演には、広瀬委員の資料を勘案していただくよう依頼する（担当：平山委員、広瀬委員）。

・広瀬さんの資料については、後述のように、総合討論の時に広瀬さんに説明していただくことを想定している。従って、斎藤主査の講演では、基本的には、広域流動系と最近の動態変化に関する理解について主に話していただくことを基本にする。

・一方、総合討論では、広瀬さんの話が出、また、個別事例として、上野駅の事例も示されるので、問題の所在として、広瀬さんの提示して下さった視点を簡単に紹介していただく方が、上野駅の話聞く上ではわかりやすい。

・WG 1 としての「まとめと提言」をこのシンポジウムの段階では示さない方向で準備をしていただくようお願いする（総合討論への流れの連続性を意識したい）。

・上述の3点を意識していただき、斎藤主査に講演内容をご検討いただく。

・JRの清水さんへの講演依頼を行い、新たなデータの提示はできないが、今までの公表データに基づいた現象の紹介をして下さるということで引き受けていただいたとの報告があった。

・沖積層中の地下水変動と洪積層中（埋没段丘を含む）の地下水変動との比較を行なうために、沖積層中の地下水変動のデータを探す（担当：広瀬委員、徳永）

（3）総合討論について

・総合討論に関しては、「広域地下水流動系」「サイトスケールでの現象を捉えるためのアプローチ」「REVの考え方の導入とそのスケール」等をキーワードに、WG 1、WG 2 の両方の成果について議論する。

・嶋田委員に、最初10分間程度イントロダクションで話をしていただき、次に、首都圏の構造物に対する地下水の影響地点の分布について広瀬委員にコメントしていただく。その後、フロアも含めた総合討論を行なう。

・最終的なまとめは、嶋田委員に依頼するが、上述の3つのキーワードで、地下水・流動系・地質構造・応用地質という概念が融合する部分が見えそうであるというところまで行きたい。

2. 次回委員会

4月末が原稿締め切りなので、原稿を各委員に見てもらった後に、最終的なすりあわせを行なう。

・講演を行なう委員は、原稿が完成した段階で、委員に配布する。

・次回委員会は、5月11日（火）18時～ 東京大学

以上

第14回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事メモ

日時：2004年5月11日 18:00～20:00

場所：東京大学工学部4号館

委員出席者：徳永委員長、斉藤主査、奥田主査、長田委員、嶋田委員、廣瀬委員、
三宅委員、平山委員、塩崎委員、川越委員

配布資料

シンポジウムの各原稿

議事内容

1. シンポジウムの内容について

- ・特別講演の原稿の確認について
- ・場の考え（斉藤主査、奥田主査）の話を受けて、事例（清水氏、川越委員）を紹介する。
- ・徳永委員長より、hydrology と geology の関連について提言する。また、質疑は総合討論の中でまとめて行う（進行形式について）旨を述べる。
- ・総合討論では嶋田委員より広域と局所を概観する考え方を示していただき、以下の議論の流れを作ってください。
- ・関東平野については、帯水層の違いによると思われる potential 分布の差をスケールの違いで見えていく。斉藤主査の話を受け、総合討論の中で、三宅委員と廣瀬委員にOHPを使って、話題提供をしていただく。
- ・岩盤については、細かい事象を如何にスケールアップしていくかについて、シュミレーションの立場の人に考えを述べていただく（平山委員）。また、トンネルでの割れ目と地下水の考えについて木谷委員に話題提供をお願いします。

2. シンポジウム以降の活動について

(1) 秋の発表会について

- ・ポスターセッションにて1ブースをいただく方向で徳永委員長が学会と調整する。
- ・WG1からは、斉藤主査、三宅委員、廣瀬委員、宮越氏、林氏に発表をお願いします
- ・WG2からは、奥田主査、長田委員、川越委員、あべ松委員、塩崎委員に発表をお願いします。

(2) 今後の活動の継続性について

今後の活動の継続性について、さらに議論を進めていく必要性が確認された。

3. その他

次回の委員会は、シンポジウムでの内容を踏まえて決める。

以上

第15回応用地質学における地下水問題研究小委員会 議事録

日時：2005年4月22日 16:15～18:00

場所：東京大学工学部4号館

委員出席者：徳永委員長、斉藤主査、三宅委員、廣瀬委員、川越委員、長田委員、石橋委員、斉藤委員、塩崎委員、細谷委員

配布資料

1. 地下水問題研究小委員会で議論すべきこと
2. <参考資料>本学会の現状と今後の方向性（学会記事）
3. <参考資料>地下水変動研究小委員会報告

議事内容

1. 第一期委員会活動の報告書について

第一期の報告書は、「地下水変動研究小委員会報告」のように、今までの活動記録やシンポジウム、研究発表会の原稿を束ねたものとして作成することとした。

内容と担当は以下の通り。

- ・ 活動内容のサマリー（長田委員・徳永委員長）
- ・ シンポジウム原稿
- ・ 研究発表会原稿
- ・ 現地見学会資料（川越委員（2002年）、塩崎委員（2003年）、奥田委員（2004年））
- ・ 研究紹介のリスト（細谷委員）
- ・ 委員会議事録（細谷委員）
- ・ 第二期委員会の活動目的（長田委員・徳永委員長）

報告書の媒体（紙 or pdf 形式）は、長田委員が研究企画委員会に問い合わせることとした。

応用地質へ掲載予定の解説は、作成しないこととし、以下の内容について論文の作成を検討することとした。

- ・ 廣瀬委員の成果（研究発表会）：
 - WG1で論文作成の方針を議論することとした→担当：三宅委員
- ・ 川越委員・長田委員の研究成果（WG2）
 - WG2で論文作成の方針を議論することとした→担当：川越委員、長田委員
- ・ 林氏・宮越氏の研究成果
 - 両氏に依頼することとした→担当：三宅委員

2. 第二期委員会活動について

第一期の活動を発展的に継続する方針とする。

- ・WGでの活動を中心とした委員会として、全体委員会は年に2~4回程度開催する。
- ・この他に、現地見学会を年1回程度企画する。
今年度は次回の委員会で議論するので、案を募集する（仮案：倉敷・波方）。
- ・各WGの主査は、斉藤委員、奥田委員に継続して担当していただく。
- ・WG1の活動方針（事業計画対応）の文章を斉藤主査に作成していただく。
- ・WG2の活動方針は、事例を増やすことを中心とする。
- ・その他の具体的な活動内容と運営の仕方は、次回議論することとした。

3. その他

次回は7月1日（金）17:30～ 日本工営（四谷）

- ・第一期の報告書案を担当者（徳永委員長・長田委員・川越委員・塩崎委員・奥田委員・細谷委員）に持参していただき、まとめを行う。
- ・論文化について、各WGでの議論を報告して（三宅委員・川越委員）いただく
- ・研究企画委員会の報告（長田委員）
- ・第二期委員会の具体的な活動内容、運営の仕方：現地見学会の案も含む

以上

平成16年度 特別講演およびシンポジウム 予稿集

テーマ「地質スケールに応じた地下水流動問題と
その応用地質学的アプローチ」

平成16年5月28日

中央大学駿河台記念館

日本応用地質学会

〒101-0062東京都千代田区神田駿河台2-3-14お茶の水桜井ビル4F
TEL 03-3259-8232

目 次

テーマ「地質スケールに応じた地下水流動問題と
その応用地質学的アプローチ」

特別講演

大阪平野に見られる地下水問題 1

橋本 正（（財）地域地盤環境研究所）

シンポジウム

1. 応用地質における地下水問題と小委員会の取り組み 8

徳永 朋祥（東京大学）

2. 首都圏の広域地下水流動系把握の現状と応用地質的課題 10

斎藤 庸（日本工営（株））

3. 建設工事，地下構造物に見られる地下水問題 26

清水 満（東日本旅客鉄道（株））

4. 地下水流動系に関わる岩盤割れ目の見方と評価 34

奥田 英治（アイドルエンジニアリング（株））

5. 割れ目系に着目したダムサイトにおける透水性評価の試み 39

川越 健（（株）熊谷組）

6. 総合討論 48

コーディネーター：嶋田 純（熊本大学）

大阪平野に見られる地下水問題

財団法人 地域 地盤 環境 研究所 橋本 正

1 はじめに

関東平野や濃尾平野と同様に、大阪平野でも戦前・戦後の大規模な工業用揚水等によって、大幅な地下水位低下とそれに伴う激しい地盤沈下が進行したが、法律や条例にもとづく揚水規制が功を奏して地下水位も上昇し、地盤沈下もほとんど見られなくなっている。最近では逆に、高い地下水位(水圧)が地下構造物の建設工事に対して障害となるケースも多く、その対策としてかなりの労力と費用が必要となっている。また、地下水位の上昇に伴う浮力や水圧の増大により、地下水位低下時期に建設された地下構造物が浮き上がったたり漏水したりする危険性もでてきている。さらに、地震時の液状化対策の一環として、揚水により人工的に地下水位を下げる事が検討されはじめている。ここでは、後述の地下水地盤環境に関する研究協議会で収集された情報やそれをもとに発表された研究成果を中心に、大阪平野の地下水の歴史と現状および新しい取り組みを紹介し、建設工事に伴う地下水の諸問題や地下水地盤環境問題の実態と対策を概観する。

2 大阪における地下水の実態と特徴

2.1 地形・地質概要

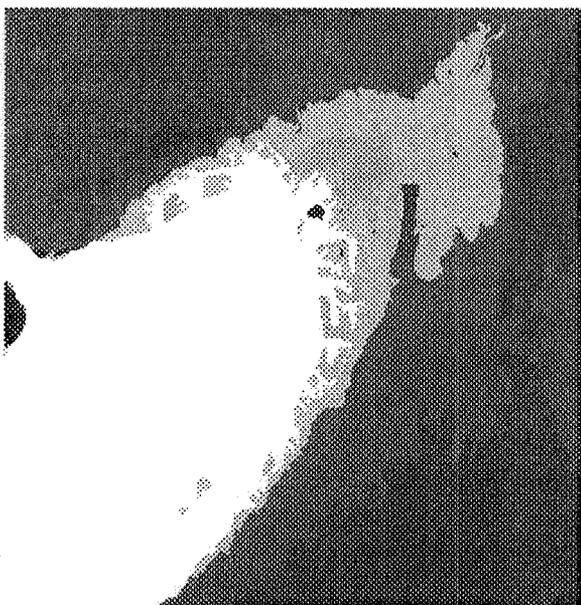


図-1 大阪平野の標高分布図 (凡例数字 ; m)

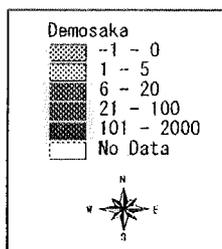


図-1は国土院のいわゆる50m数値地図(DEM)をもとに作成した大阪盆地周辺の地形図であるが、海拔0m以下の海面下の土地が淀川河口を中心とした大阪湾沿岸に広がっている。

大阪平野の地質の特徴でもあるが、南から北に半島状に延びて平野を東西に2分する上町台地が大阪平野の地形の特徴となっている。

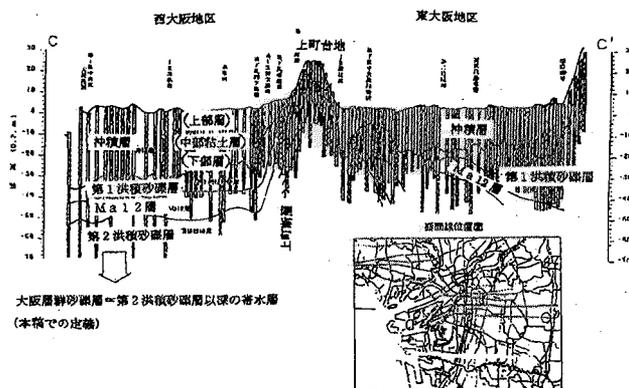


図-2 大阪平野の代表的な東西方向地質断面¹⁾

大阪平野では多数のボーリングデータを中心に地盤情報のデータベース化が進められた結果、帯水層構造を含む地盤構造が明らかにされている¹⁾。図-2は大阪市域における東西方向の代表的な地層断面図であるが、ここでは便宜的に上部より沖積層、第1洪積砂礫層(ほぼ従来の天満礫層に相当)、大阪群砂礫層(第2天満礫層以深の複数の帯水層を総括)の3層にわけている。大阪平野の地質構造の特徴として、南北方向の上町断層や上町台地により帯水層を含む地層が西大阪地区と東大阪地区に大きく2つに分れることが挙げられる。

2.2 地下水の過去と現状概要

ここでは大阪市、なかでも地盤沈下が最も激しかった西大阪地区における揚水量・地下水位・地盤沈下の歴史の全体像を把握することを目的として、従来の部分的情報^{2), 3), 4)}をつなぎ合わせた図-3により、地盤沈下開始前から最近までの経年変化を概観する⁵⁾。なお、沈下量については、地点ごとの正確な沈下量よりも平均的な地盤沈下の概要を知るために、各観測地点における沈下速度(相対沈下量/観測期間)を平均し(その値を棒グラフで示す。)、それを累積して平均的な沈下量を求めた。図-3より西大阪地域の地下水の歴史に関して以下の区分ができる。

- 第1期： 過去 ～ 1930年(昭和5年)頃
 - ・微量揚水(ほとんど自然状態)
- 第2期：1930年頃 ～ 1942年(昭和17年)頃
 - ・戦前の工業用大量揚水
- 第3期：1942年頃 ～ 1950年(昭和25年)頃
 - ・戦中・戦後の大量揚水中断
- 第4期：1950年頃 ～ 1967年(昭和42年)頃
 - ・戦後の工業用大量揚水

第5期：1967年頃～現在

・法律・条例に基づく揚水規制後の微量揚水

戦前戦後の地下水揚水量の増減が、直接的に地下水位の上下や地盤沈下速度に影響を与えていることは明白である。地盤沈下最盛期の第4期後半に、地下水位はO.P. -25～-30m（ただし、O.P. 0m=T.P. -1.3mである）まで低下している。その地下水位低下時期の平均沈下速度は10cm/年以上であるが、その後は急激に減少し、環境庁基準の2cm/年以下におさまっている。

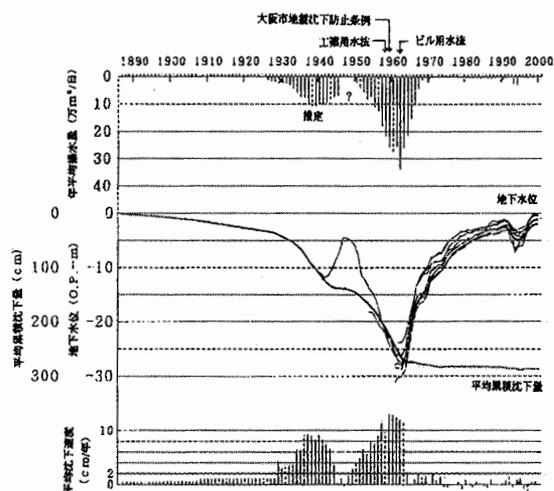


図-3 揚水量・被圧地下水位・地盤沈下経年変化図⁵⁾

比較のために、日本およびアジアの大都市における代表的な地下水位および地盤沈下の5年ごと経年変化図を図-4および図-5に示す。経済発展に伴う大量の地下水揚水とそれに伴う地下水位や地盤沈下量の変化パターンは、時期のずれや量の違いは別として、わが国だけでなくアジアの大都市における変化パターンと共通している。大阪の地下水位は上海とならび、比較的早い1960年に最低となり、その後は回復に転じているが、これは揚水規制が早期に徹底されたためと考えられる。地盤沈下について、観測開始が比較的早い大阪と東京を比較すると、1890年以降の総沈下量は大阪で約3m、東京で約4.5mであり、その比は2/3である。

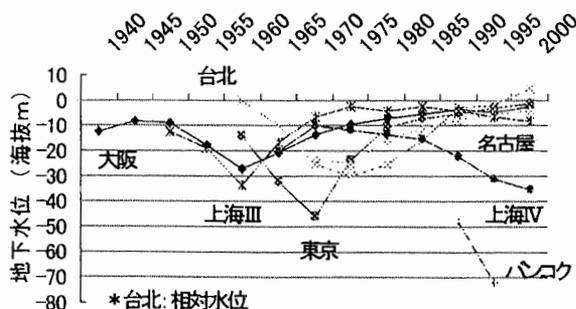


図-4 アジア大都市の地下水位経年変化比較図

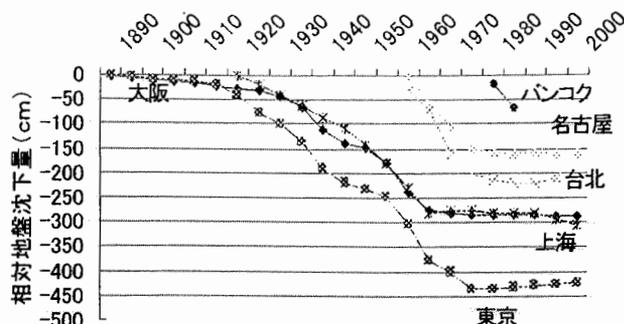


図-5 アジア大都市の地盤沈下量経年変化比較図

2.3 帯水層の連続性

大阪平野における最近20年弱の地下水位の経年変化図をみると、変動の類似性から図-6に示すように、自由（不圧）地下水・西大阪地区第1洪積砂礫層・同地区大阪層群砂礫層・東大阪地区大阪層群砂礫層の4つのグループに分けることができるが、その変動原因と帯水層の連続性に関する検討結果⁴⁾を以下に示す。

自由（不圧）地下水・被圧地下水・河川水の連続性

図-2に示すように、沖積層は上部層・中部粘土層・下部層の3層から構成されるが、地表面直下の上部層の地下水は自由地下水と考えられる。沖積層の地下水位には降雨量の多い夏季に高く、降雨量の少ない冬季に低くなるといった季節変動がわずかに見られるものの、第1洪積砂礫層や大阪層群砂礫層といった他の被圧帯水層（被圧地下水の帯水層）に見られるような大規模な地下水位変動はみられないことから、沖積層とこれらの被圧帯水層とはほとんど連続していないと考えられる。これは、沖積層における中部粘土層の遮水能力の高さによるものと思われる。なお、同様の自由地下水と被圧地下水の不連続性は東京でも指摘されている⁶⁾。また、一般的には平野部の自由地下水は河川水や海水と連続していると考えられているが、西大阪地区の自由地下水の地下水位が、海面や感潮河川の水位（ほとんど海面と等しい。）よりも常時1～1.5m程度低いにもかかわらず、自由地下水が塩水化していない場合もあることから、自由地下水が全面的には海水や河川水と連続していないことも指摘されている⁴⁾。

被圧地下水相互の連続性

西大阪地区第1洪積砂礫層と同大阪層群砂礫層（図-2参照）の両グループの地下水位経時変化と両グループの揚水時期との関係（特に、1992～1994年の後者揚水時期と1995～1996年の前者揚水時期）を詳細に比較すると、お互いのグループの揚水による地下水位低下の影響が見てとれる。この2つの帯水層は、同じ西大阪地区でMa12の粘土層を挟んで上下に分布しており、両帯水層は何らかの経路（粘土層の不連続部・ボーリング孔跡・観測井自体などが推定される。）で連続しているようである。

被圧地下水と海水の連続性

被圧帯水層と海との連続性に関連して、西大阪地区の第1洪積砂礫層（天満砂礫層）の塩素イオン濃度が約6000ppmと海水の1/3程度の高濃度であることや塩素イオン濃度が海岸に近い程大きくなっていることが確認されている⁷⁾。これは海底で被圧地下水が海水と直接的に連続している可能性を示しているが、化石水的高塩化物地下水⁷⁾の可能性も含め更なる検討が必要である。

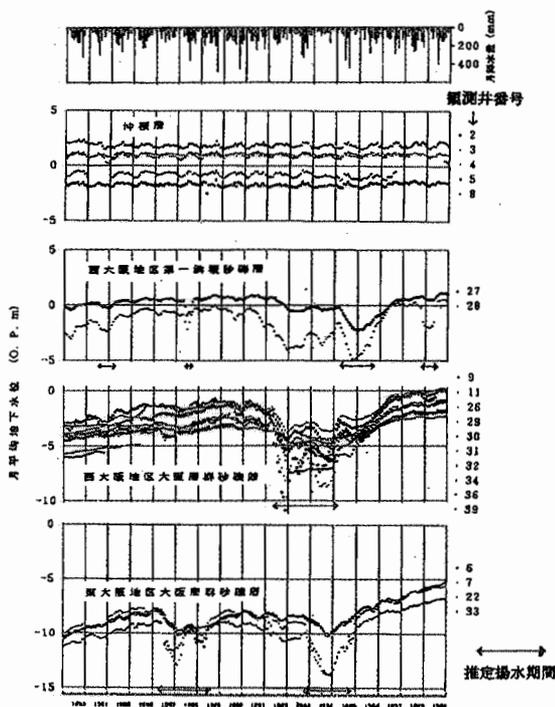


図-6 帯水層別地下水位経年変化⁴⁾

2.4 帯水層の水理特性

地下工事に先立ち実施された多数の揚水試験結果が再検討された⁸⁾が、それによると大阪市街地中心部の梅田・天満付近の第1・第2洪積砂礫層で、透水量係数は 10^{-1} (cm/sec) オーダー、透水量係数(透水量係数×帯水層厚)は 10^0 (m^2/min) オーダーと、他の地区や他の帯水層と比較して1オーダー以上大きい。第1・第2洪積砂礫層は、従来、第1および第2天満砂礫層と呼ばれ、大阪の高層建築物の基礎として知られていたが、この層の透水量係数が極めて大きいのは、最大直径が人頭大にもなる礫が主体で空隙も大きいためである。

実施工時の揚水に伴う周辺地域の地下水位低下は広域的にみた場合の大規模な揚水試験とみなすことが可能であるが、その例を以下に示す⁵⁾。

図-7は第2洪積砂礫層での揚水中心からの距離の対数と地下水位低下量の関係を示したものであるが、揚水中心からみて西側の工事用観測井a~eのデータはほとんど一直線上にプロットされ(◇印)、理想的な定常井戸理論(Thiem式)が適用できる。そこで直線勾配と推定総揚水量をあてはめて計算すると、透水量係数Tは 10^0 オーダー (m^2/min) と非常に大きな値(大阪市内

の揚水試験結果によると、 10^{-1} オーダーが多い。)となる。また、図に示すように影響圏半径Rは23.5kmと大阪地下水盆の半径に匹敵するような大きな値となっており、1箇所での揚水の影響が西大阪地区全域におよぶことを示している。

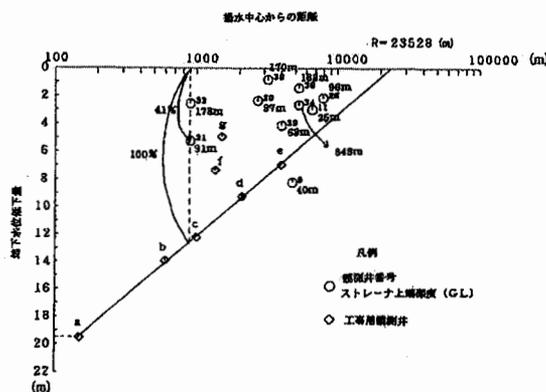


図-7 揚水による地下水位低下の例⁵⁾

3. 地下水位上昇にともなう最近の地下水問題

3.1 地下水位低下工の大量揚水と広域水位低下

大阪平野においても、近年、片福連絡線工事や大阪市地下鉄7号線建設、または大阪駅前ダイヤモンド地区における地下街、地下駐車場、地下河川の建設など数多くの地下工事が実施されてきた。最近の地下工事の特徴としては、大深度化と近接工事の増加、施工技術の進歩と多様化、および環境対策の重要性などが挙げられる。一方、図-3に示すように、昭和30年代の地下水位低下による地盤沈下対策として実施した地下水くみ上げ規制の結果として、最近では被圧地下水の水位が非常に高い位置にある。すなわち、大阪市内のほとんどの観測井で1990年台以降にはGL-10m以上まで回復している。これに加えて、帯水層自体の透水量係数や影響圏半径が大きいことから、図-7の例のように、地下水位低下に必要な揚水量とその影響範囲ともに非常に大きくなった。このことは、広域の地盤沈下再発、排水設備や下水放流量など排水処理費用の高騰にもつながり、大きな問題となっている。さらに、大深度の地下工事を行う場合に、盤ぶくれ、土留壁の遮水性、地盤改良の確実性などの地下水対策が非常に重要な問題としてクローズアップされてきた。

3.2 土留め壁の出水事故問題

ここでは、事故発生の要因となる地下水の挙動と地盤の特性を中心に、大阪市内における2つの出水事例について簡単に説明する。

(A) 大阪駅前第2棟建設時の出水⁹⁾

大阪駅前市街地改造事業の一環として計画された駅前第2棟は、高さ70m、軒高56m、延床面積10万 m^2 を超える大規模ビルであり、逆打ち工法によって昭和49年4月、地上と地下から同時に建設を開始した。その際、基礎工事のために地下連続壁による地下水の遮水工法を採用した。具体的には、建設敷地の四周を厚さ70cmのコンクリート連続土留壁で囲み、その連続壁を

天満砂礫層の下端にある粘土層（地下 39m）まで根入れして周囲の水を遮断し、工事範囲内の地下水を汲み上げることにしたものである（図-8-1、2参照）。

昭和 50 年 9 月、地下掘削は地下 4 階部分の G.L. -20 ~ -23m 付近まで進み、掘削完了（G.L. -23 ~ -25m）まであとわずかのところで、連壁の継手部に接する掘削地盤面から建物内部に漏水が始まった。直ちに止水対策が講じられたが、水とともに土砂が流入し、周辺の地盤が沈下し始めた。沈下の影響は建物の南側およそ 30×40m の範囲に及び、これに伴って 16 棟（29 世帯）の家屋が傾く等の被害が発生した。また、隣接する国道 2 号線の陥没（沈下）量は、最大 1.46m に達した。推定によれば、建物内への累計流入地下水量は約 30,000m³、流入土砂量は約 550m³ であった。

建物内に流入した水は、梅田粘土層の下にある透水層の被圧地下水と想定された。この地下水が連壁の継手欠損箇所から浸透し、一旦水みちができた後は 10 数 t / m² という水圧によって急速にその水量を増し、水みちがさらに拡大していった。同時に建物外側の帯水層にパイピングを生じ、その結果、大量の出水と土砂の流入をみるに至ったものと推論された。

(B) 片福連絡線福島地区での出水

この出水事故は、平成 4 年 4 月 3 日に大阪市福島区海老江 7 の国道 2 号の地下を走る片福連絡線建設工事現場で地下 2.1m を掘削作業中、大量の地下水が突然噴出したものである。出水後すぐに工事を中止したが、地上のアスファルト道路の歩道部分が幅 2.5m、長さ 30m にわたり、最大 30cm 陥没し、付近の民家などに被害がでた。事故原因等については、「異常出水対策技術委員会」（12 委員、委員長 柴田 徹 京都大学教授（当時））によって審議されたが、異常出水の発生状況および原因の推定に関して、1992 年 6 月 17 日の毎日新聞（京都地区版）に報道されている。これらの地盤問題に関する要点は次のようである（図-9 参照）。

- ① 出水した地下水は天満砂礫層とその上部にある沖積層からのものである。
- ② この付近の天満砂礫層の水頭は G.L. -2 ~ -3 m と高い。
- ③ 沖積層下部に、粒径が均質で流動化しやすい砂質土層が存在する。

以上の地盤条件の中で、土留壁の継ぎ目から、天満砂礫層などに含まれている被圧地下水が出水した可能性が高いと結論づけている。

以上 2 つの事例を紹介したように、土留壁の背面と前面の水頭差が大きい場合には動水勾配が非常におおきくなり、何らかの欠損部があればパイピングが発生する可能性が高い。ここでも土留壁の継ぎ目が欠損部となり、砂層や砂礫層でのパイピングによる地下侵食が進行し局所的な地盤沈下が発生したものと考えられる。これらに共通する条件として、高い地下水位（または大きな水頭差）と大きな透水係数（または透水量係数）および流動化しやすい均等粒径の砂が挙げられる。

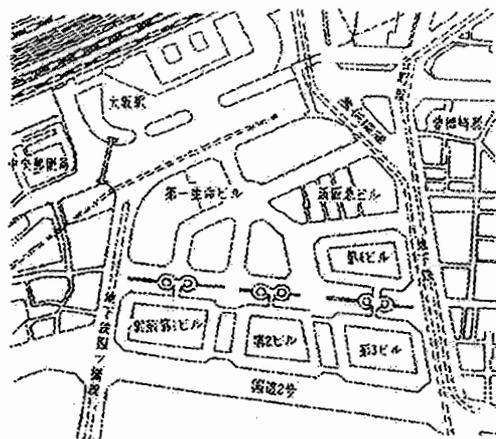


図-8-1 梅田のビル位置図⁹⁾

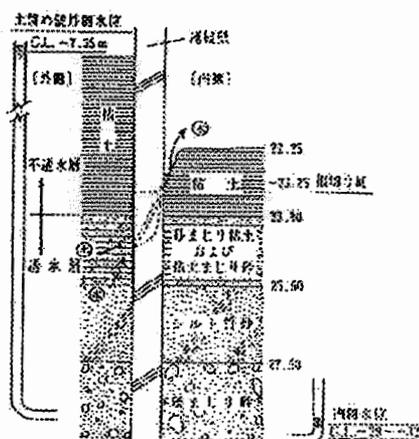


図-8-2 大阪駅前第2棟出水事故現場における連続壁と水みちの推定⁹⁾

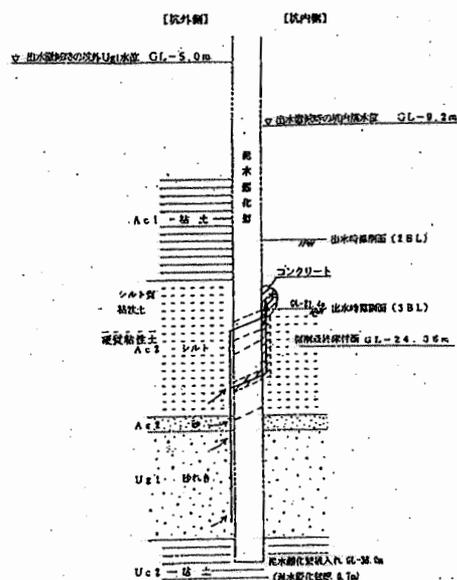


図-9 片福連絡線福島地区の出水事故現場における地下水流況（読売新聞、1992年6月17日夕刊より）

3.3 地下水位上昇による浮力増加問題と対策

地下水位が低い時期に建造した地下構造物の中には、水位が現状まで回復することを想定して浮力の検討設計をしていない場合が多い。この問題は東京におけるJR新幹線上野駅の例が有名であるが、大阪においても発生している。文献¹⁰⁾によると、大阪明治生命館(仮称)の建て替え工事に際して地下躯体を再利用する計画が進められたが、浮力による浮き上がりが問題となった。すなわち1995年の建設当時、G.L. -10m程度であった地下水位が最近ではG.L. -2.5m~3mまで上昇し、上階を解体した際の重量減による浮き上がりの恐れが生じたため、その対策として地下階にカウンターウエイトとして重量コンクリートを打設し工事が進められた。

3.4 地震に伴う液状化問題と対策

地震時の液状化には地下水位の影響が大きい。これは水圧が高いと液状化抵抗を減らすことによるためだが、液状化は一般に地下浅部の緩い砂層に起こりやすいので、自由(不圧)地下水の地下水位が問題となる。先に述べたように、大阪平野の自由地下水の下部には一般に厚い沖積粘土層が介在するため、天満層などの被圧地下水とは不連続となっているが、沖積粘土層が介在していない地域や沖積粘土層下部の緩い沖積砂層は、被圧地下水水位の変動の影響を受けるため、水位上昇に伴って液状化が発生しやすくなる可能性がある。この対策として揚水による地下水位低下が効果的と考えられ、その経済効果も試算されている¹¹⁾が、地下水の揚水に対しては特に沖積粘土層における地盤沈下再発の可能性も指摘されており慎重論も多い¹²⁾。

4. これからの地下水管理にむけて

4.1 地下水地盤環境に関する研究協議会の設立¹³⁾

以上述べてきた地下水に関連した諸問題に対しては、地下水や地盤の地域特性の実態や問題点を明らかにし、関連する機関や専門分野の情報の集積交換、あるいは研究や問題解決の手法提言等の場としての協議会を組織して総合的に取り組む必要がある。関西においても地下水に関する情報を網羅的に収集し、解析・研究した上で今後の地下水地盤環境問題に対して適切に対処するための情報を提供する機関を設置する必要がある。このような産官学の共通認識から、全国に先駆けて1993年6月に大阪を中心として標記研究協議会(現座長:京大名誉教授、柴田 徹氏)が設立された。この協議会は、毎年地下水情報を報告書としてまとめ会員に配布しているほか、シンポジウムや講習会を開催しているが、2003年には世界水フォーラムにも積極的に参加した。

4.2 地下水情報のデータベース化とGIS化¹⁴⁾

研究協議会では設立以来、主に地下水の水位と水質に関する情報を収集してきたが、淀川と大和川に挟まれた大阪市内中心部とその周辺地域に限られ、また情報も比較的最近のものに限られていた。しかし、地下水を把握するためには、空間的には被圧帯水層の拡がりも考慮して地下水盆の単位で情報を収集する必要があり、時間的

には昭和30年代の激しい地下水位低下と地盤沈下以前のなるべく自然状態に近い時期まで遡る必要がある。また、現在の地下水観測井は図-10に示すとおりであるが、

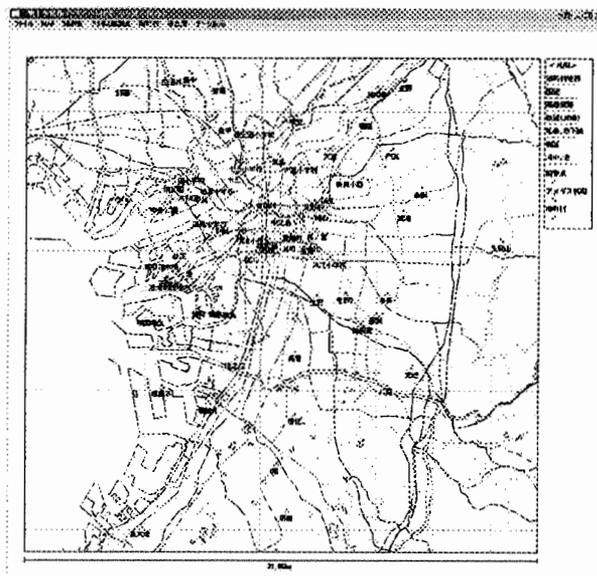


図-10 観測地点分布図¹⁴⁾

特に深い深度の観測井の数は充分ではなく数を増やす必要がある。さらに、この10年の間に蓄積されたデータを整備して、多くの研究者や技術者に活用されるために、大阪平野を対象として、以下に示すような地下水地盤環境情報のデータベース化およびGIS化が進められている。収集情報は以下のとおりである。

- ・帯水層構造情報(ボーリングデータベースの利用)
- ・地下水位情報および観測井の諸元情報
- ・地下水の水質情報
- ・水理定数情報(透水係数・貯留係数・影響圏半径)
- ・揚水量情報
- ・地盤沈下情報
- ・降雨情報

本地下水データベースの概要は以下のとおりである。
データベース入力・管理システム

- ・データ入力管理 …各種データの入力作業支援と入力状況管理。
- ・入力データのインデックスライブラリー管理 …DB化されている情報内容の管理

データベース運用システム

- ・データ検索…地図上での情報検索、データ種別・内容による情報検索
- ・基本データ出力 …集積データの位置図(GIS化)、データ時系列図等
- ・編集データ出力 …検索条件に対して複数の情報を重ね合わせて出力

(例:地域、地層、時間をキーに複数の観測データを抽出し、加工して分布図等に出力)

図-11にデータベースの出力画面の例を示す。

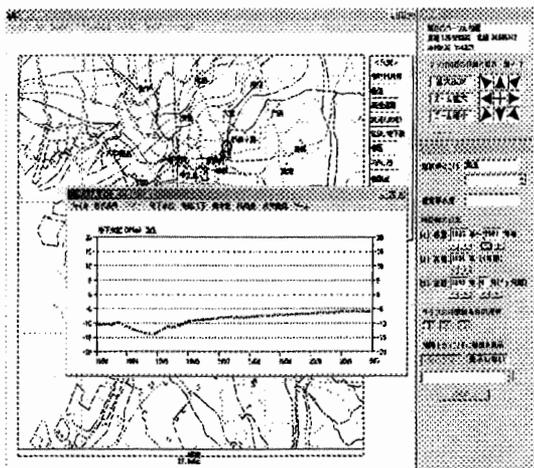


図-11 地下水データベース出力例¹⁴⁾

4.3 3次元地下水浸透流シミュレーション¹⁵⁾

地下水地盤環境に関する研究協議会には、3つの常設研究委員会とひとつの特別委員会があるが、その中の地下水涵養研究委員会では、大阪地下水盆を対象として3次元地下水浸透流モデルが作成され地下水水位変動のシミュレーションが実施されている。図-12はその成果の一部であるが、多数の地質ボーリング情報をもとに、3次元的な帯水層がモデル化され、過去の地下水水位再現シミュレーションが実施された。図-13は地下水位の計算値と観測値の比較図の例であるが、再現結果は比較的良好である。

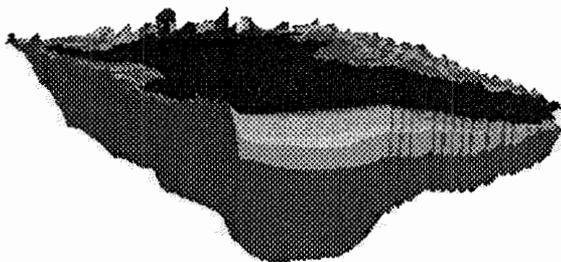


図-12 大阪地下水盆を対象とした地下水3次元浸透流解析の帯水層モデル¹⁵⁾

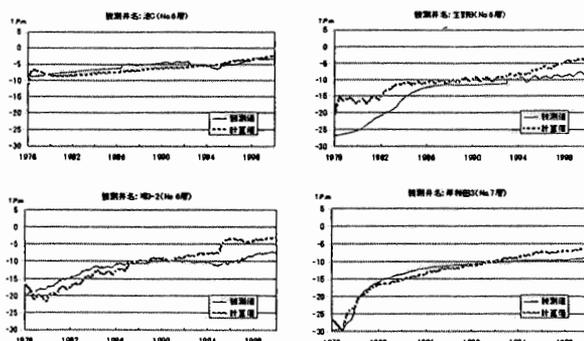


図-13 3次元浸透流解析による地下水位の計算値と実測値比較の例¹⁵⁾

4.4 地下水流動保全技術の検討¹⁶⁾

地下水流動保全技術に関する研究委員会は特別委員会として設立されたが、東京の研究委員も加え、その成果を大阪だけでなく、東京や名古屋でもその成果を中心とした講習会を開催して、全国的な活動を展開している。講習会のテキスト¹⁶⁾を一般向けに改訂して出版する計画もある。

5 まとめ

大阪平野の地下水に関連した従来研究の結果をまとめると以下ようになる。

- ・大阪市域では、戦前および戦後の2度にわたる大規模な工業揚水により広範囲の地下水水位低下と地盤沈下を経験したが、その歴史に関しては5つの時期に区分できる。
- ・自由(不圧)地下水と河川水・海水とは全面的には連続していない。
- ・自由地下水は被圧地下水とも連続していない。
- ・被圧帯水層は上町台地(断層)を挟んで、西大阪地区と東大阪地区に分けられ、互いの地区の揚水による地下水水位低下の影響は小さい。
- ・天満砂礫層の被圧地下水は海水と連続している可能性がある。
- ・大阪市の中心部(梅田付近)における第1洪積砂礫層(第1天満礫層)および第2洪積砂礫層(第2天満礫層)の透水量係数($m^2/分$)は 10^0 オーダー、同じく透水係数(cm/sec)は 10^{-1} オーダーと極めて大きい。また、影響圏半径も10km以上と非常に大きいため、その揚水による地下水水位(水頭)低下の影響は西大阪地区全域におよぶ。
- ・天満砂礫層など地下水水位が高く、透水係数または透水量係数が大きな被圧帯水層で柱列式土留壁などによる地下水の遮水工法を採用する場合、遮水壁のわずかな欠損部からパイピングが進行し、大規模な出水事故が発生する可能性があるために注意が必要である。
- ・環境に配慮した様々な地下水流動保全工法や地下水水位低下工法が開発されている。
- ・地盤沈下最盛期の地下水水位低下時期に建設された地下構造物に関して、地下水水位上昇による浮力対策が必要なケースが発生している。
- ・地震時の液状化対策として地下水水位を低下させる場合には地盤沈下を再発させないことが前提であり、そのためには地下水関連情報のデータベース化・GIS化が不可欠である。

6. おわりに

地下水を取り巻く社会環境も、ここ数十年で随分変わってきた。特に都市部において、1960年以前には、地下水の過剰な揚水により地盤沈下が発生し大きな社会問題となったため法律による揚水規制が行われた。その後、地下水位の回復が見られたが、地下開発に伴う建設事業の拡大と大深度地下利用の発展に伴い、逆に高い

地下水圧が課題となったが、密閉型シールド工法、無人化ケーソン工法、または連続地中壁などが改良・開発され、高水圧下でも信頼性の高い工事が行えるようになってきた。

一方、地下水を大量に汲み上げる揚水工事は地盤沈下の再発につながりかねないが、注水工法の併用や井戸またはスクリーンの最適配置計画により、工事域に限定した小範囲の地下水位低下をはかることができれば、工事の安全性の向上や事業費の削減につなげることができる。

また、地下水地盤環境の保全も今後の重要な課題である。例えば線状地下構造物の計画、実施および維持管理においては、地下水流動保全対策や構造物への漏水防止技術の研究開発がますます重要となってくる。さらに、地下水汚染を防止しその水質を保全するためには、事業者等に対して法令による有害物質の地下浸透の禁止を徹底的に周知するとともに、汚染された地下水に対する能率的な調査・分析技術や浄化技術のさらなる開発が期待されている。

快適な生活環境を持続していくためには、地下水に関してもその環境保全との調和をはかることが21世紀の重要な課題となることが認識されてきた。地下水に係わる諸問題に対して調和のある解決を図るためには、地下水観測網をさらに充実させて、地下水の挙動の実態把握、有効利用の目的と方法、地下水地盤環境保全の目標、あるいは地下建設技術や地下水環境保全技術開発の動向と展望などを総合的に検討していく必要があると思われる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、貴重なデータや研究成果を提供していただいた「地下水地盤環境に関する研究協議会」の会員各位および各研究委員会の委員各位、地下水の塩水化状況についてご教示いただいた日本地下水理化学研究所の鶴巻道二氏、および帯水層の水理定数や連続性についてご教示いただいた宇野尚雄岐阜大学名誉教授のそれぞれの方に対し心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) (社)土質工学会関西支部・関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会・地下空間の活用と技術に関する研究協議会編：「関西地盤」，1992.
- 2) 戸上拓也：地下水位変動と地盤沈下，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，pp.49-52，1993.
- 3) 大阪地盤沈下総合対策協議会：大阪地盤沈下対策誌，1972.
- 4) 橋本正・飯田智之・宇野尚雄・神谷浩二：大阪平野の地下水位変動の特徴とその影響要因，地下水地盤環境に関するシンポジウム2000発表論文集，pp.65-78，2000.

- 5) 戸上拓也・橋本正：大阪における地下水問題，地下水地盤環境に関するシンポジウム2002発表論文集，pp.64-75，2002.
- 6) 川島眞一：東京の地下水位の変動について，基礎工，24-2，28-33，1996.
- 7) 鶴巻道二：大阪平野における被圧地下水の塩水化について，地下水技術，34-10，37-50，2001.
- 8) 霜上民生・岸尾俊茂・鎌田敏正・有本弘孝・小林圭・沖泰三：大阪地盤帯水層の水理特性，地下水地盤環境に関するシンポジウム'95発表論文集，pp.21-38，1995.
- 9) 柴田 徹：関西における地盤問題の中から，(社)土質工学会関西支部，三十周年記念誌，pp.99-104，1988.
- 10) 岡田篤生・岡泰子：浮力とたたかうビル，日経アーキテクチュア(N o.661)，pp.102-117，2000.
- 11) 地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価に関する調査研究委員会：土木学会関西支部平成14年度地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価講習・研究討論会テキスト，5-9～5-52，2002.
- 12) 色摩勝司：大阪市における地下水・地盤問題へのアプローチ，上記テキスト，P-7～P-8，2002.
- 13) 霜上民生・橋本正：地下水環境情報の観測網について，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，pp.107-118，1993.
- 14) 飯田智之：地下水地盤環境に関する研究協議会の活動紹介 -地下水情報のデータベース化-，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，pp.47-52，2003.
- 15) 地下水涵養研究委員会：大阪平野地下水涵養に関する研究Ⅱ.涵養モデルの作業報告，地下水地盤環境に関するシンポジウム発表論文集，pp.65-79，2003.
- 16) 地下水地盤環境に関する研究協議会・地下水流動保全工法に関する研究委員会：「地下水流動保全工法マニュアル(試案)」，2001.

応用地質における地下水問題と小委員会の取り組み

東京大学大学院工学系研究科

徳永 朋祥

1. はじめに

地下水に関連する問題は、応用地質学分野において、常に主要な課題の一つとして捉えられている。これは、地下水が、地盤・岩盤を構成する主要な要素の一つであり、地下水の存在に伴う応力条件、地下水流れとその変化が、地盤・岩盤の利用や掘削を伴う建設工事の際の重要な検討項目となることによっている。このような、地下水に関わる評価や調査を進める上で最も重要なことは、対象とする問題に応じた地下水の把握の仕方である。

日本応用地質学会では、阪神・淡路大震災調査委員会第三分科会と、それに引き続く地下水変動研究小委員会において、応用地質学における地下水問題に関する調査・研究を行なってきた。これらの委員会では、「地下水流動系」という概念を念頭において事象を見ることの重要性が示された。一方で、この概念が、地質の分布やその成因、地質分布から推定される物性分布のような、今まで応用地質学分野で活躍してきた技術者が得意にしていたものの考え方とは一見違ったものの捉え方であり、地質学的なものの方と流動系の概念を融合することの必要性も明らかとなった。

今回のシンポジウムの発表は、上述の問題意識に基づき2001年10月に設立された「応用地質学における地下水問題研究小委員会」で議論されてきた内容に関する報告を主体とするものである。小委員会では、「都市域の地下水上昇が地盤・構造物に与える影響」と「割れ目系岩盤の地下水流れ」の2つのテーマを取り上げ、各々の課題に関して、主に地下水流動系の概念から現象を見ている技術者と、その入れ物である地質・地盤・岩盤構造を主に検討を行なってきた技術者の両者にメンバーになってもらい、応用地質学における地下水問題の取り扱い方のより適切な整理および地下水管理・利用に向けた提言を取りまとめることを目的として活動を行ってきている。この2つのテーマを取り上げたのは、前者に関しては、地下水流動系の概念に基づいた整理がある程度進んでおり、それと地質・地

盤構造との関連の議論ができるのではないかと考えたからである。また、後者に関しては、応用地質関連技術者が主に取り組み、多くの成果を得てきている割れ目系岩盤について、その中の流れをどのように考えるのかという点について、新たな視点を得たいと考えたからである。

小委員会での議論の詳細に関しては、具体的な講演を参照していただくとして、小委員会での議論の中で、私が重要な課題であると感じたことについて簡単に紹介させていただき、議論のきっかけにさせていただければと思う。

2. 地下水流れと地質・水位・水頭

地下水流れは、一般には、Darcyの法則にしたがっていると考えられている。割れ目系の中の非常に速い流れや、透水性の極端に低い地層中で、動水勾配も極端に小さい場合などを除くと、Darcyの法則を、地下水流れを考える上での基本的法則と考えることに異論はないと思われる。

Darcyの法則は、以下のように記述される。

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}$$

ここに、 q_i : i 方向への単位面積あたりの流量、 K_{ij} : 透水係数テンソル、 h : 水頭、である。

Darcyの法則からは、地下水流れを理解するためには、透水係数テンソル分布と水頭分布の両者を明らかにすることが必要となることがわかる。誤解を恐れずに言うと、地質・地盤・岩盤構造を主に検討しているいわゆる地質学ベースの応用地質技術者・研究者は、このうちの、透水係数テンソルの空間分布に密接に関係する地層分布、割れ目系の分布・連続性の推定の議論が重要であると考え、それがわかれば、地下水流れの理解は可能であるという発想でデータ取得、検討を行なっているように思われる。一方、地下水流動系の概念から理解をしようとする技術者・研究者は、水位・水頭の空間分布（とその時間変化）を理解することが重要であり、それがわかれば、地下水流れの理解が可能となるという発想でのデータ取得、検討を行なっ

いるようである。このような記述は非常に極端なものであり、当然、どちらの立場に立つ技術者も、透水係数テンソル分布が重要であるとか、水位・水頭分布が重要であるとおっしゃるのであろう。しかし、技術者・研究者も人間であり、頭で考える場合には、非常に単純な系に物事を近似して考えるようになってしまうのが常である。その場合には、地質学に基づいて考える技術者は、「地層分布」と「水理地質構造分布」との違いを意識しない議論をしたり、計測している水位・水頭の値の空間分布や、その時間方向への変化が持つ意味を見落とししたりすることが起こっているように感じる。一方、水位・水頭分布に基づいて議論をする場合には、しばしば場を均質等方であるという単純化をし、水理地質構造分布、透水性層と難透水性層の分布、割れ目系の存在による影響を考慮しない議論になってしまうことが起こるように思われる。

数値解析的手法は、人間が頭で考える場合に不可避な過剰な単純化をせずに現象を評価できるという意味では強力な武器であることは論を待たない。したがって、今後、地質技術者といえども、数値解析技術を積極的に利用した検討を行うことが期待される。しかし、場を支配している物性分布に関する地質学的理解、水位・水頭分布およびその時間変動が持つ情報の整理から得られる場の理解をスキップした数値解析が行なわれるとすれば、そこには大きな落とし穴があると思うのは、私だけだろうか。

3. 自然の切り取り方と境界条件

自然のシステムの中での地下水流れや、建設工事等人間活動に伴う地下水挙動の変化等を検討・議論する場合、数値解析的なアプローチをする場合には陽に境界条件を設定しなければならないが、概念的理解をする場合にも、実際には、境界条件を設定することが必要となる。これは、自然現象をどのように捉え、切り取ってくるのかという、問題の設定に関わる課題である。地下水流動や間隙水圧の変化等に関して有意義な議論をするためには、どのような境界条件を設定して現象を捉えているのか、また、それが適切であるのかについての吟味も必要であると思われる。各人の想定している境界条件が違っていることによる議論の食い違いも、様々な機会に起こっているのではないだろうか。これに、関連する問題として、境界のとり方によっては、議論する場の空間スケールが変化し、そのことが、

問題の相互理解をしにくくする原因になっているように思われることもある。

4. 今回のシンポジウムに期待すること

今回のシンポジウムでは、都市域地下水、割れ目系岩盤の各々について、小委員会で議論されたことの整理と、ケーススタディが紹介される。これらは、まだ、最終的な結論に達したものではなく、立場によって様々な捉え方が示され、お互いに十分に理解できていないところも多々あるものと思う。我々としては、今回のシンポジウムで、多くの方々にご批判、ご指摘をいただくことにより、より適切な「応用地質学的な地下水問題の取り扱い方」を整理していきたいと考えている。そのために、今日のシンポジウムの成果を踏まえ、秋の応用地質学会研究発表会での発表も予定している。本シンポジウムに参加されている皆様からのご意見をぜひたくさん伺いたいと思っており、かつ、ぜひ、我々発表者との議論を活発に行っていただきたいと希望している。

首都圏の広域地下水流動系把握の現状と応用地質的課題

日本工営株式会社 齋藤 庸

1. はじめに

地下水は水循環の重要な構成要素の一つであり、古くから農業・工業・飲用などの水資源として活発に利用されたため、首都圏沖積低地を中心として過去には過剰な揚水による著しい地盤沈下が発生した。揚水規制により近年そうした地下水障害は沈静化した。場所によって30～40mもの被圧地下水の上昇(回復)を招き、鉄道地下駅など地下インフラ施設への影響問題が顕在化している現状にある。また、都心部におけるインフラ施設の大深度・大規模化に伴う地下水環境への影響拡大や各地のゴミ・産業廃棄物(埋立土を含む)等を起源とする地下水汚染の懸念などもあり、地下水適正管理あるいは地下水環境保全の観点からより広域場での地下水流動系の実態把握が重要となっている。こうした背景を踏まえ本報では、筆者らが「応用地質学会地下水問題研究小委員会」等でのこれまで活動を通して把握してきた、首都圏における広域地下水流動系把握の現状と応用地質的課題について述べる。

2. 地下水流動の基本概念

首都圏の広域地下水流動に関する具体的な議論に先立ち、筆者らが拠り所とする地下水流動の基本概念を簡単に述べる。

2-1 地下水のポテンシャル

地下水のポテンシャルとは通常、地下水の『水理ポテンシャル(水理水頭)』を指す。地下水の水理ポテンシャルは次式に示すように、『重力ポテンシャル(位置

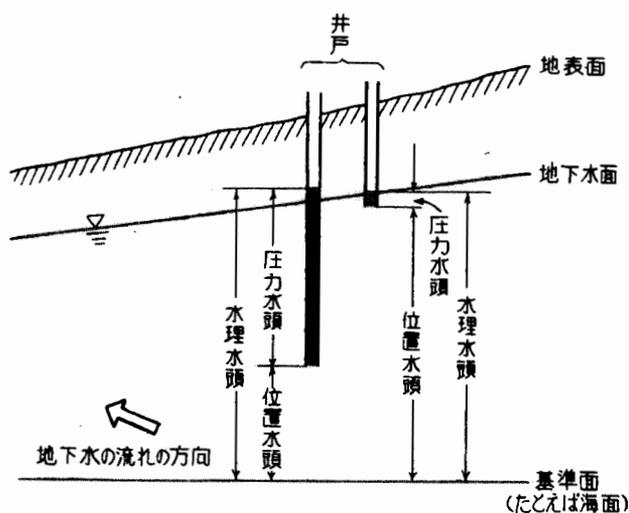


図-1 地下水ポテンシャルを示す模式図¹⁾

水頭)』と『圧力ポテンシャル(圧力水頭)』を足し合わせたものである(図-1¹⁾)。

$$\phi = Z + \phi \quad (1)$$

ここで記号は、 ϕ : 水理ポテンシャル(水理水頭), Z : 重力ポテンシャル(位置水頭), ϕ : 圧力ポテンシャル(圧力水頭)である。

2-2 地下水流動則

地下水流動では以下の3法則が成立する。

流動則1 : 地下水流動はポテンシャル流れであり地下水はポテンシャルの高い所から低い所に向かって流れる(図-1)。

流動則2 : 通常の地下水流動ではダルシー則が成立する(図-2¹⁾)。

流動則3 : 地下水流動においても、質量保存則が成立する(連続性が成立する)。

また、図-3は上記3法則全てを同時に説明する図である²⁾。以下、地下水水盆単位の地下水動態を理解する為に欠かせない、地下水流動理論に関連する要点を整理する。なおこの際、これら議論の全部に「地下水面下にあり飽和された帯水層・加圧層はその全てが共通の地下水流動系の中に包括される」という約束があることに留意する必要がある。

砂層を通過する水の排水の法則を求めるための装置

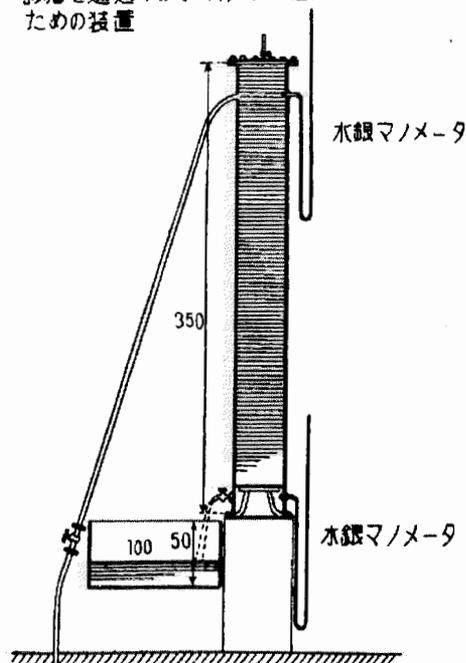


図-2 ダルシーが用いた実験装置¹⁾

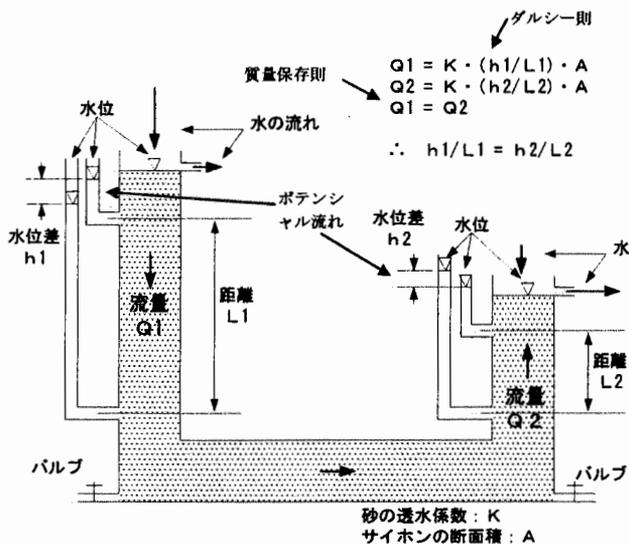


図-3 地下水流動則を表す模式図²⁾
(サイホン内断面一定、水頭損失ゼロを仮定)

