



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	宇根鉦山における地下水位および水質の挙動分析と残壁安定化を目的とした降雨対策
Author(s)	近藤, めぐみ
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第7124号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r7124
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81285
Type	doctoral thesis
File Information	Megumi_Kondo.pdf



宇根鉱山における地下水位および水質の挙動分析と
残壁安定化を目的とした降雨対策

Analysis of groundwater level fluctuation and its quality around rock slopes and
countermeasures against rainfall toward stabilizing the slope at the Une mine

2021年3月

近藤めぐみ

第1章 緒論	4
1-1. 本研究の目的	4
1-2. 内容の概観	4
第2章 武甲山の地質概況とモニタリング結果	10
2-1. 緒言	10
2-2. 武甲山残壁概況	10
2-2-1. 武甲山広域の地質および鉱床	10
2-2-2. 互層帯	12
2-2-3. 断層及び弱線	14
2-2-4. 武甲山の残壁規格	14
2-3. モニタリング概況	16
2-4. 地表面変位計測	16
2-4-1. APS 計測	16
2-4-2. GPS 計測	20
2-4-3. APS と GPS の比較	24
2-5. 岩盤内変位計測	25
2-5-1. 挿入式傾斜計	25
2-6. 調査坑道	28
2-6-1. 概要	28
2-6-2. 亀裂変位計概要	29
2-6-3. 亀裂変位計計測結果	31
2-6-4. 地表面計測との関係性	32
2-7. 結言	35
第3章 武甲山残壁における地下水位挙動と残壁変位に与える影響	38
3-1. 緒言	38
3-2. 武甲山周辺の水理状況および水理計測の概要	38
3-2-1. 秩父地域の降雨状況	38
3-2-2. 武甲山の水理状況	39
3-2-3. 残壁内部の透水性	39
3-2-4. 地下水位の計測方法	40
3-3. 地下水位の計測結果	42
3-3-1. 短期的な地下水位変化（間隙水圧計の計測結果）	42
3-3-2. 短期的な地下水位変化（投げ込み水位計の計測結果）	43
3-3-3. 長期的な地下水位変化	44
3-4. 降雨量が地下水位に与える影響	45
3-4-1. さまざまな降雨状況における地下水位変化	45

3-4-2. 地下水位の上昇および下降速度	47
3-4-3. 旧地形および断層の影響	49
3-4-4. 水位上昇のメカニズム	50
3-5. 地下水位と亀裂変位速度	50
3-5-1. 残壁上部の地下水位と亀裂変位速度との関係	51
3-5-2. 地下水位の上昇時における亀裂変位速度	51
3-5-3. 地下水位の下降時における亀裂変位速度	54
3-5-4. 残壁下部の水位と亀裂変位速度	54
3-5-5. 水位感度曲線	55
3-6. 結言	57
第4章 残壁安定化を目的とした宇根鉱山の降雨対策工事とその効果	60
4-1. 緒言	60
4-2. モニタリングと対策工事の種類	60
4-2-1. モニタリング概況	60
4-2-2. 対策工事概況	62
4-3. 降雨対策工事	63
4-3-1. 水抜きボーリング工	63
4-3-2. 揚水工	65
4-3-3. 舗装工	67
4-4. せん断面対策工事	68
4-4-1. 鋼管杭工	68
4-4-2. 盛石工	69
4-5. 対策工事によるモニタリングデータの変化	71
4-5-1. 対策前後の地下水位の変化	71
4-5-2. 亀裂変位速度の継時変化	73
4-6. 降雨対策効果の検証	74
4-6-1. 降雨量に対する変位挙動	74
4-6-2. 豪雨時の変位量の変化	75
4-6-3. 地下水位と No.5 亀裂変位速度	76
4-6-4. 豪雨時の水位シミュレーション	77
4-6-5. 年間亀裂変位量の経時変化	79
4-7. 結言	80
第5章 武甲山における水質調査と残壁管理への応用	82
5-1. 緒言	82
5-2. 武甲山の状況と対策	82
5-2-1. 地下水位と残壁変位との関係	82

5-2-2. 降雨対策工事.....	82
5-3. 地下水の採水および水質分析	83
5-3-1. 水質分析の目的.....	83
5-3-2. 採水地点と採水方法.....	84
5-3-3. 水質分析方法.....	86
5-4. 水質分析の結果と考察.....	86
5-4-1. 現場計測結果.....	86
5-4-2. 主要成分分析結果.....	89
5-4-3. 岩種と水質との関係.....	91
5-5. 降雨対策工事と水質分析	93
5-6. 結言	96
第6章 結論	99
謝辞	101

第1章 緒論

1-1. 本研究の目的

日本の石灰石鉱山の多くがベンチカット工法による露天掘採を行っており、その安定性の確保は保安、生産効率の観点で重要な問題である。また、これまでも残壁の安定性に関する研究が国内外で行われている^{1~19)}。残壁の安定性には、斜面の形状、岩盤の力学特性、亀裂の状態、地層状況、地下水の状態など多くの要因に関係するが、特に地下水や降雨が残壁の安定性に与える影響の評価は重要であり、実際に降雨に起因して発生した残壁崩壊が報告されている^{20~28)}。また今後は、残壁の長大化により、残壁の維持管理はより一層重大な課題になる。

本研究の対象となる菱光石灰工業(株)宇根鉱山は、秩父太平洋セメント(株)三輪鉱山、武甲鉱業(株)武甲鉱山とともに、埼玉県秩父地域の武甲山で石灰石の採掘を行う鉱山である(図1-1参照)。武甲山では、ベンチカット工法による採掘に伴い、国内最大規模のカーロック型の残壁が造成されている(図1-2参照)。武甲山を採掘する三社では自然環境を考慮した安全な残壁の設計と残壁の保守管理に資する目的で秩父残壁研究会(以下、秩父残研)を組織し、1994年から挙動の監視を行っている。モニタリング開始当初より残壁の広域計測を目的として、APS(Automated Polar System, 自動光波距離計)による表面の変位計測を行っていたところ、2007年台風襲来時に宇根鉱山の残壁の一部で変位が急増する傾向が計測データから確認された。これを受け、宇根鉱山では対策工事として水抜きボーリングを実施する一方で、残壁内に水位計を設置し、岩盤内の地下水挙動の把握に努めてきた。降雨時に変位の増加が確認できることから、岩盤に浸透した降雨が何らかの影響を与えていることは推測できるが、広大な残壁では変位の要因となる地下水位ポイントを特定することが困難である。そこで、複数の地下水位計測ポイントを設けてその地下水位ポイントを特定するとともに地下水位が残壁の変位に影響を及ぼす要因を考察すれば、より効果的な対策工法を検討することができると考えた。以上の観点から、筆者は地下水位と変位の関係を分析し、それに基づいて対策工事の効果の検証を試みた。

本論文では、地下水が残壁の安定性に及ぼす影響を解明することを目的として、これまでに宇根鉱山で実施してきた地下水調査、モニタリング計測、そして降雨や地下水の影響を低減する工事(以下、降雨対策工事)の効果に関する研究の成果を取りまとめる。そして、これらの結果から、将来にわたる長期的安定性を確保するためには、地下水理の実態を把握した上で、残壁の安定化のための管理手法を構築しようと試みた。すなわち、残壁の管理手法として、従来のモニタリング手法や対策工事に加えて、水質調査に基づく安定性評価・管理手法を提案する。

1-2. 内容の概観

本論文は、石灰岩残壁の安定性確保を目的として、残壁変位に与える地下水挙動と残壁変位挙動の分析を行い、それに基づき実施した降雨対策工事の効果の検証を行う。そして、新たな地下水挙動の分析手法として水質分析を行い、残壁管理の評価手法として検討す

る。本論文は、緒論と結論を除き、4つの章で構成されている。

第2章では、研究の対象となる武甲山残壁の概況として、武甲山の地質および残壁規格、残壁のモニタリング結果を述べる。武甲山の残壁は日本最大級であることから、安全を考慮した残壁設計を行い、表面変位計測を始めとした様々な手法を取り入れながら残壁挙動のモニタリングを行ってきた。本章では、これまで武甲山で実施しているモニタリングである表面変位計測および挿入式傾斜計、調査坑道計測の計測手法について述べる。そして、各計測結果とモニタリング結果から読み取れる残壁の全体的な挙動の考察、および各計測手法の信頼性について検討した。その中で、調査坑道に設置した亀裂変位計測は高精度かつ安定した連続データを取得可能であるとともに、残壁表面計測結果との相関性が高いことから、残壁変位の分析への有用性について考察する。

第3章では、各計測手法のモニタリング結果において、降雨時に残壁変位の著しい増加が確認できることから、岩盤に浸透した降雨が何らかの影響を与えていると考え、地下水位が変位に影響を及ぼす要因を考察する。まず、残壁に設置した間隙水圧計の計測データから、岩相ごとの地下水位挙動を分析し、それぞれの岩相が有する地下水挙動の特徴を考察する。また、複数の降雨時の投げ込み式水位計の結果から、降雨と水位上昇の関係を分析し、特に水位上昇が大きい宇根鉾山東側において、旧沢地形や断層が水位上昇に与える影響について考察する。更に、調査坑道内の亀裂に設置した亀裂変位計を用いて、地下水位と亀裂変位速度の関係性を分析し、降雨パターンによる残壁変位挙動メカニズムの相違や残壁変位に支配的な地下水位の特定を行う。その結果、降雨時には残壁上部の地下水位が残壁変位に支配的で、豪雨時は残壁下部の地下水位が支配的であり、地下水位は残壁全体の変位にも何らかの影響を与えていることを明らかにする。

第4章では、地下水位挙動の考察に基づき実施した、宇根鉾山の残壁安定化工事の事例を報告する。残壁安定化工事には、浸透防止対策、水抜き対策、せん断面対策の3種類があり、この中で浸透防止対策と水抜き対策を降雨対策工事としている。まず、各工事の方針と施工方法を報告し、モニタリングデータを使用し、各工事の効果を検証する。まず、浸透防止を目的とした舗装工では、降雨時の地下水位の上昇抑制効果を確認し、降雨による変位の抑制効果を評価する。また、水抜き対策工事として実施した揚水工に関して、地下水位の明確な低下や、全体的な亀裂変位速度の低減効果を確認する。各対策工事は緊急性があるために同一期間で実施しているものもあり、それぞれの効果を個別に判別することは困難である。しかし、施工時期や水位低下状況を考慮すると、せん断面対策工事より降雨対策工事の効果が大きいと考える。そして、重回帰モデルから過去の最大降雨量を大幅に上回るような豪雨が襲来したと仮定したシミュレーションを行い、一連の降雨対策工事により、水位上昇は抑制されるかを検証する。

降雨対策工事の成果により、武甲山の残壁は安定方向に向かっていると判断されるものの、将来にわたる長期的安定性を確保するためには、地下水理の実態を把握した上で、残壁の安定化のための管理手法を構築する必要がある。しかし、石灰岩地帯の地下水理は複雑

であり、残壁の安定化に直接影響する地下水を同定し、その水頭を低下させることは難しい。そこで、第5章では、新たな水抜き対策工事の評価手法として、残壁内の地下水を採取・分析し、降雨や岩種によって水質がどう変化するか分析を行う。湧水量、pH、ECなどの現場計測結果から、当該残壁内の地下水は、石灰岩層中の地下水、下盤の緑色岩類中の地下水、互層帯中の地下水に分類されることを明らかにする。更に、各種イオンなどの水質分析により、岩種と地下水の水質との対応がより明瞭となり、石灰岩、緑色岩類、互層帯のそれぞれに由来する地下水の判別が可能となることを考察する。次に、第4章で述べた水抜き対策工事の一つである揚水工の水質変化を詳細に分析し、各岩相に由来する地下水の混合比率を求めたところ、揚水された地下水は、石灰岩層と互層帯のそれぞれに由来する地下水が混合していること示唆しており、そのため由来する地下水の混合比率を評価する。その結果、互層帯からの湧水量が減少していることなどを明らかにし、揚水工により残壁中の亀裂変位速度が低下したことを確認する。

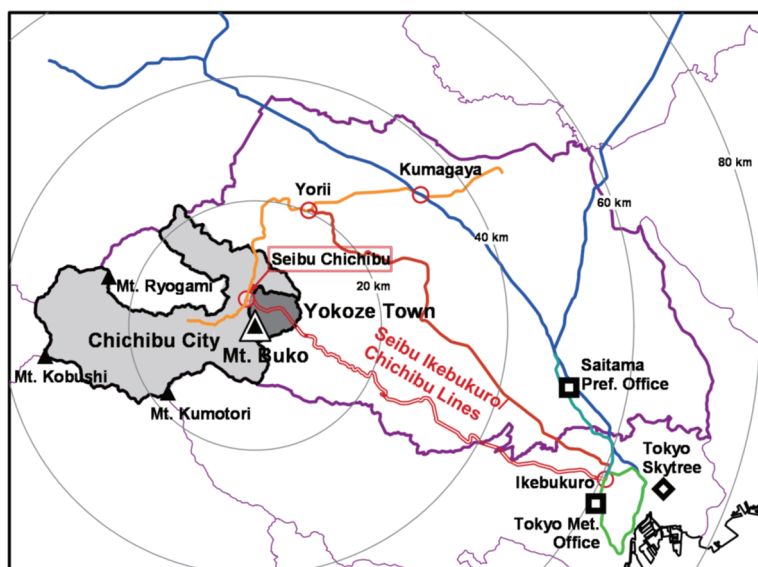


図 1 - 1 Chichibu and Mt. Buko with the Seibu Ikebukuro/Chichibu lines connecting Tokyo and Chichibu¹⁾.



図 1 — 2 An aerial view of the rock slope of Mt. Buko's Yellow lines showing the mine boundaries¹⁾.

参考文献

- 1) Zienkiewicz, O.C., B. Best, C. Dullange and K. C. Stagg : Analysis of non -linear problem in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems, Proc. of 2nd Cong. on Rock Mechanics, ISRM, Beograd, Vol.3, pp.501-509, 1970
- 2) 橋本 文作, 村山 秀幸, 田中 隆之: 石灰石鉱山における長大残壁の安定性評価へのブロック理論の適用, Journal of MMIJ, 109 巻 5 号 347-354, 1993
- 3) 宇野 晴彦, 石田 毅, 水田 義明: 岩盤モデルおよび解析手法の歴史的な変遷と特徴, Journal of MMIJ, 118 巻 3,4 号 150-156, 2002
- 4) 水田 義明, 岡崎 幸司, 永田 邦博: 弱面を含む岩盤斜面の 3 次元応力・変位解析, Journal of MMIJ, 112 巻 10 号 695-699, 1996
- 5) 金子 勝比古, 野口 義文, 曾田 健, 波津久 亮: 岩盤内変位計測による掘削斜面の安定性評価, Journal of MMIJ, 112 巻 13 号 915-920, 1996
- 6) 野口 義文, 曾田 健: 井倉鉱山における残壁監視の現状と今後の課題, Journal of MMIJ, 113 巻 6 号 408-412, 1997
- 7) 山下 秀, 杉本 文男, 山内 優, 森 聡, ナムスライ デンベレル: 軟岩の圧縮クリープ過程と微視的構造の変化 岩石のクリープ破壊機構に関する研究 (その 1), Journal of MMIJ, 113 巻 11 号 817-824, 1997
- 8) 福井 勝則, 金 豊年, 大久保 誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲, 線 Journal of MMIJ, 111 巻 1 号 25-29, 1995
- 9) 中村 直昭, 津嘉山 良治, 平田 篤夫, 金子 勝比古: カバーロック型残壁の変形計測とその解釈, Journal of MMIJ, 119, 547-552, 2003
- 10) 金子 勝比古, 中村 直昭, 尾原 祐三, 伊藤 耕介, 米田 哲朗, 加藤 昌治: 鳥形山地域の広域的応力状態の推定, Journal of MMIJ, 116 巻 7 号 572-576, 2000
- 11) 児玉 淳一, 金子 勝比古, 都築 雅年, 西山 えるむ: 井倉鉱山における残壁の長期変形計測とその解析, Journal of MMIJ, 120, 182-189, 2004
- 12) 西山 えるむ, 宮本 高充, 児玉 淳一, 川崎 了, 金子 勝比古 : Journal of MMIJ, 124 巻 9 号 p. 570-575 採掘変形計測による広域応力と地盤ヤング率の評価, 2008
- 13) 田中 芳則: 扇射探索法による採石場斜面の安定性評価, 応用地質, 113 巻 6 号, 408-412, 1997
- 14) 村山 秀幸, 花村 均, 佐野 康臣, 小山 了二, 門田 俊一, 橋本 文作: 坑内掘削による異形空洞を有する石灰石露天掘削残壁の安定性評価, Journal of MMIJ, 112 巻 1 号 1-9, 1996
- 15) 尾原 祐三, 西山 えるむ, 姜 聲承: J 高感度傾斜計による岩盤斜面モニタリングと挙動分析, Journal of MMIJ, 122 巻 12 号 582-588, 2006
- 16) 橋本 文作: 多層構造からなる大型岩盤斜面の安定性, 日本鉱業会誌, 102 巻 1177 号

137-142, 1986

- 17) 木戸 研太郎, 吉中 龍之進, 萩原 捷男, 佐々木 猛, 佐々木 勝司: 長大岩盤掘削斜面の長期計測事例に基づく変形挙動解析と安定性評価, 土木学会論文集, 2000 巻 666 号 231-243, 2000
- 18) 江崎 哲郎, 蔣 宇静, 永富 雅幸, 後藤 直人: 不連続性岩盤斜面に生じる転倒崩壊機構に関する基礎的研究, Journal of MMIJ, 113 巻 4 号 233-240, 1997
- 19) 西田 正, 江崎 哲郎, 柴田 邦彦: 応力と変形からみた岩盤斜面の安定に関する基本的検討, 日本鉱業会誌, 97 巻 1120 号 437-443, 1981
- 20) 吉田 秀典, 野崎 郁郎: 降雨時における鉱山残壁の安定性波津久 亮に関する研究, 構造工学論文集 A, 54A 巻 102-113, 2008
- 21) 菅原勝彦, 秋本昌胤, 尾原祐三, 岡村宏: 露天掘斜面の崩壊事例とその解析, 熊本大学工学部研究報告, 第 33 巻, 第 1 号, pp.21-30, 1984
- 22) Kennedy, B.A., K.E. Niermeyer, B.A.Fahm and J. A. Bratt : Trans of AIME, 250, pp.55-61, A case study of slope stability at Chuquicamata Mine, 1971
- 23) MMIJ 岩盤工学部門委員会・露天採掘部門委員会: 残壁ハンドブック, MMIJ, pp. 265-271, 2005
- 24) 山口 梅太郎: ある石灰石鉱山における斜面崩壊の事例について, 日本鉱業会誌, 97-1125, 1157-1162, 1981
- 25) 吉田 秀典, 木下 尚樹, 大野 雅之: 鉱山残壁の崩壊事例の調査と安定性の検討, 土木学会論文集, 64 巻 1 号, 57-66, 2008
- 26) 川村 國夫, 村山 秀幸, 橋本 文作, 近藤 久善, 西川 幸成: 不連続性岩盤斜面の崩壊例に基づく個別要素法の実際への適用, 土木学会論文集, 1997 巻 568 号 175-185, 1997
- 27) Roberts, D. & Hoek, E. : 1st Int. Conference on Stability in Open Pit Mining, Vancouver, A study of stability of disused limestone quarry face in the Mendip Hills, England, Proc. 1st Int. Conference on Stability in Open Pit Mining, Vancouver, AIME, New York, pp.239-256, 1972
- 28) Calder, P. N. & G. Blackwell: ブレンダ鉱山における岩盤斜面変位の研究 (その 1) , CIM Bulletin Aug, 抄録 : 石灰石, 189 号, pp.57-63, 1981

第2章 武甲山の地質概況とモニタリング結果

2-1. 緒言

緒論でも述べたように、武甲山では、国内最大規模のカバーロック型の残壁が造成されており、武甲山を採掘する三社では安全な残壁の設計と残壁の保守管理に資する目的で秩父残研を組織し、地質調査から残壁モニタリングまでの一連の調査・管理計測を実施している。

ここでは以降の議論の前提として、まず、これまでの調査報告例^{1~10)}から、武甲山の石灰石鉱床・地質と種々の残壁モニタリングなどの概要を紹介する。

2-2. 武甲山残壁概況

2-2-1. 武甲山広域の地質および鉱床

武甲山の石灰石鉱床と地質について、これまでにたびたび、論文や研究発表会等で内容が報告されているが、本節では、2018年に山富らによって発表された論文¹⁾から主に引用する。

武甲山の地質に関して、図2-1に地質平面図を、また図2-2に地質断面図を示す。武甲山は秩父累帯に属し、北から上影森層、武甲山層、一の沢層が西北西―東南東方向に分布する。上影森層は武甲山北側山麓から生川東方にかけて広く分布し、泥質岩・砂岩互層の基質中に大小様々な規模で石灰岩、チャート、緑色岩類などが含まれる混在岩相である。武甲山層は武甲山々稜中に分布し、緑色岩類とこれを覆う石灰岩を主体とする。緑色岩類は暗緑色から赤紫色を呈しており、玄武岩類を起源とするものである。石灰岩は灰白色～暗灰色を呈しており、塊状で層理面は不明瞭である。石灰岩中には一部黒色石灰岩ないし頁岩が認められる。一の沢層は武甲山々稜の南側に広く分布し、赤色層状チャートおよび赤色～淡緑色の様々な色調を呈する珪質凝灰岩を主体とし、これに緑色岩類と黒色の泥質岩およびわずかながら石灰岩と砂岩を挟む。

石灰石鉱床を形成する武甲山層は西北西―東南東の走向を持ち、北に急傾斜している。石灰石鉱床の分布幅は最大1,000 mに及ぶが、西へ向かって次第に細くなる。鉱床と下盤の緑色岩類の境界部の傾斜は、山頂から1,000 mL付近までは約45°であるが、1,000 mL以下では傾斜を増し60°以上となっている。緑色岩類の新鮮なものは堅固であるが、節理などの亀裂や構造運動に伴う弱面等に存在した水による変質作用などが加わり、一部に脆弱化が認められる。特に、地層境界付近の緑色岩類は片状構造および鏡肌が発達して脆く、細片状に剥離しやすいので、緑色岩類の風化・変質の予防のため、下盤側の石灰岩を一部掘り残し、残壁を石灰岩のカバーロックで覆うこととなった。

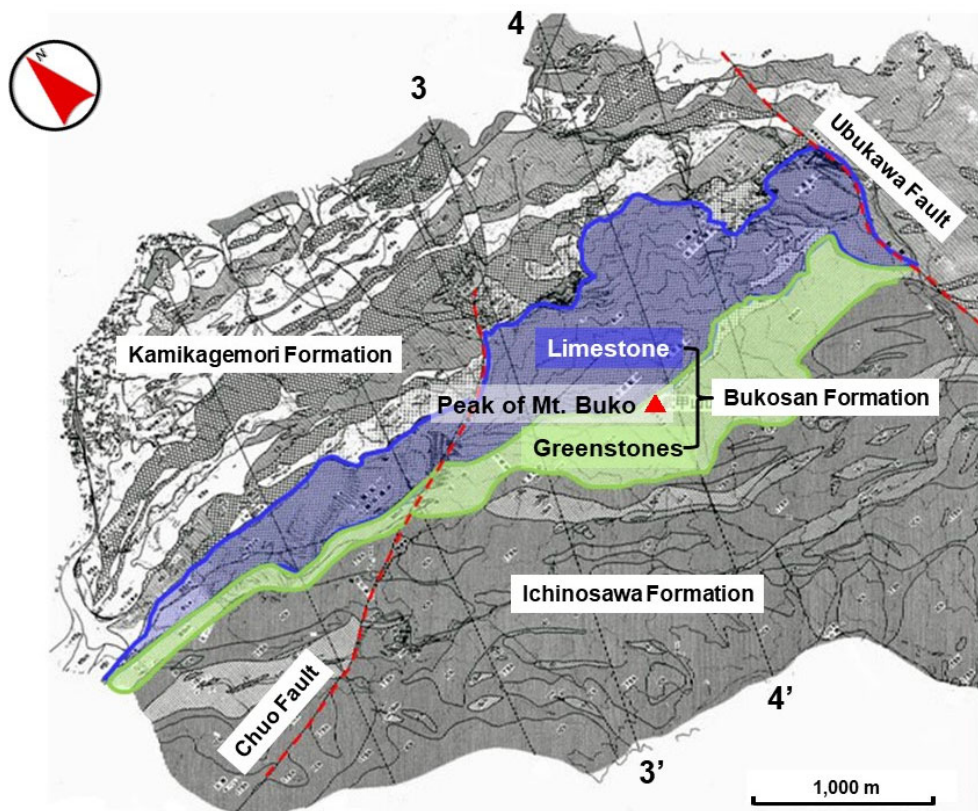


図 2 - 1 Geological plan view of Mt. Buko limestone (blue) and greenstones (green)¹⁾.

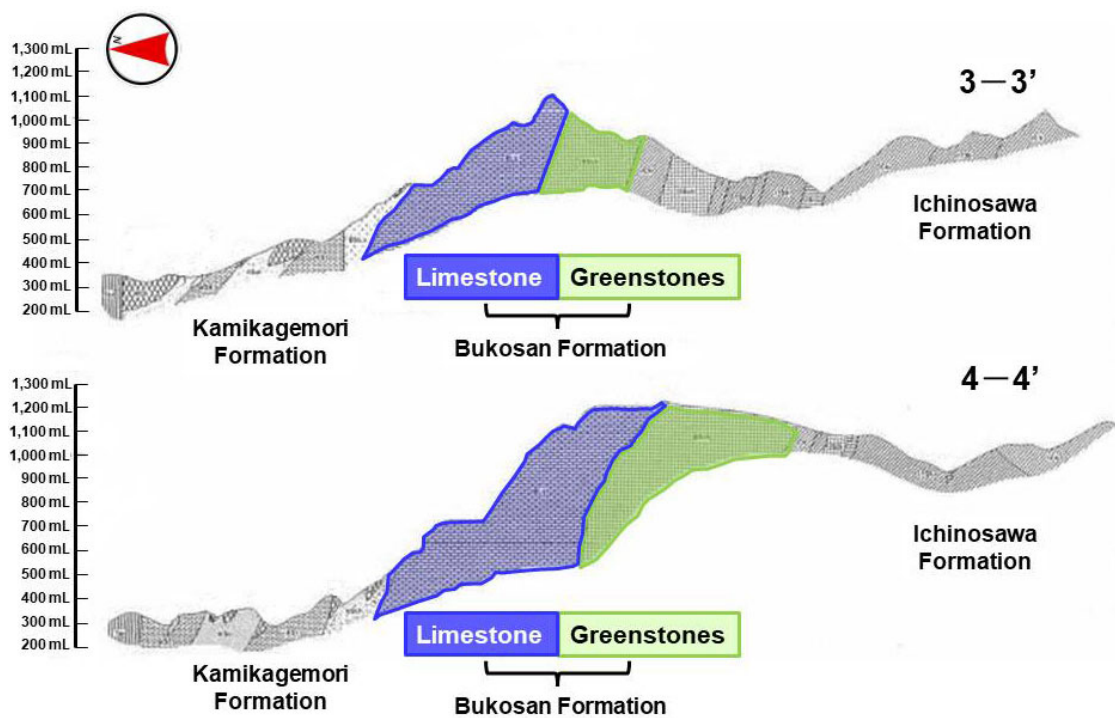


図 2 - 2 Geological cross sections of Mt. Buko lime-stone (blue) and greenstone (green)¹⁾.

2-2-2. 互層帯

宇根鉾山の各調査坑道における下盤境界部には、石灰岩および緑色岩類が混在する岩相が見かけ厚さ数 cm～10 数 m で分布しており、秩父残研では互層帯と呼称している。互層帯に関しては、秩父残研の地質小委員会によって石灰石 (2001)に詳細が記載されており、以下本項では、その特徴を引用する⁴⁾。

互層帯内の岩相は一樣ではなく、また平面的な連続性に関しても宇根鉾山残壁内に広く分布しているのに対し、武甲鉾山内にはわずかな区域にのみ確認される。図 2-3 は一例として、1,000 mL における互層帯の分布範囲を示している。宇根鉾山残壁内の互層帯は石灰岩と整合関係にあるものと考えられるが、1,010 mL 坑道内では互層帯内部に破砕帯を確認している。このように互層帯は局所的な分布を示し、また岩相も一樣でないことから、互層帯の成因については初生的な堆積構造によるものか、断層等の影響に伴い分布するものか、明確な結論は得られていない。

上記のとおり互層帯中の断層構造、あるいは互層帯の連続性を詳細に把握するには至っていないため、便宜上、図 2-4 に示すようにケース①～④の前提条件および定義を設定し、地質的な見地から互層帯を解釈している。この定義に基づいて岩相は石灰岩／互層帯／緑色岩類の 3 つのゾーンに分類される。

- ① 複数の岩相が混在する区間において、互層帯の下部境界を定めた上で、当該区間の深部から浅部方向に向かって石灰岩の割合が 70%を下回った石灰岩と非石灰岩の境界を互層帯の上部境界とする。ただし、周辺の試錐データ等から混在する岩相が、局所的で不連続な岩体であると判断される場合には、上記①の基準外とし、“挟み”とみなす。
- ② なお、石灰岩には泥質石灰岩ならびに石灰質泥岩は含めない。
- ③ また、上記①の基準では“互層帯”とならない区間でも、周辺の試錐データ等を考慮して“互層帯”とみなす場合がある。
- ④ 石灰岩中の空洞および石灰岩の粉化した粘土、地表部等から流入した粘土については石灰岩に含めるものとし、地層境界部に存在する空洞および粘土については石灰岩には含めないものとする。

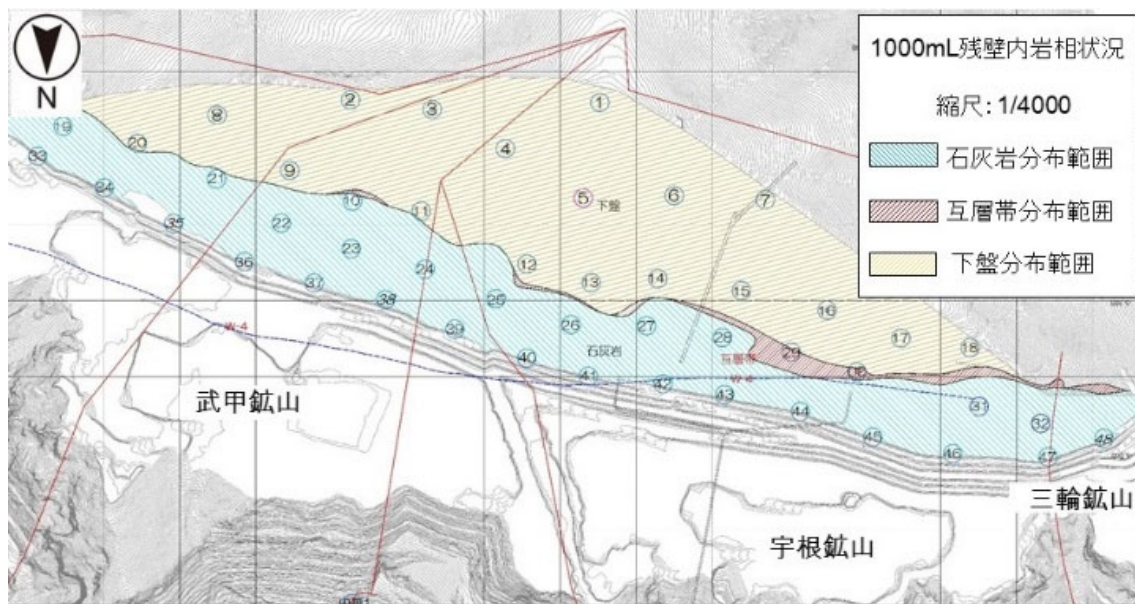


図 2 - 3 Distribution of interbedded zone at 1,000mL in the rock mass.

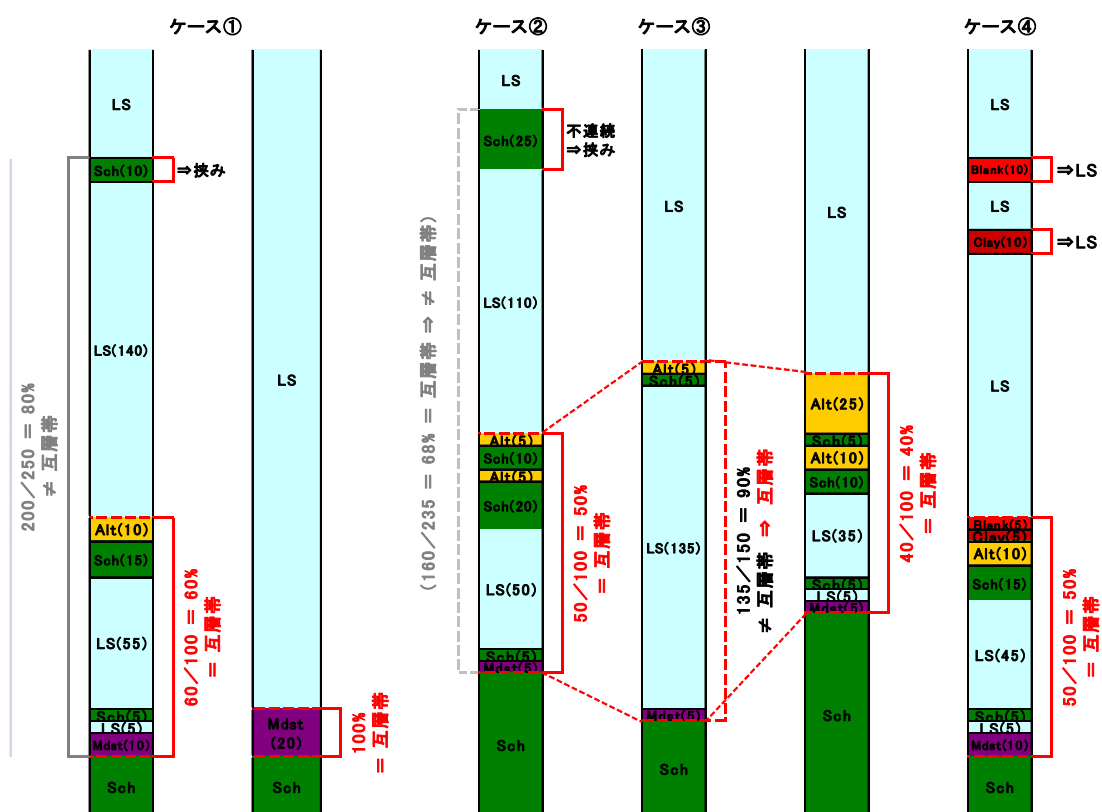


図 2 - 4 Definition of interbedded zone based on drilling record.

