

6. 熱水溶液による石灰岩の溶食と応用地質

Significance of Corrosion of Limestone by Hydrothermal Solution in Engineering Geology

○香川大学工学部

香川大学大学院工学研究科

Power & Water Institute of Technology A. Khorsandi

(株)サワソフトサイエンス

長谷川修一

渡辺 弘樹

澤田 臣啓

1. はじめに

カルスト地形は、石灰岩や苦灰岩等の炭酸塩岩が分布する地域の地表と地下に形成される、二酸化炭素を含む雨水や土壌水による溶食システムと説明されている(地学団体研究会新版地学事典編集委員会, 1996)。このため、石灰岩中に形成された溶食は、一般に二酸化炭素を含む弱酸性の地表水(天水)によって形成されたと解釈されている。これのように考えると、溶食は基本的には地下水面より高い位置に形成される。しかしながら、石灰岩中の溶食は、地下水面よりはるかに低く、地表水が直接流入したとは考えにくい地下深所からも報告され、地下カルストと呼ばれることがある(例えば、鹿島・高橋, 1989)。このような、地下カルストは、地表水の直接の流入ではなく、地下から酸性の熱水溶液が侵入して、石灰岩を溶食した可能性も考えられる。石灰岩の溶食が、地表からだけでなく、地下からも進行することがあれば、石灰岩地帯の応用地質学的調査の視点が変るはずである。本報告では、石灰岩地帯における工事の事例から熱水溶液による石灰岩の溶食の可能性を検討し、トンネル調査やダム調査における留意点に言及する。

2. イランのラルダム

2. 1 ラルダムの概要

ラルダム(Lar dam)は、イランの首都テヘランへの水道水を供給するため、テヘランから75km北東、アルボルズ山脈中央部のダマバンド山(標高5670m)の麓のラル渓谷に建設された利水ダムである。ラルダムは、堤高105m、堤長1150m、有効貯水容量8.6兆m³のフィルダムで、1981年に完成した。しかし、貯水池からの大量の漏水のため、現在も貯水位は取水口レベルより低い位置にある。

2. 2 ラルダムの地質概要

アルボルズ山脈は、テヘランの北側に東西方向に連なる3000m級の山脈で、そのなかからさらに約3000mほどそびえ立つダマバンド山は、安山岩溶岩、火山灰などから構成される第四紀の成層火山である。ダムの左岸は、ダマバンド火山岩類の安山岩溶岩からなり、右岸は基盤をなす白亜紀の石灰岩を主体とするティツクー(Tizkuh)層からなり、貯水池からダム下流にかけて、ジュラ紀の石灰岩を主体とするラル(Lar)層が分布している(図-1)。ラルダム貯水池周辺には地下水の流動を規制する断層が多数分布し、このうちダム左岸を東西に走る断層はダマバンド安山岩溶岩にリニアメント形成している(Khorsandi et al, 投稿中)。

ラル層が分布する貯水池湖岸には、新旧のシンクホールが多数分布し、直径は20・30mに達する(図-2)。また、ダム下流のラル渓谷には、ラル層分布域に鉱泉の湧出に伴い石灰華が沈殿した大規模なトラバーチンが形成されている(図-3)。

2. 3 ラルダムの漏水経路

上述の地質状況から、ラルダムからの漏水経路としては、①石灰岩中の溶食空洞、②ダマバンド火山岩類、③ダマバンド火山岩類に覆われたラル渓谷の旧河床砂礫層などが考えられる。これまでに実施されたトレーサーを使った水文調査などによれば、主たる漏水経路は、ラル層の石灰岩中に複数存在することが確かめられている。しかし、止水グラウトは、グラウト材の流失のため全く効果がないという。

