

埋め立て後、地盤化する廃棄物層と表層の土壌化

神尾重雄

廃棄物処分・利用における地質環境に関する研究小委員会（第五期）
研究成果

2024 年 08 月 20 日

1. 廃棄物処分の流れと今後の廃棄物受け入れ可能容量について

1.1 産業廃棄物の定義と処分場

「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年）第 2 条 4 項第 1 号」では 6 種類の廃棄物が規定され、同法施行令第 2 条（昭和 46 年）により 14 種類が追加して規定されている。現在では燃え殻、汚泥、廃油、動物の糞尿、動物遺体、ガレキなど合計 20 種類の廃棄物¹⁾が産業廃棄物の種類と規定されている。

また、建設工事から生じる廃棄物については建設廃棄物処理指針（平成 22 年度版）が策定され、環廃産第 110329004 号（建設工事から生ずる廃棄物の適正処理について（通知））により、処理が行われている。

産業廃棄物の埋め立て処分に関しては品目ごとに分類され、プラスチック、ゴム、金属、ガラス・陶磁器等のくず、コンクリート・ガレキ類の 5 品目と環境大臣が指定する産業廃棄物（廃石綿または石綿含有産業廃棄物の処理に由来するもので、有害物の溶出が基準以下の鉍滓（平成 18 年環境省告示第 105 号））は安定型産業廃棄物と呼ばれ、その埋め立て処分には、遮水設備や水処理施設のない処分場（安定型最終処分場）が用いられる²⁾。

安定型最終処分場については上記の品目指定があるだけで、これらが化学的に安定かを判定する必要はない（廃石綿由来の処理物を除く）。平成 10 年環境省告示第 34 号には建設廃棄物であるガレキ類について安定型産業廃棄物以外の廃棄物が混入付着することを防止する方法が紹介され、適切な分別処理を行い、熱しゃく減量 5%以下としたガレキ類は安定型産業廃棄物として安定型最終処分場に埋め立て処分ができるとされている。しかしながら生物地球化学的な知見³⁾から見ると、紙など有機物の付着する石膏ボードは埋め立てにより還元的な環境ができれば、硫化水素を発生する恐れがある。このため現在では石膏ボードの安定型最終処分場での埋め立ては禁止されている。

安定型最終処分場の課題としては混入物除去や排除、また有機物含有量の適切な評価法があるといわれている²⁾。

一方、管理型最終処分場は遮水工や滲出水処理施設により滲出水が公共水域を汚染しないよう措置を講じた施設とされる。産業廃棄物の埋め立てが可能か否かは環境省令の基準に適合するかどうか条件とされ、金属等を含む判定基準は昭和 48 年に総理府令第 5 号に記載される。その判定方法は昭和 48 年環境庁告示第 13 号に示される溶出試験であり、金属等の含有量ではなく溶出液の濃度で定められる²⁾。

1.2 一般廃棄物の定義と処分場

一般廃棄物とは、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年）第 2 条」で定められている産業廃棄物以外の廃棄物で、品目が定められておらず、家庭から排出されるごみやその焼却灰が代表的とされている⁴⁾。一般廃棄物については、自治体の条例で細かな条件が定められている場合もある。

平成 20 年度の統計によれば、一般廃棄物処分場の 90%以上で焼却等の前処理が行われている。しかしながら品目指定がなく、古い処分場では埋められた廃棄物の種類が不明あるいは

処分場からの滲出液に問題が生じている事例もあり、これらに対しては設備や施設の新設などの適正化も行われている²⁾。

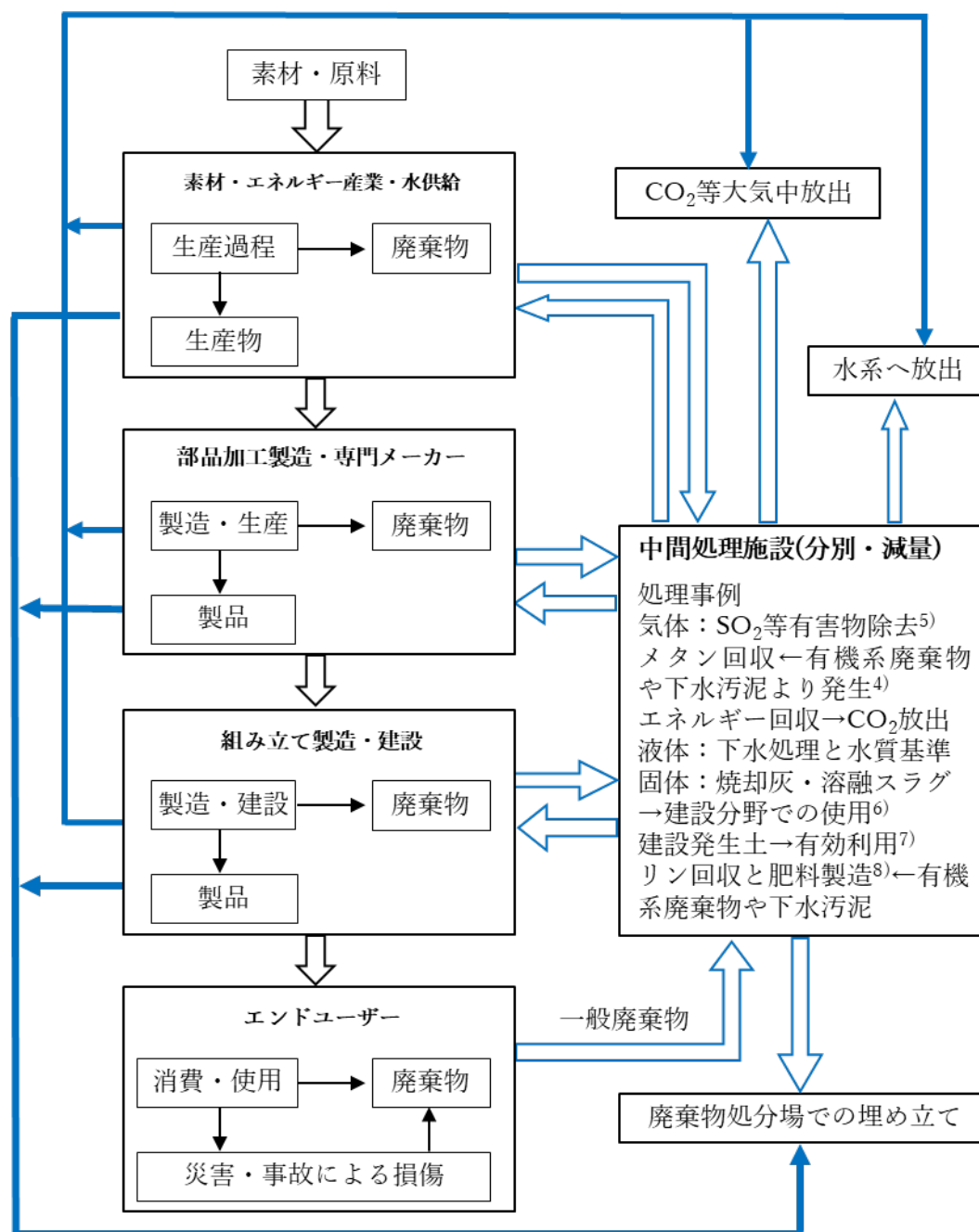


図-1 産業構造と廃棄物処理の流れ概念図（引用文献¹⁾ p5 上段説明図等を参照し作成）

白抜き黒線矢印はエンドユーザーまでの製品の流れを示す。白抜き青線矢印はエンドユーザーからの廃棄物の流れ、製造・建設と中間処理施設との廃棄物リサイクル及び中間処理施設から環境中へ廃棄物放出や処分場への搬出を示す。青線矢印は製品等の製造過程から直接廃棄される廃棄物の流れを示す。

産業廃棄物に関する処分の流れは産業構造にも関連し、素材産業から始まり製品が作られ、その受け渡しと同時並行的に廃棄物の発生と処分が進むと考えられる。（図-1）

一次的な発生量に対し最終処分場へ運ばれる数量は数%以下となっている¹⁾。これは産業廃棄物のほとんどが中間処理という形で再利用や減量がなされるので、埋め立て処分される廃棄物の量は元の発生量からすればかなり少なくなるためである。

臨海部の埋め立てあるいは処分場敷地外の流域面積がほとんどない山地や丘陵の谷あいでもかん止の土堤を設けるなどにより、最終処分場は作られている⁹⁾。

現状の最終処分場の廃棄物受け入れ可能容量を年間の埋め立て量で割ると今後は十数年分の余裕しかないといわれている。そのため今後も新しい処分場の開発が必要となるが、従来型の立地を進めるだけでなく、新しい立地についても考えていく必要性が考えられる。

2011年3月11日の東日本大震災により東北3県の沿岸部では津波堆積物を含む災害廃棄物の発生量は約2600万tに達した。このうち分別・中間処理を経た、有害物質を含まず、生活環境保全上支障がなく、構造上耐力を十分に保持するなどの要件を満たす津波堆積物、ガラスくず陶磁器くずなどはリサイクル材として公共工事で使用条件を満たすとされる。一方ではこれらのリサイクル先の確保が課題となっている¹⁰⁾。2018年7月の西日本豪雨災害の調査報告書¹¹⁾では、発生する災害廃棄物の処理について面積の広い1次仮置き場は分別の実施、防火面での配慮、粉塵対策などに関し設置メリットがあること、最終処分場への運搬、リサイクル焼却処分の分別を行う2次仮置き場は廃棄物処分をスムーズに行う上でのメリットがあること、また災害発生土については土質や含水量によってリサイクルや再利用しやすさに大きな違いがあることなどが指摘されている。

温暖化、少子高齢化に伴う人口減少や将来発生するかもしれない震災やその他大規模災害を考慮すると、台地端部に発達する樹枝状開析谷に対してガレキ等の廃棄物で埋め立てて処分する、あるいは標高の低い平野部や臨海部では津波や浸水に対する避難場所に活用出来る盛土として安定型の処分場造成などの検討は、防災対策と共に復興対策も踏まえた都市開発を効果的に実施する方策としても考慮されるべきと思われる。

2. 廃棄物層の地盤化

2.1 焼却灰や溶融スラグなど

廃棄物処分の流れの中で焼却灰などとして最終処分される量は、一般廃棄物で337万t（2022年度）、産業廃棄物では883万t（2021年度）である¹²⁾。また、最終処分場での埋め立てに関しては、廃棄物の処理および清掃に関する法律施行令（昭和46年政令第300号第2章及び第3章）により以下のような規定がある。