2-2-3. 断層及び弱線

図2-1に示されるように武甲山には、主要断層として、生川断層と中央断層が存在する。しかしながら、これらは残壁面に露出することがなく、残壁の安定性に影響を及ぼすものではないと考えられる。

秩父残研は鉾床および下盤中の連続する断層破碎帯・節理面・層理面を「弱線」と称している。8本の弱線が石灰石鉾床内に存在することが報告されており、これらは、東西系弱線(W-1～W-5)と南北系弱線(N-1～N-3)に大別される^{2,4)}。このうち、W-4(W4断層)は、西は宇根鉾山残壁の1,080 mLから宇遠地区東縁部の950 mLまで2,000 m以上連続している(図1-2参照)。北へ70～80°の傾斜を持つ断層で、粘土混じりの厚さ数mの破碎部が残壁に露出している。W4断層と交差する坑道とボーリングによって、W4断層は幅1m未満の急傾斜の断層が複数重なった脆弱帯であるとされている。

前述の8本の弱線に加えて、連続性の評価は困難な亀裂が他に多く確認されている。これらのうち、北に低角度(20～30°)で傾斜する亀裂は、その連続性は乏しいものの、宇根鉾山中央部の1,050～1,010 mLの残壁面あるいは1,010 mLの残壁内調査坑道壁面で視認できる。1,010 mL調査坑道では、互層帯内の亀裂に加え、石灰岩中の低角亀裂についても、垂直方向とせん断変位を計測する亀裂変位計を取り付け、亀裂の挙動を連続的に監視している。この低角亀裂は石灰岩中の節理であり、鏡肌も認められないことから、互層帯中の断層の延長ではないと考えている。坑道内亀裂変位計に加えて残壁表面からの挿入式孔内傾斜計によっても、低角亀裂の挙動を観測している。

2-2-4. 武甲山の残壁規格

武甲山三社では、山頂開発以降、これまで第一次～三次の施業案の申請を行ってきた。本節では、山富らによって発表された論文¹⁾を引用し、各施業案申請に至る経緯と残壁規格についてまとめる。

まず、山頂開発時には、秩父残研は山頂からの協調採掘の施業案認可を得ることを当面の目標として、

- ・ 岩盤の安定に関する外国文献等のレビューによる基礎知識の習得と海外情勢の把握
- ・ 統一された地形図の作成と地質鉾床、地質構造および地下水の共同調査
- ・ 残壁の安定解析

に取り組んだ。地質調査・岩石試験から得られたデータを用い、下盤の緑色岩類内に平面すべりを想定し、高さ200 mの残壁の限界平衡解析を行い、カバーロックの厚さ・残壁の平均傾斜の算定と感度分析を行った。この結果を基に武甲山三社は当時の監督官庁であった通産省立地公害局に第一次施業案が申請された^{2,5)}。

通産省立地公害局は、良好な排水状態の維持、岩盤の風化・浸食の防止、下盤の走向・傾斜変化を把握する調査の続行、岩石・岩盤の物性と強度について新たな知見を加えた検討を行うことを前提条件とした。1975年2月に、山頂から下方200 mまでの残壁が安全

に保持できるものと判断し、1976 年11 月、武甲山の山頂開発と1,100 mL までの採掘を含む第一次施業案が認可された。これにより、山頂～ 1,100 mL の残壁について、ベンチ高さ10 ～ 20 m, 道路・緑化帯としての小段の幅を4.7～ 15.6 m, 法面傾斜60 ～ 75° として平均傾斜は43.6° , カバーロックの厚さを上部1,300 mL では10 m, 下部1,100 mL では20 m とすることになった。第一次施業案が認可され、山頂からの協調採掘が1981 年4 月に始まった。

山頂開発に伴い、武甲山三社は秩父残研の下部組織として、三社の若手技術者からなるワーキンググループ (残研WG) を組織し、残壁造成に関する調査研究と解析を1981 年1 月より開始した。具体的な活動は、

- ・ 文献調査、現場見学、講演会参加・発表、研究機関訪問等の情報収集と自己研鑽
- ・ 岩石・岩盤試験
- ・ 地下水調査
- ・ 安定解析

である。そして、残研WG の検討結果を基に、1,100 mL から終掘までの採鉱計画を立案し、1,100 mL 以下の採掘によっても残壁の安定性が維持できることを確認して、第二次施業案を申請した。1,100 mL までの残壁規格と同様、ベンチ高さを10 m, 法面傾斜を70° とするが、1,000 mL までは残壁平均傾斜を43.6° , 1,000 mL 以下の残壁平均傾斜は60° とされた。

第二次施業案申請を受けて、通産省の関東東北鉱山保安監督部は、1,100 mL から 900 mL までの採掘について、1992 年 1 月に申請内容を認めた。ただし、第一次施業案と同様の前提条件が成り立つものとし、第二次施業案申請のために行った斜面安定解析には、未知の要素、不確定要素が含まれていることから、残壁傾斜が変化する 1,000 mL 前後のカバーロックの厚みにゆとりをもたせ、次の遵守事項 を求めた(原文のまま)。

- ・ 継続的に地質調査を行い、地質構造を詳細に把握し、また採掘技術や残壁の安定解析方法等技術上の進歩があった場合は、それを考慮して対策を実施し、岩盤の安定に資すること。
- ・ 最終残壁と背後の山腹については、肉眼観測及び機械による観測を継続的にを行い、亀裂発生が発見等岩盤崩壊の予知に努めること。大規模の発破、地震、豪雨の直後には特に注意すること。また、計測機器等による研究を継続し、適切な計測を行うこと。
- ・ 切羽及び下部の立入坑道あるいは試錐孔からの湧水に関する観測を行うこと。また、当分の間は観測井による自由地下水面の観測を行い、豪雨時には特に水位、湧水状況等の変化に注意すること。
- ・ 実操業にあたっては、岩盤崩落防止に関する具体的な操業指針ならびに従業員に対する指導要領を確立しておくこと。

1997 年から2001 年にかけて、武甲山三社と秩父残研は1,000～ 900 mL 間の残壁規格について、具体的な残壁管理、緑化工や残壁造成後の岩盤補強対策工の施工面等の便宜を考慮した再検討を行った。幅8 m の管理道路を30 m のレベル間隔で設け、残壁の平均傾斜

を60° から45.3° に緩めることが妥当と判断し、2001 年10 月に関東東北鉱山保安監督部へ説明し、変更が了承された。その後、900～780 mL を対象とした第三次施業案が、2014 年3 月に認可され、残壁の平均傾斜は1,000 ～ 900 mL 間と同じ45.3° とし、現在に至っている。

2-3. モニタリング概況

900 mL までの第二次施業案が認可されてから、秩父残研では残壁の応力異常や変位異常等を早期に察知するため、1994 年11 月にモニタリングシステムを導入してきた²⁾。残壁の表面変位計測には種々の手法が検討されたが、現在の武甲山では主にAPS(Automated Polar System, 自動光波距離計)、GPS (Global Positioning System, 全地球測位システム) によるモニタリングや、残壁管理道路における定期的な水準測量を行っている。

表面変位計測のほか秩父残研では残壁内部に設置した挿入式傾斜計、亀裂変位計やエクステンソメーターによる地下変位計測や、アンカー荷重計による力学的挙動の計測も行っている。武甲山残壁のモニタリングに関して詳細が述べられている過去の報告⁸⁾を引用しながら、武甲山における代表的な計測結果とモニタリング結果から読み取れる残壁の全体的な挙動の考察を以下に述べる。

2-4. 地表面変位計測

2-4-1. APS 計測

APS とは光波測距儀と自動制御高精度モータセオドライトを組み合わせることで自動的に距離を計測するシステムであり、広域の監視に適している¹⁾。現在計測している APS 設置位置を図2-5に示す。また、同図には GPS および挿入式傾斜計の配置位置も示す。

1994 年以降、秩父残研では残壁のモニタリングを目的として、APS による残壁各部の斜距離変化のモニタリングが連続的に行われている。計測点として山頂 (1,304 mL) と 1,200 mL, 1,100 mL, 1,050 mL, 1,000 mL の犬走り上に約 100 m の間隔でプリズムが設置されている。その他、1,010 mL の調査坑道坑口(APS1,010)や 970 mL の一部にもプリズムが設置されている。2017 年 5 月末時点で観測対象としているのは 53 箇所である。実際に光波測定を行うトータルステーション(ライカ社製 TPS1200 シリーズのタイプ TCA1201 を設置されており、測距精度は $5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ (D: 測定距離))は、残壁から約 4.5 km 離れた標高 270 m の横瀬町寺坂浄水場に設置し、1 日に 12 回、自動かつ連続的にデータを取得している (図2-6 参照)。

トータルステーションでは気温および気圧を測定し、気象に伴う変動を補正しているが、各計測点との標高差が約800 m と大きいため、トータルステーションで取得した気象条件と残壁との光路中の気象条件が異なる。そのため、図2-7からわかるように年周期的な変動が生じてしまい、完全には補正ができない。そこで秩父残研では、各計測点と同じ標高に設置している比較の変位の小さな計測点を不動点とみなし、これを基準とした

斜距離差を計算することによって気温による測定誤差を大幅に小さくした上で、残壁挙動の把握が行われている。例えば、1,200 mL に設置しているプリズムでは残壁の東端にあるAPS2 が最も変位が小さいため、この点を基準として1,200 mL での計測点の斜距離差が算出されている（図2－8参照）。他の標高においても同様の手法で斜距離差が算出されており、1,100 mL ではAPS9 を、1,050 mLではAPS22 を、1,000 mL ではAPS48 を基準点としている。図2－8の2007年5月前後で斜距離差データのバラつきに違いがあるが、これはこの時期にライカ社製WILD シリーズの光波測距儀DI3000 から、現状のトータルステーションへ更新し、測定精度を向上させたためである。

図2－9に1,200 mLに設置したAPSにおける長期的な斜距離差の変化を示す。この図は、1ヶ月間の斜距離差の平均値を1プロットとしている。変位量が小さくなると、プリズムとトータルステーションの距離が短縮していることを表しており、残壁が北方向に変形していると考えられている。西側のAPSで2000年頃から北方向の変形が表れ、2007年の台風時に急激に変位が増加した。その後も変位増加は継続し、2011年に襲来した台風では、2007年の台風同様に著しい増加が計測された。

武甲山残壁での変位の分布状態を示すために、APSの計測点は残壁にほぼ等間隔に設置されている。斜距離差計測結果から、2012年度の年間斜距離差変位の等値線図を図2－10に示す。この図より、APS7を中心とした武甲山中央部～西部にかけて斜距離差の短縮量が大きい領域が確認できる。

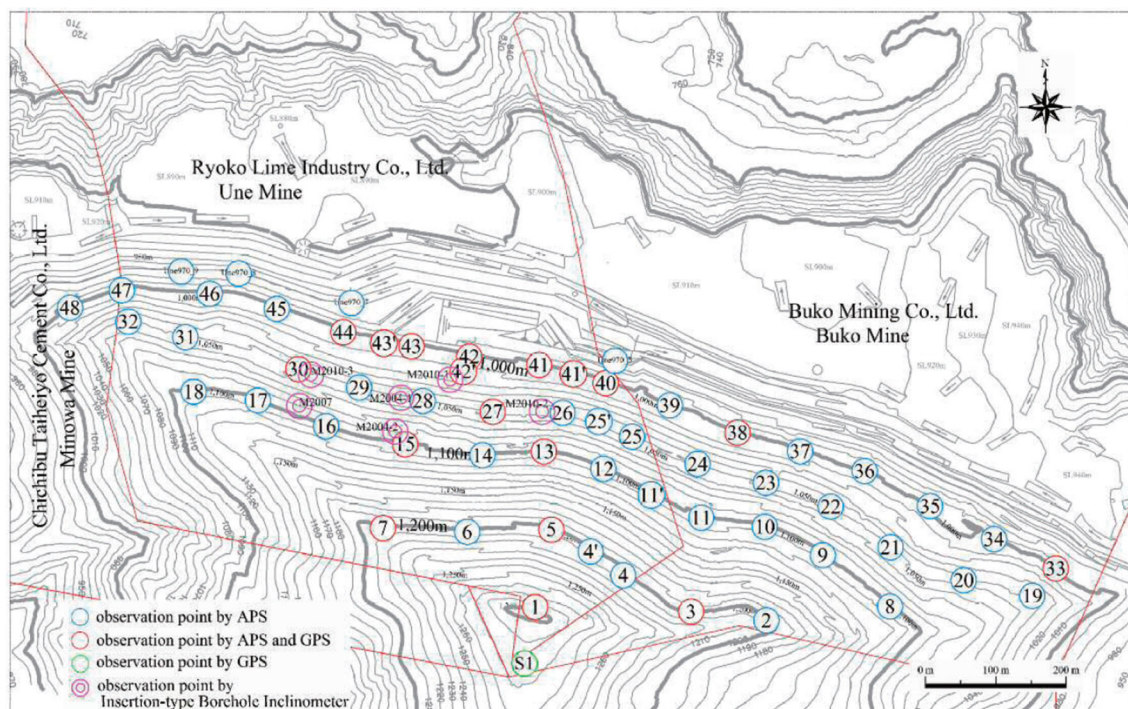


図2－5 Location of APS and GPS monitoring points on the rock slope of Mt. Buko⁸⁾：



図 2 — 6 The line of the sight of APS and a view of Mt. Buko from the Total Station ⁸⁾ .

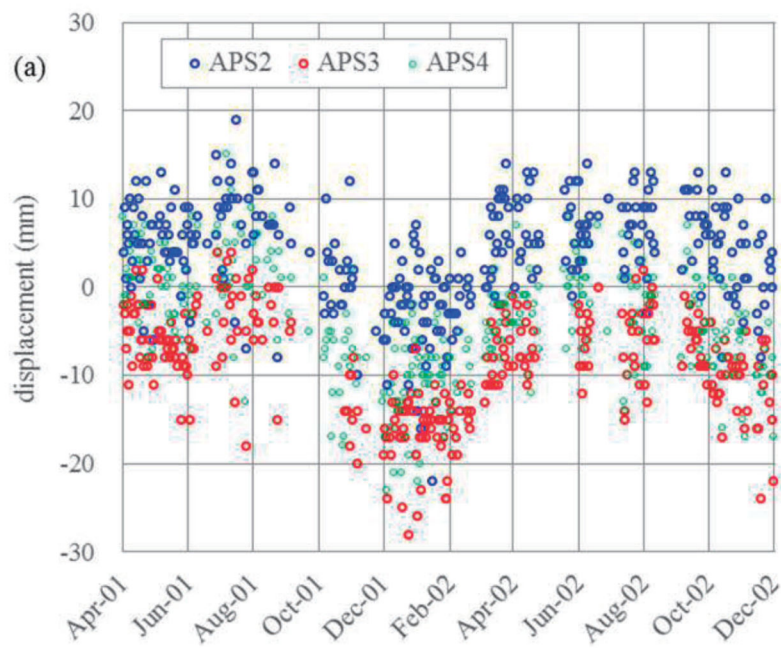


図 2 — 7 Slope distances of observation points on 1,200mL ⁸⁾ .

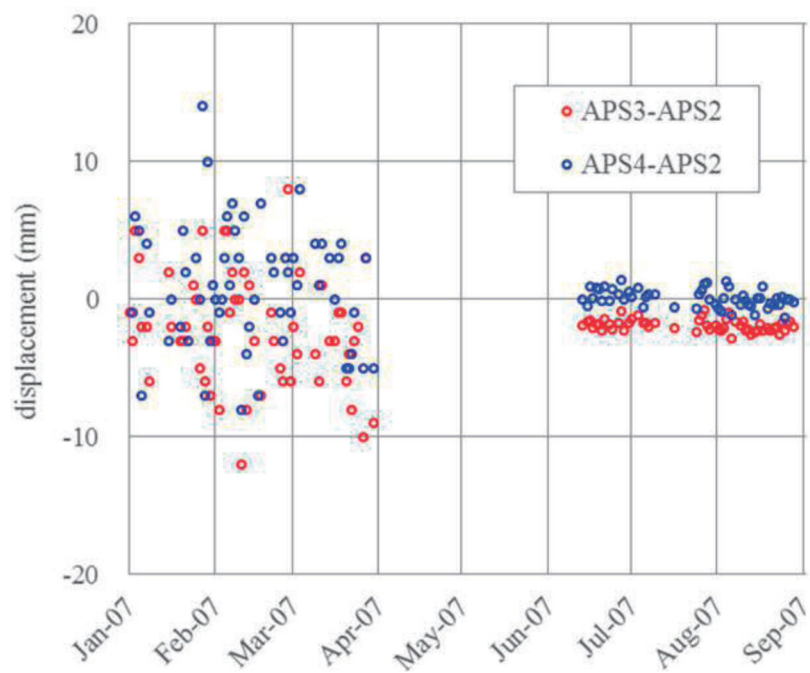


圖 2 — 8 Slope distance differences of APS on 1,200mL ⁸⁾.

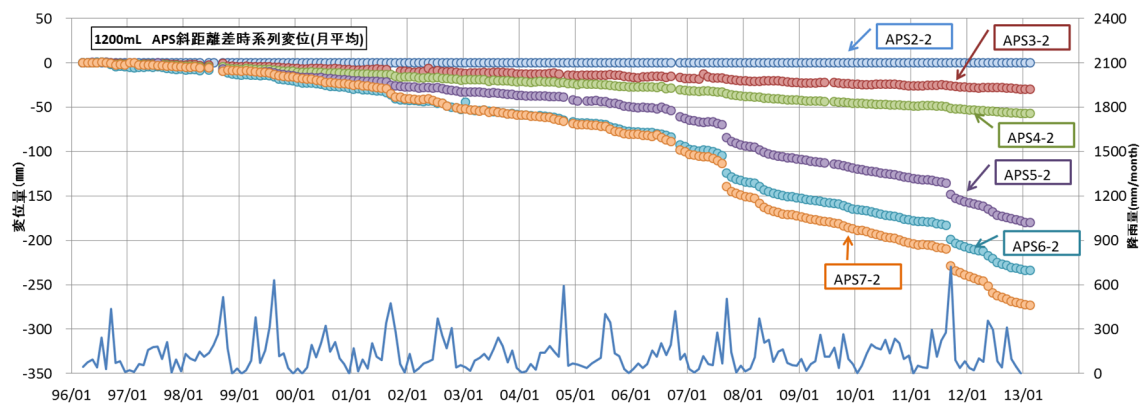


圖 2 — 9 Average of slope distance of 1,200mL during one month.

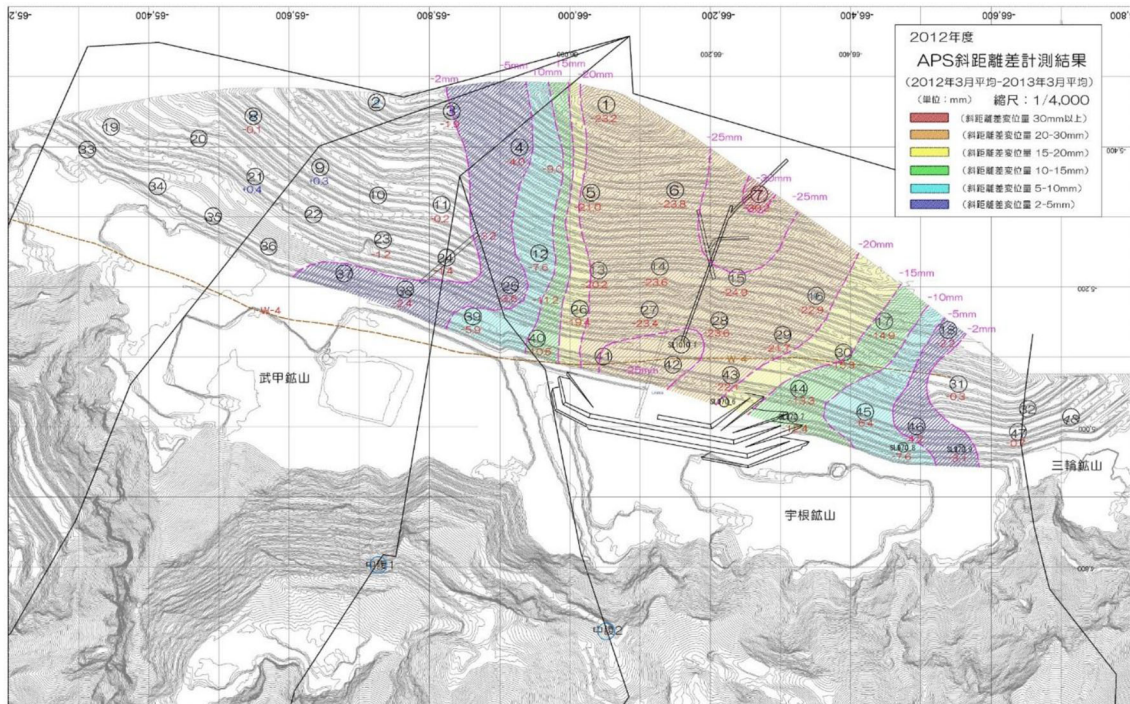


図 2 - 1 0 A contour map of measured displacement in FY2012.

2-4-2. GPS 計測

武甲山では、2-4-1. で述べたように、2000年頃からAPS7における斜距離の短縮傾向が強くなったことから、2003年に表面変位の三次元的変化を捉えるために、GPS による計測が開始された⁸⁾。GPS によるモニタリングは導入コストが高く、現場で電源の供給を必要とし、また雷によるトラブルも多いが、トータルステーションの設置地点からは見えない残壁下部における挙動を計測可能である。またAPS による計測では雲などの視界不良時に計測が不可能となるが、GPS では気象の影響を受けないといった利点も報告されている^{12~16)}。そこで、GPS による計測点は残壁に設置しているAPS の計測結果から注視すべき箇所が選定され、通常はAPS のプリズムと同位置に設置しているが、プリズム周辺に十分なスペースを確保できない場合は多少位置をずらして計測されている。

GPS 受信機はトプコン社製2 周波受信機 (GB-1000, GB-500, LEGACY-E, HiPer-SR) が使用されており、精度は水平方向で $3\text{ mm} + 1\text{ ppm} \times D$ 、垂直方向で $5\text{ mm} + 1.5\text{ ppm} \times D$ (D: 測定間の距離) である(図 2 - 1 1 参照)。計測方法は相対測位法であるスタティック法を用い、一時間毎に座標データを自動で取得し、無線ネットワークを介して鉱山事務所に設置してあるPCにて基線解析が行われている。

GPS 設置当初は国土地理院の秩父電子基準点及び大滝電子基準点からの電子基準点解析を利用した計測が行われていた。電子基準点解析とは座標値が既知であるGPS 連続測量点を基準とし、基準点の変位量で武甲山に設置している各計測点の変位量を補正する手法である。武甲山残壁では水平距離約4 km、標高差約800 m である秩父電子基準点をXY 座標

の相対測位の基準とし、水平距離約15.5 km、標高差100 m 以内の大滝電子基準点をZ 座標の相対測位の基準としていた。ここで、X 座標は南北方向、Y 座標は東西方向、Z 座標は鉛直方向を表している。しかし、これらの基準点では武甲山との距離が十分に近いとは言えず、特にZ 変位の誤差が大きいため、残壁の挙動を捉えるには精度が不十分であった(図2-12参照)。Z 座標で見られる年周期的な変動は衛星から発信されるGPS 電波の大気遅延¹⁷⁾ が原因であると考えられる。また、電子基準点の計測データは計測から3 日後にWEB 上で公開されるため、豪雨時等に残壁の挙動をリアルタイムに計測できないことが欠点とされた。そのため、2010 年以降は残壁に設置した変位の小さなGPS 測点を基準点とした残壁内基線解析へと変更された。これにより基準点と各計測点の距離は水平距離が最大でも1 km 以内となり、図2-12 から分かるように2010 年以降のデータのばらつきは比較的小さくなった。例えば、GPS15 における2009 年1 月1 日の1 時間毎データの標準偏差はX 座標が4.31 mm、Y 座標が2.80 mm、Z 座標が8.68 mmであったのに対して、2012 年1 月1 日の同様のデータではX 座標が1.4 mm、Y 座標が0.8 mm、Z 座標が3.1 mm である。この手法の変更は武甲山残壁に比較的変動の少ない計測点を有していたため可能であった。武甲山残壁でGPS の基準点は2 点設定されており、1,200 mL 以上のGPS 計測点はGPS3 (1,200 mL) を基準とし、それ以外の計測点はGPS33 (1,000 mL) を基準としている。2017 年5 月末時点でGPS 計測を行っているのは、基準点を含めて19 点である。

図2-13に残壁基線解析を開始したGPS による2010 年以降の水平方向変位図を示す。水平方向変位においては、全体として北方向の変位が大きい。ここで図中の各GPS の変位量は2010 年以降の設置開始からの累積変位量であり、各GPS の測定開始時期が異なっている。変位量は残壁中心部より西側で相対的に大きく、APS での斜距離差の短縮が認められる領域とおおむね一致している。また、山頂南側に設置しているGPS に関してはデータのばらつきはあるものの特定の方向への変位は現状では認められない。

次に残壁中央部～西部の変位が比較的大きい箇所断面図を図2-14に示す。残壁上部に設置しているGPS7 では計測開始から北方向へ一定に沈下していることが読み取れ、GPS15 はGPS7 と同様に全体として北方向の沈下傾向を示し、2012 年に沈下角度が大きくなっている。また、残壁下部に設置しているGPS42、90 では残壁上部に設置しているGPS と比較すると全体として沈下角度が浅く、水平に近い方向に変位を示している。さらに残壁下部の970 mL に設置されていたGPS72 は現在では測定中止となっているが、計測結果では隆起する傾向が見られた。



図 2 - 1 1 GPS antenna and its receiver⁸⁾ .

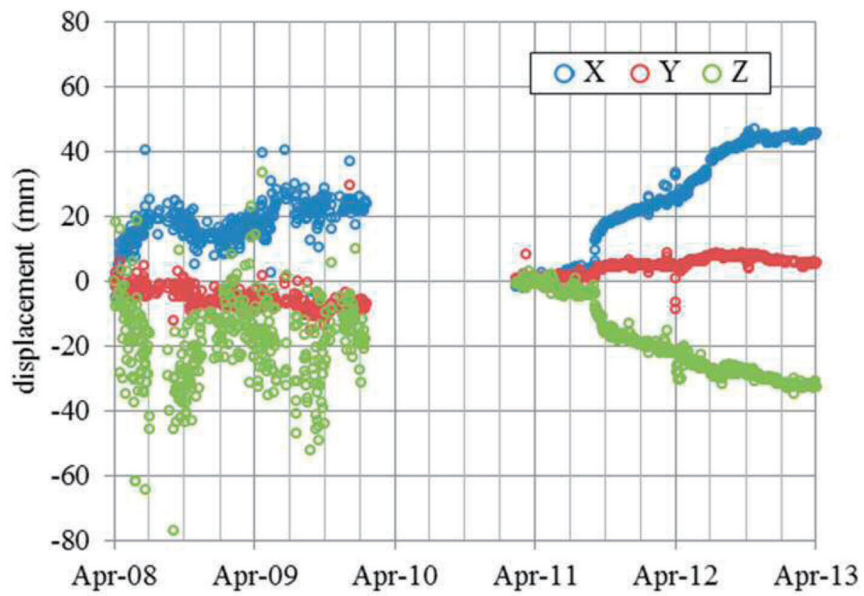


図 2 - 1 2 Displacement from GPS-based control station analysis to final slope in-line analysis (GPS15)⁸⁾ .

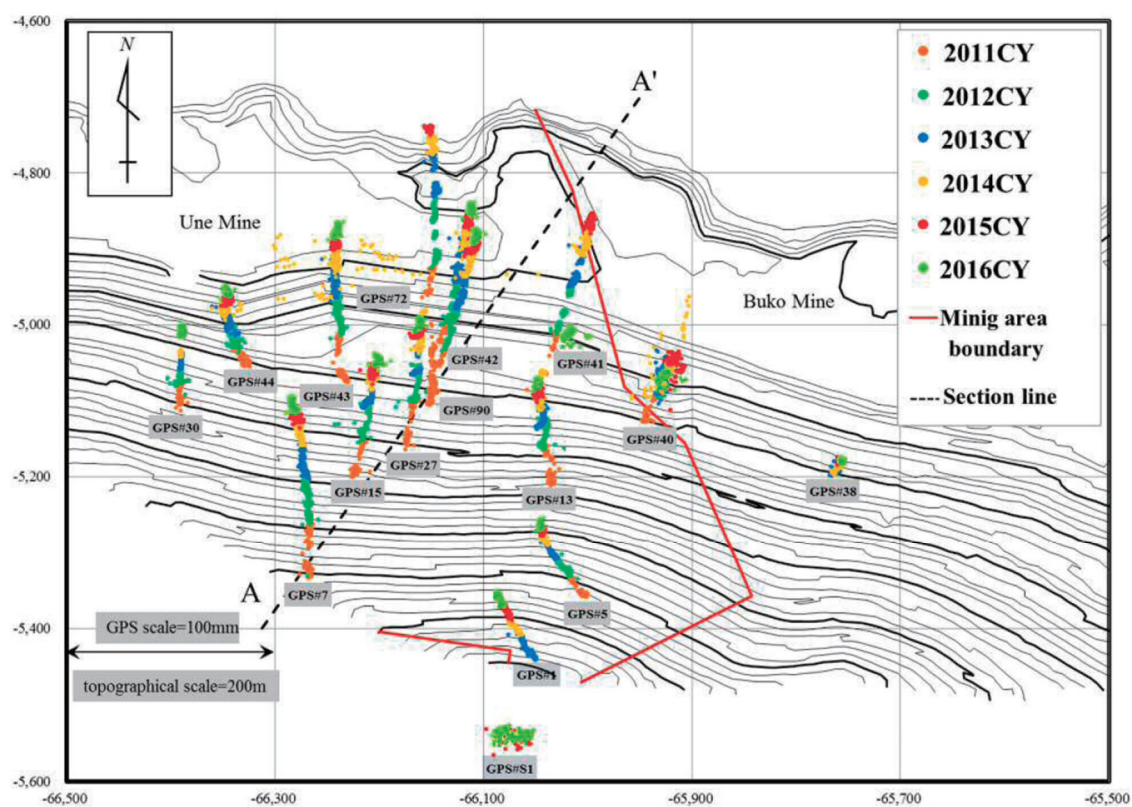


图 2 — 1 3 水平位移向量由 GPS 测量在平面视图的岩石斜坡⁸⁾。

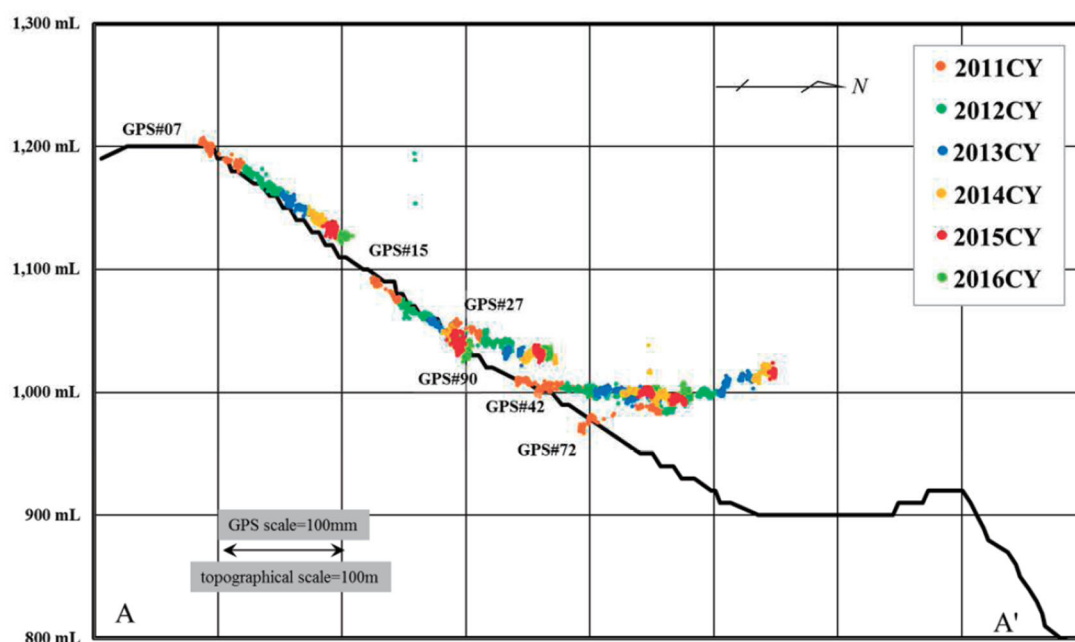


图 2 — 1 4 北向和垂直位移向量由 GPS 测量在横截面视图的岩石斜坡⁸⁾。

2-4-3. APS と GPS の比較

残壁のような大きな対象物を計測する際には、その手法ごとに特有な誤差を持つことが考えられるため、APS および GPS の計測結果を比較し、各計測結果の信頼性を確認する必要がある。図 2-15 に代表的な計測点における APS と GPS の変位量を時系列で示す。GPS の計測結果については残壁内基線解析へと変更した後の高精度な座標を APS のトータルステーション方向への斜距離変位量に換算したものを使用した。ここにあげた計測点の斜距離差の短縮傾向は APS と GPS ではほぼ同様であるが、計測点 15 に関しては変位量に乖離が確認されている。

図 2-16 に図 2-15 の計測結果を用いて横軸に APS の斜距離差変位量、縦軸に GPS の斜距離に換算した変位量を対比したものを示す。両結果の相関は高い。計測点 15 に見られるように回帰係数が 1 に一致しない理由としては、APS15 の基準 APS と GPS15 の基準 GPS が同一箇所を利用していないことに起因する各基準点で生じるわずかな変位が、計測点の変位ベクトルに影響を及ぼしていると考えられる。

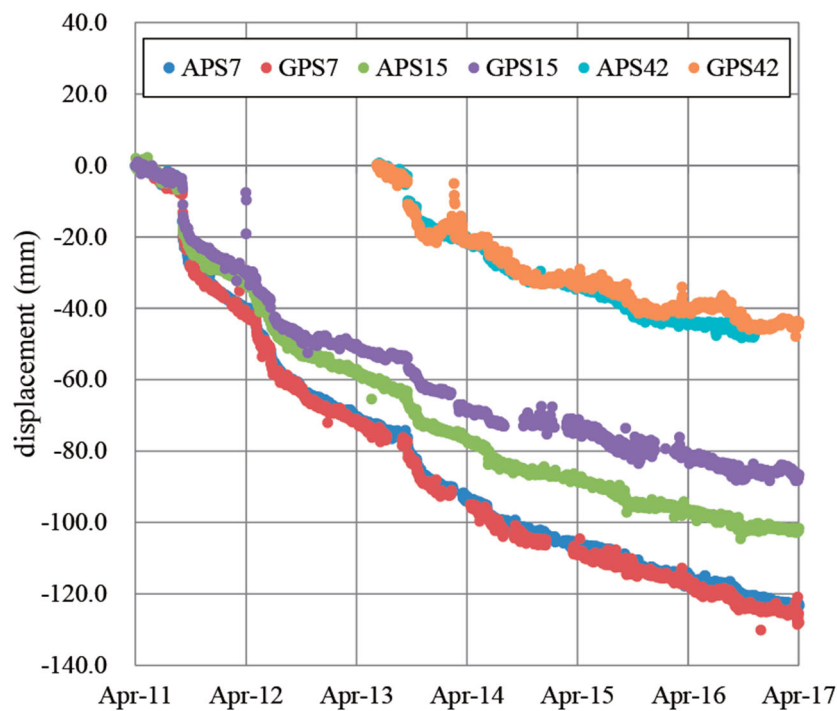


図 2-15 Time series comparison of slope distance differences measured by APS and GPS⁸⁾.

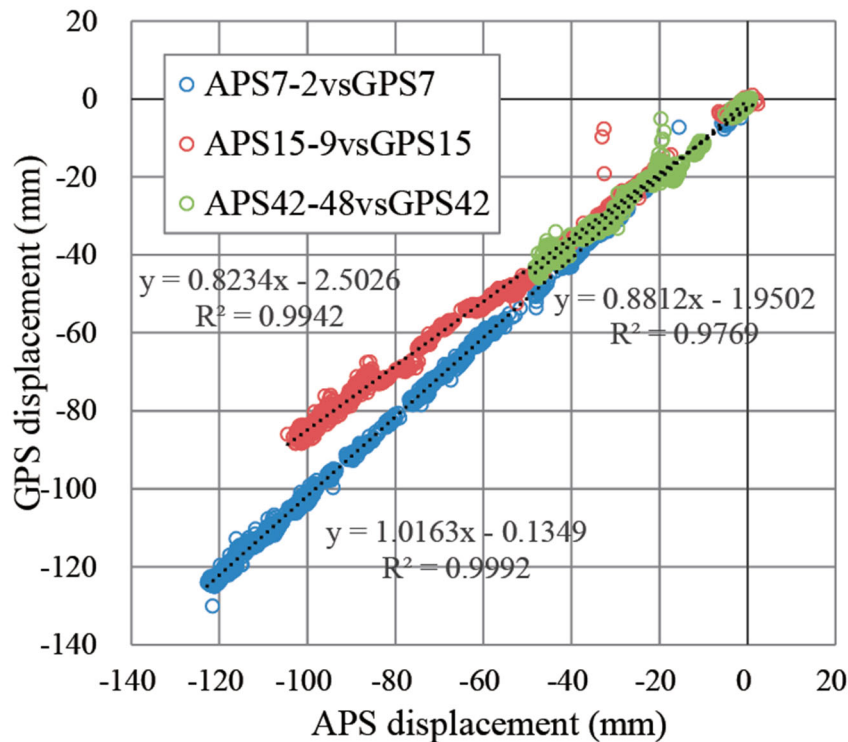


図 2 - 1 6 Comparison in slope distance displacements between GPS measurements and measured and APS measurements⁸⁾.

2-5. 岩盤内変位計測

2-5-1. 挿入式傾斜計

秩父残研では岩盤内部の亀裂等による変位箇所の標高および深度の特定及び水平方向変位量の計測のため、1,090 mL, 1,050 mL, 1,010mL の管理道路におけるボーリング孔に径50 mmの測定管（以下、ガイド管）を埋設し、挿入式傾斜計による計測を、年間10 回程度実施している（図 2 - 5 参照）。ただし、M2004-1, 2, M2007, M2010-1 はガイド管変形により閉塞し、現在は計測不能になった⁸⁾。

挿入式傾斜計には、東京測器社製KB-5HC（2 軸タイプ、容量±5°）が使用されている（図 2 - 1 7 参照）。測定は、ガイド管に傾斜計を挿入し孔底から50 cm毎に行う。区間ごとに得られる傾斜角を水平方向の変位量に換算し、孔底を基準（下盤を不動点）として地表部まで累加することで、ガイド管全体の形状変化を求め、岩盤内部の変位量を初期値（最初に埋設した際のガイド管の形状）とその後の計測値の差から求められている。挿入式傾斜計は岩盤や構造物内部の変形を観測するために、土木分野や建設分野で広く使用されている^{18~21)}。

2004年以降に、M2004-1, 2およびM2007の3箇所で計測を行い、残壁内部の変位状況が評価され、主に地層境界周辺部で屈曲区間が確認された。1,090 mLで計測したM2007の結果を図 2 - 1 8に示す。2009年1月に51 m以深がガイド管変形により計測不能になったため、

それ以降は深度51 mまでの計測結果を表している。地層境界付近の深度31.5 mにおいて、南北方向の屈曲点が認められた。

この計測結果を踏まえ、秩父残研では 2010 年に、地層境界周辺部のすべり面を想定した場合、その平面的な広がりを確認するために、計 3 箇所 (M2010-1~3) で計測が開始された。これらの測定の結果、1,050 mL で計測した M2010-2, 3 では顕著な屈曲点は認められなかったが、1,010 mL で計測した M2010-1 では図 2 - 19 に示すとおり、石灰岩中 (深度 31.5 m 付近) に屈曲箇所が確認された。この屈曲箇所のボーリングコア観察の結果では、亀裂が多く、RQD も低い岩盤不良部が約 3 m 存在することが確認された。

M2010-1 では石灰岩中に屈曲箇所が確認されたため、GPS の結果と比較して、測定結果の解釈が行われた。M2010-1 の深度 28 m (屈曲点の上部) における測定結果と GPS90 水平変位の計測結果を図 2 - 20 に示す。地表面変位と深さ 28 m 地点の変位が同程度に推移していることから、28 m 以深の岩盤内変位が地表面変位に影響していることが分かる。28 m 以深の変位の内、深度 28 m~32 m の区間変位に限れば、地表面変位の 75% 程度の変位が認められた。さらに、GPS90 の鉛直変位には、2011 年 9 月前後から沈下傾向 (約 10 度程度北傾斜) が生じ始めたことから、この期間前後に当該区間にせん断変位が生じてきた可能性が疑われた。

その挿入式傾斜計の結果から、残壁下部においては、石灰岩内にも残壁挙動に影響を及ぼす不安定な岩盤ブロックが存在することが想定された。したがって、宇根鉱山では当該石灰岩内の亀裂または想定せん断面対策として、鋼管杭工事、あるいは盛石工事による安定化対策工事を施工している。これらの工事に関しては、第 4 章で詳細を述べる。



図 2 - 17 Insertion-type borehole inclinometer⁸⁾ .