(1) ポテンシャル流れ

上述したように、地下水はポテンシャルの高いところから低いところへ流れる「ポテンシャル流れ」であり、地下水面に起伏のある場合の地下水盆内の流線は図-4³⁾の様であることが知られている。

(2) 地下水面の起伏

湿潤な地域では一般に、地下水面は地形面の高まったところで高く、低まったところで低い^{1), 4)}。このことはすなわち、日本のような湿潤な地域では、地形の起伏に調和するように地下水面の起伏ができることを指す。

(3) 地下水流動の原動力

流域の地下水流動の原動力となるのは地下水面の形状である⁴⁾。地下水面に起伏が生じると、地下水面下の飽和帯中の地下水にポテンシャルの高低が生じる。地下水ポテンシャルに高低があれば地下水はポテンシャルの高いところから低いところに向かって流れようとする。つまり、地下水面の形状が地下水流動の原動力となる。

(4) 水理地質構造

地下水面が決まると、地下の内部構造(すなわち地質条件)に応じた地下水ポテンシャルの分布が決まり、地下水は動水勾配が最大となる方向へ流れる¹⁾。このことは、涵養域や流出域など地下水流動系の大まかな形は地形により定まり地下水面形状に表現されるが、詳細な流動経路や流動する量は地質条件に左右されることを示す。このように、実際の地下水の流れは地下水面形状のほか地質条件によって決まる(図-5⁵⁾)。

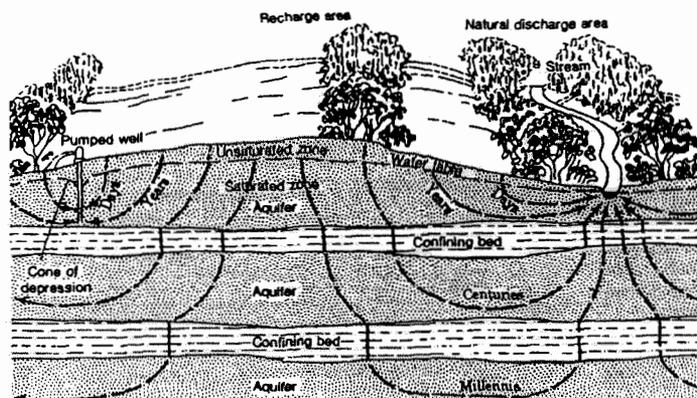


図-5 滞留時間を異にする地下水流動系のあり方を示す模式図 (Engelen and Kloosterman, 1996⁵⁾)

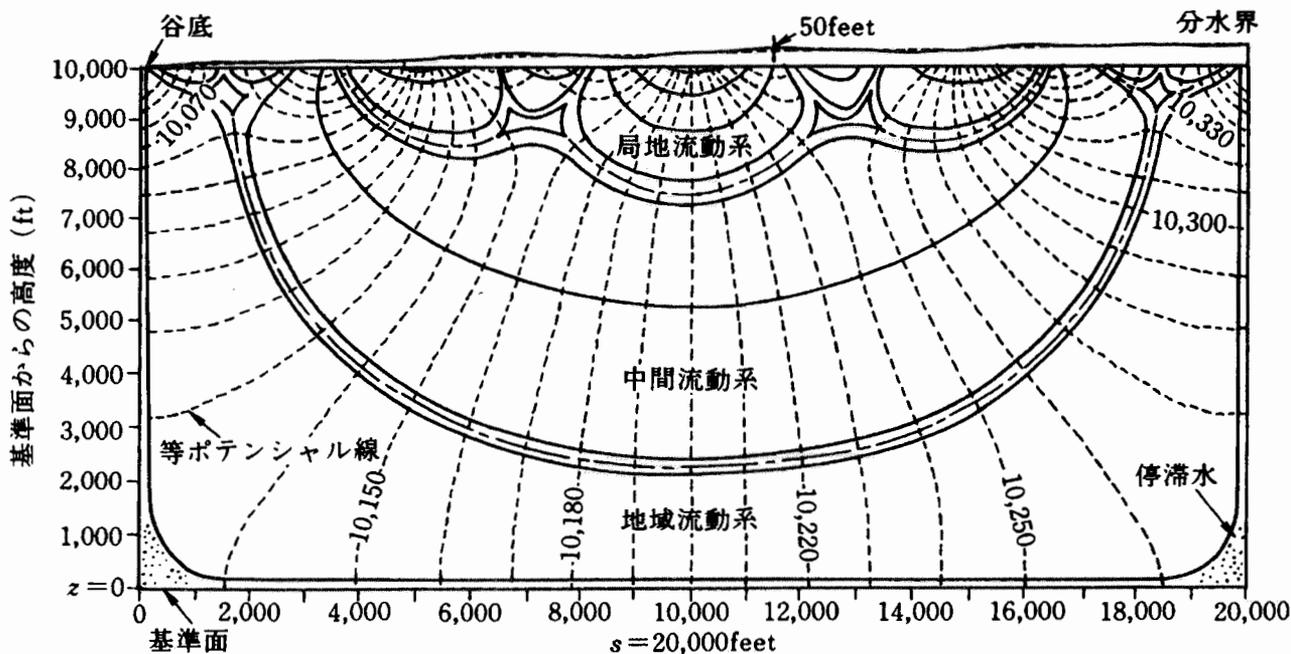


図-4 地下水面に起伏のある場合の流線³⁾

3. 首都圏の水文観測態勢と関連データの現状

地下水流動系の実態把握には、現在まで（過去）の地下水挙動の把握が必要である。通常、過去の地下水挙動は「水循環に係る基礎データの整理」並びに「それら基礎データの加工・分析」を通して把握する。首都圏の水循環に係る基礎データとしては①地盤・地質、②地下水位・地下水水質、③揚水量・地盤沈下量、④気象・水文の各データが想定できる。これらの基礎データは、国及び関連機関並びに地方自治体等で調査・観測・保有されている。ただし、これらについての統一したフォームはなく、それぞれが独自の形式で整理されているのが現状である。近年、これらの情報の電子化が進みデータベース等が構築されているが、全体の一部分をカバーするのみであり、これら基礎データの体系的な整理と電子化（データベース化）が緊急の課題となっている。

3-1 各省庁、自治体等が所有する地盤・地下水関連データベースシステムの現状

各官庁の地盤及び地下水に関する情報の電子化（データベース化）の現状を表-1に示す。

地盤情報としてJACIC、地質調査総合センター（旧地質調査所）、東京都、千葉県が既に整備済みである。地下水位、地盤沈下量情報のデータベース化は茨城県、栃木県を除く各自自治体で各々整備されているが、地下水位、揚水量、地盤沈下量、水準測量のすべてをカバーしてはいない。

以下、主要な基礎データについて、その要点を記す。

(1) 地盤・地質

① 国交省と関連機関の基礎データとデータベース

- a. 国土数値情報
 - ・ 国交省HP (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) からGISデータがダウンロード・利用できる。
 - b. 既往国土調査データ（旧国土庁データ）
 - ・ 国交省HP (<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/index.htm>) からこれまでの国土調査データ（地下水マップや全国深井戸資料台帳のGIS化データ）がダウンロード・利用できる。
 - c. JACIC 管理のデータベース（TRABIS）
 - ・ 国交省関連の事業に伴うボーリング調査データのデータベース化が行われている。
- ② 経産省他官公庁の基礎データとデータベース
 全国深井戸資料台帳は、地質調査総合センターのデータベース「いどじびき」にも登録してある。
- ③ 地方自治体所有の基礎データとデータベース
 東京都と千葉県のデータベースの活用がポイントになる。千葉県のデータはHP (<http://www.pref.chiba.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>) からダウンロード・利用可能である。データベース化の行われていない地域については、補足的に地盤・地質データの収集・整理が必要になる。
- ④ その他
 地形データ等については、国土地理院の数値地図などが利用できる。

(2) 地下水位・地下水水質

- ① 国交省関連機関（地下水技術協会、鑿井協会など）のデータ
 地下水水質年表と地下水位年表の電子化が必要である。また、地質調査総合センターの「いどじびき」の活用も考慮する必要がある。

表-1 官庁別の基礎データの整理及びデータベース化の現状（文献6）中の表を加筆修正）

官庁別 基礎 データ項目	国交省関連 (含国土地理院及び旧国土庁)	経産省、農水省、気象庁	地方自治体（都・県・市）
① 地盤・地質	①GISデータとして国土数値情報が利用可能である。 ②国土調査データとして「全国深井戸資料台帳」には約10,000本（1998当時）の井戸ボーリングデータが収録されている。 ③JACICの「TRABIS」に、約12,000本（関東地整管轄、1998当時）のボーリング柱状図、土質データ等の地盤データがデータベース化されている。 ④国土地理院の「50mメッシュ標高データ等の数値地図」があり利用可能である。	①地質調査総合センターの「いどじびき」に約80,000本（1998当時）のボーリングデータがデータベース化（デジタル化）されている。なお、千葉県はHP上からダウンロード・利用可能である。 ②国土地理院の「50mメッシュ標高データ等の数値地図」に、全国深井戸資料台帳のデータを含んでいる。	①東京都及び千葉県では50,000本以上（1998当時）のボーリング柱状図及び土質試験データのデータベース化（デジタル化）を終了している。なお、千葉県のデータはHP上からダウンロード・利用可能である。 ②横浜市、川崎市発行の地盤図集に5,000本以上（1998当時）のボーリング柱状図、土質試験データが収録されている。
② 地下水位・地下水水質	①「地下水位年表」に約280箇所の日井戸水位データが収録されている。 ②「地下水水質年表」に約40箇所の井戸の水質調査データ（年2回）が収録されている。	①地質調査総合センターの「いどじびき」に、鑿井時の簡易水質がデータベース化（デジタル化）されている。	①東京都、千葉県、埼玉県、川崎市では地下水位データのデジタル化を行っている。なお、千葉県の最新データはHP上からダウンロード・利用可能である。 ②地下水水質は各自自治体より年1回報告書が発行されている。
③ 揚水量・地盤沈下量	①毎年の水準測量データは、国土地理院の「地盤高図」に収録されている。	①農水省の「農業用地下水利用実態調査報告書」に農業用地下水揚水量が報告されている。	①東京都、千葉県、埼玉県、川崎市、群馬県で地盤沈下データのデジタル化を行っている。なお、千葉県の最新データはHP上からダウンロード・利用可能である。 ②川崎市は揚水量データのデジタル化も行っているが、その他の自治体では毎年、地盤沈下報告書として報告している。
④ 気象・水文	①「流量年表」と「雨量年表」に約40箇所の日河川流量、日雨量データが収録されている。 ②両者ともに、最近のものからデジタル化が行われており、一部は水文水質データベース（国交省HP）からダウンロード・利用可能である。	①気象庁の「気象庁年報」、「アメダス観測年報」の雨量データがデジタル化され、HPからダウンロード・利用可能である。	—

② 地方自治体所有の基礎データとデータベース
東京都、千葉県、埼玉県（及び川崎市）については、地下水位の電子化が行われているのでその利用が可能である（ただし、地下水位年表のデータと重複する部分がある）。なお、千葉県の最新のデータは HP (<http://www.pref.chiba.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>) からダウンロード・利用可能である。地下水位データの電子化の行われていない地域については、補足的に地下水位データの収集・整理が必要になる。なお、地下水水質データについては全域について電子化のための作業が必要である。

(3) 揚水量

- ① 地方自治体所有の基礎データとデータベース
唯一の川崎市を除き、各都県ともに揚水量データの電子化は行われていないので、補足的に揚水量データの収集・整理が必要である。
- ② 農水省とりまとめの揚水量データ
農業用水については、関東農政局が実施した農業用地下水利用実態調査報告書に基づいた整理（と電子化）が必要である。

(4) 地盤沈下量

- ① 地方自治体所有の基礎データとデータベース
東京都、千葉県、埼玉県、群馬県（及び川崎市）については、地盤沈下量データの電子化が行われているのでこれの利用が可能である。なお、千葉県の最新のデータは HP (<http://www.pref.chiba.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>) からダウンロード・利用可能である。地盤沈下量データの

電子化の行われていない地域については、補足的に観測データの収集・整理が必要である。

② 国土地理院のデータ

これまでのところ、電子化の実態把握ができていないが、状況によっては水準測量データ（地盤高図）のデータベース化が必要である。

(5) 気象データ

- ① 国交省関連機関（河川協会）とりまとめのデータ
最新のものは、国交省 HP (<http://www1.river.go.jp/>) からダウンロード・利用可能である。古いものは雨量年表データを（電子化して）利用することになる。

② 気象庁のデータ

電子化されており、気象庁 HP (<http://www.data.kishou.go.jp/>) からのダウンロードを含め、そうしたデータの利用が可能である。

(6) 水文データ（河川水位・河川流量）

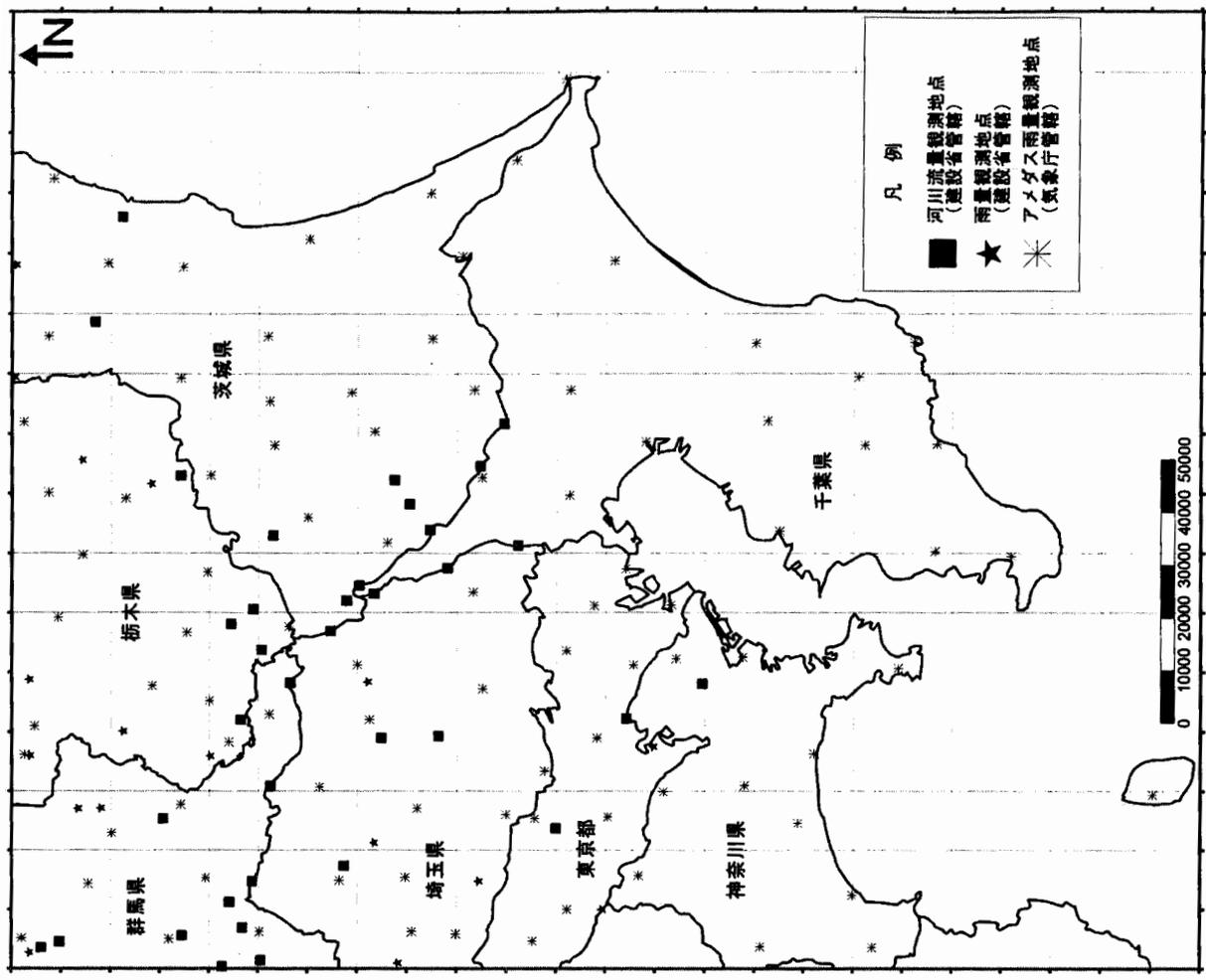
- ① 国交省関連機関（河川協会）とりまとめのデータ
最新のものは、国交省 HP (<http://www1.river.go.jp/>) からダウンロード・利用可能である。古いものは流量年表データを（電子化して）利用することになる。

3-2 各都県別の観測態勢現状

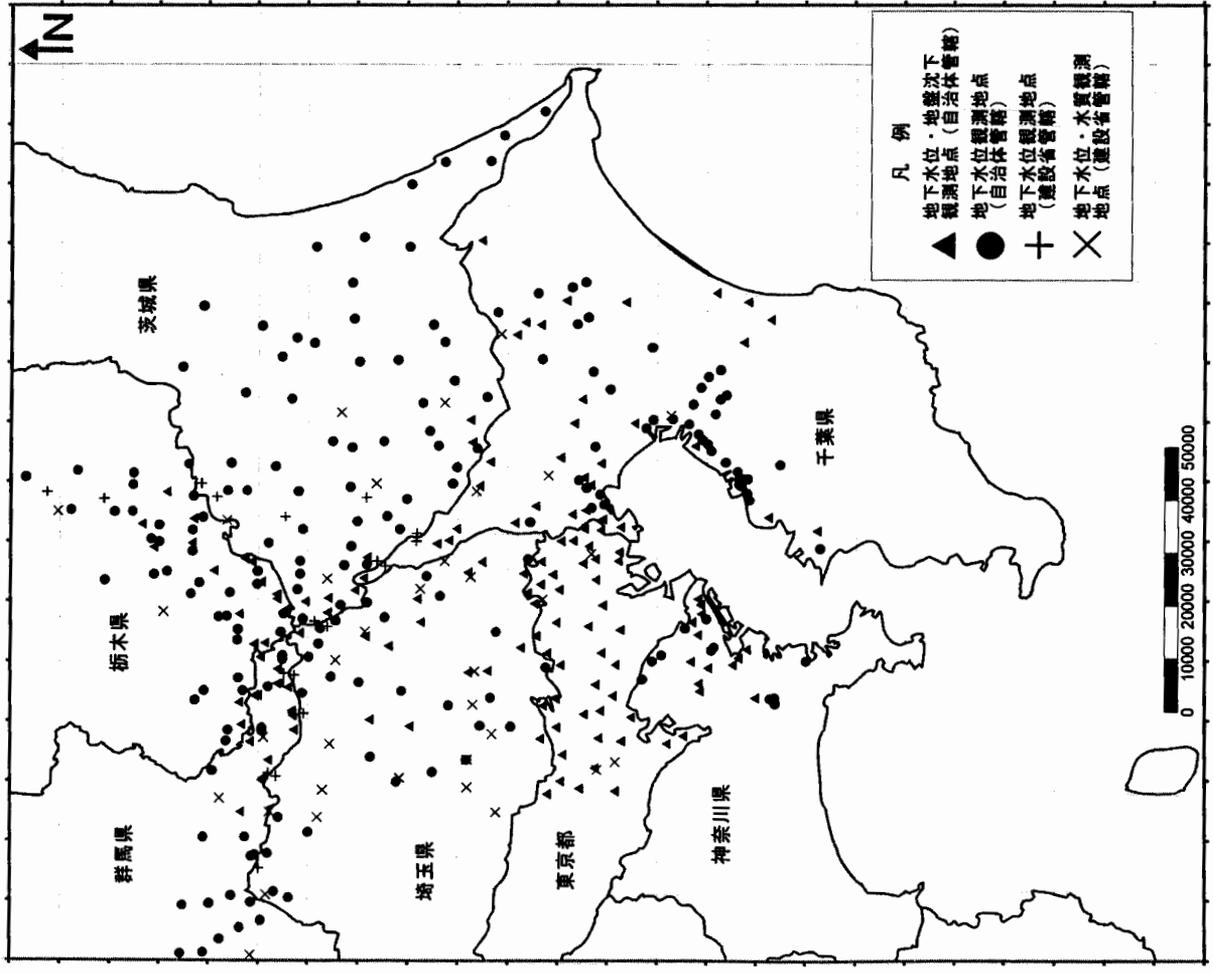
地下水位や地盤沈下量など基礎データの観測点数を、都県ごとに表-2に示す。また、主要な観測点の位置を図-5及び図-6に示す。

表-2 各都県における基礎データの観測点数（1998年当時）⁶⁾

観測項目	ボーリング			地下水位		地下水水質		地盤沈下		水準測量			雨量			河川水位(流量)	
	建設省	国土庁	自治体	建設省	自治体	建設省	自治体	建設省	自治体	国土地理院/自治体	建設省	気象庁	自治体	建設省	自治体		
都 県	東京都	1,318	3,092	55,000	10	104	5	(122)	—	92	—	—	2	15	—	2	—
		59,410			114		(127)		92		781			17			2
	埼玉県	1,656	1,251	—	24	69	17	(156)	—	32	—	—	5	14	—	5	—
		2,907			93		(173)		32		845			19			5
	千葉県	1,799	2,121	—	6	126	4	(279)	—	53	—	—	0	17	—	5	—
		3,920			132		(283)		53		1,408			17			5
	神奈川県	1,264	1,166	5,504	2	32	0	(207)	—	13	—	—	0	11	—	1	33
		7,934			34		(207)		13		1,429			11			34
	茨城県	2,771	1,354	—	12	70	5	(98)	—	13	—	—	3	23	—	8	—
		4,125			82		(103)		13		341			26			8
	栃木県	946	811	154	4	94	2	(135)	—	23	—	—	11	22	—	7	—
		1,911			98		(137)		23		191			33			7
	群馬県	640	831	—	8	35	5	(156)	—	16	—	—	17	23	—	15	—
		1,471			43		(161)		16		202			40			15
	合計	10,394	10,626	60,658	66	530	38	(1153)	—	242	—	—	38	125	—	43	33
		81,678			596		1,191		242		5,197			163			76
備考	ボーリング柱状図の取りまとめなどにより体系化されている本数を標記			地盤沈下観測井を兼ねている井戸も含む		括弧書きは環境健康基準項目の測定結果		—		各自治体では国土地理院実施のデータも一括して公表			気象庁の欄にはアメダス観測点数を記載			—	



図一6 雨量及び河川流量観測点位置図 (地下水技術協会, 1998⁶⁾ 原図)



図一5 地下水位・水質・地盤沈下観測井位置図 (地下水技術協会, 1998⁶⁾ 原図)

4. 関東平野規模の広域地下水流動把握の現状とその課題

本報は主に首都圏都心部の地下水上昇問題を中心課題に取り上げるものであるが、この比較的狭域での地下水動態も元をたどれば関東平野規模の巨大な地下水流動系に支配されたものと考えられ、そうした広域地下水流動の動態把握が不可欠になる。関東平野全域を念頭に置いた場合の広域地下水流動把握の現状と課題を以下に要約する。

4-1 広域の地形・地質概要

林ほか(2003)⁷⁾による関東平野の地形分類図を図-7に示す。地形区分は国土数値情報の土地分類メッシュを用い、山地域内の地形分類は簡略化して作図したもので、平野部の地形を丘陵、台地、低地に区分している。丘陵は、房総半島を除いて平野の周縁部のみ見られる。台地は広範囲に分布し、平野の東部には下総台地や常陸台地、西部には武蔵野台地などが広がる。また低地は、これらの台地や丘陵地を開析して流れる利根川や荒川、中川などの河川沿いに形成されている。とくに平野の中央部には、大規模な低地として加須低地や中川低地が発達する。

関東平野の主要部を構成する堆積層群は下位から三浦層群相当層(中新世～前期鮮新世)、上総層群相当層(後期鮮新世～前期更新世)、下総層群相当層(後期更新世)に大別される。下総層群相当層の上位には、低地部では沖積層が、台地や丘陵地ではローム層が堆積している(鈴木, 2002⁸⁾)。これらの地層群の堆積構造は複雑である。堆積層群は全体として盆地状の構造をなしており、層厚は最大で4,000mを超えると推定

されている。平野中央部は堆積環境が海域から陸域へ移行する地域であり堆積物の種類や連続性に大きな差異がみられるため、これらの地層群の堆積年代や層序学的な連続性および境界については、現在もさまざまな見解が示されている。同様に、地層群の水理地質的な区分においても、広域での区分はいまだなされておらず今後の研究が待たれる現状にある。

4-2 地下水揚水量

後に地下水ポテンシャルとの関係を考える上で重要となることから地下水揚水量の近年の変化について簡単に述べる。東京・埼玉・千葉の1都2県に限るが、三宅(2000)⁹⁾による揚水量整理結果を図-8, 9に示す。図-8は自治体資料(埼玉県;地盤沈下調査報告書, 千葉県;環境白書, 東京都;環境保全局資料)から求めた単位面積あたりの揚水量で、それぞれの対象としている用途は、埼玉県:水道用, 建築物用, 工業用で農業用は含まない, 東京都:工場用, 指定作業場用, 上水道用(農業用も含む)が対象, 千葉県:工業用, ビル用, 水道用, 農業用, その他, であり、これら以外の統計に現れない揚水, 地下鉄道や下水道などへの漏水, 地下工事時の排水などは含んでいない。

一方図-9は、埼玉県中央部・東部・北東部地区、千葉県東葛・葛南地域のほか、東京城北・江東・都心・城南地域の揚水量および合計揚水量を示している。揚水の用途は、東京都, 埼玉県, 千葉県とも前述のとおりである。これらのうち東京4地域の各揚水量および合計揚水量は埼玉県, 千葉県のそれらに比べて少なく、しかも1984年以降はほぼ一定である。

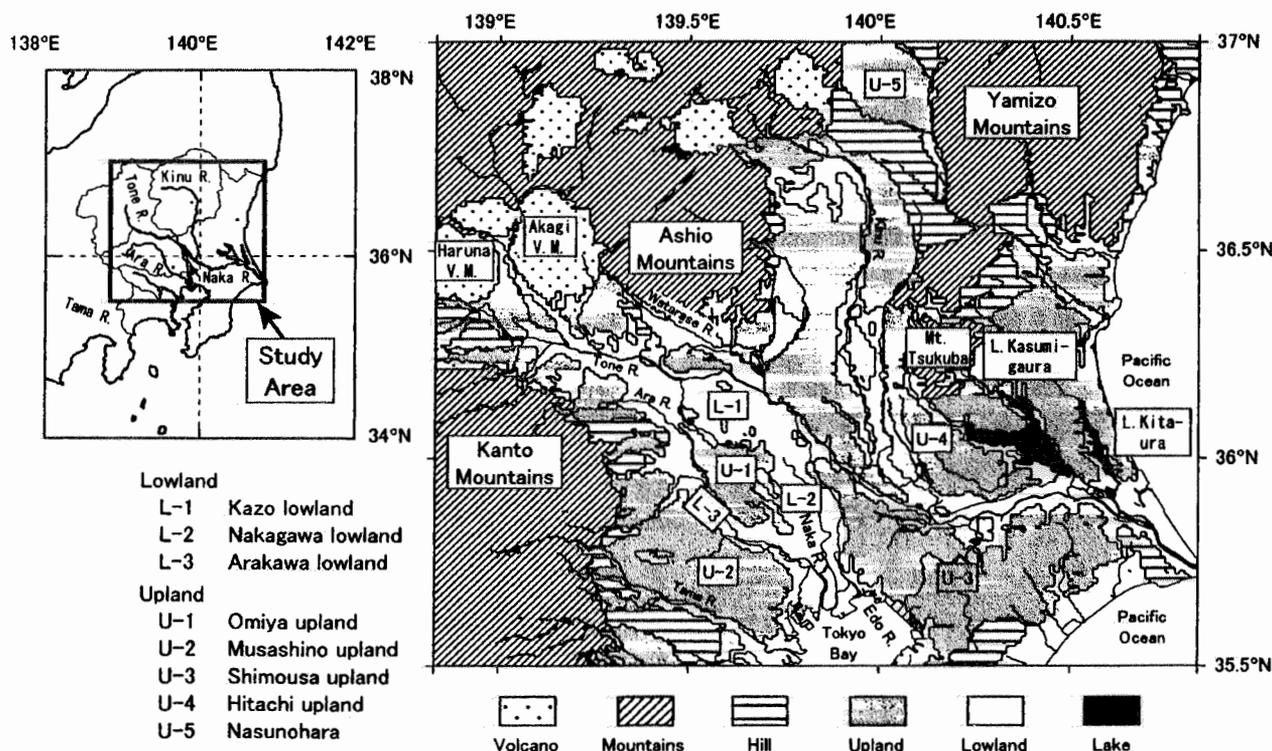


図-7 関東平野の地形区分図(林ほか, 2003⁷⁾)

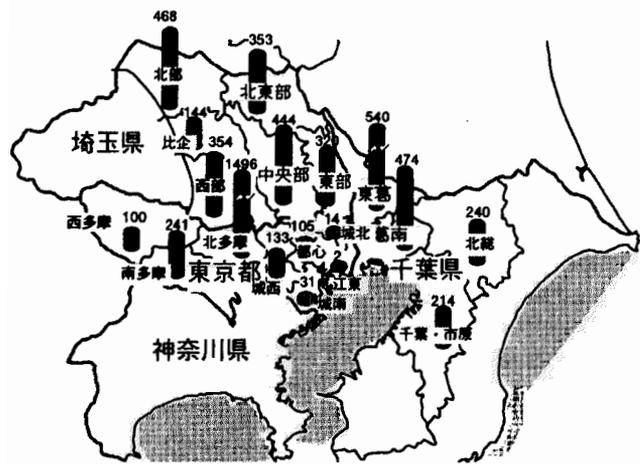
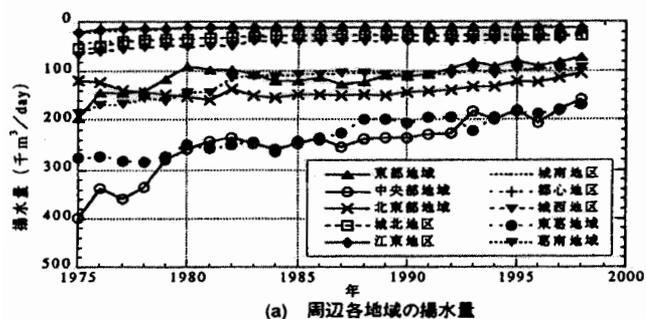


図-8 1992年単位面積あたりの地下水揚水量⁹⁾
(単位: $\times 10^{-3}$ mm/day)



(a) 周辺各地域の揚水量



(b) 周辺地域ごとの合計揚水量

図-9 周辺地域揚水量の経年変化⁹⁾

4-3 地下水ポテンシャル

(1) 関東平野全域の地下水ポテンシャル

林ほか(2003)⁷⁾による関東平野全域の地下水ポテンシャル分布を図-10に示す。図は、地表面下50~100m深度にスクリーンを持つ観測井の、1994~1998年間の平均水位に基づいて作図したもので、地下水ポテンシャルは、平野北西部(利根川中流域)、北東部(鬼怒川中流域)及び南西部地域(武蔵野台地)で高く、平野中央部で低い。なお、平野中央の低水頭域は加須~中川低地帯にとどまらず、その周辺の台地域(大宮大地、常陸台地西部、下総台地北西部)まで及んでいる。断面ポテンシャル図(図-12,13)によればこの低水頭ゾーンは標高-100以深-300m付近にまで達している。

(2) 首都圏の地下水ポテンシャル

三宅(2000)⁹⁾による首都圏の100mより深い(深部)帯水層の地下水ポテンシャル平面分布は図-14の

とおりである。対象帯水層が深いため使用したデータには低地部のほか台地部を含む。特徴などは次のとおりである。

埼玉県北東部・中央部・東部、千葉県東葛地区で水頭が低く、これらの地域に向かう地下水流動が示唆される。埼玉県・千葉県の低水頭地域では浅部(後出の図-24)と比較すると、深部の水頭がかなり低い。

図-8と比較すると、水頭の低い地域では揚水が顕著であり、これが水頭低下を招いていることは明らかである。図-8と図-14を合成したものを図-15に示す。これによれば、TP-18mより低い深部帯水層地下水頭ゾーンは埼玉県北東部・東部・中央部、さらには千葉県東葛・葛南における大量の地下水揚水の影響を強く受けていることを示唆している。ただし、これらの地域でも揚水量と水頭低下ゾーンは必ずしも対応していない。

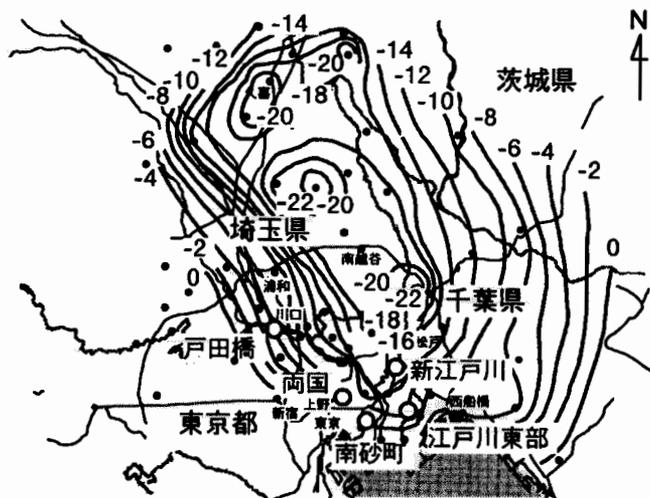


図-14 1992年100m以深の地下水分布⁹⁾
(単位: T.P. m)

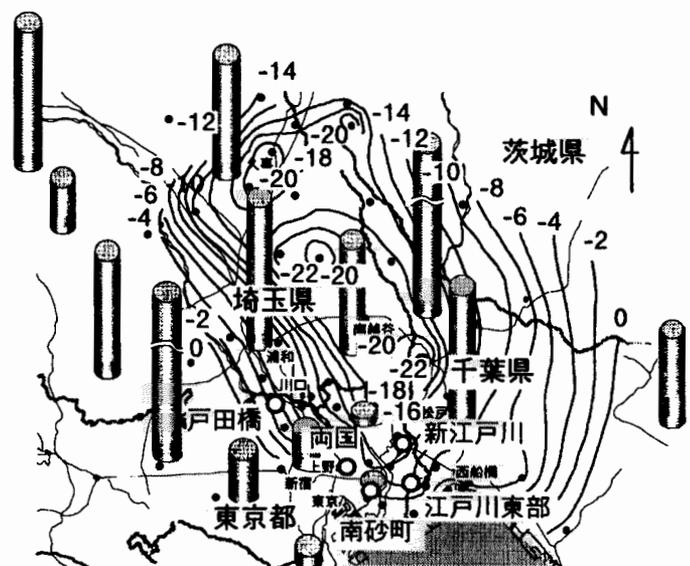


図-15 1992年100m以深の地下水分布と⁹⁾
地域揚水量の関係(単位: T.P. m)

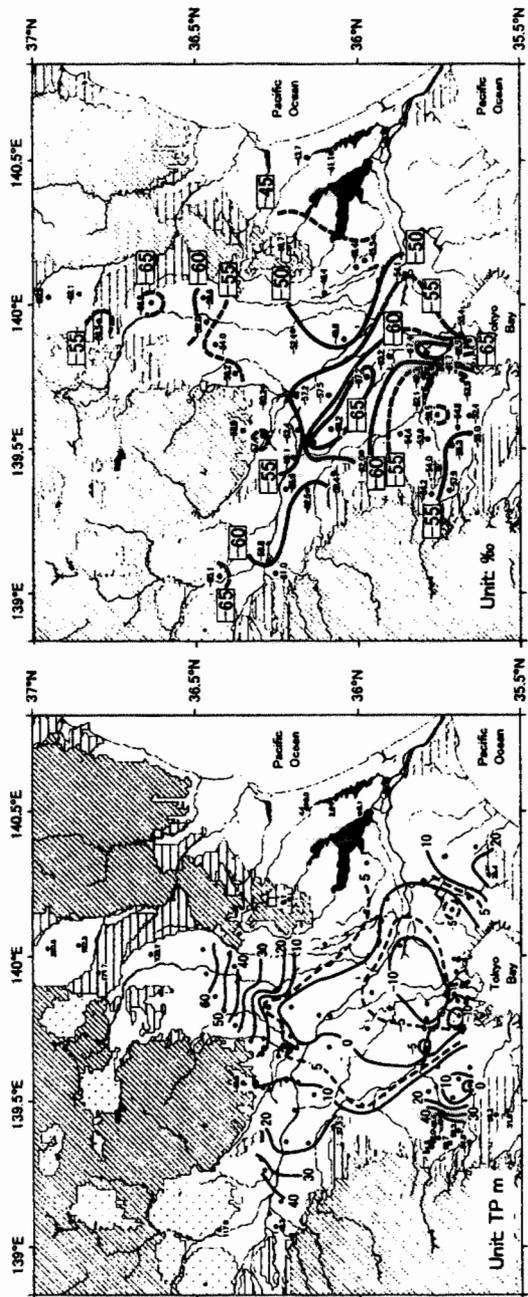


図-10 関東平野の地下50~100m間地下水のポテンシャル分布(左図)と δD (右図) 7)

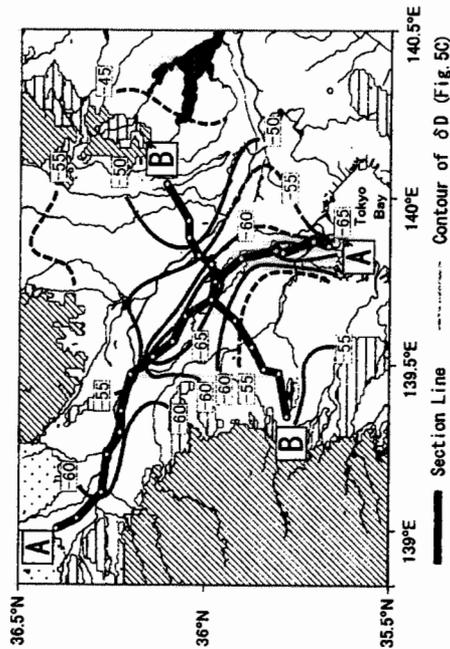


図-11 断面線位置図(図-12,13に係る断面) 7)

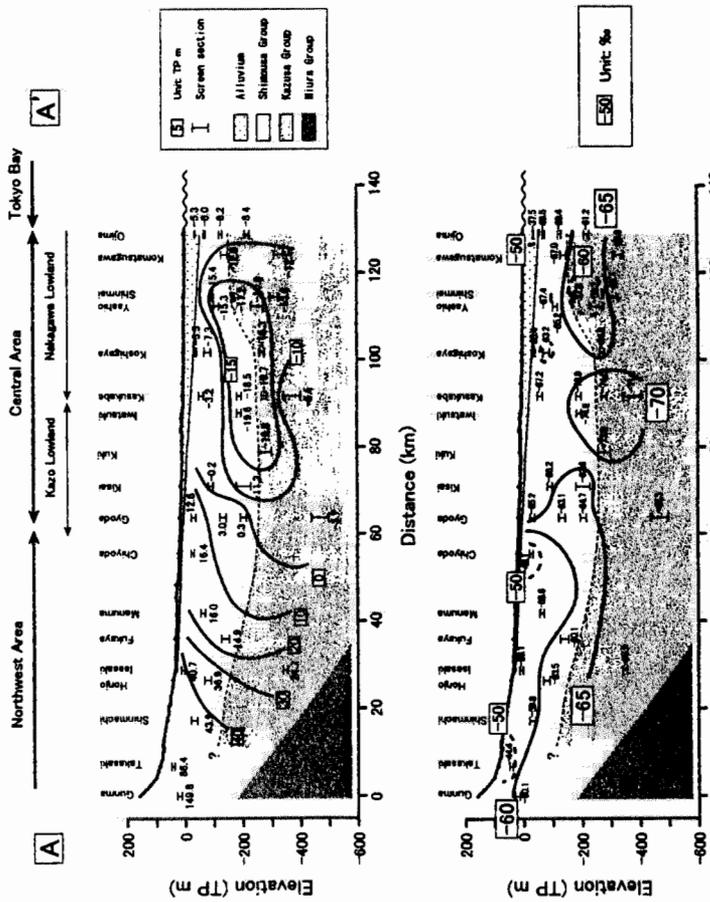


図-12 A-A断面のポテンシャル分布(上図)と δD (下図) 7)

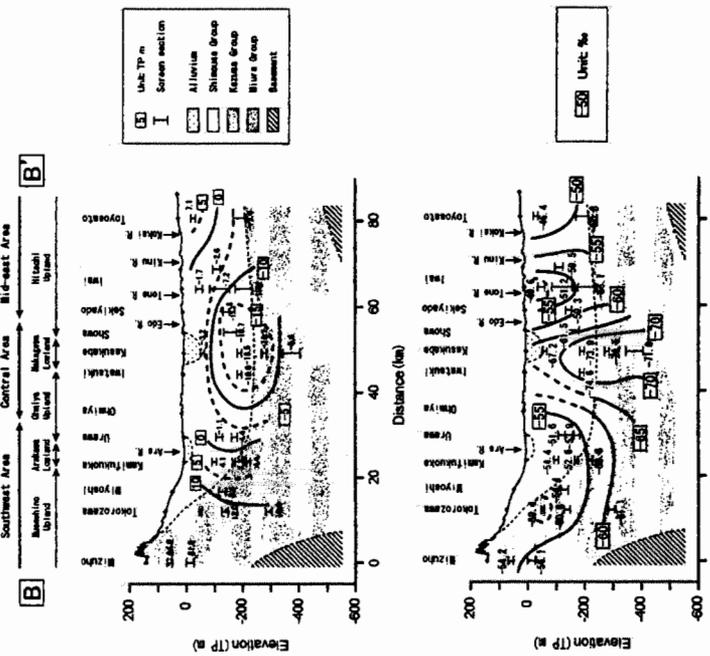


図-13 B-B断面のポテンシャル分布(上図)と δD (下図) 7)

4-4 水質・同位体組成からみた関東平野の地下水流動

林ほか(2003)⁷⁾による関東平野全域の δD 分布(採水は1999年10月~2001年11月)を既出の図-10~13に併せて示した。低水頭域の比較的浅部から深部に渡って、低同位体比の地下水が存在し、極めて特徴的である。図-16¹⁰⁾に示すように、特に-70%以下の同位体比を持つ地下水涵養源は西方山地の地表水にほぼ限られており、現在の地下水ポテンシャル分布から推定される地下水流動とは異なった、より広域の地下水流動系の存在を強く示唆している。なおここへの紹介は省いたが、同位体組成と一緒に調査した水質組成に関しても、沿岸域の海水の影響等を勘案する必要はあるが、同位体組成から読み取れる地下水流動に調和的な結果であることが報告されている。

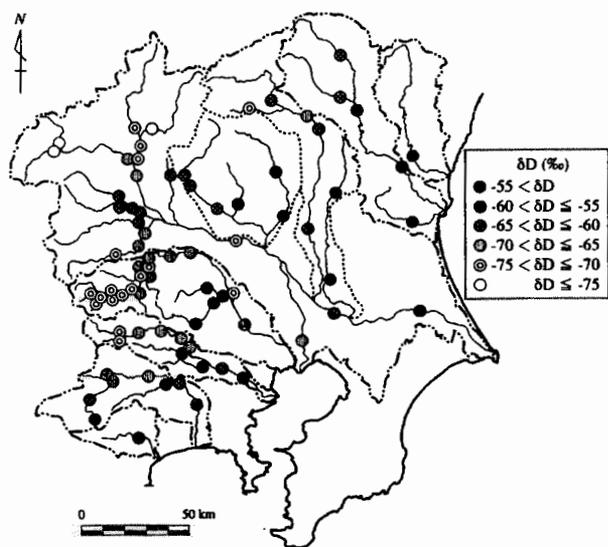
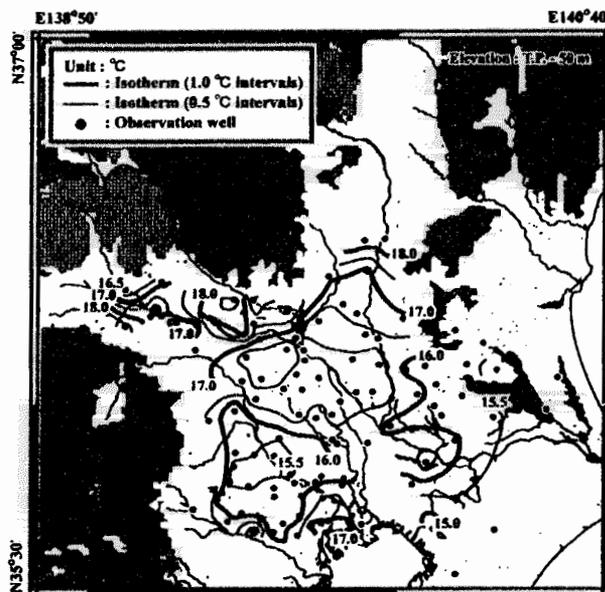


図-16 2002年3月の河川水の δD 分布¹⁰⁾

4-5 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動

宮越ほか(2003)¹¹⁾による地下温度分布調査(1999年10月~2002年2月)の結果(一部)を図-17~18に示す。浅部地下温度(図-17(a))の低温域が地下水涵養域、深部地下温度(図-17(b))の高温域が流出域と考えられ、それぞれ、周辺域や台地が涵養域、平野中央部と東京湾沿岸域が流出域に対応する。この結果は、地下温度プロファイルの分布特性(図-18)にも合致・整合する。また、先に述べた同位体組成から読み取れる地下水流動にも調和的な結果であり、ともに、現在の地下水ポテンシャル分布から推定される地下水流動とは異なる、より広域の地下水流動系の存在を強く示唆している。



(a) TP-50m 深度

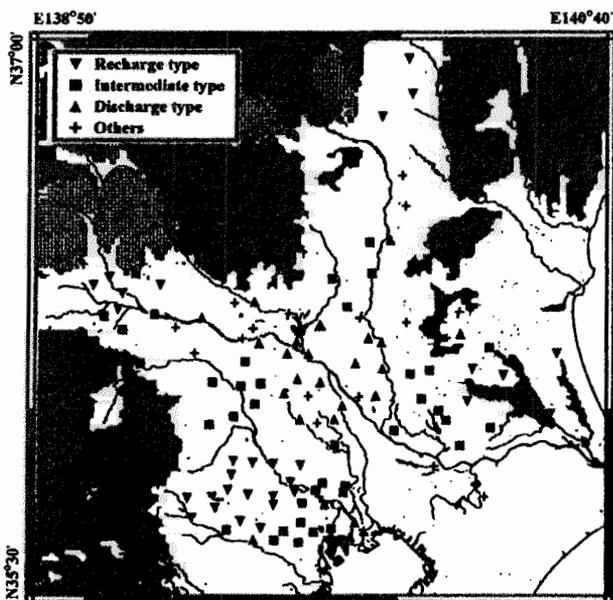
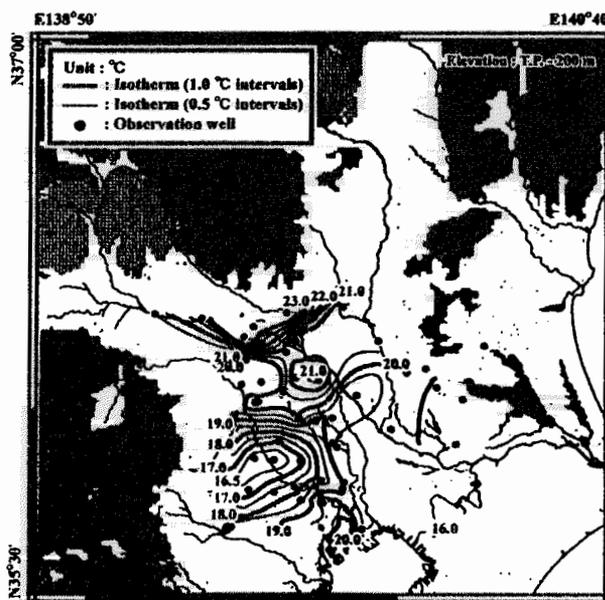


図-18 地下温度プロファイルの分布特性¹¹⁾



(b) TP-200m 深度

図-17 地下温度分布等値線¹¹⁾

4-6 水収支解析による地下水流動系評価

斎藤・三宅 (2003)¹²⁾ は、関東平野南西域に相当する多摩川流域並びにその北東に隣接する武蔵野台地上小流域 (図-19) の水収支検討を行った。この結果、①多摩川流域 (の主に河床部) から河川水が平均数 m^3/s 規模で (流域外に) 地下水流出している (図-20(a)), ②その多くは深部帯水層に流入し首都圏沖積低地下に流下すると考えられるが、一部 ($1 \sim 2 m^3/s$ 程度) は隣接する武蔵野台地上小流域に流入・流出している可能性がある (図-20(b)) ことが判明した。

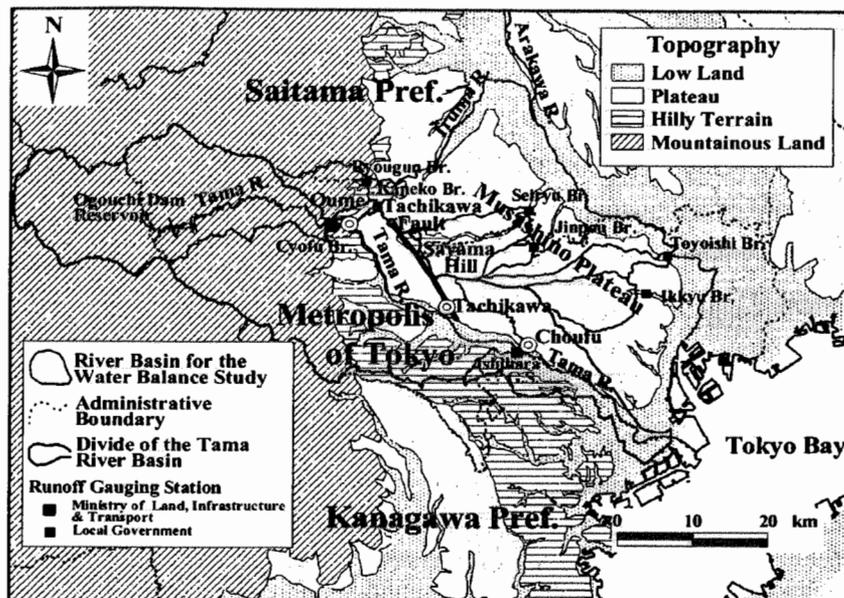
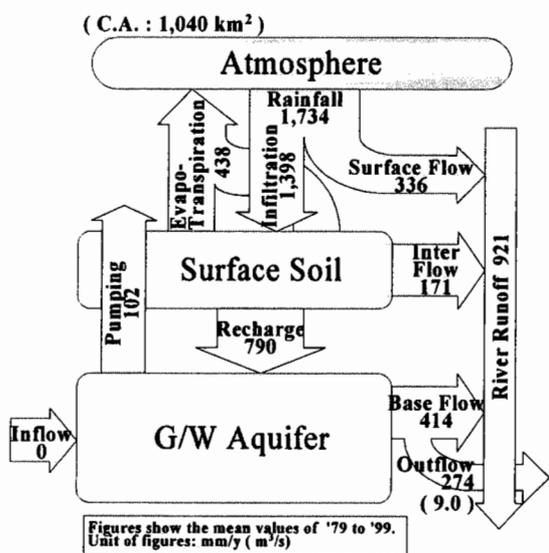
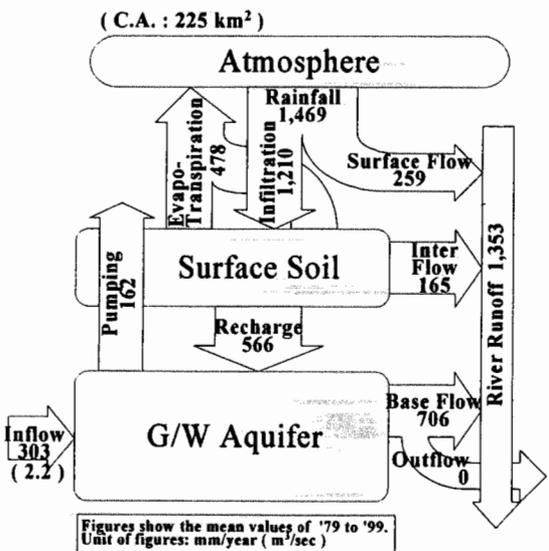


図-19 水収支解析対象流域¹²⁾



(a) 多摩川(石原地点)流域の水収支



(b) 隣接武蔵野台地小流域の合計水収支

図-20 水収支解析結果¹²⁾

なお、多摩川流域から流域外の隣接武蔵野台地小流域へ地下水が流出している可能性は、既往の研究成果に基づいた不圧地下水面分布 (図-21) からも合理的に予察可能である。

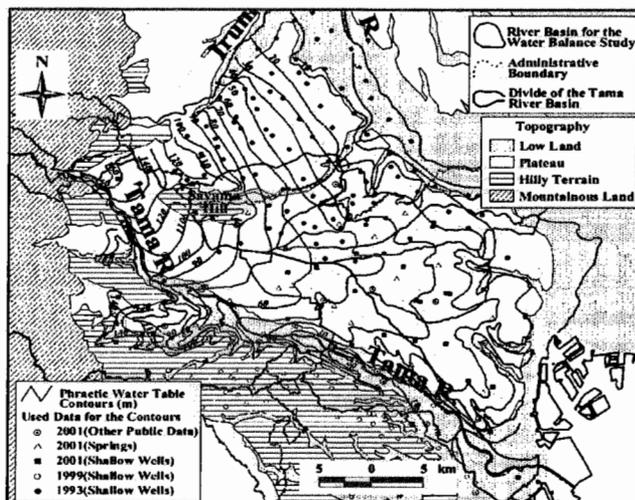


図-21 多摩川流域及び武蔵野台地の不圧地下水面分布¹²⁾

このように水収支解析は、地下水ポテンシャルや同位体調査といった流動の指標となる要素の調査とともに、地下水流動系の評価にあたり有効かつ重要である。

4-7 関東平野の広域地下水流動把握に係る課題

(1) 地下水ポテンシャル分布と地下地質構造の関係

深部（100m 以深の）帯水層の地下水ポテンシャル分布が必ずしも揚水量を反映していないことを先に述べたが、その理由として以下の三つが考えられる。

- ① 地域により帯水層の地下水賦存量に差異があるため揚水による地下水低下量も異なる、
- ② 統計値が不確かである、
- ③ 地盤構造により地下水の流動形態が地域により違う。

このうち、①は堆積環境から判断すれば、このように狭い範囲での差異は考えにくい。②については現時点では如何ともし難い。③については、角田¹³⁾が関東平野において撓曲や活断層、基盤断層の分布図を提示している。三宅⁹⁾はそれを参考に図-22 を作成した。これによれば、明らかに地盤構造と深部地下水の低下ゾーンとの間に関係が認められ、このことは角田¹³⁾も指摘している。従って、深部地下水は地盤構造によって影響を受け、必ずしも地域揚水量の影響を直接的には受けないといえる。

筆者らの最終目標である地下水の適正管理の達成過程では、地域揚水量に対する地下水ポテンシャル変化を正確に予測できる必要がある。すでにのべたように関東平野全体として、地層群の堆積年代や層序学的な連続性あるいは地層群の水利地質的な区分についても確定されたものはないのが現状であり、これらに関する答えを得ることが喫緊の課題と言えよう。