一般廃棄物の埋め立て処分：一層の厚さおおむね3m以下（ただし熱しゃく減量15%以下に焼却したものを除く）、そして一層ごとに表面をおおむね50cm土砂で覆う。

腐敗物を含む産業廃棄物の埋め立て処分：一層の厚さおおむね3m以下（ただし熱しゃく減量15%以下に焼却したもの等を除く）、そして一層ごとに表面をおおむね50cm土砂で覆

う。

腐敗物を含まない焼却灰のような廃棄物の場合、覆土について特に規定はされていないが、近年覆土は行われているようである。（「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の運用に伴う留意事項について」平成 10 年 7 月 16 日 環水企 301・衛循 63）

覆土は廃棄物層厚が 3m に達するごとに計画的に行われる（中間覆土）が、実際には作業上の都合で層厚 3m 未満でも一時的に盛り立てを休止することがある。このような一時的休止の場合でも覆土は実施されている（即日覆土）¹³⁾。

通常、盛土に用いられる天然の材料である砂質土や粘性土の性状はよく研究されており、施工法や管理方法についても盛土の用途に応じ、規定されている^{14), 15)}。さらに焼却灰の物性についても地震時の斜面安定性の検討も含め研究が行われている¹⁶⁾。しかしながら埋め立て後、長期間にわたり、廃棄物層が地盤としてどのように変化するのは、報告はあるものの、研究はあまりされていない。廃棄物が空隙の減少と共に沈下したり、局所的な固結が生じたり、湿潤と乾燥の繰り返しなどによって廃棄物層に割れ目が生じたりする可能性も考えられる。また、焼却灰など均一で細粒の集合体は、内部浸食を受けやすいと考えられる。しかし埋め立て時の飛散防止の目的で施工された覆土は、埋め立てが進行するとそのまま互層状（サンドイッチ状）の覆土層を構成する。焼却灰とは異なる粒度分布を持つ覆土層は、浸透水の流動に伴う細粒分の流出を防止するフィルター効果も期待できると思われる。

廃棄物層が地盤として適正な状態であるかを調べるために、ボーリング調査など定期的な調査と評価が望まれる。万が一災害時に処分場において変状が生じた場合には、その状態を早急に診断する必要があるかもしれない。このような時たとえば廃棄物層の地表と地下のボーリング孔内の間で、廃棄物層を取り囲むように測定点を配置した弾性波探査などのトモグラフィー的な計測¹⁷⁾を行い、これを基にして解析と診断を行うやり方もある。起振の方法についても自然地震や常時微動などを震源として利用することも検討するべきと思われる。廃棄物層のモニタリングや被災時の迅速な調査法の開発といった体制を整え、情報を公開していくことは国民の廃棄物処分に対する理解を増進し、ひいては SDGs を目指す社会を作り上げるためにも有益と考えられる。

2.2 重金属類が含まれる特別管理産業廃棄物の保管

有害重金属類が含まれる廃棄物層をメンテナンスフリーで安定的に保持するための一つの方策として有害重金属類の鉱石（硫化物）化が考えられる。

水銀、鉛、ヒ素などの元素は硫化物として比較的安定して自然に存在する。それらは生成後、数万年～数億年にわたり地下深部に封入されている^{18), 19), 20)}。これらが資源として採掘され、利用の後、未処理のまま廃棄される、あるいは侵食により重金属を含有する鉱床が地表に露出するなどすれば重金属が環境中に暴露あるいは放出されることになる。

土壌化や風化の影響が及ばない地中深く、無酸素状態で水など流体移動の小さな環境下で有害重金属類を硫化物として保存できれば、安定的な保管が可能になる。硫化水素バリア

中への有害重金属類含有廃棄物の封入が一つの答になる可能性が指摘できる。

3. 自然界における土壌化の始まり

廃棄物処分場について未来永劫にわたり管理を継続することは不可能であり、埋め立て完了後、公園やスポーツ施設などとして利用されても、いつかの時点では自然に還すことになる。ある程度の期間を経た管理中の処分場であっても、土壌化の進行が観察されている事例²¹⁾もある。管理が停止された処分場跡地において生態系や植生がどのように発達するかを理解することは管理段階においても参考になると考えられる。図-2 に地中の水循環と共に、生物の代謝に由来する物質や遺骸が分解して生成される CO₂ などが循環的に森林生態系の発達に寄与する状況を示す。日本のような温暖湿潤気候の環境では土壌侵食を助長する作用や行為がない限り、処分場跡地においても植生が侵入し、やがて樹林が優勢になると考えられる。

プレート境界と火山フロントが分布する日本列島¹⁹⁾では大規模な火山活動のたびに溶岩流や岩屑流などに覆われ、広大な面積の裸地が出現する。このような場所でその後の植生や土壌の発達状況を調べれば、新しく出来た地盤である廃棄物層の表面で、どのように変化が起きるかという課題に対し参考となる事例を提供出来ると思われる。ここでは、3つの事例を下記に示す。後述（第4章）のモデル解析にも関連するので参考のために、気象庁発表の1991~2020年での30年間の平均年間降水量も併せて示している。

1) 磐梯山（1888年）の事例

福島県磐梯山の北側斜面では1888年の水蒸気爆発に伴う山体崩壊で発生した岩屑流により河川がせき止められ、檜原湖などの湖沼が形成された²²⁾。現在、この岩屑流堆積物の表面には未成熟土壌が分布し²³⁾、植生の可能性があるとされているが現在は針葉樹（アカマツ）が卓越している²⁴⁾。磐梯山の近傍、猪苗代地点での平均年間降水量は約1300mmである。

2) 伊豆大島（1777年、1951年、1986年、2008年）の事例

火山活動が活発な伊豆大島の三原山では玄武岩質の溶岩流が度々流出している。その噴出時代は歴史時代の安永噴火溶岩（1777年）および最近噴火した溶岩（1951年 1986年 2008年）などが知られている²⁵⁾。1951年溶岩以前の溶岩流上に見られる土壌のタイプは未成熟土壌であるが、植生の遷移は進んでいるといわれている²⁶⁾。1951年以降の溶岩流については固有種のハチジョウイタドリが先駆植物として出現、その落葉が溶岩流の隙間にたまり部分的に土壌化し、そこからはススキの群生がみられる²⁷⁾。伊豆大島の平均年間降水量は約2900mmである。

3) 富士山北麓青木ヶ原（864年）の事例

山梨県の富士山北東側山麓の原生林である青木ヶ原樹海では長尾山から864年に噴出した玄武岩質の溶岩流が分布する²⁸⁾。この一帯には黒ボク土壌の分布が認められる²⁹⁾が、その厚さは薄く、溶岩流の上には厚さ3cmほどの土壌しか発達していない。しかしなが

ら、倒木更新により有機物分解や腐植質の供給は生じていると考えられる。ここで卓越する樹種は針葉樹が中心でツガ、モミ、ヒノキなどがみられ、これに広葉落葉樹が混在する³⁰⁾。青木ヶ原近傍の精進湖での平均年間降水量は約 2000mm、また河口湖地点の平均年間降水量は約 1600mm である。

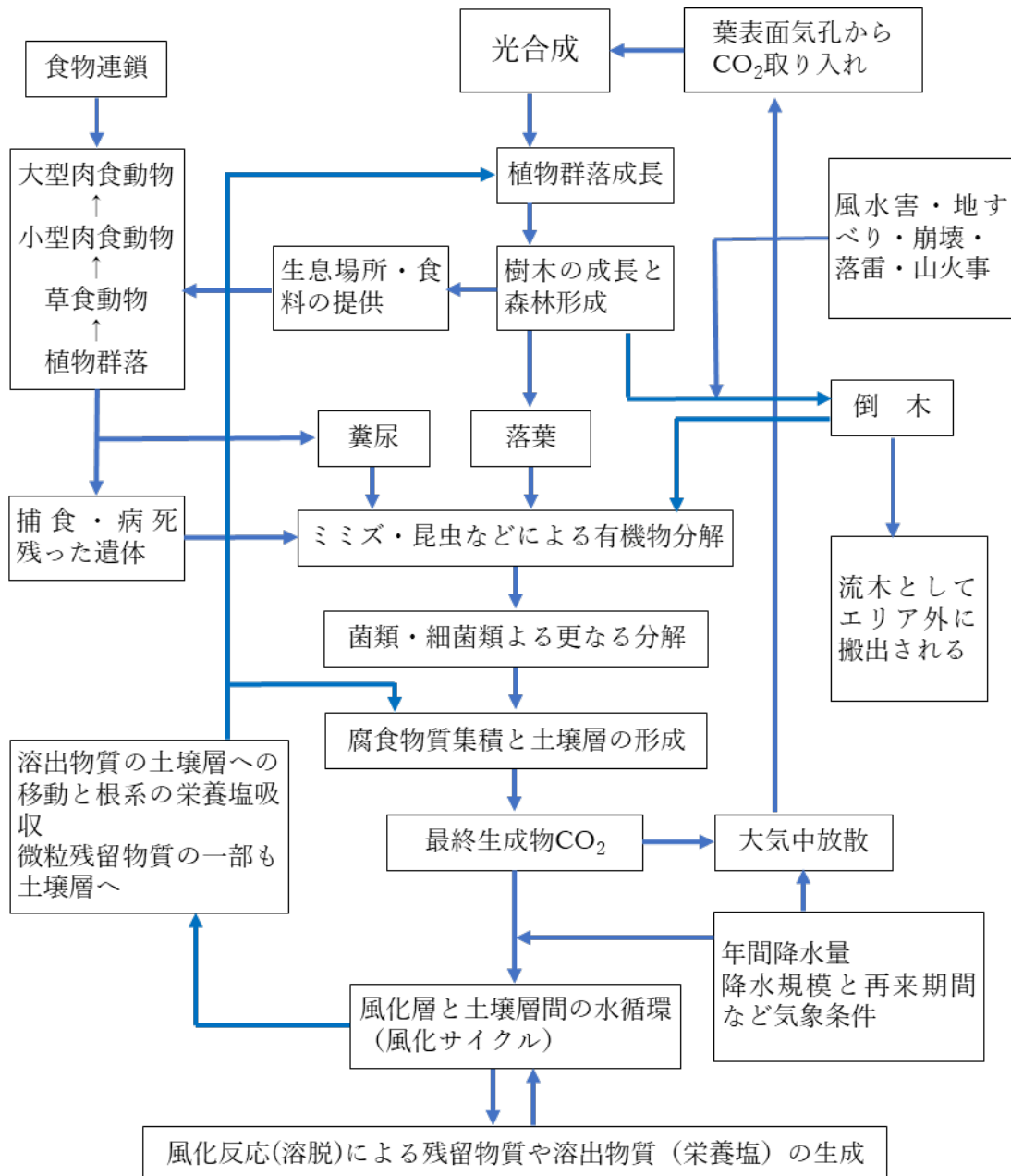


図-2 森林生態系を中心とした物質循環と水の循環（引用文献^{3), 31), 32), 33)}などに基づき作成）

4. 山地・丘陵などにおける土壌の役割について

廃棄物層の土壌化の検討には第 3 章の図-2 に示す地表の植生や生態系に関連する有機物の循環や分解過程だけでなく、土壌層とその下位の風化層の間でどのような物質循環が起きているかを理解することが必要となる。第 4 章のうち 4.1 で日本列島での降水規模とリターンペリオッドの検討を行った。4.2 では降水の時系列パターンの作成を行い、4.3 ではこの時系列パターンを低水解析ツールであるタンクモデルについて代表的な山地からの流出を示すモデルを用いて土壌層と風化層間の水循環の様子を示した。4.4 では上記の検討を受けて水循環に伴う物質の生成や移動などについて考察を加えた。