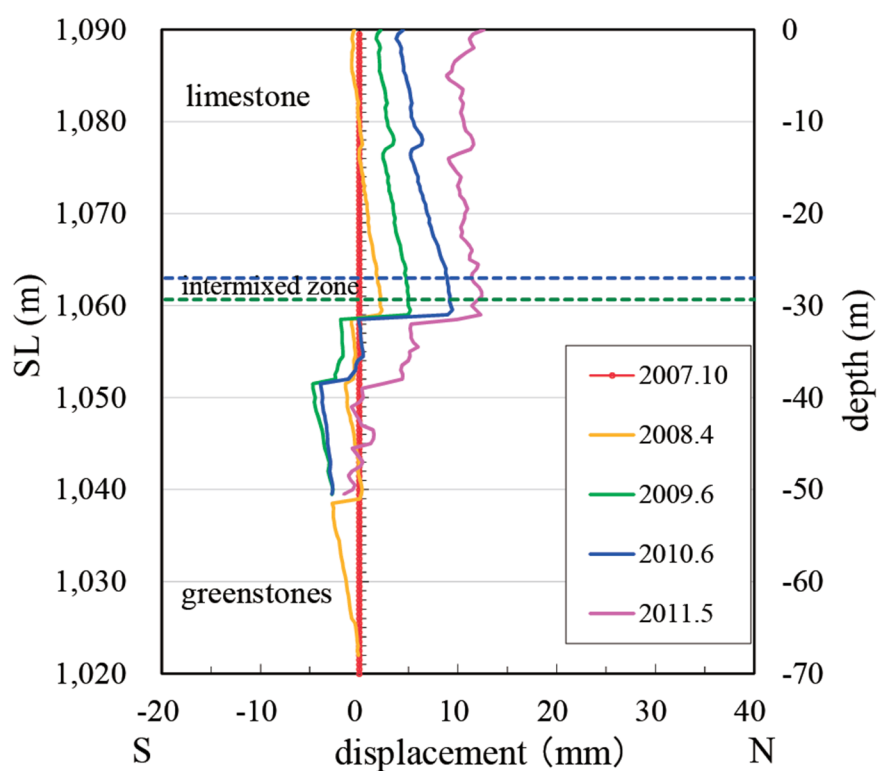


图 2 — 1 8 NS displacement measured by Insertion-type borehole inclinometer (M2007) ⁸⁾.

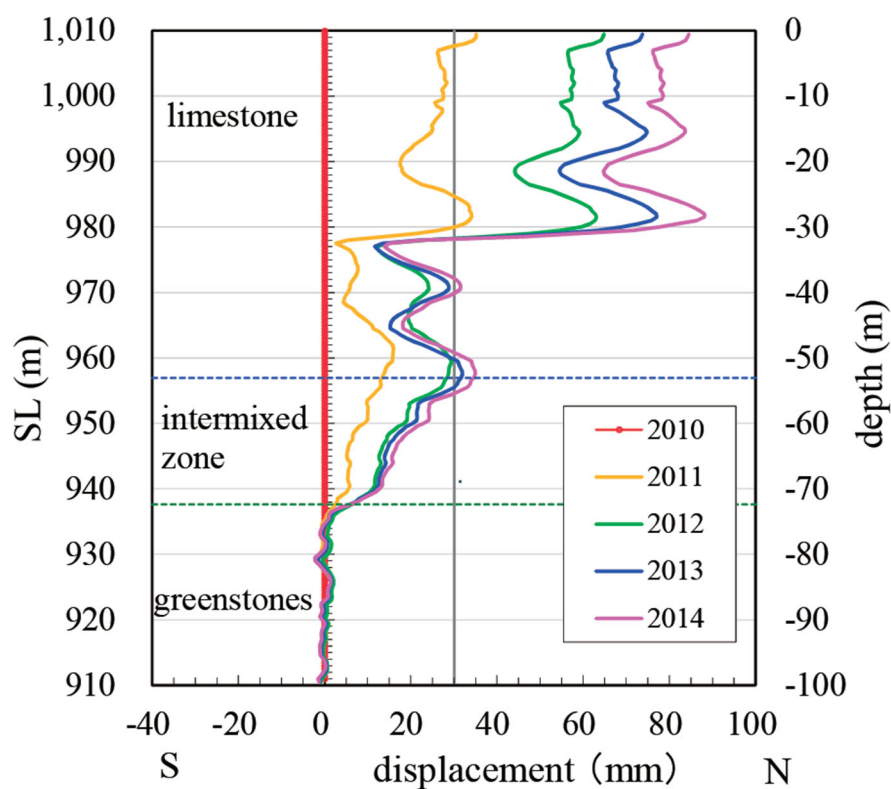


图 2 — 1 9 NS displacement measured by Insertion-type borehole inclinometer (M2010-1) ⁸⁾.

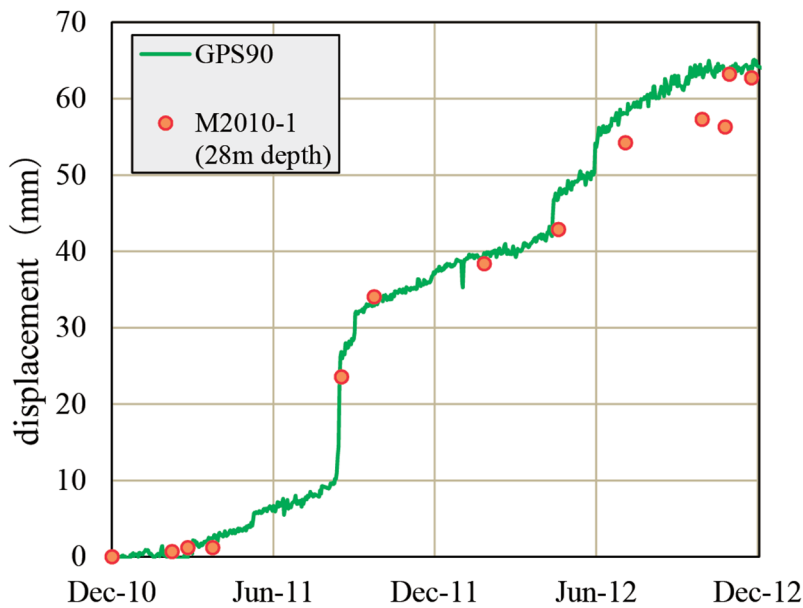


図 2 - 2 0 Horizontal displacements measured by GPS90 and Insertion-type borehole inclinometer (M2010-1, 28 m in depth)⁸⁾.

2-6. 調査坑道

2-6-1. 概要

宇根鉱山では、残壁内部の岩盤状況調査と残壁内部の挙動のモニタリングを目的として、2008 年に 1,010 mL, 2011 年に 1,090 mL, 2012 年に 930 mL 残壁面を坑口とする調査坑道が計 3 本掘さくされた。調査坑道の位置を図 2 - 2 1 の平面図および図 2 - 2 2 の断面図に示す。図 2 - 2 1 に示す残壁表面変位をみると、台風による残壁変位は APS (GPS) 7 ~ APS (GPS) 15 に沿った区域の変位が最大であった。そのため、この計測点に沿ったラインを残壁変位の中心と見做して調査坑道の掘進方向(S15W)としている。また、坑口から 170 m ~ 180 m 付近の下盤掘進中に壁面から湧水があり、先行ボーリングを行ったところ、坑道掘進方向 (S15W) よりも西側に水みちが存在する可能性が示唆された。そのため、掘進長 195 m 付近から鉱区境界までの 307 m 地点までは、この水みちが想定される方向 (S35W) に掘進が行われた (図 2 - 2 1, 図 2 - 2 2 参照)。坑口から 195 m までの区間を本線、195 m から 307 m までの区間を支線と呼称している。深度掘進工事は約 6 ヶ月の工期で完了し、坑道開削後の路盤にはインバートを打設している。一方、掘進作業時にカバーロックからの湧水は殆ど認められなかった。

調査坑道掘さくの目的は、岩盤内変位の計測の他、水抜き、地質調査などの目的も兼ねている。調査坑道では気候などの外気要因が少ないため²²⁾、データ欠損が少なく、精度の良いデータが取得できるという利点がある。宇根鉱山の調査坑道では亀裂変位計、トータルステーション、水準測量などを行っている。今回は、地下水と残壁変位の関係性を評価する上で、重要な役割を果たした亀裂変位計について詳細を述べる。

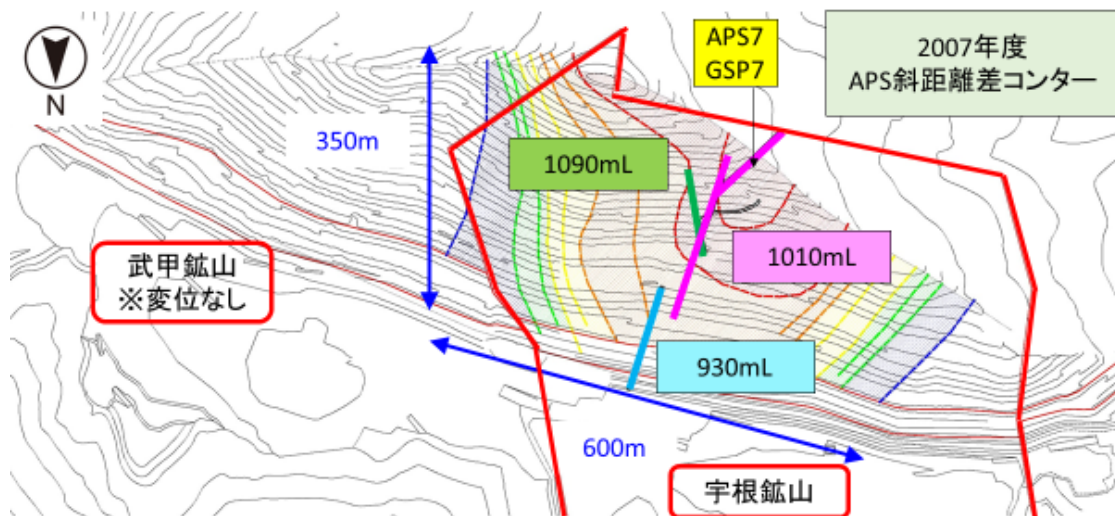


図 2 - 2 1 A contour map of measured displacement in FY2007 and location of the observation drift (plan).

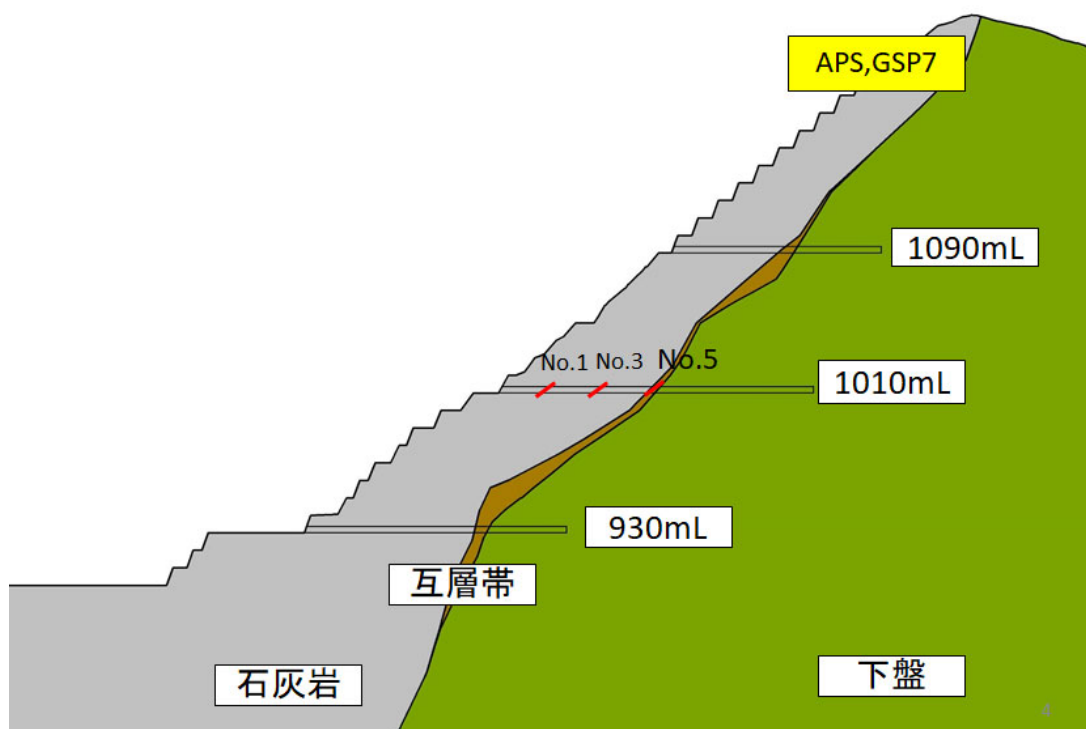


図 2 - 2 2 Location of the observation drift (section).

2-6-2. 亀裂変位計概要

坑道内岩盤を観察した結果、坑口から 31 m, 55 m, 90 m 付近の計 3 か所で残壁壁面に向かって北傾斜する亀裂が確認された。便宜上、坑口から 31 m と 55 m のカバーロック中の亀裂をそれぞれ No.1 亀裂, No.3 亀裂, 坑口から 90 m の地層境界部 (互層帯) 中の亀裂を

No.5 亀裂としている。No.1 および No.3 亀裂の開口幅は 1 cm ～数 cm であり，再結晶化した石灰石礫，一部粘土鉱物で充填されている。一方，互層帯中の No.5 亀裂の幅は数 cm ～ 10 数 cm 程度であり，その一部は粘土化していることが確認されている（図 2－23 参照）。宇根鉱山ではこれらの顕著な亀裂に亀裂変位計を設置している。計測器は，一般的にコンクリート表面の亀裂等の開口変位計測に使用されているひずみゲージ式亀裂変位計を設置することにした。亀裂変位計の選定に際しては，

- ・ mm オーダー以下の微小な挙動を測定可能であること
- ・ 連続的かつ自動計測が可能であり，また任意の測定時間間隔が設定可能なこと
- ・ 坑道内は湿度が高いため，防水，防錆性能に優れていること
- ・ データロガーは無線，有線によるデータ伝送に対応できること
- ・ 平滑ではない岩盤表面にも設置可能なこと

などが考慮され，株式会社東京測器研究所製のひずみゲージ式亀裂変位計が採用された。計測データはデータロガーのタイマー設定により，通常 1 時間毎に取得している。

通常コンクリート表面計測に用いる本計測機器を利用するため，岩盤亀裂下盤側を不動層とみなし，亀裂上盤側が変位した際のひずみ値を記録できるように設置している。せん断方向変位計測の場合，図 2－23 のように計測器の一端を亀裂下盤側にモルタルで固定して不動箇所とし，亀裂上盤側が移動した際の計測器の収縮を変位として測定している。仮に長期間の計測で累積した変位が計測容量を超える場合には，モルタル固定部を一旦外して再設置が行われ，初期状態に戻すことで繰り返し計測を行うことが可能である。



図 2－23 Close-up of No.5 fracture (with crack gage).

2-6-3. 亀裂変位計計測結果

図2-24に3 亀裂の変位量を積上げ棒グラフで、各年度の合計変位量に対する No. 5 亀裂変位割合を折れ線グラフで示す。2011 年度の変位量は9 月の台風豪雨の影響により 30 mm 以上と大きいですが、2013 年度以降は後述する残壁対策工事の効果により、変位量は減少している。最も変位が大きいのは互層帯中の No. 5 亀裂であり、合計亀裂変位量の 70-75% となる。互層帯の見かけ厚さは約 6 m であり、石灰岩と互層帯境界および互層帯と下盤境界面にも亀裂変位計を設置したが、これらの境界面には変位がないことを確認している。一方で、カバーロック内の No. 1, No. 3 亀裂でも 25-30% の変位が生じている。

図2-25(a)および図2-25(b)は、2011 年度と 2013 年度における No. 5 亀裂変位速度 (日平均) と日降雨量 (武甲山 1,000 mL 残壁に設置した雨量計, 水色プロット)との関係性を示す。短期的な亀裂変位の変動は、大雨による変位速度上昇傾向を詳細に示している。日平均速度は 1 時間ごとの測定結果から日平均変位量を計算し、その結果と前日の日平均変位量の差から求められる。また、降雨後の変位速度は、数日経過後も降雨以前の変位速度には戻らず残存する傾向がある。特に 2011 年 9 月(累計雨量 491 mm, 時間最大雨量 46 mm/h)に代表する豪雨の場合、長期間に渡り変位が残存する傾向が確認できる。

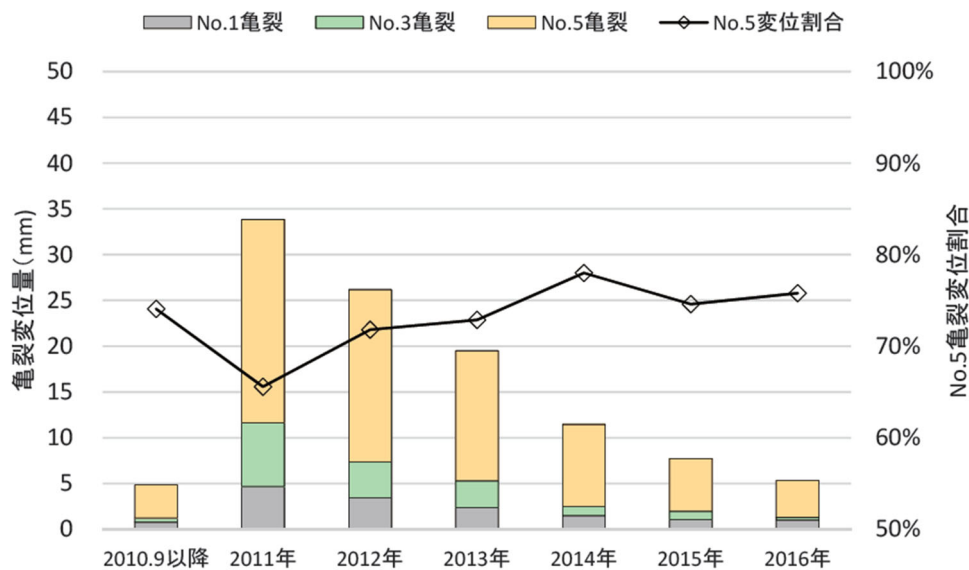
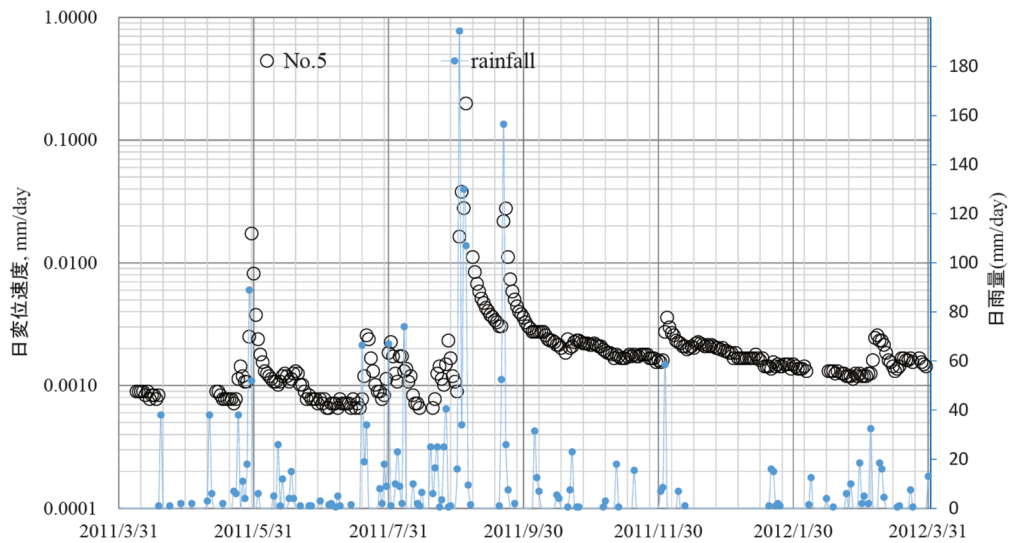
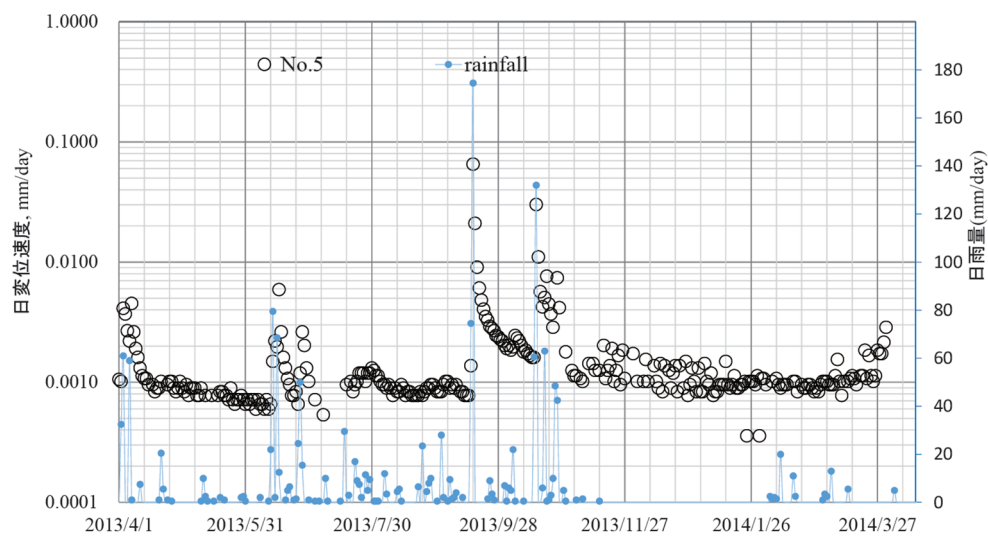


図2-24 Annual displacements of No.1, 3 and 5 fractures and ratio of displacement of No. 5 fracture to total displacement.



(a) FY2011.



(b) FY2013.

図 2 - 2 5 Daily displacement rate of No.5 fracture with rainfall.

2-6-4. 地表面計測との関係性

図 2 - 2 6 に GPS90 と No.5 亀裂変位量の変位割合をプロットしたところ、両者の関係性は直線で近似され、No. 5 亀裂せん断変位量は GPS90 北変位量の約 65% に相当するという結果が得られた。さらに、調査坑道と異なる標高に設置した残壁表面モニタリング結果との比較を行うため、地表面変位計の中で最も変位量が大きい 1,200 mL の APS7 の斜距離差変位結果を用いて同様の検証を実施した。結果、APS7 の斜距離差変位量の 60% 相当が No. 5 亀裂せん断変位にほぼ一致し、相関も高いことが確認できた。このように、坑道内の亀裂変位計測と残壁表面変位は、計測方法やその精度が異なるものの、計測結果の相関は

高い。

武甲山三社では、残壁の状態について変位速度に基づくフェイズ管理を実施している。具体的には、モニタリング結果から算出した変位速度を用いてフェイズを判定し、フェイズ1は不変動 (APS での日変位速度 0.02 mm/day 以下)、フェイズ2は潜在変動 (同 0.02 mm ~ 0.1 mm/day)、フェイズ3は準確定変動 (同 0.1 mm ~ 0.25 mm/day)、フェイズ4は確定変動 (同 0.25 mm ~ 1 mm/day)、さらにフェイズ5は緊急事態を想定すべき変動 (同 1 mm/day 以上) と定義し、三社で残壁の状態を共有している¹⁾。中長期的な残壁のフェイズ判定に際しては、APS 計測結果の 31 日間変位速度 (判定日およびそれ以前の 30 日間のデータから算出)、あるいは 365 日間変位速度 (判定日およびそれ以前の 364 日間のデータから算出) といった平均速度を用いている。

APS 計測は、季節と気象条件の影響を排除するため、基準とする APS との斜距離差で管理しており、斜距離差を採用する際に基準 APS の変位は非常に小さいことを確認しているが、視界不良時には計測不能となる欠点がある。GPS 計測は、残壁内に基準点を設けて計測を実施しているが、APS 同様に季節的な変動があることに加え、避雷対策を講じているものの、設置場所の標高が 900 m 以上と高いために、落雷あるいは誘導雷による電氣的故障のリスクがある。さらに、宇根鉦山で残壁対策工事を強化した結果、特に 2014 年以降の変位低減効果が大きく、宇根鉦山残壁の広範囲でフェイズ1を達成しつつあり、APS 計測のみではフェイズ1の境界値である 0.02 mm/day 以下の変位速度の判定が難しくなりつつある。図 2-27 に 2015 年 4 月から 2017 年 3 月期間での APS7、APS1,010 (GPS90 と同位置に設置) 斜距離差変位および No.5 亀裂せん断変位の日平均変位量を示す。APS1,010 については残壁対策工事の影響により、2017 年 2 月 28 日以降のデータに欠損が生じている。APS7 と APS1,010 でも降雨に伴う変位量増加をモニタリングできているが、バラつきが大きく、豪雨あるいは大規模地震が発生した場合の短期的な変位速度の変動を正確に判定することは困難である。そのため、残壁の状態を適切に管理し、さらに残壁対策工事の効果を評価する上で、APS、GPS 計測以外にも気象条件等の影響が少なく、かつ高精度の計測機器を用いたモニタリングが不可欠である。

一方、調査坑道内での亀裂変位計測では坑道内温度がほぼ一定であるため、高精度のデータを取得できることに加え、大雨時でも安定したデータを連続取得可能である。図 2-27 に示すとおり、残壁の広範囲でフェイズ1以下を達成しつつある状況下においても、亀裂変位計測は微小な変位を詳細に捉えている。しかも、これまでの各種計測結果を精査した結果、亀裂変位と残壁表面モニタリング結果との類似性が高いことを確認している。したがって、坑道内亀裂変位計測は、残壁変位が低減した段階での適正な残壁変位管理、あるいは今後の対策工事の成果を検証する上で、重要な計測手法と言える。

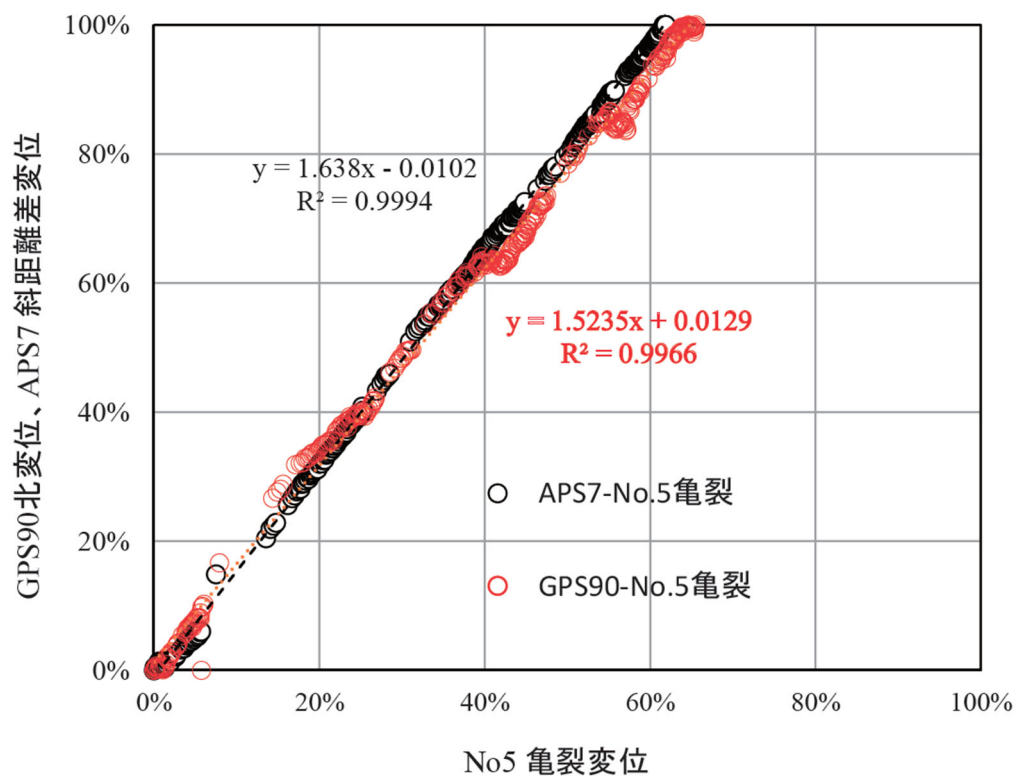


図 2 — 2 6 Relationships between displacement obtained from horizontal (northward) displacement of GPS90 and No.5 fracture (red) , and displacement obtained from APS7 and No.5 fracture (black) in percent.

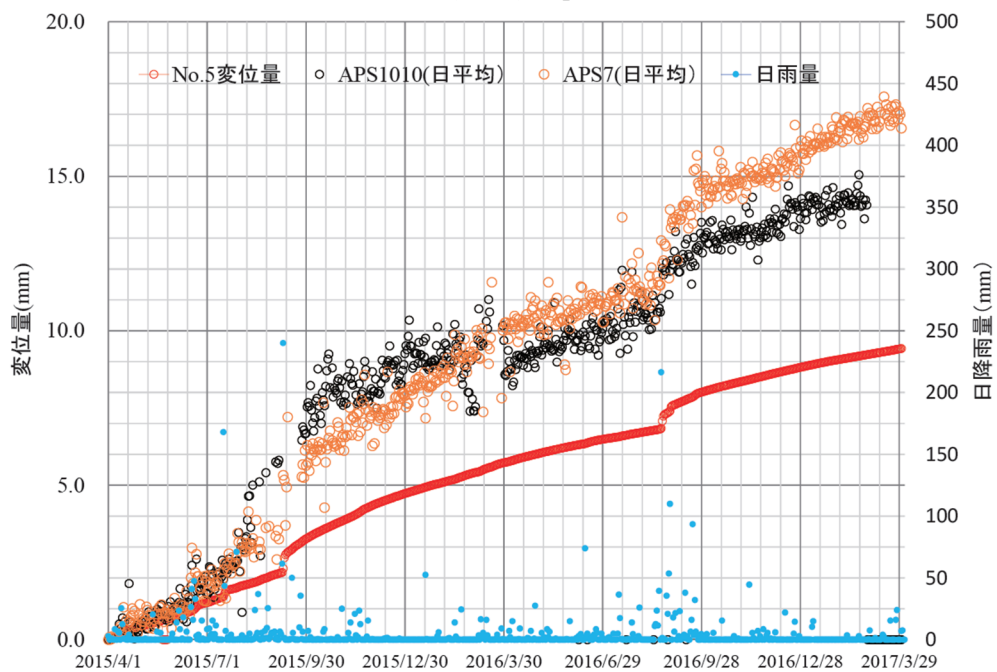


図 2 — 2 7 Summary of displacement measurement using crack gage and APS in 2015 and 2016.

2-7. 結言

本章ではこれまでの調査報告例に基づき、武甲山の地質概況とモニタリング結果について論じてきた。本章で得られた知見をまとめると以下である。

- ・ 武甲山の石灰石鉱床は山の北側に賦存し、下盤は緑色岩類を主体とした地層で構成されている。下盤境界部には、互層帯と呼ばれる石灰岩と緑色岩類が混在する岩相が分布している。残壁は計画的な設計に基づき設計されており、約 45° で最終残壁を形成している。
- ・ 秩父残研で APS による残壁表面変位の計測を実施していたところ、2007 年の台風時に宇根鉱山の APS7 を中心とした変位増加が確認された。その後、宇根鉱山では APS や GPS といった複数の計測手法を取り入れ、相互の計測結果を比較し、計測結果の信頼性を確認しながら、残壁の監視を行っている。
- ・ 宇根鉱山では残壁内部の計測と水抜きを目的として、三本の調査坑道を掘さくした。1,010mL 調査坑道で実施している No.5 亀裂変位計測では、精度の高いデータを連続で取得することが可能であり、かつ APS や GPS との相関が高く、残壁の変位状況の把握に有用である。

以上のように、武甲山では長期的なモニタリングとデータ精度向上により、残壁挙動の把握が可能になった。そして観測結果から、降雨時に変位が増加し、台風のような豪雨の場合では急激に増加することが確認された。以上より、降雨時の残壁変位挙動の分析と対策工事の検討が必要である。

参考文献

- 1) 山富 二郎, 杉山 貴志, 三上 一成, 脇坂 貴, 山口 梅太郎: 武甲山における石灰石採掘と残壁管理, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 161-169, 2018
- 2) 秩父地区秩父残研: 武甲山の協調採掘と最終残壁の安定確保をめざした研究, *Journal of MMIJ*, 112, 665-669, 1996
- 3) 八木 研, 森田 亘, 斉藤 寛士, 加藤 栄一: 武甲山協調採掘, *日本鉱業会誌*, 100 巻 116 号, 1011-1015, 1984
- 4) 秩父残研地質小委員会: 石灰石, 310, 55-71, 2001
- 5) 秩父残研: 石灰石, 162, 70-82, 1976
- 6) 山口 梅太郎: 武甲山における石灰石の協調採掘と秩父地区秩父残研, *Journal of MMIJ*, 134 巻 6 号 67-73, 2018
- 7) 山口 梅太郎: 観測と観測データの蓄積 一序に代えて-, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 159-160, 2018
- 8) 中谷 剣, 藤巻 宏太, 平澤 祐介, 秋山 文孝, 宮弓 泰輔, 田中 恭平: 武甲山残壁の表面変位のモニタリング, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 170-178, 2018
- 9) 青山 秀夫, 矢野 和文, 近藤 めぐみ, 小澤 教良, 中谷 剣: 宇根鉱山調査坑道の亀裂変位計測を用いた残壁モニタリング, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 179-187, 2018
- 10) 小澤 教良: 宇根鉱山残壁挙動に及ぼす降雨の影響, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 208-221, 2018
- 11) K. Kawabata, T. Ito, M. Tonsho: Limestone, 297, 20-27, 1999
- 12) 松田 浩朗, 清水 則一, 吉富 功, 川畑 一洋, 千葉 敏博, 頓所 幹宏: GPS による長大斜面の変位計測の精度について, *Journal of MMIJ*, 119 巻 6,7 号 389-395, 2003
- 13) 清水 則一, 小野 浩, 近藤 仁志, 水田 義明: 長大残壁の安全監視への GPS 変位計測システムの応用に関する現場実験, *Journal of MMIJ*, 112 巻 5 号 283-288, 1996
- 14) 菅原勝彦: 石灰石, 307, 43-62, 2000
- 15) 松田 浩朗, 安立 寛, 西村 好恵, 清水 則一: GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位挙動予測手法の実用性の検証, *土木学会論文集*, 2002 巻 715 号 333-343, 2002
- 16) 清水 則一, 小山 修治, 小野 浩, 宮下 耕一, 近藤 仁志, 水田 義明: GPS 変位モニタリングシステムの連続観測における安定性の検証と計測結果の処理方法の提案, *Journal of MMIJ*, 113 巻 7 号 549-554, 1997
- 17) 中島 伸一郎, 難波 辰弥, 板垣 壮真, 曾田 英揮, 岩崎 智治, 清水 則一, 小野 雅和: 高低差の大きい長大斜面の GPS 変位計測における不動点計測値を用いた対流圏遅延補正法の提案と効果の検証, *Journal of MMIJ*, 130, 479-487, 2014
- 18) 佐藤 英二, 青木 雅路, 丸岡 正夫: バットレス型地盤改良工法による山留め壁変位

抑止効果の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2007 年 72 巻 611 号 79-86.

