

# 第44回 理工学部門研究談話会

日時：令和 6年10月23日(水) 13:30～15:00

場所：理工学部2号館6階第1会議室

## 話題及び提供者

『「土の破壊」を「変位」の計測のみから判断する』

笹原 克夫

『超新星重力波と原始中性子星星震学』

祖谷 元

『謎の微化石「黄金色藻シスト」の研究』

加藤 悠爾

教職員，大学院生，学生，一般の方々のご参加をお待ちしております  
(お問い合わせ： [iida@kochi-u.ac.jp](mailto:iida@kochi-u.ac.jp))

# 「土の破壊」を「変位」の計測のみから判断する

笹原克夫

キーワード：斜面崩壊、掘削、水平変位、垂直変位

Keywords: Slope failure, Excavation, horizontal displacement, normal displacement

## 1 はじめに

筆者等は、道路等の建設のために斜面を掘削する際に、突然の崩壊による労働災害の発生を防ぐための、崩壊を予測するための研究を進めてきた<sup>1)</sup>。これらによると、斜面の多段階掘削時には、掘削中のみならず、掘削後の変位が徐々に増加し、最後に加速的な変位の増加を示して崩壊に至る。しかし変位が急増しても、その後変位の増加は収束し崩壊しない場合と、変位が加速的に増加し崩壊に至る場合がある<sup>1)</sup>。両者の場合とも当初は変位が急増するので、その時点では崩壊に至るかどうかがわからない。

本報告では、前報<sup>2)</sup>に引き続き、変位増加が開始した時点で、多次元方向の計測変位に基づき、変位が加速的に増加して崩壊に至るのか否かを判断する方法について検討した。

## 2 実験方法

自然斜面の多段階掘削時の多次元方向の変位の計測は、高知県内にて実施した。地名等は公表しない。勾配40度の自然斜面において、比高1m間隔で測線を下段、中絶及び上段と設定し、各々の測線において、60度、75度及び90度の勾配で掘削を行い、掘削中及び掘削後の変位の計測を実施した。上段の掘削においては、その後掘削のり面の透かし掘りを実施して崩壊させた。多次元方向の計測は、地表面方向及び地表面に垂直方向に設置した変位計、そして3次元の変位を計測する3Dトータルステーション(以降3D-TS)の2種類で実施した。変位計は崩壊範囲外に基礎を設置した単管パイプに固定し、地表

面上においたターゲットの、地表面方向と地表面に垂直な方向の変位を計測した。地表面方向及びそれに垂直な変位は、各々斜斜面下方と鉛直下方への変位が正である。3D-TSでは、地表面上にターゲットを設置し、その水平面上の2次元、鉛直方向の1次元の変位を計測した。X方向は北向き、Y方向は東向き、そしてZ方向は鉛直下方に変位が増加すると、正の値が大きくなる。

## 3 実験結果

図-1に上段掘削時に変位計により計測された、地表面方向及びそれに垂直な方向の変位の経時変化を示す。地表面方向の変位は、掘削ステージ11より変位増加が始まる。その後既報<sup>2)</sup>と同様に、掘削中のみならず掘削後も変位増加は進行し、掘削ステージ15の直前辺りから加速的な変位増加(第三次クリープ)を示し、崩壊に至った。地表面に垂直方向の変位は、掘削ステージ13の最中から増加をはじめ、その後変位量は小さいものの、地表面方向の変位と同様な傾向を示した。

図-2には上段掘削時に3D-TSにより計測された、ターゲットの3次元的な変位を示す。こちらは掘削ステージ14を含む26,648~26,808秒の間はバッテリー交換のために欠測となった。変位は3方向とも掘削ステージ13の最中から増加をはじめ、徐々に加速的な変位の増加を示し、掘削ステージ15の後に崩壊に至った。特にZ方向の変位増加が顕著であった。

