

”地すべりのモデル化”について考える

Thinking on Modeling of Landslides

濱崎英作* (株式会社アドバンテクノロジー・株式会社 三協技術)

Eiasaku HAMASAKI (Advantech Technology, Co.LTD & Sankyo Technology, Co.LTD)

キーワード: CIM, 質点系ダンパーモデル, 剛体バネモデル, タンクモデル

Keywords: CIM, LMDM, RBSM, Tank Model

1 はじめに

昨年、本学会から論文賞をいただきました。関係者の皆様には厚く御礼申し上げます。ただ、弊社の宮城豊彦先生（東北学院大学名誉教授）からは、本賞をもらおうと特別講演をすることになるよ、と言われました。私は宮城先生との雑談なら調子良いのですが、改まった話は苦手で、ましてや講演は嫌だな・・・と思いました。今は、講演の日が近づくとつれて”嫌だな^{3乗}”くらいになっています。とは言え、アトノマツリなので、表題の「地すべりのモデル化について考える」について、この賞をもらうに至った研究課題との出会いやヒント、挫折、はたまた幾つかの研究過程で妄想した話を絡めつつ忘れぬように書きとめておこうと思います。

2 モデル化について考える

2.1 真鍋淑郎博士のモデル式

さて最新の話題のなかで”モデル化”として思い浮かぶのは、真鍋淑郎博士が作った気候変動モデルがあります。2021年、米国プリンストン大学の同博士は、この気候変動モデル「一次元放射対流平衡モデルー大気海洋結合モデルー」でノーベル物理学賞を受賞しました。これまでの天体物理学、原子物理学、素粒子物理学などは異なり、我々に比較的身近な”地球物理学”という世界での受賞にびっくりした人も多いのではないのでしょうか？このモデルは50年以上も前に作られたモデルで、真鍋博士は、二酸化炭素の増加が温室効果をもたらした地球が温暖化に進む、という今は当たり前になった話を数式で定量化しました。今の気象庁の「3か月予報」や「寒候期予報」などの長期予報には、この「大気海洋結合モデル」を用いていると言われています。また、このモデルは国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）でも重要なモデル式となっています。かくして、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。大気、海洋、雪氷圏及び生物圏において、

広範囲かつ急速な変化が現れている。」としSDGsの目標の一つであるカーボンニュートラルの提言に大きな影響を与えました。このように、モデル式は、自然現象を数式や形で表すだけでなく、現象の未来を予測するのにも役立つ大事な物理式とすることが出来るでしょう。ちょっとそんな意識で妄想しながら地すべりのモデル化について考えてみたいと思います。

2.2 地すべりのモデル化

地すべりをモデル化するとは、対象の地すべりがどのような誘因の何と何に反応し、どのような範囲で、どのように動いていて、それがどのような仕組みで将来的に進化するかという一連の現象を計算式（数式、統計式、数値解析 etc）を使って再現～定量化することかと思っています。たぶん地すべり全般に共通するモデル化部分もあるのですが、対象地すべり固有のモデル式が考案されてもかまわないのです。おそらく、このような手法を用いて地すべりを考察することこそが「地すべり機構解析」の神髄なのだろうと思っています。

地すべりに関して、私自身が関心のある今後も探求されるべきと思う4つのモデル化について妄想してみたいと思います。

つまり、① 地すべり形状（すべり面）の3Dモデル化、② 地すべり移動速度・移動量のモデル化、③ 地すべり移動方向のモデル化、④ 地すべり発生確率のモデル化、の4つです。

①は言わずと知れたCIM（Construction Information Modeling）です。国土交通省では2019年5月にCIM導入ガイドライン（案）に第9編地すべり編として加えました。他編が概ね構造物とその設計に深く関わるCIMである中で、地すべりのすべり面構造そのものに焦点を当てた本編はその意味で特異ですが、地すべり学の進歩に大きな貢献が期待されています。つまり、地すべりCIMは地すべり地形やすべり面を3次元で見て考えることが重要なことを教えてくれています。CIMで

地すべりを初めて眺めた人の多くが、平面や断面のみで考えた地すべりイメージと大きく異なると思われたのではないのでしょうか？自分の頭で考えたイメージが CIM のそれと普通に同じになれば、技術者の地すべり構造の理解が急速に進むでしょう。結果、対策工事の失敗も少なくなると思いますので、今後もこの仕組みが一層一般化することが望まれます。