4.1 降水の出現頻度とリターンペリオッドの検討

ここでは降水について規模別の区間クラス分けと各区間で生起するリターンペリオッドおよび平均年間降水量との関係についての検討を行った。

水分の急激な減少と湿潤の繰り返しで生じる軟岩のスレーキング現象³⁴⁾などを除くと地盤の中で起きる風化現象はかなりの時間を通じて徐々に進行するものである。解析に実際の降水時系列を用いると、その周期性を検討するには計算時間が長くなり、なおかつ周期性が判別しにくくなると考えられたので、ここではリターンペリオッドからその時系列を求めて 4.3 のタンクモデル解析に用いる検討を行った³¹⁾。気象庁から公表されている日本全国の 115 観測所での 55 年間の降水資料³⁵⁾に基づき、降水規模の区間分けと月別の発生日の出現頻度から、区間分けされた降水規模毎の平均再来期間と平均年間降水量との関係を求めて整理した。

降水規模を 1-10 mm、10-30 mm、30-50 mm、50-70mm、70-100 mm、100 mm 以上の各区間に区分した日降水量が生起した日の 1 月当たりの出現頻度が月別データとして公表されている。この月別データ 12 カ月分を平均して年平均の値を求め、この年平均の 1 月（30 日）当たりの区間降水量の出現頻度を生起確率とし、その逆数を各観測所の各年リターンペリオッドとして求めた。そしてさらに 55 年間の平均値と各観測所の 55 年間平均年間降水量との関係を求めた。

図-3 には各観測所における日降水量 1-10mm、10-30mm、30-50mm、50-70mm、70-100 mm、100 mm 以上の各区間のリターンペリオッドと平均年間降水量との関係を示す。ややばらつきは認められるものの、1-10mm/day 区間を除きいずれもかなり明瞭な負（逆）相関を示す。その相関性を検討するため回帰曲線 $y = A \times x^B$ を適応させた。図-3 の中で、1-10mm/day 区間についてはばらつきが大きく相関性は明瞭には認められない。また求めた回帰曲線はその他の区間とは異なり、変動の少ない正の相関を示す。また 10-30mm/day 区間の図では平均年間降水量 1500mm より大きい区間では二つの曲線に分離する傾向も見られる。その理由としては日本列島の中でも気候区の影響が推定される。1-10mm/day 区間のバラツキの原因については季節ごとの特性や気候区の影響も考えられるがよくわかっていない。しかしながらリターンペリオッドの検討は日本列島全体の平均的な降水パターン時系列を求めることにある。そのため、30mm/day 区間については一つの回帰曲線とし、ばらつ