- 19) 久永 喜代志, 金折 裕司 : 孔内傾斜計による地すべり挙動の測定方法および結果の解釈に関する提言, 応用地質, 43 巻 5 号 p. 328-332, 2002
- 20) 千葉 伸一, 藤澤 和範, 笠井 美青, 杉田 理, 佐藤 成将, 菅沼 健: 挿入式孔内傾斜計計測の標準化に関わる各種実験成果の報告, 日本地すべり学会誌, 47 巻 1 号 60-65, 2010
- 21) 武内 俊昭 : 地盤の調査・計測に関する最近の動向と展望, 応用地質, 29 巻 1 号 p. 93-104, 1988
- 22) 外尾 善次郎: 坑道を流れる通気の温度について, 日本鉱業会誌, 78 巻 892 号 731-738, 1962

第3章 武甲山残壁における地下水位挙動と残壁変位に与える影響

3-1. 緒言

2章で述べたとおり、地表面計測において台風襲来時に宇根鉾山の残壁の一部で一時的に変位が増加する傾向を確認した。これを受け、宇根鉾山では対策工事として水抜きボーリングを実施する一方で、残壁内に水位計を設置し、岩盤内の地下水挙動の把握に努めてきた。地下水位が残壁の変位に影響を及ぼす要因を考察すれば、より効果的な対策工法を検討することができる考えた。また、残壁内に掘さくされた調査坑道内の亀裂に設置した亀裂変位計によって降雨にともなう明瞭な変位挙動が捉えられ、その亀裂変位が地表面変位と明確な関係性を有することが判明している。

以上の背景から、本章では岩盤内の地下水位挙動の詳細を調べるために、複数の計測ポイントにおいて経時的に取得した地下水位データを分析し、降雨時における地下水位変動のメカニズムに関する考察を行った。さらに、各計測ポイントの地下水位と坑道内の亀裂変位速度との関係を調べることで、地下水挙動が残壁変位挙動に与える影響についての検討を行う。

3-2. 武甲山周辺の水理状況および水理計測の概要

3-2-1. 秩父地域の降雨状況

図3-1に、武甲山南側のアメダス(浦山)による2000年からの降水量を示す。図に示されるように、武甲山周辺の最高年間降水量は2001年の2,254mm、最低年間降水量は2003年の1,472mmであり、年間降水量は概ね1,600mm前後で推移している。秩父地方は、夏に雨が多く冬に乾燥する関東で一般的な太平洋側気候に属している。武甲山は標高が高く、冬季は採掘切羽で降雪があるため、本論文では3月～11月を雨期、12月～2月を乾期としている。また、7月～10月は台風の通過により集中した降雨量を記録することもある。

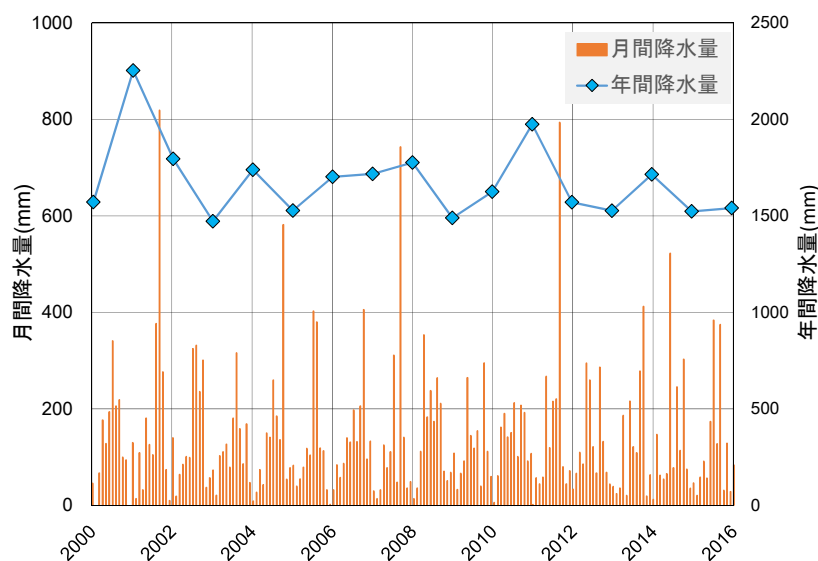


図3-1 Record of annual and monthly rainfall of Mt. Buko area.

3-2-2. 武甲山の水理状況

武甲山の地下水調査は、1990 年から始まり、武甲鉱山の 330 mL 坑道を利用して、南北方向における水理状況を計測していた。また武甲山南斜面の下盤側湧水点の調査および浸透流解析により、広域的な地下水状況の評価も行っていた¹⁾。これらの結果を考慮すると、武甲山の地下水位は図 3-2 のように、主に下盤の地層境界近傍に存在すると推測される。また浸透流解析の結果からも、武甲山の地下水位は概ね下盤内にあり、山頂から残壁北側に流れる傾向があることが確認されている。また、残壁内に掘さくした調査坑道において北落ちの亀裂が卓越していることが確認されたことから、これらの亀裂も水の流れに影響していると考えられる。

以上の結果は 1990 年頃の地下水調査および浸透流解析に基づいているが、その後採掘が進行しても武甲山南側の湧水点に変化が見られないことから、武甲山全体の地下水位は大きく変化していないと考えられる。その一方で、2011 年以降に残壁付近で行われた地下水位計測結果から、下盤以外にも宙水と呼ばれる独立した水位系が存在することが確認された。これらの計測データおよびその考察に関する詳細については後述する。

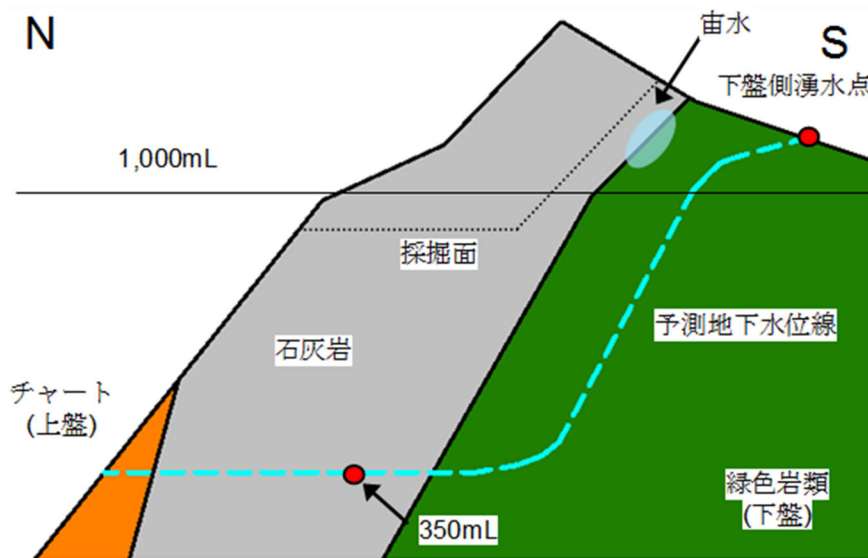


図 3-2 Schematic drawing of groundwater in the rock mass(N-S section).

3-2-3. 残壁内部の透水性

残壁内部の透水性を評価するために実施したルジオン試験の結果を表 3-1 に示す。表より、石灰岩は緑色岩類と比較して透水係数が高いことがわかる。これは石灰岩に多く存在する微細な亀裂の影響であると考えられる。一般に、石灰岩のような亀裂性岩盤は亀裂の状態 (数やサイズ) が透水性に大きく影響することが知られており、これまでも様々な研究が行われてきた^{2~8)}。実際に宇根鉱山内の調査坑道の地質スケッチから、ルジオン試験では評価できないようなスケールの大きい亀裂や岩盤の割れ目が確認されている。これらの亀裂

からは降雨時に多量の湧水が確認されていることから、岩盤内の主要な水みちとなっていると推察される。また、降雨時に石灰石採掘切羽の水はけがよく、ボーリング掘さく時にはほぼ全てのボーリング孔で逸水状態になるなど、武甲山の石灰岩は透水性が高い。

以上の結果から、現場レベルのスケールでは、石灰岩は表 3－1 で示したルジオン試験値以上の大きな透水係数を示すと考えられる。一方、下盤の緑色岩類に関しては石灰岩と比較して卓越した亀裂が少ないことから、透水係数は石灰岩より低いと考えられる。なお、互層帯は連続性に乏しく、コアレベルでは透水係数を定義できないことから、ルジオン試験は実施していない。

表 3－1 Results of permeability test on limestone and greenstones.

岩盤	試験区間長 (m)	試験区間数 (区間)	ルジオン値 (Lu)	透水係数 (cm/sec)
石灰岩	78.7	12	24.5	4.12×10^{-4}
緑色岩類 A	85.0	15	0.354	4.18×10^{-6}
緑色岩類 B	15.0	3	1.98	2.62×10^{-5}

3-2-4. 地下水位の計測方法

宇根鉱山では、降雨時に残壁表面変位が確認されてから、残壁挙動と地下水位の変動との関連を確認するため、残壁内において地下水位計の増設を行ってきた。地下水位を計測する機器として、間隙水圧計と投げ込み式水位計の 2 種類がある。間隙水圧計の特徴は特定区間にパッカーを設置し水圧を測定することで、区間毎の地下水位状況を把握することが可能である。一方で投げ込み式水位計は孔口を開放した状態で圧力センサーを鉛直下向に掘さくしたボーリング孔に設置し、これを観測孔として水面の高さを測定するものである。この計測では複数の流入、流出系から成る全体的な地下水位挙動を捉えている。

図 3－3 および図 3－4 に計測器の設置箇所を示す。水圧センサーは、間隙水圧計、水位計ともに東京測器社の KPD-PA を使用している。計測精度は 20 mm であり、1 時間毎にデータを取得している。本論文で記載した水位計に関しては、UN88 のみが間隙水圧計、M2010-2, M2010-3, UN111 は投げ込み式水位計である。また残壁内の降水量は 1,000 mL に設置した転倒ます式雨量計にて観測を行っている。測定頻度は 1 時間毎で、測定精度は 0.5 mm である。また表 3－2 に各水位計測地点の地層と水位計位置を示す。

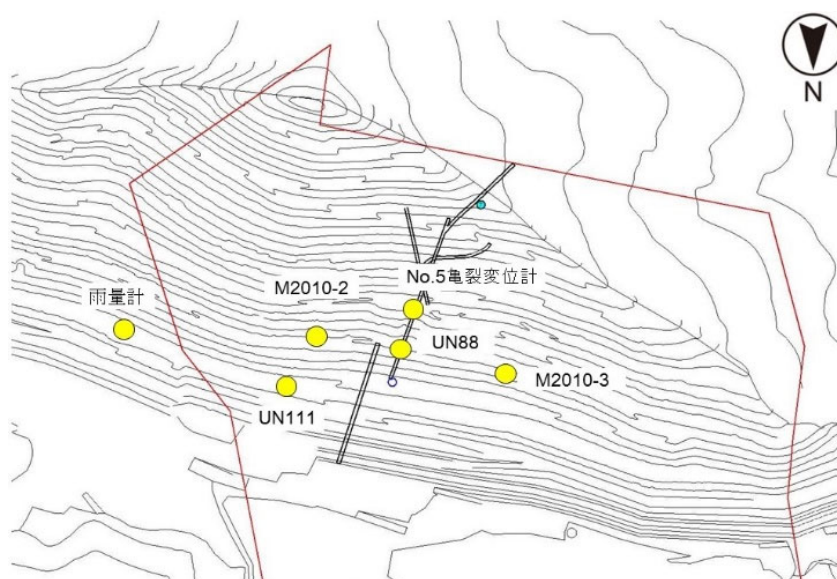


図 3 - 3 Location of the groundwater monitoring points (plan view) .

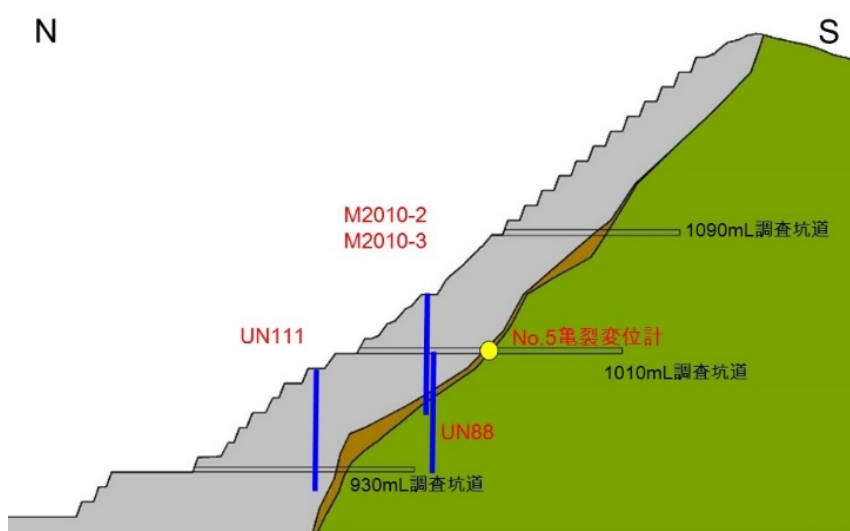


図 3 - 4 Location of the groundwater monitoring points (section).

表 3 - 2 Summary of the groundwater monitoring points.

名称	施工標高 (mL)	石灰岩区間 (m)	互層帯区間 (m)	下盤区間 (m)	水位計位置 (mL)
M2010-2	1,050	53	0	37	970
M2010-3	1,050	34	18	18	990
UN88	1,010	24	10.2	35.8	987 (石灰岩)
					976(互層帯)
					940(下盤)
UM111	1000	100	-	-	905

3-3. 地下水位の計測結果

3-3-1. 短期的な地下水位変化（間隙水圧計の計測結果）

図3-5に、2013年6月の降雨時における間隙水圧計 UN88 の計測結果を示す。図では間隙水圧計から得られた圧力 (Pa) を水頭 (m) に変換し、標高レベルで記載している。本結果より、異なる岩盤地層において下記のような特徴が窺える。

- ・石灰岩は互層帯や下盤と比較して、降雨に対する反応が早いことが確認できる。また降雨前の地下水位と最大地下水位差を比較すると、石灰岩が+6.98 m、互層帯が+5.52 m、下盤が+4.39 m となり、間隙水圧の上昇幅も石灰岩が他よりも大きい。これらの結果は、石灰岩における透水性が高いことを示している。宇根鉦山でのボーリング孔内の湧水状況を確認するために、ボアホールビデオによる孔内観察を行い、石灰岩内では小さな空洞や割れ目からの湧水を確認している。したがって、地下水流動は複数の水みちに支配されていると考えられる。
- ・互層帯は石灰岩と比較して水位が上昇し始めるのがやや遅く、緩やかに上昇、下降する傾向がある。例えば、降雨前の6月26日と3日後の6月29日における地下水位を比較すると、石灰岩の降雨前が988.57 mで3日後は989.10 mであり、+0.53 mまで低下している。それに対し、互層帯は降雨前が987.64 mで3日後が988.67 mと水位差は+1.03 mであり、間隙水圧が低下するのに時間を要している。互層帯は石灰岩と下盤が混在した状態と定義しており、挟みとして粘土を含んでいることが多い。この粘土層の影響により、強い降雨によって一時的に間隙水圧が上昇し、排水に時間を要すると考えられる。しかしながら互層帯は側方への連続性が乏しく、その存在範囲を定義することが難しい。実際にこれまで観測したデータで互層帯に着目すると、計測点によって挙動が異なり、互層帯全てにあてはまる水位傾向を包括的に評価することは困難であった。
- ・下盤の間隙水圧は2、3日かけて緩やかに上昇している。またその上昇幅も石灰岩や互層帯と比較すると小さい。これは下盤内には水みちとなる亀裂が少なく透水性が低いことを示している。この透水性の違いにより、地表面から石灰岩を通過して浸透する降雨水が下盤まで浸透する可能性は低いと考える。

以上の結果から、各層内の地下水位は独立していると考えられる。このように地下水は各地層で個別的な流動傾向を示し、石灰岩や互層帯には図3-2に示した地下水位と異なる宙水が存在していると示唆される。

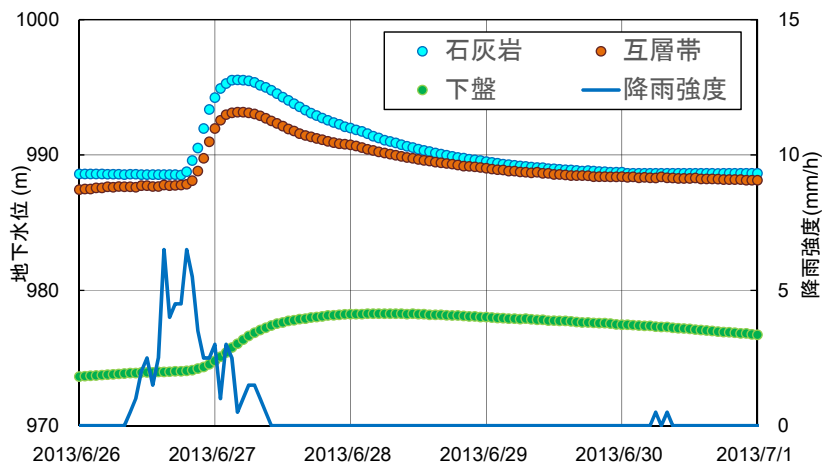


図 3 - 5 Results of fluctuation of groundwater level (UN88).

3-3-2. 短期的な地下水位変化（投げ込み水位計の計測結果）

図 3 - 6 に、2013 年 6 月の降雨時における投げ込み式水位計 M2010-2 および M2010-3 の計測結果を示す。まず M2010-2 の計測結果に着目すると、降雨前は下盤内の 994.7 mL に地下水位が存在したが、降雨により地層境界付近の 997.8 mL まで上昇していることがわかる。これは透水性の高い石灰岩から降雨水が流入し、観測孔内の水位が急上昇したためと考えられる。水位上昇のピークを過ぎた後は、995.6 mL 付近で地下水位が停滞し、降雨前よりも高い地下水位が長時間持続する。

一方、M2010-3 に着目すると、降雨時の水位変化は M2010-2 と比較して緩やかであることがわかる。また水位の上昇幅も小さく、この降雨に関しては水位の最大値が 998.96 mL と互層帯付近の少量の変動で収まっている。また降雨後の水位変化も緩やかであることから、下盤と互層帯の透水性が低いことが観察される。

以上のように、降雨時における短期間の地下水位変化は場所によって異っており、一因として周囲の地質状況の違いが挙げられる。

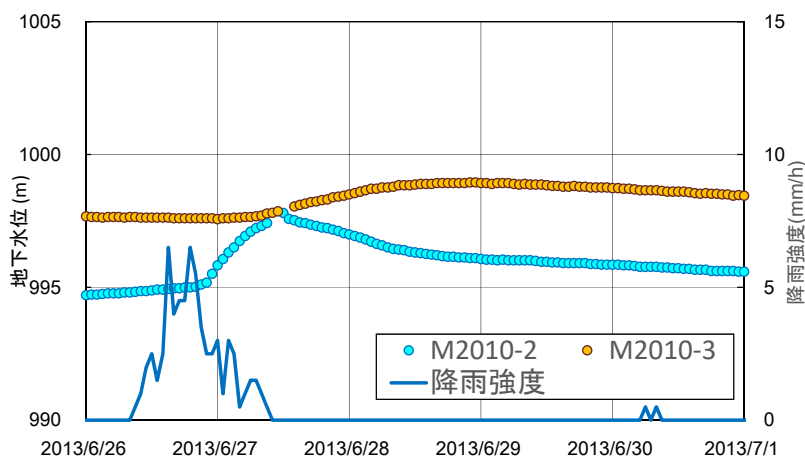


図 3 - 6 Results of fluctuation of groundwater level (M201-2, M2010-3).

3-3-3. 長期的な地下水位変化

図3-7に、投げ込み式水位計 M2010-2, M2010-3 および UN111 による計測で得られた長期的な水位変化を示す。表3-2に示すように M2010-2 および M2010-3 の2つの水位計の観測孔は下盤内まで掘さくを行っているのに対し、水位計 UN111 は石灰岩中に 1,000mL まで削孔したボーリング孔を計測孔として使用している。

まず M2010-2 および M2010-3 に着目すると、降雨時に水位が一時的に上昇し、冬季に徐々に地下水位が低下する傾向を読みとれる。武甲山山頂では 12~2 月は積雪期となるため、冬季は残壁表面からの水の浸透は極めて少ないと考えられる。したがって、この期間の地下水位の変動は降雨に由来しないと考えられるが、冬季の計測データより下盤内で地下水位が変動しており、この低下傾向も計測地点によって異なることがわかる。

一方 2013 年 3 月から計測を開始した水位計 UN111 の計測結果に着目すると、降雨がない場合の水位は水位計設置深度の 905 mL 以下に存在していることがわかる。しかしながら、降雨時には地下水位が一時的に急上昇した後に急降下する傾向があり、水位上昇は現在計測中の地下水位計で一番大きい。これは水位計 UN111 を設置したボーリング孔付近が、降雨時に集水しやすい地形であることに加えて、石灰岩の高い透水性によると考えられる。

以上のように、長期間の地下水位の変化も周囲の地質状況のみならず、季節や降雨状況を反映したものであることがわかる。

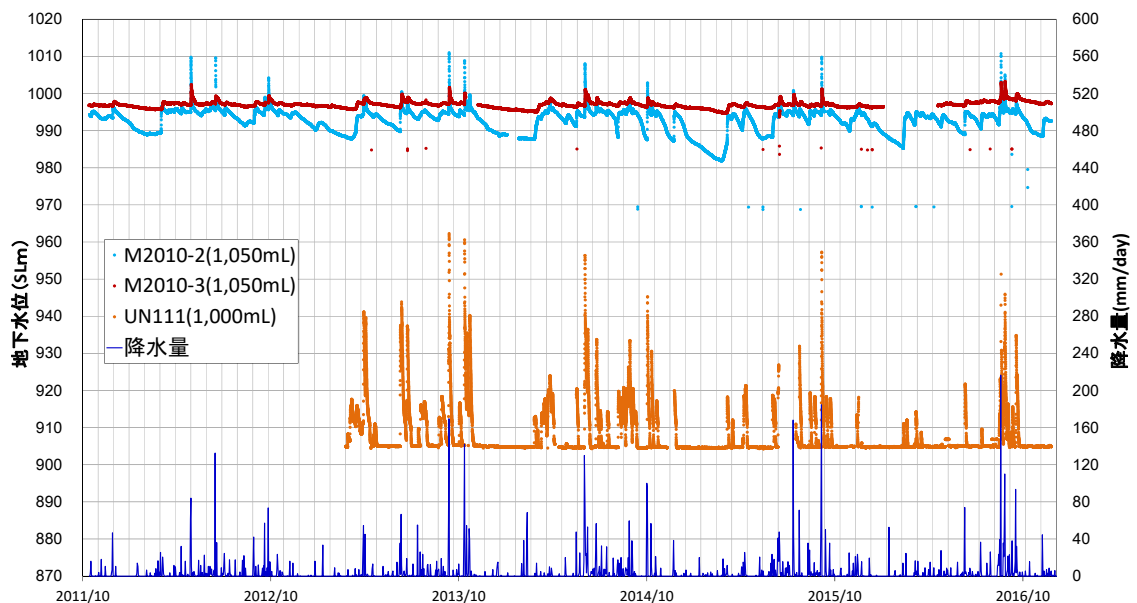


図3-7 Long term fluctuation of groundwater level (M2010-2, M2010-3, UN111).

3-4. 降雨量が地下水位に与える影響

3-4-1. さまざまな降雨状況における地下水位変化

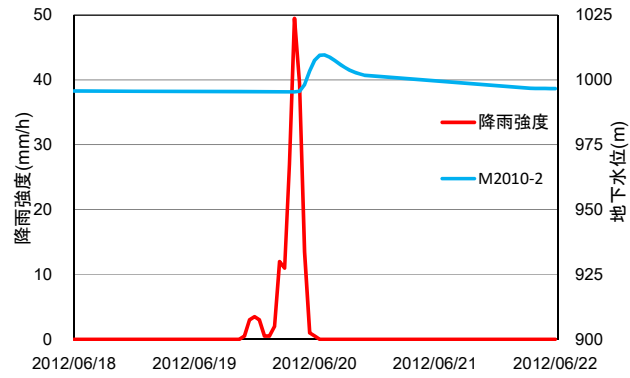
前節 3-3. で示したように、同じ残壁内に設置した水位計でも設置位置により水位変化の傾向が異なる。その要因は地下水位の偏在性、周辺岩盤の透水性の違い、地質の不均質性など多岐にわたる要因の影響と考えられる。ここではさまざまな降雨状況（降雨強度、継続時間）において、各位置の水位の上昇および下降の傾向を比較することによって、周囲の岩盤の透水性や地質・地形が地下水位に与える影響について検討した。

地下水位の測定期間中から、地下水の上昇が確認できた降雨を 3 つ抽出し（2012 年 6 月、2013 年 9 月、2013 年 10 月）、それぞれの期間の降雨強度（mm/h）と地下水位との関係を調べた。図 3-8 に、各豪雨期間における降雨強度と M2010-2 および UN111 による地下水位の計測結果を示す。2012 年 6 月の降雨時は UN111 の設置前であるため M2010-2 の結果のみを示している。

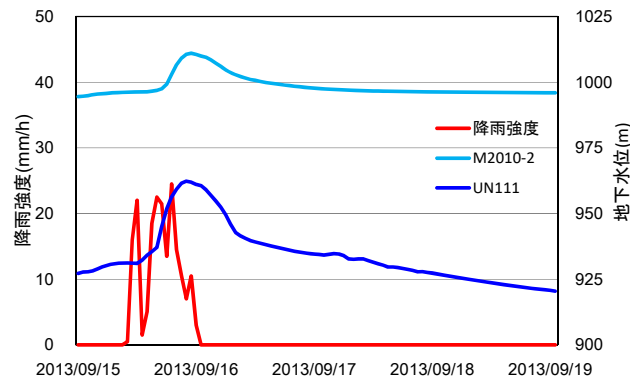
まず M2010-2 の結果に着目すると、いずれの降雨期間でも、降り始めからの降雨量が数 10 mm 程度では地下水位の上昇が発生しないことがわかる。この要因としては降雨が岩盤に浸透するタイムラグが考えられる。数 10 mm の降雨が単独であった場合でも地下水位に変化がないことから、残壁そのものが保水力や排水能力を保有しており、岩盤が完全飽和状態になった段階で地下水位の上昇が始まると考えられる。降雨強度および継続時間と地下水位変化との関係は明確ではないが、図 3-8 の結果から判断すると、20 mm/h 以上の降雨が 4、5 時間継続すると急激に地下水位が上昇することが確認できる。

次に UN111 の計測結果に着目する。図 3-7 で示したように UN111 は降雨がない場合は水位計の設置深度以下に地下水位が落ち、降雨時には水位上昇が大きいことを述べたが、図 3-8 から降雨時は M2010-2 より少量の降雨でも水位が上昇することが再度確認できる。また同じ降雨で比較した場合、水位の上昇幅は M2010-2 より大きく、上昇のタイミングが早い。これは UN111 周辺の集水しやすい地質状況や石灰岩の透水性の良さを示している。

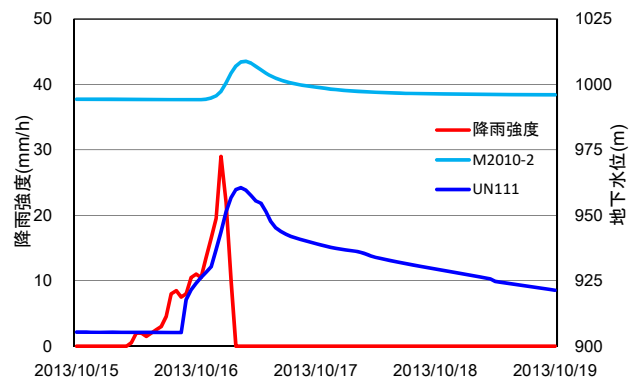
以上のように、降雨時の地下水位変化は周辺の地質状況だけでなく降雨状況（降雨強度、継続時間）にも影響を受けている。



(a) June, 2012 (Total 167.0mm, Max 49.0mm/h)



(b) September, 2013 (Total 191.0mm, Max 22.5mm/h)



(c) October, 2013 (Total 192.5mm, Max 29.0mm/h)

図 3 - 8 Relations between groundwater level and intensity of rainfall.

3-4-2. 地下水位の上昇および下降速度

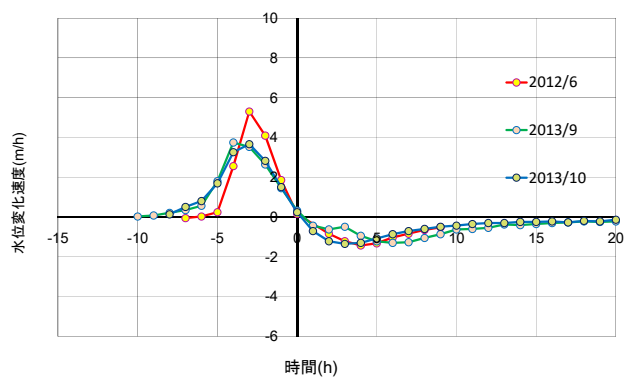
台風のような豪雨の場合、通常の降雨以上に残壁変位が大きく上昇する傾向がある。この際、地下水位も通常の降雨より速く上昇することから、豪雨時の特異的な地下水状況が残壁変位に影響を与えている可能性がある。そこで水位計 (M2010-2 および UN111) で計測した豪雨時のデータから水位変化速度(m/h)を求め、降雨状況および地質状況との関係について考察した。

図3-9に、図3-8で示した3回の降雨期間における水位計 M2010-2 の計測結果から求めた水位変化速度 (m/h) を示す。図では地下水位が最大になった時刻を 0h として、横軸が負の領域を地下水位の上昇時、正の領域を地下水位の下降時として表している。また、図3-9(b)に M2010-2 の計測データから求めた水位変化速度と地下水位の関係を示す。

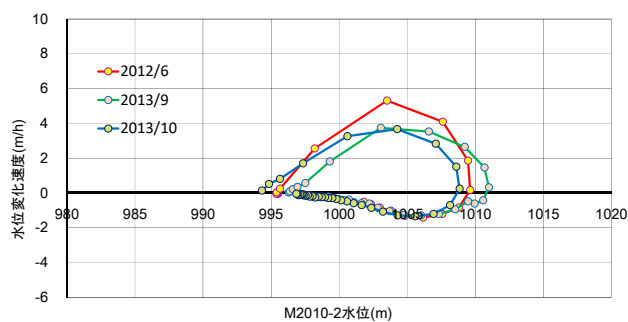
図3-9(a)に示されるように、水位が上昇する時は、降雨開始から徐々に水位変化速度が増加する。2012年6月、2013年9月、2013年10月の降雨で変化が異なるが、この水位変化速度は、降雨状況に大きく依存し、豪雨ごとに異なる変化を示す。図3-9の降雨強度のグラフに示されるように降雨状況が異なり、例えば、2012年6月の降雨では最大地下水位に至る5~6時間前から増加が視われ、3時間前後で急激に増加して、水位変化速度は最大5.2 m/hに至る。このような大きな水位変化を示したのは、2012年6月18日0時から短時間に降った降雨強度49.0 mm/hの雨によって引き起こされた。一方、2013年9月は不連続な降雨、2013年10月は降雨強度10 m/h以下の雨が継続的に降ったことが観測されており、その結果、両期間の水位変化速度が最大値に至るまでの時間が長くなったと推察される。地下水位が最大値を迎えた後は水位変化速度が負となり、地下水位が下降を始める。また、いずれの降雨期間においても水位の最大値を示した3~5時間後に極小値を迎え、その後水位変化速度は0 m/hに収束することがわかる。

図3-9(b)に示される M2010-2 の水位変化速度と地下水位の関係より、いずれの降雨期間においても、水位が1003~1004 mL付近で水位変化速度が最大となることがわかる。その後、水位変化速度は低下するものの地下水位は上昇を続け、1,010 mL前後で最大水位に至る。また水位上昇時は、水位変化速度と地下水位の関係性を示す軌道の形は類似しているが、降雨強度の違いで異なる軌道をもって地下水位の最大値へ至ることがわかる。水位の下降時は水位上昇時よりも軌跡が一致していることから、下降速度は降雨条件にあまり影響されないと考えられる。

次に図3-10(a)および(b)に示す水位計 UN111 の計測結果から求めた水位変化速度の時間変化と地下水位との関係に着目する。水位変化速度の算出方法および横軸の時間の定義は図3-9と同様である。計測孔が石灰岩中に存在する UN111 の結果では、計測孔が下盤に到達している M2010-2 の結果と比較して、水位変化速度が大きく、地下水位との関係を表した軌跡も大きなものとなっている。これは前節で考察したように、設置位置の集水力が大きく、かつ周辺岩盤の透水性の大きい UN111の方が降雨の影響を受けて変化しやすいことを示している。

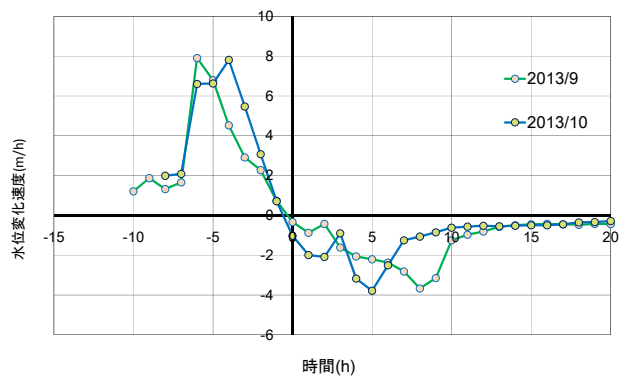


(a) Change of rate of fluctuation of groundwater level with time.

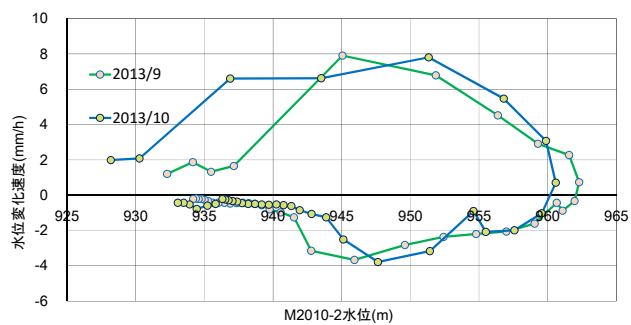


(b) Relations between rate of fluctuation and groundwater level.

図 3 - 9 The result of measurements of groundwater (M2010-2).



(a) Change of rate of fluctuation of groundwater level with time.



(b) Relations between rate of fluctuation and groundwater level.

図 3 - 10 The result of measurements of groundwater (UN111).

3-4-3. 旧地形および断層の影響

これまでに M2010-2 と UN111 の計測結果を比較して、UN111 の方が降雨の影響を受けて水位が上昇しやすい傾向があることを述べてきた。この要因として、武甲山の旧沢地形（採掘前に存在していた沢の位置）と W4 断層が影響すると考えられる。

武甲山の代表的な沢筋系として、武甲鉾山内に存在する白沢と、宇根鉾山のアケビ沢がある。図 3-11 は採掘前の武甲山の地形図である。水位計 M2010-2 と UN111 はかつてのアケビ沢に位置することが確認できる。両沢はかつてグローリーホール採掘に利用され、その後ベンチカット採掘への移行に伴い斜坑が掘さくされた経緯がある。これらの斜坑からは降雨時に多量の湧水発生が確認されている。一方、その後施工された立坑は延命を目的に尾根内に掘さくした。これらの立坑からは出水が少ないことから、沢系の深部には水みち系が多く発達していることが推測できる。これまでの水抜きボーリング孔からも、旧沢地形周辺では降雨時に特に多くの出水が確認できている。

W4 断層は宇根鉾山宇遠地区から武甲鉾山内を貫き宇根鉾山中央部にかけて、西北西－東南東方向、北へ急傾斜の構造をもって分布する断層である。武甲山中央部（宇根鉾山東部）の 990～950 mL の最終残壁面には粘土混じりの破碎部が露出しており、当該箇所における W4 断層の幅は数 10 m に達していると想定されていたが、930 mL の坑道掘さくとボーリング結果から、当該区域の W4 断層は、幅 1 m 未満の急傾斜を成す破碎部が複合（8 本程度）した断層群よりなる脆弱帯であり、その破碎幅は細かく、強度は弱いことがわかった。当断層は石灰岩内に粘土を含んでおり、調査坑道の様子から断層部分は透水性が低く遮水壁のような働きをしていると考えられる。アケビ沢付近では沢線と直角をなすように、北側に W4 断層が横断している。したがって南側からアケビ沢に沿って流れてきた浸透水が W4 断層で遮断される。その結果、断層南側で地下水位が急激に上昇し、図 3-12 に示す水位上昇イメージ線のようにになっていると考えられる。

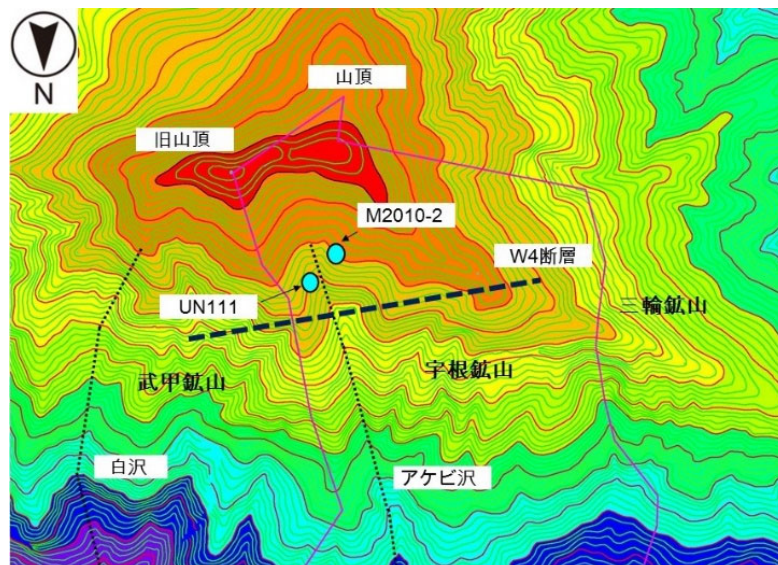


図 3-11 Pre-mining topography of Mt. Buko.

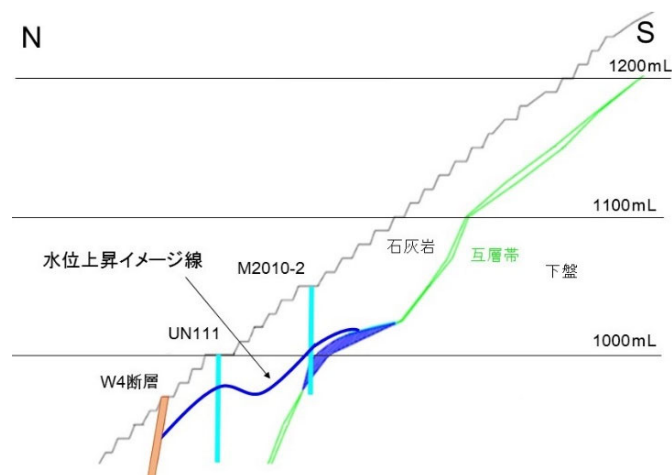


図 3 - 1 2 Influence of geologic structure on rising groundwater level.