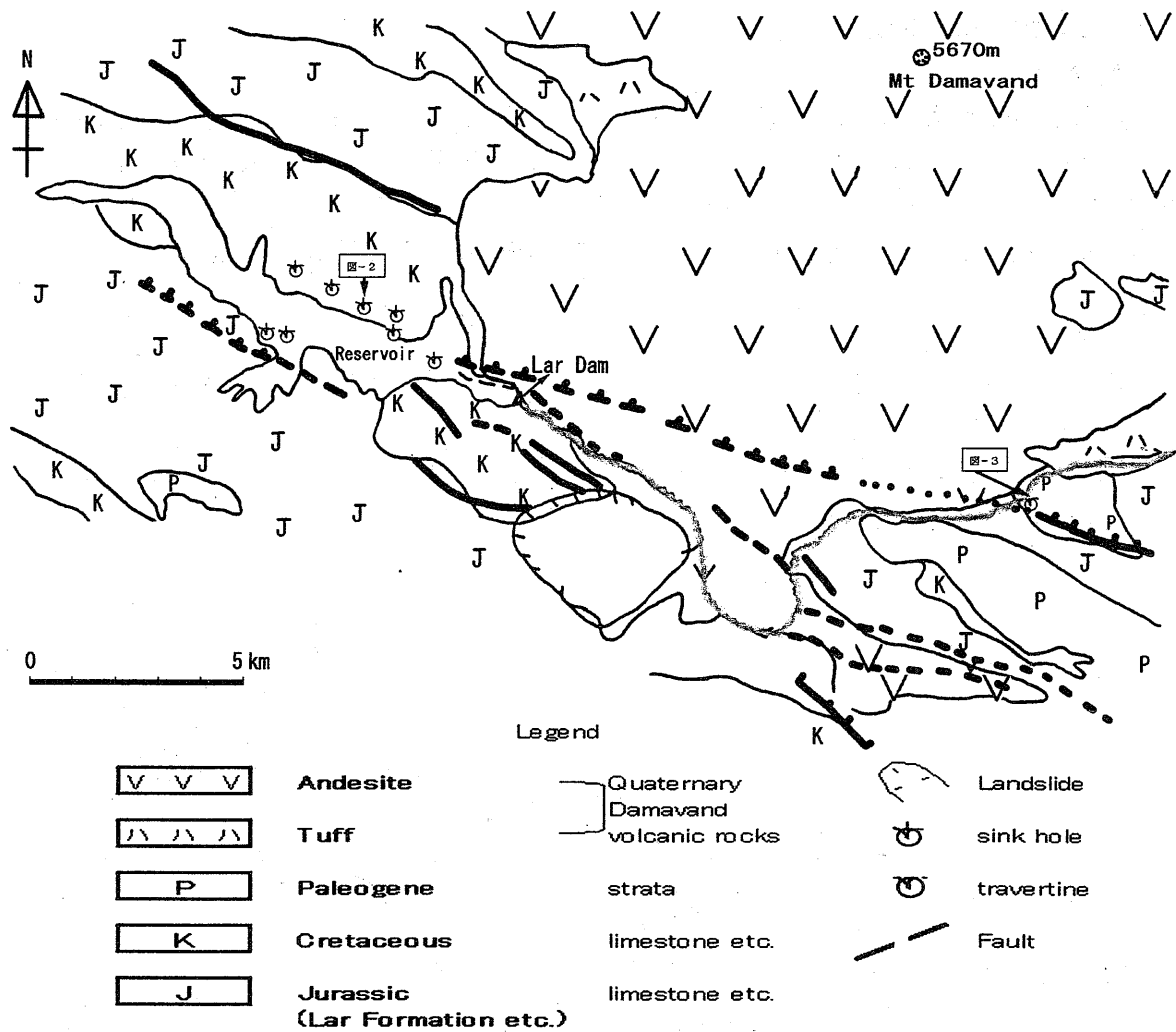


図-1 ラールダム周辺の地質図 (文献3) 5) 9)を編集



図-2 ラールダム貯水池湖岸におけるシンクホール (正面はダマバンド火山、左手前は石灰岩露頭)