③は地すべりの移動方向を再現することが、その機構解析に大事なのでは？という話です。①との組み合わせになるかもしれませんが、地すべりの移動方向がすべり面形状だけに依存するとは限らない場合があります。とすれば、その他の何が移動方向に寄与しているのか？と考えます。今、そのような観点で剛体バネモデル (RBSM) の 3 次元モデル式¹²⁾を使って、すべり方向再現解析の研究が開始されています。今後に乞うご期待です。

④の話は 2021 年 6 月に発刊された「斜面防災危険度評価ガイドブック：斜面と地すべりの読み解き方」³⁾にまとまっています。ある意味、2001 年から始まった AHP 研究の集大成の一部で、今回の論文賞を頂くことに起因した一つである「バッファ移動解析と過誤確率分析法」⁴⁾もこれに掲載されています。興味をお持ちの方は読んで頂ければと思います。

さて、スキップした②のことです。これには苦い思い出があって、その悔しい思いの中で成し遂げたいと強く思い考案した質点系ダンパーモデル (LMDM) の開発話です。ということで、これは特別に細かく話してみようと思います。

3 地すべり移動のモデル化

3.1 悔しい思い出-コスタニェック地すべり-

2009 年から 2013 年、私は日本-クロアチアでの 5 年共同研究プロジェクト「クロアチア土砂・洪水災害軽減基本計画構築」(SATREPS)⁵⁾に参加していました。その最終年度の 3 月のことです。現富山県立大学の古谷元先生からクロアチア首都のザグレブ市郊外にあるコスタニェック地すべり内に設置した伸縮計変動グラフ(図-1)が送られてきました。これは地すべり学会の元事務局長である永井修さんが作られたもので、福囿式の逆数式⁶⁾に当てはめてありました。このデータからは早ければ 4 月下旬ころに大変動するのではとの懸念が生じ、正直ゾッとしました。といいますのも、地

すべり周辺には住宅地が密集しており、末端にはいくつかの工場や主要幹線道路があったからです。

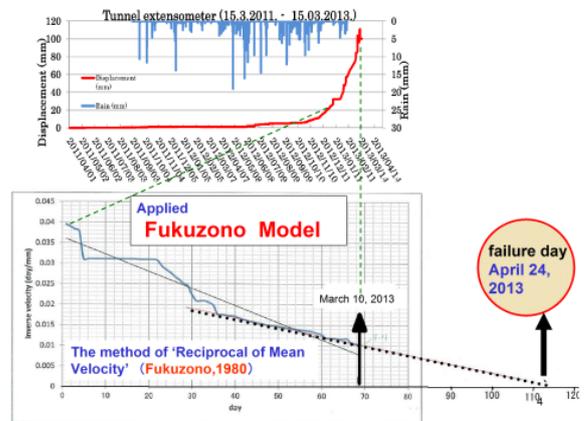


図-1 コスタニェック地すべりの伸縮計変動図と福囿モデル (永井図を一部修正)

すぐさま故吉松弘行先生(当時(株)川崎地質)と丸井英明先生(当 SATREPS の研究代表者)に相談し、同じく川崎地質の加藤猛士さんにもご同行願って急ぎザグレブへ向いました。着いてすぐにザグレブ市危機管理課とザグレブ大学の面々を伴い現場踏査を行い、さらに移動量について日本の事例を参考に当該地すべりの緊急性を説明するとともに対応協議を持ちました。しかしながら、実は 4 月はじめに我々が現地へ着いた頃には、地すべり変動はほぼ収束していたのです。残念なことにその収束データは我々がクロアチアにいる間は示されず、我々が日本に帰った後に(思いやりなのか・・・)わかったことでした。結果として事なきを得たものの、結局は対策らしい対策がないままで、モヤモヤした気分のまま帰国の途につきました。その後、両先生とはコスタニェックでの地すべり変動の原因究明を含め「地すべり移動速度を予測する物理モデル」の開発について話を続けていましたが、残念ながら吉松先生は 2015 年 2 月に癌のため逝去されました。それからは、丸井先生と何とかこの現象をモデル化したいものだと言りました。

3.2 蟻のトリビア-終端速度-

質点系ダンパーモデル (LMDM) へのヒントは幾つかあるのですが、その一つに昔フジテレビで放映されたトリビアの泉があります。2004 年のころの話です。その一話に「アリはどんな高さから落ちてでも死なない」というものがありました。つ

