

1. はじめに

2017年6月(58巻2号)から始まったIAEG Bulletin 紹介は、今回から第3シリーズに入る。第1シリーズは、各回、委員が紹介したいIAEG Bulletin の論文1編を掲載した。第2シリーズ(61巻2号~62巻3号)では、IAEG Bulletin に掲載された全論文の分野等の傾向と、委員が注目する内容を紹介している。これにより、海外の投稿事情や日本国内との決して薄くない関係性を感じていただけたと考えている。第3シリーズでは、さらに深い魅力を感じていただきたい。今回は、海外論文を紹介するだけでなく、日本の視点・海外の視点を意識しながら、執筆者独自の視点で紹介していきたいと考えている。国際委員のメンバーは、様々な分野の業務に携わり、かつ海外でも現役で活躍している人も多いことから、日本と海外というフレーバーを醸し出すシリーズになることを期待している。また、クロスオーバーな知識を持ちプロフェッショナルで国際的にも広く活躍するでもあり、研究者・技術者を目指す方の一助になれば幸いである。そんな国際的なプロフェッショナルとえば、最近映画が公開された「007」を思い出すのは筆者だけだろうか。いつの日か国際的な地質工学的課題をテキパキと解決し、各国の要人とも丁丁発止で渡り歩く主人公の地質屋が活躍する映画シリーズが出来ることを切望している。

2. “山体重力変形”におけるIAEG Bulletin の貢献

2.1 IAEG Bulletin と他誌との関係

さて、第3シリーズの初回となる今回を担当する筆者は、海外渡航歴の少ないメンバーである。そこで、一つのテーマ“山体重力変形 (gravitational slope deformation)”に対して、掘り下げを行ってみたい。山体重力変形は、応用地質学においては、なじみのある言葉であり、変動帯で多雨地域である日本の地質とは関係が深く、興味を持っていただけたと思う。山体重力変形自体の研究史については、小嶋¹⁾を、近年活発な議論のある高精度なDEMによる解釈については、高見²⁾に詳しく記載されているので、そちらを参照いただきたい。本稿では、IAEG Bulletin における研究史と役割に着目していきたい。

Bulletin の正式名称は、Bulletin of Engineering Geology and the Environment である。海外雑誌の引用されやすさを示すインパクトファクター(以下、IF)は、4.298である。歴史が古く、刊行開始は1970年である。山体重力変形と関係のある類似する学術雑誌を紹介すると、Landslides (IF:6.578)は、2004年刊行、Geomorphology (IF:4.139)は1987年刊行であるため、応用地質学系では古参と言ってよい。ただし、IAEG Bulletin と名称と内容が類似しているEngineering Geology (IF:6.755)は1965年発刊である。IAEG Bulletin とEngineering Geology は、Aims and scope を見ても重複するところが多いが、IAEG Bulletin の方が、より工学的色が強い感があり、それは本稿でもご紹介できると思う。

2.2. アルプスの氷河地形と山体重力変形

山体重力変形は、IAEG Bulletin 発刊前にすでに議論が進んでおり、Zischinsky^{3,4)}によるザギングから活発化したようである。この山体重力変形の議論は、1963年のヴァイオントダム貯水池の地すべり災害が関連していると千木良⁵⁾が述べている。ヨーロッパアルプスにおける氷河の後退による応力開放が与える地質構造に沿った直線的な地形が、特徴的であり巨大なブロックで崩壊が進行するため、斜面災害の要因とされていた。このZischinskyによる論文発表ののち、1970年代には多くの山体重力変形の報告が、認められる。主にヨーロッパアルプスの重力変形の報告は、Engineering Geology が先行して論文を掲載しており、Dramis et al.⁶⁾や Agliardi et al.⁷⁾によって地形発達に関する事例研究が進行した。

