

巻頭言

防災努力における科学的方法と経験則の棲み分け

関東学院大学客員教授

東 畑 郁 生

1. はじめに

科学はこの200年、世界人類の文明発展と幸福増進に多大な貢献をしてきた。確たる根拠に基づく論理と演繹思考を本貫とする科学には18世紀以前の文明を形づくっていた経験的方法とは段違いの確実性と普遍性があり、その価値は万人の認めるところである。同じような価値は自然災害科学にも期待されており、多くの成果が公開され続けている。しかし筆者は最近、ちょっと違う見方も必要かと感じる機会があり、それについて本稿で述べてみたい。

2. 理学と工学の違い

理学（純粋な科学の意）と工学（科学の応用）はひとまとめに理工学と呼ばれることも多いが、両者の間には大きな違いがある。理学においては真理の探究が唯一無二の目的であり、成果達成には締め切りが無い。「百年くらいしたらわかるでしょう」で問題が無い。しかし工学には締め切りがある。筆者の関わってきた地盤の液状化や斜面崩壊問題の解決においても、「百年待ってくれ」は通用しない。「今、何とかしろ」が社会の要求である。現象が完全に解明されていなくても経験的知識を動員し、今の時点で最善を尽くさなければならない。それは拙速かもしれないが、成果が完璧な解決でなかったと判明した時は、補強工事などの対応が許される。

読者が風邪に罹患して医師の診察を仰ぐとき、どんな治療が行われるだろうか？ 風邪の原因となるウイルスには200以上の種類があり、それを同定するには複雑で高度な「科学的」検査が必要らしい。それは当然、高価な作業でもある。医師はそれを弁えているので、体温測定や聴診器の作業、舌や扁桃腺の観察くらいで、あとは「暖かくして寝ていなさい、セキ止めを処方しましょうか」くらいの対応にとどめている。実際それで十分な場合が大半であろう。風邪の原因の科学的な同定を省略しているため、このような治療過程

は厳密には科学的な作業とは言えない。しかし医師は現実的な問題解決すなわち経験の教える治療法を良しとして、多額の金銭負担を患者と健保に強いることを回避するのである。社会もこれを是としている。つまり、現実社会においては科学的な手法が最善とは限らない。

3. Vajont Dam (ヴァイオントダム)

次は、科学的手法が利用できなかった事例に触れてみたい。北イタリアのドロミテ山群の峡谷に計画されたヴァイオントダムは戦後イタリアの産業復興を支えるために電力供給を担う国家プロジェクトであり、国民の期待を集めていた。高さ260 mのダム(図1)は竣工したが、初回の湛水のさ中、貯水池に隣接する斜面が体積2億 m³の大崩壊を起こして貯水池に飛び込んだ(図2)。池から溢れた水はダムを越して山麓の村に襲いかかり、犠牲者の数は2,000人を超えた。斜面崩壊の原因としては、深さ200 m以上のところに地質の弱層があり、ここに貯水池の水圧が浸透して有効応力(そしてせん断強度)の低下を招いたことと考えられている¹⁻²⁾。



図1 Longarone 村から見上げた峡谷に築造されたヴァイオントダム(矢印)



図2 ヴァイオントダムに落下した土塊(前景)と斜面崩壊のすべり面(背景上部)

このダムプロジェクトの責任者であった C. Semenza はダム建設に長年の経験を持つ世界レベルのエンジニアであった。たしか子息の E. Semenza が21世紀になってから出版した書籍で読んだことだが、今その本が手元に見つからないので記憶に基づいて書くと、父の Semenza は長年の経験から、この斜面はどうも危ないと感じていたらしい。実際1960年から始まった湛水作業では、斜面に亀裂が生じたり小さな(と言っても1000万 m³クラス)斜面崩壊が起きたりし、彼の心労は増すばかりであった。しかし当時の技術では厚さ200mの岩盤を貫いて下部から良質の土質サンプルを採取することは不可能であり、その

力学試験に基づいて「科学的に」斜面の不安定を立証することはできなかった。不確実なカン^①を理由として（非科学的に）社会の期待の集まるプロジェクトを中止することなど、できるわけがない。結局、ずるずるとプロジェクトは進行し、ディレンマに苦しんだ父 Semenza は1961年10月に突然脳内出血を起こして逝去した。その死後2年が経過して、彼の心配は現実となった。

Semenza は心配事にどう対応すればよかったのか？ 守秘義務があるので世間に問題をリークすることは絶対にできない。そうは申しても大災害の勃発^{こまね}に手を拱^{こまね}いていて良いわけもない。ただし単なるカンでプロジェクトの中止を主張するのは、顧客から見ればプロの所業ではない。この複雑なディレンマは技術者倫理の研究課題として好適であるが、そっちの議論はさておき、読者におかれては、科学的・論理的方法では扱いきれない現実問題が存在することをご理解いただきたい。