## 4 地表面上の合成変位の偏角 $\alpha$ による評価

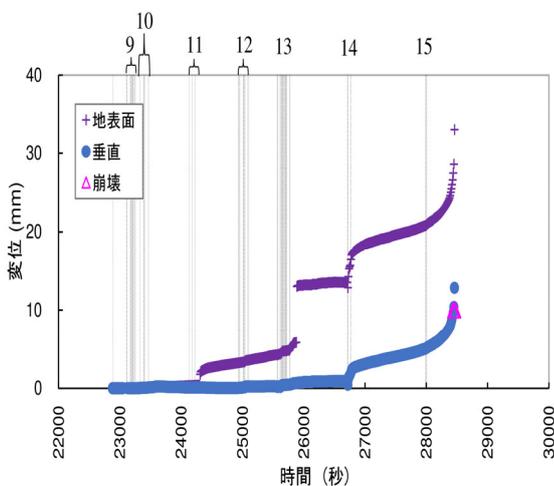


図-1 変位計により計測された崩壊までの変位  
(図の上部の数字は掘削ステージ番号)

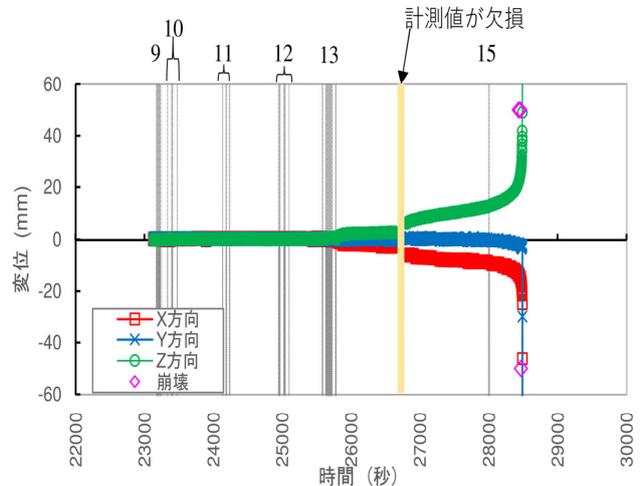
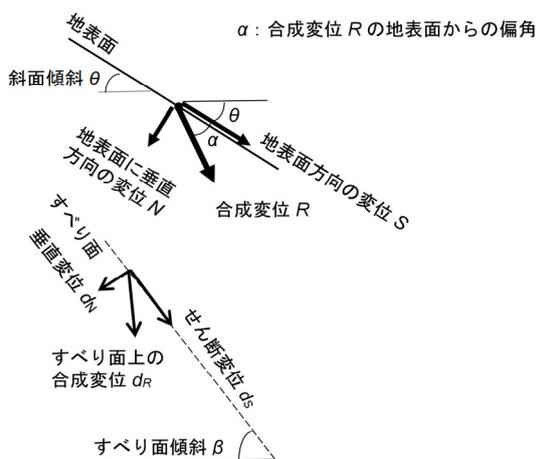


図-2 3D-TSにより計測された崩壊までの変位  
(図の上部の数字は掘削ステージ番号)



定常状態（破壊直前）では  
合成変位  $R$  の水平面からの偏角  $(\theta + \alpha)$   
= すべり面傾斜  $\beta$

図-3 地表面上の変位とすべり面上の変位の関係

笹原他<sup>1)</sup>によると、すべり面上の移動土塊が剛体であると仮定すると、すべり面上の直接せん断が定常状態に達すると、すべり面方向の変位  $d_S$  と垂直変位  $d_N$  の合成変位  $d_R$  の方向が、すべり面方向と同一になる。この場合、地表面上で計測された、地表面方向の変位  $S$  及びそれに垂直な変位  $N$  の合成変位  $R$  の方向も、すべり面の方向と等しくなる。このため地表面上で計測された変位に基づく合成変位の偏角  $\alpha$  が、斜面崩壊の発生を示す指標となる可能性を示唆した（図-3）。今回も同様な方法で斜面の不安定性を評価する。

図-4 及び図-5 は、上段掘削時に、各々変位計と 3D-TS で計測した地表面上の変位より算出した、地表面上の合成変位の偏角  $\alpha$  の経時変化である。特に後者