IAEG Bulletin では、Radbruch-Hall et al.⁸⁾が興味深い。ここでは豊富な空中写真（ただし、オンラインの画質は良いとは言い難い）が、掲載されている。また、急傾斜のモデルを利用した有限要素法による解析を行って、接合部や断層その他の不連続性によって破壊された岩石斜面の安定性を計算している。1977年には、興味深い2件の報告がある。第一はMalgot⁹⁾は、第三系の基盤岩上の新規火山堆積物がスプレッド型の地すべりを報告している。掲載される断面図は、2000年の荒砥沢地すべりを想起させる低角度のすべり面を有しているのが、印象的である。第二は、Mahr¹⁰⁾によるもので、スロヴァキアのタトラ山脈を例にした斜面の進行性変形メカニズムの記載が、紹介されている。ここで、変形の初期段階において斜面は局所的に破壊されているが全体の安定性は損なわれていないことから、進行性の斜面破壊であると述べている。Mahrは、破壊の進行に決定的な影響を与えるのは、岩塊の機械的挙動（劣化進行）であると述べている。すなわち斜面頭頂部の引張クラック発生と斜面末端部崩壊、あるいは同時に斜面の頂上付近で滑落面が発生し、破壊は斜面の中心に向かって広がることを説明している。文章に明記していないが、すべり面は、段階的に発達し表面の地形の形成とともに進行する解釈が見て取れる。豊富な図による説明も見ていて楽しい。このような議論は、日本応用地質学会の平成22年シンポジウム「地すべりの初生と初生地すべりについて」（地すべりの初生と評価に関する研究小委員会）が思い出される。

1999年のVengeon et al.¹¹⁾は、フランス語であるが興味深い。アルプスの年間2mmと緩慢な変位の斜面変動のメカニズム解析と数値解析を実施している。該地点は、片麻岩からなり氷河地形をなしている。数値解析の結果から、降伏が発生する高角度の開口亀裂は、非常に深く谷底まで伸びている事や、斜面の末端部分の応力の蓄積と屈曲ゾーンのブロック内部の重要な内部応力を明らかにした。さらに水理条件の変動と相まって、この初生すべり発生時の応力状態は、地質学的な時間スケールで二次的な亀裂の伝播を引き起こす非可逆的な損傷現象が、局所から徐々に拡大して新たな破断面が生じて斜面の全体的な破壊につながる可能性があることを説明している。

この時代の日本国内の事例紹介では、Chigira and Kiho¹²⁾がある（残念ながらEngineering Geology）。赤石山脈におけるRockslide-avalanchesを対象とし、急斜面がゆっくりであるが確実に変形することが、剪断によって集中的な変形と断片化を伴う事例を紹介している。岩層崩落すなわち岩盤の変形・破碎の原因が、匍行する岩盤が溪流の浸食によって斜面下部からの支持を失うことである、と報告している。

2.3. 国際的な事例の蓄積と数値計算による工学的評価の実施

ヨーロッパアルプスから研究が始まった山体重力変形は、2000年を中心に深層崩壊の前兆現象として着

目されることになる。ただし災害発生箇所の評価や地質・地形学的な検証は、Engineering Geology, Geomorphology, Natural Hazard によって最初に掲載されることが多い。例えば、Chigira et al.¹³⁾ Crosta et al.¹⁴⁾ などである。2006年のフィリピンレイテ沖での山体崩壊は、Evans et al.¹⁵⁾, Guthrie et al.¹⁶⁾によって報告された。さらに2009年の台湾小林村、2011年日本の紀伊半島豪雨と短期間に多くの深層崩壊が発生し、ほとんどすべての崩壊斜面には前兆現象としての山体重力変形が認められた(Chigira et al.¹⁷⁾。

一方、IAEG Bulletin では、2000年代にはいると、Massironi¹⁸⁾や Discenza¹⁹⁾に示すように Large mass movement の変動における山体重力変形の影響を数値解析によって解析することが流行となる。特に後者は、岩盤クリープの初期段階とそれに続くプロセスを特徴とする尾根の形態進化モデル(2次元)を作成し、現地調査で得られた主な知見と数値モデルの結果を結合した解釈を行った点で画期的と言える。