4. 斜面災害について

崖崩れ、土石流などの災害対策では、確実なデータに基づく論理と演繹の思考が使いつらい。もちろんこの方面でも自然災害科学の成果発表は数多いが、経験知も利用して解決に至っていることが共通項である。

筆者は斜面に廉価なセンサーを設置して斜面の挙動を観測し、豪雨のさ中に崩壊の予兆を見出したら避難警報を発令する、そのような技術を開発して普及に努めてきた³⁾。図3がその概念図である。地中に埋設したロッド（棒）の傾斜速度を連続して測定し、それが毎時0.1度を超えたら警報発令、というロジックである。この方法は、居住地の背後の斜面が崩れることを心配する人々やインフラ管理者を、顧客として想定している。豪雨時の防災技術としては他に、気象庁や自治体が推進している降雨データに基づく警報発令技術があるが、筆者らの方法は特定の斜面向き、後者は県単位のような広域を危険度判定の対象としている点が差異である。そして両者の並立することが、社会全体の防災に貢献するものと考えている。

これらの他に、より「科学的」と思われる人工衛星写真、SAR 画像による斜面の動きの検出にも警報発令能力があるのではないかと考える人々がずいぶんおられる。しかし斜

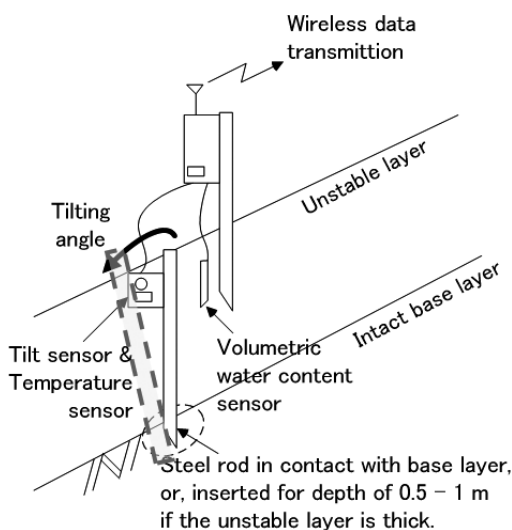


図3 傾斜センサー型斜面観測装置の概念



図4 チベットの危険地域に設置された傾斜センサー型斜面観測装置

面崩壊の前兆となる動きはたかだか1 mm 程度であり、人工衛星写真では検出できない小ささである。また近年の豪雨災害では、夕刻から降り始めた雨が、成層圏の温度の下がる夜半過ぎに激しさを増し、午前2時ころに斜面崩壊に至る、そういう時刻歴をたどることが珍しくない。降り始めから災害発生までの時間が10時間を下回っており、この短時間に人工衛星画像の撮影から分析までの予算を準備して発注している余裕は無い。何よりも、

その日その時間帯に人工衛星が上空に来てくれる保証の無いことが、注意点である。

この技術は既に内外千箇所以上に適用されている(図4)。英国の鉄道でも同様の発想で、一万箇所以上に計器を設置したと聞いている。筆者らの技術では、千のうち十数例で崩壊を事前検知した一方で、見逃しは皆無である。残りの九百数十箇所では、さいわい斜面が崩壊していない。この成果を「厳密な科学的査読」を売り物にする学術雑誌などに投稿すると、科学者を自任しているらしき査読者から決まって、0.1度毎時の科学的根拠を示せという要求がやってくる。科学は大事だが、そんな根拠は存在しない。実際の斜面でおこなった降雨実験や現実の斜面崩壊事例を観測したデータに基づいて、私がそう決断したのである(図5)。現場の地形と土質や地層構造、降雨の記録や地下水流れを精確に観測し、数値解析も行いつつ論理的に演繹したものでは決してない。そんな精確な観測と解析を個別斜面ごとに実施する予算は、地域の社会には存在しない。金がなくて「科学」を実践できない地域社会に“God help only those who have money”と宣告してよいのか？ 科学が助けきれない者でも何とか助けるのは、工学の役目であろう。