3-4-4. 水位上昇のメカニズム

これまでに述べてきた地下水位の考察から，武甲山残壁における水位上昇のメカニズムは下記のようなと考えられる。

- ・ 武甲山の地下水位は山頂から残壁側に向かう水頭勾配をもつ。
- ・ 石灰岩，互層帯，下盤がそれぞれで異なる挙動を示す地下水位を持ち，亀裂が支配する地下流動となる。
- ・ 石灰岩層は透水性が高い。
- ・ 旧沢地形では降雨時の集水効果が高い。
- ・ 宇根鉾山ではアケビ沢とその北側に，断層粘土の挟みにより透水性が低い W4 断層がある。この断層が遮水壁のように働き，とりわけ水位が上昇しやすい状況になっている。

上記のような複数の要因が重なり，宇根鉾山残壁東側では水位が上昇しやすい状況にあると考えられる。

3-5. 地下水位と亀裂変位速度

武甲山ではモニタリングデータから降雨時に残壁表面変位が増加する傾向が確認できている。また先述した通り，宇根鉾山の 1,010 mL 調査坑道の互層帯付近に設置した No.5 亀裂変位計の測定結果は地表面変位と良い相関性を示していることから，残壁挙動を示す指標として使用できると考えられる⁹⁾。加えて 3-4 で述べてきた通り，地下水位変化のほとんどは降雨に関係した短時間の変化であるから，降雨時の短時間の変位挙動を分析する必要がある。しかしながら APS，GPS などの残壁表面変位の測定手法では，天候によるデータ欠損が多く，計測精度も十分でないことから降雨中の短時間の地下水位分析には不適切である。そこで短時間の降雨時でも高精度のデータを連続して取得できる亀裂変位計が最適であると考え，亀裂変位計による変位速度の計測結果と地下水位との関係について検討を行った。

3-5-1. 残壁上部の地下水位と亀裂変位速度との関係

図3-13は、図3-8で示した3回の降雨期間での、残壁上部に位置する水位計M2010-2による地下水位の計測結果と、No.5亀裂変位計の計測結果から求めた亀裂変位速度を時間軸で示したものである。亀裂変位速度 (mm/h) は1時間ごとの変位量の差である。図より、全ての降雨期間において地下水位の上昇とほぼ同じタイミングで亀裂変位速度も上昇していることがわかる。また3回の降雨期間の内、2013年9月が最も地下水位が上昇したが、亀裂変位速度も同様に最高値を記録している。このように、いずれの降雨期間においても地下水位と亀裂変位速度の密接な関係性が確認できる。先に述べたように、No.5亀裂変位計で計測した変位と残壁表面変位との間に高い相関性が確認できていることから、地下水位の変化が残壁変位発生の因子であることは明らかである。

図3-14は、図3-13の結果に対して横軸の亀裂変位速度と縦軸の地下水位との関係を上昇時と下降時にわけて示している。亀裂変位速度と地下水位との関係は降雨ごとに異なるが、共通する傾向として以下の点がある。

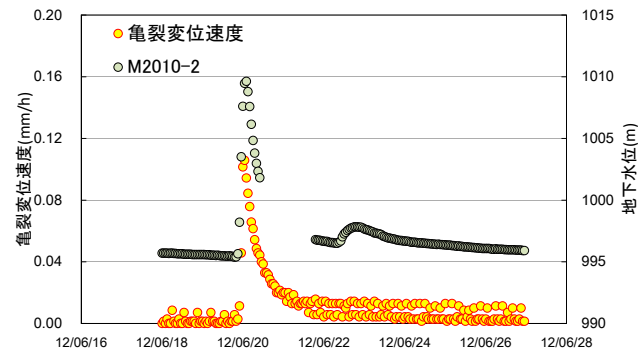
- ・地下水位と亀裂変位速度のピークのタイミングが一致している。
- ・水位の上昇にともなって亀裂変位速度が増加し、水位が高い状況ではその増加率も増加する。

以下では、上記の特徴を詳細に分析するために、地下水位の上昇時および下降時を区別して考え、地下水位と亀裂変位速度との関係性を考察する。

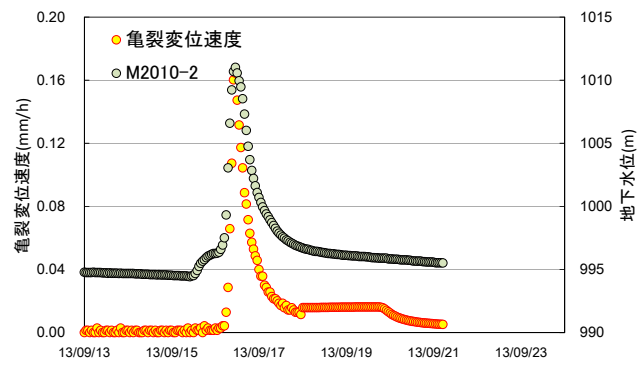
3-5-2. 地下水位の上昇時における亀裂変位速度

図3-14(a)にM2010-2における水位上昇時の地下水位と亀裂変位速度との関係を示す。地下水位が約1,005 mL以上では亀裂変位速度が急激に増加することがわかる。台風のような豪雨時には通常の降雨以上に変位が大きく生じることが報告されていたが、これはM2010-2においては1,005 mL以上に地下水位が上昇した状況であると考えられる。これより、急激な変位の発生を防ぐためにはM2010-2の水位を1,005 mL以下に抑制することが重要である。

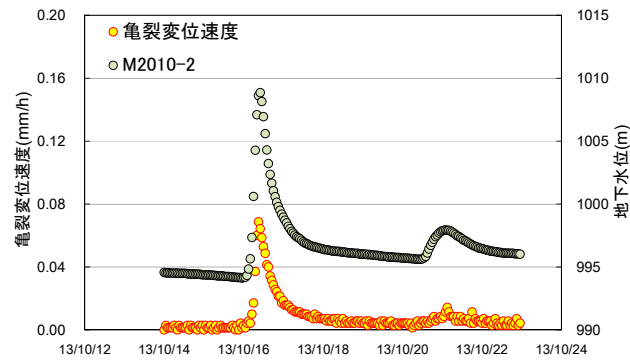
また降雨ごとの軌跡に着目してみても、地下水位の上昇に伴い亀裂変位速度が増加する傾向は共通するが、一定ではないことが読み取れる。例えば2012年6月と2013年10月の結果を比較すると、2012年6月のグラフは全体的に右側にプロットされている。これは同じ地下水位の状況にあった場合でも、2012年6月は亀裂変位速度がより高速であったことを示している。M2010-2の地下水位が概ね1,005 mLに上昇した際に亀裂変位速度の増加が顕著となることから、この地下水位以上となるような雨を通常の降雨と区別して、『豪雨』と呼び、以下の考察に使用する。



(a) June, 2012

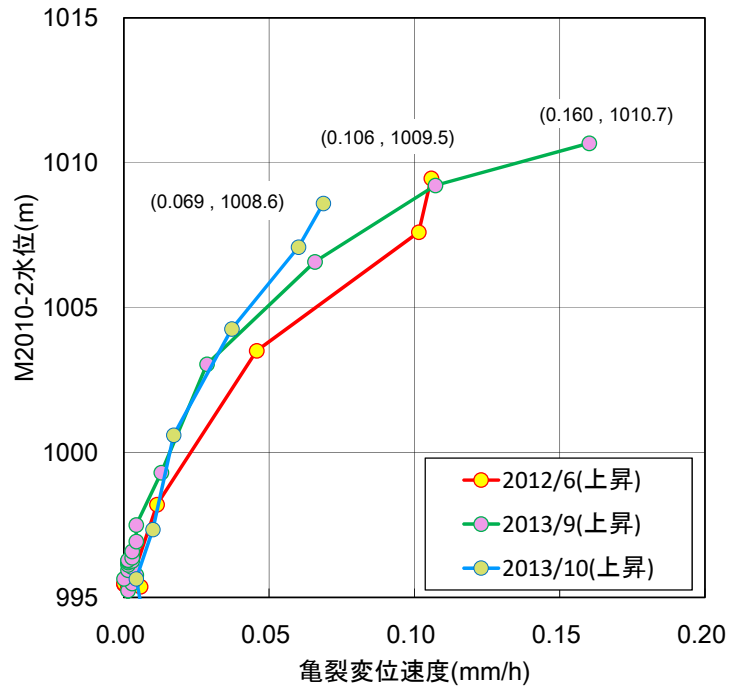


(b) September, 2013

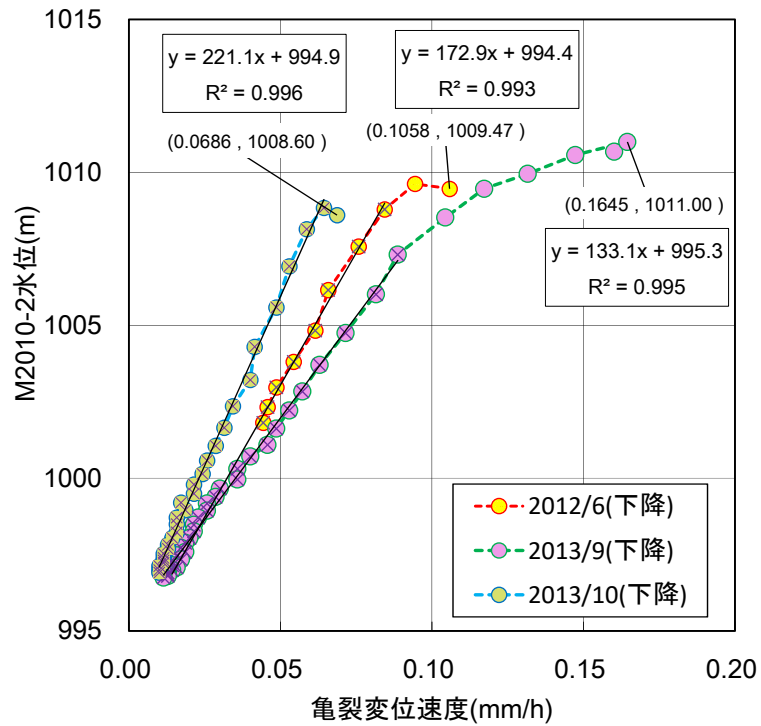


(c) October, 2013

図 3 — 1 3 Relationship between rate of crack gage displacement and groundwater level during rainfall.



(a) Relationships between rate of crack gage displacement and groundwater level on rising occasion



(b) Relationships between rate of crack gage displacement and groundwater level on falling occasion

図 3 — 1 4 Relationships between rate of crack gage displacement and groundwater level (M2010-2).

3-5-3. 地下水位の下降時における亀裂変位速度

地下水位の下降時における地下水位と亀裂変位速度との関係を図3-14(b)で示した。地下水位の下降時は亀裂変位速度がピーク値から減少すると、地下水位と亀裂変位速度との関係が線形になり、水位は997 mL 付近に、亀裂変位速度は0.02 mm/h 程度に収束する傾向がある。また、収束する際の傾きは降雨ごとに異なるが、降雨量が多く、かつ最大亀裂変位速度が大きい場合に小さくなる。図に示している3つの降雨では2013年9月の亀裂変位速度が0.165 mm/h で最大であったが、その時の傾きが133.1 m/mm/h であった。それに対し、2013年10月は最大変位速度0.106 mm/h、傾きは172.9 m/mm/h であった。図3-14(b)に示す地下水位と亀裂変位速度との関係において傾きが小さいことは、同じ地下水位でも亀裂変位速度が大きく、降雨後もより高速な変化を維持していることを意味している。

以上の結果から、地下水位の下降時の変位速度は上昇時の変位履歴が影響している可能性が示唆される。3-5-2の結果と併せて考えると、水位上昇時と下降時で変位速度変化が異なることから、上昇時と下降時では地下水位が亀裂変位に及ぼす影響度合いが異なると考えられる。

3-5-4. 残壁下部の水位と亀裂変位速度

図3-11に示したように、UN111は宇根鉾山の旧沢地形(アケビ沢)に位置し、豪雨時のみに水位が急上昇する水位計である。図3-15は豪雨時における地下水位上昇時のUN111による水位測定結果と亀裂変位計の測定結果から得られた地下水位と変位速度との関係を示したものである。UN111は図3-14(a)で示したM2010-2の結果とは異なり、豪雨の様態にかかわらず、共通した軌跡を示すことが、M2010-2と異なる点であり、940 mLを超えたあたりから亀裂変位速度が増速し始め、950 mLを超えると亀裂変位速度の増加が著しいことがわかる。M2010-2 観測孔は下盤まで掘さくし、水位計は下盤内に設置している。このように、当観察孔の地下水位は、複数の流入、流出系から成り立つため、降雨条件によって軌道がばらつくと考えられる。それに対し、水位計UN111は石灰岩内に掘り止めた水位観察孔であり、M2010-2と比較して地下水位に変化を与える要因が少ないと考えられる。また、少雨の場合は地下水変化がなく、豪雨時のみの地下水位を捉えている点も、UN111の豪雨時における地下水位と変位速度の関係性が一対一となる理由と考える。この結果から、豪雨時に変位が増加する主要因は、水位計UN111周辺で表される残壁下部の地下水位が急激に上昇することにあると推測される。

また、豪雨時に水位計UN111周辺で地下水位が急上昇するのは旧沢地形とW4断層の影響であると考えられる。図3-16に示す水位上昇量等値線図は、2014年の降雨時のデータを使って作成した豪雨の水位上昇量を表している。この場合の水位上昇量とは、降雨前の水位とピーク時水位の差を意味している。図より、豪雨時の変位発生要因と考えられるUN111付近で水位上昇量が大きくなっており、図3-11の旧地形図と比較すると、その中心が旧沢地形(アケビ沢)に位置していることがわかる。この図から旧沢地形の集水範囲

が平面的にも広がりがあることが確認できる。水位計の設置数が少なく、等値線の精度の低さは否めないが、今後水位計を増設し、上昇範囲やメカニズム解明に努めていきたい。

このように残壁に影響を与える要因は、地下水位だけでも複数あることが示唆され、豪雨時に残壁下部の変位速度発生を抑制するためにはUN111 付近の降雨時の水位上昇を 940 mL 以下に抑制する必要がある。

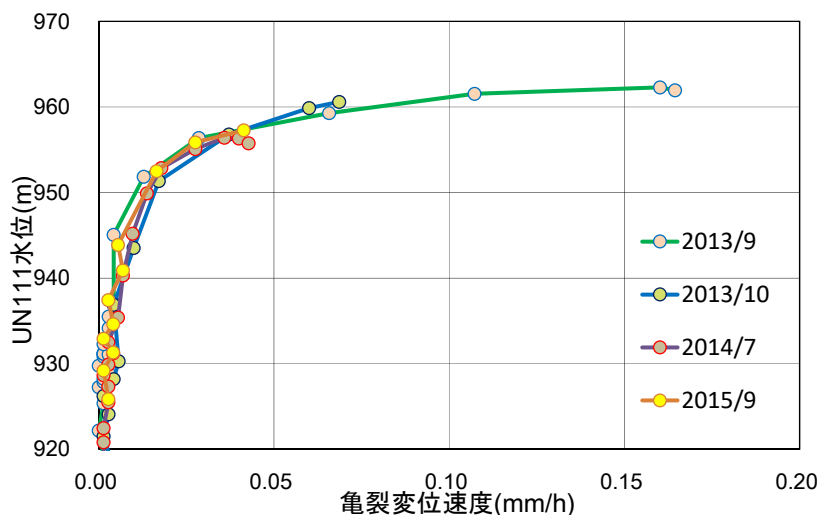


図 3－ 1 5 Relationships between rate of crack gage displacement and groundwater level (UN111).

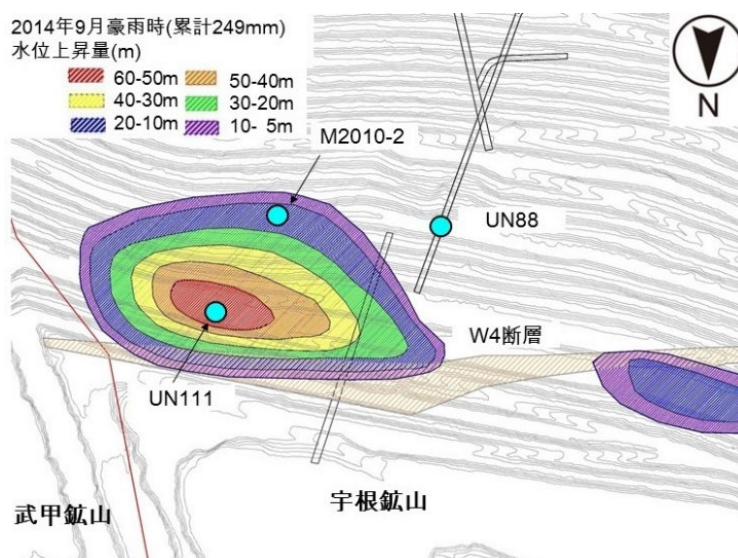


図 3－ 1 6 Rise in groundwater level during rainfall on the part of the rock slope of Une Mine.

3-5-5. 水位感度曲線

武甲山では、APS の変位速度を用いて残壁の管理基準を作成している。これは長期にわたるモニタリングの傾向から、残壁の変形挙動は変位速度で評価・管理すべきであると考えられてきたからである¹⁰⁾。しかしながら、本論文で示してきた考察から、降雨の影響を 1 回

の降雨により生じる最大の変位速度として定量化できると考えて、地下水位と変位速度の最大値の関係性を考察することとする。

図3-17は図3-14の3事例他、複数の降雨事例におけるM2010-2の地下水位の最大値と亀裂変位速度の最大値をプロットしたものであり、今まで論じてきた豪雨については緑色で示している。加えて豪雨ほど地下水位が上昇しなかった降雨についても黄色でプロットしている。図のように、豪雨と降雨のそれぞれについて、高い相関係数で線形近似できる。以後、これらの近似曲線を水位感度曲線と呼ぶ。

通常の降雨の場合、直線の傾きが大きいことから地下水位上昇による変位速度の増加は少ない。またピークに至るまでの水位上昇過程では、亀裂変位が小さく、計測器が変位速度を議論できる精度はないが、ピーク値のM2010-2の水位と亀裂変位速度の相関は高い。このように降雨時にM2010-2周辺の地下水位が1,005 mLを超えるかどうか、残壁挙動に大きく影響する。

一方、豪雨時の場合は、図3-14(a)で示したように、一定レベルの水位以上に上昇しにくくなるが、地下水位上昇に伴って亀裂変位速度が急激に上昇するようになり、亀裂変位速度も地下水位も最大値に至る。降雨時より、豪雨時の水位感度曲線の勾配が緩やかになることから、亀裂変位速度の上昇率が大きくなっていると考えられる。この結果は、豪雨時においてはM2010-2付近の地下水位ではなく、3-5-4で述べたUN111付近の地下水位と考えられる。

UN111は豪雨のみの水位変化を捉えている一方で、M2010-2は降雨時と豪雨時の水位変化が捉えられており、降雨時と豪雨時の水位上昇に関係性がある亀裂変位が複合的に表れている。結果として、この要因の違いが水位感度曲線の豪雨と降雨の変曲点を生み出している。水位感度曲線は降雨状況による残壁変形挙動の相違を明確にしたものであり、両者の変形メカニズムの相違を良く表している。

また、水位感度曲線を用いると、最大地下水位から変位速度を予測することも可能である。既に述べたように武甲山では残壁の管理基準として変位速度で残壁安定性を評価しているが、同時に地下水位のモニタリングを行うことにより、降雨時における緊急性の判断に繋がることが期待される。

以上のように、降雨時の変位速度は残壁上部の水位によって決定されることが考えられるが、豪雨時は普段は地下水位が観測されていない残壁下部に水が急激に集水することにより、一時的に変位速度が大きくなると考えられる。一般に地下水位が亀裂変位速度に与える影響として、岩盤が水を含有することによる物性値の低下^{11~14)}、亀裂の有効応力が拡大するなどが論じられている¹⁵⁾。しかしながら、ここで示した地下水位と変位速度との関係性について、その要因は未だ明らかではなく、詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。

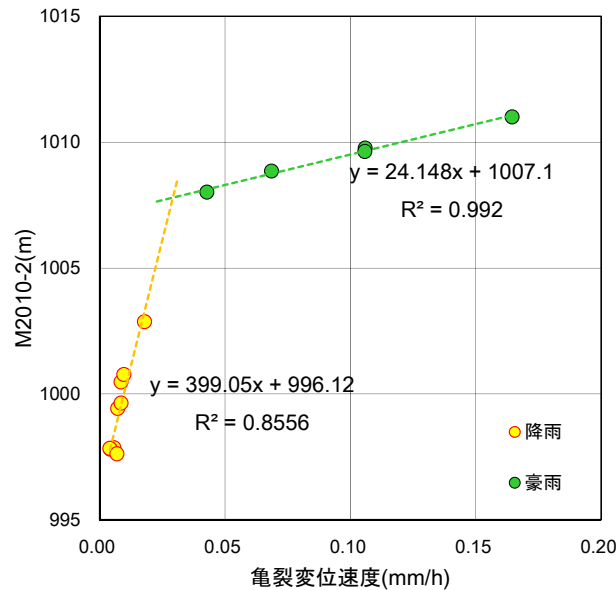


図 3 - 1 7 Sensitivity curve of groundwater level (M2010-2) on rate of crack gage displacement.

3-6. 結言

本章では武甲山の残壁変形挙動に関して、主に地下水位との関係に焦点を当て、特徴やその要因について論じてきた。本章で得られた知見をまとめると以下である。

- ・武甲山では、石灰岩、互層帯、下盤で独立した地下水位を有しており、石灰岩は亀裂および割れ目の影響で透水係数が高い。
- ・石灰岩の水みちは亀裂の影響を強く受け、水位計の挙動は一様ではない。
- ・宇根鉾山残壁東側では旧沢地形の影響を受け、降雨時に水が集水しやすい状況となっている。また残壁下部を東西に走る断層が遮水壁となり、より地下水位が上昇しやすい構造となっている。
- ・この旧沢地形沿いの急激な地下水位上昇と亀裂変位速度増速が類似した挙動を示すことから、地下水が残壁変位に何らかの影響を与えている。
- ・地下水位と亀裂変位速度との関係を分析したところ、通常の降雨の場合、残壁上部の水位 (M2010-2) が変位の発現に対して支配的であり、豪雨時は残壁下部の水位 (UN111) が支配的となる。したがって、残壁の変位挙動は複数の地下水挙動により構成されていると考えられる。

以上、本章では、地下水位変化と変位速度との関係を検討した結果、降雨時の複数の地下水位変化が変位速度に影響を与えていることが明らかになった。地下水位をコントロールすることにより、残壁変位が抑制できる可能性があるが、これにはそれぞれの地下水位への対応と対策をわけて考える必要がある。一般に、鉾山の残壁では効率的な水抜きが求められるが、今回のデータ解析では優先的に水位上昇抑制対策を実施すべき箇所、および基準とな

る水位レベルを定量的に表すことができた。これらの解析結果に基づいて降雨対策を計画することにより、より効果的な降雨時の変位抑制対策ができると考える。

参考文献

- 1) 秩父地区秩父残研：武甲山の協調採掘と最終残壁の安定確保をめざした研究, *Journal of MMIJ*, 112 巻 10 号 665-669, 1996
- 2) 野口 義文, 飯島 章夫, 中村 直昭, 小池 克明, 金子 勝比古: 岩盤亀裂群の計測とモデリング, *Journal of MMIJ*, 107, 428-433, 1991
- 3) 田中 靖治: 割れ目のネットワークを考慮した新しい岩盤中地下水流動解析手法の開発, *水工学論文集*, 48 巻 355-360, 2004
- 4) 小池 克明, 野口 義文, 岩崎 浩, 金子 勝比古: 数理地質学的手法による亀裂属性の空間分布の解析, *Journal of MMIJ*, 112, 907-914, 1996
- 5) 土原 健雄, 吉村 雅仁, 石田 聡, 今泉 眞之, 河地 利彦: 破過曲線形状及び分散率からみた亀裂性岩盤の地下水流動特性, *地下水学会誌*, 47 巻 3 号 309-322, 2005
- 6) 井尻 裕二, 深田 淳, 坂本 和彦, 内田 雅大, 石黒 勝彦, 梅木 博之, 大西 有三: 割れ目ネットワークモデルの水理特性に及ぼす割れ目スケール効果の影響土木学会論文集, 2001 巻 694 号 179-194, 2001
- 7) 竹田 幹郎, 張 銘, 江崎 哲郎, 高橋 学, 三谷 泰浩: 岩石の透気特性および水理学的異方性に関する実験的研究, *応用地質*, 41 巻 4 号 210-217, 2000
- 8) 張 銘, 竹田 幹郎, 江崎 哲郎, 高橋 学, 遠藤 秀典: 拘束圧および異方性が岩石の透水・透気係数に及ぼす影響, *Journal of MMIJ*, 117 巻 12 号 941-946, 2001
- 9) 青山 秀夫, 矢野 和文, 近藤 めぐみ, 小澤 教良, 中谷 剣: 宇根鉦山調査坑道の亀裂変位計測を用いた残壁モニタリング, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 179-187, 2018
- 10) 山富 二郎, 杉山 貴志, 三上 一成, 脇坂 貴, 山口 梅太郎: 武甲山における石灰石採掘と残壁管理, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 161-169, 2018
- 11) 地下水ハンドブック編集委員会: 改訂地下水ハンドブック, p.1504, 1998
- 12) 工藤 裕之, 松木 浩二: 飽和含水状態にある岩石の繰り返し疲労特性におよぼす間隙水圧の影響, *日本鉱業会誌*, 104 巻 1201 号 157-161, 1998
- 13) 片岡 みなみ, 包 添書, 羽柴 公博, 福井 勝則: 水飽和度が岩石の一軸圧縮下での応力一歪曲線に与える影響, *Journal of MMIJ*, 133 巻 6 号 107-115, 2017
- 14) 松木 浩二, 坂口 清敏, 飯野 英樹, 奥村 清彦: 堆積岩の強度に及ぼす間隙水圧の影響, *Journal of MMIJ*, 114, 895-900, 1998
- 15) 山田 正雄, 山崎 勉, 山崎 孝成: 地下水流動と地すべり変動の特徴について, *地すべり*, 36 巻 4 号 22-31, 2000

第4章 残壁安定化を目的とした宇根鉾山の降雨対策工事とその効果

4-1. 緒言

残壁変位の急増を受けて宇根鉾山では、アンカー工や水抜きボーリング工といった保全工事を行うとともに、変位が大きかった残壁箇所を重点的に調査し、計測強化に努めてきた。岩盤斜面の安定性は、斜面の形状、岩盤の力学特性、亀裂の状態、地層状況、地下水の状態など多くの要因に関係し、より有効な対策を実施するには、変位の急増に最も影響を与える要因の把握が必須である。そこで、第2章および第3章でのモニタリング結果の分析に基づき、残壁安定化対策を実施してきた。

本章では、これまでに宇根鉾山で実施してきた残壁安定化対策工事の事例を紹介する。の中で、降雨や地下水の影響を低減する工事（以下、降雨対策工事）によって一定の効果が確認できたことから、これらの工事による残壁変位低減効果を検証した。

4-2. モニタリングと対策工事の種類

4-2-1. モニタリング概況

第2章で述べたように、武甲山では長期にわたり、数多くの残壁モニタリングを実施してきた。例えば残壁表面の挙動を計測するものとして、APS、GPSがある。これらは残壁の広域的な変化をとらえることを目的としており、とりわけAPSによる計測期間は20年以上に及ぶ。また岩盤内の変位挙動を計測するために、挿入式傾斜計、および調査坑道内に亀裂変位計を導入している。変位計測以外にも、地下水位の挙動を把握するために水位計測も行っている^{1,2)}。

残壁モニタリングを実施する中で、2007年台風襲来時に宇根鉾山の残壁で、一時的にAPSによって測定された変位が増加する傾向が確認された。急激に増大した変位箇所は、宇根鉾山の残壁の広範囲にわたり、その規模は高さ約350 m、幅約600 mであった。このような広域の岩盤変形に対して効果的な対策工事を行うには、変位が発生した残壁周辺のモニタリングを強化し、残壁挙動要因と箇所を特定する必要がある。そこで宇根鉾山では、残壁内部に調査用の坑道（以下、調査坑道）を掘さくし、坑道を利用した岩盤内部の計測強化に努めてきた。

調査坑道内の計測は、APSによる残壁表面計測における2つの欠点を補う利点がある。1つ目は、APSによる計測結果では、岩盤内部（石灰岩、地層境界、下盤）のどの箇所で変位が生じているのか把握できないこと、2つ目は気象等の外的要因のため、データ欠損やデータのばらつきが大きくなることである。そのため、APSによる計測だけでは把握できない、岩盤内部を含めた残壁挙動を解釈する上で重要な役割を果たしている。2-5で述べた通り、1,010 mL 調査坑道に設置した亀裂変位計と残壁表面計測の結果について、相互の関係性を確認し、亀裂変位計のデータが残壁全体挙動を表す指標として有効であるとした。これにより、計測精度が高い亀裂変位計を用いて、対策工事によって生じる挙動の変化を分析し、それを他のデータとの関係性に展開することにより、残壁全体の評価に適用できると考えた。

また第3章で述べたように、地下水位挙動の分析から、宇根鉾山の残壁に設置した水位計(M2010-2, UN111)の地下水位データと亀裂変位速度に関係性が存在することを明らかにし、地下水位が残壁変位に影響を及ぼしていると報告した。これらのことから、残壁表面変位と岩盤内部の変位および水位挙動との間に関連性があることが判明し、図4-1の平面図および図4-3の拡大図に示す計測器のデータを詳細に評価することで、対策工事の残壁変位に対する効果を検証することが可能となっている。

そこで、本章ではこれまでのモニタリングデータの解釈を踏まえ、亀裂変位と地下水位に着目して対策工事の考案と効果の検証を行った。本論文で用いている計測器の配置図および後述する対策工事の施工位置を図4-1、図4-2、図4-3に黄色の○で示す。

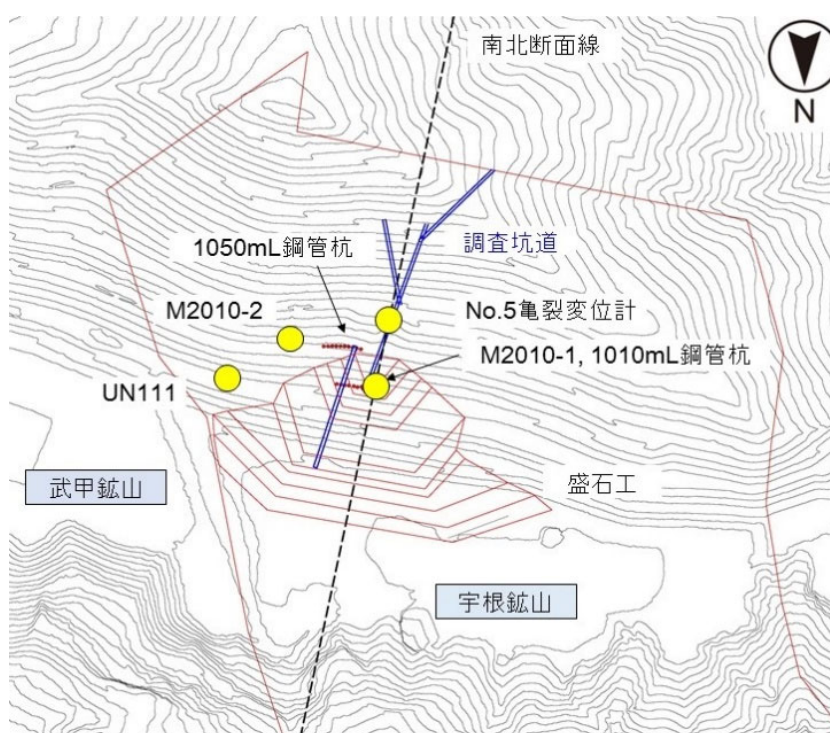


図4-1 Location of monitoring points and retaining rock pilings.

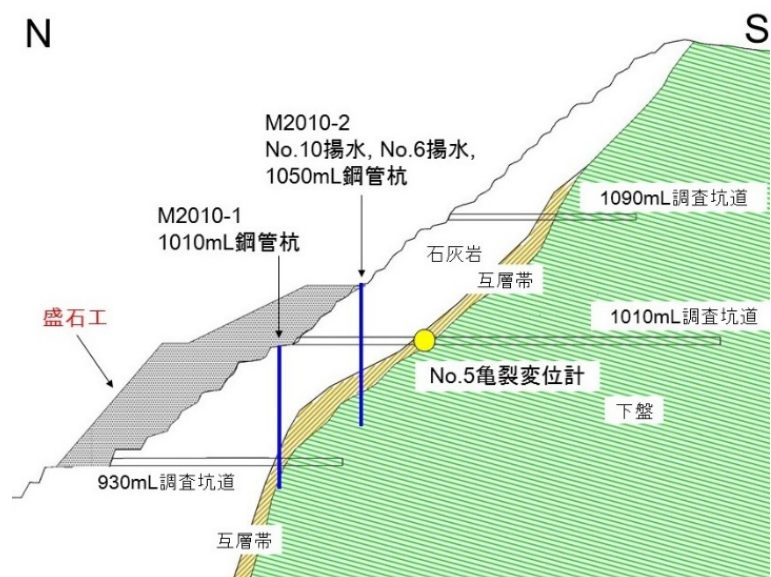


図 4 - 2 Cross section view of monitoring points and the countermeasures.

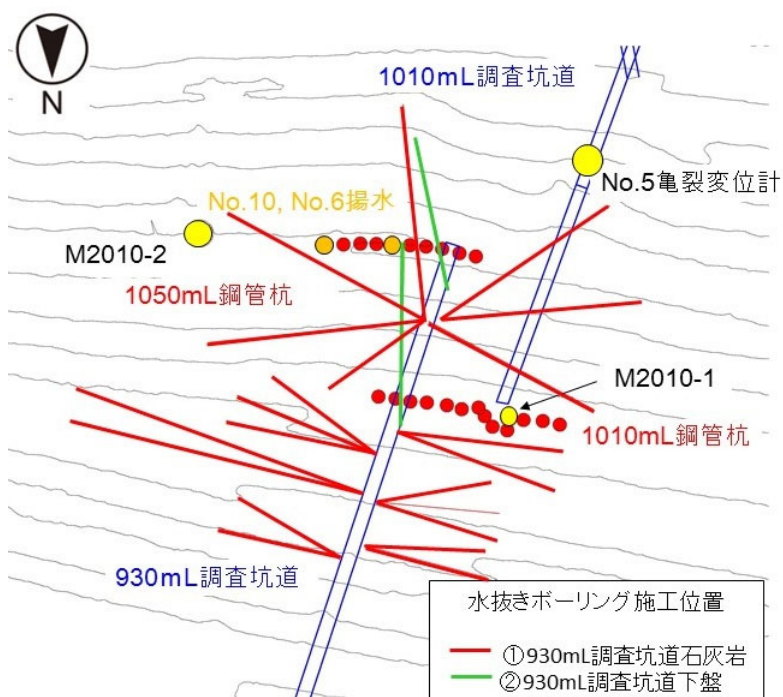


図 4 - 3 Plan view enlarged of the monitoring points and countermeasures.

4-2-2. 対策工事概況

宇根鉱山で実施した残壁安定化対策工事は、大類すると①降雨対策工事、②せん断断面对策工事である。降雨対策工事に関しては、水抜き対策と浸透防止対策に分けることができる。水抜き対策は、岩盤に浸透した水を早い段階で排出することを目的として、水抜きボーリング工と揚水工を実施した。一方で浸透防止対策は、降雨水を浸透させないことを目的とし、岩盤に影響を与える以前に適切に集水を行うもので、具体的には残壁管理道路の舗装工を

実施した。ここでは地下水位上昇抑制対策として実施した対策工事を総称して降雨対策工事と呼ぶことにするが、降雨対策工事には降雨時以外の日常的な地下水位抑制も含まれている。

次に、せん断断面对策工事であるが、これは挿入式傾斜計の計測結果から、宇根鉱山の石灰岩カバーロックの一部で、せん断挙動が懸念される箇所が確認されたために実施している。この対策としてせん断抵抗を高めることを目的とした、盛石工と鋼管杭工を行っている。

表4-1は、2012年以降に実施した宇根鉱山の残壁安定化対策工事の施工期間を示している。対策工事の効果を検証するにあたって、作業工程が重複しており、どの工法の効果によるものか、判断が困難なものもある。作業工程や工費の制約とともに、各種観測と並行して対策工事を実施する必要性から、それぞれの段階における対策工事採用の判断については試行錯誤的な面があったことは否めない。

表4-1 Summary of the countermeasures conducted by Une Mine since 2012.