まり蟻ほどの高さから落下しても 10~50cm 以上落下するうちに、空気抵抗と重力による加速とが釣り合って終端速度（時速 20 km~30 km 程度）に達し、どんな高さから落としてもそれ以上のスピードでは落下しないので、外骨格と呼ばれる硬い皮膚で覆われている蟻は死なない、というのです（図-2）。ちなみに、“へえー”（“へえー”が多いほどトリビアな話）でした。ちなみに、人間が落下する際の終端速度は、体重 70 kg の人間が約 460m 落ちたときで、およそ時速 193 km に達するそうです。流石に人間は生きていられないのが分かります。

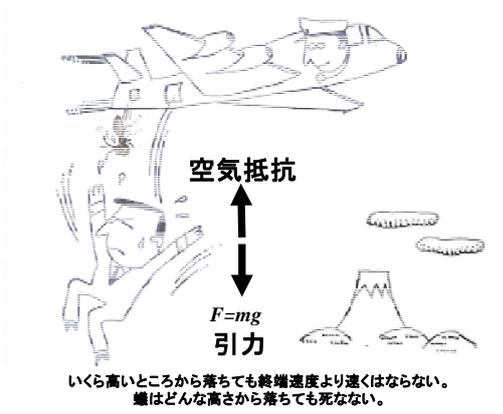


図-2 終端速度概念図(積分の話下巻に加筆修正)⁷⁾

この運動方程式は空気抵抗を k とすると $ma=mg-k \cdot dx/dt$ で表せます。このとき m は質量、 g は重力加速度、 a は加速度、 dx/dt は速度です。この速度と時間の関係は図-3 のグラフのようになります。なんだか地すべりの 2 次クリープモデルに似てきましたね。ちなみに、図にある終端速度 (v) は mg の大きさに比例して増加することを表しています。

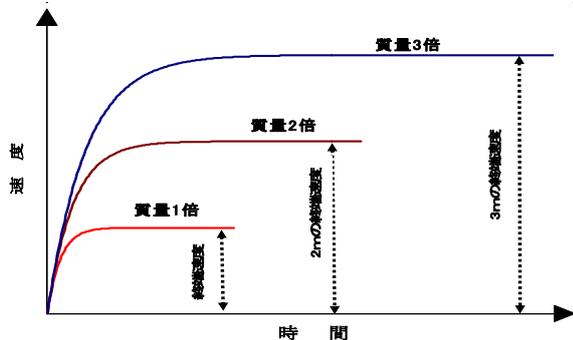


図-3 時間と落下速度の関係

3.3 ニューマーク法が面白い

ニューマーク法⁸⁾ってご存じでしょうか？地震時の盛土の計算では円弧すべりを用いて変位量を求めるのに使われています。最近では楠本岳志さん

が最新の学会投稿論文⁹⁾のなかで非円弧にも拡張された式を提案されています。名前が付いていないので、一応ここでは楠本式とさせていただきます。楠本式であれニューマークの円弧法であれ、面白いのは、フェレニウスに地震力を加味した計算式を使っていて、安全率の分母 (D : 滑動力もしくは M_D : 滑動モーメント) と分子 (R : 抵抗力もしくは M_R : 抵抗モーメント) の差分を下方力 (F) もしくは下方モーメント (M_o) として計算していることです。—ここから楠本式一本で説明— そうなんです。確かに静的な釣り合いを計算しているわけではないので、下方力 F は $D-R$ で良いのです。もちろん、 F がマイナスの間は地すべりは動きません。地すべりはズレ上がれないのですから。確かに R の考えは“強さ: S ”とも言えるでしょうが、これは極限抵抗力と言い換えても良いのかなと思っています。つまり、 R は反力なので $D < R$ 間は $D=R$ という D に拮抗する力しか発揮し得ないのです。ニューマーク法を考えることで、これまで釣り合い条件のなかでがんじがらめになり窮屈になっていた思考を一気に運動方程式へと導いていきました。

3.4 質点系ダンパーモデル (LMDM) へ

カスタニェック地すべりの解析時に思ったのですが、福囿輝旗さんの逆数式⁶⁾も斎藤迫孝さんのクリープによる斜面崩壊時刻予測式¹⁰⁾も、地すべりを動かす駆動機関とは無縁です。これらの式は時間ごとの速度をサンプリングして数式に当てはめ滑落を予想するものなので、大雨が降ると加速したり、止んで停止したり、というのが式に反映されていません。おそらくこれらの式は「そろそろこの斜面はお陀仏かも・・・」という地すべりの 3 次クリープ段階が明瞭なときに一考の余地として使用されるのはありでしょうが・・・。

