

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12483

研究課題名(和文)地震による極端異常運動に関するメカニズムの解明：卓球効果対トランポリン効果

研究課題名(英文) Mechanism analysis of earthquake induced extreme motions: ping pong effect vs trampoline effect

研究代表者

陳 光斉 (Chen, Guangqi)

九州大学・基幹教育院・教授

研究者番号：50293882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：地震による極端異常運動は異常加速度、異常速度、異常変位の三種類に分けて、発生メカニズムをそれぞれ解明した。極端異常加速度においては、急ブレークモデルを提案し、極端異常加速度の発生メカニズムを理論上、実験および数値シミュレーションで解明した。地盤の不連続性が極端大きな加速度の発生要因となることが分かった。極端異常速度においては卓球効果モデルを提案し、完全弾性衝突モデルを用い、両物体は衝突前後の運動量の保存と運動エネルギーの保存によって、物体のリバウンド速度を推定する解析式を提案した。極端異常変位においては、多重加速モデルを提案し、地震による斜面崩壊後の土砂運動の高速・遠距離移動の特性を解明した。

研究成果の概要(英文)：Extreme motions are often observed during strong earthquakes. They can be classified as the extreme large acceleration, the extreme large velocity and the extreme large displacement. Why and how these extreme motions occurred are still incomprehensible problems. It is important and necessary to clarify the mechanisms of these extreme motions induced by earthquakes for disaster mitigation in earthquake engineering as well as seismology. In this study, we have clarified the mechanism of each extreme motion phenomenon. A sudden braking model has been proposed for the mechanism of the extreme large acceleration. A ping pong model has been proposed for the mechanism of extreme large velocity. A Multiplex Acceleration Model has been proposed for extreme large displacement. The above mentioned extreme motions can be explained by using these models and they have been successfully simulated by using DDA simulations.

研究分野：防災工学、計算力学

キーワード：極端運動 急ブレークモデル 卓球効果モデル 多重加速モデル メカニズム 地震 斜面崩壊 土砂運動

## 1. 研究開始当初の背景

2008年岩手・宮城内陸地震(M6.9)の際に、強震観測網(KiK-net)の断層極近傍観測点(一関西、IWTH25)で、重力加速度の4倍を超える観測史上例のない大加速度強震波形(上下動成分)が記録され、世界を驚かせた。Aoiらがこの現象において表層地盤がトランポリンの様に振る舞うことで説明可能であるとするモデルを提唱し、トランポリン効果と名付け、米国科学雑誌サイエンスに投稿し<sup>1)</sup>、地学研究者の関心が集まった。

一方、大地震が地面上の物体の極端な異常運動を引き起こす現象がしばしば発生している。例えば、2008年中国で発生した四川大地震(Ms 8.0)では、震央地付近にある斜面から巨大な岩塊が飛び出した。岩塊が僅か64.4mの高さから61.9mの水平距離を飛んでいた。飛び出しの初期速度は単純計算で最低17m/s以上必要だが、どのようにしてそのような大きな速度を生じたかは、いまだに解明されていない。また、その地震による斜面崩壊で崩土の移動距離が3kmを超える状況が数十箇所で見られた。高速・遠距離移動のメカニズムに関しては、Seedらの「すべり面上の液状化」説、Shreveらの「エアークッション効果」説が立てられたが、いずれも理論的に不十分である。これらの現象のメカニズムの解明にトランポリン効果説に非常に期待が集まっている。

Aoiらのトランポリン効果説では、4000Galほど大きい剛体の岩塊のトランポリン運動(図1A)を仮定し、その上に弾性変形を加え(図1B)、全体的にトランポリン運動現象(図1C)が説明されるが、なぜそんな大きい剛体のトランポリン運動が発生するか、そのメカニズムはなにかということはいまだに明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、大地震による極端な異常運動は加速度、速度および変位運動に分けてそれぞれの発生メカニズムを明らかにする。

まず、衝突運動による大きな加速度が生じることに着目し、急ブレークモデルを提案する。次に、地面上の物体が地震動に伴って徐々に高くなる運動現象を「トランポリン現象」といい、その発生メカニズムはトランポリン効果ではなく、「卓球効果」モデルを提唱し、トランポリン現象の発生原因と特徴、4Gの大加速度波形の正体を解明して、地震防災研究に適用する。また、一関西で記録された大加速度強震波形を再現するシミュレーションを行い、提案モデルの有効性を検証する。最後に、大地震による高速・遠距離移動メ