(2) 関東平野全域を対象とした水収支解析

前節では関東平野南西域を対象にした水収支解析例を示しその有効性を述べたが、関東平野全体からみれば検討対象範囲はごく狭いものに限られる。関東平野規模の地下水流動系の把握には、多摩川流域とそれに隣接する小流域以外についても広域的な観点から水収支を検討する必要があり、かつその実現が重要な課題である。

5. 首都圏都心部における地下水上昇問題

5-1 首都圏都心部の浅部地下水の動態変化

(1) 東京における地下水変化の測定例

東京の被圧地下水の水頭測定は、以前から東京都土木技術研究所によって長期間にわたり精力的に行われており、平成 7 年 10 月現在、都内各地における地下水位の測定は 42 地点 104 の観測井で実施されている。

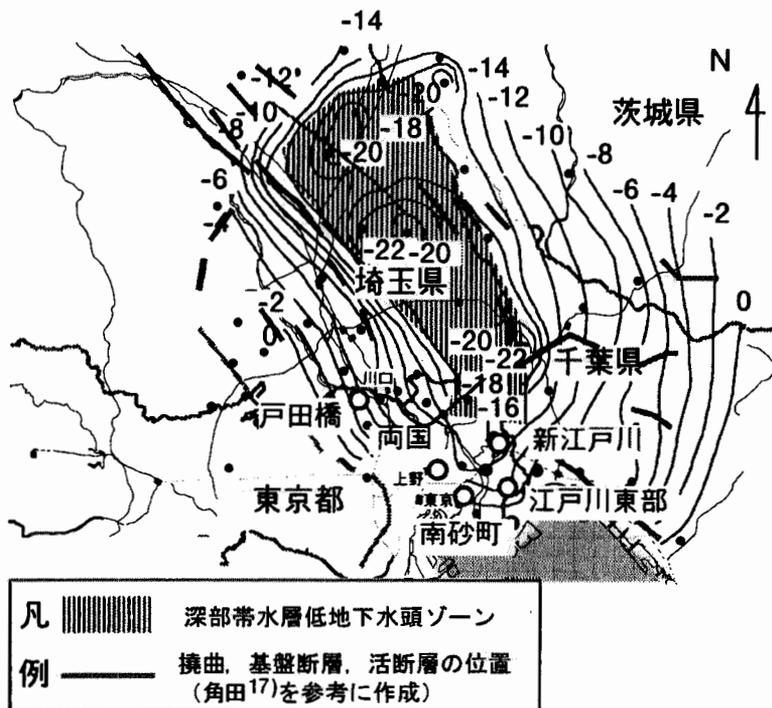


図-22 地盤構造と地下水分布の関係⁹⁾

各地点の測定結果は毎年報告されており、図-23⁹⁾はその例である。この図などから読みとれる特徴をまとめると次のようになる。

- ① 地盤沈下は昭和 40 年代半ばまで継続し、後半に落ち着き、その後ややリバウンドしている。
- ② 揚水規制はまず昭和 40 年代初め前後に行われたが、その後の地下水頭の回復が不十分なため、昭和 45~50 年間に再度規制をかけたところ、十分な回復が得られている。
- ③ 両国の平成 9 年は付近の局所的な揚水の影響で地下水が一時的に低下した可能性がある。
- ④ 場所によって 30~40m もの上昇がある。

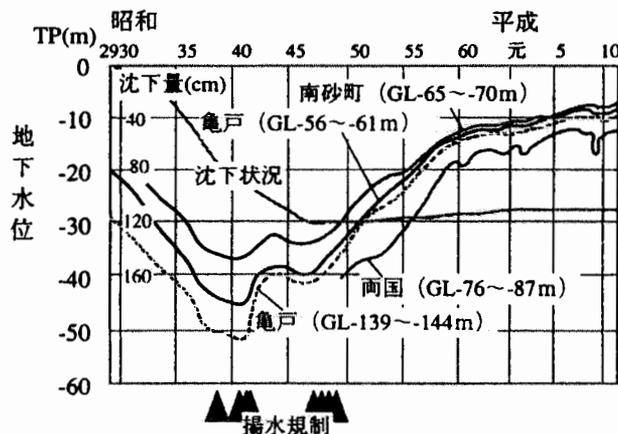


図-23 東京都の地下水と地盤沈下の例⁹⁾

(2) 浅部地下水のポテンシャル平面分布

三宅⁹⁾によれば、浅部地下水頭の平面形状は図-24 のとおりである。水頭は埼玉県や千葉県側から東京低

地部に向かって低くなっており、概して地形を反映した形状といえる。ただし、日本橋、両国、亀戸付近がTP-14m以深と最も低い。



図-24 1992年100m以浅の地下水分布⁹⁾
(単位: T.P.m)

(3) 浅部被圧地下水頭と周辺揚水量の関係

100m以浅の浅部被圧地下水分布(図-24)と周辺揚水量(図-8)の関係をみると、最も水頭の低い都心部での揚水量は極めて少なく、付近揚水との関係はほとんどない。従って、埼玉県や千葉県の上記5地域による影響や、用いた資料に現れない揚水あるいは漏水など他の原因がありえ、その解明が課題となる。

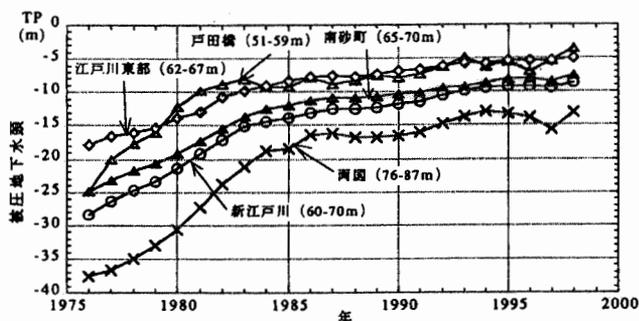


図-25 東京都沖積低地被圧水頭の経年変化⁹⁾
注) ()内はスクリーン位置

図-25は、図-24に示す水頭観測地点における浅部帯水層の被圧水頭経年変化である。観測地点はいずれも沖積低地に位置する。また図-23に示す亀戸における浅部と深部の地下水頭変化からも明らかのように、都心部沖積低地における同じ観測地点の浅部・深部の被圧水頭を比較すると、浅部が高いが埼玉県・千葉県のそれと比較して差異は少なく、時系列変化も類似する。従って、都心部沖積低地の浅部・深部地下水はいずれも広域的な揚水の影響で変化するとみなすことができる⁹⁾。

(4) 浅部被圧地下水頭の上昇予測

1976~1994年を対象に、南砂町・江戸川東部、お

よび新江戸川・戸田橋の被圧水頭と埼玉県北東部・東部・中央部、および千葉県東葛・葛南の5地域合計揚水量との関係を、図-26(左図)に示す。図は、東京の揚水4地域は、揚水量および経年変化から被圧水頭への影響は小さいと判断し除外して作図したものである。各測点とも下方(右側)から上方(左側)に連続的に変化しており、揚水量の減少とともに水頭が上昇すること、戸田橋、その他の3地点でそれぞれ1981年、1984年以後はおおむね揚水量と線形関係にあることがわかる。1981年あるいは1984年より前で線形関係を示さない理由は、揚水規制以降の揚水量減少が顕著で水頭上昇が著しく、広域的にみて年単位では揚水量と水頭がバランスしない状態にあったためである⁹⁾。

戸田橋については1981~1997年、新江戸川・江戸川東部・南砂町では1984~1997年を対象に、各観測地点の被圧水頭と埼玉県、千葉県の上記5地域合計揚水量との関係を図-26(右図)に示す。これによると、1980年代前半~1997年に揚水量が30%程度減少し、被圧水頭は4~5m上昇している。

東京以外の首都圏では、降水量の少ないときに相変わらず地下水に頼る状況が続き、このことが局地的な地盤沈下を招いている。一方、こうした悪循環を防止するため、地下水の代替水源として表流水への転換が促進されている。転換が早く進めば被圧地下水頭の上昇を加速する。図-26(右図)に示す被圧水頭と揚水量の関係を線形とみなして、その回帰線から揚水量が1997年のさらに20%減少した場合の水頭上昇量を求めたものを表-3に示す。これによれば、場所によって異なるが今後さらに3~4m程度の水頭上昇が予測される⁹⁾。

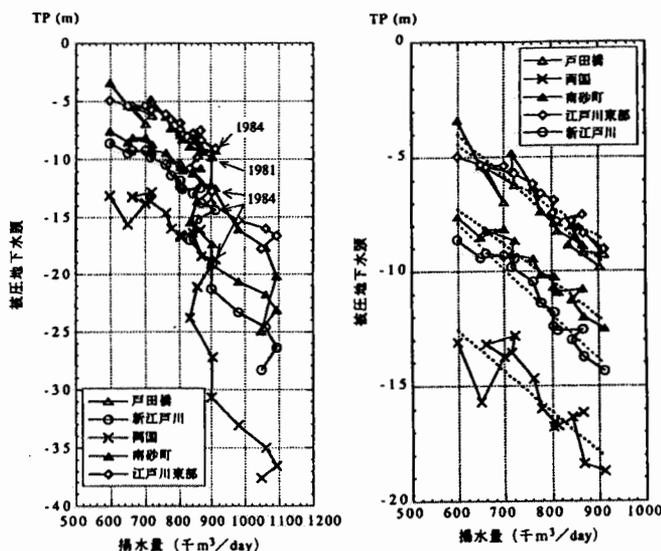


図-26 東京沖積低地の被圧水頭と⁹⁾
周辺5地域揚水量の関係

表-3 揚水量減少に伴う東京沖積低地の被圧水頭予測⁹⁾

(周辺5地域の合計揚水量が平成9年の80%に減少した場合の各地点の予測水頭)

対象地点	被圧水頭予測値 ①	1992年実測値 ②	①-②
戸田橋	TP -2.57m	TP -6.30m	3.73m
両国	TP -11.21m	TP -14.67m	3.46m
南砂町	TP -6.00m	TP -9.45m	3.45m
江戸川東部	TP -3.37m	TP -6.14m	2.77m
新江戸川	TP -6.36m	TP -10.45m	4.09m

5-2 地下水位上昇による建設分野への影響と対策

浅部被圧地下水頭が上昇した場合の建設分野への主な影響は、図-27に示すとおりで、開削地下工事における地下水対策と既存構造物の浮力対策などである。従って、首都圏においては今後、被圧地下水が今後どこまで上昇するかの予測のほか、具体的にこれらにどう対処するのかが重要な課題になる。

図-28は現時点で考えられる個々の現場での対策を示すものである。このうち施工時については対策期

間が短いこともあり、止水壁の根入れ深度増や効率的な排水工法などによる地下水処理、山留め支保工の補強による側圧対策により対応できる。最も厄介なのは完成後の浮力対策で、浮力設計水位を大きくとればそれだけコストも必要になる。設計時に地表面を設計水頭にする考え方もあるが、躯体の重量増で対応する場合はそのためのスペースを確保しなくてはならず、結果的に構造物の利用空間を減少させる。

特に既存構造物で当初設定した設計水位がその後の水頭上昇で不足することもあり、地下駅などインフラ施設で不具合が発生すれば社会的影響も大きい。この場合、講ずることのできる対策は躯体構造によって決まり、複数の対策を併用することもありうるが、いずれにしても容易ではない。構造物ごとの対策には限界があるようにも思える。

なお参考のため、廣瀬ほか(2004)¹⁴⁾が整理した「地下水位上昇対策事例位置」並びに「昭和40年及び平成10年の地下水位東西断面図」を図-29及び図-30に示す。

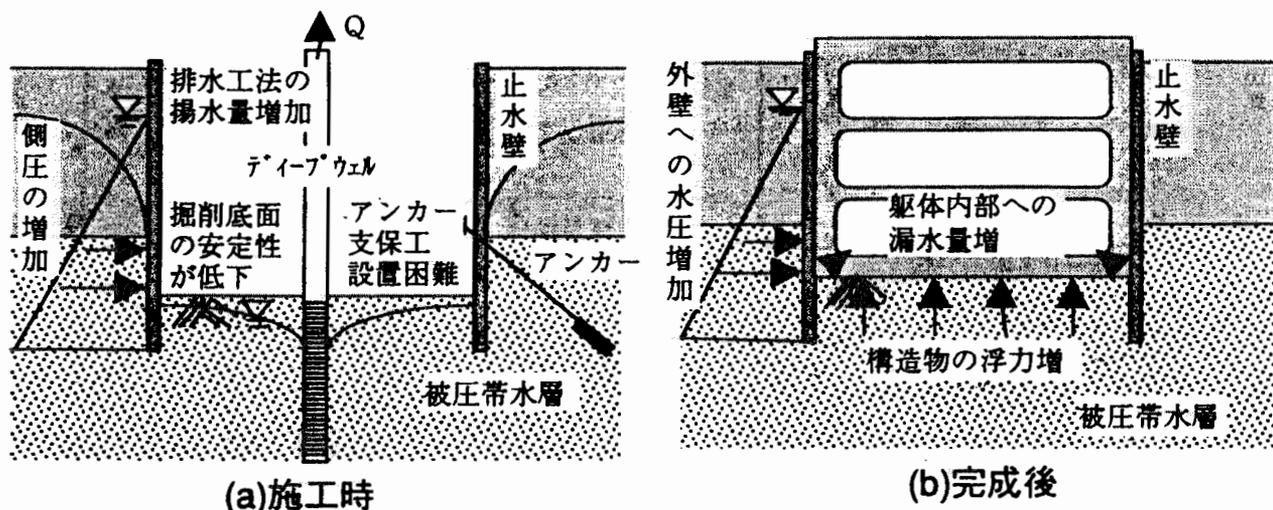


図-27 地下水位上昇に伴う建設への影響⁹⁾

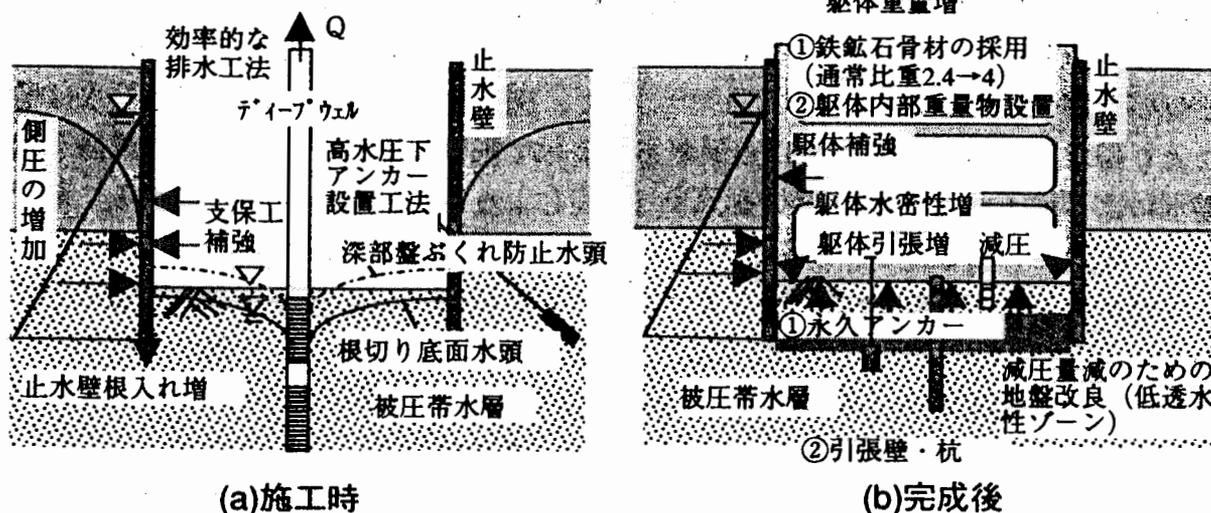


図-28 地下水位上昇への対策⁹⁾



図-29 地下水位上昇対策事例位置 (広瀬ほか, 2004^{1,4)} 原図)

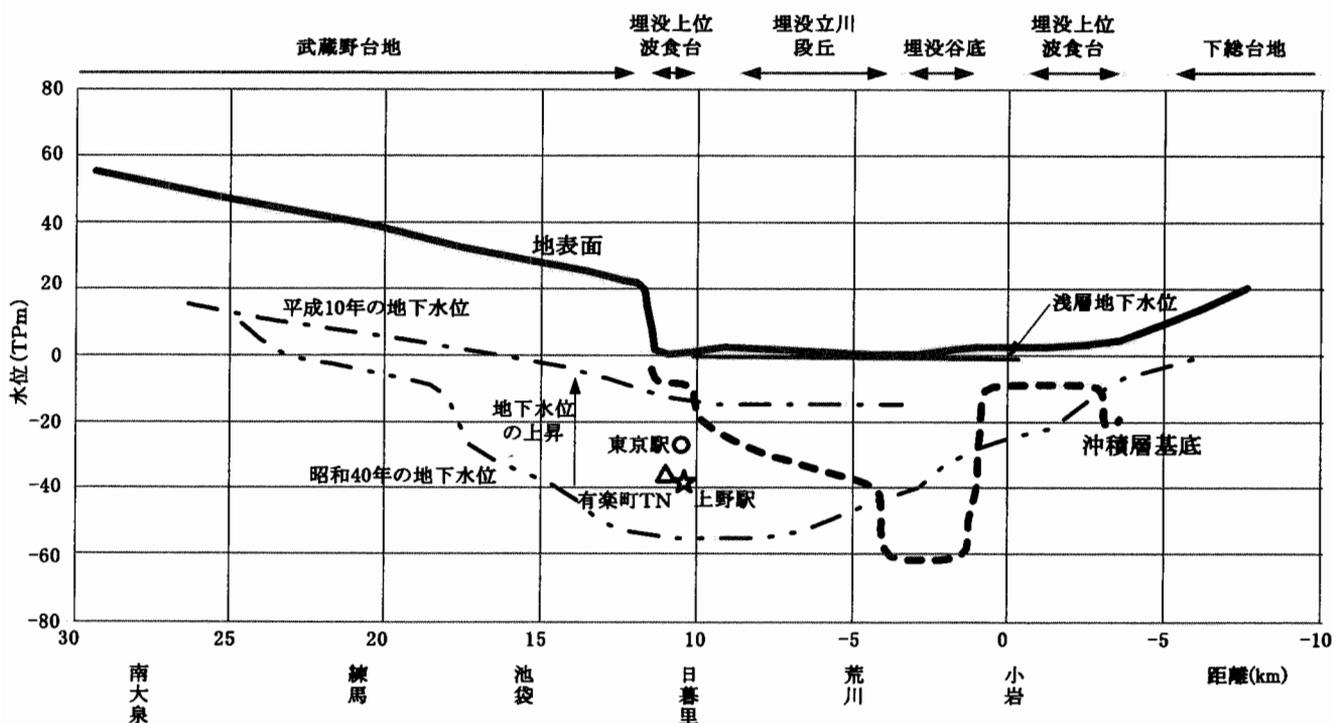


図-30 昭和40年及び平成10年の地下水位東西断面図 (広瀬ほか, 2004^{1,4)} 原図)

5-3 地盤沈下観測と許容限界水位

柴崎 (1976)¹⁵⁾ にならい東京都の地盤沈下観測井データを用いて最近の浅部被圧水頭 (年平均値) 変化と年間沈下量 (沈下速度) の関係を整理して図-31に示した。これによると、沈下速度がゼロとなる水頭 (すなわち、沈下を起さずに水位低下できる許容限界水位) は以下のように求まる。

地点	許容限界水位
戸田橋	TP-3 m
両国	TP-13m
南砂町	TP-7 m
江戸川東部	TP-4 m
新江戸川	TP-6 m

安全側にみつもった値ではあるが、新江戸川を除きいずれも表-3の被圧水頭予測値の下位にあり、特に上野や東京に近い両国では2m程度下位の値である。圧密沈下層の圧密特性試験などを行い入念な吟味を経た上で結論を出す必要はあるが、やみくもに地下水上昇を容認するだけでなく適切なレベルに地下水頭をコントロールしうる可能性を示すものと言えよう。

6. おわりに

以上、具体的な検討事例なども盛り込んで、首都圏の広域地下水流動把握の現状と応用地質の課題について述べてきた。

地下水の問題は古くて新しい問題である。地下水利用が盛んでなく地下水涵養量が地下水利用量をはるかに上回っていた時代には東京の沖積低地では自噴していたという事実があり、首都圏都心部の地下水位が一層上昇する可能性は否定できない。こうした地下水上昇問題に限らず、様々な理由で、広域的な地下水利用の状況変化に伴う東京沖積低地を主とした帯水層の水頭変化をさらに正確に予測する必要は多いと考えられる。これを実現するためには広域的な地盤・地下地質構造と地下水流動との関係や地下水の涵養機構の解明が望まれ、一方で本報で述べたような種々の課題をさらに詳細な関連データをもとに解決しなくてはならない。

今後の地下水適正管理を視野に置いて、同様な課題を抱える地域とともにその解決に取り組むことが求められていると考える。

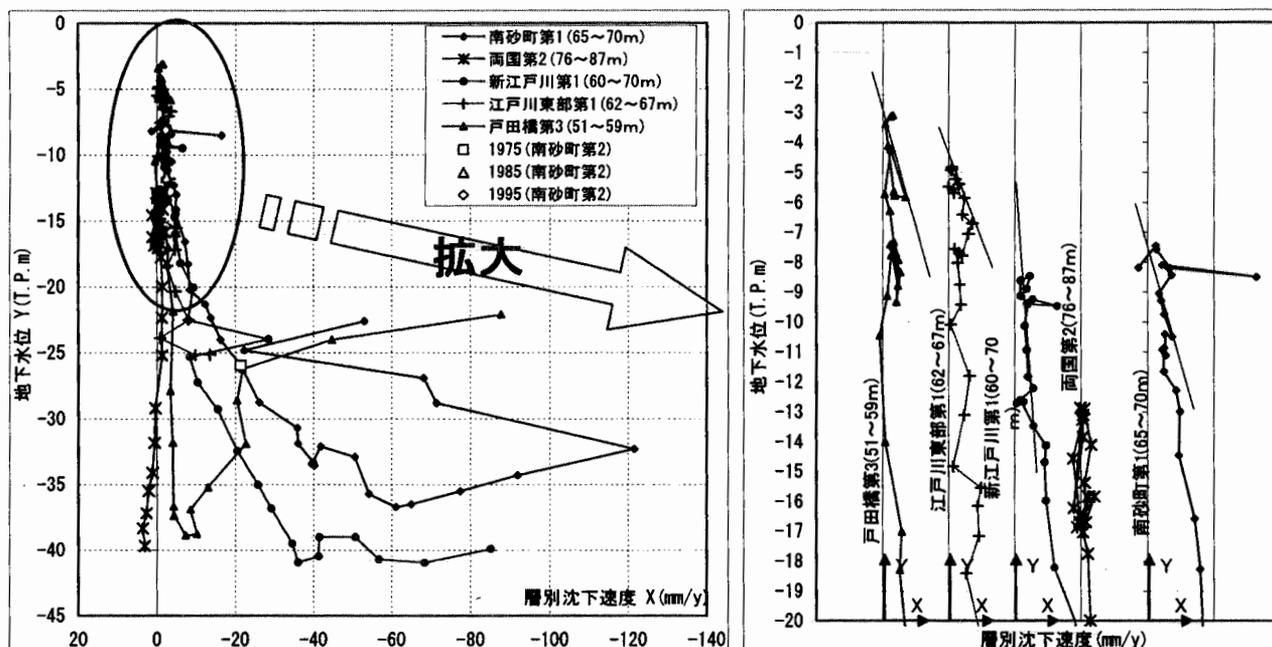


図-31 浅部被圧地下水頭と層別沈下速度の関係

参考文献

- 1) 榎根勇 (1992): 地下水の世界, NHK出版.
- 2) 松本聰・斎藤庸 (2003): 地下水流動系の把握. 地球環境 Vol.8 No.1 49-58.
- 3) Toth, J. (1963): A theoretical analysis of ground water flow in small drainage basins., JGR, 68.
- 4) 佐倉保夫 (2000): 水循環における地下水の役割と

その評価—地下水流動形の意義—. 地下水技術 第42巻第6号 1-9.

- 5) Engelen, G. B. and Kloosterman, F. K. (1996): Hydrological System Analysis. Methods and Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 152p. with 31 color plates.
- 6) 地下水技術協会 (1998, MS): 地下水の適正管理.
- 7) 林武司・内田洋平・安原正也・丸井敦尚・佐倉保

- 夫・宮越昭暢(2003)：水質・同位体組成からみた関東平野の地下水流動. 日本水文科学会誌 Vol.33 No.3 125-136.
- 8) 鈴木宏芳(2002)：関東平野の地下地質構造. 防災科学技術研究所研究報告 Vol.63 1-19.
- 9) 三宅紀治(2000)：首都圏における被圧地下水の課題と今後. 地下水技術 第42巻第10号 24-31.
- 10) 稲村明彦・安原正也(2003)：関東平野と周辺山地の河川水の水素・酸素同位対比. 日本水文科学会誌 Vol.33 No.3 115-124.
- 11) 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林武司(2003)：地下温度分布からみた関東平野の地下水流動. 日本水文科学会誌 Vol.33 No.3 137-148.
- 12) 斎藤庸・三宅紀治(2003)：関東平野南西域の地下水収支に関する検討. 日本水文科学会誌 Vol.33 No.3 197-214.
- 13) 角田史雄(1997)：下総亜地下水盆の形成について. 地下水技術 Vol.39 No.10 1-6.
- 14) 広瀬誠・川越建・木谷日出男(2004, MS)：地下水問題研究小委員会ワーキング1「建設工事・地下構造物と地下水」サブワーキング報告書.
- 15) 柴崎達雄編(1976)：地下水盆の管理－理論と実際－. 東海大学出版会.

建設工事，地下構造物に見られる地下水問題

東日本旅客鉄道（株） 清水 満

1. はじめに

東京地区における当社の鉄道施設としての地下構造物は、トンネルや地下駅があり、これら施設は東京地区における重要な輸送設備として日々利用されている。これらの地下施設は、路線としての重要度が高く、首都圏機能の維持、我が国の社会経済の継続のためにも今後も継続的に維持して行かなければならない構造物である。

一般に構造物は、一定の耐用期間を設定し構築されるが、首都圏における地下鉄道構造物においては路線としての重要度が高いことから、一度建設されると迂回ルートの設定や使用停止が困難であり、半永久的に使用が可能ないように構築し、継続的に適切な維持管理を行っていく必要がある。ところが、建設時の自然環境条件が供用期間中に大きく変化することになると、建設時の前提条件および維持管理条件が変わることになり、施設保有者はこのような変化に対処することが必要となる。

上記の観点から、本報告では東京地区における深層地下水位の上昇が当社の地下施設に及ぼしている影響の事例と、施設に流れ込む漏洩地下水の有効利用の事例について報告する。

2. 地下水位の変動と既設地下構造物の建設年代

都心部に存在する当社のトンネルや地下駅の地下構造物は、不透水層下の洪積砂礫層等に位置しており、被圧された地下水中に位置している。

この被圧地下水の変動については、東京都および国土地理院で調査が継続されている。これによると、工業用水および建築用地下水の採取に対する規制強化が実施される1971年頃までは深層地下水位は大きく低下しており、規制強化を境にその後1983年まで急激に上昇している。その後の地下水位の上昇傾向は、やや頭打ちになっているものの、緩やかな上昇を続けているようである。(図-1)

都心部における1960年以降に建設された主な路線を図-2に示す。深層地下水位が低下していた1950年代から1980年代初期までに建設された路線としては、1972年に開業した総武快速線(東京～錦糸町)、1976年開業の東海道横須賀線(東京～品川)、1973年開業の東海道貨物別線(東京貨物ターミナル～川崎貨物ターミナル)、1985年開業の東北新幹線(上野～大宮)がある。また、深層地下水位とは関連はないが、都心部を外れた武蔵野線(府中本町～新松戸)は1973年に開業している。

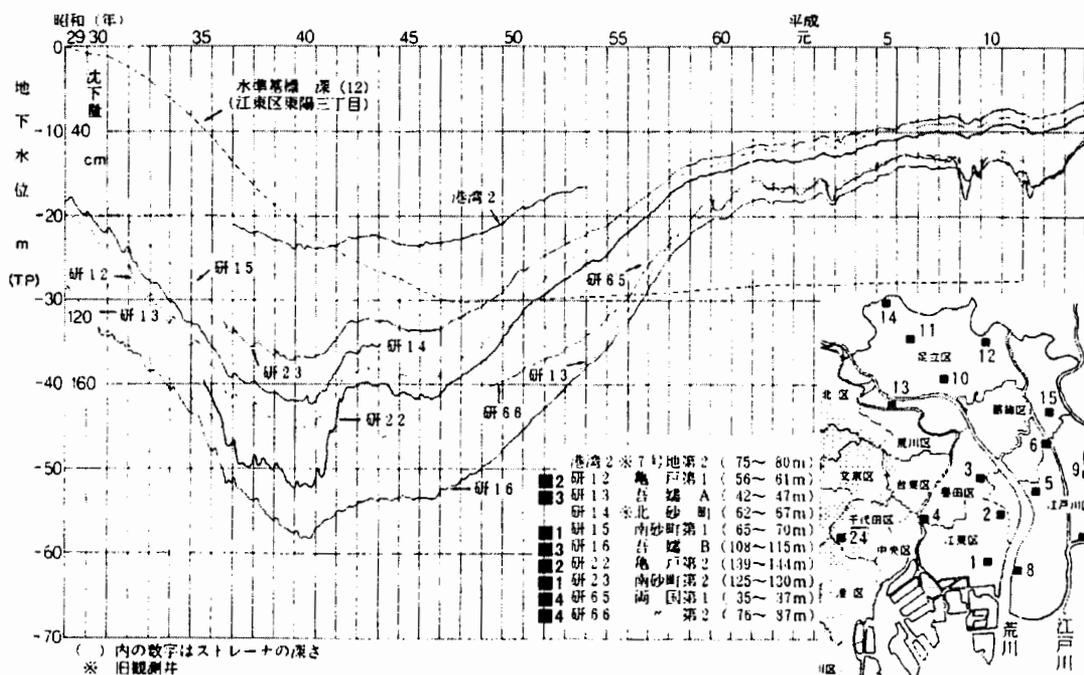


図-1 江東区、墨田区部の地下水位変動及び水準基標の累積沈下量

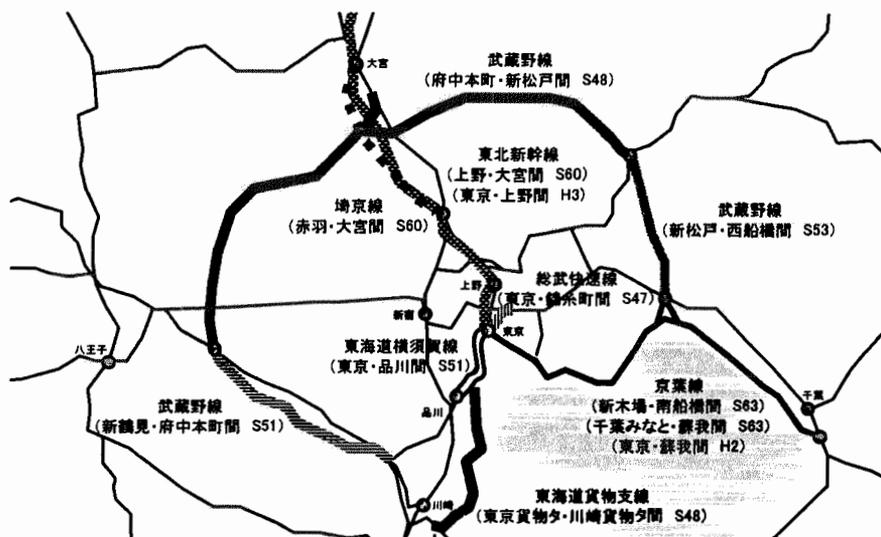


図-2 都心部において1960年以降に建設され、現在JR東日本で運営している路線

このように、当社のトンネルや地下駅の建設時期の多くは、深層地下水位が低下していた時期と一致しており、この時期は我が国の社会資本整備が活発であった時期でもある。このため、この地下水位の変動は、当社のみならず都心部の多くの地下構造物・建築物に様々な影響を及ぼしてきていると考えている。

以下に、地下水位の上昇により当社が対面している地下構造物の事例について紹介する。

3. 地下水位上昇による地下構造物への影響

(1) 東北新幹線上野地下駅の補強

東北新幹線上野地下駅は、洪積台地（上野公園）の崖下に位置する在来線（東北・常磐線）と特別区道80号線の直下に構築されており、駅中央部断面は、高さ27m、最大幅48m、全延長840mの4層6径間の地下駅であり、構築下床版までの最大深さは約30mである。地下駅の構造は、軌道階であるB4階がSRC構造で、それより上のB1～B3階はS構造となっている。地下駅周辺の土質は、地表面より約-16m（地下3階付近）までは東京層の砂層で、この層は自由水と考えられる地下水を有している。この下位には厚さ約10mの東京層のシルト層が堆積しており、この層は平均N値15程度の締まった層である。この層は上部層と下部層を隔てる不透水層となっている。このシルト層の下部には、東京礫層および江戸川砂層が堆積しており、両層とも豊富な地下水を有しており、上位のシルト層により被圧状態にある。駅躯体に影響を及ぼしているのは東京礫層および江戸川砂層に存在する被圧地下水である。（図-3）

上野地下駅は、1978年に建設工事に着手し、1985

年3月に供用を開始している。地下駅部の東京礫層および江戸川砂層の深層地下水位は、建設開始時点ではGL-38m程度であったが、開業時では約-18mまで急上昇し、1994年時点ではGL-14m程度まで上昇していた。

（図-4）このため、深層地下水の上昇が駅躯体に与える影響を検討したところ、地下水位がGL-13mで地下駅躯体の下床版が揚圧力により損傷を受け、GL-11.5mで駅躯体の浮き上がりの問題が発

生する可能性があることが判明した。このため、社内に上野地下駅技術検討会を設置し、対策工を検討することになった。

地下水位上昇に対する対策として、①補強スラブの増設による下床版の補強、②グラウンドアンカーによる下床版の固定、③カウンターウェイトの載荷、の3案を検討したが、①案は列車運行への影響が大きいこと、②案は被圧地下水でのグラウンドアンカーの施工性の問題があること等から、③案のカウンターウェイトの載荷により対策工を実施することとした。

カウンターウェイトとして、鉄塊（インゴット）と鉄粒コンクリートをホーム下の下床版の空間に設置することとし、1997年までに約3.7万トンの載荷工事を完了した。この対策により、地下水位がGL-11mまで上昇しても対応できる構造に補強されている。

この対策検討においてもっとも困難な課題は、将来の地下水位の想定であった。過去には地下水が自噴していたなどの話もあり、また周辺ビルの存在など周辺環境の変化による水位上昇への影響も考えられ、将来どこまで深層水位が上昇するかが想定困難であった。上野地下駅の検討においては、東京都などの観測データを参考にGL-5.0mを一応の最終的な地下水位と仮定し、対策を地下水位の変動に応じて段階的に施工することで最終水位に対応可能な全体補強計画を策定している。このため今回の対策は、第1期の対策と位置付けられており、当面3.0mの水位上昇に対応したものである。なお、緊急的な地下水位の急上昇に対処できるように、地下駅山側に揚水井戸7本を設置しており、不測の事態

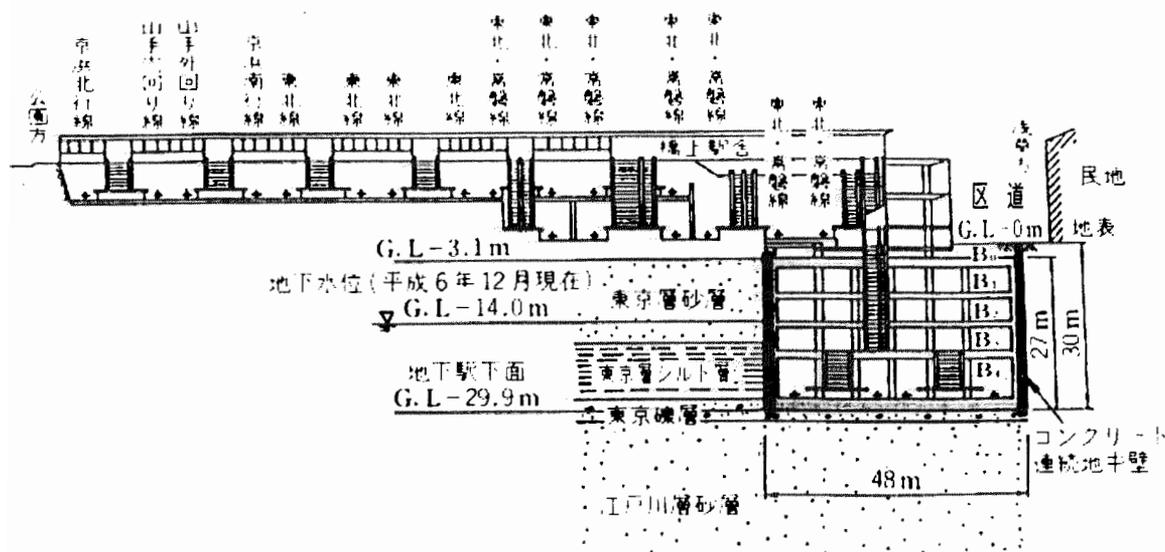


図-3 上野地下駅断面

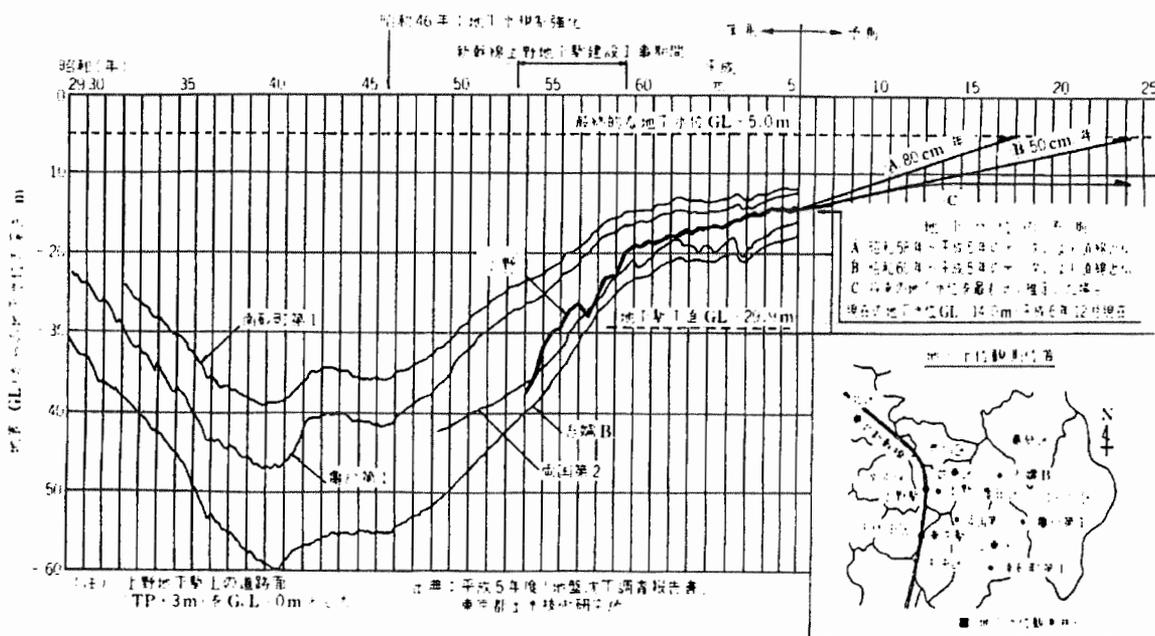


図-4 上野駅付近の地下水位変動

に適用可能な体制を備えることとしている。

(2) 総武快速線東京地下駅の補強

総武快速線東京地下駅は、東北新幹線上野地下駅より以前の1972年に供用開始している。地下駅は、東京駅の丸の内広場下に位置しており、地下駅中央部断面は、高さ25.5m、最大幅44m、全延長743mの5層6径間の地下駅であり、構築下床版までの最大深さは27mであり、上野地下駅と比べ3mほど浅い位置に構築されている。なお、地下駅中央部の構造は、S構造となっている。地下駅周辺の土質は、上部から東京層のシルト層と砂層の互層(層厚

約20m、N値1~40)で、この下部に東京礫層、江戸川砂層(いずれもN値50以上)があり、地下駅底盤面は江戸川砂層に位置している。(図-5)

東京地下駅においても上野地下駅と同様に深層地下水位の上昇が認められており、地下駅設計時の1965年頃はGL-35mであった水位が、1998年にはGL-15m付近まで上昇していた。東京地下駅も上野地下駅と同様な検討を行った結果、駅躯体の浮き上がりよりも地下水の揚圧力による下床版の損傷がクリティカルであることが判明し、駅中央部の70m区間が最も厳しく、その平衡水位はGL-14.3mであった。このため、下床版の補強と地下駅の浮き上

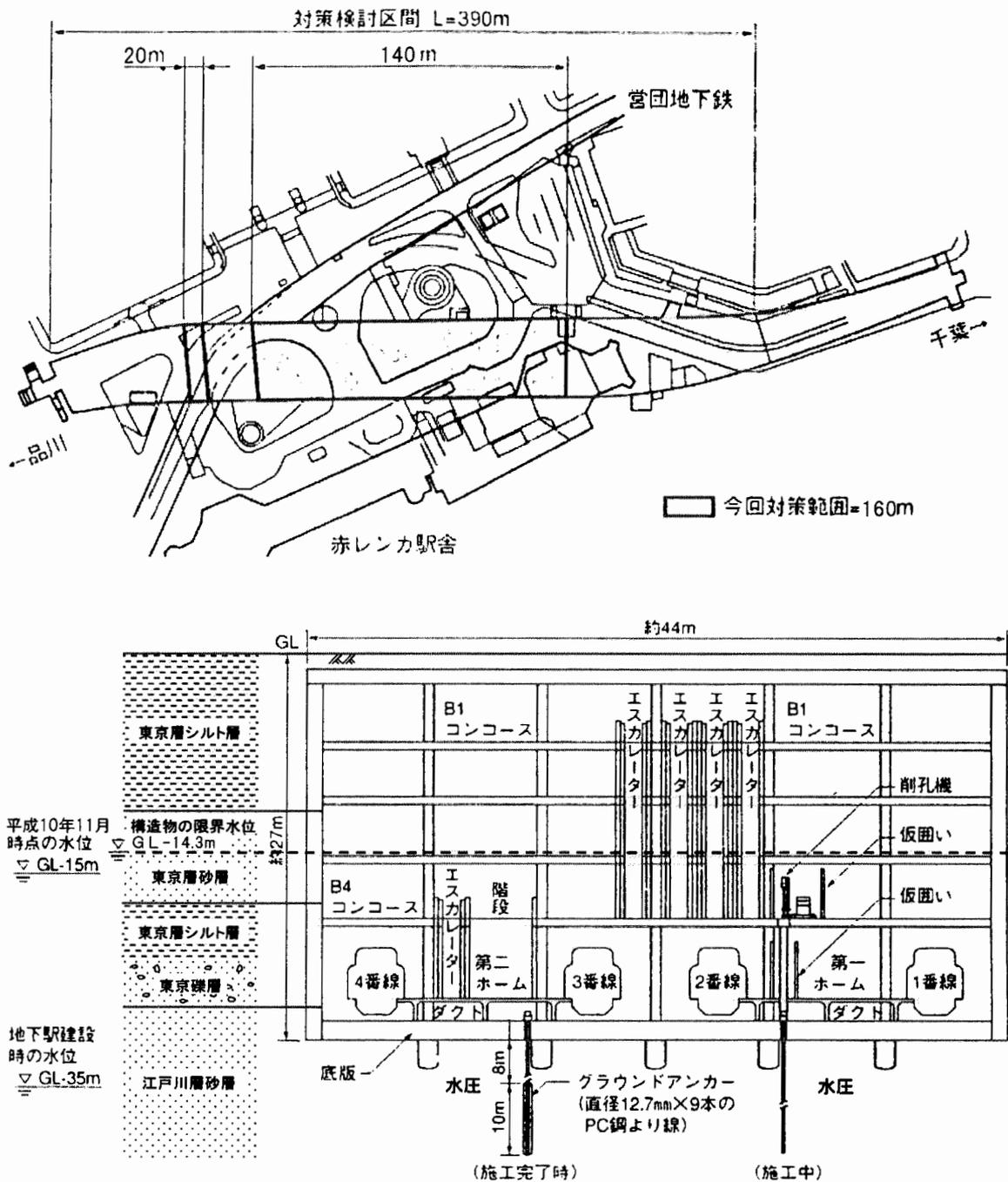


図-5 東京地下駅 (上段: 平面, 下段: 断面)

がり対策を直ちに実施することとした。

東京地下駅における対策工は、上野地下駅と同様な鉄塊等の敷設による方法も検討したが、施工性、経済性に優れる永久グラウンドアンカーによる対策を実施することとした。なお、グラウンドアンカーの施工においては被圧水下における施工法の確立が必要となるが、上野地下駅の対策期間中に高被圧水下での永久グラウンドアンカーの施工技術の開発を行っており、この成果を東京地下駅において実施することとした。

永久グラウンドアンカーの施工は、地下駅の必要対策延長 160m 区間を設定し、グラウンドアンカー (L = 18m, 定着長 10m, 緊張力 1,000kN/本, PC 鋼より線 12.7mm × 9本) 70 本を 1999 年から 2000 年にかけて施工した。

この対策による効果は、GL-12.8m までの水位上昇であり、もともとの地下駅の平衡水位に対し当面 1.5m の上昇に対する対策である。現在も地下駅周辺に観測井戸を設置し地下水位の変動を監視しており、水位上昇に対応した 2 次対策工を進めていく

予定となっている。

(3) 武蔵野線新小平駅U形擁壁の浮き上がり事故

前述のように上野と東京の2つの地下駅の補強について述べたが、この地下駅の深層地下水位の変動に対する対策の契機となった事故が、1991年に発生した武蔵野線新小平駅の浮き上がり事故である。この浮き上がり事故は、深層地下水位の変動ではなく自由水の変動によるものであるが、地下水位の上昇により鉄道地下構造物が浮き上がるという当時衝撃的な事故であったので、ここに簡単に紹介する。

1991年10月6日に降り始めた降雨は11日までに連続降雨量227mmとなり、11日23時15分頃、武蔵野台地を掘削形式で構築していた武蔵野線新小平駅のU形擁壁(幅20.2m、高さ11.6m)が、地下水の揚圧力により延長120mにわたり最大1.3m隆起し、U形擁壁のブロック目地が最大70cm開

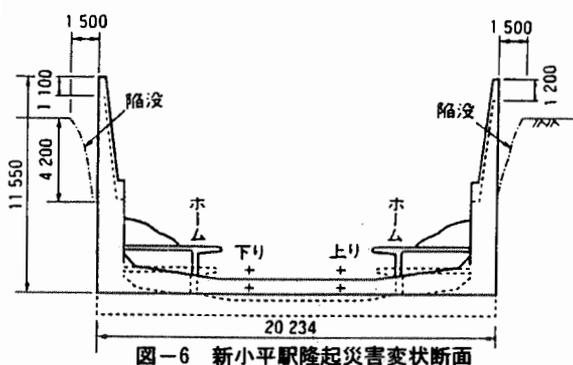


図-6 新小平駅隆起災害変状断面

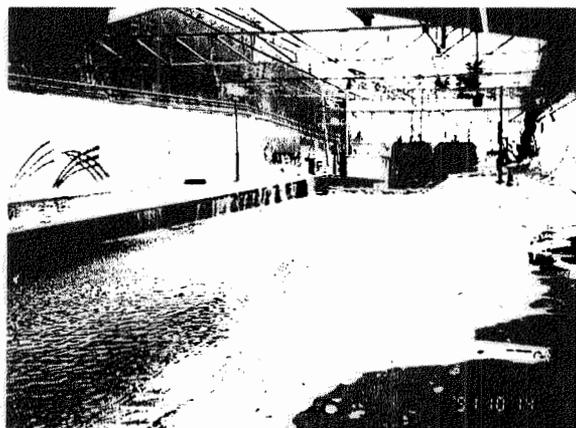


写真-1 新小平駅隆起災害状況

口した。(図-6、写真-1)

この隆起に伴い、擁壁背面の土砂と大量の地下水が流入し、武蔵野線(西国分寺~新秋津)は、災害復旧が完了するまでの2ヶ月間にわたり長期不通と

なり、旅客および貨物輸送に多大な支障を与えることとなった。

U形擁壁の底面は、表層の関東ローム層(層厚3~5m)の下に位置する武蔵野砂礫層(層厚12~13m)の中ほどに位置しており、この砂礫層は透水性のよい層($k=1 \times 10^{-1}$ 程度)であった。この武蔵野砂礫層の地下水位の変動を、新小平駅東方約1kmの地点で1968年以降継続して観測していた記録があり、これによるとこの年の8月以降災害発生までの間に地下水位が9m急上昇し、GL+2.5mまで達していたことが判明した。災害発生時の地下水による揚圧力は、1,610kN/mで擁壁の自重と摩擦抵抗力の1,248kN/mを上回るものであった。

災害復旧は、軌道部分の再構築と永久グラウンドアンカー(1,350kN/本、150本)で行い、地表面まで地下水位が上昇しても再変状しない設計とした。

4. 地下構造物における漏洩地下水の取扱の課題と漏洩地下水の活用事例

前述のように、当社の所有する鉄道地下構造物は東京圏に集中しており、その多くは深層地下水位が大きく低下していた時期に建設されたものである。このため、地下水位の上昇に伴い地下構造物の漏洩地下水の取り扱いも当社にとって大きな問題となっている。

東京都では、鉄道トンネルや建築物の地下室などに漏洩してくる地下水の取り扱いについて、1983年に「地下構築物への漏洩地下水の取り扱い指導指針」を制定し、その後、1999年度に地下高速鉄道に係わる取り扱いを一部緩和する内容の改正を実施し、現在に至っている。この指針では、深層地下水位が上昇することで水圧が増大し、鉄道トンネルや地下駅などに地下水が自然に漏洩してきた場合、その漏洩地下水が水質的に浄水に近い清潔な水であっても、地盤環境の保全に資する環境用水として下水道法に定める排水設備設置義務の免除を公共下水道管理者から許可されない限り、下水道に接続、放流しなければならないとしている。また、トンネルなどの施設保有者が水洗便所や洗車設備などに利用することについても、協議・届出が必要としている。

下水道に放流するには、地下水の水質の清濁に係わらず下水道処理費の支払いを請求されることになり、施設所有者は漏洩地下水による既存構築物の劣化対策に加えて、その漏洩地下水の下水道への排水設備の整備費負担から下水道処理費まですべてを受け入れなければならない状況となっている。これに対して、地下施設が存在する地域が清潔な水を必要としており、地下構造物に漏洩してくる清潔な地下水がこれに利用することが可能であれば、地

域と施設保有者にとって大きなメリットが生じることとなる。以下に当社が地方自治体との協議により、漏洩地下水を有効利用した事例を紹介する。

(1) 武蔵野線国分寺トンネル湧水を利用した環境改善事例

地方自治体においても水循環の保全という見地から、従来から実施している地下水保全対策に加え、漏洩地下水の環境用水への活用を行い健全な水循環の回復を図る試みを実施している。

この考え方を当社の鉄道トンネルの漏洩地下水に始めて適用した事例が、武蔵野線国分寺トンネル湧水の河川導水事業である。

国分寺トンネルは、武蔵野線と中央線を連絡する支線として武蔵野台地に構築された開削トンネルであり、高さ5.5m、幅6.8m、土被り3.5mの単線トンネルである。このトンネルは1973年に供用を開始しているが、武蔵野台地内の地下水流を横断する方向に位置しているため、1974年と1991年の大降雨時に地下水が湧出し、周辺住宅床下を浸水するという自称が発生した。このため、異常気象等による大雨により地下水位が急上昇した場合においても、周辺住宅地で湧水が発生しないようにトンネル側面に水抜きパイプ（φ50mm：24本、φ100mm：83本）を設置し、地下水位上昇対策を行った。これによる水抜きパイプからの地下水は、漏洩地下水の取り扱い指導指針に則り下水道へ放流していた。

一方、多摩川支流の野川では、都市化の進展による流域湧水の現象、枯渇、下水道の普及のため、水質は向上しているものの水量が減少し、冬季の渇水期には水流が途絶えるという問題が生じていた。この問題の対策として、国分寺トンネルの湧水を活用

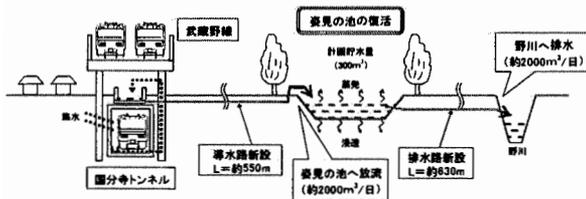


図-7 国分寺トンネルの湧水活用事例

することとし、国分寺市、東京都、JR東日本と協議を重ね、トンネル湧水を野川に放流することとした。この放流に伴う導水路等の設置費用は、JR東日本が下水道処理費の負担が軽減されることからこれを負担することとし、延長1,180mの導水路を2002年に完成させ、1日約2,000m³のトンネル湧水を放流している。(図-7)

なお、放流先は地方自治体の意向により、昔あった

「姿見の池」の復活を考慮し、この池に放流することとした。本事業により、トンネル湧水を姿見の池の復活と野川の再生を実現している。

(2) 総武快速線トンネル内漏水を活用した立会川の水質改善

総武快速線東京～錦糸町間の延長3.0kmは、1966年に建設着手し1972年に開業した単線並列シールドトンネルである。(図-8)

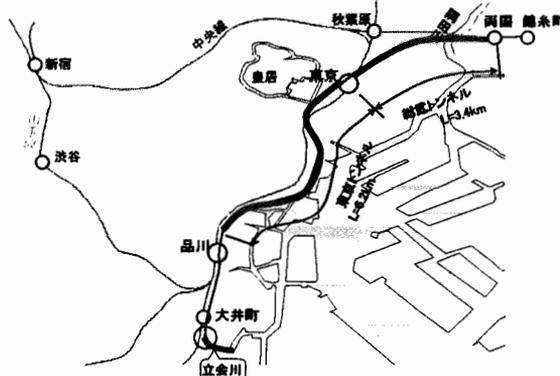
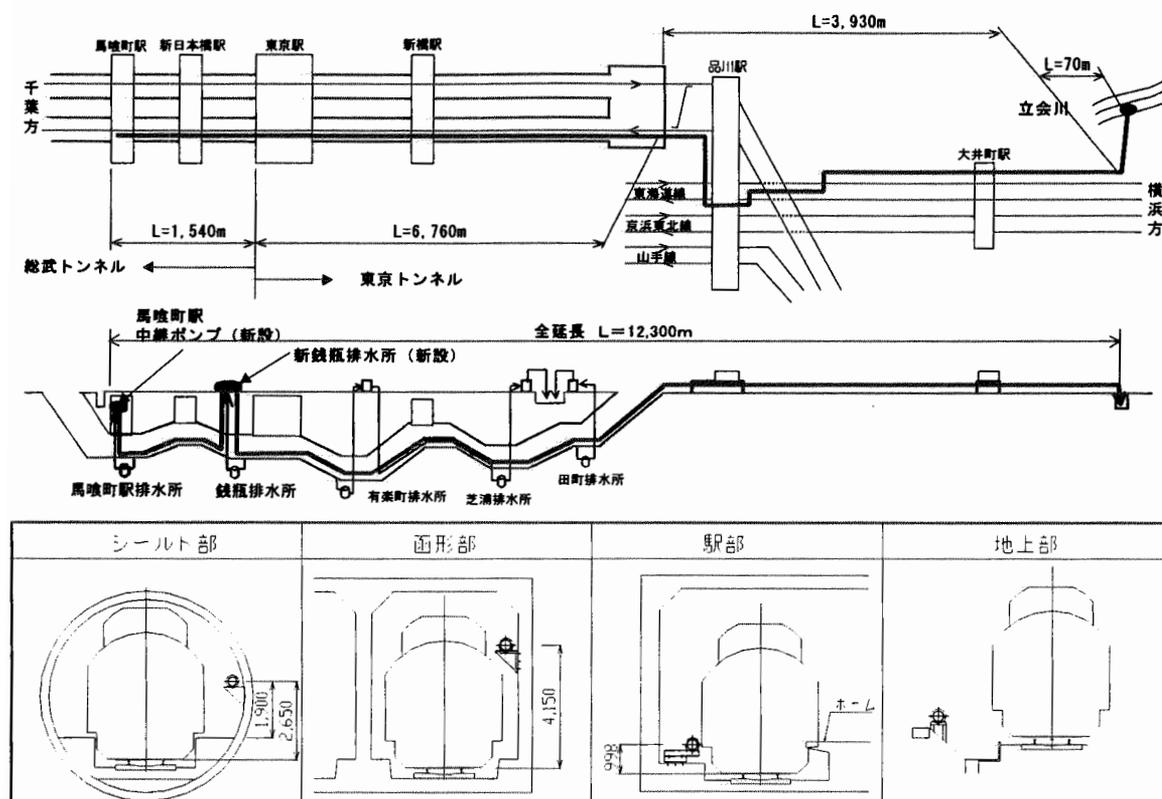