		2012年度		2013年度		2014年度		2015年度		2016年度	
		上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
水抜きボーリング工	①930mL調査坑道石灰岩	→									
	②930mL調査坑道下盤					→					
揚水工	揚水No.10					→	→	→	→		
	揚水No.6							→	→		
舗装工	1000～1240mL					→	→	→	→	→	→
鋼管工	1010mL(13本)			→	→						
	1050mL(10本)				→	→					
盛石工	2,400,000t				→	→	→	→	→	→	→

4-3. 降雨対策工事

4-3-1. 水抜きボーリング工

水抜きボーリング工は、宇根鉱山の残壁変位挙動が確認された2007年以降、継続して実施してきた対策工事の一つである。2016年度までの約10年間で計233本、総穿孔長19,344mの水抜きボーリングを施工してきた。武甲山には石灰岩と下盤との境界に“互層帯”と呼ばれる漸移帯が賦存し、一部粘土化したゾーンが認められる。各岩層に設置した間隙水圧計の結果から、降雨時には石灰岩では短時間で水位上昇を示す一方、緑色岩類内の水位上昇は比較的緩やかであると報告した。これは岩層の透水性を反映したものとなっており、降雨浸透水は透水性が低い互層帯や下盤には浸透せず、透水性の高い石灰岩内を地層境界に沿って流下すると推測できる。また互層帯に粘土化した透水性の低い挟みがある場合、一旦互層帯に浸透した降雨水は排出されにくいと考えられる。残壁上部に設置したボーリング孔内の水位計測結果では、降雨時以外でも地下水位が互層帯から緑色岩類内に位置しており、この仮定を裏付ける結果が得られている。互層帯は、武甲山中央部から西部の宇根鉱山側の残壁内に厚く分布し、東部の武甲鉱山の残壁範囲には殆ど認められない。2007年の豪雨以前より、武甲山残壁の東部（武甲鉱山）では、残壁西部（宇根鉱山）よりも変位が少ないこ

とがわかっていた¹⁾。2007 年の豪雨でも宇根鉾山残壁に変位が認められたが、武甲鉾山残壁の変化には豪雨の影響が見られなかった。このことより、降雨浸透水を含んだ互層帯の存在が宇根鉾山の残壁変位に関与していると考えた。そこで、対策当初の 2008～2009 年頃の水抜きボーリングは、変位が大きい箇所と互層帯が厚い箇所を中心に広域的に施工した。これらの水抜きボーリングは、残壁面から上向き 3～5°のさく孔角度とし、互層帯を貫通して下盤の緑色岩類まで施工するために、80 m～120 m の穿孔長となっている。また、1,010 mL の調査坑道内では下盤内から互層帯を貫通し、石灰岩まで高角度で施工したものがある。これらの水抜きボーリングは地下水状況の把握を目的としたことに加え、宇根鉾山全体の水抜き、特に標高 1,050 m 以上の残壁上部の地下水位の低下に効果があった。しかしその一方で、数点の地下水位計で水位挙動を把握し、広大な残壁において効率的に水抜き工事を行うことは困難であった。なぜなら、石灰岩のカバーロックには亀裂が発達しており、このような岩盤では亀裂が主要な水みちになるため^{3,4)}、的確に水抜をするにはこのような水みちにボーリング孔を的中させる必要がある。隣接するボーリング孔でも、湧水の有無が異なることから、石灰岩内の水みちに的中させることは難しい。水抜き工事を効率的に実施するためには、岩盤内の水理状況の把握が不可欠である。しかしながら、石灰岩残壁における複雑な水理状況を限られたボーリング調査と時間内で明らかにできないのが現状である。したがって、施工箇所の選定や孔数の決定は、現場での湧水状況を確認しながらの試行錯誤によるものが多かった。

しかし、後に実施した残壁下部での残壁変位計測および水位計測結果から、豪雨時に残壁下部での短期的な変位が大きいこと、さらに残壁下部では、豪雨時には一時的に石灰岩内まで地下水が上昇していることが判明した。第 3 章で述べた通り、水位計 M2010-2 と水位計 UN111 の地下水位と亀裂変位計の長期データを分析し、豪雨時によって、M2010-2 の地下水位が 1,005 mL 以上に、UN111 では 940 mL 以上に達した段階で、急激に変位速度が上昇することが明らかとなった。これらの標高レベルは石灰岩内にあり、石灰岩内の地下水位の急上昇も残壁変位の要因の一つであると考えられる。また、水位計設置箇所周辺は武甲山採掘前の原地形では沢地形部に相当するため、降雨浸透水を集水しやすい構造であると考えられる。さらに、武甲山残壁内には、西北西－東南東方向の高角度北傾斜の W4 断層が存在し、旧沢地形に集まった浸透水が W4 断層で遮られることにより、石灰岩内の地下水位が急激に上昇している可能性がある。旧沢地形付近の W4 断層は幅 1 m 未満の破碎部が 8 枚程度複合した断層群であることが、930 mL 調査坑道の地質スケッチから確認されている。当断層は石灰岩内に粘土を含んでおり、断層部分は透水性が低く遮水壁のような働きをしていると報告されている⁵⁾。そこで、2012 年以降は水位計 M2010-2 および水位計 UN111 孔周辺の旧沢地形部の地下水位低減を目的とした降雨対策を強化した。その対策の一つが 930 mL 調査坑道を利用した旧沢地形周辺部の水抜きボーリング工である。当工事では、調査坑道内から残壁下部の旧沢地形周辺部の排水性を高めるため、水抜きボーリング工を施工してきた。ここでは宇根鉾山で実施した① 930 mL 調査坑道石灰岩、② 930 mL 調査坑道下盤の水

抜きボーリングの事例を紹介する。図4-3は930 mL 調査坑道の拡大図であり、紹介するボーリングの施工箇所を示している。

① 930 mL 調査坑道石灰岩

前述の通り、武甲山の旧沢地形に設置した水位計(M2010-2, UN111)がとらえた地下水位上昇は、透水性の高い石灰岩を流れた降雨水が旧沢地形に集まったことが要因と考えている。また岩盤の透水性の違いから、石灰岩内または互層帯に異なる流れの地下水位が存在すると考えられる。この考察から旧沢地形の石灰岩および地層境界付近の水抜きを目的とし、宇根鉱山では930 mL 調査坑道から石灰岩および地層境界に向けて、孔径160 mmの水抜きボーリングを2012年に21本、総穿孔長1,429 mを施工している。施工位置を図4-3の赤線で示した。これらのボーリングは、普段湧水はないが、降雨時は一時的に大量の湧水が発生している。これは降雨時の旧沢地形への集水と石灰岩の高透水性という考察と一致する。

② 930 mL 調査坑道下盤

後述する揚水工で水抜き効果が確認できたことから、2015年2～3月に930 mL 調査坑道からNo. 6 揚水孔付近に水抜きボーリングを2本施工した。このボーリングは図4-3の緑線で示しており、孔径68 mm、上向き60°と70°で1本ずつ掘さくを行った。降雨がない時は5 t/day程度の湧水が、降雨時には一時的ではあるが50 t/dayの湧水が発生する。水抜きボーリング工は揚水工と異なり、電力を使用せずに自然排水ができるため、省電力の水抜き対策としての有効性を期待して実施した。現在、湧水状況を確認しながら残壁変位への影響を調査している。

4-3-2. 揚水工

土木分野において、地下水面以下の掘さく工事を行う際の地下水位低減対策工法の一つとして、揚水工が行われている^{6~9)}。この工法は岩盤のような透水性が低い地盤を対象とする場合、多数の井戸を必要とし、かつ掘さく深度が深い宇根鉱山残壁への適用は難しいと考えていた。またポンプの作動に電力を要することも、鉱山残壁での適用が難しい要因である。しかし、水抜きボーリングでは排除が難しい区域の地下水に対して、鉛直孔を掘さくし、揚水することで、地下水位の低減につながる可能性があることから、1,050 mLでの揚水工の実施を検討することにした。

3-5にてM2010-2の地下水位と亀裂変位計の変位速度(mm/day)は、降雨の上昇時や冬季の下降の傾向が類似していて、当水位計周辺の地下水位が残壁変位に影響を与えていた。この結果から、M2010-2周辺の地下水位を低減させることで、残壁全体の安定性が向上すると考え、当時1,050 mLで施工中であった鋼管杭工の掘さく孔を利用し、No. 10 揚水工を2014年8月から実施している。2015年11月からはNo. 6 揚水工も追加し、排水を強化した。No. 10 揚水孔は、水位計M2010-2西側35 m、No. 6 揚水孔は、水位計M2010-2西側55 mに位置し、ともに孔径660 mmの鋼管杭孔を利用している。表4-2は図4-4に示す、揚水孔の地層の標高レベルや孔長をまとめたものである。ポンプ設置位置の3 m以上に水位が上

昇した場合に、自動的にポンプが起動する機構になっている。

また、図4-4には1,050 mLの東西断面の地質状況と揚水工施工位置を示している。ここで示す水色の線は、揚水開始前に鋼管杭内の水位を計測し、推測した地下水位状況である。No. 10 揚水孔に関しては、揚水前の地下水位は概ね 997 mL 付近で、その水位変動は水位計 M2010-2 と類似していた。したがって、No.10 揚水孔の地下水位も M2010-2 同様に亀裂変位と関係性が高く、残壁変位に影響を与えていると考えられる。また図4-4の地層状況をみると、揚水施工箇所は互層帯が盆状になっており、石灰岩内の地下水位は水抜きボーリングでは排水されにくいと考えられる。このことから揚水によって強制的に排水を行うことは、有効な水抜き対策と考えられる。No. 10 揚水工の揚水量の変化を図4-5に示す。揚水量は降雨時に増加し、降雨がない場合は低下するが、冬季も含めて井戸が枯れることなく、常時揚水量を記録している。

表4-2 Summary of pumping-up measures in wells.

名称	施工標高	掘さく長	石灰岩	互層帯	下盤	ポンプ位置
No.10揚水	1050m	80m	1050 ~ 983mL	983 ~ 984mL	984 ~ 970mL	975mL
No.6揚水	1050m	75m	1050 ~ 988mL	—	988 ~ 978mL	983mL

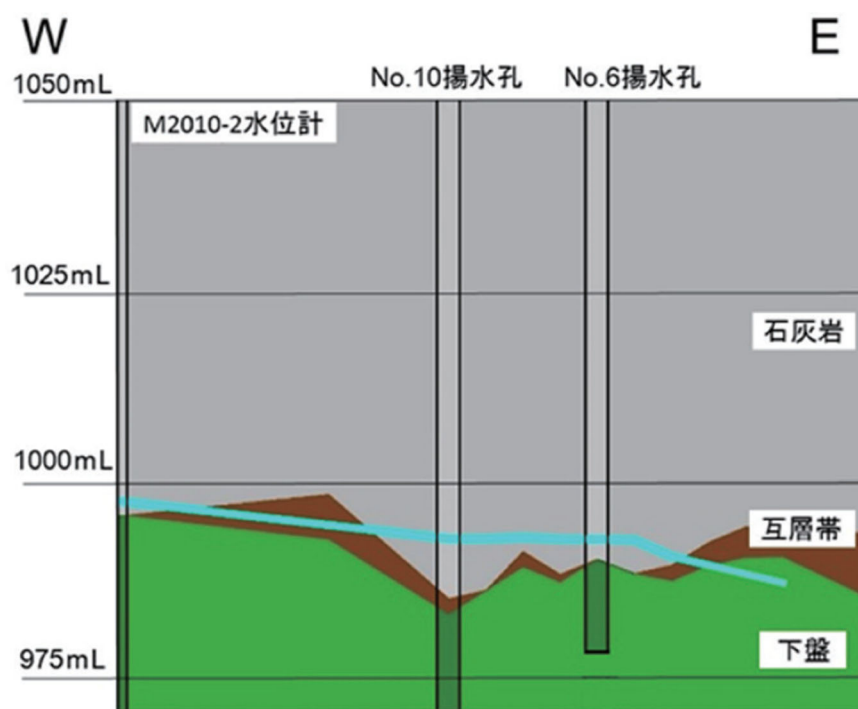


図4-4 Geological cross section and estimated groundwater level before pumping along the pumping-up wells and M2010-2 for monitoring groundwater.

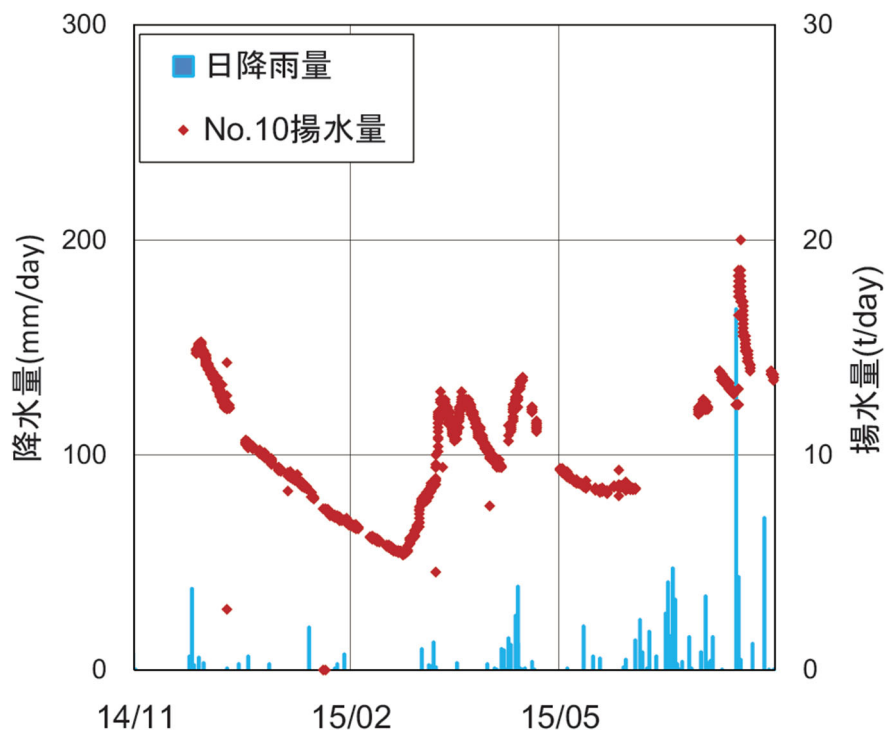


図 4 - 5 Amount of pumped-up groundwater and record of rainfalls since 2014.

4-3-3. 舗装工

武甲山では降雨後の水はけが良いこと、ボーリング掘さく時にはほぼ全てのボーリング孔で逸水状態になることなどから、武甲山の石灰岩は透水性が高いと推測できる。また、石灰岩内の水位挙動は複雑で、水みちを正確に予測して水抜き対策を計画することは困難である。そこで、4-3-1 と 4-3-2 に記した水抜き対策に加え、岩盤に水を浸透させない対策を併せて実施することにした。武甲山では残壁の維持管理のため、幅員約8 m の管理道路を残壁に設けており、宇根鉦山および武甲鉦山では各鉦区内の管理道路をコンクリートで舗装した。図 4 - 6 は1,000 mL 以上の2016 年度末までに完工した舗装済みの管理道路（ピンク）と未舗装の管理道路（黄色）を示している。ただし、1,210 mL から山頂までは、武甲山三社共通の管理道路であるため、3社で舗装を実施している。宇根鉦山では旧沢地形付近の舗装工を優先的に実施し、旧沢地形への浸透防止に重点をおいてきた。

舗装面積は、武甲山の残壁表面積（約34 万 m^2 ）の約13% であるが、降雨時の集水量が舗装の進行に伴い増加していることから、面積比以上に集水効果があると考えている。集水した降雨水の処理を武甲山三社で分担し、調査坑道や残壁内に掘さくした導水ボーリングを利用して、残壁に再浸透しないよう鉦山外へ排水している。

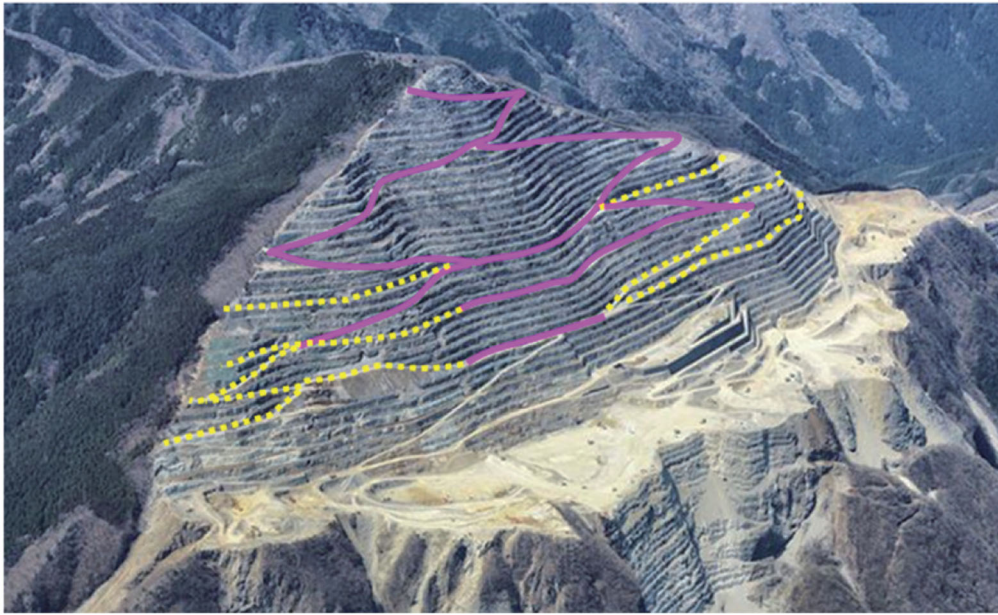


図 4 - 6 Location of paving works for mine roads on the final slope.

4-4. せん断面対策工事

4-4-1. 鋼管杭工

2-4-1で述べたように、2011年9月の台風以降、挿入式傾斜計 M2010-1 が、石灰岩カバロック内部(978 mL 付近)に、北方向への変位を示した。また周囲の GPS で観測された表面変位の挙動も考慮すると、挿入式傾斜計で変形が確認された深度付近において、せん断面の発達が懸念された(図 4 - 9 参照)。挿入式傾斜計のモニタリング結果および想定せん断面の考察は、中谷ら¹⁾によって詳細が報告されている。

せん断面の連続性や発達の程度は不明であるが、せん断面が及ぼすリスクに対して早い段階で対策を講ずることが重要と考え、鋼管杭工を実施した。また 1,010 mL 調査坑道内の石灰岩中には、降雨時の岩盤内水位上昇と連動した変位を示す No.5 亀裂変位が確認されており、鋼管杭工ではこれらの亀裂が含まれる石灰岩の安定化も目的の一つである。鋼管杭は長さ 72~80 m で想定せん断面を通過するように、1,010 mL 残壁管理道路で 13 本、1,050 mL 残壁管理道路で 10 本の計 23 本を施工した。図 4 - 7 は鋼管杭内部の写真であり、鋼管杭内部には剛性を高くしてせん断抵抗を高めるため、鋼材で補強しモルタルを充填している。また、鋼管杭工で使用した資材を表 4 - 3 に示す。

一般的に鋼管杭工は打設後に、不連続面に生じる相対変位に抵抗し、杭が反力を生じ、抵抗力を発生させると考えられる^{10, 11)}。したがって、効果の発現には時間を要すると考えられるが、現在は鋼管杭内部に挿入式傾斜計のガイド管を設置して、その挙動を定期的に測定している。



図 4 - 7 Picture of a deep steel piling after completion of cementing.

表 4 - 3 Specification of deep steel piling.

名称	形状および寸法
鋼管	SKK490 孔径 600mm 肉厚 14mm (1,010mL) ,16mm(1,050mL)
H 型鋼	H - 300×300×10×15
異形鉄筋	D25 40 本
モルタル	セメント:砂 = 1:3

4-4-2. 盛石工

前述したように残壁下部では、せん断面の発達懸念されることから、鋼管杭工に加えて、せん断面の限界抵抗力を増大させるための盛石工を施工している。盛石工は約 3 年半～4 年の工期で、約 2,400 千 t の石灰石を 920～1,050 mL までの区間に盛り上げる工事である。また、想定せん断面に対する盛石本体のせん断抵抗力を向上させるため、920～985 mL 間の盛石前面にはかん止施設（台形状のセメント改良体）を構築している。図 4 - 8(a)～(c) は盛石工の施工状況を示す写真である。セメント改良部の平均傾斜は約 51°（法面傾斜：70°）で、裏込め材は爆砕した石灰石を充填している。1,000～1,050 mL では 30° の法面勾配で盛り上げる予定である。

図 4 - 9 に盛石工事の模式図と 2015 年までの施工位置を示しているが、2015 年度に盛石高さが 975 mL となり、想定せん断付近に到達した状況である。また、盛石工は盛石の自重が法先岩盤に作用して抵抗力となるため、実際に抵抗力が発現するまでに時間を要すると考えられる。したがって、現状では近年の残壁変位低減への寄与はまだ少ないと考えられるが、鋼管杭同様、今後の効果の発現により、残壁安定化に寄与することを期待している。



(a) Overall view of retaining rock piling (height of 920 to 990 m).



(b) Haulage of limestone from mining area for construction work.



(c) The area of cement reinforcing on the front side of rock piling.

图 4 — 8 Pictures of a construction site of retaining rock piling.

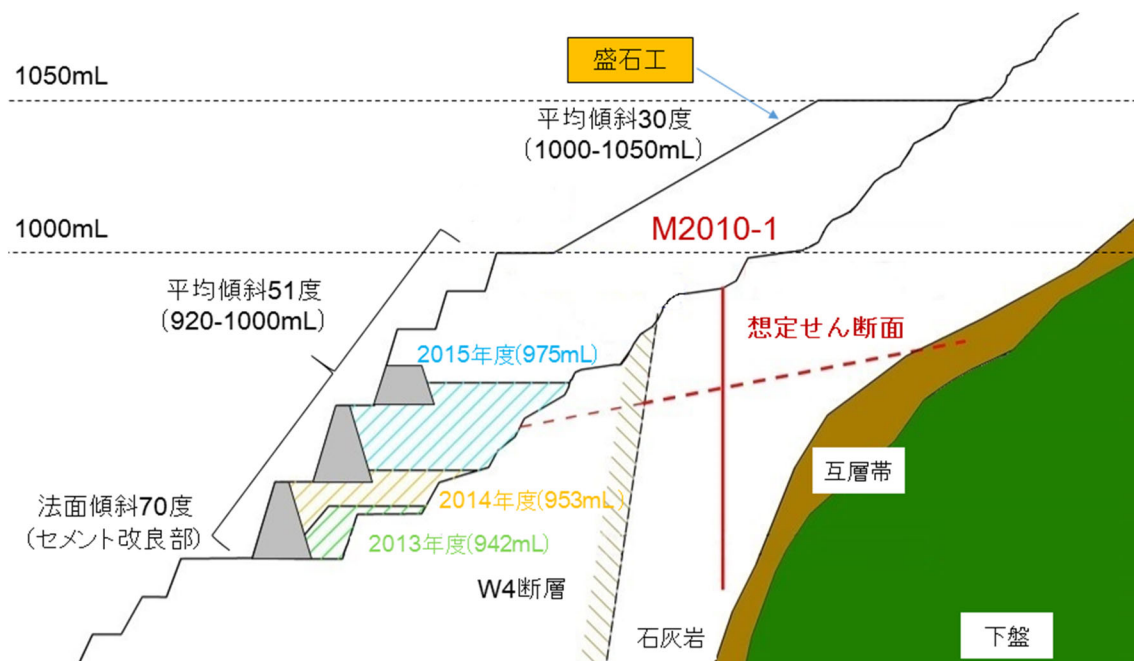


図 4 - 9 Construction plan of retaining rock piling against estimated shear zone at the lower part of the rock slope.

4-5. 対策工事によるモニタリングデータの変化

4-5-1. 対策前後の地下水位の変化

降雨対策工事の効果を確認するために、残壁変位に影響がある水位計 M2010-2 と水位計 UN111 の工事前後の地下水位変化を比較する。ここでは長期的な変化と降雨時の短期的な変化の両者について考察する。

まず図 4 - 10 に示す水位計 M2010-2 の地下水位データに着目すると、揚水開始前は冬季の地下水位が最も低下する時期に 990 mL を下回る程度であったが、揚水後は 990 mL を下回る回数が増加した。また 2 月の最低水位値を黄色○で示しているが、揚水開始前の最低水位は 2012 年が 989.0 mL, 2013 年が 988.5 mL, 2014 年が 987.3 mL であった。それに対し、揚水開始後は 2015 年が 981.9 mL, 2016 年が 985.3 mL と揚水開始前より低下している。2016 年は台風に伴う豪雨によって、全体的に地下水位が上昇した影響で最低水位が 2015 年より低下しなかったと考えられる。このように、降雨条件等によって変化するため、一概に増減を比較することは困難であるが、990 mL を下回る回数と最低水位値を考慮すると、M2010-2 の地下水位は全体的に低下しているといえる。

また図 4 - 11 は、No. 10 揚水工開始時における M2010-2 の地下水位変化に着目したグラフである。揚水実施のタイミングで地下水位低下が減少し、揚水によって排水を強化したことによる水位低減効果が確認できる。これまで宇根鉱山では多くの水抜きボーリングを実施したが、石灰岩の水位挙動は複雑で計画的に地下水位を下げるのは困難であった。一方、2015 年 11 月から No. 6 揚水工を開始したが、揚水開始時に降雨があったことから明確な水

位変化は確認できなかった。No.10 揚水孔は M2010-2 から 35 m の位置であるのに対し、No. 6 揚水孔は 55 m 離れた位置にあることから、M2010-2 の地下水位変化が明確でなかったと考えられる。しかし、No. 10 揚水と同様に常時揚水量を確認していることから、周辺の地下水位低減に寄与していると推測される。

続いて図 4－10 の水位計 UN111 に着目する。UN111 は降雨時のみ地下水位が上昇し、2013 年の降雨では最大水位が 960 mL 以上を記録しているが、年々減少し 2016 年には 950 mL を下回るまで低下している。降雨時の地下水位は降雨強度や継続時間の影響を受けるため、降雨毎の最大水位のみを比較するのは困難である。しかし長期的な傾向をみると水位上昇が抑制されていると考えられる。

また、図 4－12 は降雨毎の水位計 UN111 と水位計 M2010-2 の上昇時の地下水位をプロットしたグラフであり、2013 年からグラフが左側にシフトしている。これは、降雨時の UN111 の水位上昇が M2010-2 と比較して減少したことを表している。降雨時の地下水位の比較は困難であるが、これらのデータを考慮すると降雨時の UN111 の最大水位が抑制されたと考えられる。この計測結果から、豪雨時に地下水位が残壁に与える影響は緩和されていると推測できる。

以上から降雨対策工事以降は地下水位の低下傾向が確認でき、これらの低減効果は舗装工や揚水孔工等の一連の対策工事の進行に対応していると解釈することができる。

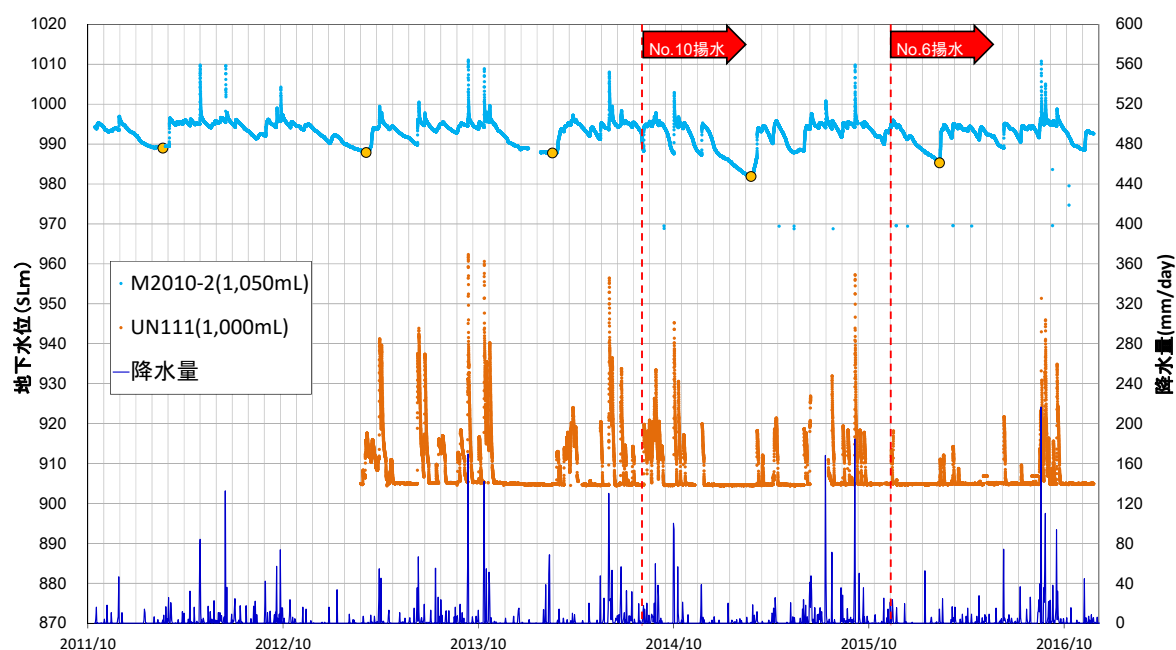


図 4－10 Long term fluctuation of groundwater level (M2010-2, UN111).

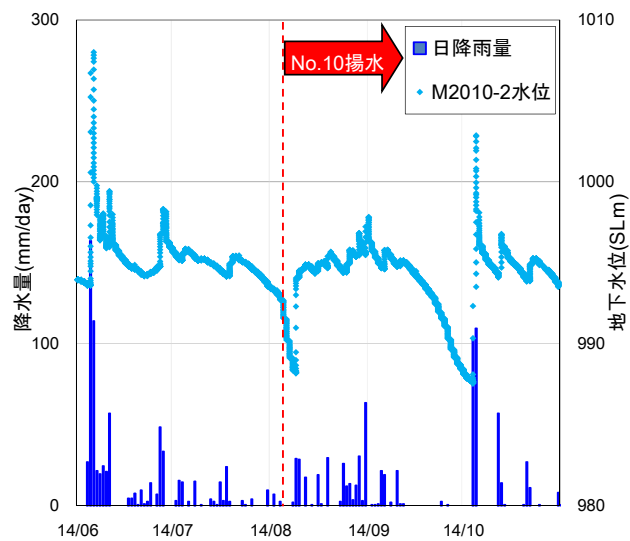


図 4－ 1 1 Decline of groundwater level (M2010-2) after pumping.

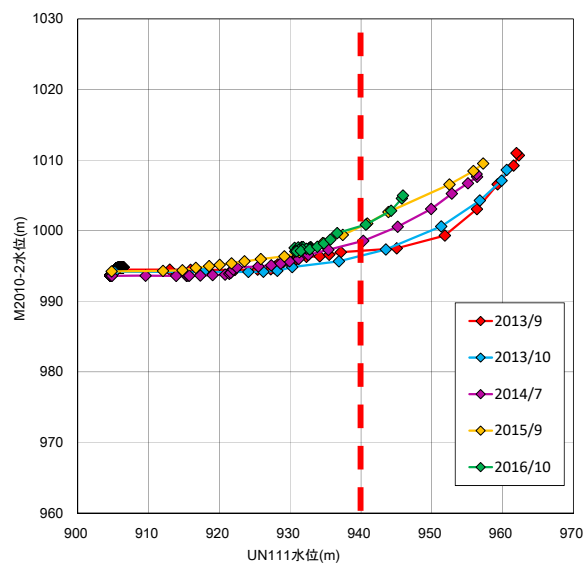


図 4－ 1 2 Comparison of groundwater levels of UN111 and M2010-2.

4-5-2. 亀裂変位速度の経時変化

図 4－ 1 3 は M2010-2 の地下水位と亀裂変位速度 (mm/day) の経時変化を示している。ここでの亀裂変位速度は、亀裂変位量 (mm) の日平均を求め、前日との差を亀裂変位速度 (mm/day) としている。長期的な変化に着目すると、2014 年に No.10 揚水工を開始してからは、降雨時の亀裂変位速度の上昇が抑制され、冬季の変位速度の低下も明確である。さらに、2015 年 11 月に開始した No. 6 揚水工と併せて、対策工事の進行に伴い亀裂変位速度の更なる低下が確認できる。

また豪雨時は通常の降雨以上に変位速度が増加し、以前は 1 mm/day を超える変位速度を

観測していたが、揚水後は 1 mm/day 以下に抑制されている。豪雨時は水位計 UN111 が 940 mL 以上に上昇し、急激に亀裂変位速度が増加するという特徴がある。図 4-12 では UN111 の地下水位 (940 mL) を赤の破線で示しているが、これを超過している時間に着目すると、対策工事以降は降雨時の水位上昇が抑制され、停滞時間も短くなっている。これより地下水位の低減が、豪雨時の亀裂変位速度低下の要因になっていると考えられる。

この成果には舗装工の効果も含まれる他、鋼管杭工や盛石工の効果も発現している可能性はあるが、各対策工事は緊急性があるために同一期間で実施しているものもあり、それぞれの効果を個別に判別することは困難である。しかし、施工時期 4-5-1 で考察した水位低下状況を考慮すると、せん断面対策工事より降雨対策工事の効果が大きいと考察できる。そこで以下は、降雨対策工事に主眼を置き、亀裂変位計と地下水位データを使用して、詳細に効果の検証を行うこととした。水位計 UN111 は豪雨時のみ地下水位が上昇するのに対し、水位計 M2010-2 は日常的に亀裂変位計との関係性が確認できている。これより、日常的な地下水位の低減効果を評価するために、4-6 では水位計 M2010-2 のデータを検証に用いる。

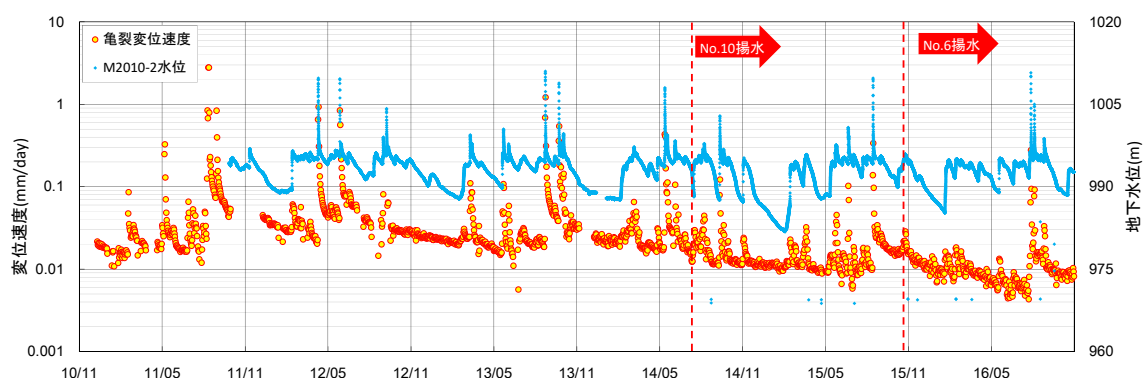


図 4-13 Effects of pumping work on groundwater level (M2010-2) and rate of crack gage displacements.

4-6. 降雨対策効果の検証

4-6-1. 降雨量に対する変位挙動

図 4-14 の水色のグラフは、365 日降雨量 (mm) であり、ある日より前 365 日間の総降雨量を表している。また緑色のプロットは、亀裂変位の平均変位速度 (mm/day) を表しており、前 365 日間の亀裂変位量を 365 で除した数値である。図 4-13 に示す亀裂変位速度 (mm/day) は前日との差から算出されているのに対し、平均変位速度 (mm/day) は季節変動を考慮し、長期間で平均化している。平均変位速度は降雨量が増加すると類似した傾向で増加しており、降雨量と変位量との関係性を示している。また赤のプロットは式(1)で算定される降雨変位率 (mm / mm of rainfall) である。

$$\text{降雨変位率} = \text{平均変位速度} \div 365 \text{ 日間降雨量} \quad \cdots (1)$$

これは降雨 1 mm あたりの変位発生量を表す指標であり、降雨によって残壁が受ける影響

を定量的に示している。武甲山では年間降雨量が 1,600 mm 前後であり、夏に雨が多く、冬に乾燥する関東で一般的な太平洋側気候である。また武甲山山頂は 1,304 m と標高が高いため、12～2 月は降雪となり残壁に降雨がほとんど浸透しない状況である。このように降雨量は季節変動があるため、一概に平均変位量の推移だけを比較するのは不十分であるが、一年間の降雨量当り変位量を求めることで季節的な変動や降雨量の違いを考慮できると考える。

亀裂変位計が設置されて以降、2012 年夏に最大 0.02 mm / mm of rainfall あった降雨変位率は、その後減少傾向にあり、現在は 0.0035 mm / mm of rainfall まで低下してきている。この減少傾向は対策工事の期間と比較すると、舗装工の進行と揚水工の開始時期に対応していると解釈できる。

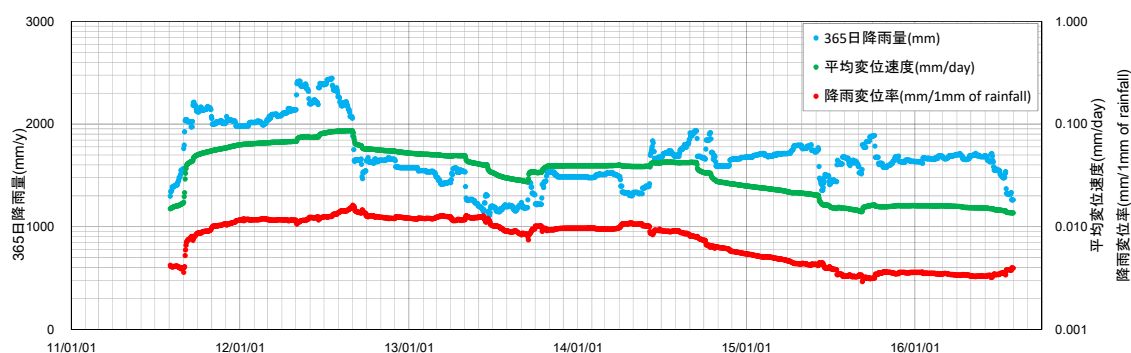


図 4 - 1 4 Changes in 365 days rainfall, average rate of crack gage displacement for 365 days, and those ratio of rate/rainfall.