実は、日本工営勤務時代の大先輩である小俣新重郎さんは、私が新入社員のころ降雨を前期降雨指数 (API=実効雨量) で表すと地下水の変動に似てることも教えてくれるなど、いつも後輩をインスパイアしてくれました。あるとき、地すべり観測データを手書きで丁寧に図化されたものを作られました¹¹⁾。それは、何が地すべりの変動の原因になったかが一目で分かる図で、よく見ると、地すべりの変位速度が地下水変動や実効雨量に似た形状をしています。後々似たような図はあちこち

の論文や報告書で散見していたのですが、あるとき、はっと思いました。地下水変動は間隙水圧 U にもつばら一次式で比例します。また抵抗成分 R は一次式的に U に比例して低下します。つまり先ほどの F は間隙水圧 U が増加すれば一次式的に増加するわけです。ところでトリビアの蟻の終端速度 (v) は mg の大きさに比例して増加することは前にも述べました。そこで、もし速度 (v) が F に比例するのであればトリビアの蟻の式を応用し mg を F に置き換えると、 $ma = F - k \cdot v$ の運動方程式が導かれます。イメージは図-4 のようになります。

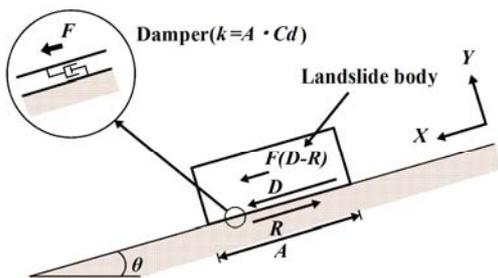


図-4 質点系ダンパーモデルの概念¹²⁾

なお運動方程式に2つ以上の未知数があると一般解は得られませんが、一個だと積分すれば一般解が得られます。そして作った式が1)式です。面積 (A) と Cd は定数ですので、地すべり速度 (v) は下方力 (F) に比例して運動することになります。

$$v \approx \frac{F}{A \cdot Cd} \quad \text{-----1)式}$$

このモデル式を用いて解析したコスタニェック地すべりの移動再現が図-5 です。これでやっと地すべり内の地下水位が減少して、それと共に移動速度が沈静化していった理由が理解できました。

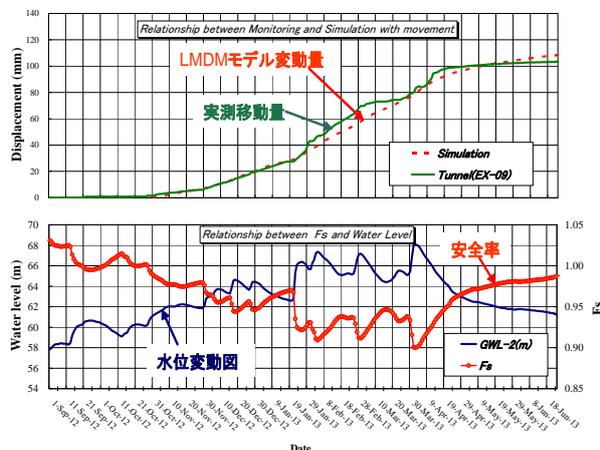


図-5 コスタニェックのLMDMによる移動再現

その後、この式は地下水応答だけでなく盛土や切土¹³⁾などでの地すべりの移動速度問題でも使え、また3次元安定解析の中でも有効に機能することが分かってきました¹⁴⁾。今年度の幾つかの発表にも関連する話がありますので是非とも聞いて頂ければと思います。

4 おわりに

冒頭「妄想話」をしました。私はしばしば、脳内引き出しにしまってあったネタを繋げながら妄想します。蟻のトリビアもその一つです。実は、独り妄想より仲間と話しながらだと、その妄想はどんどん膨らみ、その幾つかはありそうな話に繋がります。ホーバークラフトから思いを馳せた「Vapor Lock Generation：地震時には擦れたすべり面の地下水が沸騰して地すべりが浮き上がる」¹⁵⁾ のようになかなか証明に行き着かない宙ぶらりんなものもありますが……。