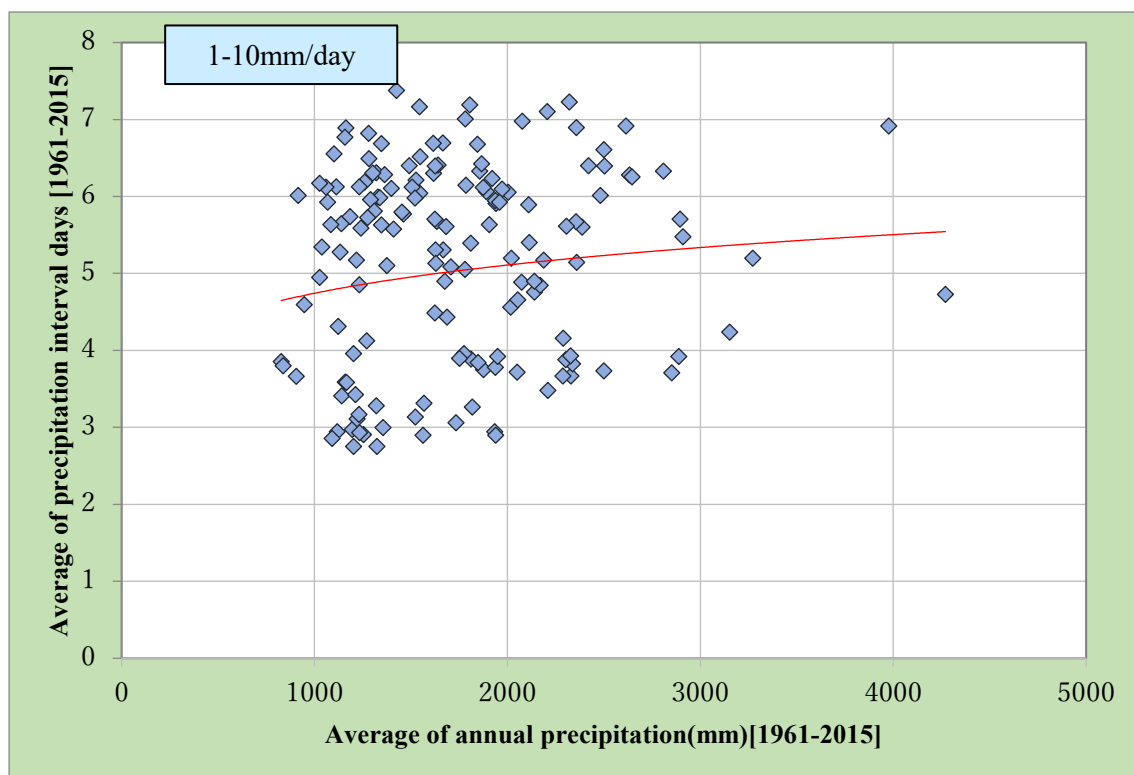


図-3-1 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（1-10mm/day の場合）

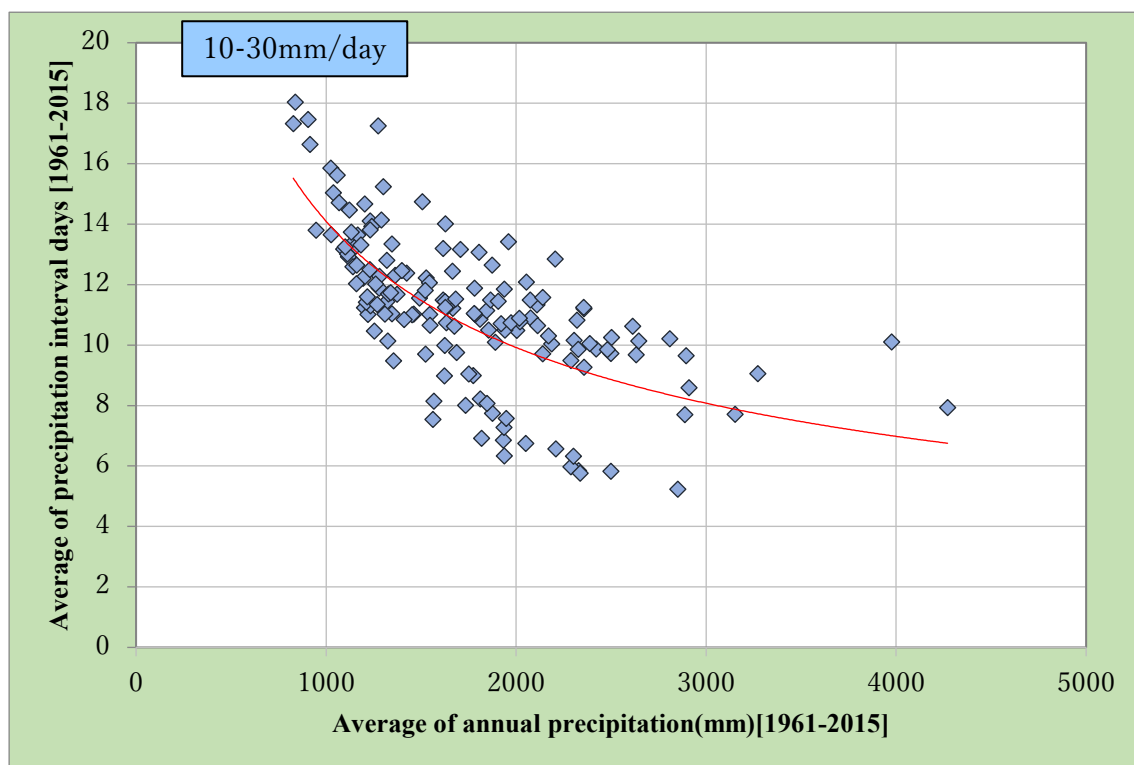


図-3-2 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（10-30mm/day の場合）

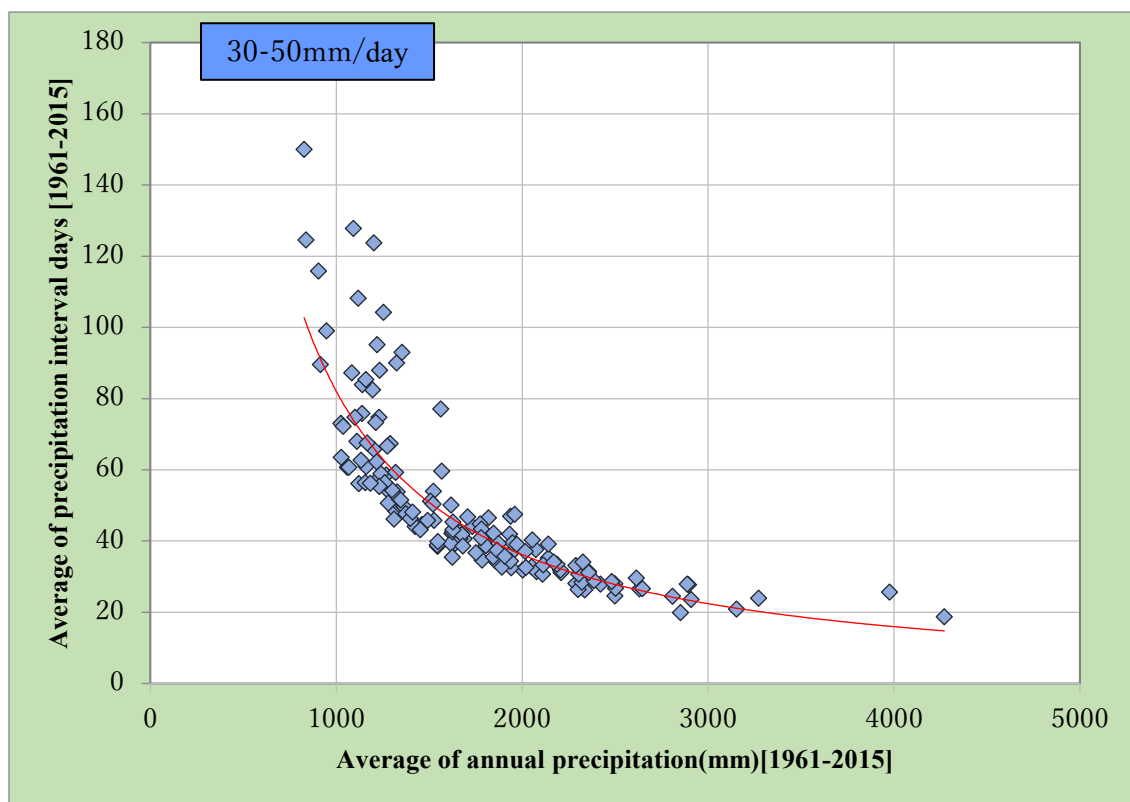


図-3-3 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（70-100mm/day の場合）

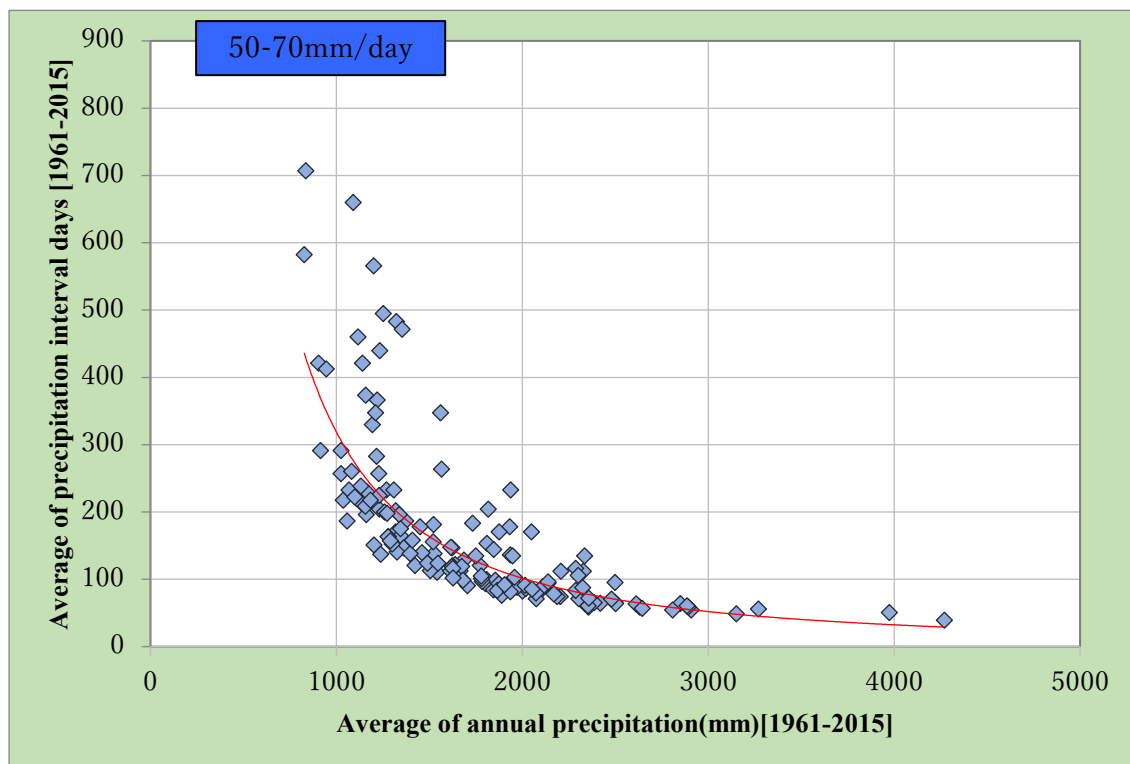


図-3-4 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（50-70mm/day の場合）

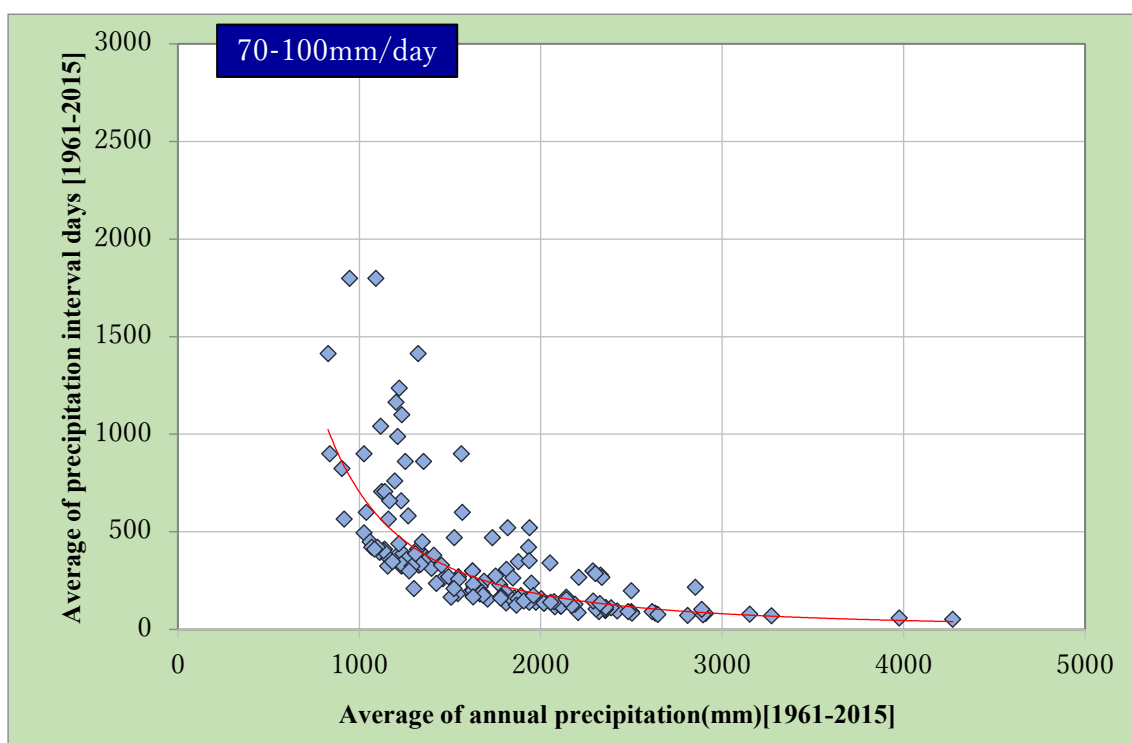


図-3-5 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（70-100mm/day の場合）

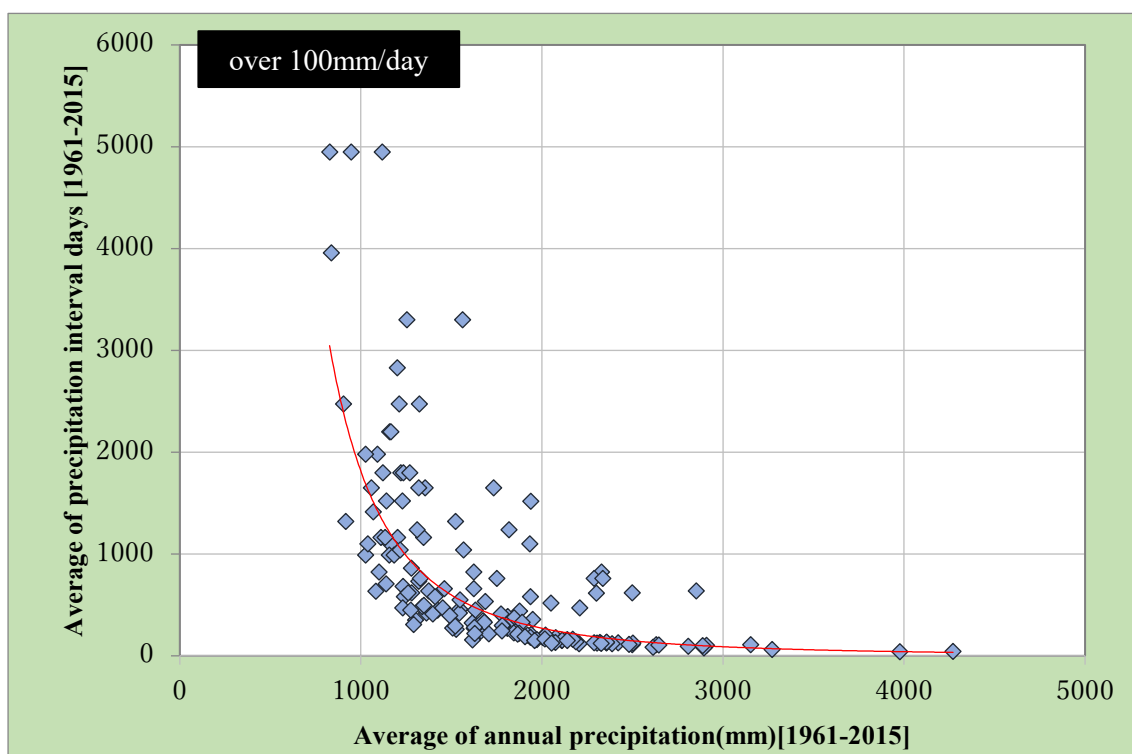


図-3-6 リターンペリオッドと平均年間降水量との関係（100mm/day 以上の場合）

図-3 全国 115 観測所の観測データから求められた 1-10mm/day、10-30mm/day、30-50mm/day、50-70mm/day、70-100mm/day、100mm/day 以上区間のリターンペリオッドと平均年間降水量との関係³²⁾。図中の赤線は回帰曲線を示す。