4-6-2. 豪雨時の変位量の変化

図 4 - 1 5 は台風等の豪雨における総降雨量 x (mm) と亀裂変位計の最大変位速度 y (mm / day) との関係を示している。同じ年の両者の観測値に対して、最小二乗法で近似式を求めると、

$$y = mx - n \quad \cdots (2)$$

で表され、 m (day⁻¹), n (mm / day) は図 4 - 1 5 に示す年毎に変化する定数で、横軸の切片 $l = n / m$ は急激な亀裂変位速度が増加する豪雨の閾値である。

対策工事前の 2011～2012 年は $l = 57.6$ mm であるのに対し、2013 年は 126.5 mm, 2014 年は 183.8 mm と豪雨による急激な亀裂変位増加が抑制されている。2015 年は 182.0 mm と 2014 年の値との差は小さいが、傾き m が 0.0029 と 2011～2014 年と比較して小さくなっている。これら定数の変化に伴い、2015 年は 200～300 mm を超える豪雨でも、以前のような急激な変位は発生しなくなっている。この観測結果から、豪雨への反応が年々落ち着いている。

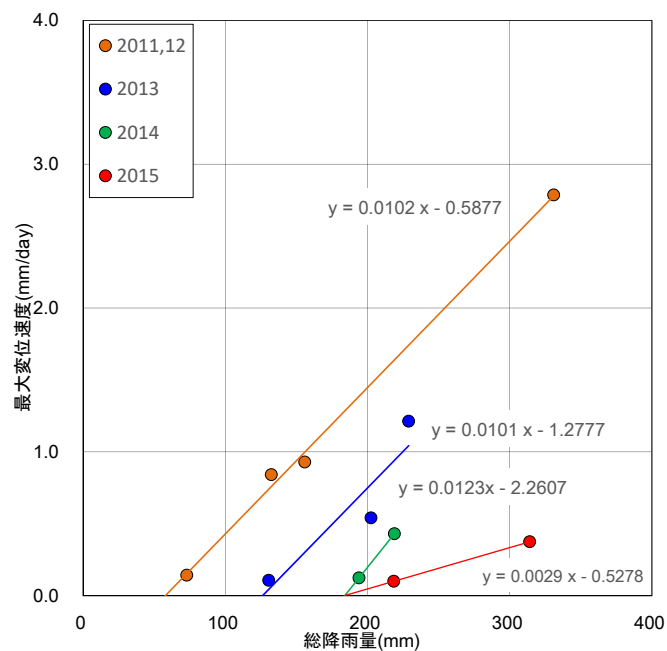


図 4 - 1 5 Annual trends of maximum rate of crack gage displacements during heavy rainfalls in 2011-2015.

4-6-3. 地下水位と No.5 亀裂変位速度

図 4 - 1 6 は横軸に M2010-2 の地下水位, 縦軸に亀裂変位速度(mm/day)を示したグラフであり, No.10 揚水開始前後でプロットは色分けされている。全体の傾向として, 地下水位が上昇すると, 亀裂変位速度が増加する傾向を表しており, 地下水位が変位速度に何らかの影響を与えていることが, このグラフからも読み取ることができる。

対策前後に着目すると, 揚水以前と比較して全体的に下にシフトしている。これは同じ水位状況でも全体的に変位速度が低下したことを表している。対策工事後, M2010-2 地下水位と変位速度が関係性を有していることに変わりはないが, 地下水位の影響が緩和されたと考えられる。

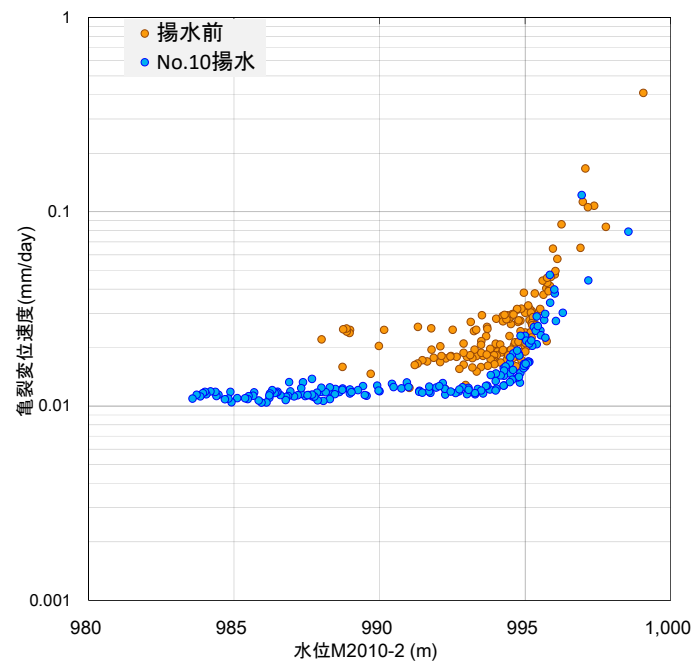


図 4 - 1 6 Comparison of groundwater level and rate of crack gage displacement after starting pumping work.

4-6-4. 豪雨時の水位シミュレーション

降雨と水位の関係を示すために回帰分析を行って水位の予測式を作り，それに基づいてシミュレーションを行った。具体的には式 (3) のように，目的変数 y をある日の水位 (m)，説明変数 x_n をそれより n 日前の実効雨量もしくは降雨強度として重回帰分析を行い，分散の最適解を求めた。

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n + c \quad \cdots (3)$$

その結果, x_0, x_1 を当日，前日に観測した降雨強度 15 mm/h 以上の回数とし, $x_2 \sim x_{14}$ を前 12 日間の日降雨量とした場合の適合性が高かったことから，これらを説明変数として採用した。分析期間を 2011 年 9 月から 2013 年 6 月として，解析を行い，式 (3) の偏回帰係数 b_n を求め，水位予測式とした。

図 4 - 1 7 は，水位計 M2010-2 の地下水位が 997 mL 以上になった場合の降雨状況について，予測式から求めた水位である回帰予測値 y と観測値 y_a をプロットしたグラフである。水位計 M2010-2 のデータ期間は 2011 年 9 月から 2016 年 6 月で，年度毎に最小二乗法で近似している。青のプロットは 2011-2012 年の両者の関係を示しており，予測式の回帰期間と同時期のため，近似式の傾きはほぼ 1 となる。

ここで近似式は，

$$y_a = dy + e \quad \cdots (4)$$

で表され, d (-), e (m) は図 4-17 に示す年度毎に変化する係数である。2013 年以降, 年ごとの近似式の傾き d が緩やかになっている。これは 2011 年 9 月～2013 年 6 月の重回帰式による予測よりも, 同じ降雨に対して年々水位が上昇しなくなったことを表している。

次に, 最大の変位量を示した 2007 年台風の降雨記録について, 2 倍の降雨があった場合 (1 日 482 mm, 累計雨量 868 mm) の水位を式 (4) より予測した。まず, 2007 年台風時の降雨実績に基づいた水位上昇シミュレーション結果を図 4-18(a) に示す。2007 年は水位計 M2010-2 の設置前であるが, シミュレーションにより最高水位が 1,023.3 mL まで上昇したと推定できる。次に 2007 年の降雨強度を 2 倍した値を式 (3) の説明変数に代入し, 求めた水位 y が図 4-18(b) の破線である。このシミュレーションは対策工事が未実施で 2 倍の降雨があった場合を想定したもので, M2010-2 の最高水位が 1,047.2 mL まで上昇するという結果を得た。図 4-17 より 2015-2016 年の近似式 (4) から, 対策後の水位予測 z_p は式 (5) で求められ,

$$z_p = 0.4886y + 509.03 \quad \dots (5)$$

先のシミュレーションから得られた水位値 y を, 式 (5) に代入すると対策後の水位 z_p が求められ, 図 4-18(b) の実線で示している。この場合の最高水位は 1,020.7 mL であり, 対策実施によって, 地下水位上昇が抑制できたことがわかる。対策前のシミュレーションと比較すると, 2 倍の豪雨が降った場合でも, 対策工事後は 2007 年台風以下に地下水位上昇を抑制することができる結果になった。地下水位と亀裂変位速度は相関があることから, 水位上昇を抑制することにより, これまでの最大変位速度以上となることはないと推測できる。しかし地下水位が 997 mL 以上になる豪雨は少なく, 特に 2015 年は $R^2 = 0.7851$ とばらつきが大きく, シミュレーションの精度が低いことは否めない。今後もモニタリングを継続し, データの量と質を充実させて, 対策工事の効果を確認していきたい。

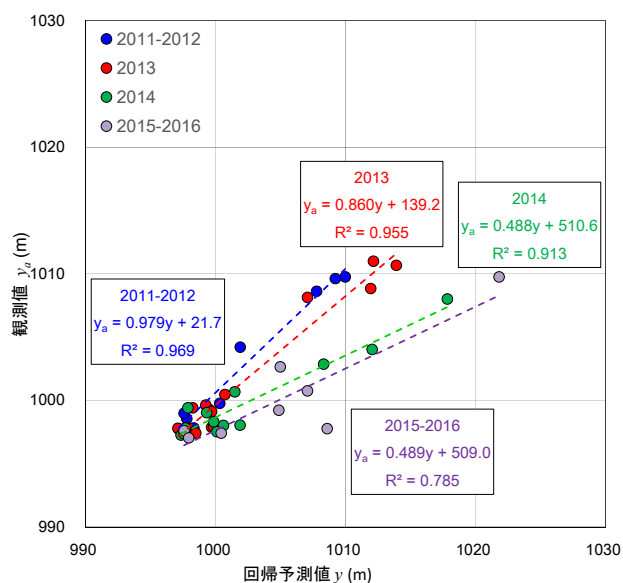
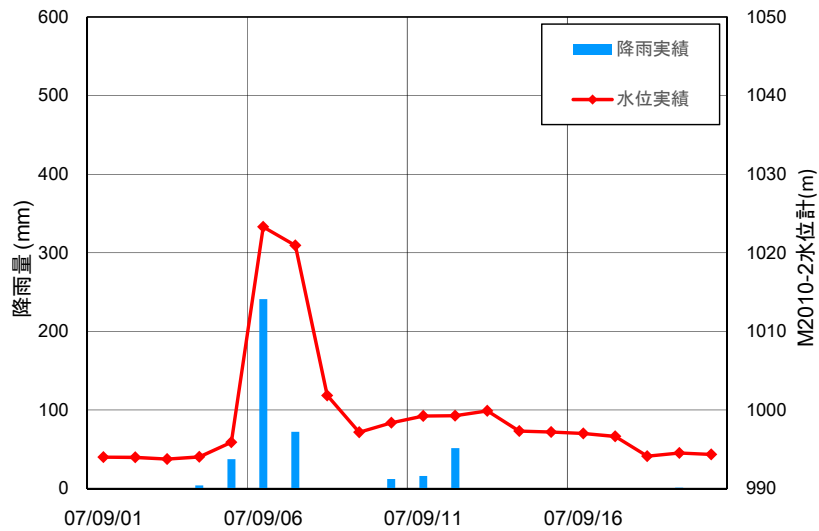
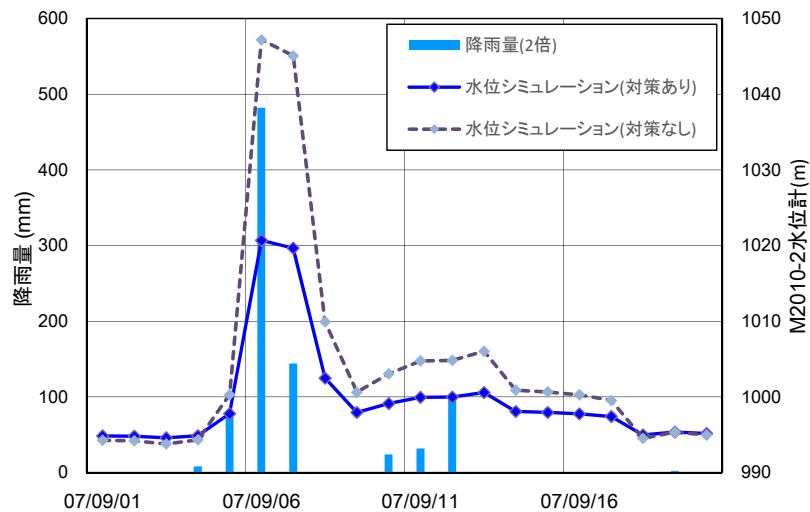


図 4-17 Results of simulated and actual groundwater level during heavy rains in 2012-2015.



(a) Record of actual rainfall on September 2007 and simulated groundwater level of M2010-2 on this period.



(b) Simulated groundwater level, assuming doubled amount of rainfall of September 2007.

図 4 - 1 8 Results of simulation of groundwater level.

4-6-5. 年間亀裂変位量の経時変化

本章で述べてきた通り、降雨対策工事により、亀裂変位速度の低減が確認できており、亀裂変位量は減少している。図 4 - 1 9 に亀裂変位計の年間変位量を示す。2011 年は台風時の変位量が大きく、その後も変位速度が高い状態で推移した影響により、亀裂変位量が年間 22.7 mm あった。2012 年の亀裂変位量は減少しているが、これは年間降雨量が少なかったことが要因である。これは図 4 - 1 4 で 2012 年の降雨変位率が低下していないことから読み取れる。しかしながら、2013 年以降に実施した対策工事に伴い、年間の亀裂変位量は年々減少しており、2015 年には 5.8 mm と 2011 年のピーク時より 25%まで減少した。

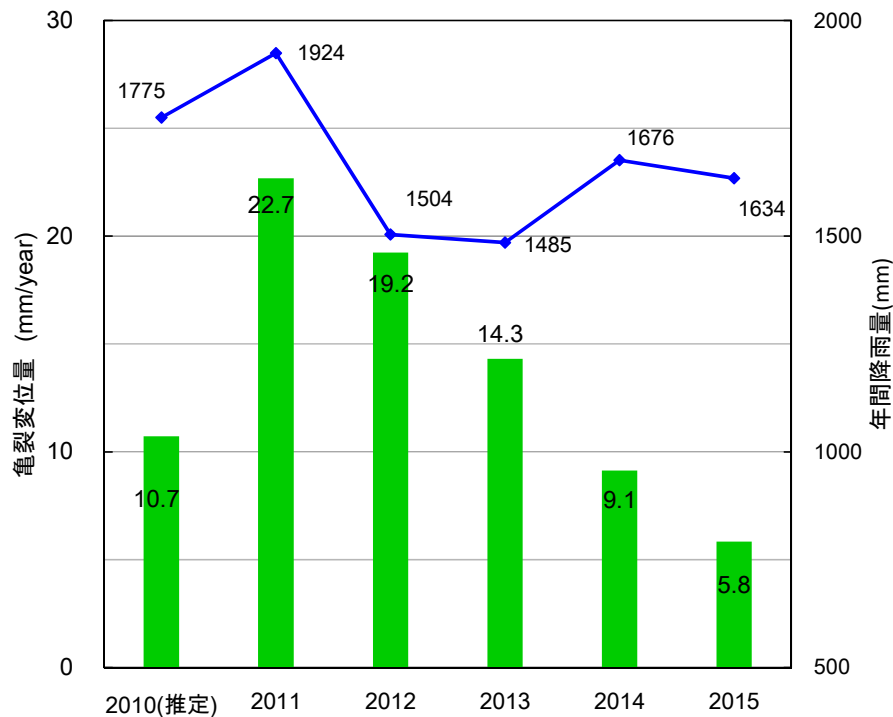


図 4-19 Decrease of annual displacements of crack gage due to the effects of permeation-preventive measures.

4-7. 結言

本章では宇根鉦山の残壁安定化工事の事例紹介とそれら工事の効果について検証を行った。本章から得られた知見をまとめると以下である。

- ・宇根鉦山では残壁の変位要因を解明するために、長期にわたるモニタリングを実施し、地下水位が変位挙動に影響を与えていることが判明した。それを基に宇根鉦山では降雨対策工事を重点的に実施してきた。
- ・浸透防止を目的とした舗装工では降雨における地下水位の上昇抑制効果が確認でき、降雨による変位の抑制効果も確認できた。
- ・ボーリング工および揚水工によって地下水位の低下が確認でき、全体的な亀裂変位速度の低減効果も確認できた。
- ・これら一連の降雨対策工事によって、武甲山の残壁は安定方向に向かっており、重回帰モデルから過去の最大降雨量を大幅に上回るような豪雨が襲来した場合でも、水位上昇は抑制されるというシミュレーション結果を得ることができた。
- ・将来の残壁の安定性をより高めるために実施した鋼管杭工、および盛石工に関しては、今後の効果の発現に期待したい。

参考文献

- 1) 中谷 剣, 藤巻 宏太, 平澤 祐介, 秋山 文孝, 宮弓 泰輔, 田中 恭平: 武甲山残壁の表面変位のモニタリング, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 170-178, 2018
- 2) 山富 二郎, 杉山 貴志, 三上 一成, 脇坂 貴, 山口 梅太郎: 武甲山における石灰石採掘と残壁管理, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 161-169, 2018
- 3) 土原健雄他: 農村工学研究所技報, pp. 93-107, 207, 2008
- 4) 土原 健雄, 吉村 雅仁, 石田 聡, 今泉 眞之, 河地 利彦: 破過曲線形状及び分散率からみた亀裂性岩盤の地下水流動特性, *地下水学会誌*, 47 巻 3 号 309-322, 2005
- 5) 青山 秀夫, 矢野 和文, 近藤 めぐみ, 小澤 教良, 中谷 剣: 宇根鉾山調査坑道の亀裂変位計測を用いた残壁モニタリング, *Journal of MMIJ*, 134 巻 11 号 179-187, 2018
- 6) 竹下 祐二, 河野 伊一郎: 地盤掘削工事における最適化手法を用いた排水設計方法に関する考察, *土木学会論文集*, 1994 巻 493 号 155-163, 1994
- 7) 赤井 浩一, 大西 有三, 西垣 誠: 揚水解析における影響圏の算定と排水設計への適用, *土木学会論文報告集*, 1977 巻 268 号 91-98, 1997
- 8) 西垣 誠: 建設工事に伴う地下水災害とその考え方, *地下水学会誌*, 30 巻 2 号 59-70, 1988
- 9) 高坂 信章, 三宅 紀治, 平野 文昭: 大深度地下開発における地下水問題と部分揚水試験法の提案, *地下水学会誌*, 32 巻 4 号 209-220, 1990
- 10) 福本 安正, 長 清: 地すべり防止杭の応力分布, 挙動および地盤反力について, *地すべり*, 37 巻 1 号 25-34_1, 2000
- 11) 福本安正: 地すべり防止杭打工法について, *地すべり*, 11 巻 2 号 p.21-29, 1974

第5章 武甲山における水質調査と残壁管理への応用

5-1. 緒言

降雨対策工事の成果により、武甲山残壁は安定方向に向かっているが、将来にわたる長期的安定性を確保するためには、地下水理の実態を把握した上で、残壁の安定化のための管理手法を構築する必要がある。しかし、石灰岩地帯の地下水理は複雑であり、残壁の安定化に直接影響する地下水を同定し、その水頭を低下させることは難しい。したがって、現段階では、原位置において地下水に関する種々の計測・分析を行い、地下水理を理解することが必要である。そこで、本研究では、残壁内の地下水を採取・分析し、降雨や岩種による水質が変化について調査を行った。とりわけ、これまで宇根鉾山で実施した残壁の水抜き対策の一つである揚水工に主眼をおき、水抜き効果の評価を行った。

5-2. 武甲山の状況と対策

5-2-1. 地下水位と残壁変位との関係

先に3-5で、宇根鉾山における地下水位と亀裂変位速度との関係を分析し、通常の降雨の場合、残壁上部(標高 1,005～1,012 mL)の水位 M2010-2 が変位の発現に対して支配的であり、豪雨時は残壁下部(標高 940～960 mL)の水位 UN111 が支配的となることを示した。特に、豪雨時は残壁下部に浸透水が急激に集まり地下水位が上昇することにより、一時的に変位速度が大きくなると考えられる。

一方、小澤は降雨量と変位量を統計学的に処理し、残壁変位を要因別にⅠ型変位とⅡ型変位に分類している¹⁾。Ⅰ型変位は“通常の降雨に反応しない変位”であり、豪雨に伴い残壁上部の変位速度が上昇し、その後、少雨期に変位がゆっくり減速する過程である。残壁上部の互層帯あるいは下盤内の一部に変位が集中し、その領域の残壁を滑動させていると解釈されている。また、Ⅱ型変位は“降雨に即応して発生する変位”であり、豪雨時に急激に発生し、その後急速に減少する。豪雨時に残壁下部の地下水位が急速に上昇すること起因して発生する、一時的で急激な変位であると解釈されている。これらの結果は、残壁の変位挙動は複数の地下水の影響を受けていることを示唆している。

5-2-2. 降雨対策工事

第4章で述べたように、地下水位が残壁の変位に影響を与えていることが判明したことから、宇根鉾山では残壁安定を目的として、降雨対策工事を重点的に実施してきた。降雨対策工事には、①浸透防止対策と②水抜き対策がある。浸透防止対策としては残壁管理道路においてコンクリート舗装工を行っている。また、降雨における地下水位の上昇も抑制され、降雨による変位の抑制効果も確認できた。一方、水抜き対策として実施した揚水工や水抜きボーリング工では、地下水位の低下が確認でき、全体的な亀裂変位速度の低減効果も確認できた。特に、揚水工の開始後、Ⅰ型変位に対応する亀裂変位速度の低下が認められている。

これら一連の降雨対策工事によって、武甲山の残壁は安定方向に向かっていると判断されている。また4-6-4で述べたように、降雨量と地下水位を用いた重回帰モデルによると、過去の最大降雨量を大幅に上回るような豪雨が襲来した場合でも、水位上昇は抑制されるというシミュレーション結果を得ることができた。

5-3. 地下水の採水および水質分析

5-3-1. 水質分析の目的

前述のように、現状の武甲山の残壁は安定方向に向かっているものの、長期的な残壁の安定性を確保するためには、対策工事の水抜き効果を確認しながら、より効果的かつ効率的な浸透防止対策、水抜き対策などを検討する必要がある。しかしながら、残壁の変位や安定性に影響を与える地下水の供給源が明確になっていない点が、現状の問題として挙げられる。石灰岩のような亀裂性岩盤は亀裂の状態(数やサイズ)が透水性に大きく影響し^{2,3)}、岩盤内の水位挙動は複雑であることが知られている。宇根鉱山では変位が観測された2007年から2016年までに233本、総穿孔長19,344 mの水抜きボーリングを掘さくしてきたが、常時湧水が確認できているものは1割にも満たない状況である。また、武甲山では水位挙動を分析するためにトレーサー試験や電気探査等を実施してきたが、いずれの方法においても明確な結論は見出せなかったため、新たな評価手法を検討する必要があった。

これまで実施してきた水抜きボーリング孔からの湧水状況を観察すると、例えば、1,010 mL調査坑道下盤を掘さくしたボーリング孔は年間を通じて湧水が確認できる。一方、石灰岩から互層帯を貫いたボーリング孔からの湧水は、降雨時の増加が著しく、流量の変動が大きい。このように透水係数や地下水位の変化に合致した湧水状況が観察できていることから、湧水の水質分析を行うことによって、地下水挙動が解明できると考えた。加えて、岩手県の釜石鉱山で行われた水質調査によると、石灰岩を浸透してきた地下水は周辺の地下水よりも、電気伝導度(EC)やカルシウムイオン(Ca^{2+})濃度が高い傾向にあることが報告されている⁴⁾。武甲山においても、各層の岩石試料に対し、蛍光X線分析(X-ray Fluorescence Analysis, XRF)による元素分析、X線回折分析(X-ray Diffraction Analysis, XRD)による鉱物同定を行ったところ、石灰岩に含まれる Ca^{2+} はほとんどがcalciteとして存在していることがわかった(表5-1, 表5-2参照)。また、緑色岩類は、石灰岩と比較してマグネシウムイオン(Mg^{2+})、ナトリウムイオン(Na^{+})、シリカ(Si)の含有量が多く、それらはquartzやalbite, chloriteなどとして存在している。そこで、本研究では地下水位挙動を評価するために地下水(湧水)の水質を分析した。

表 5－1 Results of XRF analysis.

(単位 wt.%)		
	石灰岩	緑色岩類
SiO ₂	0.24	39.7
TiO ₂	0.02	3.39
Al ₂ O ₃	0.42	15.3
Fe ₂ O ₃	0.25	15.7
MnO	< 0.01	0.24
MgO	0.52	8.30
CaO	54.6	8.04
Na ₂ O	0.01	2.40
K ₂ O	< 0.01	0.10
P ₂ O ₅	0.03	0.45
LOI	42.8	5.04

表 5－2 Results of XRD analysis.

	含有鉱物
石灰岩	calcite
緑色岩類	quartz, calcite, albite, hematite, chlorite

5-3-2. 採水地点と採水方法

図 5－1 と図 5－2 に武甲山の地質構造と地下水試料の採取地点を示す。図 5－1 の平面図には図 5－2 の南北断面線と図 5－8 の東西断面線も記入している。サンプリングは宇根鉱山の調査坑道および残壁表面から掘さくされたボーリング孔 8 地点において行った。また、同図には 5-4 で説明する揚水工の配置も記入している。L-1 は 1,090 mL 調査坑道、L-4、S-1、S-2 は 1,010 mL 調査坑道、A-7、L-9 は 930 mL 調査坑道の内部から掘さくを行っている。また L-10 は採掘切羽下部にある 860 mL 探鉱坑道のボーリング孔である。そして、L-3 は 1,050 mL の残壁表面から掘さくしている。表 5－3 に各ボーリング孔の掘さく情報とボーリングが通過している岩相を示しており、水抜きの対象とした岩相を太字で示している。ただし、ボーリング孔が地下水の水みちや貯留層に達した場合のみ有効な水抜きが行われることから、実際に水抜き対象となった岩種は分析結果から推定することにした。そこで、水抜きボーリング孔を石灰岩対象のボーリング孔を L 系、緑色岩類対象を S 系、互層帯対象を A 系と分類し、それぞれ“L-”、“S-”、“A-”を付して表すことにする。

採水時は、現場データとして pH、EC(mS/m)、水温(℃)を測定し、各ボーリング孔から流出する地下水の流量はメスシリンダーを用いて測定した。また、採取した試料は 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過した後に、ポリ容器に保存し実験室に持ち帰ってイオン分析に供した。調査は 2014 年 12 月より 2016 年 11 月まで実施した。全体の採水は 11 回実施したが、L-1、L-3、L-4、S-1 は湧水が見られない時期があった。また、対策工事を実施

していたため、2015年7月はA-7の流量の測定ができなかった。

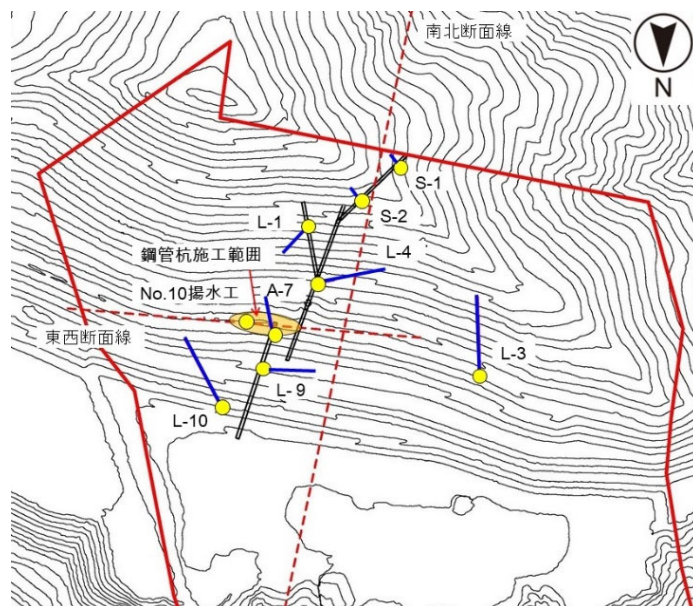


図5-1 Location of sampling points and drainage drilling (Plan view).

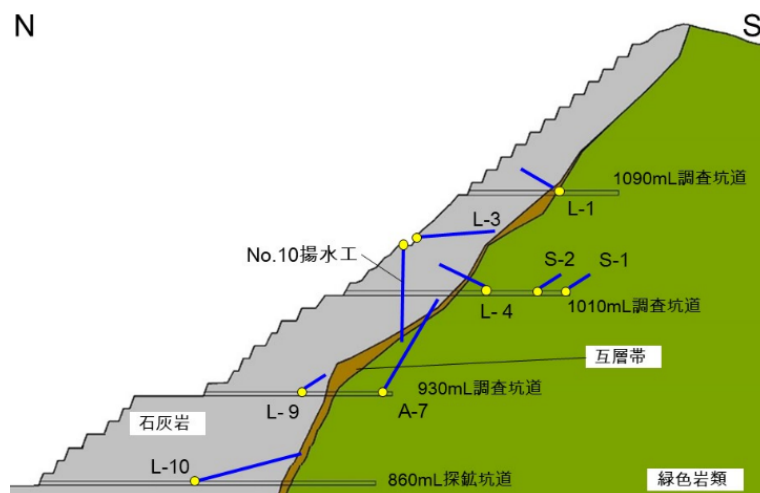


図5-2 Location of sampling points and drainage drilling (Section view).

表5-3 Information of drainage drilling.

	傾斜 (度)	掘進長 (m)	ボーリングが通過する岩種
L-1	5	45	緑色岩類～互層帯～石灰岩
L-3	3	100	石灰岩～互層帯
L-4	35	120	緑色岩類～互層帯～石灰岩
L-9	5	50	石灰岩～互層帯～緑色岩類
L-10	30	114	石灰岩
A-7	60	90	緑色岩類～互層帯～石灰岩
S-1	約5	約5	緑色岩類
S-2	約10	約5	緑色岩類

5-3-3. 水質分析方法

現場で測定を行った項目に加えて、実験室において主要元素(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Si)および微量元素(Al, Fe)の分析を行った。 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} はイオンクロマトグラフ(IC)を用いて、アルミニウム(Al), 鉄(Fe), ケイ素(Si)はプラズマ発光分析装置(ICP-AES)を用いて、 HCO_3^- は0.01mol/Lの硫酸を用いた滴定法によって定量分析を行った。なお、ICP-AESでは塩酸を加えたる過試料を、ICは塩酸を加えずろ過試料を直接分析に供した。

5-4. 水質分析の結果と考察

5-4-1. 現場計測結果

現場での観察から、湧水状況に最も大きな影響を与える要因は、採水前の降雨量と考えられる。これまでの研究により、石灰岩、互層帯では降雨開始後5～6時間で水圧が上昇し、下盤では2～3日かけてゆっくりと上昇する傾向が見出されている³⁾。そこで、ここでは降雨状況の参考値として、日降雨量とともに採水日の前2日間の降雨量を指標として用いることにした。図5-3にEC, pH, 水温, 湧水量, 採水前2日間降雨量, 日降雨量の経時変化を示す。この図では、L系のボーリング孔を青のプロットで、S系のボーリング孔を緑のプロットで、A系のボーリング孔を赤色のプロットで示している。また、これら測定量の空間分布を把握するために、上記測定値の一部を図5-3に示す。

図5-3から測定値の全体的傾向をみると、データはL系, S系, A系に大略3分類されることがわかる。具体的に、流量に着目すると、石灰岩を主体としたL系は降雨時に急激に湧水量が増加していることがわかる。これに対し、下盤や互層帯を掘さくしたS系, A系では降雨時に急激に水量が増加することではなく、年間を通じてほぼ一定の湧水が観測される。

そこで、豪雨時と平常時の流量の空間分布を把握するために、2015年7月と2015年10月の湧水量を断面図上に記入したものが図5-4 (a), (b)である。これらの図より、降雨時は石灰岩カバーロック中で流量が大幅に増大すること、平常時はカバーロックよりも下盤や互層帯からの流量が多いことなどが明瞭である。なお、測定データ数と分布に限りがあるが、地質状況も考慮して空間分布を推定してみると大略図中の破線のように推察される。

水温に着目すると、石灰岩中(L系)で季節的により上下しているのは、湧水量が少なく採水時間が長くなり、試料が気温の影響を受けたためである。一方、下盤中(S系)では年間を通じてほぼ一定であるのは、採水場所が坑道内で外気温の影響を受けないためである。これらの測定状況の違いを考慮すると、水温は標高によらず10℃前後で一定であると考えられる。

図5-3(c)はpHの平均値の分布を示す。pHに関しては、季節変動はなく、下盤中(S系)は石灰岩中(L系)に比較してその値が高いこと、A系は両者のほぼ中間的値を示すこと

がわかる。特に、石灰岩中の地下水は大気や雨水の影響を受けやすく、pHも8.0～8.2と他系よりも低くなる。

図5－3(d)はECの平均値の分布を示す。ECに関しては、石灰岩中(L系)が高く、互層帯中(A系)、下盤中(S系)の順に低くなっている。また、岩種の違いとともに石灰岩層では標高が低くなるとECが増大する傾向も認められる。これは、石灰岩中の上部から下部への地下水の流動によって、下部の地下水ほど多くの溶存成分が含まれるためである。

以上の結果から、当該残壁内の地下水は、主として、石灰岩層中の地下水(L系)、下盤の緑色岩類中の地下水(S系)と互層帯中の地下水(A系)に分類されること、L系は降雨時に急激に湧水量が増加するが、S系、A系は降雨の影響をあまり受けずに年間を通じてほぼ一定の湧水量が観測されることがわかる。これら地下水の特徴を前述の残壁変位と対照すると、小澤の指摘するⅠ型変位はS系及びA系の地下水の影響による変位であり、Ⅱ型変位はL系の地下水の影響による変位であると解釈できる¹⁾。

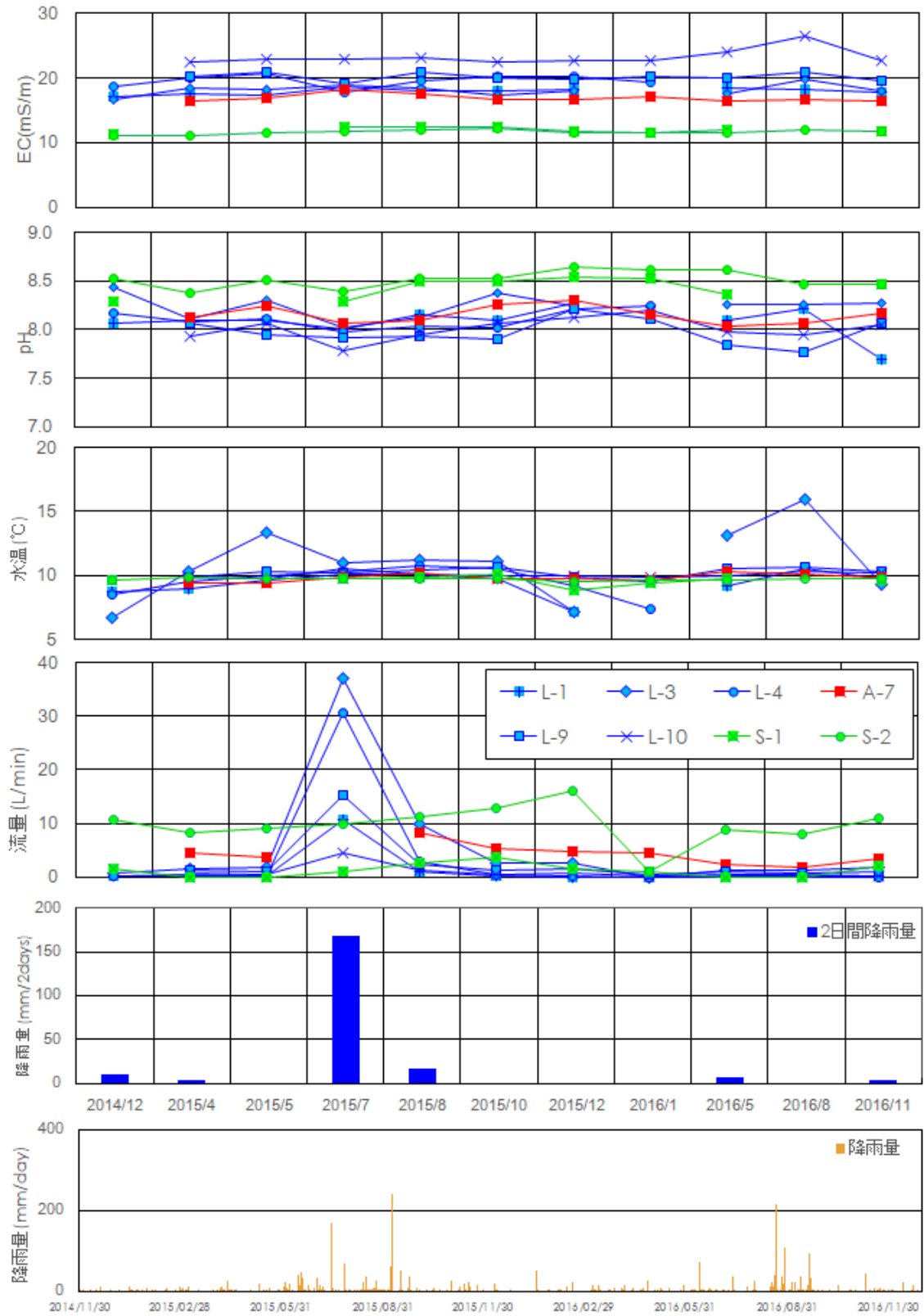


図 5 — 3 Changes of (a) EC, (b) pH, (c) temperature and (d) flow rate of groundwater, and (e) rainfall for 2 days before sampling, and (f) daily rainfall .