図-8 総武快速線トンネル

本トンネルを計画・設計した時期は揚水規制以前であり、施工時においても地下水がない状態であった。このため、トンネルの覆工は地下水の影響を想定せず、セグメントによる一次覆工のみの構造とした。

このため、供用開始後の深層地下水位の上昇により多量の漏水が生じ、レールおよび付属品の腐食やマクラギの劣化などで、線路の維持管理に多くの費用と労力を費やす状況となっていた。深層地下水位が上昇するにつれて漏水量も増大し、2000年時点では1日当たりの排水量が4,500m³にもなっていた。これらの漏水は、トンネル勾配に沿って自然流下させ、区間最深部の馬喰町排水所と東京駅銭瓶排水所のピットに一旦貯水した上で、電動ポンプにより汲み上げて下水道に放流していた。なお、漏水の水質は塩素イオンが若干多いが、海水の1/10程度のため中水と使用しても問題がないレベルのものである。

このような状況の中で、武蔵野線湧水の水循環への活用事業が推進されていたことから、総武トンネルにおいてもトンネル内漏水を環境用水として有効活用すべく関係自治体と協議を進めることとなった。この協議の中で、河床が3面張りでも自然湧水がほとんどなく、下水流入により水質悪化が著しい品川区内の立会川に漏水を放流する提案があり、東京都、品川区、JR東日本の三者でトンネル内漏水を活用した立会川の水質改善に取り組むことになった。



立会川の水質改善においては、総武トンネルの馬 質改善

図-9 総武トンネルにおける送水経路および送水設備配置 (上段: 平面, 中段: 縦断面, 下段: 断面)

喰町排水所から品川区の立会川放流口までの、12.3 km 区間の送水設備が必要となった。具体的な送水設備としては、各排水所のポンプ新設、銭瓶排水所の貯水タンク新設、馬喰町駅～東京駅～品川駅～立会川の送水管 (ダクタイル鋳鉄管 $\phi 250$, $\phi 350$) 新設である。送水管は、限られた鉄道施設内に設置する必要があり、トンネル内においては保守用通路と反対側の建築限界外のトンネル側壁に設置し、地上部では支障物を避けながら土留擁壁面や橋梁部に添架し、踏切部では道路下に埋設した。なお、これらの送水設備の新設費用および維持管理については、JR 東日本が負担することとした。(図-9) また、豪雨時には所定量以上の地下水を立会川に放流しないように、雨量観測機器と連動して放流先を下水道に変更する管理システムも導入している。

送水設備の新設工事は 2001 年より着手し、1992 年 7 月より放流を開始した。トンネル漏水の開始後においては、周辺住民からの立会川に対する悪臭苦情が大幅に減少し、魚影が見られなかった放流口付近にもボラが遡上してくるなど、河川環境の改善が図られている。

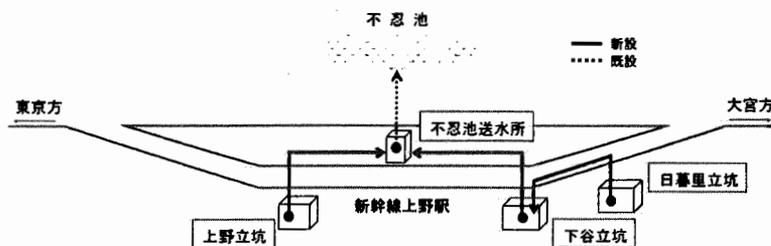
(3) 東北新幹線トンネル内漏水による不忍池の水

東北新幹線上野トンネルは、上野地下駅を中心に約 3.5 km が地下部分となっており、このトンネル内の漏水は駅部をはさみ東京駅方の上野立坑と大宮方の下谷、日暮里立坑に集水し、下水道へ放流していた。トンネル内漏水量は合計 270m³/日であった。

このような状況下において、東京都、JR 東日本とでこのトンネル内地下水を活用することによる、不忍池の水質改善と地下水の涵養を図る事業について協議し、不忍池にトンネル内地下水を放流することとした。なお、不忍池は河川と接続しておらず、水の交換がないことから水質は必ずしもよくない状態であり、東京都ではさまざまな設備 (曝気体噴水ポンプ、生物膜酸化処理など) を池に設置し、水質浄化に取り組んでいた。

不忍池にトンネル内地下水を放流するには、上野駅地下部の既設貯水槽へ 3 つの立坑から地下水を送水する管路設備が必要であり、 $\phi 100 \sim 200$ mm の導水管を延長 3.2 km に渡り JR 東日本の負担で整備した。上野駅から不忍池への導水設備については、上野地下駅の深層地下水位上昇対策用に設置してあった導水路を活用することとした。(図-11, 12)

本工事は 2002 年から 1 年半の工期で完了し、



2003年9月より放流を開始している。トンネル内

図-10 新幹線上野トンネルにおける送水設備

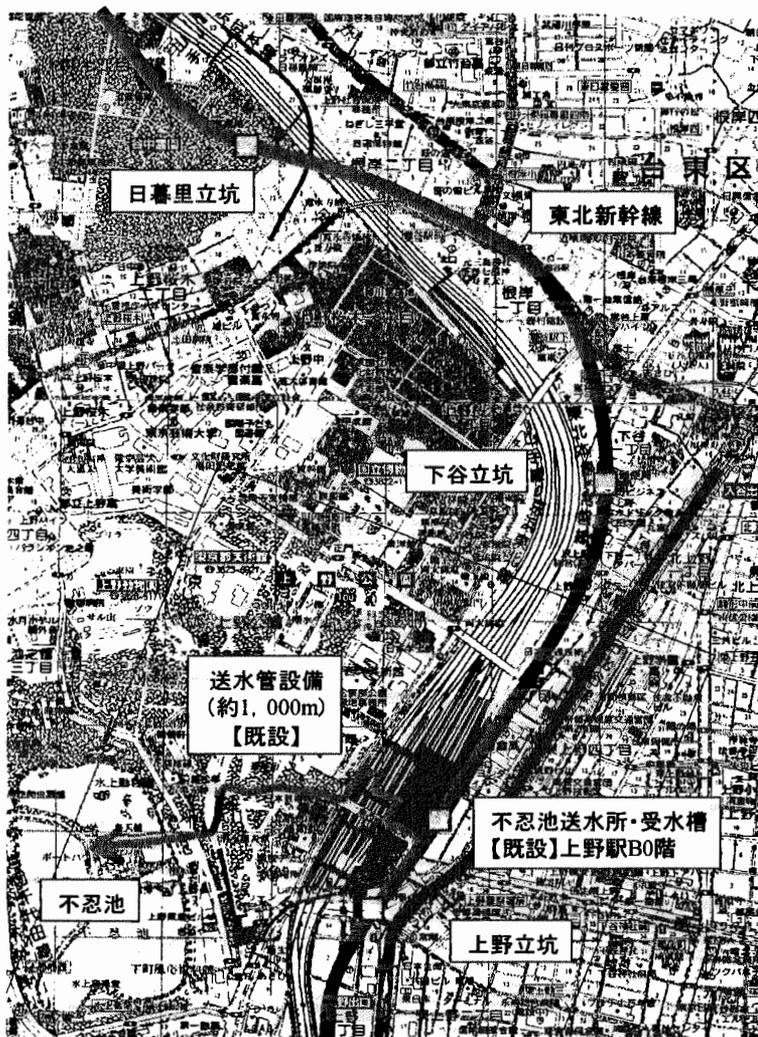


図-11 新幹線上野トンネルの送水経路

地下水の水質はきわめて良好であり、水質改善効果に寄与することが期待されている。また、水質改善効果については、定期的な水質調査を継続していく予定である。

なお、不忍池については容量が限られていることから、導水した地下水がオーバーフローし下水道に流下した分については、下水道料金を負担すること

としている。

5. おわりに

東京圏における深層地下水位の変動は、地下水の採取に対する規制が強化された1971年頃より上昇傾向が見られ、地下水利用規制強化による地盤沈下の停止など多くの問題が解決された反面、深層地下水が低下していた期間に構

築された当社の地下鉄道構造物に深刻な影響を生じさせてきている。

当社の鉄道施設の機能障害は、首都圏における社会経済活動の停滞につながるため、施設機能の維持管理は確実に実施する必要があります。地下水位の変動に対しても対象構造物周辺に観測井戸を設けるなどにより監視を行っている。しかし、地下水位の上昇に対する対策は、通常の構造物のメンテナンスに付加される事柄であり、このことは増大し続けるメンテナンス費用をさらに押し上げる結果となっている。このため、当社では地下水位の変動に応じた対策を順次実施することとしており、特に上昇収束時の水位の予測について重大な関心を持っている。

このように深層地下水位の変動は、地下施設所有者に大きな負担を強いる結果となっているが、この地下水位の変動は純粋な自然環境変化の影響というよりも時の行政の判断による影響といえると考えている。過去に大きく低下した深層地下水位が復活してくる状況を見ると、貴重な地下資源である地下水に影響のない範囲でコントロールし、自然環境改善などに有効利用することにより、地盤沈下の再発防止と地下構造物などへの影響防止の両立が図れる施策も可能ではないかと考えている。

地下水流動系に関わる岩盤割れ目の見方と評価

アイドールエンジニアリング（株） 奥田 英治

1. はじめに

一 広域流動系の一側面としてのサイトスケールでの岩盤内地下水流れをどう捉えるか、またその流れを支配する割目を現場でどう評価するか

岩盤内地下水流水に関しては、渡辺（1983）の先駆的な研究¹⁾があり、近年それらのシミュレーション的な研究が勢力的に行われている^{2), 3)}。

岩盤内の地下水流れといえどもそれ自体は様々な地盤中を流下する広域地下水流動系の一側面として位置づけられるものである。

従って、それらは数十 km 単位以上の広域的スケールにおいては均質多孔体中の地下水流動則に従って流れていると見ても近似的に大差はないが、場のスケールを小さくしたときはその場の岩盤の不均質性に大きく影響され、均質多孔体中の流れとは大きく異なるものとなることが予測される。

このことは自然界あるいは様々な現場における事実から検証されている（例；ダム掘削面湧水、トンネル湧水、海食崖湧水など）。

これらは、岩盤内の地下水流動が地質構造、特に割目に大きく影響されていることを示すもので、これらは「みずみち」と呼ばれる。「みずみち」にもよく水を通すものと相対的にあまり通さないものがあって、よく通す部分の流速は早く、あまり通さない部分では遅いという不均質流動の単純な法則に従っている。

岩盤内の地下水流れは、これら「みずみち」を通じて流動し、広義の「みずみち」としてはマイクロな方から①堆積物粒界・岩石構成鉱物粒界、次いで②これを切る微小割目、③連続性の小さい亀裂、④広域的に広がりを持つ層理・節理、構造的成因の割目、⑤断層破碎帯等があり、この順に桁違いに大きなオーダーの流速を持つようになる。

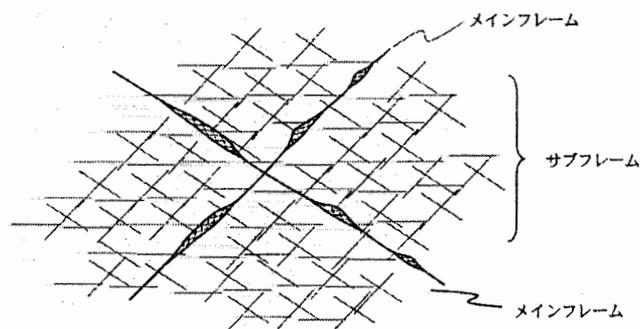
従って、サイトスケールでの地下水流動を検討する場合にはその対象とするサイトの大きさにより、またどの程度のオーダーの割目があるかによって検討対象とする「みずみち」が異なることになる。

その際、流動規制力の大きいオーダーの「みずみち」をメインフレーム、それらに囲まれた内部の「みずみち」をサブフレーム（図—1 参照）と呼ぶこととすると、メインフレーム、サブフレーム共に様々なスケールのものがあり得ることになり、検討課題、対象に応じていかにしてこれらを識別・抽出するかが問題となる。

また地表近くにおける割目沿いの地下水流動を対象とするダムなどでは、割目が形成された後の割目に沿った風化⁴⁾や上載

荷重の除荷による弛み現象、表層クリープなどの副次的な影響も受けるためこれらについても併せて評価しておく必要がある。

ここでは、岩盤地下水流動を規制する割目を現場でどう識別するかの方法についてとりまとめを行うものとする。



図—1 岩盤浸透流の流路模式図

2. 地下水流れのメインフレーム推定手法

岩盤内地下水流れを大きく規制するメインフレームの推定手法には大まかに以下の様なものがある。

- (1) 経験的アプローチ
- (2) 地質学的アプローチ（発達史的・構造的側面）
- (3) 実験的アプローチ

(1) 経験的アプローチ

岩盤中の地下水流動に関するフィールドエビデンス（掘削面、トンネル、鉱山、試掘横坑、調査ボーリングにおける透水試験など）は以下の様な経験的事実を提起している。これらは広域地下水流動の一側面を表しているに過ぎない点に留意する必要がある意味でみずみちを考える大きなヒントを提供してくれている。

- ① 割目に沿って流れている（割目湧水）
- ② 流出量が多い特定の割目がある
（同一平面・同一標高に隣接して存在するのに湧水量の多い割目と少ない割目、全く湧水の観察されない割目がある）
- ③ 断層を介して地下水位のギャップがある場合がある
（断層が遮水しているあるいは流動方向を規制している）
- ④ 断層沿いの破碎帯あるいは破碎影響ゾーンは大きなみずみちとなっている場合がある
- ⑤ 同じ断層でも場所により湧水の多い所と少ない所がある
- ⑥ 開口割目は極端に水を通す（開口≒広義の引張割目）

- ⑦ 周辺部に比べて風化褐色化の強い割目、深くまで褐色化の続く割目がある(特定の割目を水が流れている証拠)

(2) 地質学的アプローチ(発達史的・構造的側面)

1) 流体の化石

全体像が目には見えない岩盤内地下水流動に関して、ナチュラルアナログの視点から以下に示すようなフィールドで見られる現象を過去の「流体の化石」として認識し、これらは岩盤への浸透流体の選択注入の結果であるとの解釈から、地質構造と流体の流れやすさの関係を類推しようとするものである。

[流体の化石] の例

- ① 細い岩脈・・・破碎部へのマグマ注入現象の化石、岩脈貫入時の σ_1 方向の化石 (σ_3 直交方向)

図-2は花崗岩からなる基盤に対して貫入したドレイライトの貫入形態を示している。

全体的な貫入方向はほぼ東西方向であるが、岩脈は既存の破

碎ゾーンに沿って細脈の集合体として貫入しており、個々の貫入面の方向は交角 $20\sim 30^\circ$ の2つの方向性を持ち、全体的な延びの方向はその2等分線の方向となっている。

岩脈群全体の幅は膨縮があり、岩脈は1枚で数mしかない所から数m~10mの幅の岩脈が10数枚集まって全体で20~30mにわたる所まであり、元々の破碎帯の雁行・膨縮構造に従っている。

脈幅の広い所は雁行部であり、そこでは主脈に斜交する細脈が多数発達する。

岩脈の貫入方向は、広域的に同方向の多数の岩脈が認められることより、貫入箇所付近の広域応力場における最大圧縮主応力軸の方向を示すと考えられる。

これらの事象より、

- a) 碎帯は流体が通りやすい
- b) 碎帯の中でも雁行の連結部は流体が集中する
- c) 当該箇所での最大圧縮主応力軸方向は流体が通りやすい

等の傾向を読みとることができる。

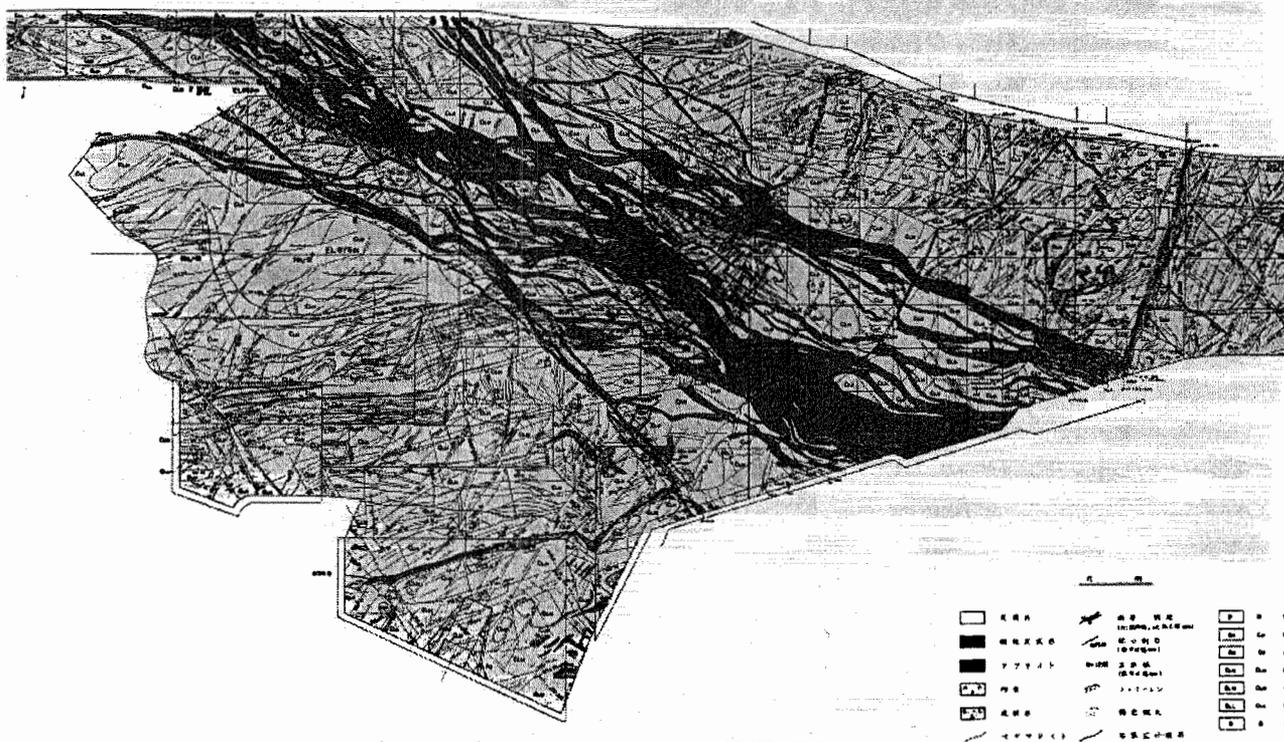


図-2 岩脈の貫入形態 (1/200) ⁵⁾

② 鉍脈型鉍床の鉍体・・・破碎部への熱水鉍液注入の化石
熱水性の鉍脈型鉍床の形態は、図-3に示されるように破碎帯の微小内部構造を反映したものであることはよく知られており(大槻 1993ほか)、大規模な鉍体は破碎帯の雁行部に集中してあることもこれらの図から読みとられる。

破碎帯がなければ鉍液を含んだ熱水溶液は上昇できないこと

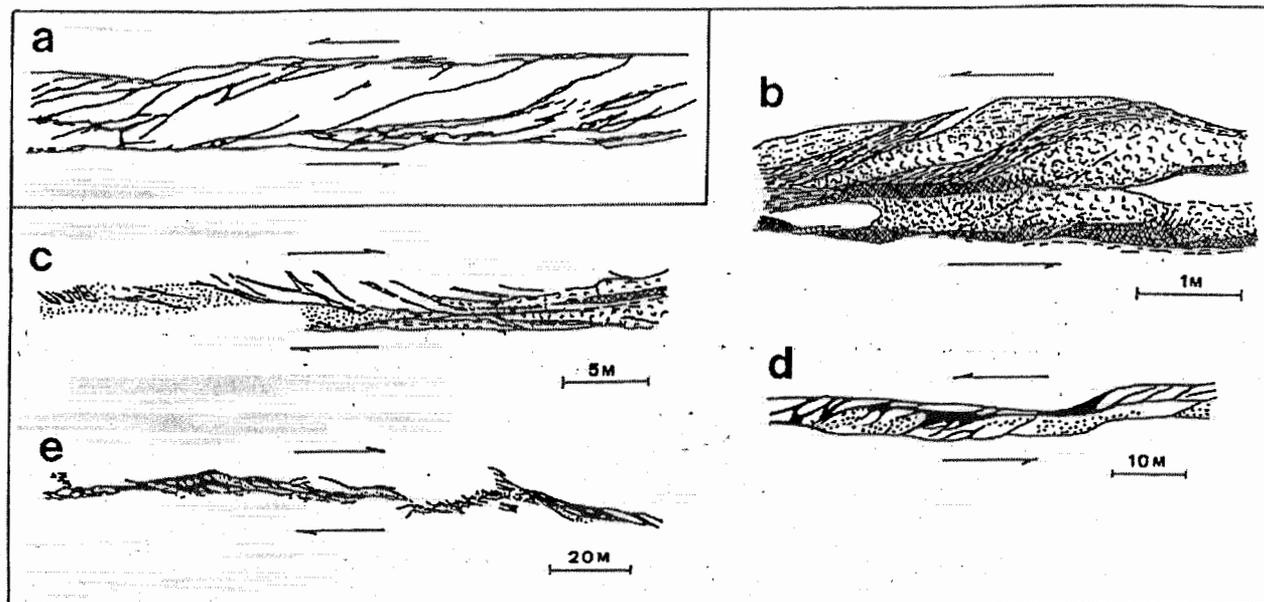
は当然であるが、その雁行部に富鉍体が存在することはそこに熱水が集中して上ってきたことを示す。

これは、破碎帯が主変位せん断面とその周辺に生じる二次的なリーデルシャーや雁行部での展張割目の形成等、基本的に割目が多いことと開口性割目が存在することに起因するものと判断される。

これらより、

- i) 破碎帯の雁行部は流体が通りやすい
- ii) 割目が多い所は流体が通りやすい

iii) 展張性（開口性）割目がある所は流体が通りやすい等の傾向が読みとれる。



図—3 破碎帯と鉱脈内部構造の類似性。a: 岩石摩擦実験による破碎帯内部の雁行状すべり面 (Byerlee et al., 1978)。b~e: 鉱種や破碎部が作る鉱脈の内部構造の実例, b: 御園鉱山大切坑 (酒匂, 1960), c: 轟鉱山忠越ひ (長谷川ほか, 1976), d: 大江鉱山千歳ひ (篠田ほか, 1974), e: 豊羽鉱山但馬ひ (阿古目・原口, 1963)。矢印はせん断のセンスを表わす。(大槻, 1989) ⁶⁾

③ 熱水変質帯・・・熱水溶液の浸透・注入の化石

近畿地方の花崗岩地帯における熱水変質帯の分布とその構造解析の事例では、地表踏査により、幅広い変質帯が存在する部分とごく狭い変質帯しかない所が交互に繰り返しており、その連続性は雁行形態をとり大きく屈曲を繰り返すことが明らかにされている。踏査から導き出された変質帯全体の延びの方向は、当然観察される粘土ガウジの方向とは大きく斜交する。

このような連続性ならびに変質帯の膨縮は、図—2の岩脈の貫入形態や図—3の鉱脈の分布形態に近く、解釈的には雁行破碎帯の展張割目による連結部への集中的な熱水の浸透によるものであろうと結論づけられる。

④ 不飽和帯の風化脈・・・空気と水の通り道の化石

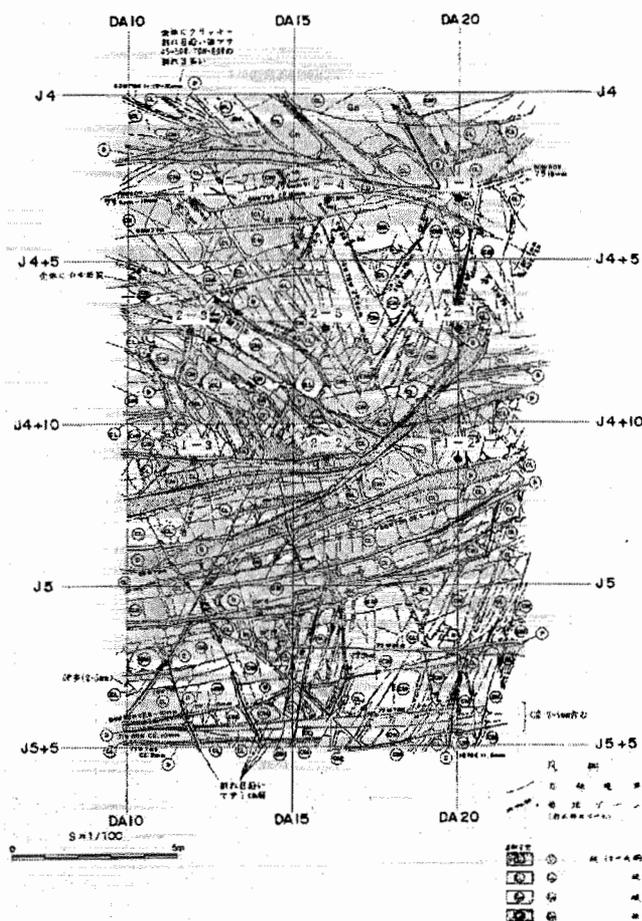
図—4は、近畿地方の花崗岩ダムサイトにおける堤体基礎掘削面の地質図である。

不飽和帯における風化作用は、空気や水が入りやすいほど著しいはずであるから、風化の進んだ箇所ほど水が通りやすいと言い換えることもできる。

現地における調査結果より、風化（割目沿いにマサ化や強い褐色酸化）が進んでいるのは、

- ア) 目の多い所
- イ) 目の交差部（特に共役せん断面の交差部）

ウ) く続く顕著な割目（特に変位を有する割目）
 エ) 成時代の新しい割目（他の割目系を切るもの）
 オ) 口割目（流入粘土付着割目）
 カ) 張性と推定される割目
 等である。



図—4 飽和帯における風化脈の構造 (奥田, 原図)

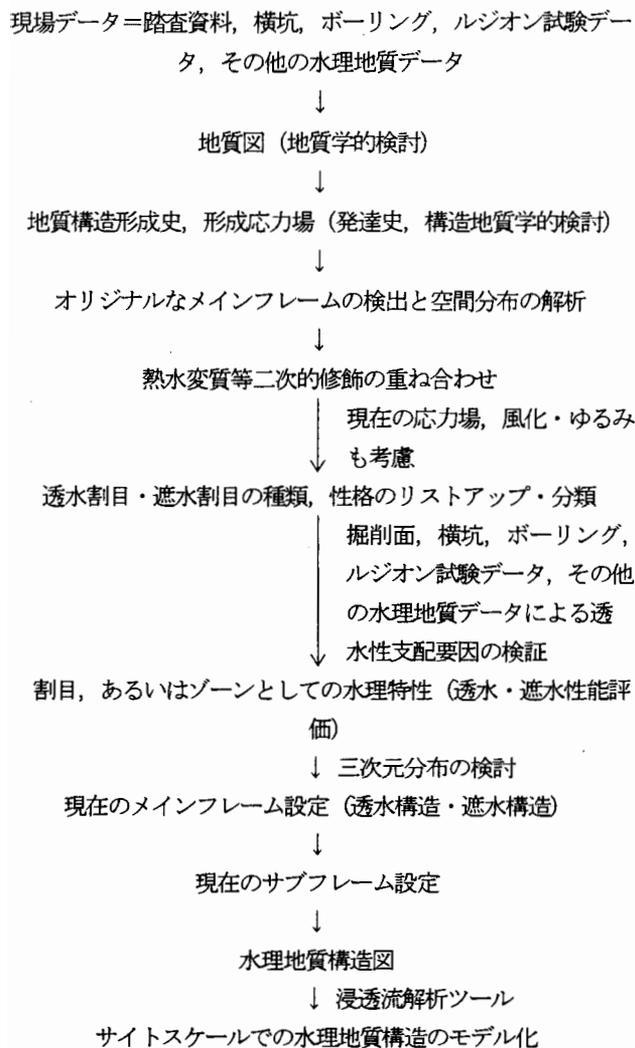
- 2) 断裂の形態→ガウジ, 面の凹凸の大きさ, 副次的断裂随伴。
 - 3) 断裂の形成機構→せん断, 展張, 引張, 主せん断/二次せん断。
 - 4) 断裂の新旧 (構造発達史)
 - 5) 場のおかれてきた環境 (構造発達史)
 - 6) 場の最近の環境 (風化, ゆるみ等)
- (3) 実験的アプローチ
- 割目に対する注入試験 (原位置または実験室), ルジオン試験, セメントミルク注入試験

3. 現場への適用—割目を現場でどう見るか—

2. より集約されるメインフレーム像は以下の様なものとなる。

- ① 岩盤内の浸透流は, 主体的に水を通すメインフレームと, これに連結されるサブフレーム (その内部にはさらに小さなオーダーのマイクロフレームがある) からなる。
- ② 何がメインフレームとなるかは, 空間・時間スケール, 対象とするもの物によって異なる。
- ③ メインフレームは, 広域的に発達する断層等弱層の規模・構造に支配される。
- ④ サブフレームはメインフレームの断層発生時の応力場における同時発生的同方向の剪断面や二次的な剪断面・展張破壊面, 節理面, 地層・岩石の持つ初次的層理・冷却節理面等によって構成される。場合によってはさらに小さなオーダーのマイクロフレームによって構成される。
- ⑤ メイン, サブのフレームは「みずみち」と呼ばれ, これらで構成されるネットワークを使って地下水は流動する。
- ⑥ メインフレームのみずみちで最大のものは一般的に断層である。断層は熱水変質帯や粘土を介在するものはそれを切る方向では難透水性, 断層に沿う方向での周辺の破碎影響ゾーンは高透水性。
- ⑦ 各フレームには内部にさらに水を通しやすいチャンネルがあり, 特に断層交差部・雁行連結部等は大きなみずみちとなっている可能性が高い。
- ⑧ 断層以外の割目では, 連続性等が同一とすれば開口性の割目 (展張性, 引張性…とう曲帯, シーティング, 冷却等) が最もみずみちとなりやすい。
- ⑨ 封圧の小さい条件下で形成された割目=ブリットル破壊, 体積膨張=ずれによる開口部形成→高透水みずみちとなりやすい。
- ⑩ 割目のスケールが同一とすれば, 単一割目より複数割目, せん断割目より引張割目, 共役交差部, 連続性の大きい割目, 形成時代の新しい割目, 現在の応力場で展張方向となる割目などがみずみちとなる可能性が高い。
- ⑪ これらのフレームは, 形成後の変質作用や過去から現在にわたる風化作用により元来の性格は変化しており, 全体に粘土化が進みかえって難透水性化していたりするので, 現在の性状も含めてみずみちとしての性能を評価しなければならない。
- ⑫ 透水割目は酸化したり, 風化している場合が多い。深部でのこのようなものは要注意である。

以上のようなメインフレーム像に対して, サイト毎にどのような割目があり, その割目がどのようにして形成され, どう発展してきたかを分析の上, 上記のメインフレーム像に当てはめていけば自ずと当該サイトのメインフレームは明らかとなる。実際の現場において割目をどう見るかはサイト毎の条件が多様であるので一概にはいえないが, 基本的には以下のフローに示すような確実な調査・検討のステップを踏んだ上でのサイト毎の透水性支配要因の評価・判断が必要である。



図— 5 現場におけるフレーム構造設定のフロー

4. 総括と今後の展望

サイトの地質条件に対して地質学的に適切な手順を踏んで調査をすれば，水理地質上重要な割目系を明らかにすることが出来，それに基づいて水理地質上のフレーム構造を推定できる。

従って，サイトスケールにおける地下水流動の問題は，そのスケールサイズと流動場の地質構造が大きく影響することより，流動場のメインフレーム構造を明らかにすると同時にその構造のよってきたる所を地質学的に明らかにすることによって解決への道は拓けるものと考ええる。

即ち，小スケール流動場における岩盤割目系は，その現在に至るまでの形成→発展の歴史「氏と育ち」を明らかにすることが大切であり，その地質学的な解明なくしては流動場におけるモデル化も計算上の諸条件も合理的には決められないということである。

このような視点から山体の水理地質構造を解明し，同時に実施される水理地質的調査・試験・工事の結果を統一的に説明出来る仮説を構築・検証していくことが地下水流動系に関わる岩盤割目系評価の一番の近道となると考えられる。その過程においては，水理地質構造モデルの検証のみでなく，適切にそのモデルを評価できる岩盤浸透流計算手法の開発も必要である。

また，データを取得できるごく限られた範囲の割目系解析結果をいかにしてより広範囲の領域に拡大していくかの方法論について，そのモデル化手法も含めた研究が必要と考えられる。

—参考文献—

- 1) 渡辺邦夫 (1983) : 岩盤割目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎研究. 埼玉大学工学部地盤水理紀要 No.2
- 2) 渡辺邦夫 ほか (1994) : 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 (その1). 応用地質, 35, No. 3.
- 3) 杉村淑人 ほか (1999) : 水みちネットワークモデルによる亀裂性岩盤の非ダルシー流解析. 埼玉大学工学部年報, 24.
- 4) 大河内誠 ほか (1998) : 節理に沿う岩盤の劣化傾向. 応用地質, 35, No. 5.
- 5) 水資源開発公団 奈良俣ダム建設所 (1991) : 奈良俣ダム工事誌・図面集.
- 6) 大槻憲四郎 (1989) : 鉾脈による新第三紀東北本州弧の造構応力場復元. 地質学論集, 32.

割れ目系に着目したダムサイトにおける透水性評価の試み

(株) 熊谷組 川越 健

はじめに

「不連続性岩盤の透水性は割れ目および割れ目系に支配される。」このことは研究者や技術者の間で共通認識となっており、岩盤の地下水浸透問題として割れ目系のモデル化、透水性の評価が様々な角度から議論されている。

実際にダムやトンネル・地下空洞などの構造物を建設する場合、割れ目および割れ目系と地下水の流れをどのように評価するかは非常に重要な課題である。

地下水の流れは、一見、複雑なものとなっており、岩盤の透水性を支配する割れ目および割れ目系の評価を行う上では、「場と対象とするスケール」における地質構造と透水性の関係を明確に説明する必要が求められる。

現在、このことに関してさまざまな検討を、「応用地質学における地下水問題研究小委員会」ワーキンググループ2(以下ではWG2とする)では実施している。本発表は、花崗岩類を基礎としたダムサイトにおいて、WG2の中で示された、奥田が述べる「地下水流動系に関わる岩盤割れ目の評価」¹⁾を適用して、検討している事例について紹介する。この中で奥田が示すアプローチは、1)地質構造とその成因・時間的な前後関係やその経てきた歴史・現在の置かれている地質的環境等を解析することによって、2)対象に応じた時間・空間スケールにおける地下水流れを支配する割れ目および割れ目系を抽出してメインフレーム、サブフレームからなる水理地質構造図を構築し、3)これと同時に実施される試験・調査の結果を统一的に説明できる仮説を構築・検証してゆくというものである。ここでは、地下水の流れについて相対的に流動規制力の大きいオーダーの水みちをメインフレームとよび、メインフレームに囲まれた内部のみずみちをサブフレームと呼ぶ。

1. 検討内容の概要

(1) 検討対象としたダムについて

検討対象としたのは、阿武隈花崗岩類が分布する地域に建設中の小山ダムの基礎岩盤である。小山ダムは茨城県久慈水系ダム建設事務所により建設される多目的ダムで、完成すれば茨城県内最大のダムとなる。小山ダムの堤体図を図-1に示し、諸元を表-1に示す。工事は、平成6年11月に本体着工され、平成15年10月に最終打設を終えている。

(2) 検討対象事例の位置づけ

花崗岩類は地下深部に形成された塊状岩体であることから、物理・力学特性は層状の堆積岩体に比べて均質である

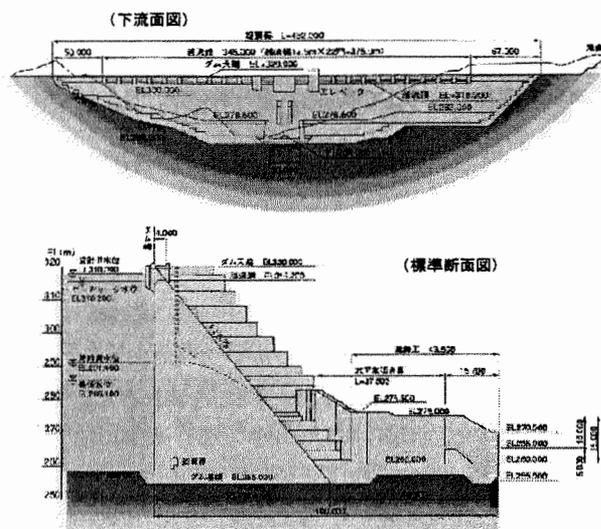


図-1 小山ダム堤体図

表-1 小山ダム諸元

位置	茨城県高萩市大字横川	集水面積	79.7km ²
型式	重力式コンクリートダム	湛水面積	0.87km ²
堤高	65.0m	総貯水容量	16,800,000km ³
堤頂長	462.0m	有効貯水容量	15,000,000km ³
堤体積	531,000m ³	常時満水位	EL291.4m
ダム天端標高	EL320.0m	サーチャージ水位	EL316.2m
ダム基礎標高	EL255.0m	設計洪水水位	EL318.0m

と考えられる。このため、ダムサイトのスケールである数100m程度の領域を考えると、現在見られる透水性の不均質性や割れ目系の発達後は後的に獲得したものと考えられる。そのため、花崗岩類は割れ目系と岩盤の透水性を考えるうえで、割れ目系の発達状況やその他の後的な不均質構造に焦点を絞って検討することができると考え、ワーキングにおける最初の検討例とした。

(3) 検討方法

今回の検討では、主に基礎掘削面の岩盤スケッチから大まかな地質構造を解釈し、これとコンソリデーショングラウチング、カーテングラウチングのルジオン試験及び湧水箇所データのデータ、カーテングラウチングパイロット孔などのデータを合わせて水理地質構造の構築と検証を試みた。

ここでの検討は、大きく4つのステップを踏んでいる。

- 1) 地質、施工データの概観
- 2) 各割れ目の特徴から割れ目系の抽出
- 3) メインフレーム、サブフレームを抽出し、割れ目系の

構造発達史を組み立てて水理地質構造についての作業仮説を構築

4)上記で構築した作業仮説について主に施工時のデータをを用いた検証

なお本稿では、「割れ目」と「割れ目系」という言葉を分けて使用している。「割れ目」は単に岩盤を分かち不連続面(断層、節理など)という意味で用い、「割れ目系」はなんらかの因果関係を持って形成された一群の割れ目として用いる。

2. ダムサイトの概要

(1) 地形・地質概要

1) 地形

検討を実施した小山ダムは茨城県北部を流れる大北川中流域に位置する。流域は阿武隈山地の南部(多賀山地)に位置し、標高 400~600mで定高性を示す山頂が連続する準平原地形の様相を呈している。大北川はこの山地を屈曲しながらほぼ東流している。²⁾

大北川はダムサイトより上流では比較的河床勾配が緩く河岸段丘を伴い、川幅も一部で約 100mと広がっている。一方、下流側では河床勾配が急となり、V字谷の様相を呈する溪谷となっている。ダムサイトでの河床標高はEL.260 m程度となっており、右岸は直線状の沢部、左岸はややせ尾根となっている。図-2にダムサイト周辺の地形を示す。

2) 地質

小山ダムのサイトには中生代白亜紀の深成火成活動により生じた、阿武隈花崗岩類(古期花崗岩類)の花崗閃緑岩が主に分布する。また、花崗閃緑岩に貫入する形態で淡紅色を呈するアプライト脈が多く分布している。花崗閃緑岩の岩相は粗粒優白色を呈し、主に石英、長石類、有色鉱物の結晶からなる。有色鉱物は主として、黒色を呈する角閃石と黒色~金色を呈する黒雲母からなる。図-3に周辺の地質図、図-4に地質層序を示す。

また、小山ダムの西方約 20 kmには NNW-SSE 方向に棚倉構造線が分布している。棚倉構造線は、白亜紀から古第三紀において左横ずれ運動により形成されたと考えられている³⁾。

3) 地下水位

当初設計時における地下水位を図-5のダム軸ルジオンマップ中で示す。左岸側では孔内水位としてはGL-30m付近でマサ化地山の下限付近にあたる。右岸側では概ねCH~CM級出現深度付近に想定されている。

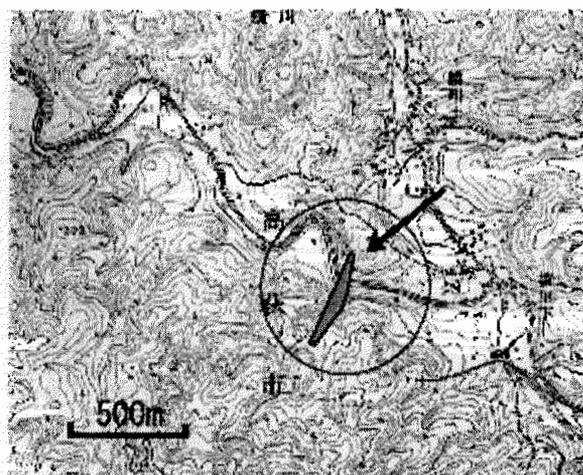


図-2 ダムサイト周辺の地形
(国土地理院 1:25,000 地形図「巖原」より抜粋、一部加筆)

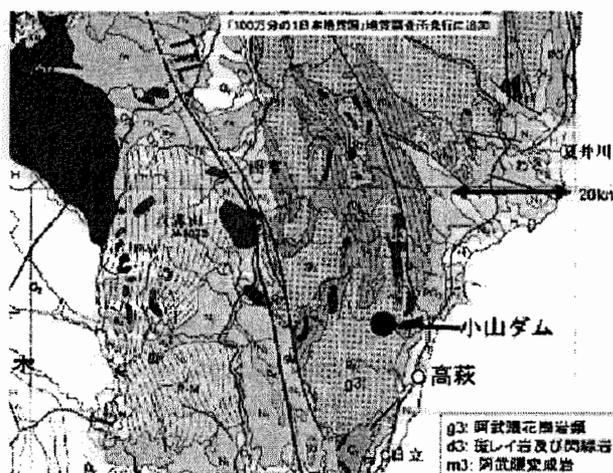


図-3 小山ダム位置図・周辺地質図
(「100万分の1 日本地質図」地質調査所発行に追加)

地質時代		地層名	地質名	記 事
時代	地層年代 (百万年)			
新 生 代	第四紀 (沖積世)	第四紀堆積層	現代堆積層	大北川およびその支流の河床堆積層に分布し、主に花崗岩類および砂から構成される。
			山麓	谷に分布し、花崗閃緑岩の塊、マサ土から構成される。
			砂丘堆積層	大北川の両側に分布し、堤防より3~5mの比高を有する。主に花崗閃緑岩の塊および砂から構成される。
	更新世 (沖積世)	2		当ダムサイトでは欠如する。
第 三 代	新第三紀			
	中新世	13		
	漸新世	25		
	古第三紀 始新世 白垩世	70		
中 生 代	白 亜 紀	阿武隈花崗岩 (古期花崗岩)	アプライト、ペグマタイトの不規則な岩脈が散在する。地質であるが亀裂が多い。	
		花 崗 岩	ダムサイトの基盤岩として広く分布する。やや粒径の角閃石、黒雲母花崗閃緑岩である。当ダムサイトでは欠如する。	
古 生 代	ジュラ紀	135		
		180		

図-4 地質層序²⁾

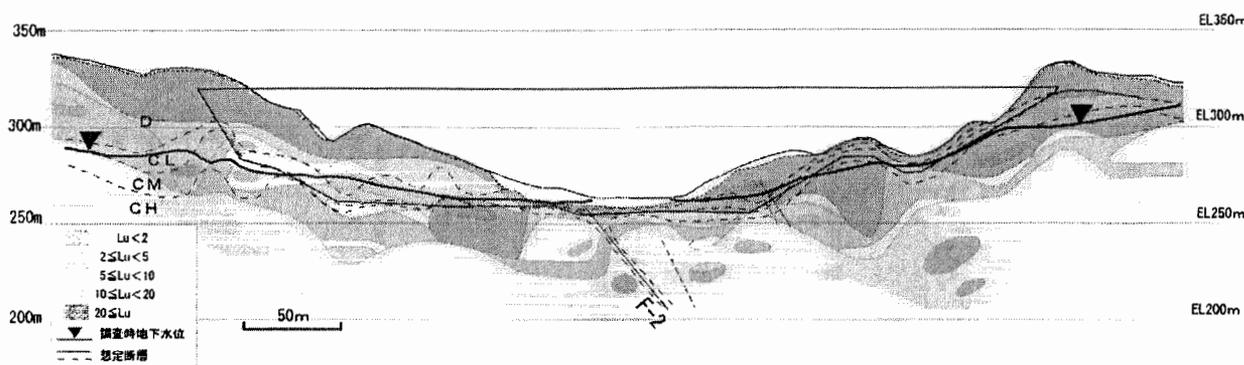


図-5 ダム軸ルジオンマップ（設計時）
（参考文献4）をもとに作成

3. ダムサイトの岩盤状況

(1) 岩質

図-6に小山ダム基礎岩盤スケッチを示す。また、図-7に岩盤スケッチから抽出した小山ダムで特徴となる岩盤の状況をまとめる。

ダムサイトにおける花崗閃緑岩はCH、CM級を主体とし、断層、シームの周辺およびそれらの交差部でCL級が分布する。アプライト脈は総じて緻密堅硬であるが、亀裂が発達し方形の小ブロック状を呈している。また、左右岸の高標高部ではマサ化が比較的深部まで進行しており、特に左岸天端では深さ20mにおよんでいる。

断層や断層周辺の節理、特定方向の亀裂が密に分布する箇所では熱水変質作用が認められる。熱水変質は大別して緑色粘土化されたものと、白色粘土化に分けられる。これらは断層、節理の両方に認められるが、緑色粘土は主として断層系を充填している場合が多い。亀裂の密集部に熱水変質作用が認められる箇所では、節理を中心として岩質の劣化が進行し、全体としてCM級以下に岩級が低下している。節理面自体が風化により不明瞭化もしくは黄褐色粘土の薄層（厚さ数mm）を挟在する状態となっている箇所が多く認められ、局部的にCL級を呈する領域が存在する。この熱水変質を比較的強く被る領域では、岩質の劣化の進行は浅層部に顕著で、深度が深くなるにつれ岩級の低下は低減する傾向がある。

ここで示した顕著な熱水変質ゾーンは定性的ではあるが、スケッチ時に目視にて抽出した領域である。また、剪断変位を伴い明瞭な粘土分を伴うものを断層として抽出した。

(2) 透水性

本ダムでは基礎岩盤において、研究などを目的とした透水性の試験は行ってない。そこで、今回の検討ではグラウチング時におけるルジオン値を用いて透水性を評価した。図-8にコンソリデーショングラウチング1次孔の1ステージ、2ステージのルジオンテストの結果を示す。

(3) 割れ目の方向性と特徴

ダムサイトにおける割れ目の方向（以下グループと称する）は概略、以下のようにまとめられる。ここで取り扱う「割れ目」は、施工時に実施した1/200スケールの岩盤スケッチ（図-6）に記載されるレベルの中で、比較的連続性を有するものとした。

①ESE-WNW 走向/40-60° SW（主たるアプライト脈、変質を強く被っている節理群）

ほぼすべての割れ目系により切られる。ただし、④の一部はアプライト脈により見掛け伸張が止められている場合がある。熱水変質を強く被っている割れ目系の多くは、この方向にあたる。

②NNE-SSW/鉛直～高角度W（F-1断層系）

F-1断層では、アプライト脈の組み合わせおよび条線の方向から、ほぼ左横ずれ成分が卓越（10°前後で南落ち）する。他の割れ目系をすべてにおいて切る。主に最大幅20cm程度の緑灰色粘土（ $Q>Pl>>Chl>Mica$ ）、小角レキ混じり緑白色粘土と角レキ化帯よりなる。破碎帯の幅は最大で10m程度、周辺岩盤との境界部は明瞭である。

③(NW-SE)NNW-SSE/50-60° S（F-2断層系）

連続性は比較的良い。②の系列により切られる。また、④とは共役の関係の場合が多い。緑灰色のフィルム状の薄い挟在物を伴う場合が多く、一部では熱水変質を被るものも認められる。

④NE-SW～NNE-SSW/60-80° SE

割れ目単体での連続性は乏しいが、断続的に連続している。亀裂は密着し、比較的新鮮なものが多い。

⑤sheeting-joint（傾斜30°以下、部分的に開口～マサ状の挟在物）

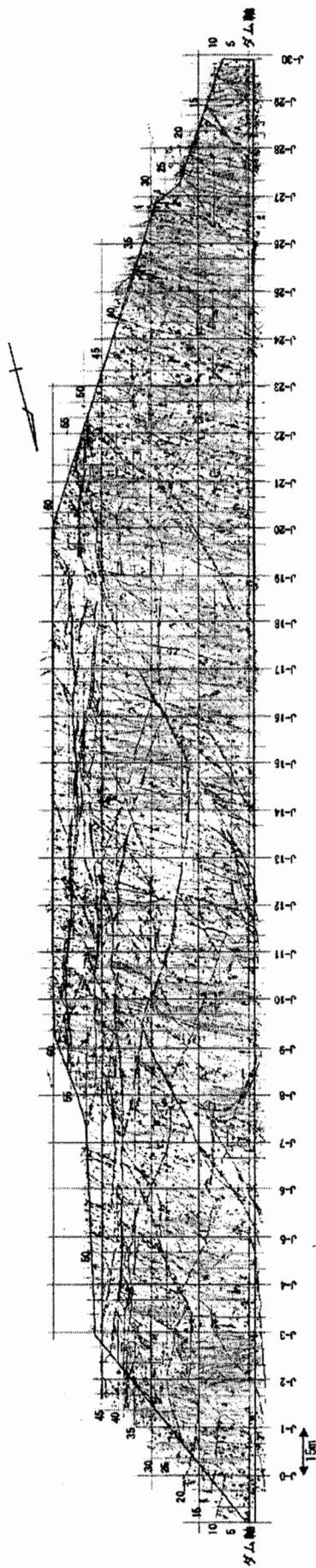


図-6 小山ダム基礎岩盤スケッチ
(原図：JV作成)

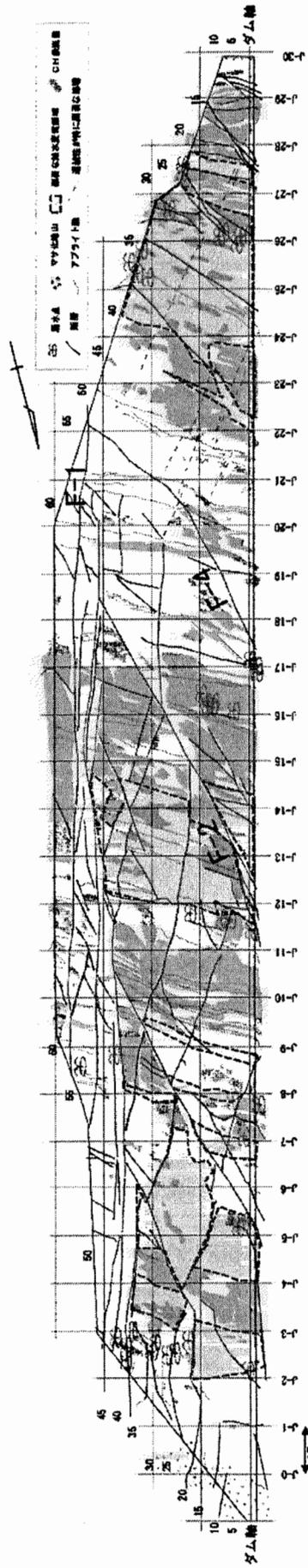


図-7 岩盤の状況

個々の交差関係は概略、以下になる。

②>③>④>①>⑤ (例: ③は②に切られる場合が多い)

前述したグループ①～⑤の割れ目の方向性をみると、図-9のシュミットネット中に示すような関係を示している。

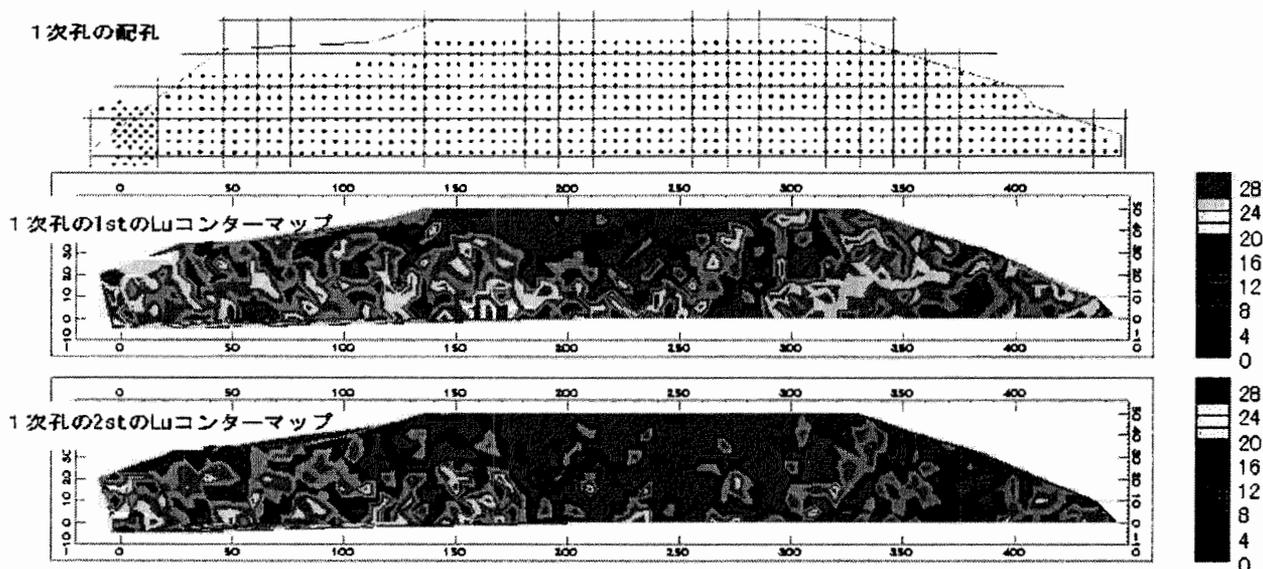


図-8 コンソリデーショングラウチングにおけるルジオンテストの結果

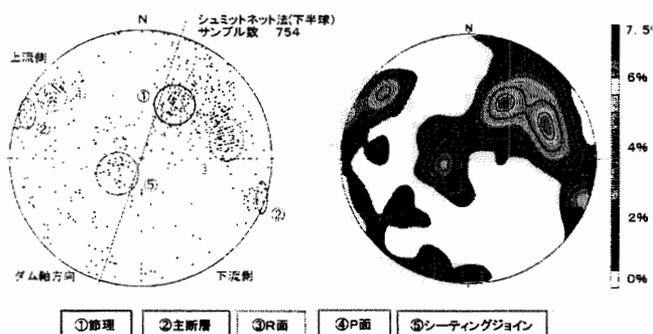


図-9 ダムサイトにおける割れ目の分布(北半球投影)

ここで、最も規模の大きいF-1断層をダムサイトスケールにおける主断層とすると、F-1断層とF-2断層の方向から図-9に示すシュミットネットの各極はF-1断層の二次剪断面として発達したリーデルシア(R面)やスラストシア(P面)として位置づけられる。

図-9の結果は、前述した割れ目グループ②～④は同じ応力条件下で形成された一群の割れ目として取り扱えることを示している。このため、今後、各割れ目グループを「割れ目系」として取り扱う。

4. フレームの抽出と割れ目系の構造発達史の推定

(1) サイトにおけるメインフレームの抽出

コンソリデーショングラウチングの結果、断層によりルジオン値の分布が規制されているように見える(図-7, 8および図-13参照)。このことは、割れ目のうち最も大きな構造である断層が、何らかのフレームを形成しているものと推測される。また、小山ダムでの断層は、ほとんどの場合、ある幅の粘土を伴う。そのため、断層面を通過する方向では、他の割れ目に比べて透水性としては低いことが考えられ、岩盤の透水性を評価する上で、何らかの流動を規制する割れ目であることが期待される。特にF-1断層およびその縁辺ではルジオン値のほとんどが2以下となっている。