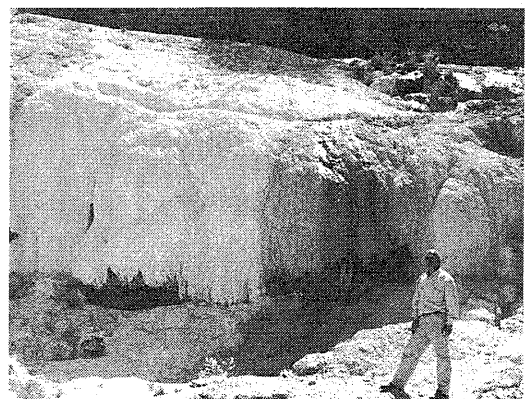


図-3 ラールダム下流におけるトラバーチン

3. 愛媛県南部における地下深部の石灰岩の溶食

3. 1 法華津山地の地下カルスト

(1) 地質概要

四国西端部の愛媛県法華津山地は、肱川と四万十川の分水嶺を形成している(図-4)。法華津山地の南斜面は、最大傾斜 45° の急斜面からなり、その中腹の傾斜変換線(遷緩線)にそって仏像構造線が走っている。仏像構造線の北側には三宝山層群に属する石灰岩、チャート、砂岩・泥岩互層が分布し、南側には四万十層群に属する泥岩、砂岩、これらの互層が分布している。仏像構造線付近の四万十帯には、熱水によるローモンタイト脈が発達している。

(2) 地下カルストの概要

吉田導水路トンネルは、下流坑口(南側)よりの1800m付近において仏像構造線の破碎帯と遭遇し、同坑口よりの1817-2615m、2793-2898m、2938-3033mにおいて石灰岩を掘削し、下流坑口よりの2615-2638m間には古洞穴とこれを充填する堆積物からなる地下カルストが発見された(鹿島・高橋, 1989: 図-5)。地下カルストは、地表下300mを越える海拔130mのレベルに形成され、赤紫色から黄褐色の粘土層を伴っている。