私の良き妄想相手は冒頭の宮城先生です。他に国土防災技術の山科真一さん、水文企画の渡邊修さん達もいます。いずれもその道では経験豊かな人達で、ついつい妄想話が広がります。また、京都大学を退官された松浦純生先生とは、つい数ヶ月前に山形のキャンプ場でビールを飲みながら色々話をさせて頂きました。前にシンポジウムで「因果関係が判然としない地すべりから考える今後の研究課題」のご発表で”地すべり発生が必ずしも同じ条件だからと言って同じにならない”の話は、私も思い当たることがありました。そして同じ条件が異なる運動をもたらすのは「応力履歴」のせいで、それが地すべり運動が繰り返されながら様々に変化する”何か”の原因ではないかと。実際、LMDMでの解析の大半は単純で大筋合っているのですが、細かく見ると立ち上がり時や終息時の移動速度には若干の乖離があるものがあります。ここは今後の重要課題です。その辺のことは新潟大学の紀要¹⁶⁾に書かせていただきましたので興味のある方は是非お読みになって頂ければと思います。

実は、LMDMを本会に投稿するにあたって、地すべり学会副会長の榎田充哉さんの論文¹⁷⁾を拝見しました。水位応答に関しては、ほぼ同じ仕組みのモデルを発表されているのです。もちろん計算

式へのアプローチが少し違いましたので私の論文もリサーチノートとして通して頂きましたが、自分で考えたつものものでも時として先行する近似理論があるのですね。よくよく肝に銘じておきたいものです。その後、榎田さんには新潟大でまとめた紀要論文¹⁰⁾を持って行きまして、代わりに榎田さんの学位論文の原著を頂きました。

日本工営の小俣さんから教わった「前期降雨指数 API (=実効雨量) が地下水水位と似た変動をする」の話を参考に、1987 年、当会の研究発表会で実効雨量を使った地下水応答モデル式¹⁸⁾を発表しました。これが私の初モデル式でした。そのときは地下水応答の再現方法として 1 次回帰モデル式 (被圧水型) と指数回帰モデル式 (自由水型) の二つでモデル式を提案しました (図-6)。

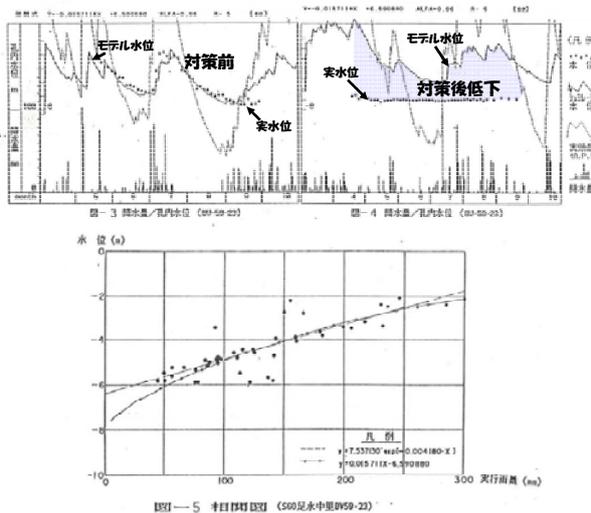


図-6 実効雨量を用いた地下水水位の再現と効果評価

1980 年代以前は、観測データは手ばかりで観測員が週に 3 回くらい収集したものを使って報告書をまとめていた時代です。対策工の評価は観測期間の最高水位と最低水位を表にまとめ毎年と比較で対策工が効いた効かないを一喜一憂? していたのが普通でした。しかし、この式をある地すべりに適用して、地下水対策工後のモデル水位と実水位の比較から対策工効果を示すという方法で報告書をまとめた結果、その当時ムズカシ屋の係長があまりヤカマシくお叱りにならなくなってきました。このことを思い出すと地下水水位のモデル化が良かったのかなと思います。ところで、近年は地下水水位再現にはタンクモデル¹⁹⁾がよく用いられて

います。東北地方は融雪もありますので、多くは融雪タンクモデルも連動させています。実は、実効雨量法の仕組みは一段タンクモデルで再現できるので、水収支 (質量保存則) を考える半物理モデルとしてのタンクモデルの方がより高度です。

とは言え、今に至ってもよく目にする報告書は「最高水位と最低水位」をまとめた年表と同時水位でない最高水位線を基にした安定計算だけでの評価が主流のようです。「自動観測」が当たり前となって地すべり観測データは日単位はおろか時間単位にさえ容易に取得することが可能で当たり前となってきた今であるにもかかわらず……。孔毎にずいぶん時期の違う最高水位を入れて計算することに疑問がないとしたら計測の進歩に思考や解析が全く追いついていないとしか言えないように思います。

まだまだ言いたいことは沢山ありますが、是非ともこれからの技術者の皆様には「マニュアル」を駆使するだけで満足しないで様々なモデルにトライしたり編み出したりして「機構解析の向上」にチャレンジして頂きたいと切に思う次第です。