2010年代の後半からは、氷河地形以外の山体重力変形の事例研究が、ヒマラヤを含めたアジアでの災害多発とともに増えている。これには中国の台頭とも関係があると思われる。例えば、Zhang²⁰⁾では、中国黄河上流の砂岩と粘板岩互層で顕著なトップリングの事例を豊富な写真で紹介し、転倒のメカニズム解明のため数値シミュレーションを行った。彼らは、トップリング転倒の進行プロセスを4つの段階に分けており、将来的な崩壊の予測の一助となると考えられる。このような山体重力変形の挙動を数値解析で理解する流れは今後も続くと思われるが、一方で、コンピュータ技術の解析能力の進歩に伴い、新たな流れも認められた。例えば Zhao et al.²¹⁾は、三峡ダム地すべりにおいて、浸透-応力連成モデルによる有限要素法でクリープ変形を解析し、貯水池の水位低下の影響を受けていると報告しているように、重力変形した地形が滑動するにあたり、物性値の影響が説明できるようになった。

近年ではレーザ測量が一般的な手法になっているが、これを複数時期で実施した航空測量(ALS: Aerial laser scanning), 固定型(TLS: Terrestrial laser scanning)による斜面変動計測も行われている。Zangerl et al.²²⁾は、オーストリア、アルプスの活動的な深部岩盤すべりについて、10年以上の計測データを用いて岩石すべりの地質・幾何学的モデルを構築し、時系列変化と個々の岩石すべりのスラブの形成・発達を評価している。岩盤すべりは、破碎と緩みの影響を受け、その結果、斜面の下部に広範囲の質量損失が発生することを実測・理論的に明らかにした。

このように山体重力変形に関して事象の地形・地質的な解明は、Engineering Geology や Geomorphology などの雑誌の論文で進んでいる。その後、工学的な視点-特に構造物の建設や数値解析による崩壊の危険度評価、安全率の評価については、IAEG Bulletin や International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences の論文で検討されており社会的な貢献がなされている。

3. まとめ

本稿は、IAEG Bulletin 紹介の第3シリーズを開始にあたり、山体重力変形について着目し、IAEG Bulletin に掲載された論文を紹介した。山体重力変形は、地すべりや崩壊の直接的な原因となることも多く、1970年の発刊以降、長く検討され続けたテーマである。一方で、そのメカニズムや発達史における推定や仮説は、発刊段階から積極的に議論されて現在に至っており、先駆者の先見の明に驚くばかりである。IAEG Bulletin では、その時代の最新の手法と豊富なケーススタディを元に、社会基盤に貢献するスタンスで研究が進められていることが確認できた。

一方、山体重力変形の多くは緩慢な変動が多く、コストの問題も含めて計測方法が限られることからその変位メカニズムの解明は難しい。しかし、地形の詳細な解析と変形に関する数値解析、さらにLiDARやD-InSARのような広域で高精度な変位計測が発達することで、これまで仮説であったメカニズムの解明が進んできている。今後、新たな計測・解析手法の研究成果がIAEG Bulletinに投稿され汎用性が議論されることが社会基盤の安定につながることを期待したい。