また、断層を除いた割れ目の方向性を図-10のシュミットネットに示す。図-9のサイト全体での割れ目の方向性と比較すると、ほぼ同じところに極が分布しているようにみえる。この結果は、小山ダム基礎岩盤の割れ目系の分布にスケールに応じた階層性が存在する可能性を示しており、割れ目系についてのモデルを考える時、断層に着目することの有効性を表している可能性が考えられる。(現時点では、割れ目系の階層性についての詳細な議論は進めていないが、今後、モデルの階層性や広域応力場との関係を議論していく上では重要な課題の一つである。)

これらのことから、フレームモデルを構築する際の作業仮説としてまず、割れ目系がつくるネットワークの構造の内、最も大きなスケールを構成する断層に着目した。

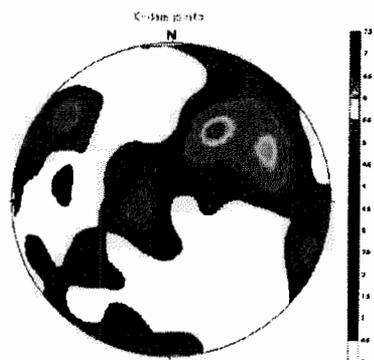


図-10 断層を除いた割れ目系のシュミットネット (北半球投影)

(2) 割れ目系の構造発達史

アプライト脈の方向性を図-11 のシュミットネットに示す。図-8 に示すダムサイト全体での割れ目の方向性の中で、割れ目グループ①の極と良く一致している。アプライト

脈はサイトを構成する花崗閃緑岩生成直後に貫入したと考えられ、花崗閃緑岩形成初期に生成された引っ張り系の割れ目の方向性を示している可能性が考えられる。アプライト脈はF-1断層、F-2断層などの断層により明瞭に変位を受けており、これらの断層が形成される以前に岩盤中に形成されていたことは明らかである。

以上のことから、アプライト脈の個々の幅、組み合わせをもとに、断層の見かけの水平変位分を戻しF-1断層の運動による割れ目生成以前のある時期の状態の復元を試みた結果を図-12 に示す。

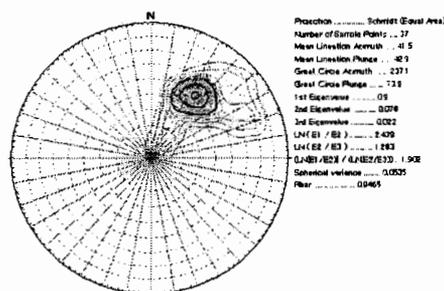


図-11 アプライト脈の方向性

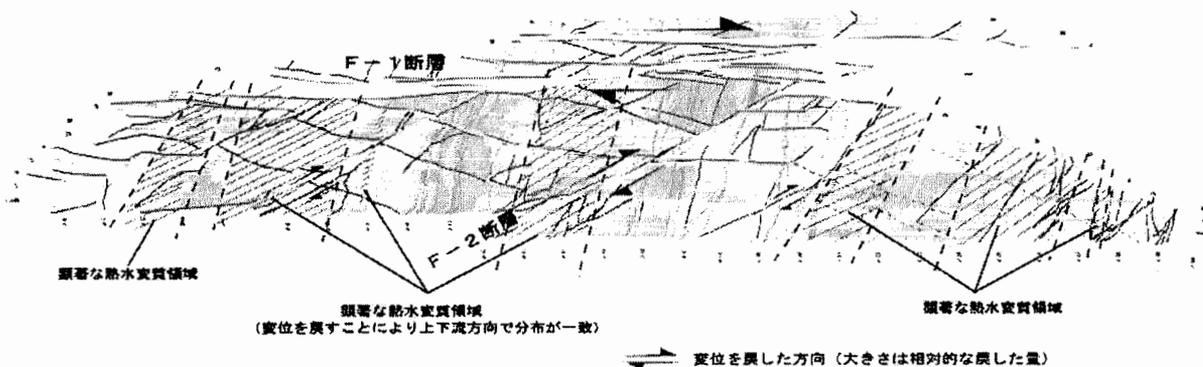


図-12 断層変位を戻した時の岩盤状況

図-12 では、アプライト脈の個々の幅、組み合わせが上下流方向で比較的良い一致を見ることができ、F-1断層で約60m、F-2断層で約20mの見かけの水平変位量があることが推定された。さらに、変位を元に戻すことによって、一見不規則に見えた顕著な熱水変質ゾーンが上下流方向に連続する構造となっていることが明らかになった。また、このゾーンに挟まれるように比較的まとまったCH級の岩盤が分布していることがわかった。

また、顕著な熱水変質ゾーンを形成する節理の方向もアプライト脈とほぼ同じであり、これらも割れ目系(図-9中の①に対応する)として扱うことができる。

これらのことから、熱水活動と断層運動のイベントの関

係として、F-1断層を形成した断層運動の前にアプライト脈の貫入および熱水の影響が岩盤に及んでいたことがわかった。

これらの作業をとおして、F-1断層運動以前に存在していた上下流方向の構造とこれを変位させたF-1断層、F-2断層およびF-1断層の二次剪断面として発達したリーデルシア(R面)やスラストシア(P面)を識別することが出来、ダム基礎岩盤に内在する割れ目系の構造発達史を解析することが可能となった。

つまり、割れ目系の構造発達史として、引っ張りの割れ目系を通してアプライト脈の貫入、熱水の影響が及んだのち(アプライト脈と熱水変質の前後関係は現時点では不明)、

F-1断層の運動により、現在みられる割れ目系の大枠が決められた。また、基礎岩盤面で顕著な熱水変質を被る領域が上下流方向にのびる領域を形成していることから、現在認められる岩質はF-1断層系の形成以前に形成された割れ目系の影響を強く受けていることが、仮説として考えられる。

以上の地質構造の解釈から、現在の小山ダムの基礎岩盤における水理地質構造を解釈する上で、F-1断層、F-2断層がメインフレームとすることができ、上下流方向に発達する割れ目系、およびF-1断層の二次剪断面として発達したR面、P面がサブフレームとして寄与していることが推定される。

5. 推定されたフレームの検証

本章では前章で構築した水の流れを規制するフレームのモデル（水理地質構造の作業モデル）について各データから検証を行う。

(1) 掘削時の岩盤状況

図-13 (1) に岩盤状況に解釈を加えたものを示す。

掘削時に確認された湧水点は上下流方向に連続した位置に分布する傾向にあった。この湧水点の並びは断層、岩質との関係は認められず、概ねサブフレームの一つである引張りの割れ目系（割れ目グループ①）の方向に沿った方向にあたるのがわかった。ただし、同一の割れ目からの湧出ではなく、近接する複数の割れ目からの場合もある。このため、特定の割れ目系の限られた複数の割れ目が水みちになっていると考えられる。

一方、岩質の違いも上記の湧水位置の連続性と同様の方向性を示している。大きな構造をみれば、断層の変位を戻した場合に確認される顕著な熱水変質ゾーンとまとまったCH級岩盤の分布がダム軸に直交する方向（引張り割れ目の方向）に規制されている。さらに、小さな構造をみれば、CM級がまとまって広がる領域もしくは顕著な熱水変質ゾーン中に見られる小規模なCH級岩体も割れ目グループ①の方向に長軸をもつように分布する傾向が強い。

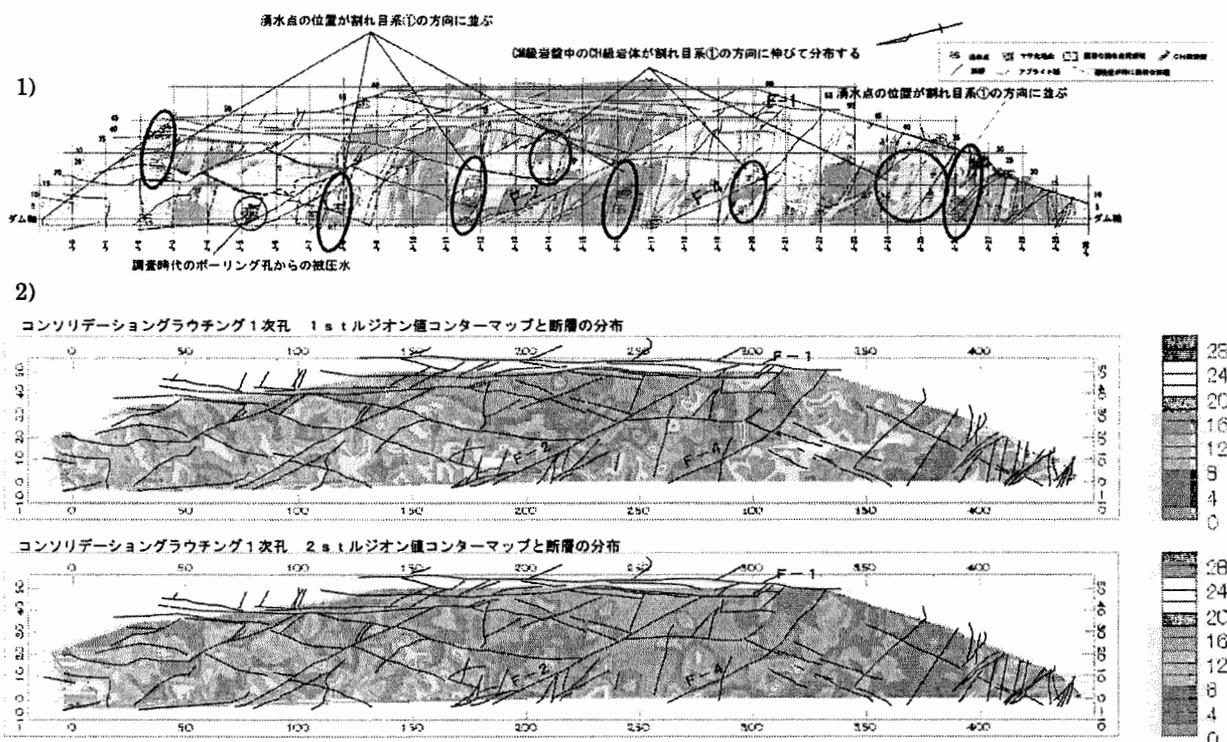


図-13 基礎岩盤の状況と水理地質モデルの検証

1) 岩盤状況の検証、2) コンソリデーショングラウチングと断層

岩質の差、つまり風化が地下水の流れに影響を受けていることは広く知られていることであるが、小山ダムのサイトで確認できる岩質の差は先にあげたサブフレームを形成する割れ目系の方向(F-1断層以前の引張り割れ目系)

と調和的であると見ることができる。

(2) コンソリデーショングラウチング

図-13(2)にコンソリデーショングラウチング1次孔の1

ステージと2ステージのルジオン値のコンターマップに断層を重ねた結果を示す。

F-1断層自体は全体にルジオン値が低く、難透水ゾーンを形成していることが分かる。また、F-2断層を含む割れ目系(割れ目グループ③:R面)にあたる断層によりルジオン値のコンターが左右岸で明瞭に分離されている。また、割れ目系④に相当する断層(P面)により、さらに上下流方向で明瞭に分断されていることが読み取れる。このことは、断層により岩盤の水の透しやすさの連続性が絶たれていることを示唆していると思われる。特にメインフレームとなっているF-1断層、F-2断層ではその傾向が明瞭となっている。

F-1断層の上流側、F-2断層の下盤側にあたる領域は全体に低透水領域となっている。この領域には堅硬なCH級岩盤、熱水変質を被ったCM級岩盤が混在している。ダムサイト全域でみれば顕著な熱水変質ゾーンのルジオン値は高くなる傾向にあるが、この領域では低い値となっている。これはメインフレーム(F-1断層、F-2断層)で挟まれているからとも解釈は出来るが、断層の幾何学的パターンが同様なブロックで必ずしもこのような傾向は認められない。この理由として、F-1断層の発生時に他の箇所比べて破壊を免れた、F-1断層発生前の割れ目系の影響を強く残しているなどのことが考えられるが、今後、

検討を加えていく必要がある。

現時点では部分的に解釈上の問題を残すが、ダムサイト全体のスケールでフレームの仮説をみると、概ねメインフレーム、サブフレームの考えに調和的なルジオン値の分布となることが分かった。

(3) カーテングラウチング

カーテングラウチングのパイロット孔ボーリングコアから想定されるダム軸における概略の地質縦断面図とパイロット孔のルジオン値を図-14に示す。

総じて深部ほどルジオン値が低くなる傾向がある。この中で、F-2断層の上盤側の領域で相対的に高いルジオン値を示しており、ダム基礎岩盤の面的な透水性評価の指標となるコンソリデーショングラウチングの結果とも良く一致している。断層などの上盤側で高透水となる関係は両岸のマサ化領域を除き、他の断層にも当てはまる傾向が認められる。このことは、F-2断層および同系の断層(R面)の上盤側に主となる水みちが形成されていることを示唆しており、F-2断層がメインフレームを形成していることを裏付けている。また、F-2断層と同様な割れ目系に含まれる断層も検討しているダムサイトのスケールではメインフレームとして機能している可能性も考えられる。

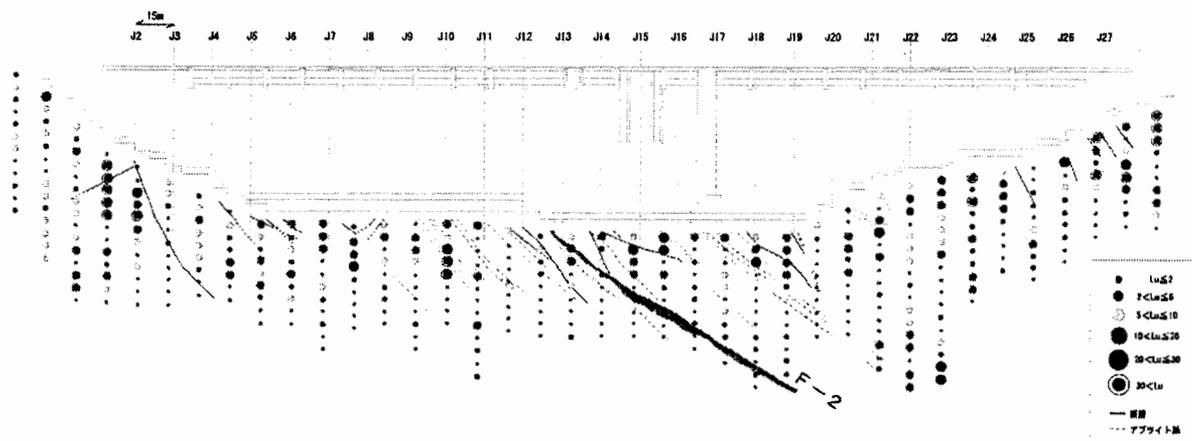


図-14 ダム軸における地質縦断面図(概略)とパイロット孔のルジオン値

(4) 検証結果のまとめ

掘削面の岩盤状況、湧水点の位置およびグラウチング時のルジオン値の分布は、3章で作業仮説として組み立てたメインフレームとサブフレームで構成される水理地質構造と調和する解釈が可能であることが分かった。

現在までの検討から得られた小山ダムの水理地質構造をまとめると、以下のようになる。

- ①現在、F-1断層とF-2断層がメインフレームとして機能し、大枠の水理地質構造を制約している。また、F-2断層と同じ割れ目系の他の断層もメイ

ンフレームとして寄与している可能性がある。

- ②サブフレームとしてF-1断層の運動以前に形成されていた割れ目系(引っぱり割れ目系)とF-1断層の二次剪断面が寄与している。
- ③現在、地表で認められる岩質の差が、過去のある時期に水を透しやすかった割れ目系(現在のサブフレーム)に依存している。

6. まとめ

今回の検討は、主として基礎掘削面の岩盤スケッチを主として実施した。そこから導かれたメインフレーム・サブフレームといった概念を用いた水理地質構造についての作業仮説は場の状況を系統立てて説明することに非常に有用であることがわかった。

本発表で述べた検討方法で、必ずしも水理地質構造の唯一解を求めることはできないが、地質構造を適切に解釈することによって、ルジオン値などの試験データを統一的に解釈できる仮説を導くことができることが示されたのではと考えている。このような仮説では、割れ目系の構造がもつ空間的な連続性が地質の論理に従っており、単に試験データを空間的につないだものと比べると遙かに確からしさが高いものとなることは明らかである。このようなアプローチは、地質条件やデータ量などに依存するため、すべてのサイトに対して適用できるものとはならないが、検討事例およびそれに伴う経験を蓄積することによって、割れ目系岩盤の地下水流動をより現実的に理解できるようになることが期待できる。また、最終的にはカーテングラウチングのような工学的問題に対しても合理的な設計施工を行う上も有効な手法となり得ると考えられる。

7. 今後の課題

今までのワーキングの検討では、割れ目系に着目することで、ダムサイトのスケールにおける透水性に寄与するフレームの抽出の可能性が示された。今後、小山ダムの事例をはじめ様々な事例を検討することで以下のことについて検討する必要がある。

①広域場の展開

広域応力場の変遷を考慮した割れ目系の形成過程とそれに対応するであろう地下水流動に関わるフレームを様々なスケールで検討してみる必要がある。

②岩盤深部への浅部岩盤情報の展開

今回の検討ではデータの質・量の制約から基礎掘削面の情報を主として検討を進めた。今後は、深部岩盤への展開を考える上で三次元モデルを構築するためのアプローチを実施していく必要がある。

③異方性を有する岩盤（層状岩体）でのフレームの検討

堆積岩のように初生的に異方性を有する岩盤についても、割れ目系の発達と水理地質構造の関連を考察するアプローチを検討していく必要がある。

おわりに

現在、WG2 では、「はじめに」で述べた現状を踏まえ、岩盤の割れ目系の透水性評価方法について検討を進めてい

る。今回の発表はその過程で得られた結果の一部であり、特定のダムサイトの岩盤に対する例である。岩盤の割れ目系の特徴はそのサイトが位置する地質と広域的な応力条件に強く依存している。したがって、ここでの検討結果は、岩盤の割れ目および割れ目系の調査・解析にあたって、“このように評価しなければならない”といったものではなく、“このサイトにおいては、このように解釈するのが最も合理的に場を理解できる”という性質のものである。

現在も小山ダムでの検討を続けている段階であり、多くの方々からご意見を頂戴できることを望むとともに、このような検討例を増やして、対象とするスケールにおける地質構造と透水性の関係を理解する一助となれば幸いである。

謝辞

今回のWG2での検討にあたり、茨城県久慈水系ダム建設事務所ならびに熊谷・株木・鈴縫特定建設工事共同企業体の皆様には多大なご協力と有意義なご助言をいただきました。ここで、深くお礼を申し上げます。

「応用地質学における地下水問題研究小委員会」ワーキング2検討メンバー：

主査 奥田英治（アイドールエンジニアリング株）

委員 長田昌彦（埼玉大学工学部）、徳永朋祥（東京大学工学部）、塩崎功（株間組）、川越健（株熊谷組）、細谷真一（株ダイヤコンサルタント）、精松保貴（株建設技術研究所）、田中智（株建設技術研究所）、磯村敬（アイドールエンジニアリング株）、芝田修一（埼玉大学工学部 *現株竹中土木）

参考文献

- 1)奥田英治(2004):地下水流動系に関わる岩盤割目の評価、平成16年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集
- 2)蛭田信行・松田修平(1997):小山ダムの設計・施工について、ダム日本, No.635, pp43-60
- 3)越谷信(1986):棚倉破碎帯の変形と運動、地質学雑誌 Vol92-1, pp15-29
- 4)茨城県・(財)ダム技術センター(1987):大北川総合開発事業第2-83号 小山ダム堤体配置設計等委託工事報告書 第1編地質総合解析

地質スケールに応じた地下水流動問題とその応用地質学的アプローチ

熊本大学・理学部 嶋田 純

1. はじめに

標記のテーマで設定された今回のシンポジウムの総合討論に先立って、議論の糸口となる話題提供を簡単に取りまとめた。

2. 水文循環とそのスケール

太陽系の第3惑星である地球には水が存在し、しかもそれらが地球表面において三態（気体、液体、固体）で存在できるように理想的な温度・大気圧状態になっているために、太陽からの熱エネルギーと地球の重力によって水の循環が発生し、それによって地球全体の温度分布の平滑化が図られている。このような水循環の中で淡水の占める割合は僅か2.5%程度に過ぎないが、我々人間の生活に極めて密接に係わる重要な要素であり、その循環の実態把握を行う学問分野を水文学（すいもんがくと読む）と言い、広い

意味での地球科学に属しているが、水は人間生活と密接に関係していることから実学である農学・林学や土木工学・衛生工学、社会経済学等との関係も極めて深い学際領域の学問でもある。

この水文学が対象としている地表面領域は、図-1の概念図に示される様に、実は地球表層の一部であり、このほかに循環していない水が存在している領域も多くある。我々の関心事は、寧ろこの循環水が及ぶ領域がどの範囲（深度）までかという点に注がれている。例えば最近、極めて透水性の低い第三紀の海成泥岩中の地下水には、海岸から10km以上内陸部で地表面標高が100m程度の地点においても、堆積時の海水起源の塩水が数百万年経過した現在でも深度400m以下に滞留している事実（寺本、他、2004）が確認されており、水循環の限界深度に相当する一例と考えている。

Figure 2.1. General circulation of water in nature (after Z.S. Abramov).

1, free marine water; 2, sedimentary cover; 3, crystalline rocks of the crust; 4, magma chamber; 5, mantle; 6, upper and lower boundaries of intensive water exchange.

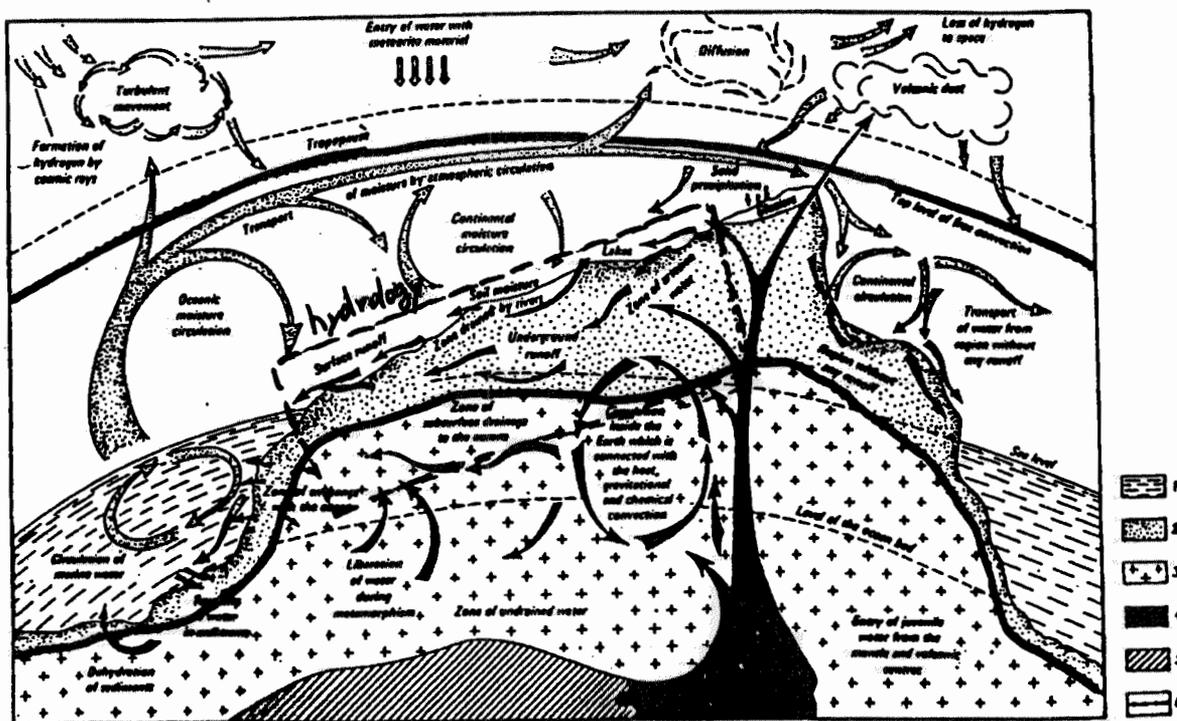
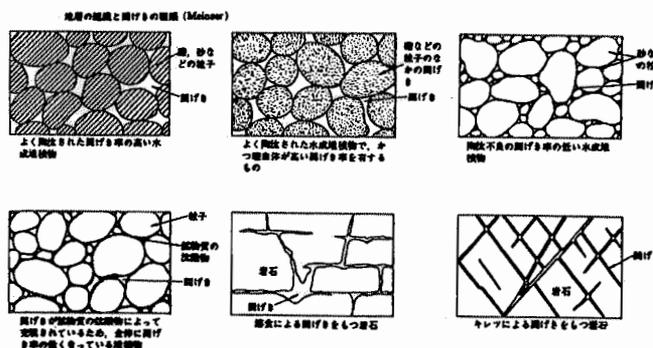


図-1. 地球の上の水循環概念図 (Pinneker, E.V. による)

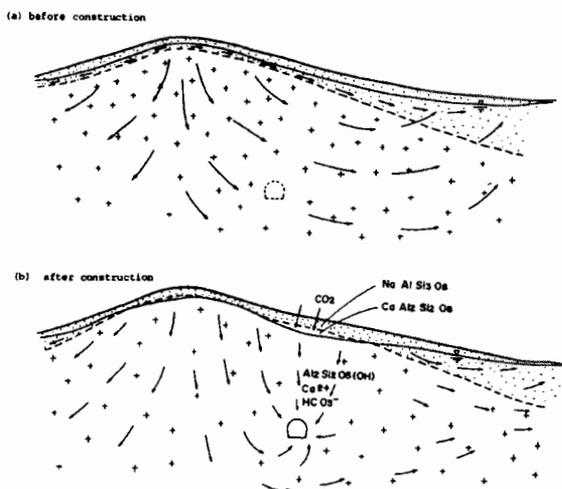
3. 間隙構造の多様性と岩体の大きさに応じた割れ目系の展開状況

学術的には、地面より下の地層中の間隙及び岩石の亀裂や空洞を飽和して、重力によって移動している水、あるいは移動しうる水を地下水(groundwater)と定義している。重力によって移動するという事は、前述の水循環の一部を形成していることに他ならない。ここで問題となるのが、移動経路となる地層中の間隙構造である。

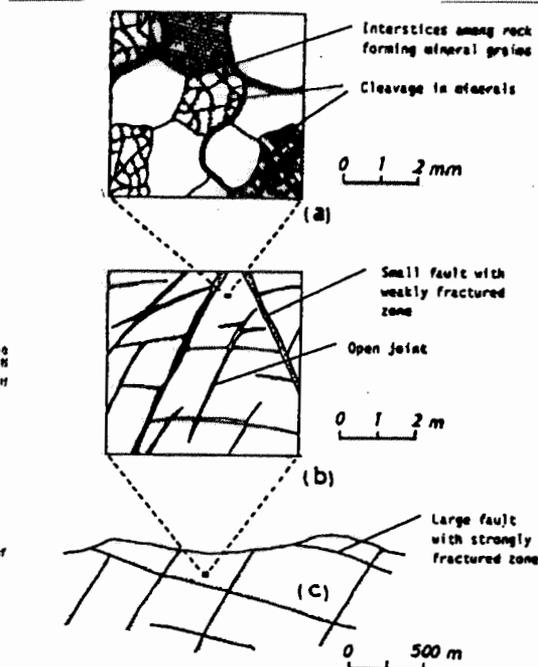


図一2. 様々な間隙構造模式図 (Meinzer)

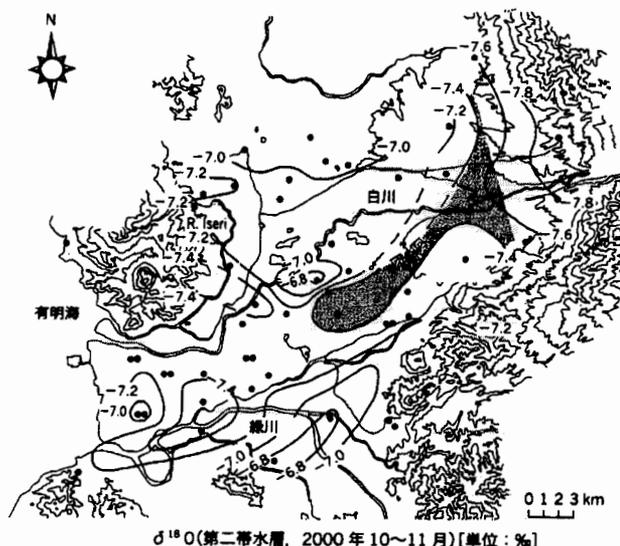
図一2は、地下水学の教科書によく見られる様々な間隙構造を模式化した図で、未固結の堆積層と溶食間隙を主体とする石灰岩や、亀裂系間隙からなる岩盤が示されている。この図では、取り扱っているスケールについてのコメントが無いが、実は亀裂系岩盤中の地下水と多孔質な未固結の堆積層とは、そのスケールが大きく異なっている。特に岩盤亀裂の場合、図一3に示す様に、岩石を構成する結晶構造中の数mm規模の亀裂から、ジョイントや節理等を主体とする数メートル規模の亀裂、大規模な構造運動に伴う断層破碎帯のような数百mからkm規模の亀裂と色々な規模の亀裂系が存在している。このような様々な間隙、亀裂を移動経路として地下水が流動していることになる。



図一5. 亀裂系岩盤からなる筑波トンネルの掘削前後の地下水流動変化 (嶋田 1985)



図一3. 岩体の大きさに応じた割れ目系の分類 (渡辺 1983)



図一4. 阿蘇西麓台地中の火砕流帯水層を涵養する白川河川水の効果 (小坂、他、2002)

実際の広域スケールで地下水流動を捉えてみると、多孔質の火砕流堆積物からなる阿蘇火砕流中の地下水流動に浸透する河川水からの涵養効果の実態 (図一4 参照) や、花崗岩中に掘削されたトンネルへの地下水流出に伴う空洞周辺の地山中の亀裂系地下水の流動変化の実態 (図一5) に見られる様に、間隙の構造に関わらず広域的な地下水の流動の実態は明確に示されている。

4. REV

地下水の運動方程式を支配している Darcy の法則は、代表的な連続体が想定できるような粒状体からなる帯水層を想定した経験式であり、ある程度の大きさの粒子以上のサイズの間隙系について成り立つとしている。逆に言うと、法則が成立する間隙サイズには下限が存在することになる。Hubbert(1940) は、この法則が成立するマクロサイズの間隙の下限を図-6 に示す様に、仮想的な間隙率と対象媒体サイズとの関係で示した。Bear(1972)は、この概念を更に追求して図中の V_3 で示した媒体のサイズを Representative Elementary Volume (REV) と定義している。

この REV のサイズは、絶対スケールではなく、対象とする帯水層によって異なると考えられ、多孔質な未固結帯水層では、堆積物の粒子の大きさ程度のものであるが、亀裂系岩盤の場合には、亀裂の密度により図-3 に示すような、ジョイントや節理スケールから破砕帯スケールまで大きく変動していると考えられる。

図-5 に示したような広域の地下水流動スケールでは成立する大域的な流れも、スケールを小さくしてくると亀裂の分布状態や透水性によって大きく異なることになり、REV の下限を下回る領域になってくる。しかしながら、耐水性を重視するダム基盤のような岩盤構造物における地下水流動特性には、寧ろこの領域の現象がクリティカルな情報として重要になっている。

5. 地下水流動場を規定する『氏と育ち』

本シンポジウムで紹介された関東地域の広域地下水流動と揚水規制に伴う変化、そこから引き起こされる首都圏で発生している応用地質学の問題では、多孔質の未固結帯水層地下水に伴う流動が、また、ダム岩盤周辺の割れ目系地下水における応用地質学の評価では、亀裂系地下水中の流動が取り上げられたが、地下水の器としての地質媒体の特性と言う共通項で繋ぐことが出来る。

地下水が流動する間隙や亀裂系は、地質媒体中に形成されたものであり、それらの地質媒体がどのような起源で形成され、またどのような履歴を変遷してきたか(『氏と育ち』)に関する情報を掌握することで、流動の実態をより明確に理解することが可能となる。

岩盤亀裂系の場合には、亀裂の発生要因、その後の亀裂の充填状況等の情報(続成作用や構造運動も含む)がこれに相当するし、多孔質未固結帯水層の場合には、透水性の同等な地層の連続性や、それらの堆積環境等の情報がこれに相当すると考えられる。これらの情報の掌握には、地質学的な知識を持った地下水技術者の存在が不可欠であり、これは正しく応用地質学分野の地下水技術者の役割に該当する。

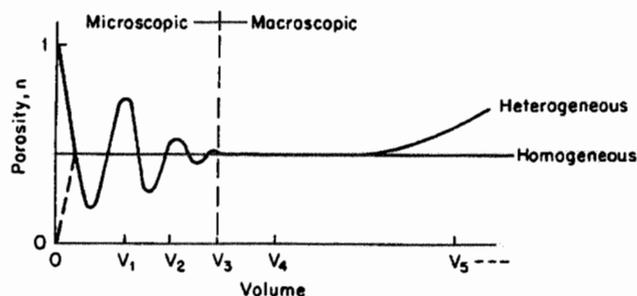


Figure 2.26 Microscopic and macroscopic domains and the representative elementary volume V_3 (after Hubbert, 1958; Bear, 1972).

図-6 REV 概念図

今後益々、複雑な地下水に関連する土木構造物が台頭することに伴い、この分野の技術の必要性は益々増大するもの考える。

参考文献

- 寺本雅子・嶋田純・国丸貴紀(2004): 低透水性堆積岩盤における地下水流動の同位体水文学的研究. 日本地下水学会 2004 年度春季講演会講演要旨集 No.22
- 小坂寛、嶋田純、坂本正巳 (2002): 安定同位体比から見た熊本地域における地下水の起源. 2002 年日本地下水学会秋季講演会要旨 140-143.
- 嶋田 純(1985): 筑波トンネルの掘削に伴う結晶質岩中の地下水挙動と水質変化. ハイドロロジー, 15, 42~54.
- Meinzer, O.E., (1923): The Occurrence of groundwater in the United States. U.S. G.S. Water Supply Paper 557, 94pp.
- Pinneker, E.V. (1983): General Hydrogeology, Cambridge University Press, 141.pp.

P42 . 首都圏の地下水位上昇問題に係る広域地下水流動系について

Discussion of the regional groundwater flow system in relation to the rise of the groundwater level beneath the alluvial plain of the Metropolitan area

斎藤庸(日本工営), 林武司, 宮越昭暢(産業技術総合研究所), 三宅紀治(清水建設), 廣瀬誠(ジオテック)
Mamoru Saito, Takeshi Hayashi, Akinobu Miyakoshi, Noriharu Miyake, Makoto Hirose

1 . はじめに

地下水は水循環の重要な構成要素の一つであり、首都圏においても古くから農業・工業・飲用などの水資源として活発に利用されたため、沖積低地を中心として過去には過剰な揚水による著しい地下水位低下を引き起こし、それに伴って顕著な地盤沈下が発生した。揚水規制により近年そうした地下水障害は沈静化した。が逆に、場所によっては30~40mもの被圧地下水位の上昇(回復)を招き¹⁾、鉄道地下駅など地下インフラ施設への影響問題が顕在化している現状にある。最近の研究成果^{2), 3)}によれば、首都圏の被圧地下水位上昇には関東平野規模の広域地下水流動の関与が指摘でき、地下水適正管理あるいは地下水環境保全の観点からより広域場での地下水流動系の実態詳細把握が重要となっている。こうした背景から筆者らは、2001年10月に設立された「応用地質学における地下水問題研究小委員会(日本応用地質学会)」で「都市域の地下水位上昇が地盤・構造物に与える影響」について検討を重ねてきたところである。本稿では、筆者らがこれまでの活動で把握してきた、首都圏都心部(主に沖積低地)の地下水に係わる広域地下水流動系の概況と適正管理の方向性について概説する。

2 . 関東平野の広域地下水流動系把握の現状

広域地下水盆の地下水流動研究では、地下水ポテンシャルや環境同位体といった流動の指標となる要素の調査が有効である⁴⁾。以下、これら流動の指標となる要素に関する最新の研究成果から推定しうる、関東平野規模の広域地下水流動系の大要を述べる。

2.1 地下水ポテンシャル

林・宮越⁵⁾による関東平野全域の地下水ポテンシャル(深度150~200m付近, 1999~2001年間平均)は、平野北西部(利根川中流域), 北東部(鬼怒川中流域)及び南西部地域(武蔵野台地)で高く、平野中央部で低い。平野中央の低水頭域は加須~中川低地帯にとどまらず、その周辺の台地域(大宮台地, 常陸台地西部, 下総台地北西部)まで及んでいる。断面ポテンシャル図(図-1, 2^{5), 6)}の上段)によればこの低水頭域は標高-100以深-300m付近にまで達している。

三宅¹⁾によれば、この低水頭域は揚水により生じたものと考えられ(図-3¹⁾), 揚水量の減少(図-4⁷⁾)とともに水頭値は上昇している(図-5⁷⁾)。ただしより広い範囲では、揚水量に見合った水頭低下が生じていない地域もあり(図-3), 揚水量と水頭低下ゾーンは必ずしも1対1に対応していない。

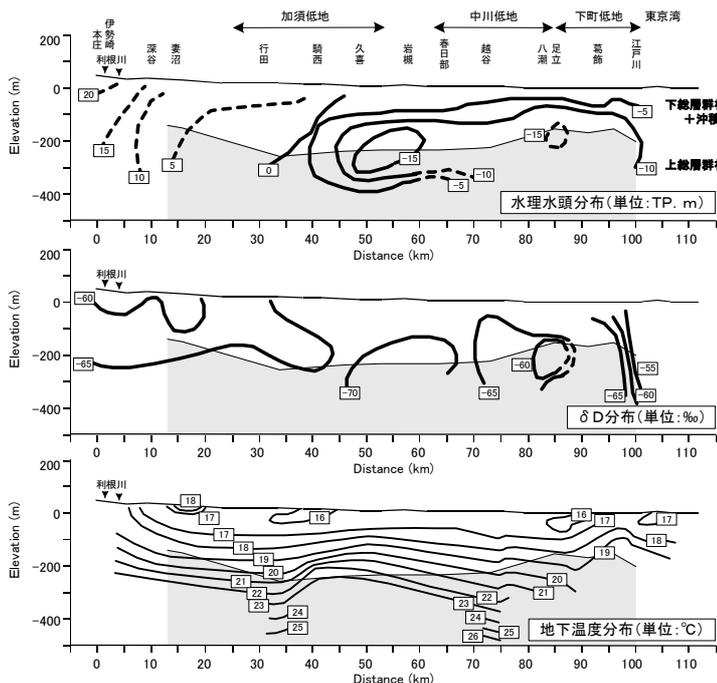


図-1 平野縦断方向(北西~南東)断面における水理水頭, Dおよび地下温度の鉛直分布(文献5),6)に基づき作成)

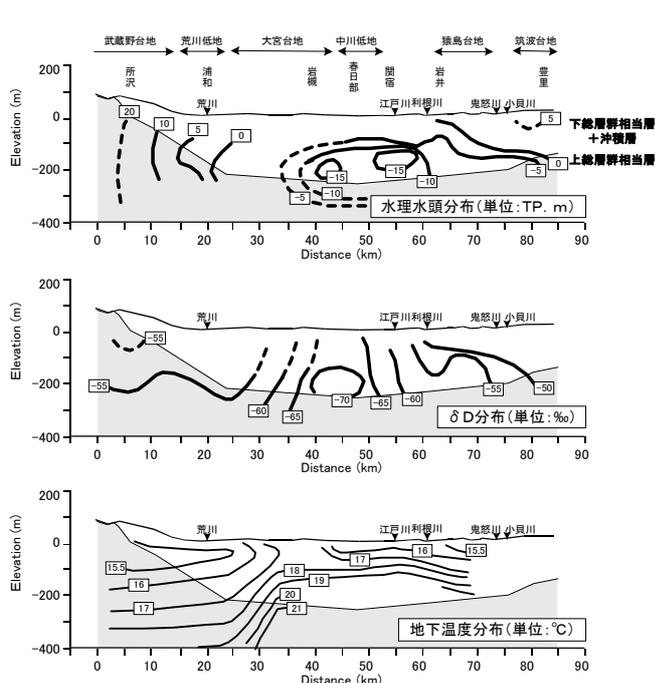


図-2 平野横断方向(北東~南西)断面における水理水頭, Dおよび地下温度の鉛直分布(文献5),6)に基づき作成)

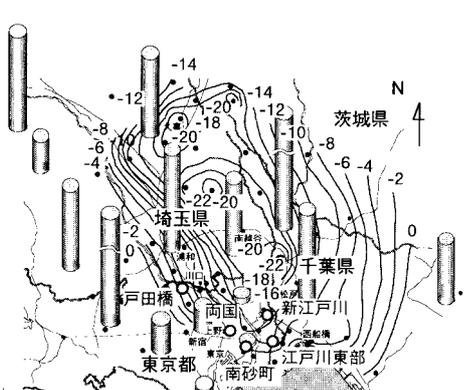


図 - 3 1992年100m以深の地下水位分布と地域揚水量の関係(単位:TP.m)

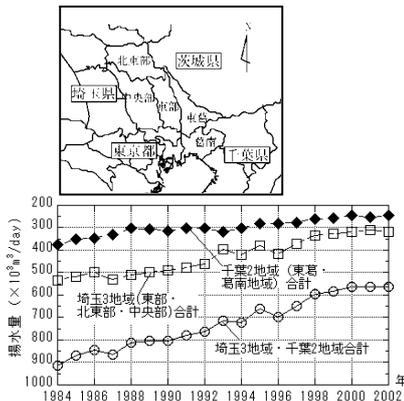


図 - 4 周辺の揚水地域と揚水量経年変化

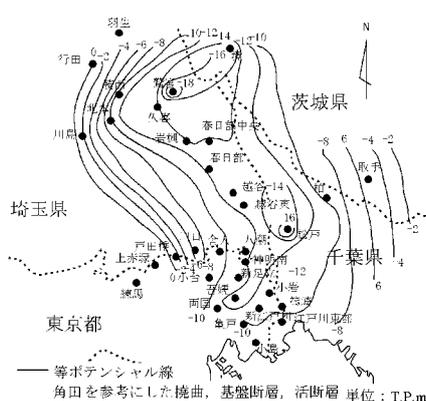


図 - 5 2002年100m以深帯水層の地下水ポテンシャル

これに関して三宅¹⁾は、角田⁸⁾による関東平野地下深部の撓曲・活断層・基盤断層の分布(図-5に併記)を拠り所に、深部地下水は地盤構造によって影響を受けて変化し、必ずしも地域揚水量の影響を直接的には受けない可能性のあることを指摘した。地盤構造が広域地下水流動に大きく影響することを確認した具体例としては、例えば立川断層をはさんだ地下水ポテンシャル分布の顕著な“ずれ”が知られており(Kayane 他⁹⁾)、同様な水文環境が関東平野中央地下深部に存在する可能性がある。

2.2 水素同位対比(D)

林・宮越⁵⁾が作成した関東平野全域のD分布(図-1,2の中段;採水は1999~2001年)によれば、平野中央部低水頭域の比較的浅部から深部に渡って低同位体比の地下水が存在し、極めて特徴的である。D以外の酸素同位体比(¹⁸O)及び水質組成に関しても、沿岸域の海水の影響等を勘案する必要があるが、Dの示す結果に調和的であることが報告されている。

平野部における湧水など現在の浅層地下水のDが60‰より高いことは、水収支の観点から見て、地下水ポテンシャル分布から推定できる浅層から深層への地下水流動の規模(流動量)がさほど大きく無いことを示唆している。また、平野中央部の低同位体比地下水の年代測定結果が4,000~16,000年を示すことを考え合わせると、低同位体比地下水帯は地下水揚水の影響を受けるかなり前(おそらく海水準が現在より大きく低下していた最終氷期の寒冷気候下で涵養・形成されたと推定できる⁵⁾)。

なお、平野中央部の低水頭域の中であって地下水ポテンシャルの極小値を示す八潮・足立地区の地下深部には、60‰の高D地下水が存在する。当該地区では、地下水ポテンシャル分布に調和的な、浅層から深層に向かう相当程度の地下水涵養の存在が推定可能である。これらは、地盤の透水性が場所により異なり、地下水涵養量も地域毎に変化することを示すものと考えられる。

2.3 地下温度分布

地下温度分布は地下水流動に伴う熱移流の影響を強く反映し、涵養域では地表面からの低温の地下水涵養によって低くなるのに対し、流出域では地下深部からの熱移流によって高くなる。

宮越・林⁶⁾の関東平野全域の地下温度分布調査(1999~2002年)の結果によれば、関東平野周辺域や台地は地下温度の低下

する涵養域に相当し、平野中央部と東京湾沿岸域に地下温度が上昇する流出域があることが分かる(図-1,2の下段及び図-6)。この結果は、先に述べた同位体比や水質から読み取れる地下水流動にも調和的な結果である。さらに、大局的には角田の深部地盤構造に調和した地下温度分布となっていること、平野中央部低水頭域の中であって地下水ポテンシャルの極小値を示す八潮地区近傍に局所的な地下温度低下域があること、等から、揚水の影響を受けた現在の地下水ポテンシャル分布にも調和的である。

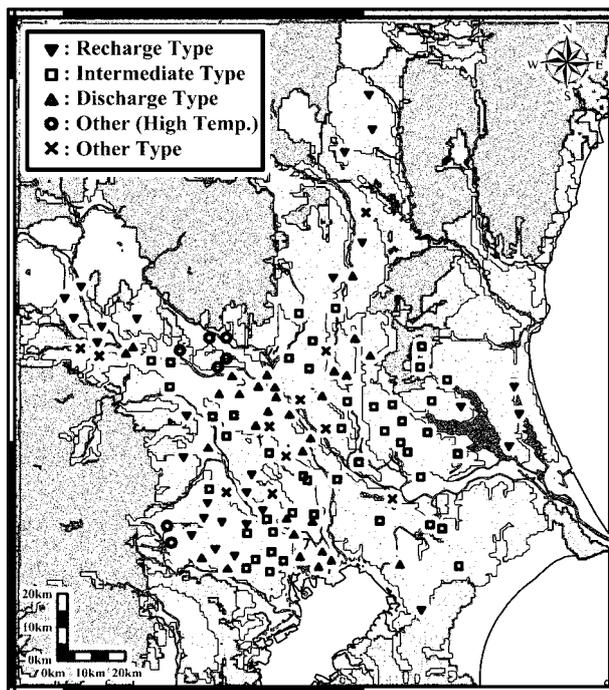


図 - 6 地下温度プロファイルのタイプ別分布図

2.4 関東平野の広域地下水流動系とその把握に係る今後の課題

広域の同位体比分布特性からは、揚水の影響を受けるはるか以前の寒冷気候下で低同位体比地下水帯が形成され、そうした低同位体比地下水が、現在の比較的高同位体比の地表水・浅層地下水の涵養により置き換わりつつあること、またその置換の速度は地下深部の断層など地盤構造や(表層)地盤の透水性並びに揚水等の人為的影響を受けて地域毎に大きな開きがあること、などが推定される。一方、地下温度分布からは上記の他、涵養域の中でも武蔵野台地からの地下水涵養が大きい

いこと、そこで涵養された地下水が北東の低水頭域に大量に流入することは水質特性から判断して否定的であるため、距離的に近い東京湾岸の流出域に流出している可能性の大きいこと、等が推定できる。

こうした仮説は関連データの今後一層の蓄積とその検討により検証されることになるが、これら地下水流動の指標となる要素の調査研究のみでは定性的な議論に留まる懸念が残る。こうした課題は、涵養量や揚水量などを集計して水収支的な検討を行い、定量的な議論を通して解決する必要がある。例えば斎藤・三宅²⁾は、関東平野南西域に相当する多摩川流域並びにその北東に隣接する武蔵野台地上小流域の水収支検討を行って、多摩川流域(の主に河床部)から河川水が平均数 m^3/s 規模で(流域外に)地下水流出していること、その多くは深部帯水層に流入し首都圏都心部沖積低地下に流下すると考えられるが、一部(1~2 m^3/s 程度)は隣接する武蔵野台地上小流域に流入・流出している可能性があること、を示した。

このように水収支解析は、地下水ポテンシャルや同位体調査といった流動の指標となる要素の調査とともに、地下水流動系の評価にあたり有効かつ重要である。

3. 首都圏都心部における地下水位上昇問題

3.1 最近の被圧地下水動態変化

図-7は100m以深被圧帯水層の年平均地下水頭変化(1984~2002年)と周辺5地域揚水量(図-4)の関係を示したものである(三宅・斎藤⁷⁾)。図は、東京の揚水量は、その規模および経年変化から被圧水頭への影響は小さいと判断し除外して作図したものである。グラフの右端が1984年に左端が2002年に相当する。いずれのグラフも右下から左上に移行する傾向にあり、広域的な揚水量の減少とともに線形的に地下水頭が上昇することを表している。なお、鷲宮2号及び両国第2では途中、揚水量との相関が悪い時期があるが、これらは限られた地域の

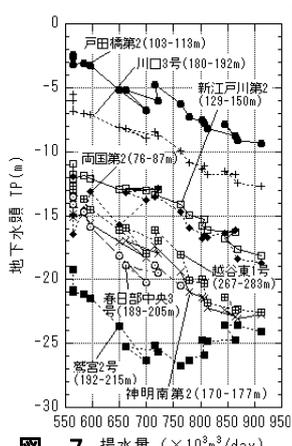


図-7 揚水量(×10⁸m³/day) 深度100m以深帯水層の年平均地下水頭と周辺5地域合計揚水量の関係

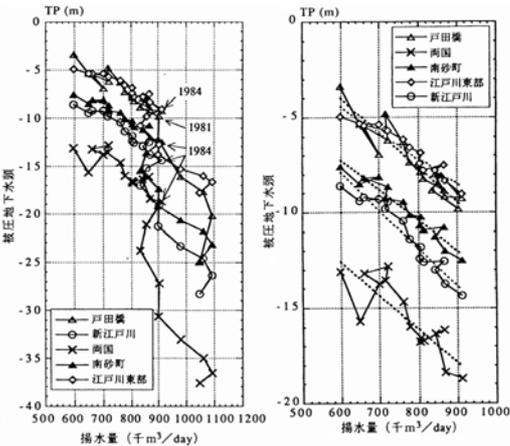


図-8 東京沖積低地の深度100m以浅帯水層の被圧水頭と周辺5地域揚水量の関係

表-1 揚水量減少に伴う東京沖積低地の被圧水頭予測 (周辺5地域の合計揚水量が平成9年の80%に減少した場合の各地点の予測水頭)

対象地点	被圧水頭予測値 ①	1992年実測値 ②	①-②
戸田橋	TP -2.57m	TP -6.30m	3.73m
両国	TP -11.21m	TP -14.67m	3.46m
南砂町	TP -6.00m	TP -9.45m	3.45m
江戸川東部	TP -3.37m	TP -6.14m	2.77m
新江戸川	TP -6.36m	TP -10.45m	4.09m

揚水の影響を強く受けているためと考えられる。

図-8(左図)では1976~1994年を対象に、100m以浅被圧帯水層の南砂町(スクリーン深度65-70m)、江戸川東部(同62-67m)、新江戸川(同60-70m)および戸田橋(同51-59m)の地下水頭と周辺5地域揚水量との関係を示した(三宅¹⁾)。各測点とも右下から左上に連続的に変化しており、揚水量の減少とともに水頭が上昇すること、戸田橋、その他の3地点でそれぞれ1981年、1984年以後はおおむね揚水量と線形関係にあることがわかる。1981年あるいは1984年より前で線形関係を示さない理由は、揚水規制以降の揚水量減少が著しく水頭上昇が著しく、広域的にみて年単位では揚水量と水頭がバランスしない状態にあったためである¹⁾。

なお浅部・深部の被圧水頭を比較すると、浅部が高いがそれほど極端な差異はなく、時系列変化も類似する。したがって、都心部沖積低地の浅部・深部地下水はいずれも広域的な揚水の影響で変化するとみなすことができる¹⁾。

3.2 地下水位上昇による建設分野への影響と対策

近年、地下水位上昇対策が取られた事例を図-9に示す(廣瀬¹⁰⁾)。対策は構造物の良好な支持地盤である武蔵野台地東部、埋没上位波食台など図中央域に集中している。対策工法としては、建築物の揚圧力対策としてのグランドアンカ工法、トンネル漏水対策としての排水が多い。東京駅、上野駅は揚圧力・漏水対策にグランドアンカ、載荷工法および排水工法を併用している事例として有名である。

沖積層中の表層地下水位は経年的にもほとんど変化していないことから、揚水量の減少に伴った浅部(及び深部)帯水層被圧水頭の上昇が、地下構造物の浮力増加あるいは漏水量の増加を惹起していることが分かる。なお後述するように、地下水上昇対策が取られた地点の多くが、先述した低水頭域の南西部縁辺もしくはその外にあることに留意が必要である。

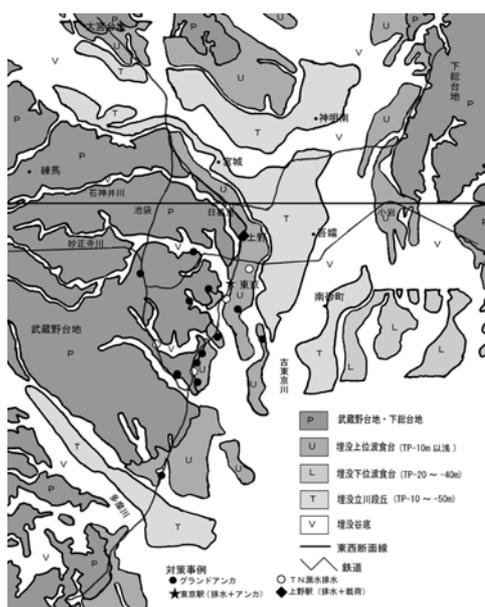


図-9 地形分類と地下水位上昇対策事例位置図

4. 今後の地下水位変化予測と地下水管理

4.1 浅部被圧地下水位等の上昇予測

図-8(右図)に示すように、1980年代前半～1997年に揚水量が30%程度減少し、被圧水頭は4～5m上昇している。東京以外の首都圏では、降水量の少ないときに相変わらず地下水に頼る状況が続き、このことが局地的な地盤沈下を招いている。こうした悪循環を防止するため地下水の代替水源として表流水への転換が促進されている。関東平野北部地盤沈下防止等対策要綱で目指す揚水量(1997年からさらに20%減)とした場合の水頭上昇量を求めたものを表-1に示す。これによれば、場所によって異なるが今後さらに3～4m程度の水頭上昇が予測される。

4.2 許容限界水位と地下水位の適正管理

齋藤¹¹⁾が東京都の地盤沈下観測井データから求めた許容限界水位(沈下を起こさずに水位低下できる許容値)は以下のものである。安全側にみつめた値ではあるが、新江戸川を除きいずれも表-1の被圧水頭予測値の下位にあり、特に上野や東京に近い両国では2m程度下位の値である。

地点	許容限界水位
戸田橋	TP - 3 m
両国	TP - 13m
南砂町	TP - 7 m
江戸川東部	TP - 4 m
新江戸川	TP - 6 m

廣瀬他¹⁰⁾は、沖積層と洪積層では異なる沈下・リバウンドの特性があり、全体としてはリバウンドであっても、主に沖積層中で残留沈下が継続している場合もあることを指摘した。こうした事情を踏まえ許容限界水位に関しては、層別沈下の実態詳細の把握あるいは圧密沈下層の圧密特性試験などを実施し入念な吟味を経た上で結論を出す必要はあるが、やみくもに地下水位上昇を容認するだけではなく適切なレベルに地下水頭をコントロールしうる可能性を示すものと言えよう。

特に断層などの隔離性の強い深部地盤構造が存在するならば、平野中央部低水頭域の外側の被圧地下水と低水頭域内沖積低地下の被圧地下水との関連性は小さいと期待できることから、低水頭域の外側に関してはより積極的な地下水頭上昇抑止策を実現しうる期待が持てる。

5. まとめ

以上述べてきた事柄をまとめると以下に示す。

地下水ポテンシャルや同位体及び地下温度といった流動の指標となる要素の調査により、関東平野規模の地下水流動系の大要が明らかになりつつある。今後、こうしたデータのさらなる蓄積を通して、今回得られた仮説の検証と不確かな事項の一層の解明を計る必要がある。

平野中央部の低水頭域は揚水(人為的)に生じたものであるが、水質・同位体並びに地下温度の分布特性上からも特異であ

り、断層など隔離性のつよい深部地盤構造と密接に関連している可能性がある。

地下水流動の指標となる要素の調査のみでは定性的な議論に留まることが懸念されることから、水収支の集計など定量的な検討も併行し上記仮説の検証を補強することが肝要である。