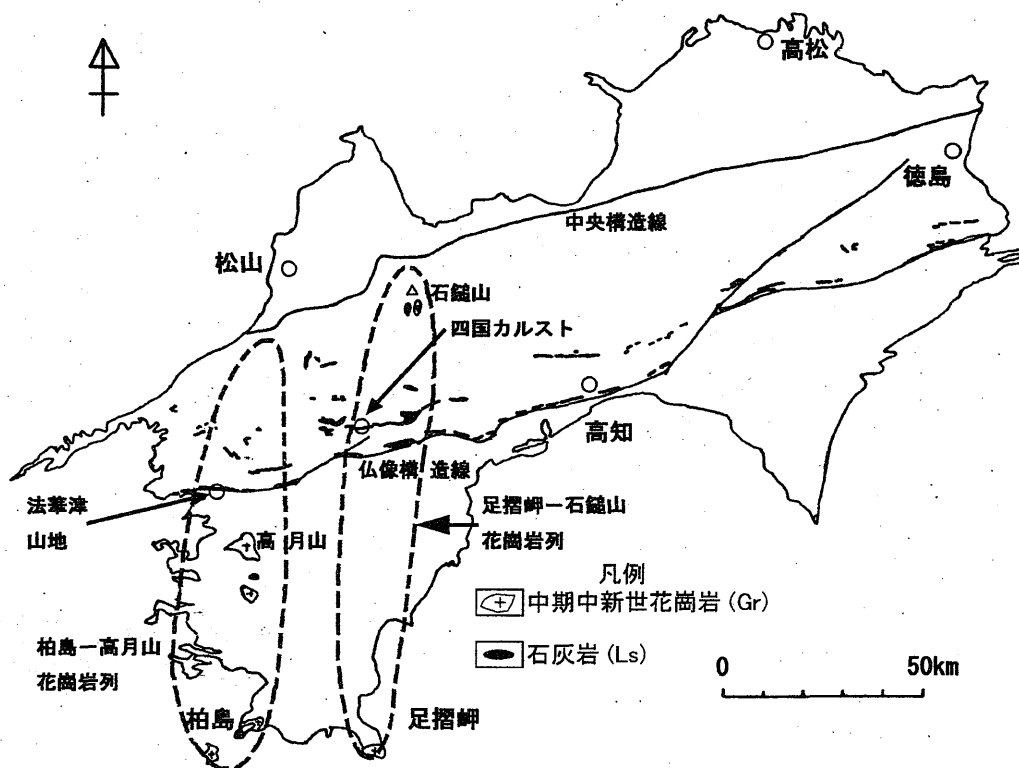


図-4 四国における石灰岩の分布と地下カルスト地点

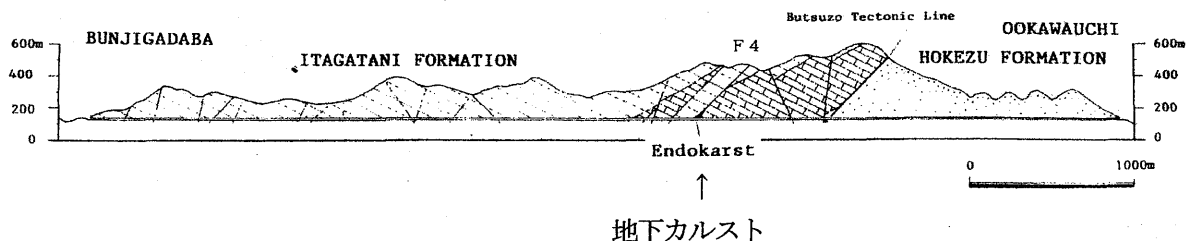


図-5 吉田導水路トンネルにおける地下カルスト (鹿島・高橋, 1989 に加筆)

3. 2 四国カルストの被圧地下水

(1) 地質概要

四国西部の愛媛県柳谷村と高知県梶原村の四国カルストは、仁淀川と四万十川の分水嶺を形成している（図-4）。四国カルストは、秩父帯に属する混在岩（砂岩、チャート、緑色岩などが泥岩中に混入した乱雑な地層）と石灰岩の岩体が分布している。地芳トンネルは、これらの地層群を貫く 2990m の道路トンネルで、平成 12 年 1 月に着工された（大喜多ほか、2003）。地芳トンネルでは、地層は一般に東西走向で北へ傾斜し、同方向の大規模な断層破碎帯が数本推定されている。

(2) 高圧大湧水の概要

地芳トンネルでは、土被り約 240m のところで、約 2MPa (約 20kgf/cm²) の水圧を持つ突発湧水に遭遇した。出水地点は、石灰岩中の小規模な溶食洞穴に対応して、踏前からも湧出した。被圧水の出水は継続している。

