

地盤災害軽減に向けた時間軸マルチスケール解析の考え方

時間軸マルチスケール 地盤災害 粒子法

筑波大学 国際会員 ○松島亘志

1. はじめに

これまでの地盤工学は、主に数秒から数分の短期的な土砂移動現象(斜面崩壊、土石流、液状化)の予測手法の高精度化を試みて成果を上げてきたが、現状では、地盤の不均質な力学的性質に関する空間情報の不足が、土砂災害の予測精度の大きなボトルネックとなっている[1]。一方で、土構造物の長期劣化、ダムへの堆砂や海浜侵食などの長期土砂移動問題など、より長期の予測を行うための力学解析手法については、その枠組すら構築されていないのが現状と思われる。本報告では、このような長時間の解析を行う際の、時間軸マルチスケールの考え方についてのいくつかの考察を行うものである。

2. 長期の土砂移動問題の性質

地球表層の未固結地質物質としての「土砂」は、山地における風化や侵食、斜面崩壊によって生産され、流水によって河川の下流へと運搬され、流速の減少により堆積する。その過程で粒子摩擦やソーティングなどによって土砂の性質は変化する。堆積した土砂は、上載圧あるいは他の外圧によって圧密され、やがて固結して岩石になる。このように土砂移動プロセスには、様々な力学プロセスが介在するが、それぞれのプロセスの代表的なタイムスケールは異なる。斜面崩壊は、数秒から数十秒の現象であるが、岩石の風化プロセスの一種である凍結融解プロセスは年間数 cm～数十 cm といったオーダーの現象である。粒子が河川で運ばれるプロセスは、流速に支配される時間スケールを持っているが、流下する粒子の摩擦現象は、粒子の衝突という瞬間的な力学現象の繰り返しである。

更に、実際の地層形成プロセスでは、数 10 年から数 100 年に一回の大規模な洪水が極めて大きな影響を及ぼすことが堆積学などの分野で知られている。また、地質学的には、氷期と間氷期の繰り返しによる海面上昇が河川の侵食・堆積プロセスに大きな影響を及ぼすことが知られている。このように、様々な時間スケールを持つ現象の複合した総体としての土砂移動問題を、現在は、アウトプットとして求められる何らかの物理量変化に対応する一つの時間刻みで、時刻歴計算を行っている。そのため、その時間スケールに合わない力学現象の作用は、非力学的なモデルで近似せざるを得ず、これが増えれば、当然精度は悪化する。また、非力学モデルは、限られた観測や実験から構築されたモデルであるので、説得力がなく、基盤技術として定着しない。

このような現状に対するブレークスルーとして着目すべき概念のひとつは「イベント性」であると考えている。すなわち、ある小さな時間スケールの現象が、確率的に繰り返されることが、ひとつ大きな時間スケールの現象として積み上げられる。このアップスケールプロセスに対して、支配的なパラメータを抽出して、モデルを構築する。これは例えば、土粒子の振る舞いから、土の構成モデルを構築する、空間的なマルチスケールプロセスと同様である。このようなアップスケールリングを様々な力学プロセスに対して積み上げることにより、徐々に長期の現象を予測できる全体モデルが組み上がる。

ただし、ここで注意すべきは、特徴的な時間スケールを正しく抽出することである。同じような力学現象が、様々な時間スケールで発生するように見える場合、これをどこかの時間スケールで分離すべきか、ひとまとまりの確率過程として考えるべきかは、純粋に力学問題として検討されるべきである。そのような考察を助ける概念として「フラクタル」がある[2,3]。観測された現象がひとつのフラクタル次数で表現されているものは、分離すべきでなく、逆にあるスケールで次数が変化しているならば、そこに何らかの物理的要因の変化が見いだされるべきである。

3. 空間スケールと時間スケールの取り扱い

土砂移動現象は、空間的にもマルチスケール問題として取り扱うべきものである。すなわち、土粒子スケールの性質、土砂スケールの性質、地形スケールあるいは構造物スケール（あるいは外力の空間スケール）の性質が階層化している。これらは当然ながら前述の時間スケール分離と完全に独立ではない。ある現象は、ある空間スケールかつある時間スケールで発生するからである。このような検討は、時間スケールの適切な分離の判断にも役立つと思われる。

長時間の力学計算では物理量の保存が重要となる。その意味では、オイラー的な解析手法よりもラグランジュ的な解析手法が適していると考えられる。特に、粒子法などでは、各種の物理量を粒子が保有したまま長距離移動していけるので、土砂移動問題のような、広域スケール・長時間解析に適した手法であると考えられる[4]。粒子法は、支配方程式や境界条件の厳密性には欠ける面もあるが、そのような部分を多少犠牲にしても、計算効率を優先させる、というような判断は、非常に長時間の計算などでは必要であると思われる。

これまでの計算力学では、主に空間のマルチスケール解析が研究されている。この研究成果を時間のマルチスケール解析にも援用することができるかもしれない。例えば、均質化理論[5,6]では境界条件に周期性を仮定するが、これは前述の時間のイベント性と類似しているとも考えられる。また、この結果が徐々に積み上がっていることは、その分の摂動を取るという操作として扱えるかもしれない。