きの大きい 1-10mm/day 区間についても回帰曲線でリターンペリオッドの値を代表させている。

図-4 には降水規模の 6 つの区間分けに対応した回帰曲線をまとめて表示している。小規模な区間降水量ほど再来周期が短く、洪水のような顕著な河川流出を起こすような大規模な区間降水量は再来周期が長くなる傾向が認められる。降水規模が大きいほどリターンペリオッドは長くなり、また同規模の大降雨区間のリターンペリオッドは平均年間降水量が小さいほど長くなる傾向が認められる。

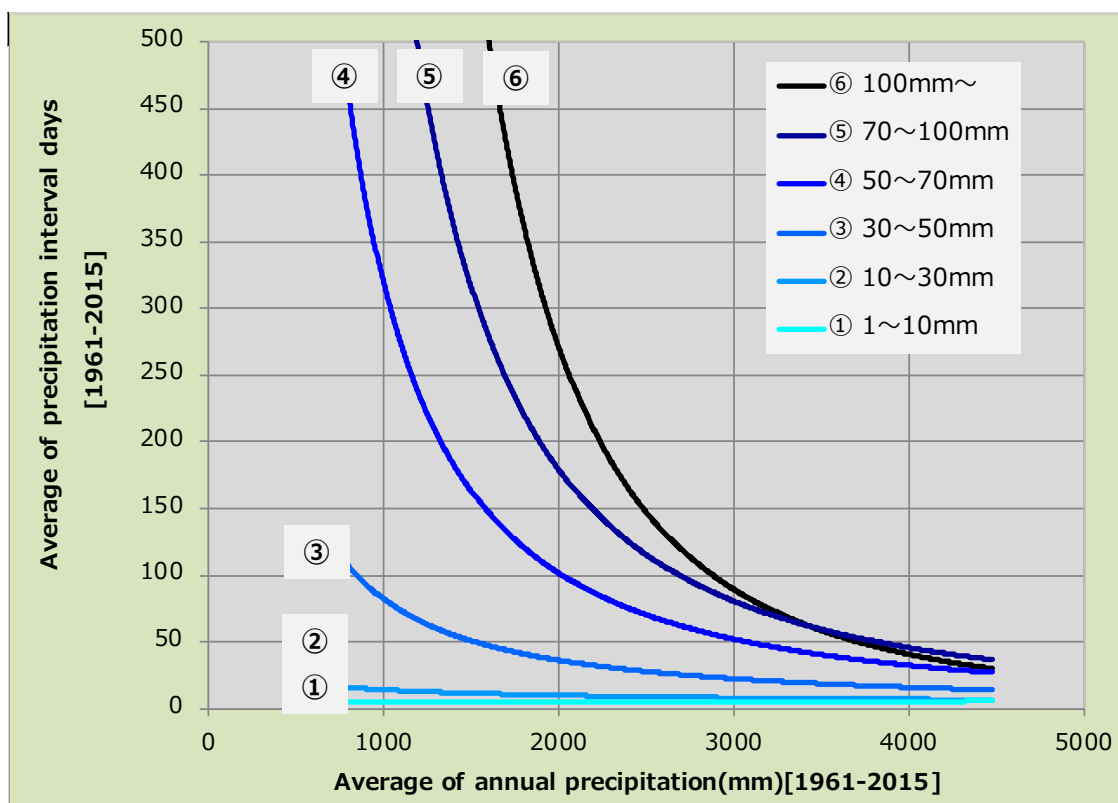


図-4 平均年間降水量と 6 つの区間日降水量のクラス分けに対応するリターンペリオッドの関係を表-1 に示す係数の回帰曲線によって示す³²⁾。

表-1 の中間欄に回帰曲線 $y = A \times x^B$ の定数 A, B の値を示す。また右側の欄には平均年間降水量 3000mm, 2000mm, 1000mm の各ケースに対応するリターンペリオッドを示す。1-10mm/day については求められた回帰曲線の値を四捨五入して 5 日をリターンペリオッドとした（表-1 右側各ケース欄参照）。

表-1 解析結果のまとめ

生起した 降水規模区間	対応する回帰曲線の 定数		平均年間降水量に対応する リターンペリオッド		
	A	B	3000 mm	2000 mm	1000 mm
① 0-1 mm (曇天)	-	-	2	2	2
② 1-10 mm	2.258E+00	0.107	5	5	5
③ 10-30 mm	4.678E+02	-0.507	8	10	14
④ 30-50 mm	2.875E+05	-1.181	22	36	82
⑤ 50-70 mm	2.827E+07	-1.649	52	102	319
⑥ 70-100 mm	5.871E+08	-1.974	81	179	705
⑦ 100mm -	2.974E+11	-2.738	89	272	1,812
回帰曲線： $y = A \times x^B$					

4.2 リターンペリオッドを基に平均年間降水量 3000mm, 2000mm, 1000mm に対応する降水パターン時系列の作成

降水規模区間 0-1 mm (曇天) のリターンペリオッドについては平均年間降水量 3000mm, 2000mm, 1000mm のいずれに対しても 2 (day) を与えている。これは降水規模区間 0-1 mm (曇天) の出現頻度が隣接する降水規模区間 1-10 mm より 2 倍程度高いと考えられるためである。

しかしながら具体的な降水パターンの時系列を求めるためには各降水規模区間ではなくそれを代表する具体的な数値を定めなくてはならない。そこで、定められたリターンペリオッドと代表数値を仮定したトライアル計算から平均年間降水量を逆算で求め、区間の代表値を求めた³²⁾。その結果、0-1mm、1-10 mm、10-30 mm、30-50 mm、50-70mm、70-100 mm、100 mm 以上の各区間に与えられた代表値として、それぞれ 0mm、4mm、18mm、38mm、58mm、82mm、120mm が求められた。

時系列の検討として、まず表-1 の右欄に示す全ての降水規模区間をリターンペリオッドに基づき、カレンダー (時系列) に埋め込んでいく。つぎに降雨の設定のない日は晴天日として、蒸発散量 5 mm/day を与える。

リターンペリオッドに基づきカレンダーに上記の日降水量を張り付けていくと異なるクラスのリターンペリオッドの倍数によっては同一日に重なる事態が起きる。その場合は発生確率の少ない、リターンペリオッドの長い降水規模のクラスを優先して、当該日に貼り付けている。

また時系列作成のスタート日は 50-70 mm (代表値 58 mm/day) のリターンペリオッド

の発生時を初日とした。この値の日降水量が再び発生するのは平均年間降水量 3000mm の場合 52 日後、2000mm では 102 日後、1000mm については 319 日後となる（表-1）。

これらの作業により平均年間降水量 3000mm, 2000mm, 1000mm に対応した降水パターン時系列を完成させた。図-5 には 2000mm の例を掲載している。降水パターン時系列は青線曲線で示される。

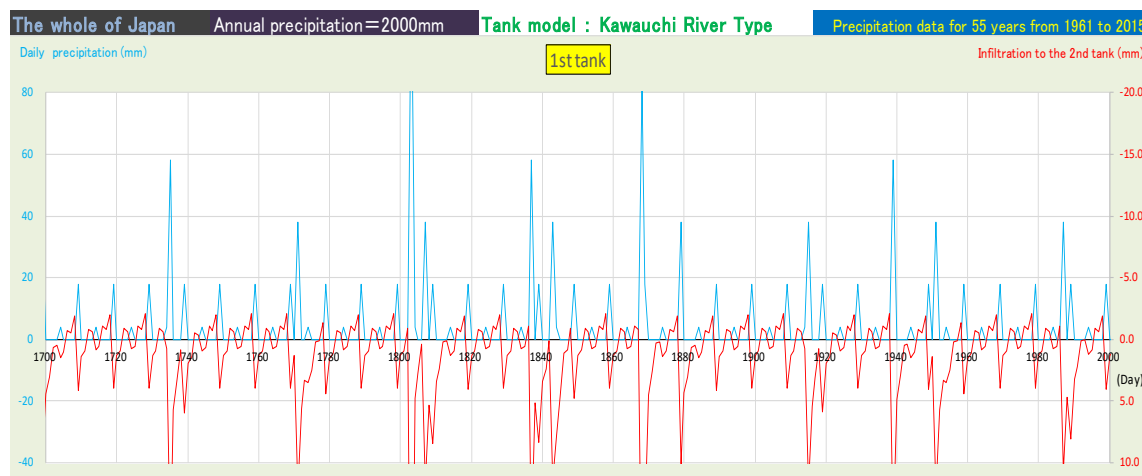


図-5 平均年間降水量 2000mm に対応する区間降水規模のクラス別に求められたリターンペリオッドを並べて得られた降水パターン時系列日雨量（青線）とその値をタンクモデル（河内川モデル²⁵⁾）に入力して得られた第1段タンク第2段タンク間の水浸透（移動）を赤線で示す³²⁾。

図中の 1735 日目、日雨量 57 mm のリターンペリオッドは表-1 に示す通り 102 日であり、ここでは 3 本のピークが現れる。1802 日目付近でピークアウトしている日雨量 120mm に対応するリターンペリオッドは 272 日、1870 日目付近の日雨量 82 mm のリターンペリオッドは 179 日である。そのため図-5 の範囲ではこれらの雨量の次のピークは図示されない。

4.3 タンクモデルを用いた第1段タンクと第2段タンク間の水分移動

タンクモデルは菅原正巳氏により提唱・開発された流出解析法³⁶⁾であり、河川の低水流出量の時系列解析に用いられている³⁷⁾。タンクモデルは元来数理的なモデルで各段のタンクと実際の地山内部との対比はある種の空隙の存在で説明されているが、具体的なその姿は明らかにされていない。