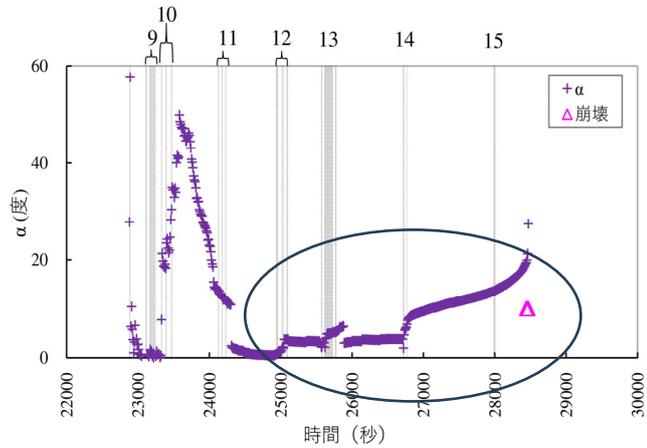


図-4 変位計による変位より求めた合成変位の偏角  $\alpha$  の経時変化

の 3D-TS の場合は、図-2 で変位の増加が始まった掘削ステージ 13 までは偏角  $\alpha$  が大きく変動するが、その後急激に変動の幅が小さくなり、時間に線形の増加傾向を示した。図-4 に変位計による地表面上の合成変位の偏角  $\alpha$  も、掘削ステージ 11 までは値が大きく変動したが、変位増加が始まる掘削ステージ 11 からは変動が小さくなり、その後掘削ステージ 14 からは、単調な増加傾向を示した。これらより、偏角  $\alpha$  の変動が小さくなるのが、変位の顕著な増加の開始を示すことが示唆される。既報<sup>2)</sup>では、偏角  $\alpha$  の変動が小さくなった後は、先の図-3 による思考実験の結果と同様に、偏角  $\alpha$  は一定値を示したが、今回は滑らかな増加を示した。ただし増加量は小さい。これはすべり面が曲面であり、その上を移動土塊が変位したと考えると、説明がつく。

つまり今回の検討からは、地表面上の合成変位の偏角  $\alpha$  の変動が小さくなると、地表面方向の変位が顕著な増加を示し、崩壊に至ったことが分かった。このことから、地表面上の合成変位の偏角  $\alpha$  が、変位が崩壊に向けて加速的な増加を開始するタイミングを判断する指標となり得ることを示唆する。

参考文献

- 1) 笹原克夫他：地盤工学ジャーナル, Vol. 14, No. 4, pp. 363-375, 2019.
- 2) 濱田好弘他：第 61 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 2022.
- 3) 笹原克夫：第 61 回日本地すべり学会研究発表会講演集, 2022.

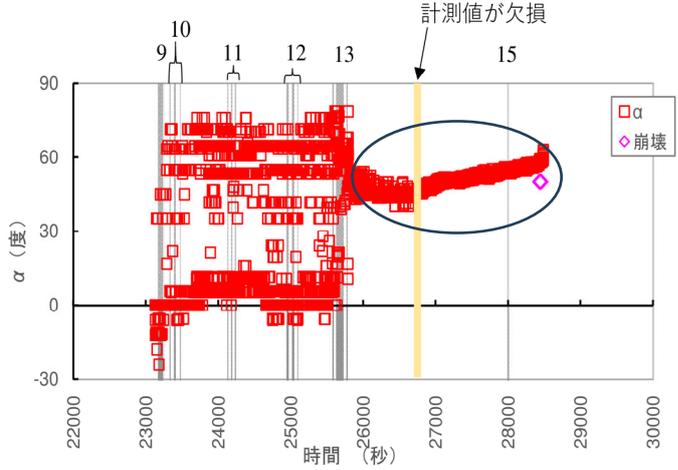


図-5 3D-TS による変位より求めた合成変位の偏角  $\alpha$  の経時変化

## 超新星重力波と原始中性子星星震学

祖谷 元

重力波の直接観測を受け、重力波は電磁波やニュートリノとともに天体の情報を知るための重要な観測量となった。2017年8月17日に観測された連星中性子星合体時からの重力波 (GW170817) では、重力波とともに対応する電磁波観測にも成功し、波源天体の同定を可能とした。GW170817では、合体前の重力波 (チャープ信号) から、中性子星の潮汐変形率に制限が与えられ、これにより1.4太陽質量の中性子星の半径に制限が与えられた。2023年5月からは、日本の重力波観測器 (KAGRA) を含む重力波観測器ネットワークによる第4回科学観測が行われており、重力波観測事例はますます増加している。コンパクト連星系の合体時に次に期待される波源としては、重力崩壊型超新星爆発が考えられる。コンパクト連星系に比べると、超新星爆発は系が球対称に近い場合、放出重力波も非常に弱いことから、現在の観測器では、おそらく我々の銀河でのイベントに限られるかもしれない。イベント頻度の少なさから、イベントに備えて十分に理論的な準備を進めておく必要がある。