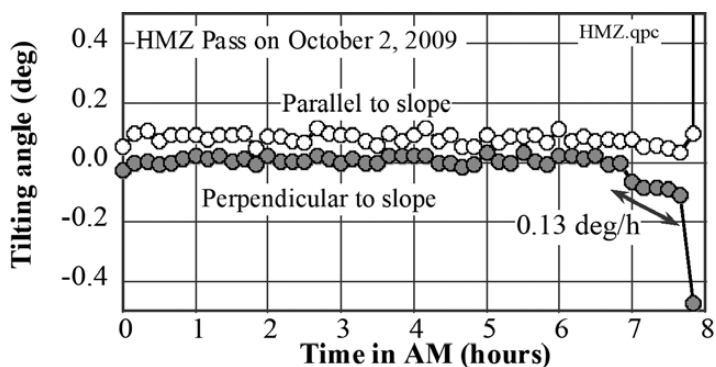


図5 ある斜面崩壊事例における、計器の傾斜角度の時刻変化観測結果

5. 斜面防災の現実から

崩壊の恐れのある斜面は、全国に数限りなく存在する。そしてそれらを今、ただちに安定化する（補強工事をする）ことは予算的に不可能であるし、自然景観の保全のためにも問題が多い。そこでハザードマップを作成して、居住者に自助の努力を期待することになっている。本来ならば、一つ一つの斜面で地層、土質、地下水の条件を調査して、その危険度を判定するのが科学的である。しかし目には直接見えない地下の状況、しかも不均質で確率モデルすら作れない地質、土質、地下水の状況を厳密に把握することは、不可能と言ってよい。危なく見えた斜面が予想外に安定している一方で、想定外の斜面が崩れることもある。それでもある程度の地中調査（ボーリング調査）をして危険度を判定した斜面（土砂災害特別警戒区域、通称レッドゾーン）には、それなりの論理的根拠がある。そうではないのが通称イエローゾーンであり、予算の不足のため地中の科学的調査ができていない。そこで高さ5m以上で勾配30度以上の自然斜面がほぼ一律にイエローゾーンに指定されている。谷間の地域では、集落中すべてがイエローゾーンに指定されてしまい、どこに住むのが安全なのか、見当もつかないケースもある。豪雨時には自宅の安全はあきらめて、避難で命だけは助かる、それしか選択肢がない。

ではどこに住めばよいのか？ 斜面の高さ H の二倍以上、水平離隔距離 L を確保してください、という目安がある。 H/L を0.5以下にしてくださいという意味である。その根拠は経験知であって、科学的に証明されたわけではない。経験知の例として図6がある。この図によると、土塊の体積が大きいほど H/L が小さい。つまり巨大地すべり土塊は流動しやすく L が大きいのである。その理由としては間隙水圧、間隙空気圧、土粒子間の摩擦熱など諸説あるが、ここではそれ以上触れない。実際に発生が多いのは小さな斜面崩壊であり、その H/L はバラつきが著しい。そこでおおよそ平均をとると $H/L=0.5$ となり、この L 以上の離隔距離を確保すれば、土砂が住まいまで到達しない可能性が大きい。こ

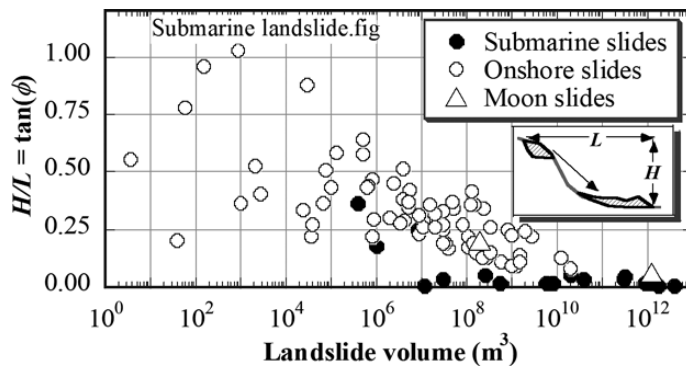


図6 崩壊土体積と幾何学形状 H/L の経験的関係 (既往の斜面災害事例)

れはすべて経験知である。仮に同じことを科学的に立証しようとするれば、粒子の流れを数値解析で再現することになるだろう。しかしそれに必要な現場の地質、土質、地下水調査（ただしこの調査で必要な情報がすべて獲得できるかは疑問）、数値解析コストは、地元を負担できない。 H/L が例外的に小さかった事例を図7に示しておく。



図7 地下水を含む火山噴出物（スコリア）斜面では水平流動距離が大きくなる事例（スマトラ・パダン郊外）

6. 経験知の過大評価の危険

議論のバランスを確保するためには、経験知の内包する危険も取り上げなければならない。経験知とは要するに、過去と同じ状態が未来にも続くという仮定に依拠する知識であり、その過去が十年だけなのか一万年なのかで、信頼性が変わってくる。また、経験という獲得済みの情報を唱え続ければ一応の議論になる（経験者として大きな顔ができる）という意味で、頭を使って考えずに済む安楽な方法でもある。しかし仮定の成り立たない未