図-3 から平均年間降水量 3000mm, 1000mm は日本列島全体の平均年間降水量の出現範囲のほぼ上限下限に相当し、2000mm はその中間値であり平均値にも近いことが分かる。平均年間降水量 3000mm, 2000mm, 1000mm に対応するリターンペリオッド時系列で日本列島の降水状況をほぼカバーできると考えられたので、これらの値をタンク定数が既に求

められている河内川をモデル流域とするタンクモデルに入力した（図-6）。

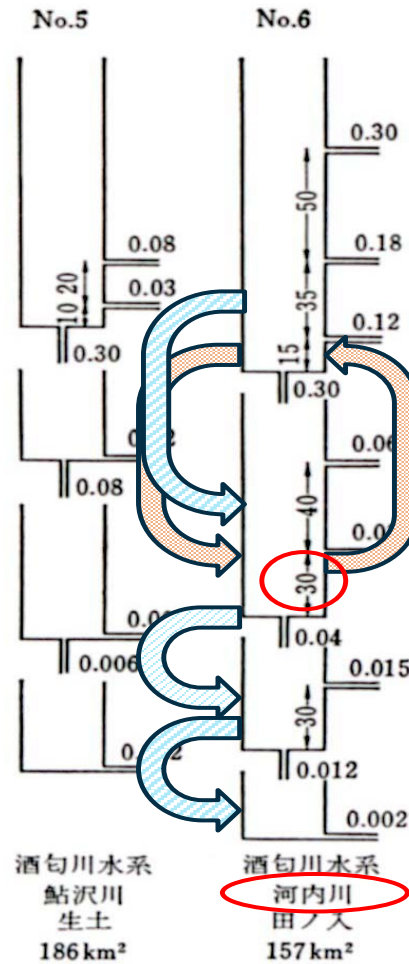


図-6 酒匂川水系鮎沢川および河内川流域に対し同定されたタンクモデル

上から下に第1段タンク～第4段タンクを示す。各タンク下の孔は浸透孔、側壁の孔は流出孔。定数で示される浸透孔の大きさは地下への浸透のしやすさを表す。河内川流域は丹沢山地、鮎沢川流域は富士山東側斜面に相当する。（引用文献³⁶⁾p.154 図-96の一部から引用し、一部を加工）

タンク間の水の移動を示す中抜き矢印の中を薄赤で塗りつぶした矢印は風化サイクル時の水分移動、また矢印の中を薄青で塗りつぶしたものは遮断降水時の水分移動を示す。

タンクモデルでは降水量を入力するとまず第1段タンクに貯留され、次に貯留高が流出孔位置を上回る場合に流出が起き、また底部の浸透孔から第2段タンクへの浸透が起きる。それより下段の各タンクへの浸透や流出の動きは貯留高（タンク内水位）と浸透孔の大きさや流出孔の高さと孔の大きさとで規定される。降水が1日だけだと次の日の第1段タンクの貯留高は流出量と浸透量を差し引いた高さとなる。また、晴天など無降雨時には蒸発散に伴

い、不足分に対応して各タンクから上方への水分移動が起こるとされている。地下水位以上の地中水の含水量やモデル流域からの基底流出に係る地下水位は各タンク（第1～第4段のタンク）の貯留量（水位）として表現される。

タンクモデル計算に当たっては、初期状態でタンクはすべて空なので第4段タンクの貯留量が十分安定的になるまで降水パターン時系列の計算日数を進めた時点から検討を行った。計算はExcelの表計算ソフトを用いて行った。

4.4 土壌層と風化層間の水循環と溶出物質・溶脱物質の移動

(1) タンクモデル計算によって分かったこと

各降水クラスのリターンペリオッド時系列の降水パターンの入力に対しては、第1段タンクと第2段タンクの間で生ずる水分移動は浸透と蒸発散に伴う下方および上方移動の繰り返しが明瞭である（図-7）。図-6に示した河内川タンクモデルに入力した時の第1段タンクと第2段タンク間での水分移動（浸透量）を赤線で、第1段タンクからの系外への流出量を青線で図-7に示す。このような水分移動の繰り返しの状況は第1段タンクと第2段タンク間でのみ認められた。

(2) 土壌層では何が起きているのか？（土壌内空隙でのCO₂生産）

土壌層は腐食物質や未分解の植物遺骸などの有機物を含むA層、溶脱物質である粘土と腐植質を混在するB層、母岩が風化した粘土層であるC層から成り立つとされている³⁸⁾。地中温度の高い土壌層ではまた微生物生態系が活発に活動して有機物分解が盛んであり、特に熱帯地方の土壌には腐食を含むA層はほとんど存在しない。その代わりに微生物による有機物分解の最終生産物であるCO₂の土壌空隙中の濃度は数%に及ぶ。日本の土壌でも夏季のCO₂濃度の高まりが認められている³⁹⁾。

土壌はまた陸上における炭素の最大の貯蔵庫として知られている。地球温暖化の進行はまた土壌におけるCO₂生産量の増加の可能性を示している⁴⁰⁾。

土壌層で生産されたCO₂の一部は大気中に放散するが、植物の葉から吸収され光合成原料となる。（図-2）また土壌中の水分に溶解したCO₂は、炭酸となり、その一部は炭酸水素イオンと水素イオンに電離し、弱酸性の水を形成する。

(3) 風化層では何が起きているか？（風化反応とその生産物質）

岩石を構成する造岩鉱物は風化反応により僅かではあるが、溶存態ケイ酸やCaイオンなど水に溶解する溶出物質と粘土鉱物粒子に分解する^{41), 42)}。そしてその分解反応には炭酸の供給が必要である。また、反応速度は温度にも依存する。風化層の温度が高いほど反応速度は増加する。