首都圏都心部の浅部被圧水頭は、関東平野規模の広域の地下水揚水量の減少に符合して、上昇の一途をたどってきた。関東平野北部地盤沈下防止等対策要綱によれば、今後さらに揚水量は減少するとみられ、1977年を基準として被圧地下水頭は3～4m上昇すると予想される。

単純に結論することはできないが、上記予測上昇水位の多くは許容限界水位の上位にあるとみられる。特に隔離性の強い深部地盤構造が存在し、そうした地盤構造で囲まれる低水頭域の外側の洪積台地～縁辺では、地下水頭上昇抑止を目的に地下水位をコントロールしうる可能性も十分に考えられることから、適正管理のあり方も含めて一層の検討が求められている。

参考文献

- 1) 三宅紀治(2000):首都圏における被圧地下水の課題と今後。地下水技術 第42巻 第10号 24-31。
- 2) 齋藤庸・三宅紀治(2003):関東平野南西域の地下水収支に関する検討。日本水文科学会誌 第33巻 第3号 197-214。
- 3) 三宅紀治・齋藤庸(2003):東京、埼玉の沖積低地を主とした被圧地下水流動について。日本水文科学会誌 第33巻 第3号 185-196。
- 4) 嶋田純(2000):水循環から見た地下水保全と21世紀への提言。日本水文科学会誌 第30巻 第2号 63-72。
- 5) 林武司・宮越昭暢(2004):水質・同位体組成からみた関東平野における広域地下水流動系。平成16年度日本応用地質学会研究発表会予稿集。
- 6) 宮越昭暢・林武司(2004):地下温度からみた関東平野における広域地下水流動系。平成16年度日本応用地質学会研究発表会予稿集。
- 7) 三宅紀治・齋藤庸(2004):東京沖積低地を主とした最近の地下水水頭ポテンシャルの状況。平成16年度日本応用地質学会研究発表会予稿集。
- 8) 角田史雄(1997):下総垂地下水盆の形成について。地下水技術 第39巻 第10号 1-6。
- 9) Kayane, I., Ogasawara, H. and Yoshida, M. (1993): Four-dimensional response of the aquifer and aquitard system in Tokyo to groundwater withdrawal and regulation. Environmental Research Center Papers, Univ. of Tsukuba, 16, 53p.
- 10) 廣瀬誠・川越健・木谷日出男(2004):建設工事・地下構造物と地下水。平成16年度日本応用地質学会研究発表会予稿集。
- 11) 齋藤庸(2004):首都圏の広域地下水流動系把握の現状と応用地質の課題。日本応用地質学会平成16年度特別講演およびシンポジウム予稿集 10-25。

P43. 水質・同位体組成からみた関東平野における広域地下水流動系

Groundwater Flow System in The Kanto Plain Estimated by Chemical and Isotopic Characteristics

林 武司 (産業技術総合研究所), 宮越昭暢 (産業技術総合研究所)

Takeshi Hayashi, Akinobu Miyakoshi

1. はじめに

関東平野は国内最大の地下水賦存域であり、これまで水理地質構造や地下水流動、地下水質、可能揚水量などに関する調査・研究が数多くなされてきた。これによって関東地下水盆とも呼ばれる賦存形態の概要が明らかとなってきたが、いまだ平野全体での理解には至っていない。この一方で首都圏という一大都市圏を擁する関東平野では、都市域の拡大に伴う地表水と地下水の乖離、内陸部での地下水位の低下や地盤沈下、都心部での地下水位の回復に伴う地下構造物への障害など、地下水環境が複雑化・多様化する傾向にあり、近代の地下水流動が人間活動によって常に変化してきたといえる。地下水環境を適正に管理し、現在利用されている地下水資源を保全した上で、さらに地下水への潜在的な社会ニーズ（災害時の緊急水源、河川の浄化、親水空間の整備など）に対応していくためには、現在の地下水流動、地下水質、揚水深度や揚水量、層別地盤沈下量などを、平野の広域かつ立体的に把握する必要がある。

筆者らは、関東平野における地下水流動系の立体的な構造や時間スケール、人間活動が地下水流動や地下水質へ及ぼす影響を明らかにするため、平野各地において地下水を採取し、主要溶存成分や酸素・水素同位体比を調査してきた^{1,2)}。本稿では、これまでに得られた地下水質および酸素・水素同位体比の性状を整理し、これらの3次元的な分布および近年の水理水頭分布から、地下水流動系の構造を検討する。

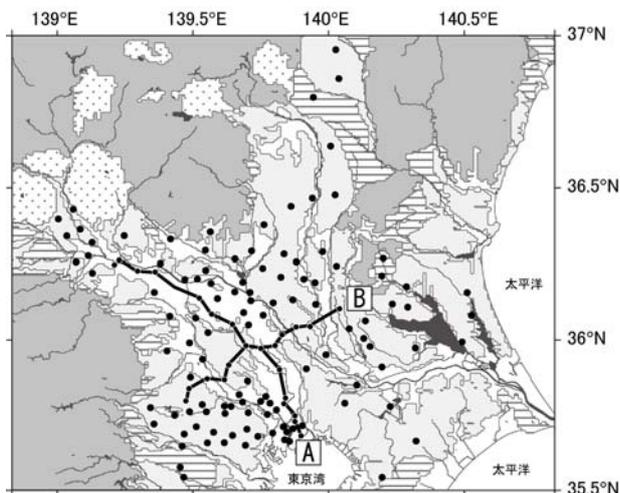


図1 採水井位置図

2. 研究方法

平野内に分布する地下水位・地盤沈下観測井 138 地点 218 井 (井戸深度: 6m~600m) より地下水を採取し、主要溶存成分および酸素・水素同位体比を測定した。採水地点を図-1 に示す。また非採水井を含む各観測井の地下水位記録^{3)~8)}を収集し、調査期間である 1999 年~2001 年の平均値 (千葉県内は 1997 年の平均値) より水理水頭分布を求めた。

3. 地下水質の性状

採取された地下水は 46.2~19,500 μ S/cm と広範な EC 値を示すが、全体の約 86% は 400 μ S/cm 未満の範囲にある。また EC は相対的に平野の周縁部で低く、中央部で高い傾向にある。主要溶存成分の測定結果を Piper ダイアグラムとして図-2 に示す。採取された地下水は主として Ca-HCO₃ 型、Na-HCO₃ 型およびこれらの中間型を呈するが、一部は Na-Cl 型を示す。Na-Cl 型の地下水は他の型の地下水と比較して EC が高い傾向にあり、主に 400 μ S/cm 以上を示す。またこの型の地下水は、分布域が東京湾岸域および、内陸部の利根川中流域・加須低地の GL-200m~300m 付近に限定的に見られる。少なくとも内陸部の Na-Cl 型地下水に関しては、現世海水の影響は考えられないことから、高濃度の塩類は地層中もしくは化石水的な地下水から供給されたと考えられる。

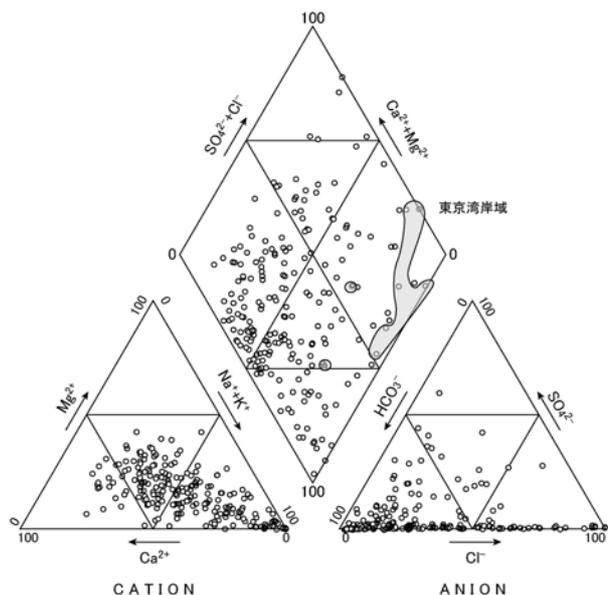


図2 Piper ダイアグラム

4. 酸素・水素同位体比の性状

地下水の酸素・水素同位体比(以下、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)は、それぞれ -5.3‰ ～ -10.7‰ 、 -36.2‰ ～ -76.2‰ であった。 $\delta^{18}\text{O}$ と δD の関係を図-3に示す。地下水は全体として天水線($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$)に沿って分布しており、Na-Cl型を呈した地下水も同様である。この結果から、内陸部に賦存するNa-Cl型地下水が降水起源であることが支持されるとともに、東京湾岸域に見られたNa-Cl型地下水も降水起源であることが示唆される。また $\delta^{18}\text{O}:5.4\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}:40\text{‰}$ という幅広い同位体比は、平野内での地域差を反映したものである。関東平野では、地下水の同位体比は全体として太平洋沿岸域から内陸に向かって低くなるが、平野中央部の加須低地西部～下町低地には、周辺地域よりも同位体比の低い地下水($\delta^{18}\text{O} < -9\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} < -60\text{‰}$)がGL-50m付近～300m付近に賦存することが確認されている^{1)、2)}。一方、平野部における現在の浅層地下水(湧水など)の δD は -60‰ よりも高く⁹⁾、山地・平野境界部における主要河川の δD は最小でも -70‰ 程度である¹⁰⁾。したがって $\delta\text{D} < -60\text{‰}$ の地下水は、現在の気候下において平野内で涵養されたものではないと判断される。平野中央部に賦存する $\delta\text{D} < -60\text{‰}$ の地下水を対象に、地下水中の溶存無機炭素を用いて $\delta^{13}\text{C}$ 、 ^{14}C 濃度を測定し、地下水年代を求めた。この結果、年代値として4,260年～16,510年が得られた。年代値の確からしさについては今後も検討していく必要があるが、平野中央部の低同位体比地下水は寒冷気候下で涵養されたものと考えられる。

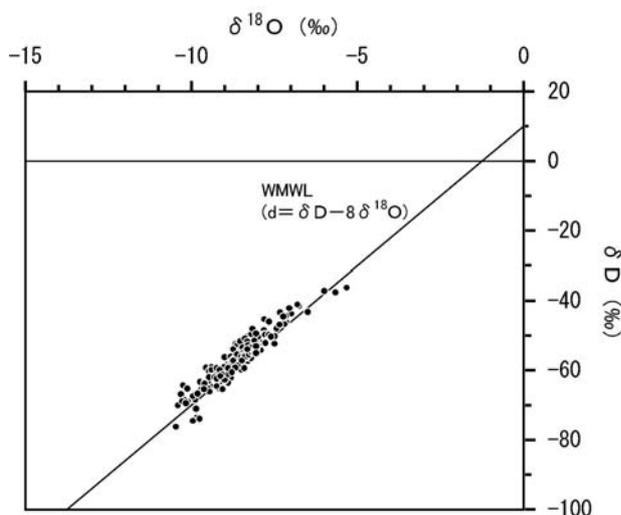


図-3 ダイアグラム

5. 地下水質, 同位体比, 水理水頭の平面・鉛直分布

地下水質(Stiff ダイアグラム)、 δD および水理水頭の平面分布(GL-150m～200m付近)を図-4に示す。この深度は、平野中央部では木野¹¹⁾の区分した第2帯水層に相当し、古利根地下水塊と呼ばれた高Cl地下水が賦存する。また平野の縦断面および横断面での鉛直分布を図-5および図-6に示す。両測線の位置は図-1に示した。

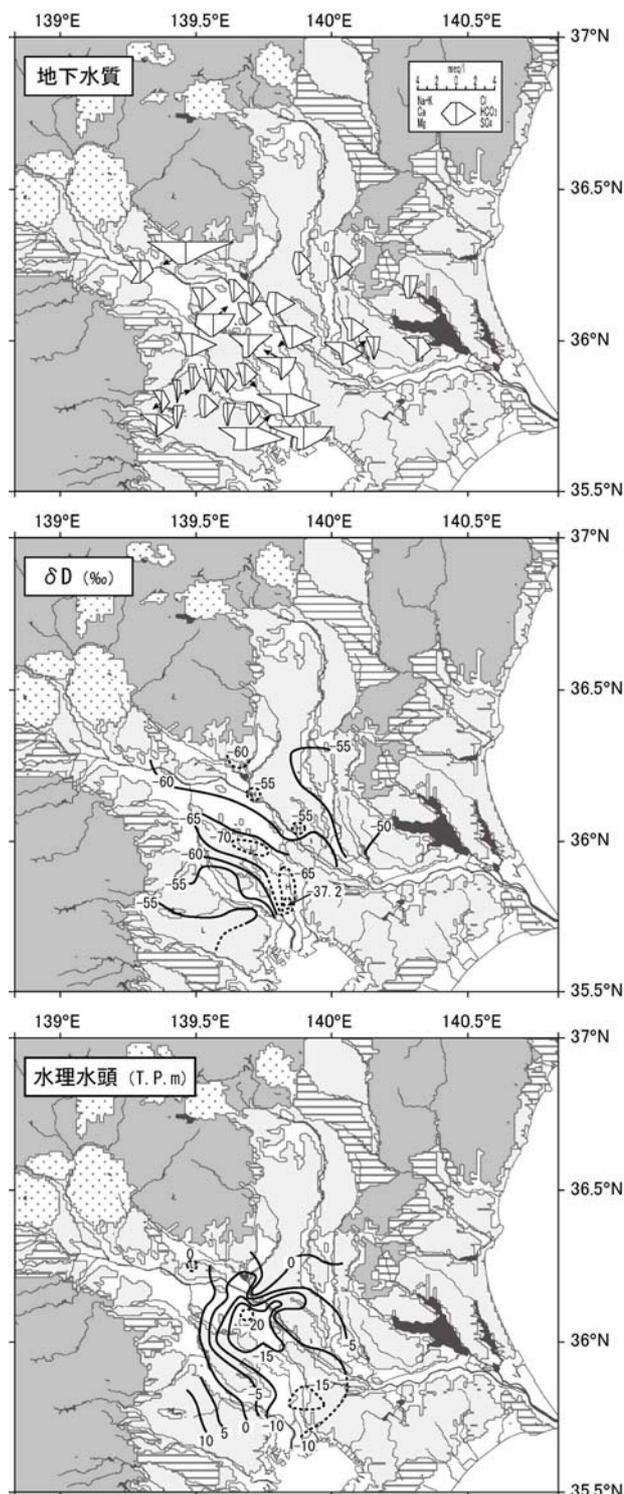


図-4 地下水質(Stiff ダイアグラム)、 D 、水理水頭の平面分布(GL-150m～200m付近)

5-1. 地下水質および δD 分布

地下水質および δD の分布には、平野の周縁部と中央部で異なる傾向が見られる。地下水質では、平野周縁部では相対的に溶存成分量が低く主としてCa- HCO_3 型～Na- HCO_3 型を示すのに対し、平野中央部では溶存成分量が高くNa- HCO_3 型もしくはNa-Cl型を呈する。 δD においても、平野周縁部では相対的に同位体比が高く、地下浅部に対して深部で低い同位体比を示す。これに対して中央部では、地下浅部から深部まで

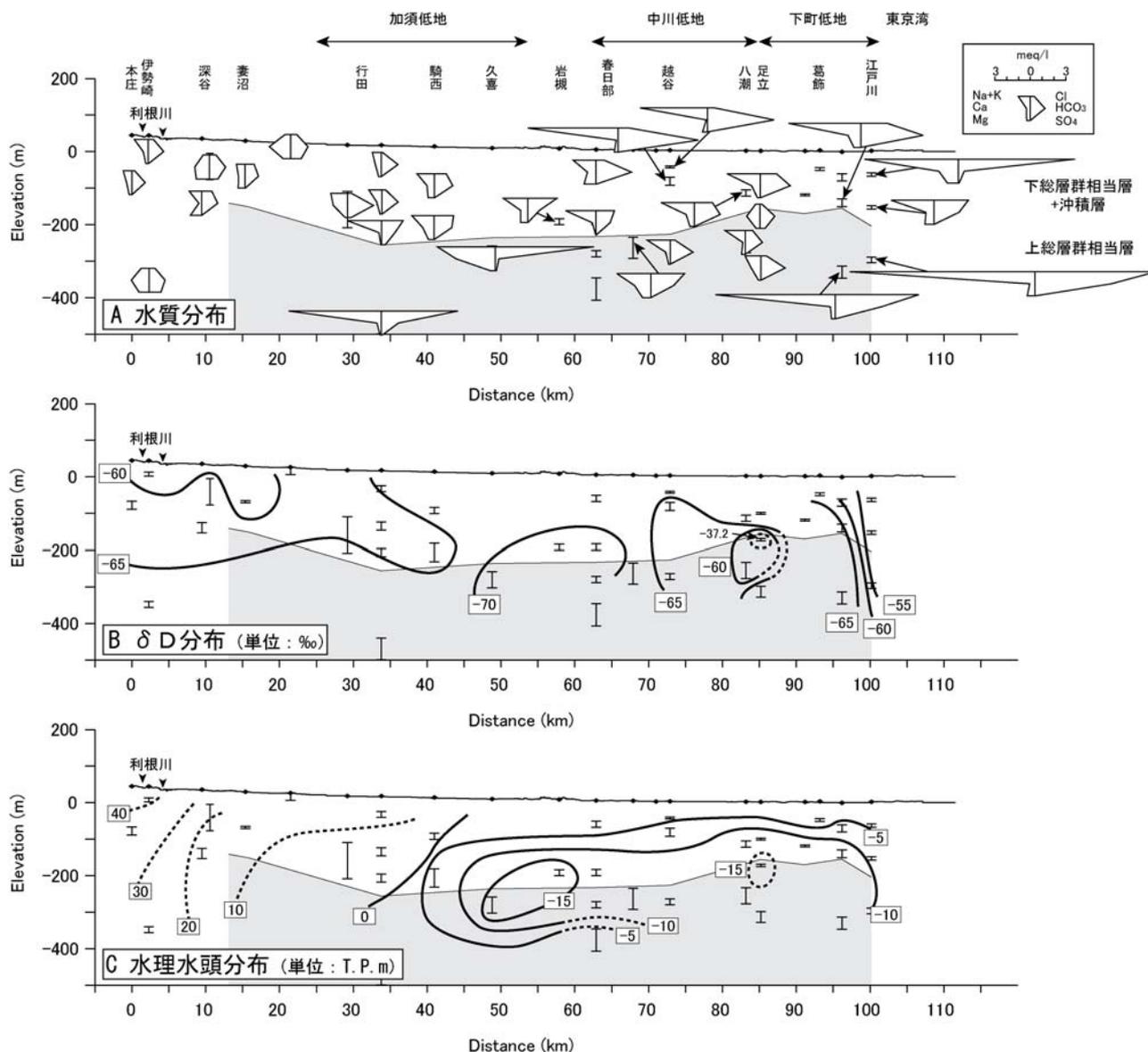


図-5 測線A(平野縦断面)における地下水質, D, 水理水頭の鉛直分布

周辺地域よりも低い同位体比を示す。また平野中央部では、中川低地でやや分布傾向が異なり、地下水質ではNa-Cl型地下水が見られず、 δD においても同位体比が高い傾向を示している。

5-2. 水理水頭分布

水理水頭分布に関しては、多くの報告がなされている¹²⁾。近年の水理水頭は平野周縁部から中央部へ向かって低下し、中央部では低地部だけでなく台地部においても負の値を示す。また加須低地の東部および中川低地のGL-150m~300m付近に極小域が存在する。本研究の調査期間においても、同様の傾向が見られる。

6. 水理水頭分布と地下水質・同位体比分布の比較と地下水流動の検討

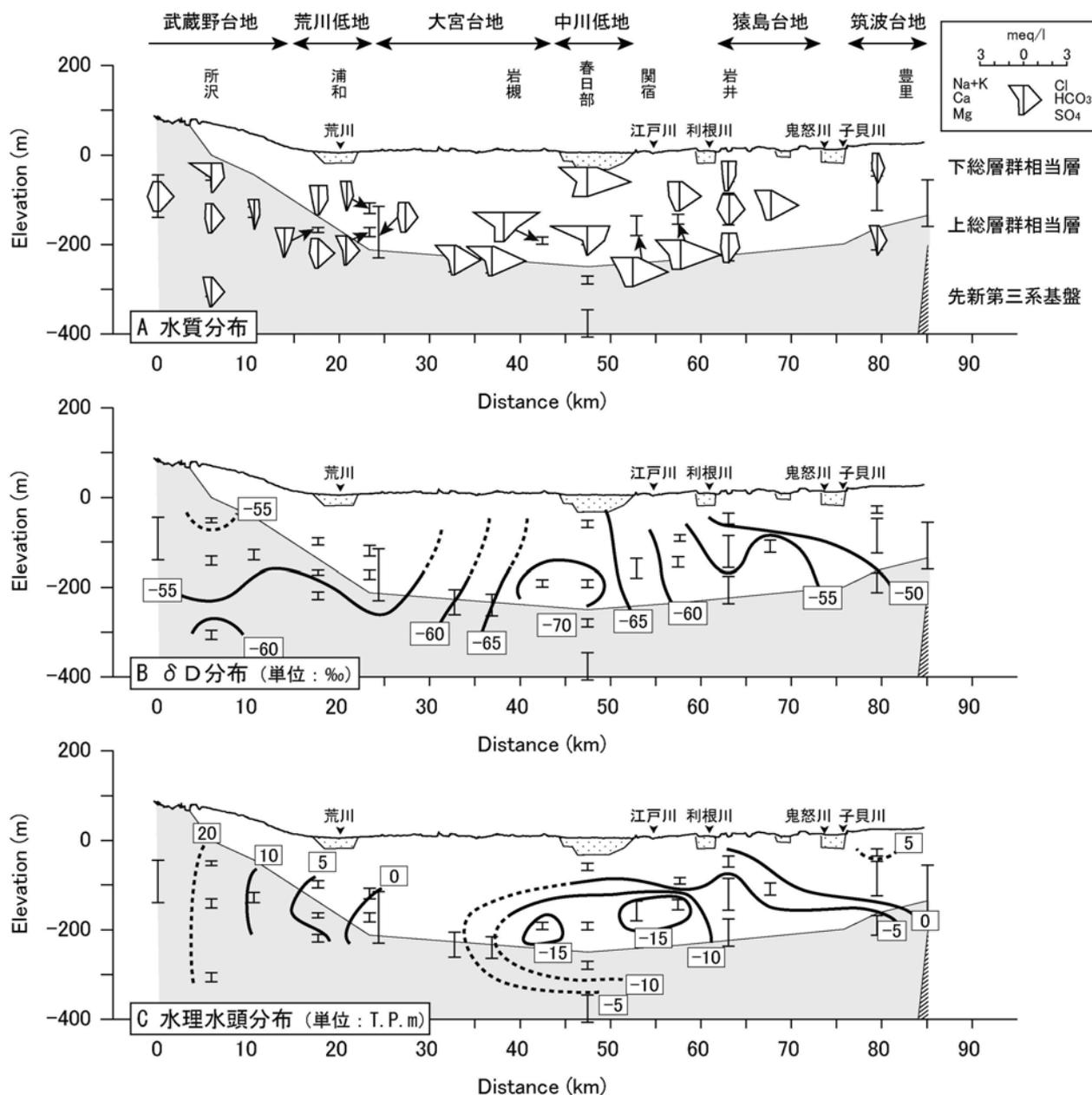
水理水頭分布は、平野周縁部、中央部の地下浅部(GL-150m付近より浅部)および深部(GL-300m付近より深部)から、中央部の水頭極小域へ向かう地下水流動があることを示している。こ

の地下水流動は地下水揚水によるものであり、流出域をもたない。一方、地下水質・同位体比分布は平野の中央部と周縁部で傾向が大きく異なっており、地下水流動系が異なることを示唆している。 δD 分布では、平野中央部の水頭極小域より浅部にも低同位体比地下水($\delta D < -60\%$)が賦存している。先に述べたように、同位体比からみて現在の天水では低同位体比地下水を地表から涵養できないことから、近年の水理水頭分布が示す地下水流動では、平野中央部の低同位体比地下水の分布を説明できない。したがって低同位体比地下水帯は、地下水揚水の影響を受ける以前の地下水流動によって形成されたと考えられる。

7. まとめ

これまでの調査により、地下水質および $\delta^{18}O$, δD の立体的な分布や、平野中央部の低同位体比地下水が寒冷気候下で涵養されたことが明らかとなってきた。最終氷期の海水準を考慮すれば、涵養時の地下水流動系は現在とは全く異なっていたと考えられる。今後は、海水準変動に伴う地下水流動系の変化を評価することが重要である。また地下水質・同位体

図-6 測線B(東西断面)における地下水質, D, 水理水頭の鉛直分布



比の分布には、局地的な不連続性が見られる地域がいくつか確認されている。これらの地域では水理水頭や地下温度の局地的な低下が見られることが多く、地下水揚水の影響を反映していると考えられる。今後は、このような人間活動の影響に関して、地下水の揚水量や揚水深度などと併せて検討していく必要がある。

引用文献

- 1) 林 武司 (2003): 関東平野中央部に見られる低酸素水素同位体比・高 Cl 濃度地下水帯の三次元的分布と成因, 日本水文科学会誌, 33, 2, 53-70.
- 2) 林 武司・内田洋平・安原正也・丸井敦尚・佐倉保夫・宮越昭暢 (2003): 水質・同位体組成からみた関東平野の地下水流動, 日本水文科学会誌, 33, 3, 125-136.
- 3) 東京都土木技術研究所: 地盤沈下・地下水位観測記録.
- 4) 千葉県公害研究所: 千葉県の地盤沈下と地震.
- 5) 茨城県: 地下水位観測調査報告書.
- 6) 群馬県環境生活部: 群馬県地盤変動調査報告書.
- 7) 埼玉県: 埼玉県地盤沈下調査報告書.
- 8) 栃木県生活環境部: 地下水位年報.
- 9) 安原正也 (2002): 関東平野と周辺山地の天水にみられる同位体効果, 日本水文科学会学術大会 発表要旨集, 16, 120-121.
- 10) 稲村明彦・安原正也 (2003): 関東平野と周辺山地の河川水の水素・酸素同位体比, 日本水文科学会誌, 33, 3, 115-124.
- 11) 木野義人 (1970): 関東平野中央部における被圧地下水の水理地質学的研究, 地質調査所報告, 238, 1-38.
- 12) 三宅紀治・斎藤 庸 (2003): 東京, 埼玉の沖積低地を主とした被圧地下水流動について, 日本水文科学会誌, 33, 3, 185-196. など

P44 . 地下温度分布からみた関東平野における広域地下水流動系

Groundwater flow system estimated by distribution of subsurface temperature in the Kanto Plain

宮越昭暢（産総研），林武司（産総研）

Akinobu Miyakoshi, Takeshi Hayashi

1. はじめに

地下温度分布は，地下水流動に伴う熱移流の影響を強く反映する。Domenico and Palciauskas¹⁾は，地下水流動によって地下温度分布に生じる歪を理論的に提示した。地下温度は，涵養域では地表面からの低温の地下水涵養によって低くなるのに対し，流出域では地下深部からの熱移流によって高くなる。このような地下温度分布の特性を利用して，国内外の平野や盆地において地下水流動解析が行われている^{2)~4)}。

関東平野は日本最大の平野であり，大都市が数多く分布している。地下水流動に関する研究は従来から行われているが，平野の広域あるいは全域を対象とした研究は少ない（例えば地質調査所⁵⁾）。一方，関東平野の地下水流動は揚水等の人為影響によって変化しており，地下水環境も多様化している⁶⁾。

7)。従って，地下環境のマネジメントには平野全域での地下水流動の把握が必要不可欠である。

筆者らは，関東平野の広域地下水流動を明らかにするため，平野内に広く同一手法で適用することが可能である地下温度に着目して調査を行ってきた。本稿では，平野内に分布する148地点の観測井（図-1）で測定した結果から3次元での地下温度分布を示し，地下水流動を検討する。

2. 観測方法

東京都，千葉県，栃木県，群馬県，埼玉県，茨城県が管理する地盤沈下対策用観測井の合計148地点において，地下水位ならびに地下温度の測定を行った。図-1に観測井分布図を示す。測定は1999年10月14日から2003年2月21日に実施した。観測井の深度は30m~630mであり，深度方向に

連続した温度測定を行い，地下温度プロファイルを得た。測定深度間隔は，地下水面から300mまでは2m間隔で，300mから最深600mまで5m間隔である。

3. 観測結果

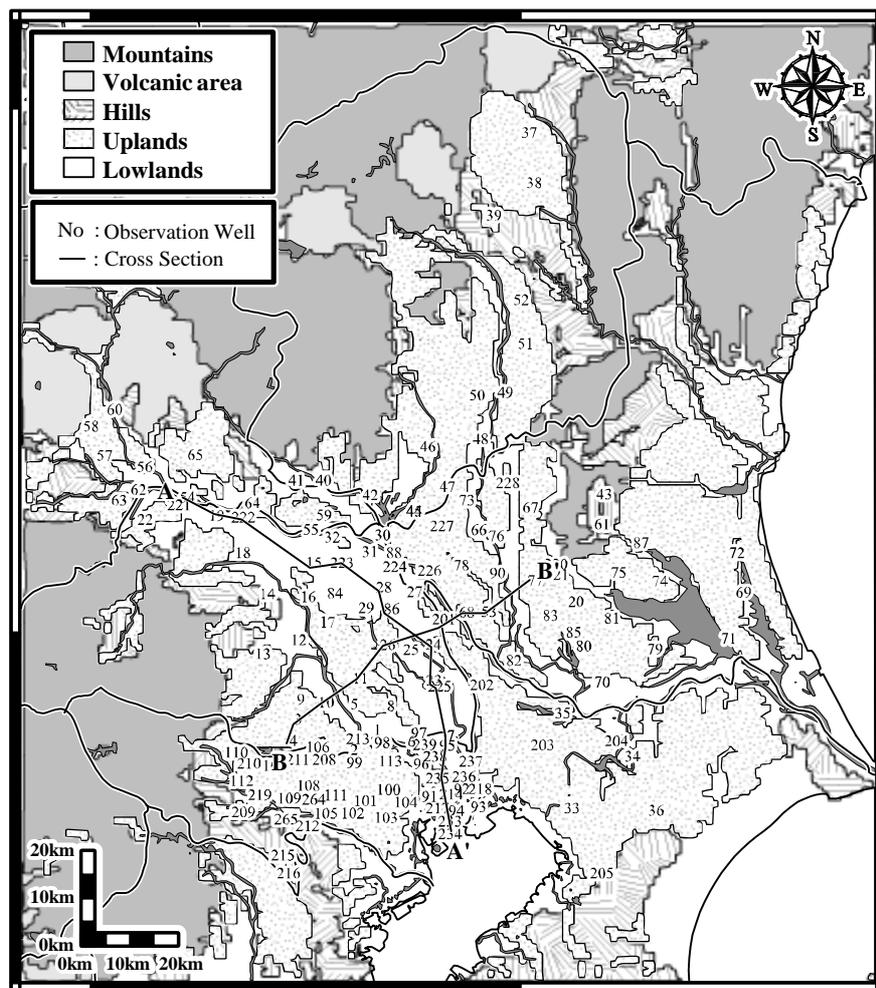


図 - 1 観測井位置図

図 - 2a ~ 2c はそれぞれ標高-50m, 標高-100m, 標高-150m

における平面地下温度分布を示す。利根川より北部の足尾山

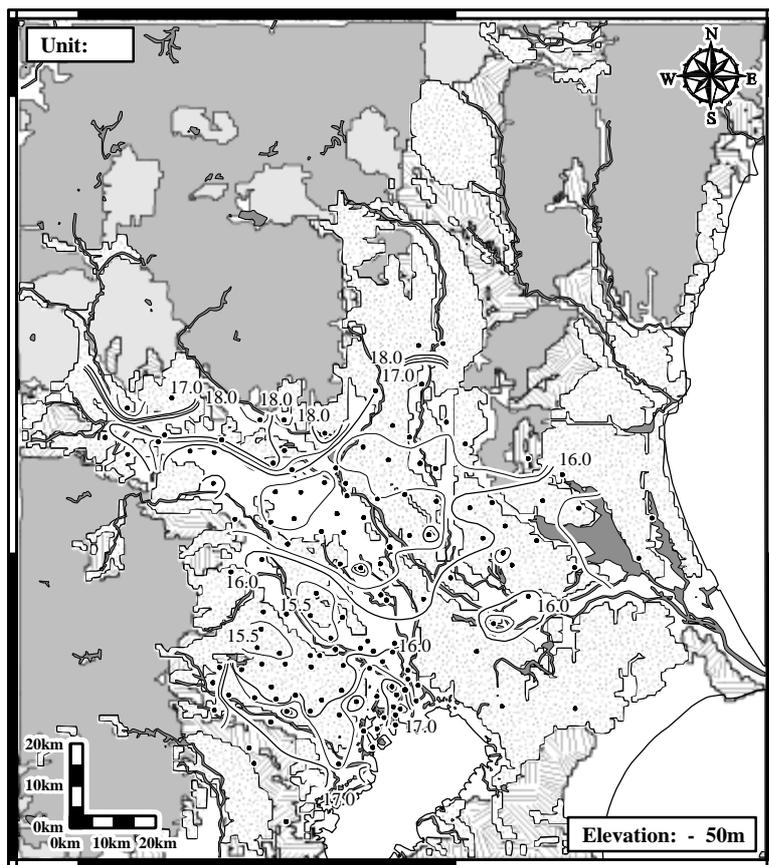


図 - 2a 標高-50m における平面地下温度分布

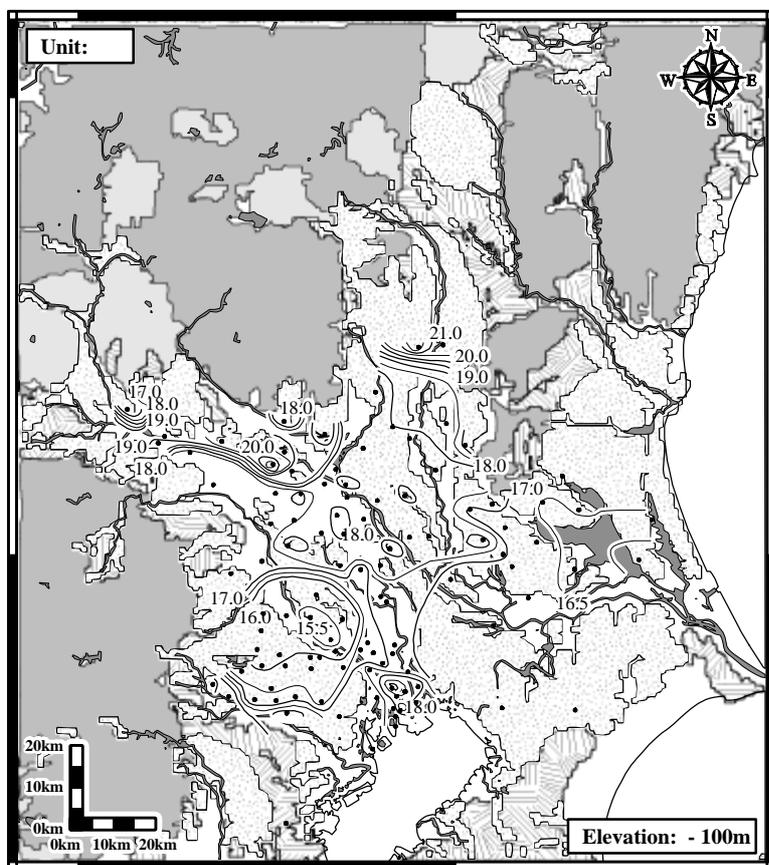


図 - 2b 標高-100m における平面地下温度分布

地周辺 (No.54, 64, 55, 42, 41) では、いずれの標高においても地下温度が特に高温を示す (標高-50m : 18.0 , 標高-100m : 19.0 ~ 20.0 , 標高-150m : 20.0 ~ 23.0) また武蔵野台地西部の、関東山地との境界付近 (No. 110, 112) においても同様に高温を示す。これらの高温域を除き、武蔵野台地、下総台地、常総台地などの比較的標高の高い地域において周囲より低温を示す。武蔵野台地・下総台地では標高-100mまで 15.0 ~ 16.0 を示し、深度による増温率が小さい。また標高-150mにおいても 15.0 ~ 16.0 の地域が存在する。一方の常総台地では、標高-50mにおいては 15.0 ~ 16.0 であるが、標高-150mにおいて 17.0 ~ 18.0 を示し、武蔵野台地や下総台地よりも高い。

このような台地部の低温域に対し、平野中央部の加須低地東部 (No. 27, 28) および東京湾湾岸部に高温域が見られる。例えば、標高-50mでは東京湾湾岸部 : 16.5 ~ 17.5 , 平野中央部 : 16.5 ~ 17.0 であり、標高-100mでは両地域で 17.5 ~ 18.5 を示す。これに対して両地域には含まれた中川低地 (No. 23, 225, 7, 95) ではやや低温になっており、本研究の対象深度では2つの高温域は連続しない。

図 - 3a に A - A断面 (図 - 1 参照) における地下温度分布を示す。この測線では、No.54 (伊勢崎)、平野中央部および東京湾岸部の下町低地に高温域が見られる。また標高-50m付近では、平野中央部の 16.5 程度に対して下町低地は 17.5 以上を示し、より高温である。これに対して利根川中流低地の No.15, 223 および中川低地の No.7, 95 では、それぞれ標高-50m および標高-100m まで、16.0 以下の低温部が存在する。

図 - 3b は B - B断面における地下温度分布である。武蔵野台地の No. 4, 3 および常総台地の No.77 では、中川低地 (No.26, 201) と比較して低温域が形成されている。また、武蔵野台地の低温域は常総台地よりも深部に到達しており、大宮台地 (No.11) においても所沢と同等の低温域が確認される。これに対し、常総台地 (No. 68, 53) では標高-100 ~ -200m において 17.0 以上を示しており、中川低地と同等の温度を示している。

4. 考察

足尾山地 ~ 利根川北部および武蔵野台地西部の高温域は、周囲と連続性がなく特異であ

る。両地域は山地と平野の境界にあって、先新第三系基盤深度が平野中央部より浅い⁷⁾。基盤岩の地温勾配は平野部の堆積層の2~3倍と大きく⁸⁾、地質条件の差が地下温度に反映さ

れていると考えられる。

低温域は、武蔵野台地、下総台地、常総台地等の地形の高まりに相当しており、水理水頭分布および地形条件からも地

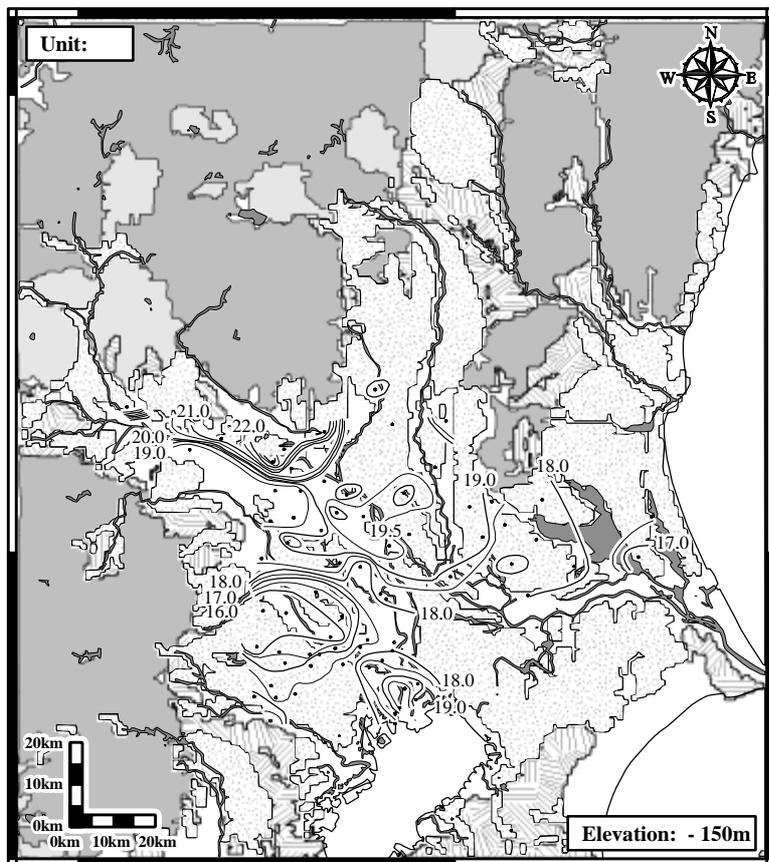


図 - 2c 標高-150mにおける平面地下温度分布

下水の涵養域であると考えられる^{6), 7)}。武蔵野台地では、常総台地と比較して深部まで低温域が形成されており、増温率も1.0~2.0/100mと小さい。また低温域は、大宮台地まで達しており、地形ユニットを超えて形成されている。このような低温域の規模の差は、武蔵野台地における地下水涵養量が、他の地域よりも大きい事を示唆している。

一方、平野中央部および東京湾岸域の高温域は、地下水流動系の流出域であると推定されるが、平野中央部の高温域が常総台地にまで広がっているのに対し、東京湾岸域では下町低地のみであり、地下水流動系の規模の違いを反映していると推定される。

また浅層(標高-100m以下)には、増温率が負の値を示してプロファイル中に極小温度が確認される温度逆転部および局地的な低温部の存在が認められ、地下温度は一様ではない。温度逆転部は都市化等による地表面温度上昇を反映していると考えられ⁷⁾、その影響は地下水涵養域でより深部まで到達する。

一方、図-3の利根川中流域および中川低地に見られたような低温部は、地表からの地下水涵養があることを示している。低温部は平野内に広く見られるが、その深度や周囲との

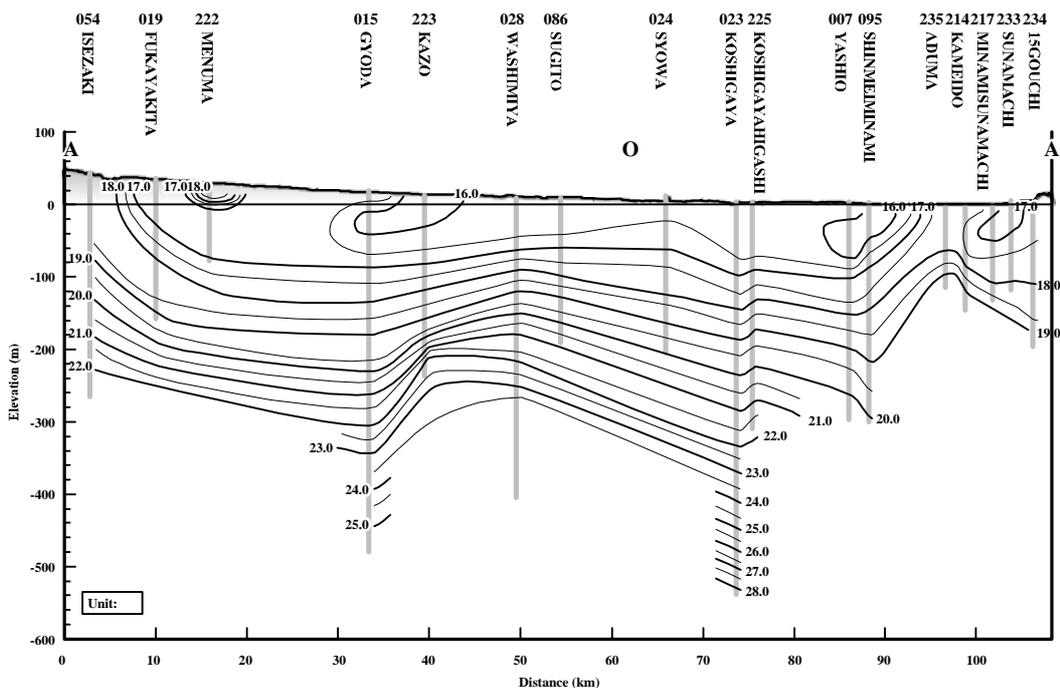


図 - 3a A - A断面における地下温度分布

温度差は地域により異なっており、地下水揚水の規模や深度の違いを反映していると考えられる。

観測された地下温度プロファイルは、温度および増温率から流出域型、涵養域型、中間域型、他型の4タイプに分類できる(図-4)。深度による地下温度の増温率が大きく(3.0~4.0/100m以上)、かつプロファイル全体の温度が高

い流出域タイプは関東平野中央部と東京湾岸部に分布している。プロファイルの温度が全体的に低く、かつ増温率が小さい(2.0 /100m以下) 涵養域型は丘陵・台地部に分布する。また、増温率が比較的一定であり(2.0~3.0 /100m) 前述した2タイプの中間的な性質を持つ中間域型は平野中央部周

辺に分布する。また、山地と平野部の境界付近に分布する高温部(4.0 /100m以上)等分類不能のものをその他のタイプに分類した。

分類されたプロファイルは、台地・丘陵から平野中央部および東京湾岸部に向かい涵養域型 中間域型 流出域型と分布している。このような分布特性は平野内の地下水流動系の構造を示唆するものである。

5.まとめ

1. 地下温度は地下水流動を反映しており、平野中央部および東京湾岸域を流出域とする地下水流動系の存在が示唆される。
2. 地下水涵養域の1つである武蔵野台地では、他の台地と比較して低温域の規模が大きく到達深度も深い。これは、比高差だけでなく揚水の差も含めて、武蔵野台地での地下水涵養量が大きいことを示唆している。
3. 地下温度逆転部および局地的な低温部の存在は、地下温度が人為影響も反映していることを示している。今後は土地利用や揚水も併せて、地下浅部での温度分布を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) Domenico, P.A. and V.V. Palciauskas (1973): Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. Geological Society of America Bulletin, 84: 3803-3814
- 2) 佐倉保夫 (1984): 温度による地下水調査法, 日本地下水学会誌, 26-4: 193-197
- 3) 谷口真人 (1998): 地下水流動と物質輸送・熱輸送, 日本水文科学会誌, 28-1: 1-12
- 4) 内田洋平・佐倉保夫 (1999): 濃尾平野における地下温度プロファイル, 地質調査所月報, 50(10), 635-659
- 5) 木野義人・安藤武 (1962): 日本水理地質図「関東平野中央部水理地質図」, 地質調査所
- 6) 林武司・内田洋平・安原正也・丸井敦尚・佐倉保夫・宮越昭暢 (2003): 水質・同位体組成からみた関東平野の地下水流動, 日本水文科学会誌, 33-3, 125-136
- 7) 宮越昭暢・内田洋平・佐倉保夫・林武司 (2003): 地下温度分布からみた関東平野の地下水流動, 日本水文科学会誌, 33-3, 137-148
- 8) 鈴木宏芳 (1985): 関東平野の地中温度. 国立防災センター研究報告, 35, 139-153

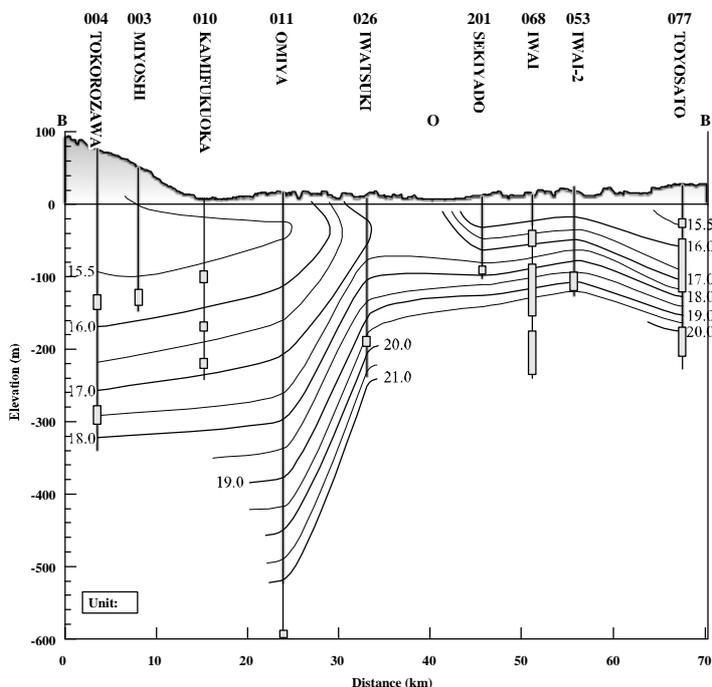


図 - 3b B - B'断面における地下温度分布

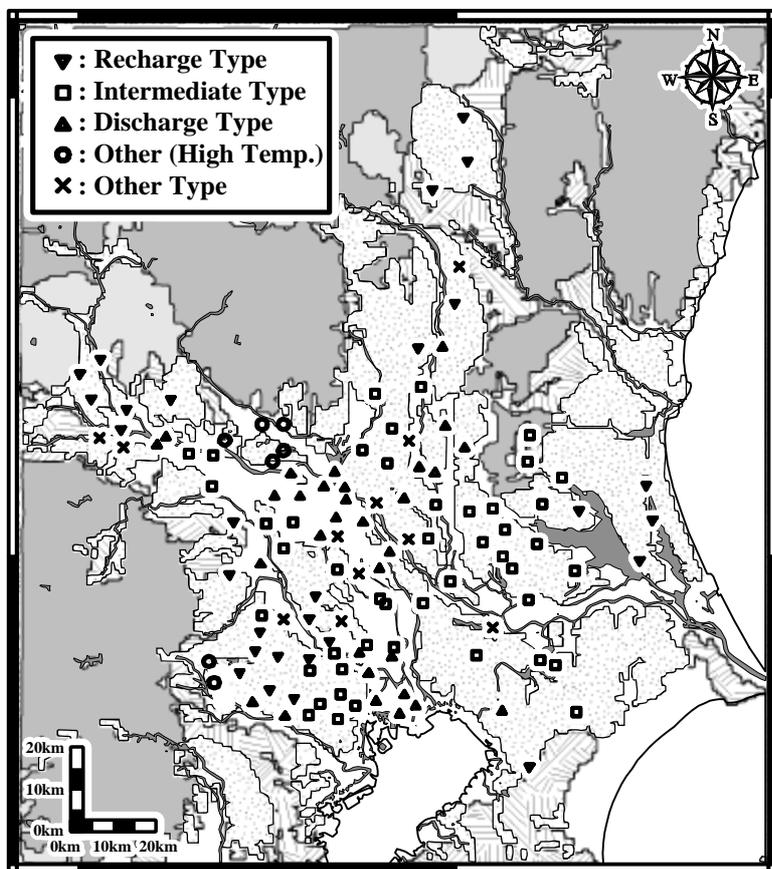


図 - 4 地下温度プロファイルのタイプ別分布図

P45. 東京沖積低地を主とした最近の地下水水頭ポテンシャルの状況 Assessing Recent Confined Groundwater head in Mainly Tokyo Alluvial Area

三宅紀治（清水建設），齋藤庸（日本工営）
Noriharu Miyake, Mamoru Saito

1. はじめに

東京の沖積低地では、かつて地下水を大量に揚水したために広域的な水頭低下を招いたほか圧密による地盤沈下を引き起こし、様々な障害が発生した。そのため、首都圏では昭和40年頃から様々な揚水規制を行った結果、東京都心部では水頭上昇による地下構造物への漏水や浮き上がり問題などが起きている。一方、埼玉県東部・北東部など一部の地域では未だ地盤沈下が継続し、今後も一層の揚水量削減が求められている。

本稿では、首都圏における最近の地下水流動の実態を把握することを目的に、地下水頭ポテンシャルの空間特性・経年変化のほか、揚水量との関係などについて述べ、さらに東京沖積低地と周辺地域の水理的関連性や今後の水頭上昇などにも言及する。

2. 地下水頭ポテンシャルの特徴

2.1 平面ポテンシャル

図-1は資料1)~3)に示された年平均水頭データを用いて作成した1992年100m以深帯水層の平面地下水頭ポテンシャルであり、次の特徴がある。

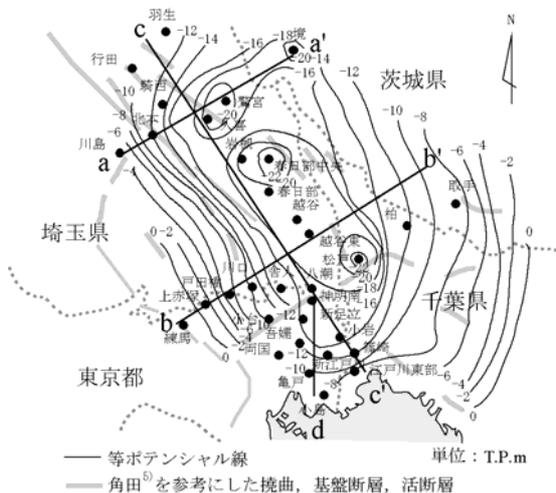


図-1 1992年100m以深帯水層の地下水ポテンシャル^{4),6)}

- ・ 水頭の低いゾーンは埼玉県鷲宮,久喜,春日部,越谷から千葉県松戸付近であり,(低水頭地域と呼ぶ)それを取り巻く形で周辺に比較的高水頭な地域(周辺高水頭地域と呼ぶ)が存在する⁷⁾。
- ・ 周辺高水頭地域から低水頭地域に向かう地下水流動は地質構造的影響を受ける可能性がある⁶⁾。

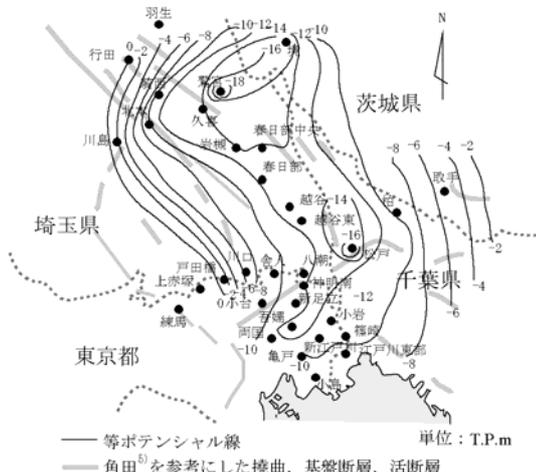


図-2 2002年100m以深帯水層の地下水ポテンシャル

図-2は資料2),3)および千葉県,茨城県から提供されたデータを参考に作成した2002年の平面地下水頭ポテンシャルであり、その特徴は以下のとおりである。

- ・ 低水頭地域および周辺高水頭地域の分布形状は1992年当時と余り変わらない。
- ・ 低水頭地域の水頭は1992年に比較して4~6m上昇している。従って、水頭の平面分布形状は変わらないものの全体的に数m上昇したことになる。

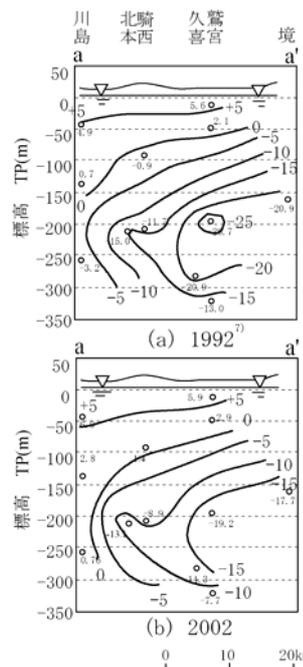


図-3 断面線 a-a' のポテンシャル

2.1 断面ポテンシャル

地下水流動をさらに詳細に把握する目的で、図-1に示す断面線における地下水ポテンシャルの傾向を1992年と2002年について比較した。それぞれの特徴は次のようである。