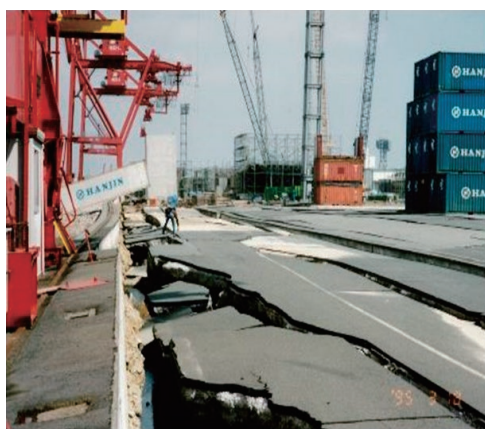


図8 液状化によって大変形した神戸港ポートアイランドの岸壁

知の領域に踏み込むと、論理的な演繹に裏付けを持たない経験知法は土崩する。

1995年1月16日まで阪神間では「関西には地震がケェヘンから」という経験知が存在し、広く信じられていた。それは翌朝雲散霧消したことは、周知のとおりである。神戸のポートアイランドの建設では地盤沈下対策が主要な課題であり、地震時の液状化の問題はほとんど（ごく一部の地域を除いて）意識されていなかった。地震と液状化の結果、港の機能は2年間にわたって停止した（図8）。そして顧客一タビ去

リテ復^マタ返^{カヘ}ラズという事態に至った。事業継続計画 BCP の重要性を示す事例である。それ以前から慶長伏見地震の存在は知られていたのだが、その意味するところが科学的に十分には理解されていなかったこと、事業の重要性によっては過剰で不必要に見えかねない防災施策にも意味がある、という教訓であろう。これはあとづけのサル知恵ではあるが。

7. おわりに

自然災害「科学」にあつては、きちんとした根拠に基づかない空想的発言は相手にしていただけないかもしれない。しかし過去の「大震災」においては、前例の無いタイプの大災害に意表を突かれてきた、だから想像力が重要だ、そのような意見が本年7月の防災学術連携体のシンポジウムでも表明されていたので、ここであえて私見を申し述べたい。

近年流行の防災減災技術には、災害発生後の事後対応の改善を主眼とするものが多い。それは廉価で実行できるという意味からも、予算不足の地方自治体にとっては歓迎される技術である。しかし災害はすでに起こっているものであり、事後に最高の対応をしたとしても、壊れた家やインフラは元に戻らない。それは地域社会の存続においては大打撃であろう。また発災直後の対応においてもスマホ等の通信と IT 技術への期待が目立つが、大災害を想定しながら全電源喪失という事態は想定しないのであろうか？ そこでスマホ基地局の電源喪失への対策として、ドローン基地局の開発が試みられていると聞いている。その滞空時間は何分あるのか、ドローンを数多くそろえてカバーするのか、バッテリーの充電はどうするのか。ドローン充電用の発電機をそろえるくらいなら、はじめから地上基地局に発電機を持ち込んだ方が効率が良い。またドローンより気球（アドバルーン）や飛行船の方が滞空時間が長いことには、疑問の余地がない。まことに不可思議な技術動向である。

その裏には、気球や飛行船の研究ではエッジを目指す科学技術研究予算がつかない、という現実的な状況があるのであろう。時流に乗った研究テーマには予算が付きやすい。予算を獲得し続けないと研究グループが維持できないという状況もある。しかし防災のあり方を流行が決めてしまい、実際に災害が起きてはじめてドローン基地局が役に立たないことを知る、まことに不可思議な技術動向である。

電気は便利だが、その供給は脆弱である。全電源喪失は別に原子力発電所に限った事態ではない。近年では2018年胆振東部地震、2019年房総半島沖台風、2022年の積雪と送電線鉄塔倒壊による紋別市など、その事例が存在する。情報伝達の途絶えた社会で何か起こるのか、それは関東大震災の直後に経験されたことと同じであろう。さらに全国的な物流にも多大な悪影響があるものと信じて良いのではないか？ 私などは、大震災の時にはトランジスターラジオと飲料水だけ確保して、布団にくるまり体力を温存しつつ、3日程は読

書に耽ろうと考えている。登山専門店に行けば、携帯用のトイレも販売していることが心強い。

参考文献

- 1) Müller-Salzburg, L.: The Vajont catastrophe - A personal review, *Engineering Geology*, Vol. 24, pp. 423-444, 1987.
- 2) Nonveiller, E.: The Vajont reservoir slope failure, *Engineering Geology*, Vol. 24, pp. 493-512, 1987.
- 3) Uchimura, T., I. Towhata, L. Wang, S. Nishie, H. Yamaguchi, S. Seko and J.-P. Qiao: Precaution and early warning of surface failure of slopes by using tilt sensors, *Soils and Foundations*, Vol. 55, Issue 5, pp. 1087-1100, 2014.