風化の進んだ花崗岩であるマサのように粘土のほかにも未分解の造岩鉱物が含まれる風化層の内部においても風化は進行していく。

(4) 土壌層と風化層、また地下水の水質を結びつける地中の水循環に伴う溶脱

土壌層（A+B層）を第1段タンクとし、風化層（C層）を第2段タンクとして取り扱えば、第1段タンク底部の浸透孔を通じ、小降雨時には土壌層から風化層に向かい土壌

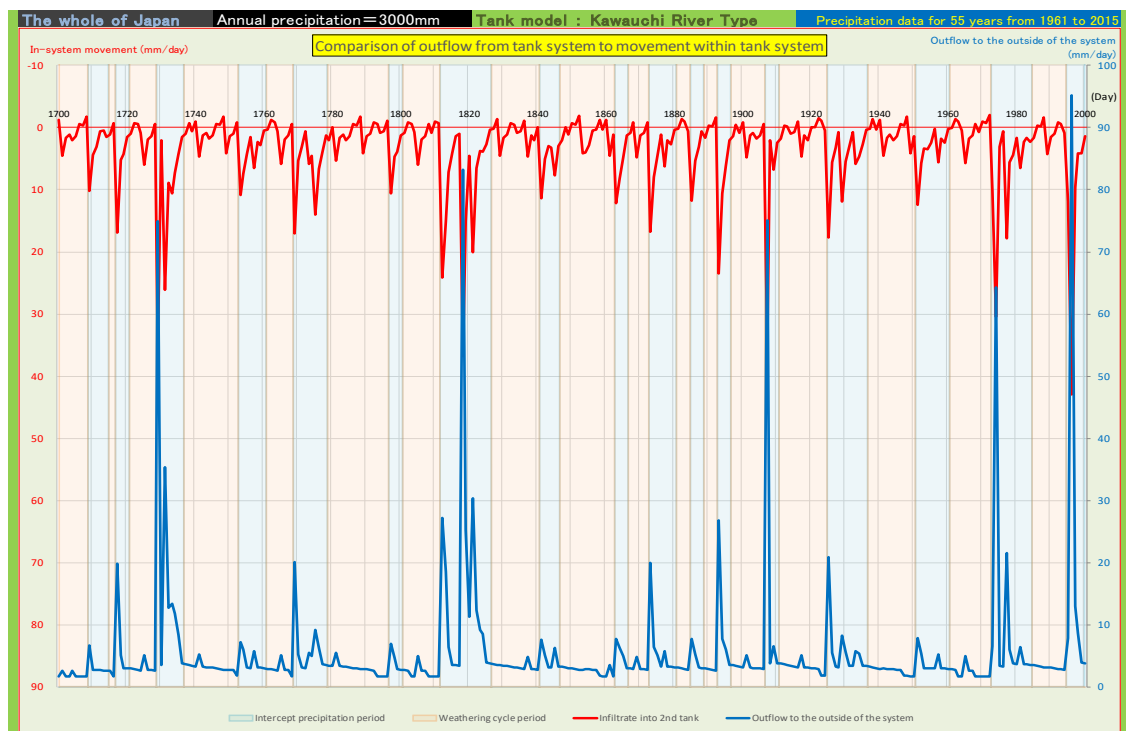


図-7-1 平均年間降水量 3000 mm の場合

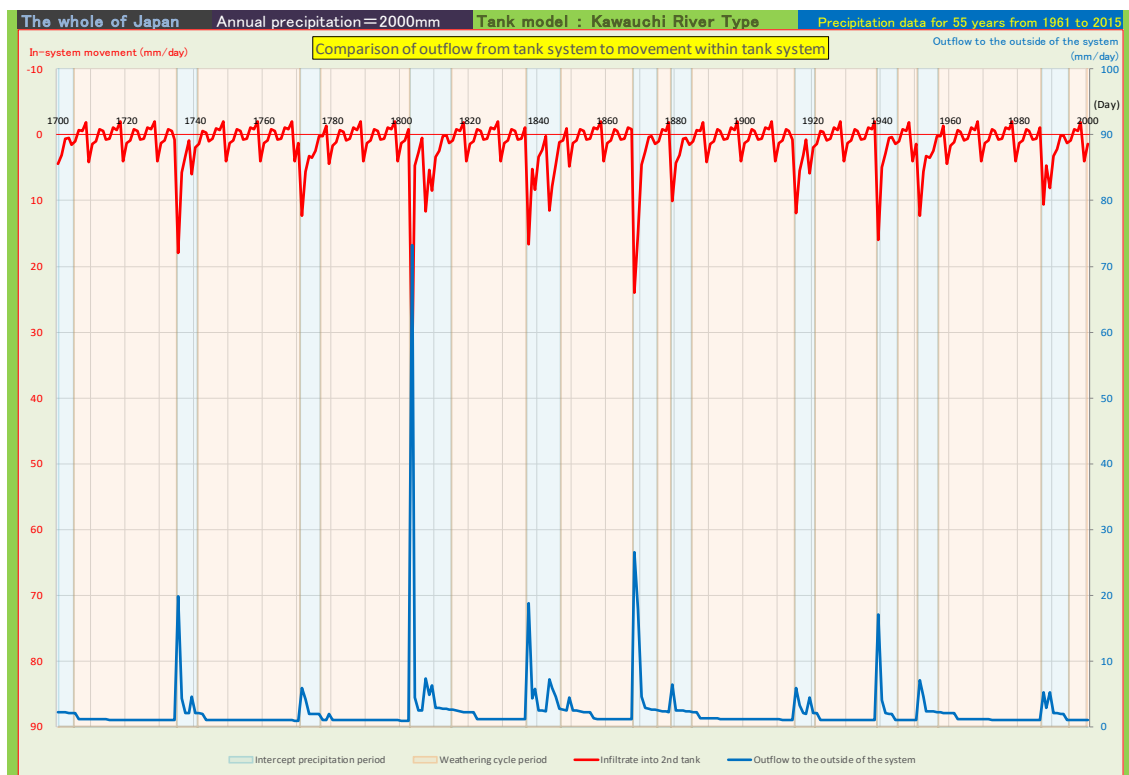


図-7-2 平均年間降水量 2000 mm の場合

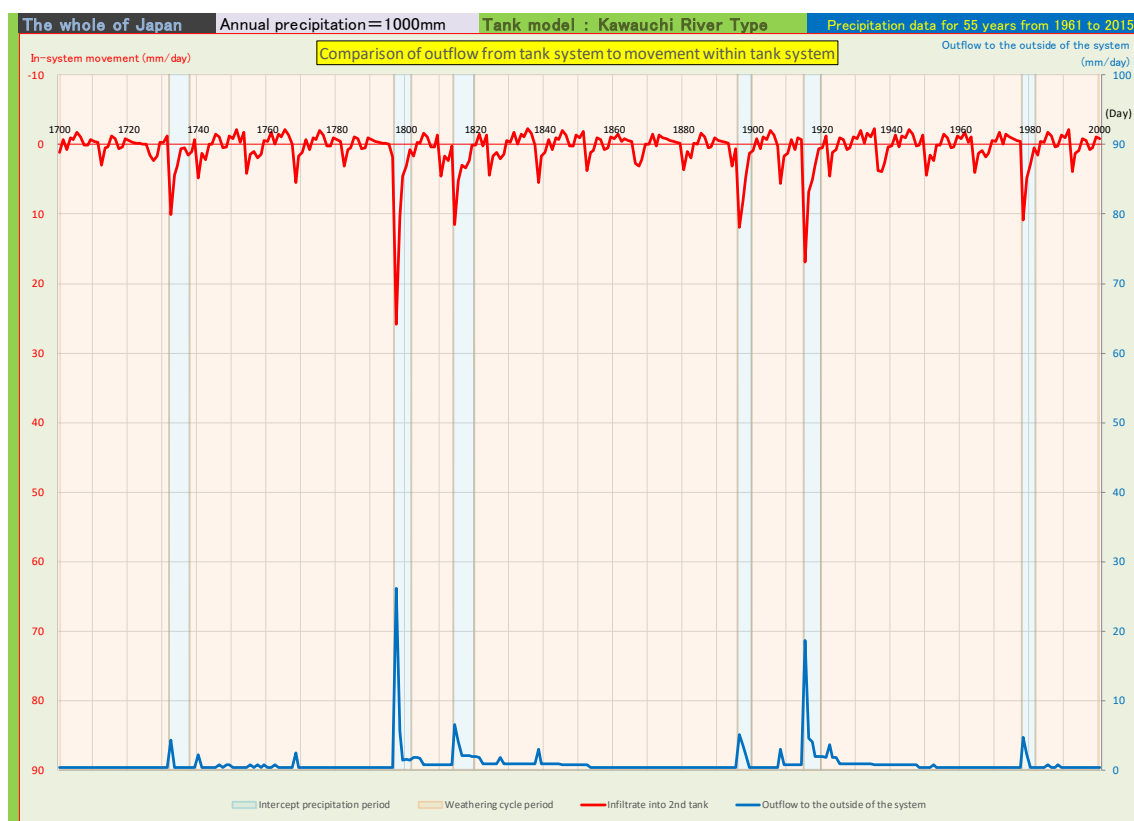


図-7-3 平均年間降水量 1000 mm の場合

図-7 酒匂川水系河内川流域のタンクモデルから算出された水分の移動状況

赤線：各降水クラス（平均年間降水量 3000 mm, 2000 mm, 1000 mm）のリターンペリオッド時系列に応じた第 1 段タンクと第 2 段タンク間での水分浸透量（移動量）、青線：第 1 段タンクから系外への流出量。

背景の薄い赤色の塗りつぶしは風化サイクル期間、薄い青色の塗りつぶしは遮断降水期間を示す。（引用文献³²⁾中の図の一部を引用）

中の水の下方向浸透が起こり、逆に晴天時に地表や植生の蒸発散に伴い、風化層から上の土壌層への地中水の上方移動が生じる。この上下する水循環は、大きな降水により遮断されるまで図-7 に示すように連続したサイクル（図-7 の薄赤で塗りつぶした期間）として生じている。

図-7 に赤の実線で示す第 1 段タンクと第 2 段タンク間の水移動サイクルは風化反応に必要な炭酸及び風化により生じた溶出物質の溶脱に係わっており、これを風化サイクルと呼ぶ³²⁾。また、リターンペリオッドの長い、まとまった大きな降水（図-7 の薄青で塗

りつづいた期間) が起きますと、風化サイクルは一旦中断されるのでこれを遮断降水と呼ぶ³²⁾。

平均年間降水量の違いに着目すると図-7-1 に示す 3000mm の場合、遮断降水の発生間隔は短く、これに応じて風化サイクルのサイクル数は減少し、継続時間は短くなる。また 1000mm の場合、逆に遮断降水の発生間隔が長くなり、風化サイクルのサイクル数は増加し、その継続時間も長くなる（図-7-3）。

土壌層から風化層へ運搬された水には炭酸が含まれ、その一部は炭酸水素イオンと水素イオンに電離した状態である。遮断降水後、風化サイクルの 1 サイクル目の水の浸透により風化層に供給された炭酸のうち電離したものが風化反応に消費される。そして 1 サイクル後半では蒸発散に伴い反応生成物である溶出物質は土壌層へと上方に運搬され、そこで一部は根系から栄養塩として吸収される。その時に栄養塩以外の溶出物質や剰余の栄養塩は土壌構造中の微小間隙に塩分として吸着される⁴³⁾。土壌中で発生する CO₂ 濃度は季節に応じてある期間一定とすると、2 サイクル目の雨水浸透により第 2 段タンクである風化層には同じ濃度の炭酸が供給される。栄養塩は植物により吸収され、小降雨時には土壌中の微小間隙は下方への水みちとならないため、2 サイクル目に炭酸と共に土壌層から風化層に浸透する水に含まれる溶出物質は減少している。このようなサイクルが進行すると風化層では同じ濃度の一部電離した炭酸が供給され続け、同時に供給される溶出物質の濃度は減少し続ける。風化サイクルの進行により風化層つまり第 2 段タンク内で起きる反応は、造岩鉱物から粘土鉱物を生ずるように分解側に向かって進みやすいことがわかる。

次の遮断降水が生起した時、それまでの風化サイクルの過程で根系に吸収されず塩分として土壌中の微小間隙に吸着され、貯留されていた溶出物質等は土壌中で飽和した水みちを通る水の浸透⁴³⁾により風化層である第 2 段タンクを経由して、さらに地中深部の第 3 段タンク、第 4 段タンクにまで輸送され、地下水や低水時の河川水の水質の形成に寄与するようになる⁴⁴⁾。

なお、我が国における表層部での塩類集積の事例として岩盤表面に生ずるタフォニ⁴⁵⁾、⁴⁶⁾や大谷石（軽石質凝灰岩）を積んだ石堀下部での劣化現象を上げることができる。

図-7 によれば、これらの風化サイクル曲線の 1 サイクルはおよそ 4~5 日程度となるので、遮断降水期間を除けば、年間の風化サイクル数は約 73 サイクルとなり、1 万サイクルを達成するには最低でも 137 年かかることとなる^{45), 47), 48)}。

造岩鉱物の風化反応の進展に伴い、風化層中に残留した粘土鉱物粒子が蓄積される。しかしながら蓄積された微粒の粘土の一部は風化層中の隙間を通り蒸発散に伴う上方への水の流れに乗って上方の土壌層へと移動することがあり得る。土壌中の B 層中の粘土はこのような運搬メカニズムにより沈殿・堆積した可能性がある。また、第 4 段タンクに相当する岩盤へ向かう下方浸透する地中水と共に移動した粘土の微粒が岩盤中の亀裂に沈殿することもあり得る。構造物基礎などの地質調査に伴い、岩盤の亀裂中に流入粘土が、

しばしば確認されている^{49), 50), 51)}。

このように A 層、B 層など土壌層の形成³⁸⁾には植物遺骸などの有機物集積だけでなく風化層における粘土鉱物の生産と蒸発散に伴う地中水の上方移動も関係している可能性がある（図-2）。

生ごみなどの有機物を含む廃棄物の土壌化については以前から着目され研究が行われている²¹⁾。一方、焼却灰などの廃棄物層が地盤として安定化する際、内部がどのような状態になり、そして表層における微生物を含めた生態系の活動やその最終産物である CO₂ などの発生についても注目する必要がある。

5. 廃棄物の土壌化について

自然の山地等での土壌化の進展と同様に、最終処分場に埋積された廃棄物層についても時間の経過と共に表層部での樹林化や土壌化の進展が予想される。それに伴う CO₂ 供給と地下浅部での水循環は、徐々に廃棄物層の風化や溶出した物質の溶脱を引き起こし、廃棄物層の表層は長い時間をかけて徐々に栄養塩（図-2）などの溶出物質と残留する物質とに変化すると考えられる。そして溶出物質のうち葉緑素の原料となる Mg など植物体に必要な栄養塩成分は樹木など植生に吸収され、残りの溶出物質は、まとまった規模の降水で生ずる下方浸透により廃棄物層内の地下水面まで輸送されると考えられる。