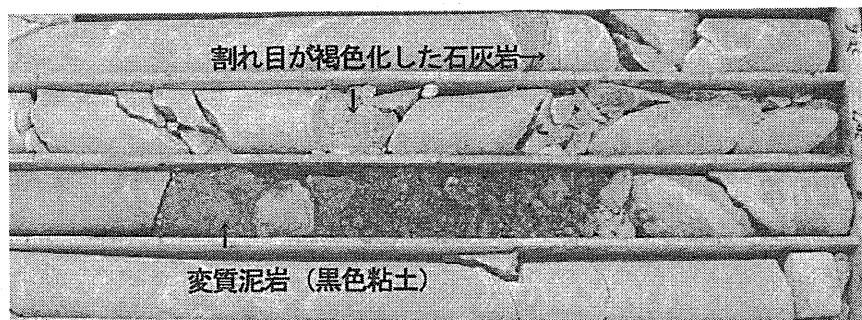


図-6 被圧大湧水箇所のボーリングコア

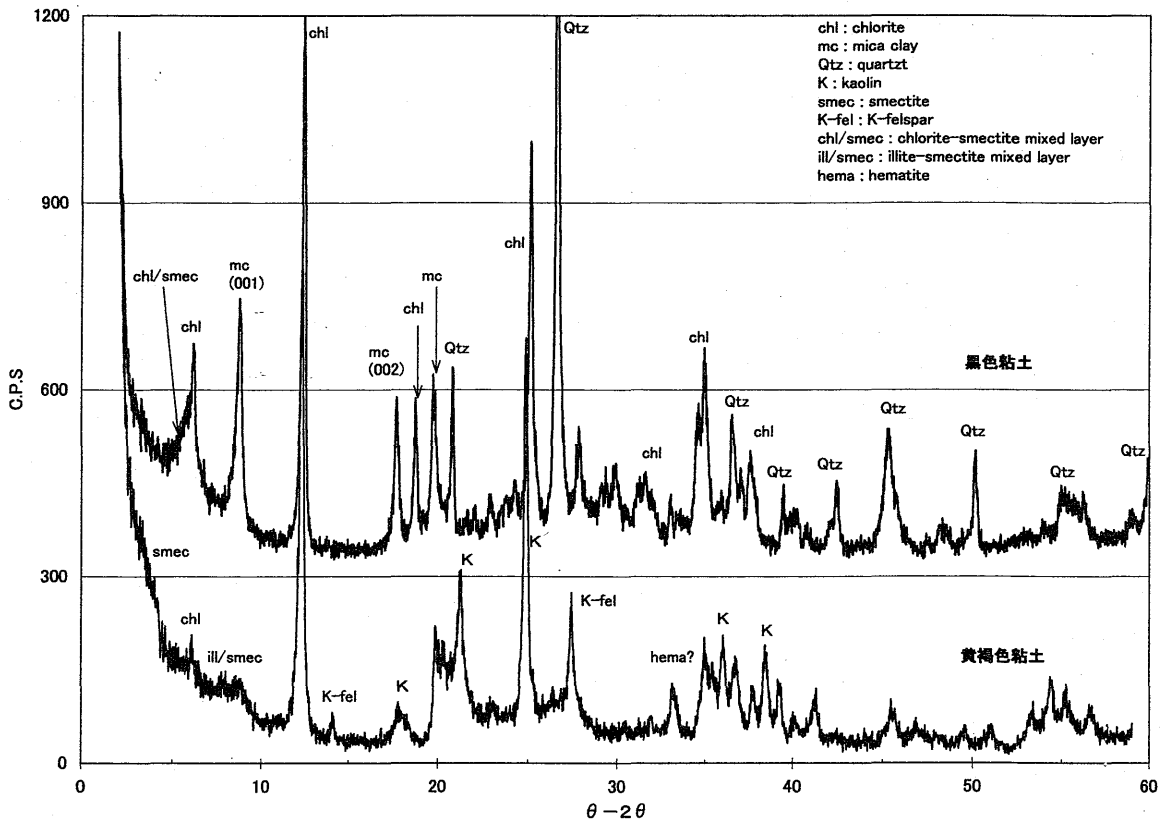


図-7 石灰岩洞穴中の粘土および黒色泥岩変質部の全粉末試料のX線回折結果

(3) 湧水箇所のボーリングコアの鉱物組成

湧水箇所のボーリングコアでは、石灰岩の洞穴に黄褐色の粘土が堆積し、非破砕の石灰岩に変質して粘土化した黒色泥岩が接している(図-6)。この接触関係は、断層破砕でなく、熱水変質を示唆している。黄褐色粘土と黒色泥岩粘土の鉱物組成をX線回折によって検討した。黄褐色粘土はカオリナイトとスメクタイト混合層鉱物を主体とする粘土、黒色粘土は雲母とスメクタイト混合層鉱物を主体とする粘土から構成されている(図-7)。