4. 時間の逆回し解析

土砂移動問題の解析での問題点のひとつとして、初期状態（過去の地形）がわからないという点が挙げられる。これを解決する方法として、現在の時間から過去の地形を予測する時間の逆回し解析がある。時間逆転解析は、ボルツマンの H 定理に対するロシュミットの批判(ロシュミットのパラドックス)などで有名であるが、土砂移動解析の場合には、特有のいくつかの工夫が必要と思われる。土砂は、山地で降った雨水が溪流へと流れ込み、河川となって谷を下り、勾配の小さな平野部、さらには海洋に出る、という流れに運ばれて移動する。その際、山地のある場所にあった土砂が、どの河川に流れるかは、河川の流域面積図に対応して求められる。しかしながら、逆に河川中のある土砂が、その上流のどの斜面から流出した土砂かを定めることは難しい。これは、流路の分岐の性質に依る。河川は様々な土砂経路が一本にマージする収束線となっている。

この場合、時間の逆転解析を妥当に行うことは難しい。一方、順解析は比較的容易であるので、現在の山地地形が過去にどうであったか、という解析を行う場合には、順解析と、イベント性を組み合わせた方法が有効であると考えられる。すなわち、ある地形状態で順解析を行い、侵食量、堆積量を計算したとして、その侵食量分を堆積、堆積量分を侵食させ、1 タイムスケール前の地形を構築する。これを繰り返すことにより、過去の地形を時刻歴で再現していく。

しかしながらこの手法は、平野部や海底での堆積地形の時間逆解析には使えない。このような堆積過程では、一旦マージした土砂経路が再び拡散するからである。これは、平野部のある場所にある土砂が、どの河川から来たかは容易に推測できても、河川中を流れる土砂が、長期的にどの場所に堆積するかを特定しにくいことに対応する。もしも前述の順解析の繰り返し法を適用すると、現在平野部を流れている河川がどんどん深くなっていってしまう。実際には、ある場所の堆積が進むと、そこに河川が流れにくくなるため、洪水などをきっかけとして河川流路が変化して、別のところに土砂が堆積するようになる。これの繰り返しで氾濫原が形成される。

では、このような堆積地形に対する時間の逆転解析は、どのように行うべきだろうか。実は、上述の山地の侵食解析よりも、より多くの境界条件を我々は持っている。それは「地層」である。地層は、過去の堆積過程を記しており、これを満たすように過去を遡っていけばよい。地質学の分野では、堆積の情報は残っても侵食の情報を失われる、という本質的な情報の欠損がある。本手法は、これを時間の逆転解析で補間する、という考え方であるとも言える。

5. 学際的研究の必要性

土砂や地盤は我々の生活の基盤であり、それ故に様々な分野で土砂の振る舞いは問題となっている。一方で、それぞれの分野によって、興味のある土砂の振る舞いが異なり、それに対応して扱うタイムスケールも異なっている。例えば地学分野では、何百万年～何億年といった地質学的なタイムスケールであり、生物分野では数十年程度以上の生物・環境的タイムスケールであり、土木工学分野では、構造物の供用期間以下といったタイムスケールである。同じ土木でも、地盤分野と河川・海岸では、異なるタイムスケールを扱っているようである。さらに、土砂の微視的現象を扱う場合には、分子運動的時間スケールも必要となる。

このように、それぞれの分野で多くの労力をかけて蓄積してきた研究成果を有効利用することは重要である。すなわち、土木(地盤・河川・海岸)、地質学、生物学、物理学などの関連研究者が、情報を交換し、ことなるタイムスケールをどのように繋いでいくのかの、共通のフレームワークを構築する努力を始める時期に来ている。

6. おわりに

本論では、具体的な解析事例などは含めず、地盤災害軽減に向けた時間軸マルチスケール解析の構築に必要と思われるいくつかの事項について検討した。このような大きなフレームワークの構築は、とても一人の研究者や特定の研究室のみで進めていけるものではない。現在、土木学会地盤工学委員会土砂動態学小委員会では、少しずつ学際的な情報交換や、情報発信の取り組みを始めているところである[7]が、関連する活動は、他の様々な分野でも始まっているようである。そのような流れをマージさせて、大きなうねりにしていくことが重要であると思われる。

参考文献

- [1] 山田恭央：「地震による斜面崩壊予測とそれによる家屋・道路被害推計の統合システムの開発」, 国土交通省建設技術研究開発助成制度, 基礎・応用研究開発課題(平成 21～22 年度) 最終報告書, <http://granular.kz.tsukuba.ac.jp/200905mlit/>
- [2] B. Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*, Times Books, 480p, 1982.
- [3] 高安秀樹：フラクタルの物理, 物性研究 44-6, 1985.
- [4] ホアン ジャクエン、松島亘志、山田恭央：衛星画像から得られる 2.5m メッシュ標高データをを用いた土砂流動解析, 地盤工学会関東支部発表会講演概要集, pp.427-431, 2010.11.
- [5] Lions, J.L. (1981) *Some Methods in the Mathematical Analysis of Systems and Their Control*. Science Press, Beijing, China.
- [6] Sanchez-Palencia, E. (1980) *Non-homogeneous Media and Vibration Theory*. In: *Lecture Notes in Physics 127*. Springer-Verlag, Berlin.
- [7] 土木学会地盤工学委員会土砂動態学小委員会 HP, <http://granular.kz.tsukuba.ac.jp/sediment/>