断面線 a-a'
・ 鷲宮付近では1992年,2002年とも深さ200m付近のポテンシャルが最も低く,この深さ付近の揚水が顕著であることを示唆している。

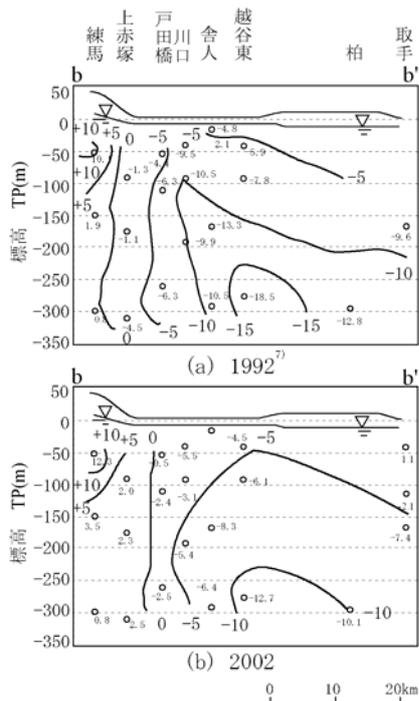


図 - 4 断面線 b-b' のポテンシャル

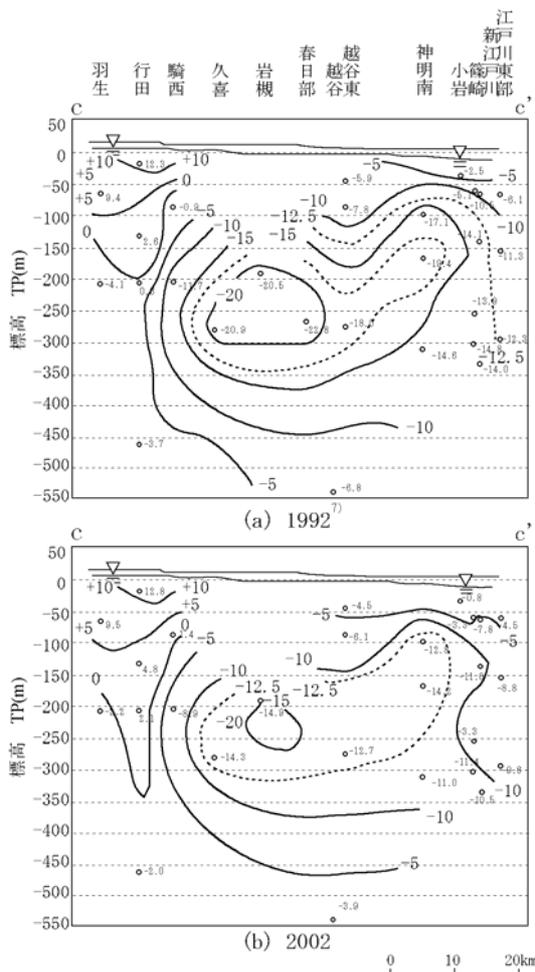


図 - 5 断面線 c-c' のポテンシャル

- 2002 年のポテンシャル形状は 1992 年と同様であるが、深さ 200m 付近の水頭は最大 7m 程度、

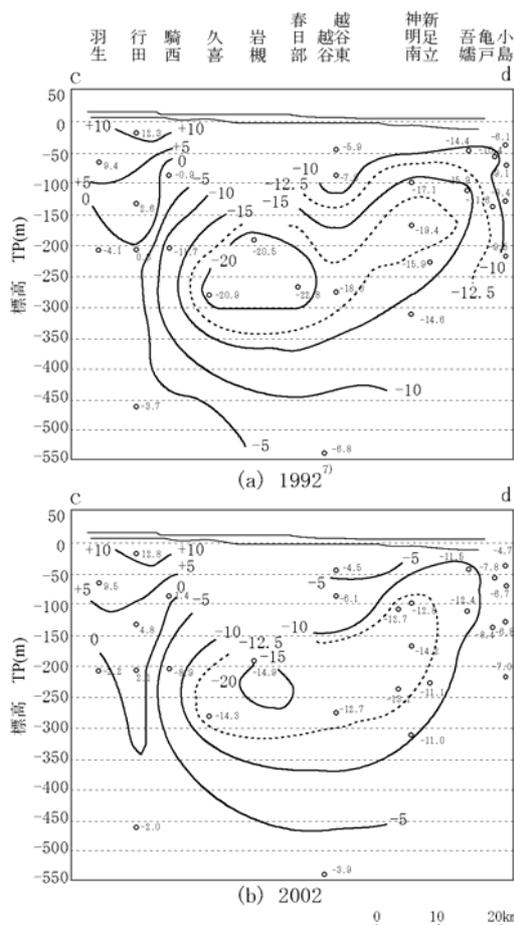


図 - 6 断面線 c-d のポテンシャル

周辺低水頭地域でも 2m 程度高くなっている。

断面線 b-b'

- 1992 年, 2002 年を比較すると, 後者の水頭が低水頭地域では 6m 程度, 周辺高水頭地域でも 3~4m 程度高くなっている。
- 低水頭地域に位置する越谷東の深さ 250-300m における水頭が最も低い。
- 周辺高水頭地域に位置する戸田橋, 上赤塚付近では静水圧に近い状態にあることから揚水が少なく, 低水頭地域への地下水流動があることを示している。従って, 周辺高水頭地域の水頭上昇は低水頭地域の揚水量減少による影響を受ける(後示する断面線 c-c', c-d についても同様)。

断面線 c-c'

- 埼玉県北東部から東京沖積低地に至る断面であり, 低水頭地域では深さ 150~300m 付近のポテンシャルが最も低い。
- 低水頭地域における 2002 年の水頭は 1992 年に比べて 5m 程度上昇し, その影響で東京沖積低地など周辺の高水頭地域の水頭も 2m 程度上昇している。

断面線 c-d

- 東京沖積低地に位置する小島, 亀戸付近ではほぼ静水圧状態にあり, 低水頭地域に向かう地下水流動が示唆される。

- これらの地域では 2002 年の水頭は 1992 年に比較して 2m 以上上昇しているが、断面線 b-b' , c-c' と同様に低水頭地域の水頭上昇によるものである。

3. 地下水頭変化

いくつかの観測地点において毎月の平均水頭データ 2), 3) から地下水頭の経年変化傾向を検討する。図 - 7 は断面線 a-a' に含まれる観測井の深さ別地下水頭変

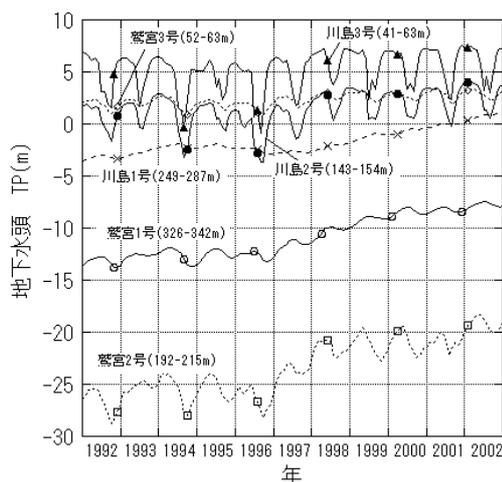


図 - 7 鷲宮，川島の水頭変化

化であり、その特徴は次のとおりである。

- 鷲宮では鷲宮 2 号 (192-215m) の水頭が最も低く揚水による季節変動が顕著であることから、この付近への上下層からの地下水涵養が示唆される。
- 川島では川島 1 号 (249-287m) の水頭が最も低いものの季節変動が小さく、低水頭地域の揚水の影響が及んでいる可能性がある。
- 深い帯水層の水頭は経年的に上昇傾向にあるほか季節変動が小さくなる傾向にあり、これは広域的な揚水量の減少によるものと思われる。

図 - 8 は断面線 c-d に含まれる観測井の深さ別地下水頭変化であり、その特徴などは次のとおりである。

- 春日部中央 2 号と 3 号は、鷲宮と同様にこの深さ付近で揚水が顕著であり上下層からの地下水涵養があることを示唆しているほか、経年的に上昇傾向にあり揚水による季節変動も小さくなっている。
- 神明南第 1, 第 2 でも春日部中央 2 号, 3 号と同様の变化傾向を示している。
- 東京沖積低地に位置する新江戸川では第 1 の水頭が高いものの、より深い第 2, 第 3 ではほぼ静水圧状態にあり、季節変動が少ないことからこの付近での揚水がほとんどないことを示している。
- 新江戸川では第 1 ~ 第 3 にみられる経年的な水頭上昇は低水頭地域の水頭上昇によるものであろう。

図 - 9 は戸田橋、両国および小島の深さ別水頭変化

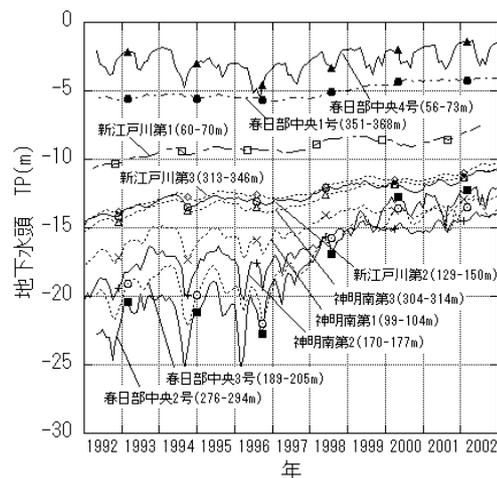


図 - 8 春日部中央，神明南，新江戸川の水頭変化で、その特徴を次に述べる。

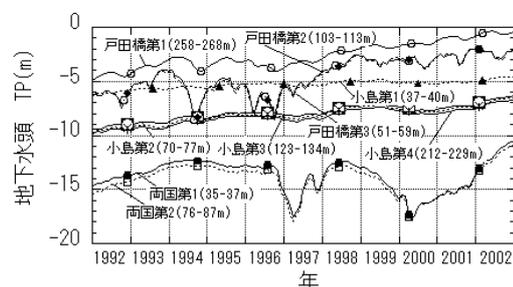


図 - 9 戸田橋，両国，小島の水頭変化

- 戸田橋第 2, 第 3 は鷲宮 2 号, 神明南第 2 などと同様に経年的に上昇し、かつ季節変動が小さくなる傾向にある。
- 小島では第 2 ~ 第 4 で水頭差がなく静水圧状態にある。両国では第 1, 第 2 とも他と異なる水位変動を示し、1996 年 ~ 1997 年, 1999 年 ~ 2000 年の低下は局地的な揚水の影響を受けたものと考えられる。

4. 地下水頭と揚水量との関係

図 - 10 は資料 2), 3) による年平均地下水頭の 1984 年 ~ 2002 年にわたる経年変化であり、次のような傾向がみられる。

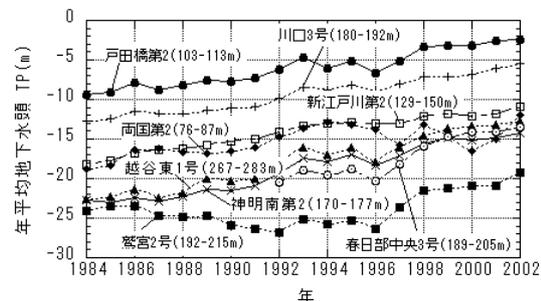


図 - 10 年平均地下水頭の経年変化

- 戸田橋第 2, 川口 3 号, 越谷東 1 号, 神明南第 2 および新江戸川第 2 は同様の経年変化を示し、経年的に上昇するとともに特に 1996 年から上昇傾向が顕著である。
- 鷲宮 2 号は 1992 年までは下降傾向にあるが、1996

年からは上昇傾向に転ずる。

- ・ 両国第 2 は先にも述べたように局地的な揚水の影響で他とは異なった変化を示している。

図 - 11 には資料 3), 8) による埼玉県 3 地域 (東部・北東部・中央部) 合計揚水量, 千葉県 2 地域 (東葛・葛南) 合計揚水量とこれら 5 地域の合計揚水量を示した (地域は図 - 12 を参照) 。

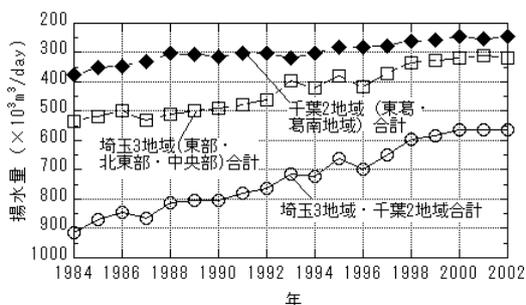


図 - 11 周辺地域の揚水量経年変化



図 - 12 揚水地域

なお、東京区部の揚水量はこれらの地域に比べて非常に少なく、また経年変化がほとんどないことから対象地域から

除いた。同図は図 - 10 と比較しやすいように縦軸の上方を小としている。これによれば、いずれも経年的に揚水量が減少傾向にある。

図 - 13 は 1984 年から 2002 年について年平均地下水頭と周辺 5 地域揚水量の関係を示したものである。同図ではグラフの右端が 1984 年に左端が 2002 年に相当する。これらから以下がいえる。

- ・ いずれのグラフも右下から左上に移行する傾向にあり、広域的な揚水量の減少とともに線形的に地下水頭が上昇することをあらわしている。
- ・ 鷲宮 2 号では途中、揚水量との相関が悪い時期があり、限られた地域の揚水の影響を強く受けている可能性がある。
- ・ 両国第 2 でも線形関係から大きく乖離する箇所があるが、先に述べたように局地的な揚水の影響による。

5. まとめ

以上述べてきた事項を次に総括する。

低水頭地域および周辺高水頭地域の地下水ポテンシャル分布形状は 1992 年、2002 年とも同様であるが、近年の揚水規制の影響で水頭は全体的に上昇

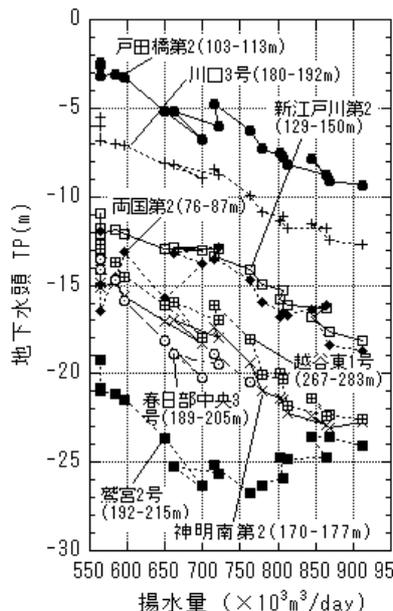


図 - 13 年平均地下水頭と周辺 5 地域 (合計揚水量の関係)

している。低水頭地域では深さ 150 ~ 300m のポテンシャルが最も低く、上下層および周辺からここへの地下水流動を示唆

している。

周辺高水頭地域に位置する東京沖積低地の地下水頭は、低水頭地域の揚水量減少にともないほぼ静水圧状態のまま上昇する。従って、両者間には水理的連続性が認められる。

1984 年 ~ 2002 年について、年平均地下水頭と周辺広域揚水量の関係をみると両者は多くの場所で線形関係にあり、東京沖積低地の地下水頭は今後の周辺地域の揚水量減少によって現状に比べてさらに上昇する可能性がある。

(引用・参考文献)

- 1)建設省河川局編(1994):地下水水位年表 第19回 平成4年(1992). 671p.
- 2)東京都土木技術研究所年報(昭和60年~平成15年).
- 3)埼玉県地盤沈下調査報告書(昭和60年~平成15年).
- 4)三宅紀治(1995):東京沖積低地を主とした被圧地下水頭の現状.第30回土質工学会研究発表会,平成7年発表講演集,(社)土質工学会,1885-1888.
- 5)角田史雄(1997):下総垂地下水盆の形成について.地下水技術,39(10),1-6.
- 6)三宅紀治(2000):首都圏における被圧地下水の課題と今後.地下水技術,42(10),24-31.
- 7)三宅紀治・斉藤庸(2003):東京,埼玉の沖積低地を主とした被圧地下水流動について.日本水文科学会誌,33(3),185-196.
- 8)国土交通省河川局編:地下水水位年表,第28回 平成13年(2001),642p.
- 9)千葉県環境白書(昭和60年~平成15年).

P46．建設工事・地下構造物と地下水

A relation of a groundwater level change for construction and underground structures

廣瀬誠(ジオテック), 川越健(熊谷組), 木谷日出男(鉄道総合技術研究所)

Makoto Hirose, Takeshi Kawagoe, Hideo Kiya

1．はじめに

大正中期にすでに低下し始めていた地下水位¹⁾は、第2次世界大戦終期に顕著な水位回復²⁾を示した。しかし戦後復興期から水位は再度低下し始め、昭和40年前後にGL-50~-60mの最低水位を示した。その後、地下水取水規制、水溶性天然ガス採取停止等により、地下水位は上昇し始め、昭和40年代後半から回復は顕著で、その傾向は現在もなお続いている。

一方、地盤変位は地下水位変化よりも5年程度のタイムラグが認められる。その結果、昭和40年半ばに最も地盤は低くなった。その後、ほぼ一定高の安定期を経て、昭和50年初頭~半ば以降はリバウンド傾向を示している³⁾。

構造物と地下水位変化の係わりについてみると、水位低下期に0m地帯が発生・拡大し、防潮堤機能が不全化するなど悪影響が顕在化した。水位上昇が著しい現在、既設の道路・鉄道・共同溝など地下構造物、大深度建築物等の劣化が懸念される。また山留工事、トンネル工事等の新設工事においても地下水対策費増大が問題である。このような地下水位上昇はインフラストラクチャーや建築物の短命化、ライフサイクルコストの増大、社会環境の悪化等をまねく恐れがある。

本稿は東京下町、武蔵野台地東部を例に地下水位変化と地盤・構造物の係わりについて、既往の観測データ等を用いて検討した結果を報告する。

2．地形概要

地下水位変化が著しい洪積層以深の地形を把握するために、首都圏の台地、埋没段丘を分類した図¹⁴⁾、表1を参照すると、古東京川が宮城、神明南、吾嬬、南砂町と図中央を流下する。吾嬬~河口にかけて谷底深度TP-60mに及び埋没谷が形成されている。また多摩川は図左下方を埋没立川段丘南縁に沿って北西~東南に流下し、河口付近の谷底深度はTP-50mである。

図1中央付近を通る断面線を西~東に追うと、武蔵野台地は石神井川、妙正寺川等によって開析され、周辺はTP-10m以下の埋没上位波食台に取り巻かれている。その東部にTP-20~

表 1 首都圏地域の地形分類表

地形要素	主な地形名称、分布位置	標高(TP)	形成年代
台地	武蔵野・下総・大宮台地等	20m以上	洪積世
埋没上位波食台	浅草・日本橋台地等	-10m以下	縄文時代
埋没下位波食台	江戸川下流	-20~-40m	
埋没立川段丘(河岸段丘)	本所台地	-20~-40m	2~3万年前
	多摩川下流	-10~-30m	
	荒川放水路下流部	-40~-50m	
埋没谷底	東京谷(古東京川谷底)	-60m	
	多摩谷(多摩川谷底)	-50m	
	丸の内谷(神田川谷底)	-50m	

-40mと一段低い埋没立川段丘が分布する。古東京川埋没谷東方は埋没上位波食台、下総台地と連なる。

3．地下水位上昇が構造物に与える影響

近年、地下水位上昇対策⁵⁻¹³⁾が取られた事例を図1に示す。対策は構造物の良好な支持地盤である武蔵野台地東部、埋没上位波食台など図中央域に集中している。

各地点における対策工法、事例は以下のようである。

- ・建築物の揚圧力対策にグランドアンカ工法が採用された事例
- ・トンネル(TN)漏水対策に排水を行っている事例
- ・東京駅、上野駅は揚圧力・漏水対策にグランドアンカ、荷重工法および排水工法を併用している事例

事例が無い下町域の大規模構造物はTP-20~-50mと深い埋没立川段丘および埋没下位波食台を支持層にしていると推測される。そのため基礎形式は厚い沖積層を貫く杭・ケーソン等の深い基礎が採用され、地下水位上昇の影響を受けにくいと考えられる。池袋・日暮里・小岩を通る地下水位東西断面図(図2)に地表面、沖積層基底、古東京川埋没谷および昭和40年、平成10年における表層地下水位、上部洪積層の地下水位等を示す。断面図によれば、東京駅、上野駅等の基礎部分、有楽町トンネルは埋没上位波食台内に位置している。昭和40年の地下水位は日暮里付近でTP-55mと低い。平成10年に地下水位はTP-13mとおおよそ40m上昇している。昭和40年後期~50年前期に構

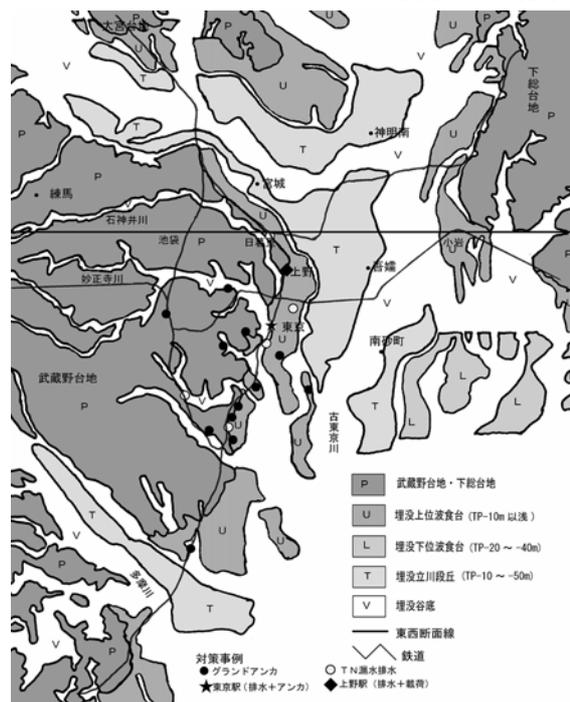


図 1 地形分類と地下水位上昇対策事例位置図

築された駅舎周辺水位は上昇し、またトンネルも水深が増大した。その結果、水深 15～30m 相当の水圧、揚圧力が新たに作用し、対策が必要になったと考えられる。また練馬 池袋中間線より東部の武蔵野台地でも水位が 30m 以上上昇した結果、台地

上においても、建築物は揚圧力対策にグラウンドアンカ等を必要としたと推測される。表層地下水位は経年変化せず、ほぼ一定高を示し、平成 10 年においても洪積層地下水位より高い。

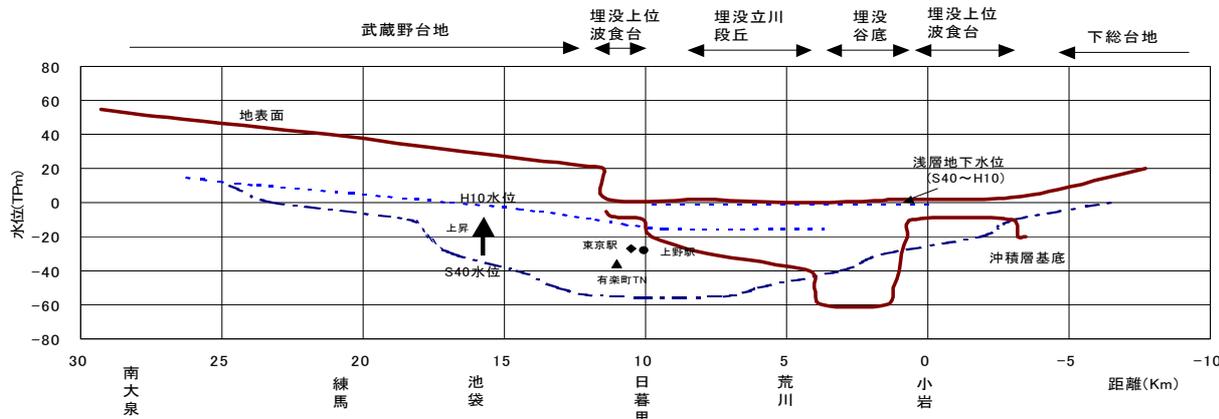


図 2 昭和 40 年，平成 10 年における地下水位東西断面図

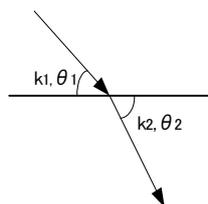
4. 沖積粘土層，洪積層上部における間隙水圧変動

洪積層の地下水位上昇は既述のように地下構造物に作用する水圧が増大する。一方、水位低下は地盤沈下をまねき、社会環境問題を顕在化させた。地盤内応力は地下水位変化に敏感に回答し、沈下・リバウンド等の地盤変位を生じさせる。このような地下水位と地盤内応力の相互作用について検討することが重要と云える。本節では沖積粘土層の応力状態を理解する一助として、昭和 46 年～昭和 58 年における神明南町、宮城の沖積粘土層，上部洪積層の間隙水圧について検討する。なお、検討では以下を仮定する。

- ・表層，沖積粘土層，洪積層は水理的に等方，均質である
- ・表層，上部洪積層は帯水層（透水係数約 10^{-3}cm/s ），沖積層は粘土層（約 $10^{-7} \sim -8 \text{cm/s}$ ）とする

この仮定より，以下の結果を得る。

a) 表層から沖積粘土層，沖積粘土層から洪積層への地下水流動



流線の屈折則¹⁴⁾(図 3)によれば、透水係数 k_1 層から浸透角 θ_1 で透水係数 k_2 層に流入するとき、流線角 θ_2 は $\tan \theta_2 = (k_1 \tan \theta_1) / k_2$ 従って、 $k_1 \gg k_2$ で $\theta_2 \approx 90^\circ$

である。即ち、表層をほぼ水平に流動する地下水は、全水頭の低い粘土層に鉛直に流入する。同様に沖積粘土層から洪積層に流出する地下水は洪積層をほぼ水平に流動する。

b) 表層，洪積層内の間隙水圧分布

連続則より，表層から沖積粘土層・洪積層への流下浸透量は

$$i_s = \frac{k_c}{k_s} i_c = 10^{-4} \sim -5 i_c \quad 0$$

ここに k : 透水係数, i : 動水勾配 サフィックス s : 表層・洪積層, c : 粘土層, $i_c < 10$ (図 5 参照)

即ち a), b)より表層，洪積層内の間隙水圧は，粘土層への地下水流入あるいは流出の影響をほとんど受けず，静水圧分布する。神明南町，宮城における沖積層と洪積層の間隙水圧分布¹⁵⁾を図 4，図 5 に示す。図中の記号は昭和 46，49，52，58 年に 3 深度で測定された実測値である。なお、図示の静水圧線は検討期間中ほぼ一定高を示す表層水位を基準としている。

図 4(神明南町)によれば，同時期に測定した洪積層の 2 測点を結ぶ線は 3 線共に静水圧勾配とほぼ同じ傾きである。即ち既述したように上部洪積層の間隙水圧は静水圧分布を示す。

これより，ラインを上方に延長して求めた洪積層上面における昭和 49 年の間隙水圧はサクシオンとなる。サクシオンはいずれ大気圧に開放されて不圧帯を形成すると考えられる。

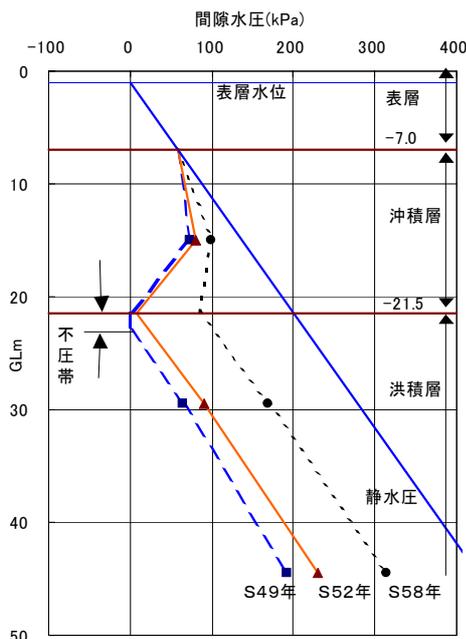


図 4 神明南町沖積洪積層間隙水圧分布図 (S46～S58)

沖積層内の間隙水圧は層上面水圧～測定点水圧～層下面水圧を結ぶ弓状分布を示す。その後、地下水位上昇に連れて沖積層下面水圧は静水圧線に向かって移動する。洪積層上部の間隙水圧分布も同様に静水圧線に向かって平行移動する。その結果、不圧化した洪積層上部は再被圧化する。

図 5(宮城)によれば、昭和 49, 52 年における上部洪積層の不圧帯は厚さ 10mに及ぶ。不圧帯にある期間サクシオンあるいはキャピテーションが発生していたか否かは、沖積粘土層の応力状態に大きく影響する。なお沖積層下端における間隙水圧は著しく消散しにくい。水圧ラインは沖積層内で弓状に変化しており、神明南町データと調和する。

5. 沖積粘土層、洪積層以深の沈下・リバウンド

沖積層が厚く堆積する古東京川埋没谷沿いで最も大きな沈下が観測されている。このような沈下の地域性は洪積層以深における地下水位低下分布、沖積層基底深度分布と調和している。本節は地盤沈下性状を低地部に位置する南砂町第 1, 吾嬬 A¹⁶⁾ について検討する。

a) 南砂町第 1

図 6 に南砂町第 1, 第 2 における洪積層以深の地下水位経年変化を示す。()内数値はストレーナ設置深度である。ストレーナ位置に約 50m 深度差があるが、2 深度の地下水位はほぼ同レベルを変動する。即ちこの深度域が同一帯水層であれば鉛直浸透流を無視できる。吾嬬 A, B においても同様である。

図 7 上段は昭和 37 年～平成 12 年における地盤沈下量の経年変化を、中段は南砂町第 1 における沖積層、洪積層以深別に各年の沈下量を示す。上段によれば、地盤は沈下収束期からリバウンド期に移行した事を示している。中段では、昭和 47 年以前の沖積層、洪積層以深はともに沈下する。沖積層は昭和 37 年をピークに徐々に沈下量が減少し、水位が上昇に転じて約 8 年(昭和 48 年)経過後、沈下量は急減する。しかし洪積層以深のようにリバウンドに転じることなく沈下が続いている。一因として二次圧密の影響が考えられる。洪積層以深の沈下量は水位低下期に沖積層を上回り、かつ毎年ほぼ一定量である。昭和 48

年以降、洪積層以深は明確にリバウンドに転じる。その後、リバウンド量が暫時減少している。これら変動量を昭和 37 年末～平成 12 年末について表 2(負値：沈下量, 正值：リバウンド) に示す。

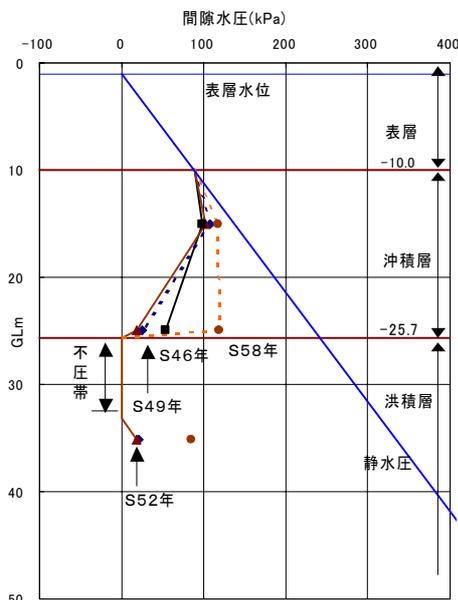


図 5 宮城沖積洪積層間隙水圧分布図 (S46～S58)

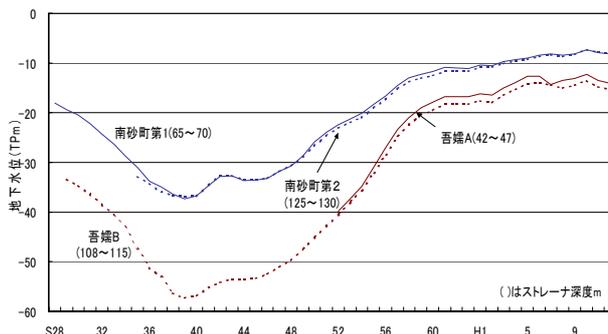


図 6 地下水位の経年変化図

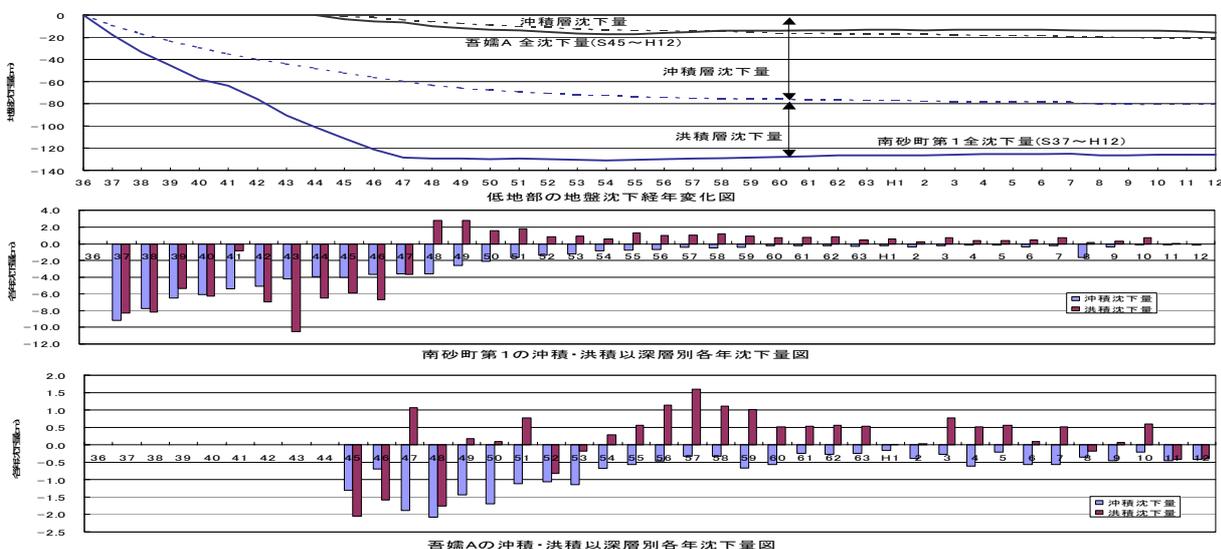


図 7 南砂町第 1, 吾嬬 A における沖積層・洪積層以深の沈下経年変化図

表 2 昭和37年末～平成12年末における地盤沈下量

	沖積基底 深度(m)	計測期間	沖積層沈 下量(cm)	洪積層沈 下量(cm)	計 (cm)
南砂町第1	70	S37～S47	-59.5	-69.1	-128.6
		S48～H12	-21.5	24.1	2.6
		計	-80.9	-45.0	-125.9
吾嬬A	47	S45～S53	-12.4	-4.3	-16.7
		S54～H12	-9.0	10.0	1.0
		計	-21.4	5.7	-15.7

沈下量とリバウンド量を比較すると、洪積層以深の変位に弾性変位、塑性変位が含まれていると考えられる。

b)吾嬬A

図 6によれば吾嬬A、Bにおける洪積層以深の地下水位は南砂町第1第2と比べて全般に低い。昭和40年付近で約20m、近年においても約10m低い。図7上段および下段に示す吾嬬Aにおける全沈下量および沖積層、洪積層以深部の沈下傾向は南砂町第1とほぼ同様である。なお洪積層以深がリバウンドに転じる時期は昭和54年と南砂町第1に比べて6年程度遅れている。表2によれば洪積層のリバウンド量を南砂町第1(昭和48～平成12年24.1cm)と吾嬬A(昭和54～平成12年10cm)で比較すると、南砂町第1は吾嬬Aの2.4倍のリバウンド量を示す。なお図6より同期間における水位上昇は同量(約22m)である。この遅延及びリバウンド量の差は両地点における地盤構成と応力状態の差と考えられる。

c)沖積粘土層、洪積層以深の沈下・リバウンド

地下水位の経年変化から沖積粘土の圧密沈下現象を概観すると、地下水位低下期は、圧密圧漸増のもとで圧密が進行する期間である。層内部では、圧密完了域と未了域が時間経過と共に変動しながら併存している。地下水位上昇期は、圧密圧が漸減しながら圧密が進行する。それまで獲得した有効応力よりも圧密圧の大きい期間は一次圧密、二次圧密が進行し、小さくなればリバウンドに転じる。層内部では水位低下期以上に圧密完了域、未了域、過圧密域が複雑に混在する。

洪積層以深は一般に安定した硬質地盤と考えることが多いが、事例では地下水位変動に伴いダイナミックな挙動を示している。即ち水位低下期の沈下は沖積層と同量以上であり、水位上昇期はある水位レベルを超えると明確にリバウンドに転じる。また洪積層の地盤変位は弾性変位と塑性変位が含まれる。このような洪積層以深の変位に寄与している層とその応力状態・力学的性質など不明な点が多い。

6.まとめ

東京下町、武蔵野台地東部を例に地下水位変化と地盤・構造物の係わりについてまとめると以下のようである。

地下水位変化、地盤沈下等は地形、地質の制約を受けている。

良好な構造物支持地盤と云われる武蔵野台地および埋没波蝕台、埋没段丘の地下水位が近年顕著に上昇したため、そこに直接基礎形式で建設された建築物あるいはトンネル等に水位上昇対策が集中したと考えられる。

地下水位低下時は沖積粘土層の沈下量が一般に注目される。しかし洪積層沈下量も沖積層以上となる場合がある。

沖積層、洪積層の地盤変位および応力状態は地下水位変化履歴を反映して複雑である。

地表面変位はこの複雑な状況にある各構成層の沈下量とリバウンド量の累積値と云える。地下水利用には更なるデータ収集と分析が今後の課題である。また検討域に生じている現象は大局的にみれば広域地下水流動の制約を受けた地域現象と考えられる。検討には広域流動系、地域流動系、更には局地流動系を融合した手法が重要である。

参考文献

- 1)新藤静夫 南関東の地下水 土と基礎 Vol.20 No.5(1972) pp25～36
- 2)遠藤毅,川島真一,川合将文 東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史 応用地質 Vol.42 No.2(2001) pp74～87
- 3)平成14年地盤沈下調査報告書 東京都土木技術研究所(2003)
- 4)貝塚爽平 東京の自然史増補第二版 紀伊国屋書店(2001)
- 5)日経コンストラクション(1996-2-9) pp52～55
- 6)日経コンストラクション(1996-8-9) pp22～45
- 7)日経アーキテクチャー(2000-3-6) pp102～117
- 8)日本経済新聞 Sunday Nikkei(2001-7-8) p17
- 9)総武・横須賀線地下ルートへの漏水対策 高木達二 高森繁光 基礎工(1989-4)pp54～61
- 10)大規模掘削工事における上総層群(土丹層)の被圧地下水対策 上野孝之 須藤賢 西田憲司 基礎工(2001-11)pp52～54
- 11)営団地下鉄, JR 東日本: インターネット
- 12)片寄紀雄 復元する被圧地下水から地下駅を守る 東北新幹線 上野地下駅 トンネルと地下 Vol.27 No.10(1996)pp7～14
- 13)倉澤徳男 宮園達郎 東京地下駅の地下水上昇対策工 トンネルと地下 Vol.31 No.10(2000)pp7～16
- 14)山口柏樹 土質力学(全改訂) 技報堂(1984) pp69～70
- 15)遠藤毅,石井求 東京都平野部の水文地質と地下水位上昇に伴う諸現象 応用地質 Vol.25 No.3(1983)pp11～20
- 16)東京都土木技術研究所年報(昭和45年～平成13年)

P47. 地下水流動系に関わる岩盤割目の見方と評価

Evaluation of Fracture in Rock Concerned with Groundwater Flow System

奥田 英治 (アイドルエンジニアリング (株))

Eiji Okuda

1. はじめに

一広域流動系の一側面としてのサイトスケールでの岩盤内地下水流れをどう捉えるか、またその流れを支配する割目を現場でどう評価するか

岩盤内地下水流れに関しては、渡辺 (1983) の先駆的な研究¹⁾があり、近年それらのシミュレーション的研究が精力的に行われている^{2), 3)}。

岩盤内の地下水流れといえどもそれ自体は様々な地盤中を流下する広域地下水流動系の一側面として位置づけられるものである。従って、それらは数十 km 単位以上の広域的スケールにおいては均質多孔体中の地下水流動則に従って流れていると見ても近似的に大差はないが、場のスケールを小さくしたときはその場の岩盤の不均質性に大きく影響され、均質多孔体中の流れとは大きく異なるものとなることが予測される。

このことは自然界あるいは様々な現場における事実から検証されている (例; ダム掘削面湧水, トンネル湧水, 海食崖湧水など)。これらは、岩盤内の地下水流れが地質構造、特に割目に大きく影響されていることを示すもので、これらは「みずみち」と呼ばれる。「みずみち」にもよく水を通すものと相対的にあまり通さないものがあって、よく通す部分の流速は早く、あまり通さない部分では遅いという不均質流動の単純な法則に従っている。岩盤内の地下水は、これら「みずみち」を通じて流動し、広義の「みずみち」としてはミクロな方から①堆積物粒界・岩石構成鉱物粒界、次いで②これを切る微小割目、③連続性の小さい亀裂、④広域的に広がりを持つ層理・節理、構造的成因の割目、⑤断層破碎帯等があり、この順に桁違いに大きなオーダーの流速を持つようになる。

従って、サイトスケールでの地下水流動を検討する場合にはその対象とするサイトの大きさにより、またどの程度のオーダーの割目があるかによって検討対象とする「みずみち」が異なることになる。

その際、流動規制力の大きいオーダーの「みずみち」をメインフレーム、それらに囲まれた内部の「みずみち」をサブフレーム (図-1 参照) と呼ぶこととすると、メインフレーム、サブフレーム共に様々なスケールのものがあり得ることになり、検討課題、対象に応じていかにしてこれらを識別・抽出するか

が問題となる。また地表近くにおける割目沿いの地下水流動を対象とするダムなどでは、割目が形成された後の割目に沿った風化⁴⁾ や上載荷重の除荷による弛み現象、表層クリープなどの副次的な影響も受けるためこれらについても併せて評価しておく必要がある。

ここでは、岩盤地下水流動を規制する割目系を現場でどう識

別するかの方法についてとりまとめを行うものとする。

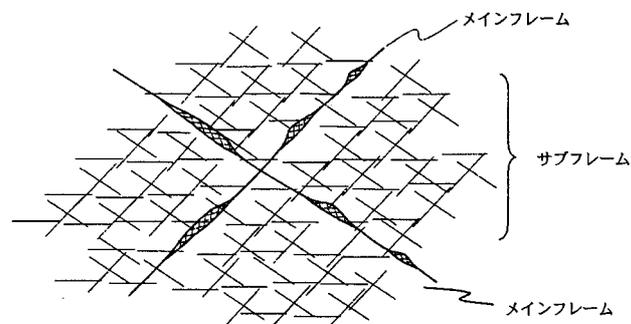


図-1 岩盤浸透流の流路模式図

2. 地下水流れのメインフレーム推定手法

岩盤内地下水流れを大きく規制するメインフレームの推定手法には大まかには以下の様なものがある。

- (1) 経験的アプローチ
- (2) 地質学的アプローチ (発達史的・構造的側面)
- (3) 実験的アプローチ

(1) 経験的アプローチ

岩盤中の地下水流動に関するフィールドにおける証拠 (掘削面, トンネル, 鉱山, 試掘横坑, 調査ボーリングにおける透水試験など) は以下の様な経験的事実を提起している。これらは広域地下水流動の一側面を表しているに過ぎない点に留意する必要がある意味でみずみちを考える大きなヒントを提供してくれている。

- ① 割目に沿って流れている (割目湧水)
- ② 流出量が多い特定の割目がある
(同一平面・同一標高に隣接して存在するのに湧水量の多い割目と少ない割目, 全く湧水の観察されない割目がある)
- ③ 断層を介して地下水位のギャップがある場合がある
(断層が遮水しているあるいは流動方向を規制している)
- ④ 断層沿いの破碎帯あるいは破碎影響ゾーンは大きなみずみちとなっている場合がある
- ⑤ 同じ断層でも場所により湧水の多い所と少ない所がある
- ⑥ 開口割目は極端に水を通す (開口=広義の引張割目)
- ⑦ 周辺部に比べて風化褐色化の強い割目, 深くまで褐色化の続く割目がある (特定の割目を水が流れている)

(2) 地質学的アプローチ(発達史的・構造的側面)

1) 流体の化石

全体像が目には見えない岩盤内地下水流動に関して、ナチュラルアナログの視点から以下に示すようなフィールドで見られる現象を過去の「流体の化石」として認識し、これらは岩盤への浸透流体の選択注入の結果であるとの解釈から、地質構造と流体の流れやすさの関係を類推しようとするものである。

〔流体の化石〕の例

- ① 細い岩脈・・・破碎部へのマグマ注入現象の化石、岩脈貫入時の σ_1 方向の化石 (σ_3 直交方向)

図一2は花崗岩からなる基盤に対して貫入したドレイイトの貫入形態を示している。

全体的な貫入方向はほぼ東西方向であるが、岩脈は既存の破碎ゾーンに沿って細脈の集合体として貫入しており、個々の貫入面の方向は交角 20~30° の2つの方向性を持ち、全体的な延

びの方向はその2等分線の方向となっている。

岩脈群全体の幅は膨縮があり、岩脈は1枚で数mしかない所から数m~10mの幅の岩脈が10数枚集まって全体で20~30mにわたる所まであり、元々の破碎帯の雁行・膨縮構造に従っている。

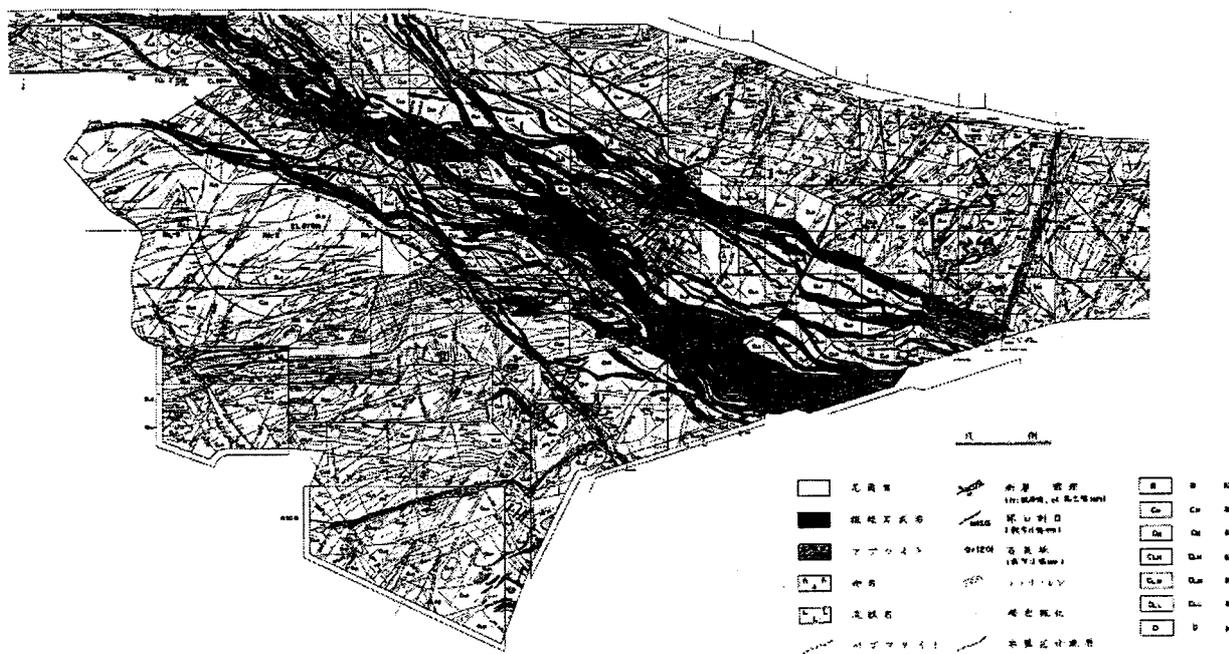
脈幅の広い所は雁行部であり、そこでは主脈に斜交する細脈が多数発達する。

岩脈の貫入方向は、広域的に同方向の多数の岩脈が認められることより、貫入箇所付近の広域応力場における最大圧縮主応力軸の方向を示すと考えられる。

これらの事象より、

- a) 碎帯は流体が通りやすい
- b) 碎帯の中でも雁行の連結部は流体が集中する
- c) 当該箇所での最大圧縮主応力軸方向は流体が通りやすい

等の傾向を読みとることができる。



図一2 岩脈の貫入形態(1/200)⁵⁾

② 鉍脈型鉍床の鉍体・・・破碎帯への熱水鉍液注入の化石
熱水性の鉍脈型鉍床の形態は、図一3に示されるように破碎帯の微小内部構造を反映したものであることはよく知られており(大槻 1993 ほか)、大規模な鉍体は破碎帯の雁行部に集中してあることもこれらの図から読みとられる。

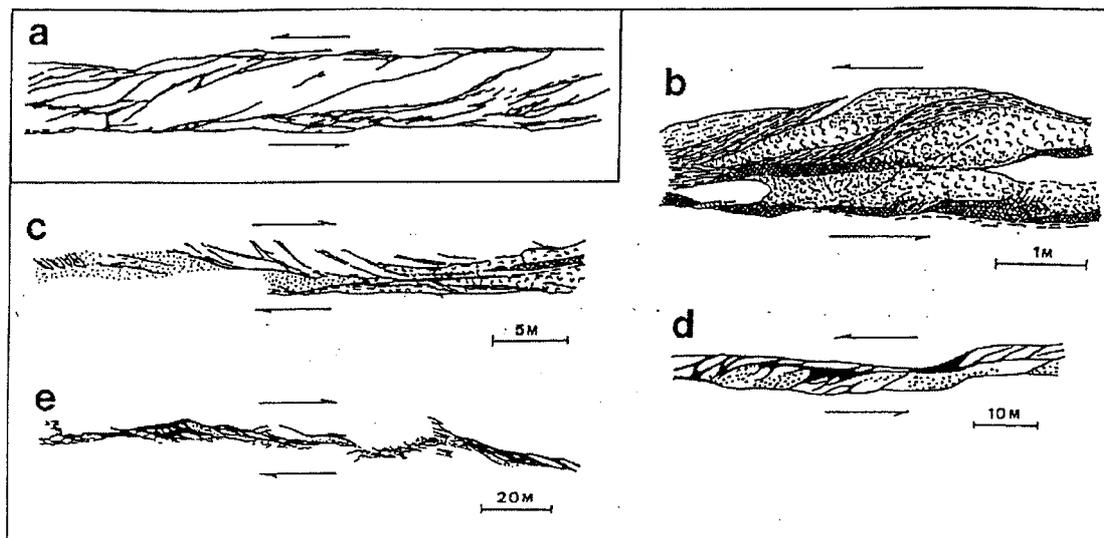
破碎帯がなければ鉍液を含んだ熱水溶液は上昇できないことは当然であるが、その雁行部に富鉍体が存在することはそこに熱水が集中して上ってきたことを示す。

これは、破碎帯が主変位せん断面とその周辺に生じる二次的なりーデルシャーや雁行部での展張割目の形成等、基本的に割

目が多いことと開口性割目が存在することに起因するものと判断される。

これらより、

- i) 破碎帯の雁行部は流体が通りやすい
 - ii) 割目が多い所は流体が通りやすい
 - iii) 展張性(開口性)割目がある所は流体が通りやすい
- 等の傾向が読みとれる。



図一3 破碎帯と鉱脈内部構造の類似性. a: 岩石摩擦実験による破碎帯内部の雁行状すべり面 (Byerlee et al., 1978).
b~e: 鉱種や破碎部が作る鉱脈の内部構造の実例 (御園、轟、大江、豊羽鉱山鉱脈), 矢印はせん断のセンスを表わす.
(大槻, 1989) ⁶⁾

③ 熱水変質帯・・・熱水溶液の浸透・注入の化石

近畿地方の花崗岩地帯における熱水変質帯の分布とその構造解析の事例では、地表踏査により、幅広い変質帯が存在する部分とごく狭い変質帯しかない所が交互に繰り返しており、その連続性は雁行形態をとり大きく屈曲を繰り返すことが明らかにされている。踏査から導き出された変質帯全体の延びの方向は、当然観察される粘土ガウジの方向とは大きく斜交する。

このような連続性ならびに変質帯の膨縮は、図一2の岩脈の貫入形態や図一3の鉱脈の分布形態に近く、解釈的には雁行破碎帯の展張割目による連結部への集中的な熱水の浸透によるものであろうと結論づけられる。

④ 不飽和帯の風化脈・・・空気と水の通り道の化石

ダムサイトにおける掘削面の不均質な風化状況から見ると、不飽和帯における風化作用は、空気や水が入りやすいほど著しいはずであるから、風化の進んだ箇所ほど水が通りやすいと言え換えることもできる。

現地における調査結果より、一般に、風化（割目沿いに砂状化や強い褐色酸化）が進んでいるのは、

- ア) 割れ目の多い所
- イ) 割れ目の交差部 (特に共役せん断面の交差部)
- ウ) 長く続く顕著な割目 (特に変位を有する割目)
- エ) 形成時代の新しい割目 (他の割目系を切るもの)
- オ) 開口割目 (流入粘土付着割目)
- カ) 展張性と推定される割目

等である。

2) 断裂の形態→ガウジ, 面の凹凸の大きさ, 副次的断裂随

伴

- 3) 断裂の形成機構→せん断, 展張, 引張, 主せん断/二次せん断
- 4) 断裂の新旧 (構造発達史)
- 5) 場のおかれてきた環境 (構造発達史)
- 6) 場の最近の環境 (風化, ゆるみ等)

(3) 実験的アプローチ

割目に対する注入試験 (原位置または実験室), ルジオン試験, セメントミルク注入試験

3. 現場への適用—割目を現場でどう見るか—

2. より集約されるメインフレーム像は以下の様なものとなる。

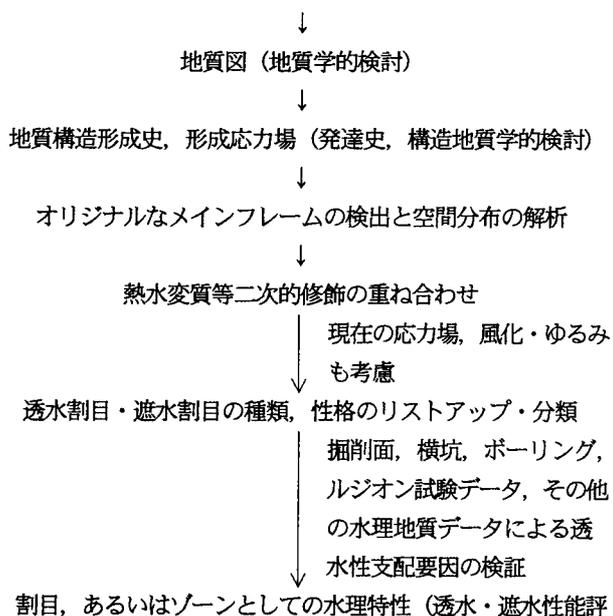
- ① 岩盤内の浸透流は、主体的に水を通すメインフレームと、これに連結されるサブフレーム (その内部にはさらに小さなオーダーのマイクロフレームがある) からなる。
- ② 何がメインフレームとなるかは、空間・時間スケール、対象とするものによって異なる。
- ③ メインフレームは、広域的に発達する断層等弱層の規模・構造に支配される。
- ④ サブフレームはメインフレームの断層発生時の応力場における同時発生的同方向の剪断面や二次的な剪断面・展張破壊面、節理面、地層・岩石の持つ初生的層理・冷却節理面等によって構成される。場合によってはさらに小さなオーダーのマイクロフレームによって構成される。
- ⑤ メイン、サブのフレームは「みずみち」と呼ばれ、これらで構成されるネットワークを使って地下水は流動する。
- ⑥ メインフレームのみずみちで最大のものは一般的に断層である。断層は熱水変質帯や粘土を介在するものはそれを切

る方向では難透水性、断層に沿う方向での周辺の破碎影響ゾーンは高透水性。

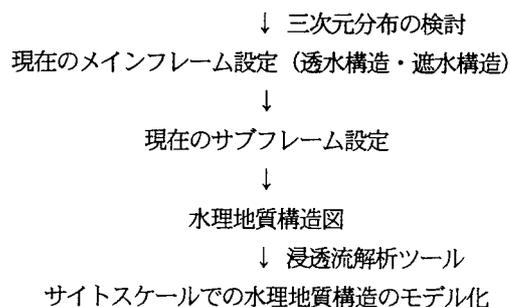
- ⑦各フレームには内部にさらに水を通しやすいチャンネルがあり、特に断層交差部・雁行連結部等は大きなみずみちとなっている可能性が高い。
- ⑧断層以外の割目では、連続性等が同一とすれば開口性の割目（展張性、引張性…とう曲帯、シーティング、冷却等）が最もみずみちとなりやすい。
- ⑨封圧の小さい条件下で形成された割目はブリット破壊、体積膨張＝ずれによる開口部形成→高透水みずみちとなりやすい。
- ⑩割目のスケールが同一とすれば、単一割目より複数割目、せん断割目より引張割目、共役交差部、連続性の大きい割目、形成時代の新しい割目、現在の応力場で展張方向となる割目などがみずみちとなる可能性が高い。
- ⑪これらのフレームは、形成後の変質作用や過去から現在にわたる風化作用により元来の性格は変化しており、全体に粘土化が進みかえって難透水性化していたりするので、現在の性状も含めてみずみちとしての性能を評価しなければならない。
- ⑫透水割目は酸化したり、風化している場合が多い。深部でのこのようなものは要注意である。

以上のようなメインフレーム像に対して、サイト毎にどのような割目があり、その割目がどのようにして形成され、どう発展してきたかを分析の上、上記のメインフレーム像に当てはめていけば自ずと当該サイトのメインフレームは明らかとなる。実際の現場において割目をどう見るかはサイト毎の条件が多様であるので一概にはいえないが、基本的には以下のフローに示すような確実な調査・検討のステップを踏んだ上でのサイト毎の透水性支配要因の評価・判断が必要である。

現場データ＝踏査資料、横坑、ボーリング、ルジオン試験データ、その他の水理地質データ



価)



4. 総括と今後の展望

サイトの地質条件に対して地質学的に適切な手順を踏んで調査をすれば、水理地質上重要な割目系を明らかにすることが出来、それに基づいて水理地質上のフレーム構造を推定できる。

従って、サイトスケールにおける地下水流動の問題は、そのスケールサイズと流動場の地質構造が大きく影響することより、流動場のメインフレーム構造を明らかにすると同時にその構造のよってきたる所を地質学的に明らかにすることによって解決への道は拓けるものとする。

即ち、小スケール流動場における岩盤割目系は、その現在に至るまでの形成→発展の歴史「氏と育ち」を明らかにすることが大切であり、その地質学的な解明なくしては流動場におけるモデル化も計算上の諸条件も合理的には決められないということである。

このような視点から山体の水理地質構造を解明し、同時に実施される水理地質的調査・試験・工事の結果を統一的に説明出来る仮説を構築・検証していくことが地下水流動系に関わる岩盤割目系評価の一番の近道となると考えられる。その過程においては、水理地質構造モデルの検証のみでなく、適切にそのモデルを評価できる岩盤浸透流計算手法の開発も必要である。

また、データを取得できるごく限られた範囲の割目系解析結果をいかにしてより広範囲の領域に拡大していくかの方法論について、そのモデル化手法も含めた研究が必要と考えられる。

—参考文献—

- 1) 渡辺邦夫 (1983) : 岩盤割目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎研究. 埼玉大学工学部地盤水理紀要 No.2
- 2) 渡辺邦夫 ほか (1994) : 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その1). 応用地質, 35, No. 3.
- 3) 杉村淑人 ほか (1999) : 水みちネットワークモデルによる亀裂性岩盤の非ダルシー流解析. 埼玉大学工学部年報. 24.
- 4) 大河内誠 ほか (1998) : 節理に沿う岩盤の劣化傾向. 応用地質, 35, No. 5.
- 5) 水資源開発公団 奈良俣ダム建設所 (1991) : 奈良俣ダム工事誌・図面集.
- 6) 大槻憲四郎 (1989) : 鉱脈による新第三紀東北本州弧の造構応力場復元. 地質学論集, 32.