4. 酸性熱水溶液による石灰岩の溶食の可能性

4. 1 ラールダムの漏水経路の成因

ダムサイトの地質調査は欧州のコンサルタント会社が担当し、渓谷の河床面より地下の地下水面下には、鍾乳洞(横穴)は形成されないとして、ダムが建設されたと推察され。しかし、結果は全く違っていた。この失敗の原因は、石灰岩の溶食の媒体として天水しか想定しなかったためと考える。当地点は、第四紀火山の裾野に位置し、火山活動に伴う熱水の影響も想定しなければならない。また、ダム下流には、鉱泉によって沈殿した石灰からなる大規模なトラバーチンが形成されている。このような状況から、酸性の熱水溶液によって、ラール石灰岩が溶食され、鉱泉水の通路が形成されている可能性を検討すべきであった。

ラールダム貯水池周辺には地下水の流動を規制する断層が多数分布し、このうちダム左岸を東西に走る断層はダマバンド安山岩溶岩にリニアメント形成し、ダムの上下流を貫いている(Khorsandi et al, 2003)。また、この断層沿いの貯水池湖岸には、新しいシンクホールが形成されている。したがって、この断層に沿って熱水が流入して、ラール層中の石灰岩に連続性の良い水みちが形成された可能性が高い。大規模なトラバーチンもこの断層沿いにある。

4. 2 法華津山地における地下カルストの成因

鹿島・高橋(1989)は、NW-SEの走向をもつF4断層が深部地下カルストの場所にあることから、素因の一つと推定している。そして、この洞穴が断層破砕帯(F4断層)に沿う地下水の流動によって当時の侵食基準面近くで形成されたと推定した。しかしながら、周囲の谷が侵食される過程を考えると、過去の地下水面は現在の地下水面より高く、したがって海拔130mよりはるかに高い位置にあったはずなので、地表水による溶食は考えにくい。むしろ、F4断層にそって過去に酸性の熱水溶液が侵入し、石灰岩を溶食した可能性があるのではないだろうか。

鹿島・高橋(1989)は、大分県宇目町木浦地区においても、仏道構造線北側の石灰岩中に同様な地下カルストが地表下約300mのところの形成されていることを紹介している。この木浦地区の石灰岩は新第三紀(14Ma)の黒雲母花崗岩類の接触変成作用をこうむっている(金属鉱物探鉱促進事業団, 1972)。したがって、中期中新世の火成作用に伴う酸性熱水溶液によって、木浦地区の地下カルストが形成された可能性が考えられる。

同時代の花崗岩類は四国西部にも南北方向に広く伏在し、広範囲に熱水変質作用を与えた可能性が指摘されている(長谷川, 2002)。また、四国西部においては地表分布から、柏島—高月山と足摺岬—石鎚山の2つの中期中新世花崗岩列がある(木村, 1985)。法華津山地はまさに、柏島—高月山の花崗岩列に対応する(図-4)。したがって、地下深部における石灰岩の溶食は中期中新世の珪長質火成活動に伴う熱水変質作用のよって形成されたと推定する。

4. 3 四国カルストにおける被圧地下水の成因

通常の石灰岩洞穴は地下水面にそって形成されるため、そこを流れる天水起源の地下川が、地芳トンネルの湧水にみられる水頭200mもの被圧地下水を形成するとは考えにくい。逆に、水頭約200mの水圧は、この洞穴が地下水面に沿って天水によって形成されたものでないことを示している。なぜなら、カルスト地形にある天水起源の地下川は、基本的には不圧地下水と考えられるからである。