なお 2 章で述べた厚さ約 50 cm の覆土層がサンドイッチ状に廃棄物層の中に含まれ、また表層部が覆土で覆われることが廃棄物層表層部で予想される土壌化に対しどのような影響を与えるかは有機物含有量など廃棄物層自体の特性にもよるが、まだよくわかっていない。土壌混入の可能性もあるが通常、覆土層は土砂つまり堆積性あるいは残積性の土質材料であると考えられるので覆土で覆われた表層部の土壌化は自然に起きる速度に大差ないと思われる。処分場の前側斜面が充分保全されていれば侵食や崩壊の機会も少ないので、図-2 に示したような物質循環と共に土壌化が進展するものと考えられる。

廃棄物のうち溶融スラグはケイ酸の含有割合などその化学組成は玄武岩¹⁹⁾と類似している。このような廃棄物層の表面では覆土の特性にもよるが時間経過と共に火山灰地域に見られる黒ボクに類似した土壌が発達すると思われる。また、優先して発達する樹木種については、降水量・気温など気候条件にもよるが、文献^{24), 30)}からも推定されるように針葉樹が予想される。

また、タンクモデルは 100 km² 以上の流域に対し適用されるもの³⁶⁾であり、それより規模が格段に小さい処分場の流出状況については今後、解析方法の適応性などの検討が必要になると思われる。

謝辞

本研究報告の取りまとめに当たり、当小委員会委員長宮脇健太郎先生には法に基づく廃

棄物処分場の規定に関し助言を賜りました。同じく当小委員会の京都大学、陳友晴先生には全体構成、表現上や内容の疑問点の指摘など細部にわたりご指導を賜りました。また同じく小委員会の幹事である地質工学社大野博之氏には処分場の処理状況の実態についてご指導ご指摘をいただきました。そして（株）ニュージェック東京本社増田信吾氏には引用図面の提供について便宜を図っていただきました。

最後に当学会研究企画委員会からは図表、用語、文章について適切なコメントをいただきました。関係する皆様方に改めて謝意を表します。

引用文献

- 1) 環境省監修 公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団編集（2022）：日本の産業廃棄物（改訂9版）。
- 2) 遠藤和人・山田正人（2013）：最終処分場の現状と課題，地質と調査（一般社団法人 全国地質調査業協会連合会），第一号（通巻135号），pp. 42-45.
- 3) 山中健生（1992）：入門生物地球化学，学会出版センター。
- 4) 松藤敏彦（2019）：科学的に見る SDGs 時代のごみ問題，丸善出版。
- 5) 今田武男（1965）：回収イオウとイオウ回収装置，安全工学（特定非営利活動法人 安全工学会），Vol. 4, No. 1, pp. 48-58.
- 6) 佐藤研一（2013）：各種スラグのリサイクルの現状と今後について，地質と調査（一般社団法人 全国地質調査業協会連合会），第一号（通巻135号），pp. 29-35.
- 7) 三木博史（2000）：建設発生土の有効利用の現状と課題，地質と調査（一般社団法人 全国地質調査業協会連合会），第三号（通巻85号），pp. 2-5.
- 8) 中尾賢志・西尾孝之（2015）：下水汚泥溶融スラグ硫酸脱着液からの pH 調製によるリン回収，第52回下水道研究発表会講演集（公益社団法人日本下水道協会），pp. 191-193.
- 9) 田中信壽（2000）：環境安全な廃棄物埋め立て処分場の建設と管理，技報堂。
- 10) 松原武志（2013）：災害廃棄物処理の現状と課題，地質と調査（一般社団法人 全国地質調査業協会連合会），第一号（通巻135号），pp. 36-41.
- 11) 大野博之・磯部有作・打木弘一・山内一志・宮原哲也・登坂博行（2018）：西日本豪雨における災害廃棄物/災害発生土と仮置場，平成30年7月豪雨災害（西日本豪雨災害）調査団報告書IV-2（日本応用地質学会），pp. 243-256.
- 12) 環境省（2024）：令和6年版環境・循環型社会・生物多様性白書。
- 13) 公益社団法人全国都市清掃会議（2010）：4章埋め立て作業管理，改訂版 廃棄物処分場整備の計画・設計・管理要領Ⅲ編。
- 14) 公益社団法人日本道路協会（2010）：道路土工 盛土工指針（平成22年度版）。
- 15) 農林水産省農林振興局（2003）：土地改良事業 計画設計基準 設計「ダム」フィルダム編 平成15年4月。

- 16) 宮原哲也・八村智明・大野博之・小坂英輝・大久保拓郎・山内一志・山中稔（2018）：最終処分場の適正化に向けた調査と対策Ⅰ-主に力学的安定性の観点から-, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 29, pp. 206-218.
- 17) 遠藤修実・松浦好孝・深水正康・長瀬武英・嶋崎浩二・上水文仁（2014）：弾性波トモグラフィによる開口亀裂性岩盤の定量的区分, 応用地質, Vol. 55, No.2, pp. 77-85.
- 18) 西川有司（2014）：おもしろサイエンス 地下資源の科学, B&T ブックス日刊工業新聞社, p. 33.
- 19) 浜島書店（2003）：ニューステージ新訂地学図表, 浜島書店.
- 20) 国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター（1989）20 万分の 1 地質図幅「高山」.
- 21) 熊田幸一・辻登美次（1982）：埋立地土壌の腐植化と安定化について—15 号埋立地（新夢の島）の土壌と植生の特徴, 東京都清掃研究所研究報告 1982 年 03 月（東京都清掃研究所編）, pp. 115-126.
- 22) 井口隆（1988）：日本における火山体の山体崩壊と岩屑流 磐梯山、鳥海山、岩手山. 国立防災科学技術センター研究報告 Vol.41, pp163-275
- 23) 財団法人日本地図センター（1972）：復刻版土地分類図 07 福島県 土壌図（国土庁土地局国土調査課監修）.
- 24) 環境庁（1994）：磐梯山（植生変化図）福島 28, 第 4 回自然環境保全基礎調査（植生調査）.
- 25) 川辺禎久（2012）：ジオパークを歩く（第 17 回）伊豆大島ジオパーク 水と火と風そして人びとがつくる火山島の姿, 地理, Vol. 57, No. 11, pp. 16-22.
- 26) 財団法人日本地図センター（1976）：復刻版土地分類図 13 東京都 土壌図（国土庁土地局国土調査課監修）.
- 27) 大島自然愛好会編（2000）：身近に見られる伊豆大島の植物, 大島町.
- 28) 桑原啓三（2008）：地盤災害から身を守る-安全のための知識-, シリーズ繰り返す自然災害を知る・防ぐ第一巻, 古今書院.
- 29) 財団法人日本地図センター（1973）：復刻版土地分類図 19 山梨県 土壌図（国土庁土地局国土調査課監修）.
- 30) 篠原博（1965）：富士山麓青木ヶ原の植物, 富士国立公園博物館研究報告（通号 13）, pp. 1-14.
- 31) 神尾重雄・増田信吾・小野弘道・池田敦・吉村直孝・奥野哲史（2016）：降雨再来間隔とタンクモデルを用いた風化サイクルの検討, 日本応用地質学会 平成 28 年度研究発表会講演論文集, pp. 229-230.
- 32) 神尾重雄・増田信吾（2017）：タンクモデル解析により求められた土壌層—風化層間の水循環と風化反応との関係, 日本地球惑星科学連合（JpGU-AGU Joint Meeting 2017）BBG02-P08.

- 33) 町田貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤正・榎根勇・小野有五編集（1981）：地形学辞典，二宮書店.
- 34) 大島洋志（2000）：土木地質学，土木工学社，p. 207.
- 35) 気象庁ホームページ：各種データ・過去の気象データ <https://www.data.jma.go.jp>
- 36) 菅原正巳（1972）：水文学講座 7 流出解析法，共立出版.
- 37) 日本河川協会編（1997）：改定新版河川砂防技術基準同解説調査編，技報堂出版.
- 38) 一般社団法人日本土壌協会監修（2020）：土壌診断のきほん，誠文堂新光社.
- 39) 日本地下水学会編（2000）：地下水水質の基礎，理工図書.
- 40) 経済産業省技術環境局環境政策課編（2006）：京都議定書目標達成計画の策定，p. 397.
- 41) Dorothy Carroll (1970): 岩石の風化，松尾新一郎監訳，丸善ラテイス（昭和 49 年）.
- 42) 古米弘明・山本晃一・佐藤和明編集（2012）：ケイ酸 その由来と行方，技報堂出版.
- 43) Daniel Hillel (1998): 環境土壌物理学 I 土と水の物理学，岩田進午・内嶋善兵衛監訳，農林統計調査会（平成 13 年），p. 143 and p. 244.
- 44) 神尾重雄・小野弘道（2015）：ケイ酸溶出ポテンシャル指数，日本応用地質学会 平成 27 年度研究発表会講演論文集，pp. 49-50.
- 45) 川野辰康・小坂和夫（2002）：中世石窟遺構の塩類風化―鎌倉のやぐらの例―，応用地質，Vol. 43, No. 3, pp. 124-133.
- 46) 西山賢一・横田修一郎（2010）：熊本県天草上島の古第三系砂岩に分布するタフォニの形状，応用地質，Vol. 51, No. 3, pp. 122-129.
- 47) 朽津信明（2010）：屋内と屋外での来待石製石塔の風化の違い，応用地質，Vol. 50, No. 6, pp. 329-335.
- 48) 荒井正行（2023）：機械工学ライブラリー3 初歩からの材料強度学 安全なモノ作りのために，数理工学社，p. 110.
- 49) 小原雅人・中村康夫・脇坂安彦（1996）：流入粘土、断層粘土、熱水変質粘土を識別する鉱物学的性質，日本応用地質学会 平成 8 年度研究発表会講演論文集，pp. 113-116.
- 50) 脇坂安彦・小原雅人・原田政寿・高橋努・田中政司・古市久士・大神昭徳（2002）：岩盤中の弱層を構成する粘土の鉱物化学的性質，土木技術資料，Vol. 44, No. 3, pp. 34-39.
- 51) 山根誠・荒谷忠（2017）：流入粘土：色調、粒度分布、化学組成、鉱物組成 内部構造とその成因，応用地質技術年報（36）（応用地質株式会社技術本部編），pp. 63-70.