これまで、超新星重力波は主に数値シミュレーションを通して議論されており、コアバウンス後、1秒程度の時間スケールで、振動数が数百ヘルツからキロヘルツへ上昇していく重力波シグナルの存在が示唆されている。このような重力波の背景は当初、原始中性子星の表面における重力モード (表面gモード) と考えられていたが、この振動モードは局所的な振動数であり、原始中性子星の表面をどこに選ぶかということに強く依存している。そこで、我々は超新星重力波を原始中性子星の大局的な振動数で説明できないかという動機のもと、原始中性子星における星震学を用いた解析を行なっている。

原始中性子星を構築するには、(冷たい)中性子星の場合とは異なり、密度と圧力に加え電子分率とエントロピーの動径分布も必要となる。そこで、数値シミュレーションの結果を用いて、原始中性子星モデルをコアバウンス後の各時刻で用意する。このようなモデルの上で線形解析を行うことで、各時刻の原始中性子星モデルにおける固有振動数を求めた。得られた固有振動数と数値シミュレーションで得られた重力波シグナルを比較することで、超新星重力波の物理的な背景を探った。その結果、超新星重力波は、主に原始中性子星の基本振動に起因していることを発見した。また、超新星重力波は超新星モデルに強く依存するが、重力波振動数を原始中性子星の平均密度で記述すると、超新星モデルに依存しない形で普遍的に重力波振動数を表せることを示した。我々の導出した普遍的な関係を用いることで、いざ超新星重力波が観測された際には、原始中性子星の平均密度の時間進化に制限を与えることができる。このような制限は、高密度領域における状態方程式に制限を与えることにつながると期待される。

## 謎の微化石「<sup>おうごんしよくそう</sup>黄金色藻シスト」の研究

海洋コア国際研究所 加藤 悠爾

多くの人は「化石」と聞くと恐竜やアンモナイトなどを思い浮かべるかもしれませんが、実は、顕微鏡を使わないと観察できないくらいに小さいマイクロサイズの化石も存在しており、これを我々は微化石と呼んでいます。微化石の代表例としては、動物プランクトンの有孔虫や放散虫、植物プランクトンの珪藻や円石藻などがあり、こうしたプランクトン化石は堆積物コア試料（海底に降り積もった地層をボーリング掘削で掘り抜いた柱状の地質試料）においてしばしば観察されます。そのうち筆者は珪藻化石を専門としており、これを用いて過去数百万年間の環境変動史を調べる研究に取り組んできました。

さて、珪藻化石が多産するような試料には、珪藻だけでなく 5~10 $\mu$ m 程度の小さな球状の化石が産出することがあります。これが、黄金色藻と呼ばれる微細な淡水藻類の休眠期細胞（シスト）の化石です。これに関心を持った筆者は、黄金色藻シスト化石に関する研究事例を求めて様々な文献をあたりました。しかし、過去数十年以上遡って文献を調べても黄金色藻シスト化石は殆ど報告されておらず、古環境学への応用はおろか分類学的な研究すら満足に進んでいないことがわかりました。いわば、黄金色藻シスト化石は、ほとんどの微古生物学者から「無視」されてきた分類群だったのです。筆者は、この黄金色藻のほとんどが淡水棲であることに注目し、海の地層から産出する黄金色藻シスト化石が地質学的過去における海洋への淡水流入や融氷などを捉えることができる新たな古環境指標として使えるかもしれないという着想に至りました。そこで筆者は、南大洋（南極海）の堆積物コア試料や海水試料を用いた一連の基礎研究を実施し、黄金色藻シスト化石が持つ新たな古環境指標としての可能性を探ってきました。今回の談話会では、これらの研究で得られている成果や今後の展望などについて紹介します。