引用文献

- 1) 小嶋智 (2018): 応用地質学的視点からみた山体重力変形地形研究の進展と展望. 地質学雑誌, Vol. 124, No11, pp. 889-897.
- 2) 高見智之 (2015): 細密 DEM を活用した地形解析に基づく重力変形斜面の類型化. 応用地質, Vol. 56, No. 5, pp. 210-218.
- 3) Zischinsky, U. (1966): On the deformation of high slopes, In 1st ISRM Congress. OnePetro.
- 4) Zischinsky U. (1969): Über sackungen. Rock Mech., Vol. 1, pp.30-52.
- 5) 千木良雅弘 (2013): 深層崩壊-どこが崩れるのか-, 近未来社, 232p.
- 6) Dramis, F., Sorriso-Valvo, M. (1994): Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. Engineering Geology, Vol. 38, No. 3-4, pp. 231-243.
- 7) Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A. (2001): Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. Engineering Geology, Vol. 59, No. 1-2, pp. 83-102.
- 8) Radbruch-Hall, D. H., Varnes, D. J., and Savage, W. Z. (1976): Gravitational spreading of steep-sided ridges (“sackung”) in Western United States. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol. 13, No. 1, pp. 23-35.
- 9) Malgot, J. (1977): Deep-seated gravitational slope deformations in neovolcanic mountain ranges of Slovakia. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol. 16, No. 1, pp. 106-109.
- 10) Mahr, T. (1977): Deep—Reaching gravitational deformations of high mountain slopes. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol. 16, No. 1, pp. 121-127.
- 11) Vengeon, J. M., Couturier, B. and Antoine, P. (1999): Post-glacial gravitational deformations in metamorphic slopes. Comparison of the movement signs in the south slope of la Toura (Saint-Christophe-en-Oisans, France) with the internal rupture phenomenon observed in the south slope of Mont Sec (Sechilienne, France), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 57, pp. 387-395.
- 12) Chigira, M. and Kiho, K. (1994): Deep-seated rockslide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaishi Mountains, central Japan, Engineering Geology, Vol. 38, No. 3-4, pp. 221-230.
- 13) Chigira, M., Wang, W.N., Furuya, T. and Kamai, T. (2003): Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoiling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan, Engineering Geology, Vol.68, pp.259-273.
- 14) Crosta, G.B., Chen, H. and Frattini, P. (2006): Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of

- countermeasure efficiency for large debris avalanches, *Engineering Geology*, Vol.83, pp.236-253.
- 15) Evans, S.G., Guthrie, R.H., Roberts, N.J. and Bishop, N.F. (2007): The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte island, Philippines: a catastrophic landslide in tropical mountain terrain, *Nat Hazards Earth Syst Sci*, Vol. 7, pp.89–101.
- 16) Guthrie, R.H., Evans, S.G., Catane, S.G., Zarco, M. A. and Saturay, R. M. (2009): The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaugon Philippines: a synthesis, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 68, pp. 201–213 <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0205-2>.
- 17) Chigira, M., Tsou, C.-Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N. and Matsuzawa, M. (2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology* Vol.201, No. 1, pp.479-493.
- 18) Massironi, M., Genevois, R., Floris, M. and Stefani, M. (2011): Influence of the antiformal setting on the kinematics of a large mass movement: the Passo Vallaccia, eastern Italian Alps. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 70, No. 3, pp. 497-506.
- 19) Discenza, M. E., Esposito, C., Martino, S., Petitta, M., Prestininzi, A. and Mugnozza, G. S. (2011): The gravitational slope deformation of Mt. Rocchetta ridge (central Apennines, Italy): geological-evolutionary model and numerical analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 70, No. 4, pp. 559-575.
- 20) Zhang, Z., Liu, G., Wu, S., Tang, H., Wang, T., Li, G. and Liang, C. (2015): Rock slope deformation mechanism in the Cihaxia hydropower station, Northwest China, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 74 No. 3, pp. 943-958.
- 21) Zhao, N., Hu, B., Yan, E., Xu, X. and Yi, Q. (2019): Research on the creep mechanism of Huangniba landslide in the Three Gorges Reservoir Area of China considering the seepage–stress coupling effect, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 6, pp. 4107-4121.
- 22) Zangerl, C., Fey, C. and Prager, C. (2019): Deformation characteristics and multi-slab formation of a deep-seated rock slide in a high alpine environment (Bliggspitze, Austria), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 8, pp. 6111-6130.

国際委員会からのお知らせ

IAEG Bulletin は、国際会員になれば購読することができます
(年会費 : 4,500 円).

国際会員の入会案内

<https://jseg.or.jp/02-committee/international.html>

なお、IAEG Bulletin の Abstract は、下記 URL よりどなたでも閲覧できます。

IAEG Bulletin Abstract 閲覧

<https://www.springer.com/journal/10064>