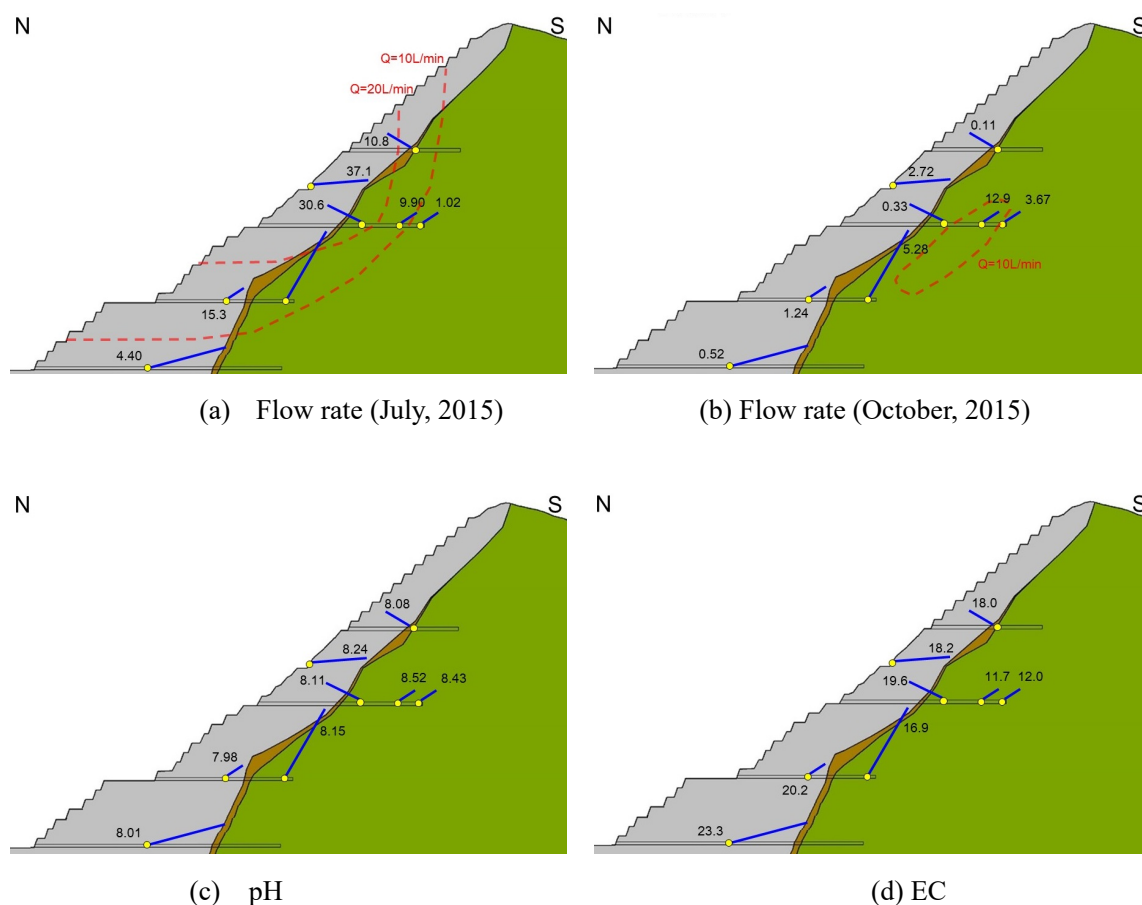
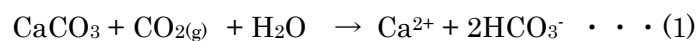


図 5 - 4 Geological cross section and spatial distributions of flow rate, pH, and EC.

5-4-2. 主要成分分析結果

表 5 - 4 に地下水中の成分の平均値を示す。ICP-AES の標準法の結果では、Al や Fe はほとんどの場合、定量下限以下となった。Si は L 系よりも S 系に多く含まれる傾向があり、これは緑色岩類に Si が多く含まれることに由来すると考えられる(XRF, 表 5 - 1 参照)。

表 5 - 4 の主要イオンを図 5 - 5 のトリリニアダイアグラムに示す。トリリニアダイアグラムの中央の菱形のプロットの位置から、水質組成は、Type-I : アルカリ土類炭酸塩型、Type-II : アルカリ炭酸塩型、Type-III : アルカリ土類非炭酸塩型、Type-IV : アルカリ非炭酸塩型のように分類することができる。地下水試料すべて主要イオンが Ca^{2+} と HCO_3^- で、すべてアルカリ土類炭酸塩型の水質であった。このように、今回採水した試料は全体的に水質の傾向が類似しているため、岩盤に由来する水質の特徴の違いを比較するためには、各層に特徴的な成分に焦点を絞って、詳細を分析する必要がある。石灰岩では、式(1)に従って、石灰岩の主要な鉱物である calcite と二酸化炭素が反応することで calcite が溶解し、石灰岩層中の地下水の Ca^{2+} および HCO_3^- が上昇することが知られている⁵⁾。



また、緑色岩類は表 5 - 1 に示したように Mg^{2+} , Na^+ , Si が多く含まれるという特徴から、それぞれの濃度が地下水に多く含有し、起源となる岩種による特徴がより明確に現れる可能性がある。実際に表 5 - 4 の Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Si の濃度に着目すると、L系は Ca 濃度が高く、S系は Mg^{2+} , Na^+ , Si が高い傾向が表れている。したがって、以後は Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Si に着目して考察する。

表 5 - 4 Average values of water quality.

	Na mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	NO ₃ mg/L	Fe mg/L	Al mg/L	Si mg/L
L-1	0.722	0.453	0.146	41.2	0.803	4.09	0.752	<0.001	<0.001	2.05
L-3	0.904	0.617	0.256	40.5	1.77	6.48	0.894	0.006	<0.001	2.87
L-4	1.72	2.80	0.201	21.8	1.17	3.98	4.93	0.006	<0.001	2.46
L-9	1.73	1.06	0.300	43.4	1.26	14.2	1.46	0.006	<0.001	2.76
L-10	2.10	1.69	0.236	49.1	1.13	16.0	2.70	0.005	<0.001	3.48
A-7	2.74	3.77	0.340	30.8	0.981	8.09	1.93	0.008	<0.001	6.19
S-1	1.72	2.80	0.201	21.8	1.17	3.98	4.93	0.006	<0.001	6.37
S-2	1.84	2.72	0.202	21.0	1.22	4.07	5.06	0.005	<0.001	6.49

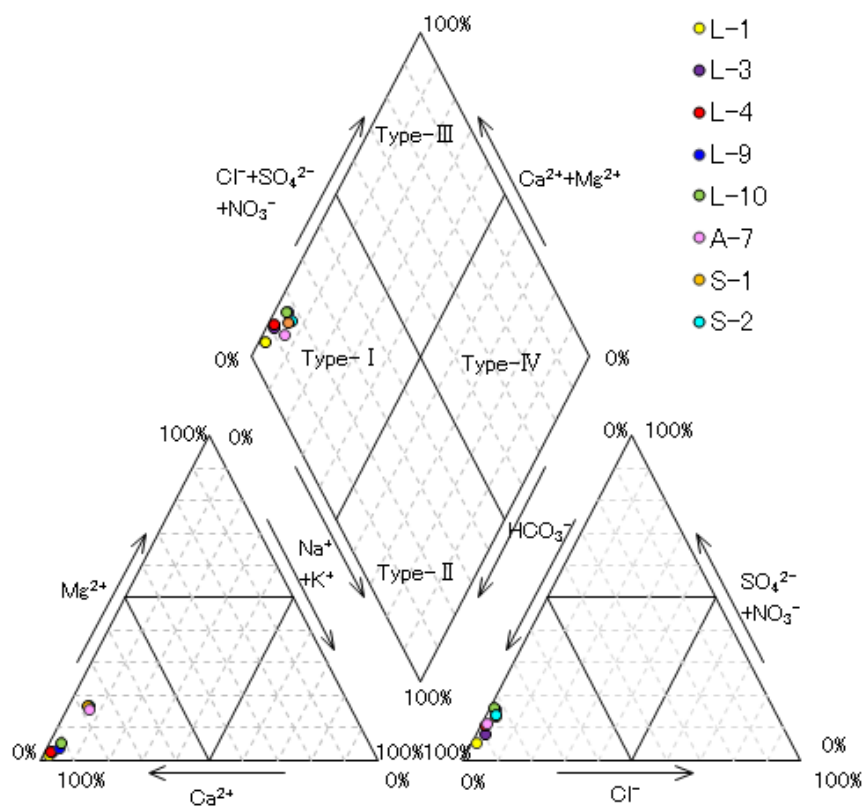


図 5 - 5 Piper plot using average concentrations.

5-4-3. 岩種と水質との関係

図5-6は Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Si の濃度変化を示す。また、図5-4と同様に、ボーリング孔ごとに各成分濃度の平均値を求め、断面図上にプロットすると図5-7となる。石灰岩カバーロックに着目すると、石灰岩層中の地下水(L系)は Ca^{2+} 濃度が33.1~58.1 mg/Lであり、下盤中(S系)や互層帯中(A系)の地下水と比較して高いことがわかる。下盤や互層帯からの湧水であるS系及びA系の地下水に着目すると、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Si がL系に比較して高く、特に、A系は Mg^{2+} と Na^+ が高い特徴を有している。この傾向は互層帯、下盤、石灰岩の鉱物組成に起因すると考えられる。

次に降雨による水質の変化をみると、降雨量に対して Ca^{2+} はあまり変化がなく、2015年7月の豪雨時も Ca^{2+} 濃度が低下しないことが確認できた。 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Si に関しては、年間を通じて変動が小さいが、豪雨時は石灰岩を主体としたボーリング孔において、これらの濃度が低下する傾向が認められる。これは石灰岩層内を流下してきた地下水が増加したことにより、互層帯や下盤経由の地下水が希釈された結果であると考えられる。このように豪雨時の水量の急増を考えると、豪雨時には石灰岩内を流下する水量が急激に増大すること、下盤経由の湧水量はほぼ一定であることから、主要成分濃度変化を解釈することができる。

以上より、水質分析によりL系、S系、A系の分類判定が可能であり、どの岩種に地下水が賦存しているかが判断できる。特に、前述の地下水位と残壁変位の関係を考慮すると、I型変位抑制にはS系、A系の水抜きが、II型変位抑制にはL系の水抜きが有効と考えられることから、変位要因となる地下水の対象を絞ることが可能となる。

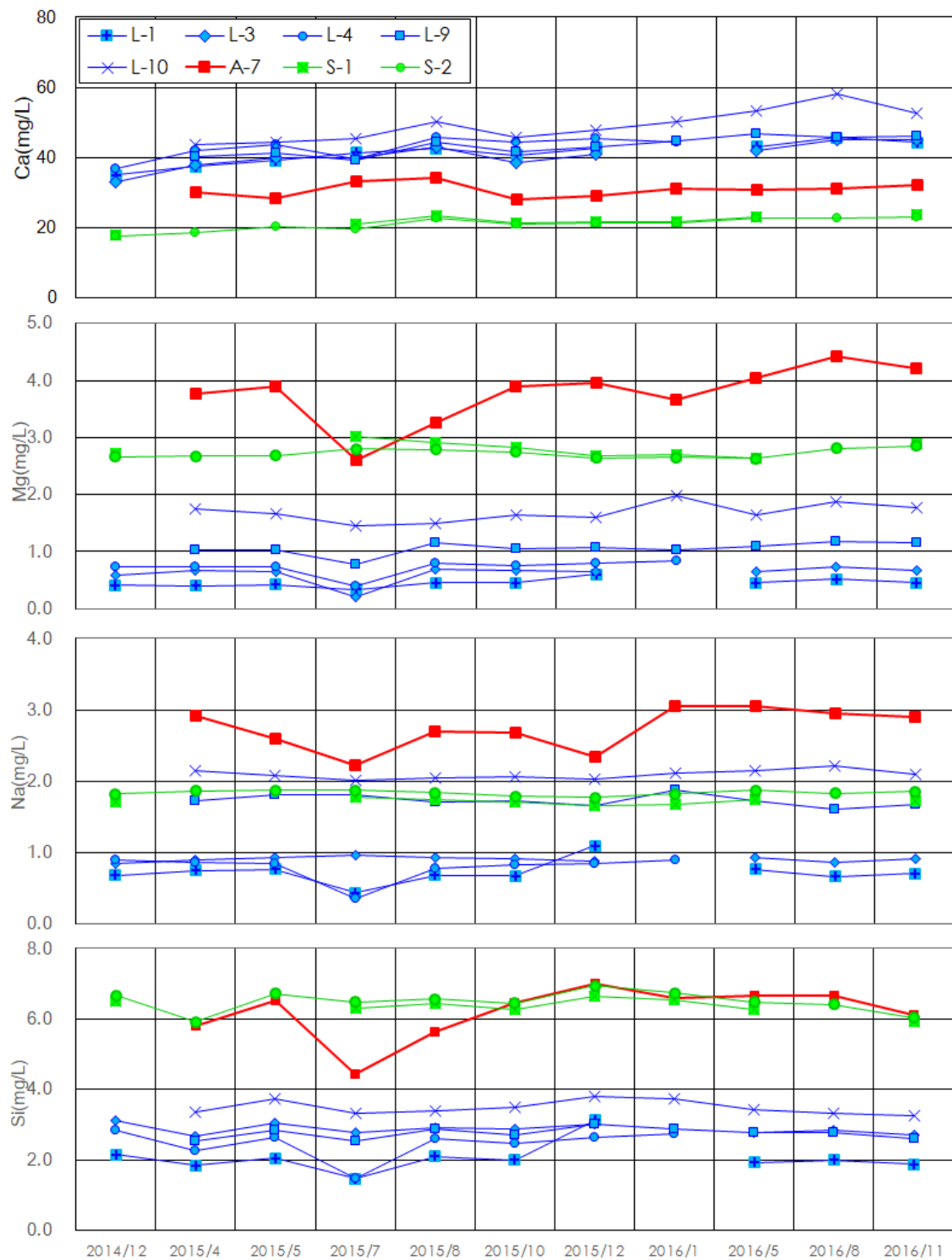


图 5 — 6 Changes in concentrations of dissolved constituents (a) Ca²⁺, (b) Mg²⁺, (c) Na⁺, and (d) Si

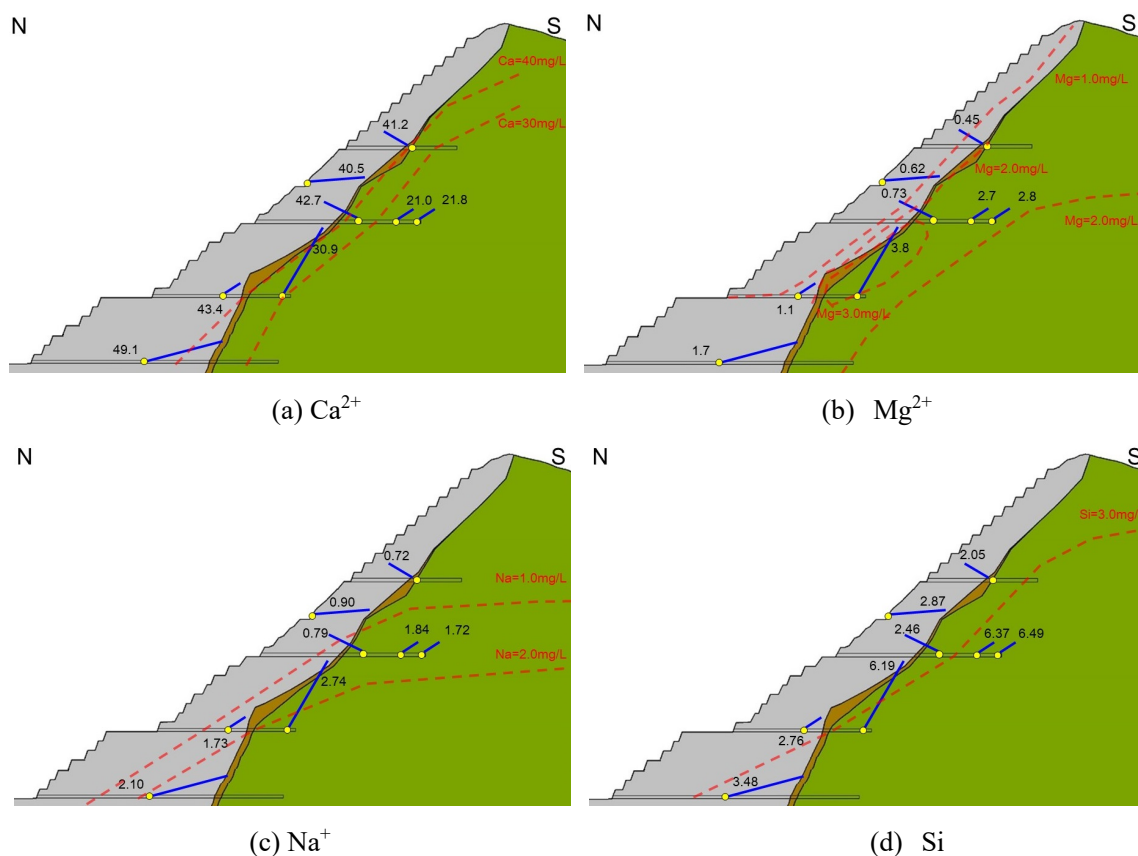


図 5 - 7 Geological cross section and spatial distributions of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and Si concentrations.

5-5. 降雨対策工事と水質分析

宇根鉱山では互層帯分布域の地下水位を低減させることで、残壁全体の安定性が向上すると考え、当時 1,050 mL で施工中であった鋼管杭工の掘さく孔を利用し、No.10 揚水工を 2014 年 8 月から実施している。鋼管杭及び No.10 揚水孔の配置は図 5 - 2 (a) の平面図に記したが、残壁に平行な東西断面における地質状況は図 5 - 8 となる。

No.10 揚水工の鋼管杭は穿孔長 80 m であり、973 mL に深井戸式ポンプが設置されており、978 mL まで水位が上昇するとポンプが稼働を開始し、975 mL まで水位が低下すると停止する仕組みとなっている。周辺の地層状況をみると、揚水施工箇所は互層帯が盆状になっており、水抜きボーリングでは排除が難しい互層帯エリアの地下水に対して、鉛直孔を掘さくし、揚水することで、地下水位の低減につながる可能性があると考え施工された。実際に施工後は揚水孔周囲の水位が全体的に低下し、近くに設置していた亀裂変位計の変位速度、特に I 型変位に対応する亀裂変位速度の低下も確認できている。そこで、No.10 揚水孔に関して詳細に分析を行うことにした。

図 5 - 9 (a) に揚水量 (t/day) と Mg^{2+} , Na^+ , Si の濃度変化を示す。揚水量は、ポンプの稼働時間を連続的に計測し、揚水時間(min)とポンプ能力(L/min)との積で算出している。

この図より、揚水量は降雨状況や季節によって変動するが、冬季を含めて常時揚水が確認できていることから、当該地下水位は常時供給源が存在すると考えられる。また水質に着目すると、前述5・4・3の水抜きボーリング孔のL系とA系もしくはS系との中間的な水質を示しており、No.10 揚水孔では石灰岩からの湧水と互層帯もしくは下盤からの湧水が常に混合した状態であると考えられる。

そこで、No.10 揚水孔で揚水された地下水の流入源について検討する。揚水により採水された地下水は、石灰岩層、互層帯、および下盤を流れてきた地下水が混合されたものであり、混合において化学変化はないと仮定する。さらに、図5－2に示した揚水孔と水抜きボーリング孔の配置を考慮して、石灰岩層はL-1の地下水で、互層帯はA-7の地下水で、下盤内はS-2の地下水でそれぞれ代表させ、No.10 揚水孔の地下水はこれらが混合されたものであると仮定する。No.10 揚水孔で採取された地下水のイオン濃度を $C(\text{mg/L})$ 、L-1、S-2 および A-7 の地下水のそれらを $C_{L1}(\text{mg/L})$ 、 $C_{S2}(\text{mg/L})$ 、 $C_{A7}(\text{mg/L})$ とする。また、L-1、S-2 および A-7 から揚水孔への流入量を $Q_{L1}(\text{t/day})$ 、 $Q_{S2}(\text{t/day})$ 、 $Q_{A7}(\text{t/day})$ とすると、

$$C = \frac{Q_{L1}C_{L1} + Q_{S2}C_{S2} + Q_{A7}C_{A7}}{Q_{L1} + Q_{S2} + Q_{A7}} \quad \dots (2)$$

となる。また、揚水量を $Q_T(\text{t/day})$ とすると、

$$Q_T = Q_{L1} + Q_{S2} + Q_{A7} \quad \dots (3)$$

と表される。ここで Q_{L1} を式(1)へ代入すると、

$$C = \frac{(Q_T - Q_{S2} - Q_{A7})C_{L1} + Q_{S2}C_{S2} + Q_{A7}C_{A7}}{Q_T} \quad \dots (4)$$

となり、 Q_{A7} は次式で求められる。

$$Q_{A7} = \frac{Q_T C - (Q_T - Q_{S2})C_{L1} + Q_{S2}C_{S2}}{C_{A7} - C_{L1}} \quad \dots (5)$$

ここでは、下盤からの流入量は降雨や季節によらず一定であると仮定し、3種類のイオンにおける互層帯層からの流入量 Q_{A7} の標準偏差を求めたところ、 $Q_{S2}=0$ の時に標準偏差が最も小さくなった。

また、図5－6(b), (c), (d)と図5－9(a)のそれぞれのイオンを比較しても、Si と Mg^{2+} に関しては、互層帯あるいは下盤の地下水と石灰岩層の地下水が混合していると考えられる。一方で、 Na^+ に関しては、下盤からの地下水単独か、あるいは石灰岩層と互層帯の地下水との混合と考えられる。すなわち、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、Si の3成分を考慮した場合、No.10 揚水孔は石灰岩層の地下水と互層帯層の地下水の混合であると考えられる。したがって、No.10 揚水孔の場合、式(5)は、

$$Q_{A7} = \frac{(C - C_{L1})Q_T}{C_{A7} - C_{L1}} \quad \dots (6)$$

となり、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、Si のそれぞれのイオン濃度について互層帯からの流入量 Q_{A7} を求め

と、図5－9(b)のようになる。この図より、全期間を通して3種のイオン Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Si に対して得られた流入量がほぼ一致することがわかる。この結果は、得られた結果の範囲内では、No.10 揚水孔の地下水は石灰岩中 L-1 の地下水と互層帯中 A-7 の地下水との混合であることを示唆している。

そこで、3種のイオン Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Si に対して求められた流入量の平均値 $\overline{Q_{A7}}$ を求め、揚水孔の混合割合の継時変化を示すと図5－9(c)となる。図より、2015年7月以降は、揚水量が減少しているが、この傾向は互層帯からの流入量が減少してきていることに起因する。言い換えれば、揚水により互層帯中の地下水が効率よく排出され、その貯留量が減少してきていると解釈することができる。これらの結果として、I型変位に対応する亀裂変位速度が低下したと解釈することもできる。

以上より、水質分析は水抜きボーリング工・揚水工など地下水対策が、どの岩種からの水抜きに有効であるかの判定に利用できる。そして、それぞれの岩種の地下水位および水質と残壁挙動の関係を分析することにより、残壁変形挙動の理解が進み、効果的な地下水対策の立案に繋がることが期待される。

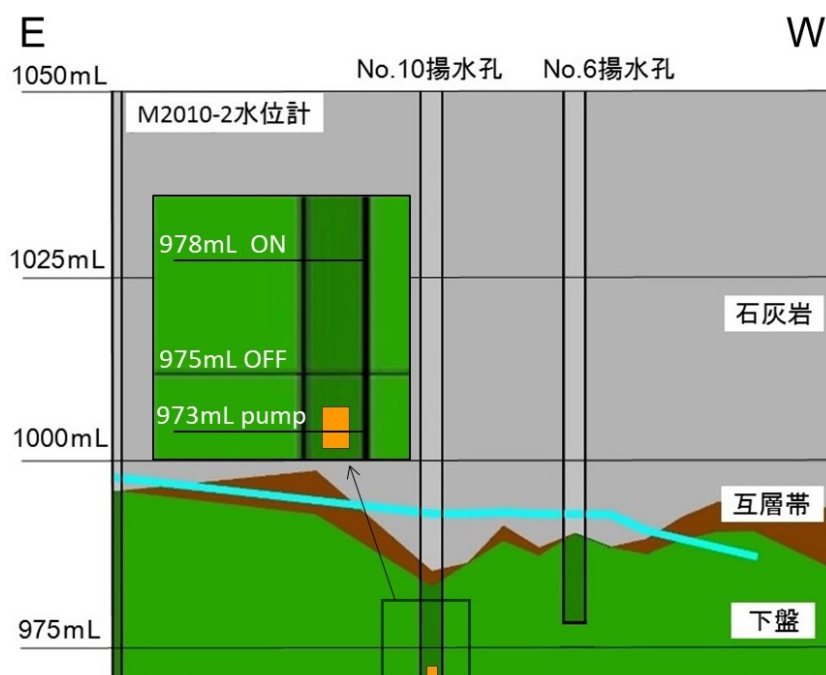
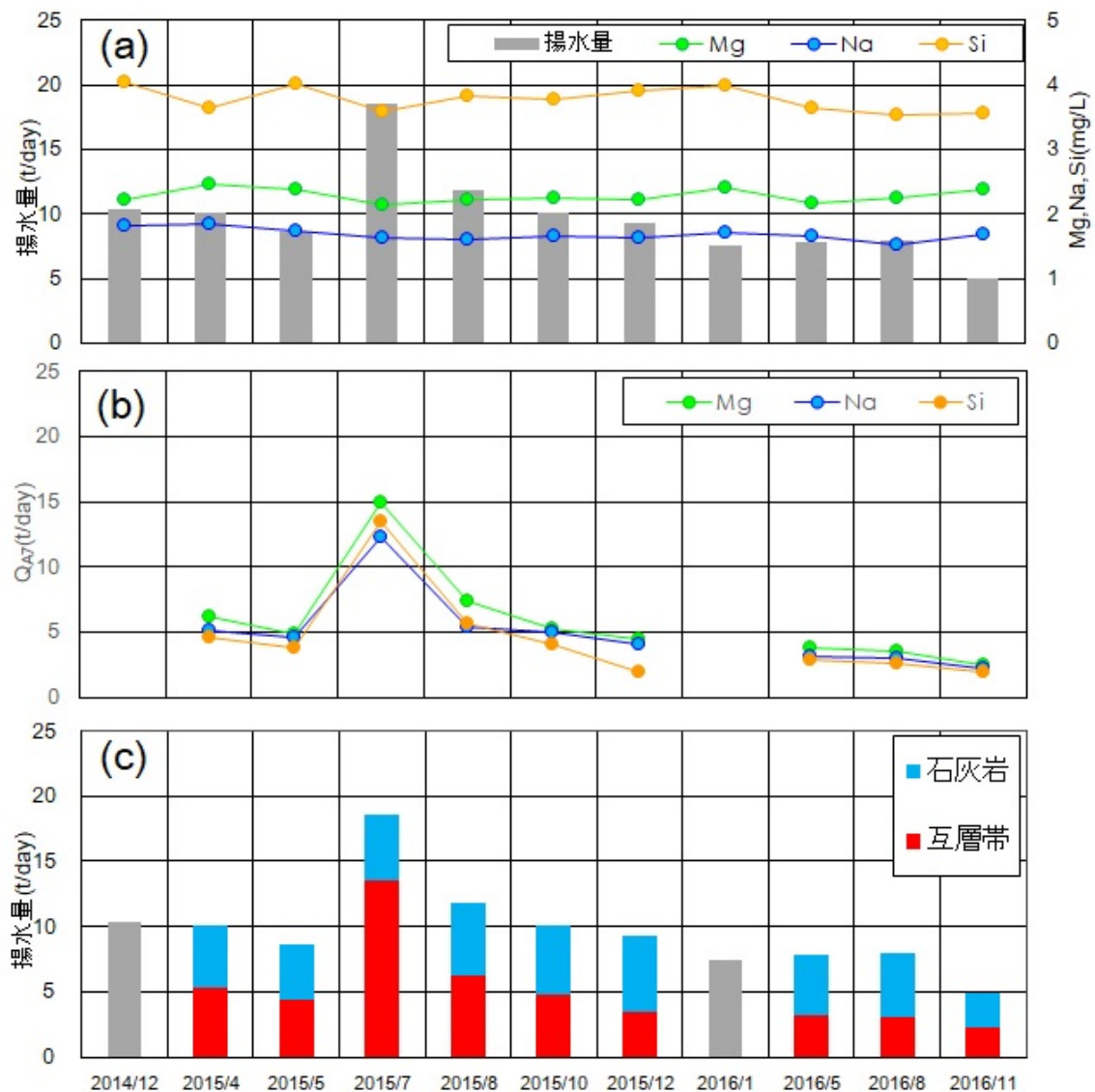


図5－8 Geological east-west section and estimated groundwater level before pumping along the pumping-up wells.



(a) Amount of pumped-up groundwater and concentrations of Mg, Na and Si,
 (b) QA_7 of Mg, Na and Si, (c) Amount of pumped-up groundwater considering mixing ratio.

図 5 - 9 Data on No.10 water pumping.

5-6. 結言

本章では宇根鉱山の水抜き対策工を対象として湧水の水質計測・分析を実施し、それらの特徴や残壁変位挙動に与える影響について論じてきた。本研究により得られた知見をまとめると以下である。

- ・湧水量, pH, EC などの現場計測結果から、当該残壁内の地下水は、石灰岩層中の地下水(L系)、下盤の緑色岩類中の地下水(S系)、互層帯中の地下水(A系)に分類されること、L系は降雨時に急激に湧水量が増加するが、S系、A系は降雨に大きな影響を受けずに年間を通じてほぼ一定の湧水が観測された。

- ・各種イオンなどの水質分析により、岩種と地下水水質との対応が明瞭となり、石灰岩由来の地下水は Ca^{2+} 濃度が高く、緑色岩類を由来とする地下水は Mg^{2+} , Na^+ , Si の濃度が高いこと、互層帯に由来する地下水は、 Si 濃度は緑色岩類と同程度であるが、 Mg^{2+} と Na^+ が緑色岩類より高いこと、などを明らかにした。これらの結果から、水質分析により、石灰岩、緑色岩類、互層帯のそれぞれに由来する地下水の判別が可能となることを指摘した。
- ・宇根鉦山で実施した地下水対策工である揚水工に関して、水質データの詳細な分析を行い、揚水された地下水は、石灰岩層と互層帯のそれぞれに由来する地下水が混合したものであることが示唆された。この結果を踏まえ、石灰岩層と互層帯のそれぞれに由来する地下水の混合比率を評価した。結果、互層帯からの湧水量が減少してきていることなどが明らかになった。この結果は、揚水工により残壁中の亀裂変位速度が低下したことで調和的であった。

以上より、水質分析は水抜き工事の効果の判定や残壁変位メカニズムの解明に有用な手法であると言える。

参考文献

- 1) 小澤 教良：宇根鉾山残壁挙動に及ぼす降雨の影響, Journal of MMIJ, 134 巻 11 号 208-221, 2018
- 2) 小池 克明, 野口 義文, 岩崎 浩, 金子 勝比古: Journal of MMIJ, 112(1996), 907-914
- 3) 野口 義文, 飯島 章夫, 中村 直昭, 小池 克明, 金子 勝比古: 岩盤亀裂群の計測とモデリング, Journal of MMIJ, 107, 428-433, 1991
- 4) 森田 誠也, 嶋田 純, 長 久: 深部結晶質岩中の地下水の化学的特性とその挙動 (その1), Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 32 巻 4 号 155-166, 1991
- 5) 吉村 和久, 井倉 洋二: 石灰岩地域秋吉台における水循環と地下水水質の形成, 地下水学会誌, 第 34 巻第 3 号, 183-194, 1992

第6章 結論

本論文は、石灰岩残壁の安定性確保を目的として、残壁変位に与える地下水挙動と残壁変位挙動の分析を行い、それに基づき実施した降雨対策工事の効果の検証を行った。また、残壁地下水の水質分析を行うとともに水質の特徴を分析し、地下水挙動の評価手法としての水質分析の有効性について論じた。

第2章では、研究の対象となる武甲山残壁の概況として、武甲山の地質および残壁規格、残壁のモニタリング結果について述べた。武甲山の残壁は日本最大級となることから、安全を考慮した残壁設計を行い、表面変位計測を始めとした様々な手法を取り入れながら残壁挙動のモニタリングを行ってきた。また、これまで武甲山で実施しているモニタリングである表面変位計測および挿入式傾斜計、調査坑道計測の計測手法について述べた後、それぞれのモニタリング結果から読み取れる残壁の全体的な挙動について考察するとともに、各計測手法の特徴と精度について考察した。また、調査坑道内の亀裂変位計測は高精度かつ安定した連続データを取得可能であるとともに、残壁表面計測結果との相関性が高いことから、残壁変位の分析に有用であることを明らかにした。また、亀裂変位計測の結果を利用することにより、残壁変形を高精度に分析することが可能になった。

第3章では、各計測手法によるモニタリング結果において、降雨時に残壁変位の著しい増加が確認できることから、岩盤に浸透した降雨が何らかの影響を与えていると考え、地下水位が変位に及ぼす影響を分析し、その要因を考察した。まず、残壁に設置した間隙水圧計の計測データから、岩相ごとの地下水位挙動を分析し、それぞれの岩相が有する地下水挙動の特徴を考察した。その結果、石灰岩の地下水位は、互層帯や緑色岩類と比較して、降雨時に急激に上昇し、上昇幅も大きいことを明らかにした。また、複数の降雨時の投げ込み式水位計の結果から、降雨と水位上昇の関係を分析し、特に水位上昇が大きい宇根鉾山東側において、旧沢地形や断層が水位上昇に与える影響について論じた。更に、調査坑道内の亀裂に設置した亀裂変位計を用いて、地下水位と亀裂変位速度の関係性を分析し、降雨パターンによる残壁変位挙動メカニズムの相違や残壁変位に支配的な地下水位の特定を行った。その結果、降雨時には残壁上部の地下水位が残壁変位に支配的で、豪雨時は残壁下部の地下水位が支配的であることが明らかになった。また、亀裂変位計が地表面変位と相関性があることから、地下水位は残壁全体の変位に大きな影響を与えていることを具体的に論じた。

第4章では、地下水位挙動の考察に基づき実施した、宇根鉾山の残壁安定化工事の事例を示した後、その効果について論じた。残壁安定化工事には、浸透防止対策、水抜き対策、せん断面対策の3種類があり、この中で浸透防止対策と水抜き対策を降雨対策工事としている。まず、各工事の目的と施工方法を示した後、工事の工程とモニタリングデータを比較分析し、各工事の効果を検証した。浸透防止を目的とした舗装工では、降雨時の地下水位の上昇抑制効果を確認し、降雨による変位の抑制効果を明らかにした。また、水抜き対策工事として実施した揚水工に関しては、地下水位の明確な低下や、全体的な亀裂変位速度の低減効果を確認した。各対策工事は緊急性があるために同一期間で実施しているものもあり、そ

それぞれの効果を個別に判別することは現状では困難であるが、施工時期や水位低下状況を考慮すると、せん断面対策工事の効果より降雨対策工事の効果が大きいことが明らかになった。更に、重回帰モデルを用いて過去の最大降雨量を大幅に上回るような豪雨が襲来した場合を想定したシミュレーションを行い、一連の降雨対策工事により、水位上昇が抑制されることを示した。これにより対策工事の効果と妥当性が検証された。

上述の降雨対策工事の効果により、武甲山の残壁は安定方向に向かっていると判断されているが、将来にわたる長期的安定性を確保するためには、地下水理の実態を把握した上で、残壁の安定化のための管理手法を構築する必要がある。しかし、石灰岩地帯の地下水理は複雑であり、残壁の安定化に直接影響する地下水を同定し、その水頭を低下させることは難しい。そこで、第5章では、新たな水抜き対策工事の評価手法として、残壁内の地下水を採取・分析し、降雨や岩種によって水質がどのように変化するかを分析した。湧水量、pH、ECなどの現場計測結果から、当該残壁内の地下水は、石灰岩層中の地下水、下盤の緑色岩類中の地下水、互層帯中の地下水に分類されることが判明した。更に、各種イオンなどの水質分析により、岩種と地下水の水質との対応がより明瞭となり、石灰岩、緑色岩類、互層帯のそれぞれに由来する地下水の判別が可能となることを指摘した。次に、第4章で述べた水抜き対策工事の一つである揚水工の水質変化を詳細に分析し、各岩相に由来する地下水の混合比率を求めたところ、揚水された地下水は、石灰岩層と互層帯のそれぞれに由来する地下水が混合していることを示唆しており、そのため由来する地下水の混合比率を評価した。更に、揚水工による残壁中の亀裂変位速度の低下は、互層帯からの湧水量の減少に起因していることを明らかにした。この結果から、地下水の水質分析により地下水流動経路などが推定可能であることを示し、水質分析が残壁管理計測として有効であると結論付けた。

終掘後も含めた長期的かつ恒久的な対策に関しては、今後さらなる検討が必要と考える。今後もこれまで実施してきた水抜き効果を確認しながら、より効果的な浸透防止対策、水抜き対策の検討が求められる。また、水質調査を継続し、どこから地下水が流入し、残壁変位にどのような影響を与えているかを解明する必要がある。これらを通じて、長期的な武甲山残壁の安定管理が望まれる。

謝辞

本論文を進めるにあたり、主査を努めていただきました北海道大学の五十嵐敏文教授からは多大な助言を賜りました。論文作成以外にも、現地調査にご同行頂く等、多大なご尽力を賜り、厚く御礼申し上げます。また、副査を務めて頂きました室蘭工業大学板倉賢一教授、北海道大学藤井義明教授には貴重な意見を賜り、深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、北海道大学の金子勝比古名誉教授には、日頃の研究への助言を始め、学会の投稿論文や発表、学位論文作成に至るすべての過程で懇切丁寧なご指導を賜り、深く感謝申し上げます。

秩父残壁研究会の前座長である東京大学の山口梅太郎名誉教授、現座長である東京大学の山富二郎名誉教授には、宇根鉦山在籍中に、日頃の残壁管理から論文作成までご指導頂きました。心より感謝申し上げます。

また、筆者は、三菱マテリアル株式会社に在籍しながら、本論文をまとめることができました。これは、技術統括本部資源部長 大高信之氏、金属事業カンパニー資源事業部長 矢野和文氏のご理解とご鞭撻の賜です。さらに、宇根鉦山在籍中にご指導いただきました、当時資源部長 小澤教良氏（現、菱光石灰工業株式会社 社長）、宇根鉦山副鉦山長の青山秀夫氏（現、International Council on Mining and Metals出向）ならびに山田修一郎氏（現、宇根鉦山 鉦山長）に厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。

そして、最後に論文作成にあたり、陰ながら応援してくれた家族に感謝の意を表します。

2021年3月

近藤 めぐみ