P48. 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討 (1) - 割れ目系の構造発達史から読み取れる透水性評価 -

Characterization of Hydrogeologic Structure in a Dam-Site with Developed Fracture System(No.1)

川越 健(熊谷組) 長田昌彦(埼玉大学)
Takeshi KAWAGOE、Masahiko OSADA

1. はじめに

不連続性岩盤の透水性は割れ目および割れ目系に支配され、岩盤の透水性を評価し水理地質構造をモデル化していく上では「場と対象とするスケール」における地質構造と透水性の関係を明確に説明する必要がある。このためには、岩盤の透水性を支配する割れ目および割れ目系について、地質学的な立場から評価していくことは非常に重要なことである。本論は、応用地質学会「応用地質学における地下水問題研究小委員会」ワーキンググループ2での上記に関する検討を踏まえ、花崗岩類を基盤とするダムサイトで割れ目系の構造発達史を踏まえた岩盤の透水性を検討した事例を報告するものである。¹⁾

2. 検討対象の概要

(1) 検討対象としたダム

検討対象は、阿武隈花崗岩類に建設中の小山ダムの基礎岩盤である。小山ダムは茨城県久慈水系ダム建設事務所により建設される重力式コンクリートダムである。

(2) 地形・地質概要

検討地点は茨城県北部を流れる大北川中流域に位置する。大北川はサイトより上流では、比較的河床勾配が緩く河岸段丘を伴い、川幅が一部で約 100mと広がっている。一方、下流側では河床勾配が急となり、V字谷の様相を呈する渓谷となっている。サイトの右岸は直線状の沢、左岸はややせ尾根となっている。図-1にダムサイト周辺の地形を示す。サイトには中生代白亜紀の深成火成活動により生じた、阿武隈花崗岩類(古期花崗岩類)の花崗閃緑岩が主に分布し、これに進入する形態で淡紅

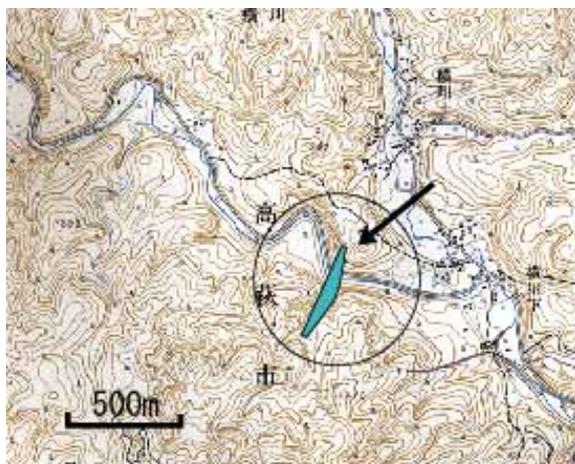


図-1 ダムサイト周辺の地形

(国土地理院 1:25,000 地形図「巖原」より抜粋、一部加筆)

色を呈するアプライト脈が多く分布している。²⁾

図-2に周辺の地質図を示す。

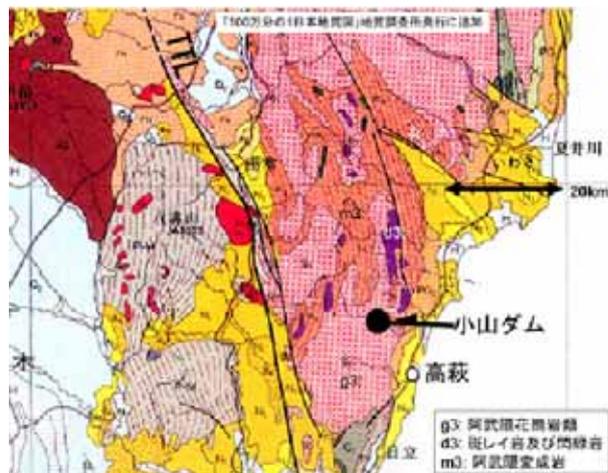


図-2 小山ダム位置図・周辺地質図

(「100万分の1日本地質図」地質調査所発行に追加)

3. 検討方法

主に基礎掘削面の岩盤スケッチからダムサイトスケールにおける割れ目系についての発達史を検討した。この結果に対して、グラウチングのルジオン試験及び湧水箇所などのデータを合わせてモデルの検討を試みた。

4. ダムサイトの岩盤状況

(1) 岩質

図-3に岩盤スケッチから抽出した岩盤の状況をまとめる。ダムサイトの花崗閃緑岩はCH、CM級が主体である。断層や断層周辺の節理、特定方向の亀裂が密に分布する箇所では熱水変質作用がゾーンとして認められる。熱水変質を比較的強く被る領域では、岩質の劣化の進行は浅層部に顕著であり、深部では岩質の劣化は低減する。ここで示した顕著な熱水変質ゾーンは定性的ではあるが、スケッチ時に目視にて抽出した領域である。

(2) 割れ目の方向性と特徴

ダムサイトにおける割れ目の方向を図-4のシュミットネットに示す。ここで、最も規模の大きいF-1断層をダムサイトスケールにおける主断層とすると、F-1断層とF-2断層の方向から図-4に示すシュミットネットの各極はF-1断層の二次剪断面として発達したR面やP面として位置づけられる。図-4の結果は、図中に示す割れ目

は同じ応力条件下で形成された一群の割れ目とし

て取り扱えることを示しており、今後、各割れ目を「割れ目系」として取り扱う。図-5に断層を除いた割れ目の

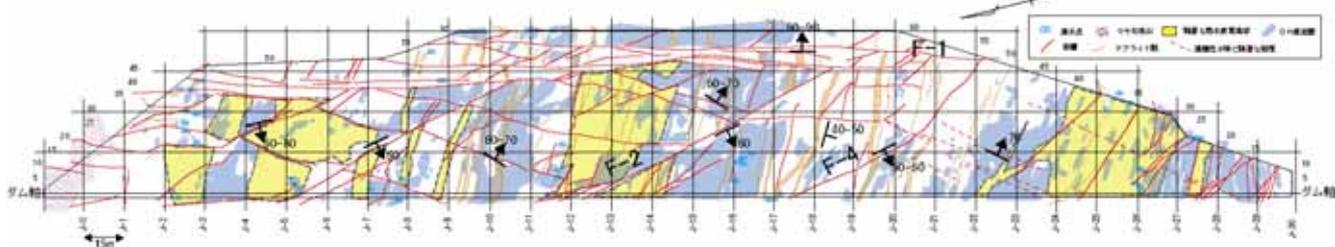
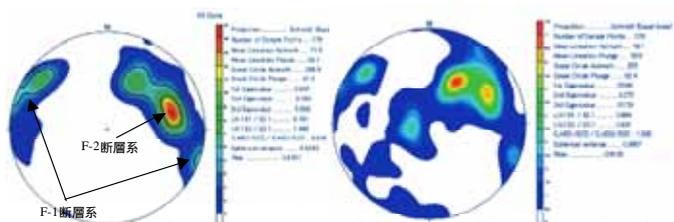


図-3 岩盤スケッチから抽出した岩盤の状況

方向性を示す。図-4と比較すると、ほぼ同じところに極が分布している。これは、小山ダム基礎岩盤の割れ目系で、スケールに応じた階層性が存在する可能性を示しており、割れ目系についてのモデルを考える時、相対的に規模の大きな割れ目に当たる断層に着目することの有効性を示唆しているものとする。



(断層) (断層以外)

図-5 断層を除いた割れ目系のシュミットネット (北半球投影)

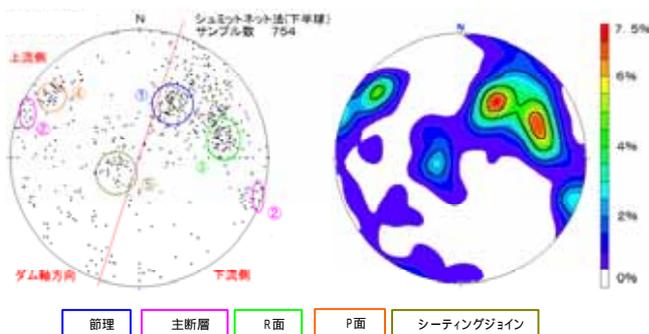


図-4 ダムサイトにおける割れ目の分布 (北半球投影)

5. 割れ目系の構造発達史と水理地質構造の推定

アプライト脈はサイトを構成する花崗閃緑岩生成直後に進入したと考えられ、花崗閃緑岩形成初期に生成された引っ張り系の割れ目の方向性を示していると考えられる。アプライト脈はF-1断層(レイクは10°前後を示す)F-2断層などの断層により明瞭に変位を受けている。このアプライト脈の幅、組み合わせから、断層の見かけの水平変位分を戻し、断層の運動による割れ目生成以前のある時期の状態の復元を試みた結果を図-6に示す。

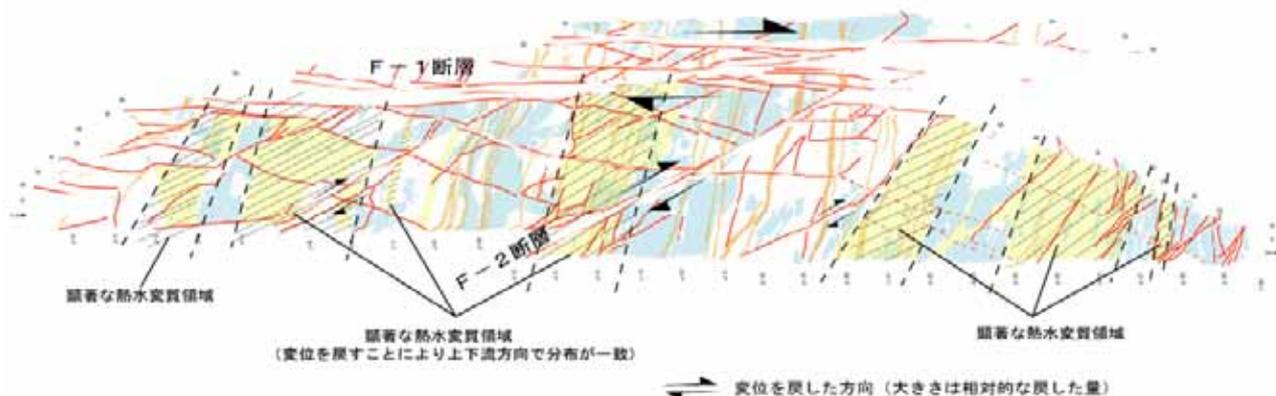


図-6 断層変位を戻した時の岩盤状況

図-6から、アプライト脈の組み合わせは上下流方向で比較的良く一致し、顕著な熱水変質ゾーンや比較的まとまったCH級の岩盤が上下流方向に連続する構造となっていることがわかる。このことから、割れ目系の構造発達史として、引っ張りの割れ目系を通してアプライト脈の進入、熱水の影響が及んだのち、F-1断層の運動によ

り、現在みられる割れ目系の大枠が決められた。また、基礎岩盤面で顕著な熱水変質を被る領域が上下流方向にのびていることから、現在認められる岩質はF-1断層系の形成以前に形成された割れ目系の影響を強く受けていると考えられる。ここで述べた割れ目系の構造発達から、ダムサイトスケールにおける現在の基礎岩盤の水理地質

構造を解釈すると、F-1 断層、F-2 断層が地下水の流れを大きく規制する水みち³⁾(メインフレーム)で、上下流方向に発達する割れ目系、および F-1 断層の二次剪断面として発達した R 面、P 面をメインフレーム内部の水みち³⁾(サブフレーム)として位置づけられる。

6. 推定される水理地質構造と施工実績

本章では前章で構築した割れ目系の発達史から想定された水みち(メイン・サブフレームのモデル)について各データとの整合性を検討する。

(1) 掘削時の岩盤状況

図-7-1)に岩盤状況に解釈を加えたものを示す。掘削時に確認された湧水点の並びは断層、岩質との関係は認められず上下流方向に連続した位置に分布する傾向にあった。この湧水点はサブフレームの一つである引張りの割れ目系(割れ目グループ)の方向に沿い、また、メインフレーム F-2 断層系の割れ目を超えての連続性は認め

られない。岩質や顕著な熱水変質ゾーンの分布も上記の湧水位置の連続性と同様の方向性を示している。サイト全体での構造をみれば、断層の変位を戻した場合に確認されるようにダム軸に直交する方向(引っ張り割れ目の方向)に規制されている。しかし、各断層で囲まれた領域で見れば、割れ目グループの方向に長軸をもつように分布する傾向は強いが、F-1 断層系のメインフレームとなる構造を超えた連続性は乏しい。つまり、サイトスケールで見た場合、メインフレームとなる断層で区切られた領域は過去の割れ目と透水性の影響が強く現れているが、これは現在のメインフレームを超えての影響は小さいものと考えられる。

本サイトでの現在の岩盤状況(岩質、水みち)は割れ目系の構造発達を踏まえ、メイン、サブフレームといった概念を用いることで合理的に説明がつく可能性が得られた。

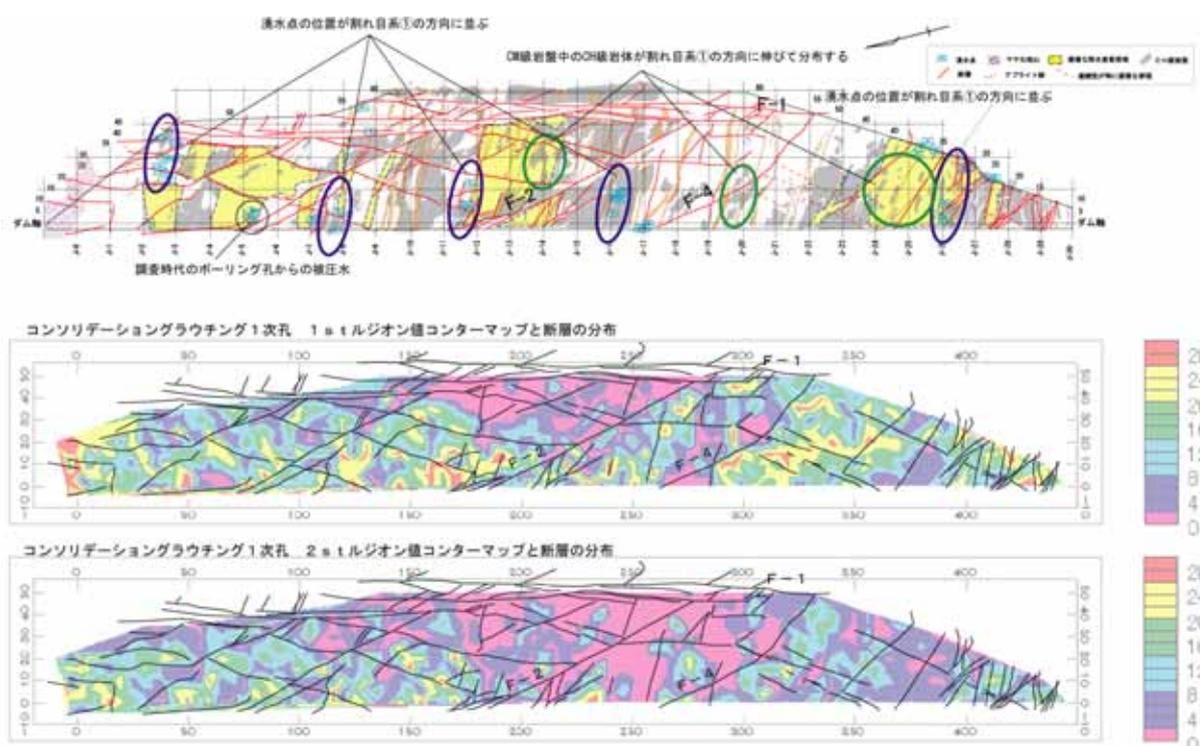


図-7 基礎岩盤の状況と水理地質モデルの検証(1)岩盤状況の検証、2)コンソリデーショングラウチングと断層)

(2) コンソリデーショングラウチング

図-7-2)にコンソリデーショングラウチング1次孔の1ステージと2ステージのルジオン値のコンターマップに断層を重ねた結果を示す。F-2断層を含む割れ目系(割れ目グループ)によりルジオン値のコンターが左右岸で明瞭に分離されている。また、割れ目系に相当する断層(P面)により、さらに上下流方向で明瞭に分断さ

れている。このことは、これらの割れ目系により岩盤の水の透しやすさの連続性が絶たれていることを示唆しており、特にメインフレームと解釈するF-1断層、F-2断層ではその傾向が明瞭となっている。

(3) カーテングラウチング

カーテングラウチングのパイロット孔ボーリングコアから想定されるダム軸における概略の地質縦断図とパイ

ロット孔のルジオン値を図-8に示す。総じて深部ほどルジオン値が低くなる傾向がある。この中で、F-2断層の上盤側の領域で相対的に高いルジオン値を示しており、ダム基礎岩盤の面的な透水性評価の指標となるコンソリデーショングラウチングの結果とも良く一致している。断層などの上盤側で高透水となる関係は兩岸のマサ化領域を除き、他の断層にも当てはまる傾向が認められる。

このことは、F-2断層および同系の断層(R面)の上盤側に主となる水みちが形成されていることを示唆しており、F-2断層がメインフレームを形成していることを裏付けている。また、調査時代におけるルジオン値の分布(参考文献4)をもとに編集)もこのような構造を踏まえることにより合理的に説明が可能であると考えられる。

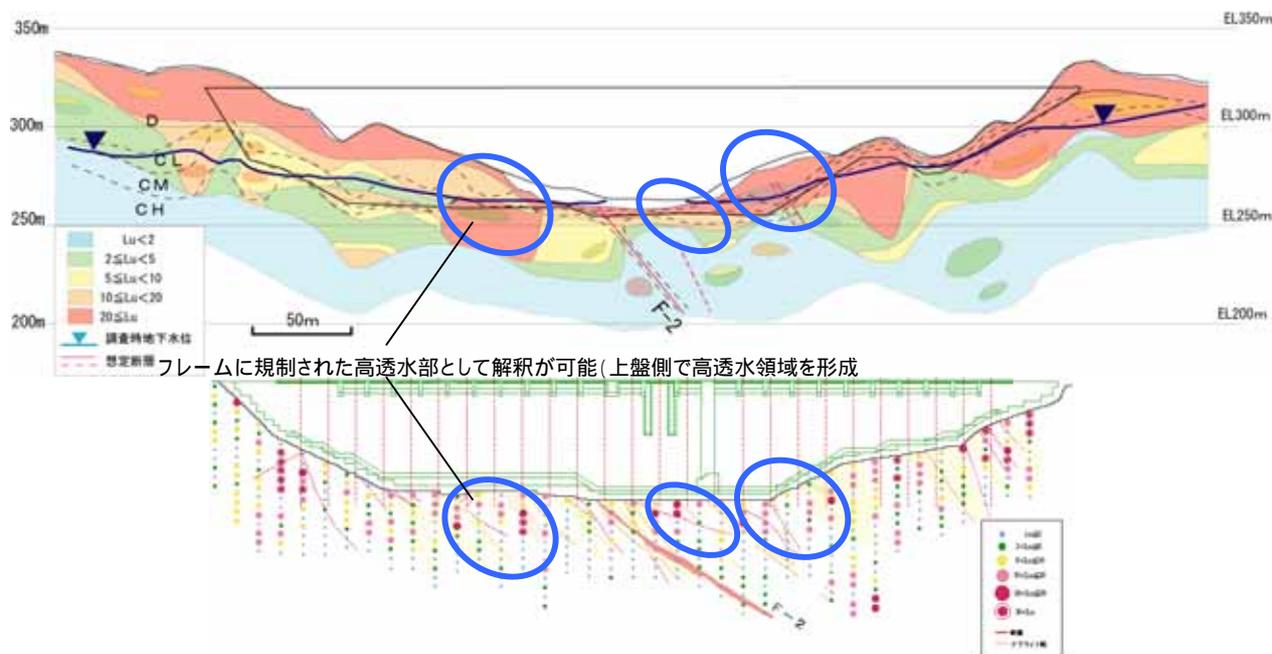


図-8 ダム軸における地質縦断面図(概略)とパイロット孔のルジオン値
上)調査時の地質・ルジオン⁴⁾ 下)施工時のパイロット孔実績

7. まとめ

小山ダムにおける今回の検討では以下のことが得られた。

現在、F-1断層とF-2断層および同系統の断層がメインフレームとして機能し、大枠の水理地質構造を制約している。また、サブフレームとしてF-1断層の運動以前に形成されていた割れ目系(引っぱり割れ目系)とF-1断層の二次剪断面が寄与している。

現在、掘削面で認められる岩質の差が、過去のある時期に水を透しやすかった割れ目系(現在のサブフレーム)に依存している。

今回の検討では、「割れ目系の構造発達史を考えた水理地質構造のモデル」とそこから導かれた「地下水の流動規制の差によるメイン、サブフレームの概念」を合わせることにより、掘削面の岩盤状況、湧水点の位置およびグラウチング時のルジオン値の分布が合理的に説明できることを示した。今後、さまざまなスケール、岩種において同様の検討を行うことで、地質構造と透水性の関係を理解する一助としたい。

謝辞

今回の検討にあたり、茨城県久慈水系ダム建設事務所ならびに熊谷・株木・鈴縫特定建設工事共同企業体の皆様には多大なご協力と有意義なご助言をいただきました。また、本論をまとめるにあたり、「応用地質学における地下水問題研究小委員会」ワーキング2検討メンバー(主査:奥田英治氏)の方々には有益な討議をして頂きました。ここで、深くお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 川越健(2004): 割れ目系に着目したダムサイトにおける透水性評価の試み,平成16年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集, pp39-47
- 2) 蛭田信行・松田修平(1997): 小山ダムの設計・施工について,ダム日本, No.635, pp43-60
- 3) 奥田英治(2004): 地下水流動系に関わる岩盤割目の評価,平成16年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集, pp34-38
- 4) 茨城県・(財)ダム技術センター(1987): 大北川総合開発事業第2-83号 小山ダム堤体配置設計等委託工事報告書 第1編地質総合解析

P49. 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(2)

- カーテングラウティング結果を取り入れた三次元的な透水性評価 -

Characterization of hydrogeologic structure in a dam-site with developed fracture system(2)

長田昌彦 (埼玉大学), 川越健 (熊谷組), Aung Ko Ko Soe (埼玉大学)

Masahiko Osada, Takeshi Kawagoe, Aung Ko Ko Soe

1. はじめに

不連続性岩盤の調査では、多くの地質情報が得られる。特に割れ目の幾何学的な情報は、地質の専門家によって詳細に調べられる。しかしながら、これらの情報は十分に生かされないまま眠ってしまうことが多い。その原因の一つには、そのような情報がどのように生かされるべきなのかについての手法が確立していないことによるものと考えられる。これらの情報が生かされるためには、調査する側と設計する側での知識の共有が必要である。地質の専門家の頭の中では、二次元情報は容易に三次元情報に置き換えられるが、設計する側にとっては容易なことではない。このようなギャップを埋める一助として、情報の三次元化が有用であると考えられる。また地質を専門とするものにとっても、視覚的に三次元情報を眺めることができれば、様々な角度からの考察が容易になり、得られる情報も広がっていくことが期待できる。

割れ目系岩盤の地下水流れを考えるとときには、「器」としての地質情報をできる限り正確に把握しておく必要がある。そのためにも得られた地質情報を有効に利用することが望まれる。

本論文では、川越ら 1), 2) により二次元的に検討したダムサイトのデータを三次元モデルに展開する。三次元化することによってどのような傾向が把握できるか、またもし現有の二次元情報をもとにした検討以上の考察が可能でないならば、今後如何なる情報を取得していく必要があるかを議論する。なお、この検討結果の一部は、応用地質学における地下水問題研究小委員会」における研究結果によるものである。

2. モデル作成方法

モデルの作成は、対象領域の設定、割れ目系の表示、ルジオン値のプロットの順に行う。

2.1 対象領域

モデルの対象領域を図 1 に示す。ダム軸に平行な方向を x 軸、下流方向を y 軸、標高方向を z 軸としている。モデル上面は、ダム基礎掘削時の標高とし、下面はカーテングラウティングの最も深いレベルより 10m 下の位置とした。ここでは対象領域を、8つの四角柱で表現している。

2.2 対象とした割れ目系

対象領域の中には、数多くの割れ目が存在している。ここでは川越ら 1), 2) によって検討された主要な割れ目系、すなわちダム軸とほぼ平行に走る断層 (F-1 系) と、これと斜交する R 系と P 系の割れ目のみを対象とする。詳細については、表 1 のとおりである。

ここで取り扱う割れ目系の特徴は、変位を有していることで

ある。アプライトのずれから推定された各断層/割れ目の変位量を表 1 の中に合わせて示してある。変位量が大いほど、粘土を厚く挟む傾向にあり、岩盤の透水性を評価するうえでは重要となる。

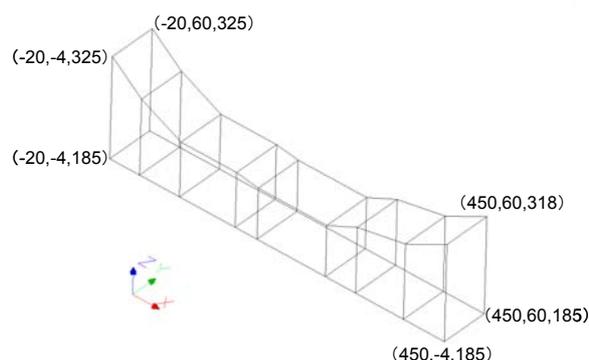


図 1 モデル形状と座標点 (単位: m)

表 - 1 対象とした割れ目情報

Name	dip-direction /dip (deg.)	coordinates (x, y, z) (m)	estimated displacement (m)
F-1	105/90	282,53,255	62
F-1'	105/90	282,45,255	-
R-1	250/50	180, 0, 255	-
R-2	255/55	80, 0, 260	3
R-3	260/55	260, 0, 255	22
R-4	250/55	105,40, 255	2
P-1	295/78	125, 0, 260	-
P-2	121/73	200, 0, 255	-
P-3	118/78	290, 0, 255	3
P-4	120/74	355, 0, 255	1

この領域の中に、表 1 に示した地点を通る割れ目の走向傾斜をインプットして、領域内に割れ目を発生させる。このとき使用したプログラムでは、割れ目同士が交差したとき、観察された切断関係を反映させた形で表現することがまだできていない。したがって、後述する割れ目モデルでは、現実にはない割れ目も表示していることになるので、注意して解釈する必要がある。

2.3 ルジオン値

コンソリデーショングラウティング 1 次孔と 2 次孔、およびパイロット孔において計測されたルジオン値を、図 - 2 の中に示した凡例のように区分して表示した。ルジオン試験は、5m 間隔

で実施されているので、5m ごとの円柱として表現している。ただし、円柱の直径は0.5m に誇張して描いている。

以上を通して、最終的に作成したモデルを図 2 に示す。

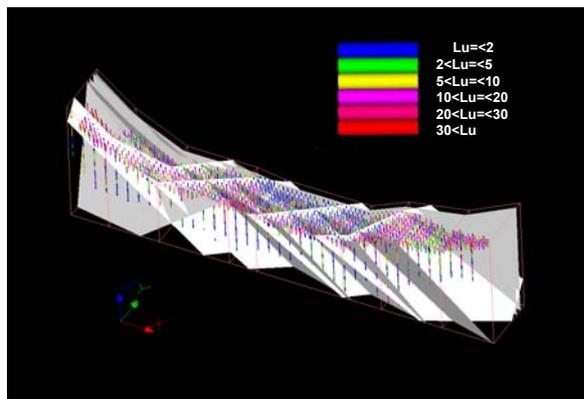


図 2 割れ目モデルとルジオン値

3. 割れ目系とルジオン値との関係

図 2 のように各種の情報を三次元化することにより、二次元における検討のときに得られた結果がさらに明確に理解しやすくなる。例えば、F-1 断層周辺で低いルジオン領域が観察されることや、コンソリデーショングラウチングの 1 次孔と 2 次孔では深い方が低いルジオン値を示すことなどである。

P 面系の割れ目を取り去り、上流側左 45 度 (R 面系にほぼ平行) 方向から眺めると、図 3 のようになる。図中 R-3 の割れ目は、比較の変位量大きい割れ目 (断層) であるが、この割れ目の上盤側に若干ルジオン値の大きい領域が並んでいることがわかる。他方、R-1、R-2、R-4 では、これらの面上に比較的低ルジオン値の大きいところが並んでいるが、必ず大きいというわけではない。右岸側深部の高ルジオン域は、割れ目 R-4 の延長上付近に位置しており、この割れ目の影響がある可能性が指摘できる。これらの情報は、二次元情報からでも読み取れる情報ではあるけれども、三次元化することによって一層理解しやすくなっている。

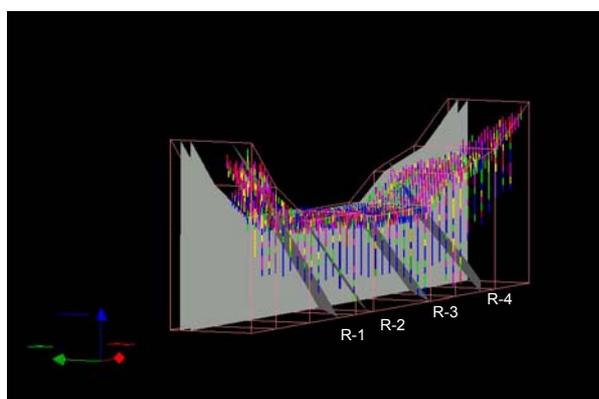


図 3 R 面系の割れ目とルジオン値の関係

なお、当たり前のことではあるが、地表面で計測した走向傾斜のほんの 1 度か 2 度異なるだけでも、割れ目モデルを作成するうえではかなり厳しい条件となる。スケールに見合った、その場を代表する値を求められるように、例えば確実な 3 点で主

要な割れ目の方向を求めることが必要である。

図 4 は、比較の変位量大きい割れ目 R-3 と変位量の小さい P-2 について、両者の交線方向から眺めたものである。図より、割れ目交線沿いに低いルジオン値が分布していることがわかる。割れ目の交線方向は、割れ目系岩盤においては高透水部として、あるいは逆に低透水部として評価されることが多い。この例題では交線付近にルジオン値が計測されている箇所が少ないために、領域全体を通しての傾向を把握するまでには至らないが、このような三次元情報を活用することにより、割れ目の交線方向に対する一般的な傾向を明らかにしていく手立てとなることが期待される。

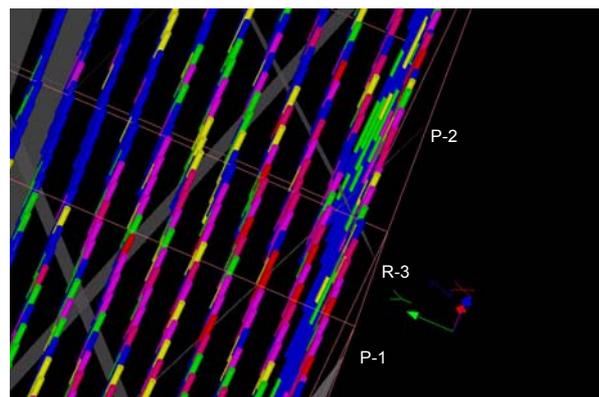


図 4 割れ目の交線とルジオン値の関係

4. まとめと今後の課題

三次元モデルを構築することにより、対象領域の主要な割れ目系とルジオン値との関係を考察した。二次元情報から得られる情報に加えて、割れ目交線部の情報取得に対して有効であることが示唆された。

今後、さらに熱水変質帯やアプライトの分布などの情報を組み合わせて検討する必要がある。また割れ目系の構造発達史を取り込むことができるように、モデル作成の技術も向上させていく必要がある。

謝辞: 茨城県久慈水系ダム建設事務所ならびに熊谷組・株木・鈴縫特定建設工事共同企業体の皆様には、貴重なデータを使用させていただきました。割れ目の幾何学情報を三次元表示するために、Package-D (代表: 森田豊氏) 作成のプログラムを使用させていただきました。また本論をまとめるにあたり、「応用地質地下水問題研究小委員会」ワーキング 2 検討メンバー (主査: 奥田栄治氏) の方々には有益な討議をしていただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川越健・長田昌彦 (2004): 割れ目系に着目したダムサイトにおける水理地質構造の検討(1), 平成 16 年度日本応用地質学会研究発表会, P48.
- 2) 川越健 (2004): 割れ目系に着目したダムサイトにおける透水性評価の試み, 平成 16 年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集, pp.39-47.

P50 . グラウチング実績とダム初期湛水時の水質データによる透水性の評価 Evaluation of Permeability using Grouting Result and Water Quality during the Initial Filling of Dam

村上晃生(中部電力), 塩崎 功(ハザマ), 川越 健(熊谷組)
Akio MURAKAMI, Isao SHIOZAKI, Takeshi KAWAGOE

1. はじめに

1995 年に竣工した奥美濃水力発電所は岐阜県の西部に位置する出力 150 万kWの純揚水式発電所である。上部調整池は川浦ダムと川浦鞍部ダムから,下部調整池はゾーン型ロックフィルダムである上大須ダムから構成されている。本発電所では,初期湛水時において漏水量等の計測項目に加えて浸透水等の水質・同位体・水温の調査を実施し,湛水時の浸透水の挙動を評価している^{1),2)}。

本論は,上大須ダムにおける上記水質調査結果の一部をグラウチング実績データ³⁾と併せて再評価することにより,ダム基礎岩盤のマクロな透水性について考察したものである。

2. 上大須ダムの地質概要³⁾

ダムサイトの地質および岩盤等級分類平面図を図 - 1 に,岩盤等級縦断面図を図 - 2 に示す。上大須ダム周辺の基礎岩盤は美濃帯に属する中生代ジュラ紀の左門岳累層であり,砂岩,頁岩およびその互層より構成される。ダムサイトの地質構造の特徴を以下に示す。

ほぼダム軸に平行する方向の軸

を持つ波長数 10m の褶曲と方向はやや異なる波長数 m の小褶曲をもつ褶曲構造である。

ダム軸にはこの褶曲構造を切る 3 つの顕著な破碎帯 (F-15, F-21, F-32) が存在する。

上下流方向に貫入する流紋岩とダム軸方向に貫入するヒン岩の 2 種類の岩脈がある。

ダム軸付近を構成する岩石は,主として塊状の砂岩よりなるが,砂岩・頁岩の互層は右岸側で洪水吐越流部,河床部,左岸側では EL.490m 付近から低い標高部にダム軸に沿うように分布している。

岩盤等級は,コア基礎部では C_M 級を主体として一部 C_L 級から C_M 級があり,深部に至るほど新鮮堅硬となり,

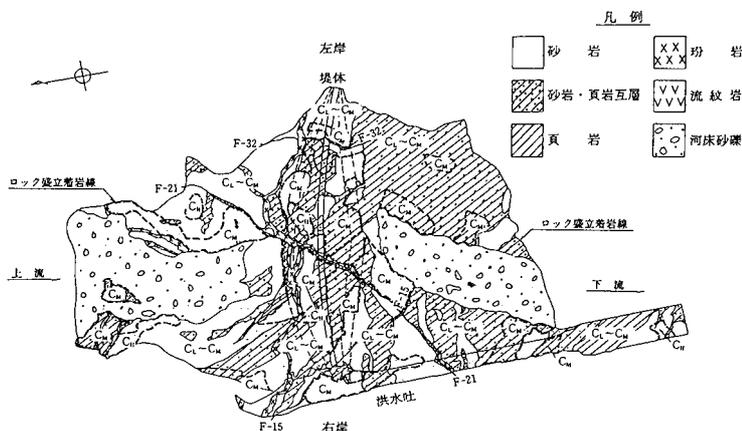


図 - 1 ダムサイトの地質および岩盤等級分類平面図(電研式)³⁾

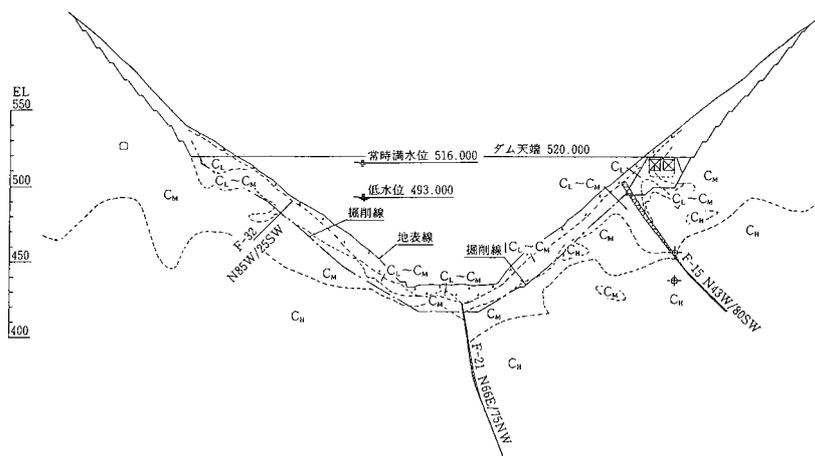


図 - 2 ダム軸岩盤等級分類縦断面図(電研式)³⁾

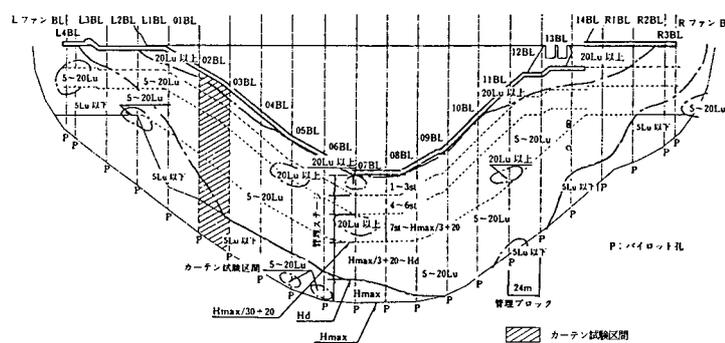


図 - 3 ルジオン値の分布図³⁾

破碎帯,シーム箇所を除けば大部分が C_H 級以上である。

図 - 3 は,カーテングラウチングのパイロット孔から得られたルジオン値の分布である。一部に 20Lu 以上の高透水性領域が存在するが,本分布図では左右岸の透水性に顕著な違いは認められない。

3. グラウチング実績³⁾

3.1 ブランケットグラウチング

施工範囲は監査廊を除くダム本体のコア敷である。グラウチングの改良目標深度は、設計掘削線以下8mで、0~3mを1ステージ(1st)、3~8mを2ステージ(2st)とするステージ工法で施工した。改良目標ルジオン値は10Lu、非超過確率は85%以上である。ブランケットグラウチングの施工実績を管理ブロックごとの単位注入セメント量として図-4に示す。

3.2 カーテングラウチング

カーテングラウチングはすべて監査廊内から施工し、改良目標深度は設計洪水水位からパイロット孔で想定した5Luラインまでであり、1ステージの区間長は5m、改良目標ルジオン値は5Lu、非超過確率は85%以上である。カーテングラウチングの施工実績を管理ブロックごとの単位注入セメント量として図-5に示す。

図-4および図-5には、後述の水質調査における採水地点の名称を集水範囲に該当する管理ブロック上に矢印で記載した。

3.3 破砕帯処理グラウチング

F-15 破砕帯は洪水吐越流部に存在し、洪水吐コンソリデーショングラウチングを延長して改良した。F-21 破砕帯はコア敷河床部を上下流に横断する破砕帯であり、破砕帯を縫う形で斜めボーリングを行い処理した。F-32 破砕帯はブランケットグラウチングを延長して処理した。

4. 初期湛水時の水質変化²⁾

水質調査における主要採水地点は、上大須調整池水、溺堤(図-6に示す基礎岩盤上に設置された漏水の集水堰：河床部 EL.452m、右岸 EL.455m、右岸 EL.493m、左岸 EL.452m、左岸 EL.493m、F-15 破砕帯、F-21 破砕帯の7箇所)、監査廊内水量水圧計からの湧水(右岸部：R-440、R-470、左岸部：L-440、L-470、等)である。

代表的な採水地点における水質の分析結果をヘキサダイアグラムで表示し、その時間変化を示したものが図-7である。水質の変化傾向は以下の3つに大別できる。

河床溺堤、右岸溺堤 455、左岸溺堤 452、F-15 漏水では、湛水前からイオン濃度が高く、湛水開始後にイオン濃度が減少している。これらの地点は、ブランケットグラウチングの影響を受けたイオン濃度の高い地下水に、多くの浸透経路を持つ流路を通過した調整池水が侵入することにより、濃度が徐々に低下しているものと考えられる。

監査廊内水量水圧計湧水の初期イオン濃度は低いが、湛水開始後に一旦濃度が増加した後に再び低下するという変化を示している。これらの地点は、溺堤に比べて集水範囲が狭く採水地点に至るまでの流路が比較的単純であり、ピストン流的な押し出し流れが生じているものと考えられる。すなわち、湛水前はブランケットグラウチングの影響を受けていない低濃度の地下水が存在し(監査廊はブランケットグラウチングの施工範囲外)、湛水により上流側のカーテングラウチングおよびブランケットグラウチングの影響を受けた高濃度の地下水が押し出された後、調整池水の侵入により濃度が低下しているものと考えられる。

F-21 漏水では、水質変化がほとんど認められていない。このような地点では、調整池水の侵入量は極微量であると判断できる。

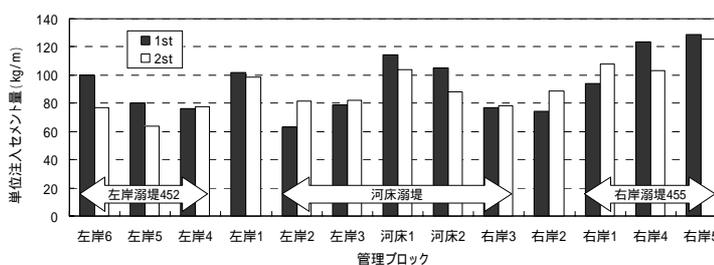


図-4 ブランケットグラウチングにおける単位注入セメント量

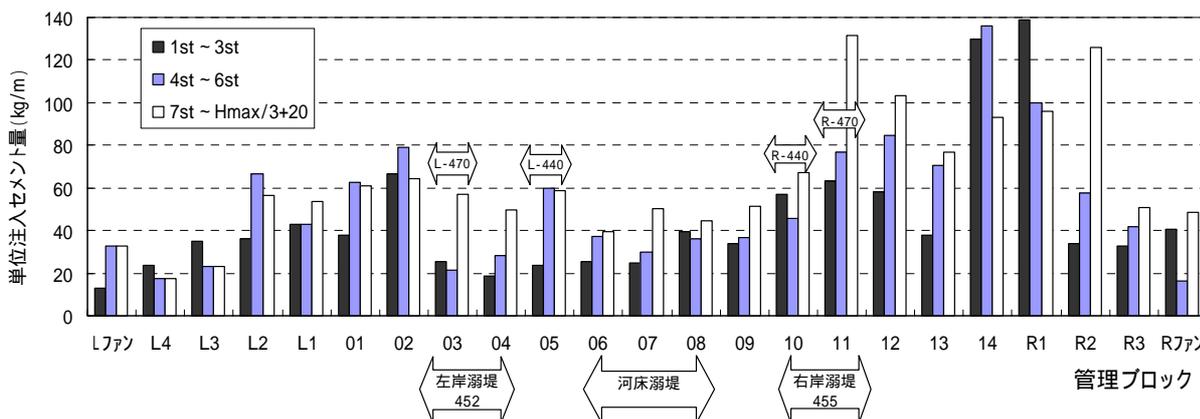


図-5 カーテングラウチングにおける単位注入セメント量

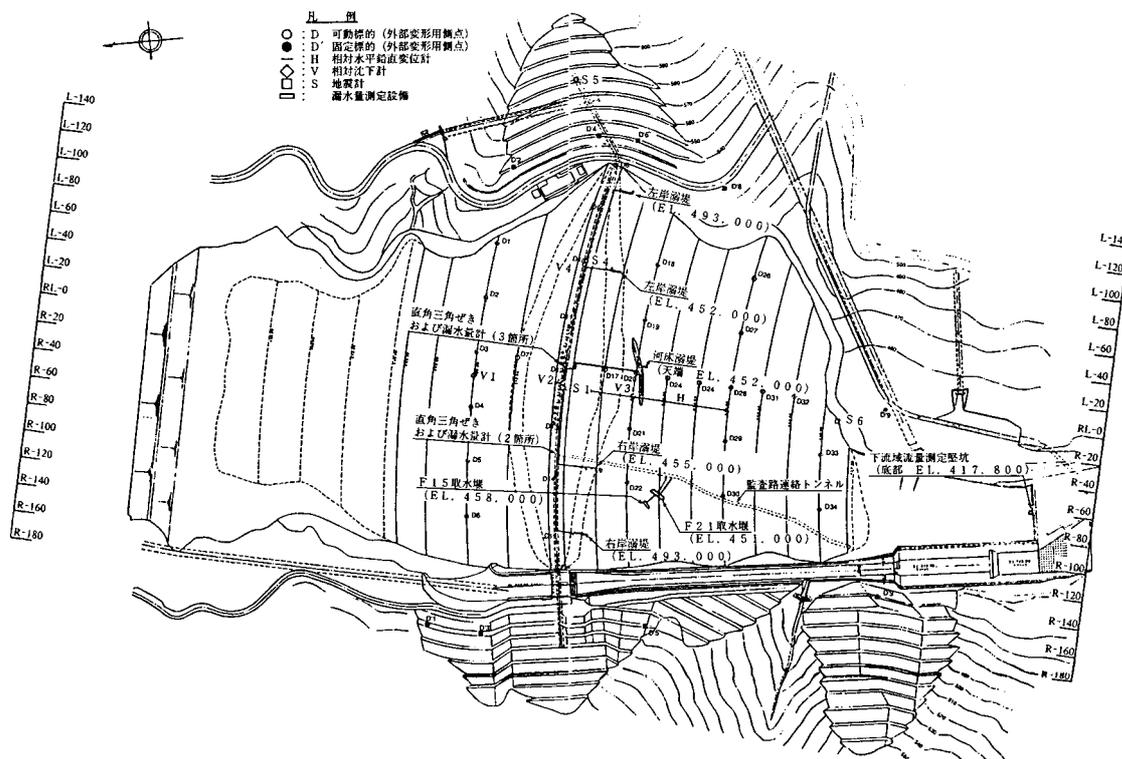


図 - 6 三角堰および漏水計器配置平面図³⁾

5. 単位注入セメント量と水質変化との関係

5.1 ブランケットグラウチングとの関係

グラウチング施工時の水押し試験結果によれば、ブランケットグラウチングの施工範囲の平均的な透水性は、左岸側より右岸側の方が大きい。これは、右岸側では頁岩より砂岩が卓越していること、右岸側にはF-15とF-21で区切られた2つの破碎帯による影響領域が存在すること等が原因であると考えられる。

図 - 4 に示す単位注入セメント量を浸透水の集水範囲ごとに集計すれば、右岸溺堤 455 (114kg/m) > 河床溺堤 (87kg/m) > 左岸溺堤 452 (79kg/m) の順になる。図 - 7 に示す溺堤の水質データを見れば、右岸溺堤 455 の水質変化が最も大きく、左岸溺堤 452 の水質変化が最も緩やかである。HWL時の湧水量²⁾も右岸溺堤 455 の方が左岸溺堤 452 より多く、改良前に透水性が高い右岸はグラウチング施工時のセメント注入量も多く、湛水時の流量・流速も大きいことがわかる。

5.2 カーテングラウチングとの関係

図 - 5 に示すカーテングラウチングの単位注入セメント量は、1st ~ 3st, 4st ~ 6st, 7st ~ Hmax/3+20 の3段階の管理ステージに区分しているが、施工深度に換算すれば、1st ~ 3stは 0 ~ 15m, 4st ~ 6stは 15 ~ 30m, 7st ~ Hmax/3+20 は 30m以深となる。粒子追跡法により求められた浸透経路²⁾を見れば、最も下流側に位置する河床溺堤に至る流路の最大深度は 40m程度である。したがって、溺堤に至る経路の透水性を議論する場合は、

1st ~ 3st, 4st ~ 6stのデータを評価すれば良い。その結果、カーテングラウチングの単位注入セメント量は、ブランケットグラウチングと同様に右岸溺堤 455 > 河床溺堤 > 左岸溺堤 452 の順になる。

カーテングラウチングの施工範囲の透水性は、浸透経路長が長い溺堤よりは、直下流に位置する水量水圧計湧水の水質との関連性が高いと考えられる。そこで、水量水圧計湧水の水質データとして、R-440, R-470, L-440, L-470 の4箇所のデータを選定し、図 - 5 の該当する管理ブロック上にその名称を記載した。監査廊内水量水圧計が設置されたボーリング孔の深さは約 10m であり、透水性を評価するには 1st ~ 3st のデータが対象になる。

図 - 5 と図 - 7 から、1st ~ 3stの注入セメント量が最も多いR-470では水質変化が大きく、R-440でも1993年から1994年にかけてイオン濃度が減少していることがわかる。それに比べて注入セメント量が少ないL-470, L-440では水質変化傾向が緩やかであり、イオン濃度が低下し始める時期も遅い。また、HWL時の湧水量²⁾は R-470(120 ℓ/min) > R-440(23 ℓ/min) > L-470(11 ℓ/min) > L-440(5 ℓ/min)の順である。

したがって、グラウチングによる改良後においても岩盤の透水性の差が流速と流量の両方に影響を及ぼしているといえる。

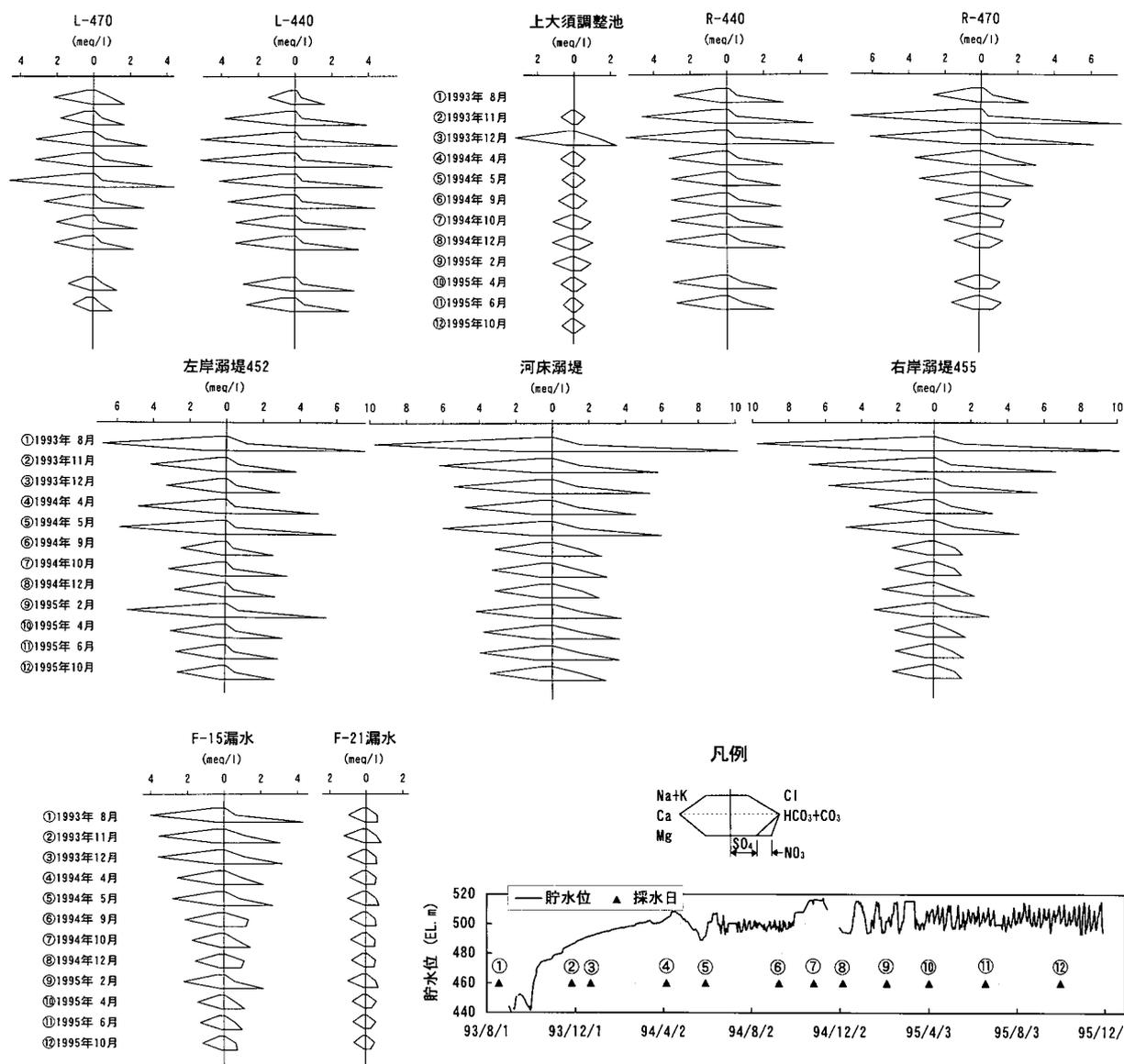


図 - 7 イオン濃度の時間変化 (塩崎ほか²⁾から抜粋)

5.3 破砕帯処理グラウチングとの関係

破砕帯を対象にした注入セメント量のデータは存在しないが、図 - 7 の水質データを見れば、F-15 の水質変化は溺堤と同様な傾向があり、調整池水の侵入によるイオン濃度の低下傾向が読み取れる。一方、F-21 では水質の変化が小さく湛水による影響はほとんど認められない。

6. まとめ

ダム建設時のグラウチング実績と併せて既往の水質調査データを再評価した。その結果、グラウチングにおける単位注入セメント量が多い領域は、湛水時における浸透水量が多く、流速も速いことが示された。これは、岩質の違いや破砕帯による影響等に起因する基礎岩盤の透水性の差がグラウチングによる改良後にお

いても残存することを意味する。

【参考文献】

- 1) 塩崎功・村上晃生・谷口博幸・川上康博・今井久・稲葉秀雄 (1997): 水質・同位体を利用した川浦ダム・川浦鞍部ダム初期湛水時地下水流動調査, 土木学会論文集, No.579/ -41, pp.163-176 .
- 2) 塩崎功・村上晃生・谷口博幸・川上康博・今井久 (1997): 水質・水温を利用した上大須ダム初期湛水時地下水流動調査, 土木学会論文集, No.579/ -41, pp.177-189 .
- 3) 中部電力株式会社 (1999): 奥美濃発電所建設工事報告 () .