最後に、冒頭のノーベル賞受賞者 真鍋博士の素晴らしさを語る言葉に「エッセンスを見極めて単純化するのが凄い」とあるそうです。なるほど単純化がモデル化の極意かなと思いました。地すべりはある種の複雑系かもしれませんが、そのなかでも極めつけの何かを捜し出し、それを単純化して「モデル化する」ことができれば、より有効な対策の策定と将来予測が可能になるのかな……。と。

そのことを肝に銘じて、これからも地すべりをよく観察し、観測データをじっくり見てさらなるモデル化にチャレンジしていきたいと思います。

以上

【参考文献】

- 1) 濱崎英作・竹内則雄・大西有三 (2006) : 三次元斜面安定問題に対する簡易離散化極限解析法の開発, 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.5, pp.389-397.
- 2) 高橋康平・濱崎英作・渡邊修・山科真一・西尾克人: New-SlopeRBSM3D による銅山川地すべりの移動方向解析, 第 59 回地すべり学会研究発表会講演予稿集

- 3) 地すべり学会斜面防災危険度評価編集委員会 (2021) : 斜面防災危険度評価ガイドブック-斜面と地すべりの読み解き方-, 朝倉書店 122p.
- 4) 濱崎英作・檜垣大助・林一成 (2015) : GIS に基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法-2008 年岩手・宮城内陸地震での事例研究-, 日本地すべり学会誌, Vol.52, No.2, pp.51-59.
- 5) 丸井英明・吉松弘行・濱崎英作・加藤猛士・王純祥 (2013) : クロアチアの土砂・洪水災害軽減のための共同研究 (Ⅱ) -活性化した地すべりに対する緊急対応事例-, 水利科学, No.332, pp.146-167.
- 6) 福囿輝旗 (1990) : 平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測, 防災科学研究所研究報告, 46, pp.45-81.
- 7) 大村平 (1991) : 微積分のはなし (下), 日科技連 249p.
- 8) 安田進, 安達健司 (2010) : ニューマーク法を用いた地震時盛土すべり変位量の推定, 技術手帳, 地盤工学会誌. Vol.58, No.12, pp52-53.
- 9) 楠本岳志・酒井俊典・中里裕臣・吉迫宏・井上敬資・正田大輔 (2021) : 地すべり土塊の簡便な耐震性能照査手法について, 日本地すべり学会誌, Vol.58, No.1, pp.16-27.
- 10) 斎藤迪孝 (1987) : 斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について, 地すべり, vol.24, No.1, pp.30-38.
- 11) 小俣新重郎 (2009) : 岩盤斜面の地すべりの発生と減災に関する実証的研究, 博士論文, 京都大学, 178p.
- 12) 濱崎英作・丸井英明・吉松弘行・加藤猛士・古谷元・王純祥 (2016) : 地すべり移動速度を予測するためのダンパー質点系モデル, 日本地すべり学会誌, Vol.53, No.4, pp.128-133.
- 13) Hamasaki E, Marui H, Furuya G (2017) : Simulation Model to Predict Landslide Speed Using Velocity-Dependent Viscous Damping, 4th World Landslide Forum, pp.579-586.
- 14) 江藤大・上妻良昌・大鶴泰史・濱崎英作 (2019) : 日連続安定計算に基づく集水井対策の効果評価その 2 -実効雨量法と質点ダンパーモデル (LMDM) を使って-, 第 58 回日本地すべり学会研究発表会 講演集 2-21, pp.85-86.
- 15) 濱崎英作・渡辺修・橋本修一・山科真一 (2010) : 巨大地震時の地すべり運動メカニズムに関わるすべり面地下水沸騰の可能性, 日本応用地質学会東北支部 第 18 回研究発表会予稿集
- 16) 濱崎英作・丸井英明・古谷元 (2016) : 質点系ダンパーモデル(LMDM)による地すべり変位量予測法-解析手法と事例-, 平成 28 年新潟大学災害・復興科学研究所流域保全学研究部門年報, No.3, pp.213-313.
- 17) 榎田充哉・市川仁士・大宅康平 (1994) : 地下水位と移動量の関係に基づく地すべりの移動特性とモデル解析, 地すべり, vol.31, No.2, pp.1-8.
- 18) 吉田郁夫・小林佳嗣・濱崎英作・国分新市 (1987) : 孔内水位と降雨の相関性について, 第 27 回地すべり学会研究発表会講演予稿集
- 19) 菅原正巳 (1972) : 水文学講座 7 流出解析法, 共立出版, 257p.