石灰岩の洞穴の周辺には、スメクタイト混合層鉱物、カオリナイトを主体とする変質粘土が形成されている。

このカオリナイトは、土被り 240m の地下にあることから、地表における風化でなく、酸性の熱水溶液によって形成された可能性が高い。すなわち、石灰岩の洞穴近傍は酸性熱水溶液によるカオリナイト帯から中性熱水溶液による混合層帯の熱水変質帯が形成されたと推定される。当地区は、四国西部に伏在すると推定される花崗岩列のうち、足摺岬—石鎚山花崗岩列に対応している(図-4)。したがって、熱水溶液は中期中新世の珪長質火成活動に伴って形成された可能性が高い。なお、この高圧大湧水は長期間継続していることから、水みちは広範囲に広がっていると推定される。このような水みちは、石灰岩岩体に連続性の良い断層が存在し、その断層に沿って熱水溶液が流量した可能性を示している。

5. まとめ

熱水溶液による石灰岩の溶食作用は、大規模な水みちを形成し、ダム貯水池からの漏水、トンネル工事における大湧水の原因になる。特に連続性のよい断層沿いに形成された石灰岩の洞穴は、その規模が小さくても連続性のよい水みちを形成している可能性が高い。また、このような水みちからは、被圧した大湧水が発生する可能性がある。また、湧水箇所の近傍では、熱水変質作用による粘土化によって膨張性の高い地山が形成される場合もある。したがって、石灰岩分布域でかつて火成活動があった地域には、水溶液による地下深部からの石灰岩の溶食作用を受けている可能性も想定して地質調査を行う必要がある。

このためには、まず周辺地域における火成岩体の分布と熱水変質作用の有無を把握しておく必要がある。熱水変質作用は地表風化を受けていると判別しにくいので、河床部における未風化の岩体、もしくはボーリングコアなどの観察が不可欠である。そして、地下深部における岩盤の粘土化や褐色化を深層風化と思わず、粘土鉱物組成をX線回折で確認する必要がある。また、熱水の通路となりやすい断層などに関する地質構造調査も重要である。そして、断層破碎帯の熱水変質の有無を粘土鉱物組成などから確認する必要がある。

謝辞 ラールダムの現地調査の機会を与えていただいたイランエネルギー省 Power & Water Institute of Technology 土木工学科 N. Hassani 教授、地芳トンネル工事を見学させていただいた国土交通省四国地方整備局中村工事事務所および鹿島・日本国土特定建設工事共同体の関係各位に厚くお礼申し上げます。

〈引用文献〉

- 1) 地学団体研究会新版地学事典編集委員会 (1996) : 新版地学事典、平凡社
- 2) 長谷川修一 (2002) : 四国の地質現象の黒幕としての中期中新世珪長質火成岩体, 日本応用地質学会平 14 年度研究発表会論文集, 23-26.
- 3) Jamshidi, Kh., Maasoom, Ro. (1997) : Geological Map of Damavand, Geological Survey of Iran.
- 4) 鹿島愛彦・高橋治郎 (1989) : 四国西部法華津山地の地下カルスト (南予用水農業水利事業隧道の地質学的研究—その6), 愛媛大学起用自然科学D シリーズ (地学) 第X I 巻第2号, 1-10.
- 5) Khorsandi, A., Miyata, T., Hassani N. (2004): SINKHOLE ARRAY INDICATIVE OF WATER DISCHARGE ALONG FAULTS BENEATH THE LAR DAM LAKE, NORTHEAST OF TEHRAN (IRAN). (投稿中)
- 6) 木村敏雄 (1985) : 日本列島—その形成に至るまで— (III下), 古今書院, 1715—2155.
- 7) 金属鉱物探鉱促進事業団 (1972) : 昭和 46 年度精密調査報告書. 祖母傾山地域, 68p.
- 8) 大喜多孝雄・宮下保之・宮脇工・北側幸夫 (2003) : 四国カルスト直下の付加体メランジェを貫く一般国道 440 号線地芳トンネル, トンネルと地下, 34 (4), 27-36.
- 9) Sahbai, M., Chaichi, Z., Nozari, A. (2000): Geological Map of East Tehran, Geological Survey of Iran.