カニズムにおいて、多重加速モデルを提案し土砂災害の運動を高精度な予測手法を確立する。

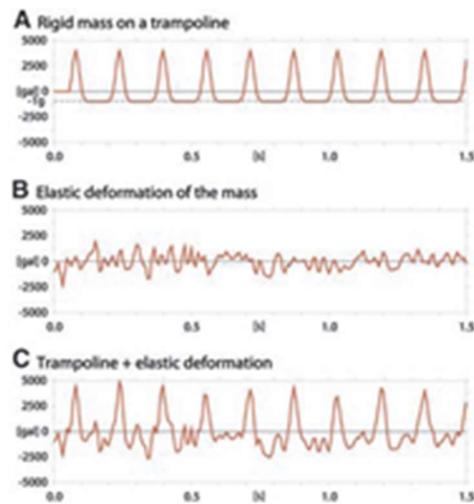


図1 Aoiらのトランポリン効果モデル

## 3. 研究の方法

### (1) 急ブレークモデルにおける検証

落下物体はある速度で地面に落ちた後、リバウンドで速度の方向が反転する。物体は地面との接触の時間が非常に短いため、停止でも大きな上向きの加速度が要することが分かる。

リバウンド速度は物体の反発係数と関係し、接触時間は材質に関わるので、3種類の材質を用いて自由落下実験を行い、物体と地面との衝突による大きな加速度を確かめ、急ブレークモデルの有効性を検証する。

### (2) 卓球効果モデルにおける検証

大地震の際に、地面上の物体が振動に伴って徐々に高くなる現象および大きなリバウンド速度が生じる現象の発生メカニズムを検討する。落ちてきた卓球ボールに向かってラケットが上向きに振られると卓球ボールは高いリバウンド速度を得る。

振動台実験を行い、卓球効果によるトランポリン現象を確認し、その発生条件:地震条件(振幅と周期)と地盤条件を明らかにする。

### (3) 極端運動メカニズムの解明

一関西観測点にて鉛直上向き方向に3866galの加速度の発生メカニズムを解明するために、①地中260mで観測された加速度波形を用いて、地震応答解析を行い、地表付近の地震波形を推定する。②地下260mまでの地盤は地震による不連続面が生じ、地表面の観測機器が付着するブロックが地盤との分離運動ができることを仮定し、不連続変形法DDA<sup>2)</sup>モデルを作成する。動的なDDAシミュレーションによる重力加速度の4倍を超える観測史上例のない大加速度強震波形を再現する。

### (4) 高速・遠距離移動のメカニズムの解明

地震波の作用形態を P-phase と N-phase に分けられ、卓球効果モデルを反映できる改良 DDA を用いて、大地震による崩壊土砂の高速・遠距離移動のメカニズムをシミュレーションする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 急ブレークモデルにおける検証結果

加速度計を取り付けたブロックを一定の高さから自由落下させ、ブロックの鉛直方向の加速度を測定する実験を行った。

ブロックは材質の違いを比較するため、コンクリートとレンガを用いた。自由落下の高さは 1, 2, 5, 10 cm とした。加速度計の観測頻度は 100 Hz である。

一例として、落下運動による加速度波形を図 2 に示す。ブロックは空中では重力加速度を受けており、衝突時には鉛直上向きに大きな加速度を得ていることがわかった。また、鉛直上向きの加速度を受けている時間は非常に短く、ブロックと地面が接している時間(衝突時間)は 0.01 ~ 0.02 sec であると判断される。

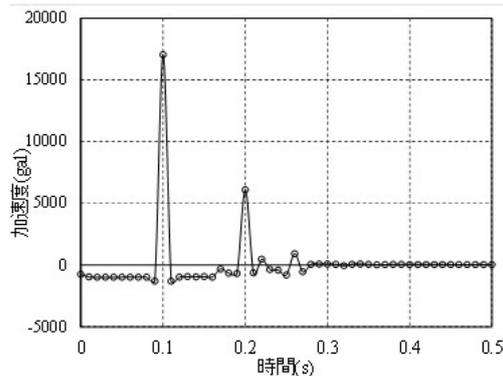


図 2 落下運動の加速度波形

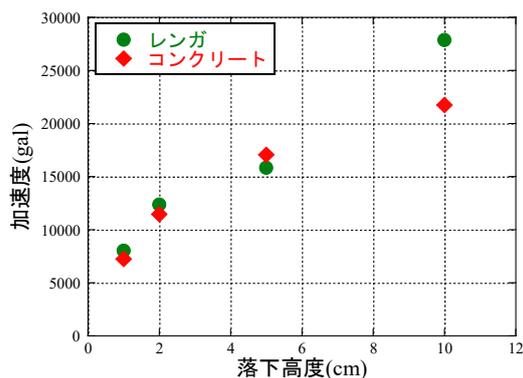


図 3 落下高さと PGA の関係

また、各ケースにおいて3回の実験を行い、落下衝突による最大加速度 PGA の平均値を求め、加速度と落下高さの関係を図 3 に示す。落下高さが大きい程、衝突により生じる鉛直加速度は大きくなった。また、同じ落下高さであっても、ブロックの材質により生じる最大鉛直加速度は異なっ

ており、レンガの方がコンクリートより大きい傾向にあった。これは、材料により反発係数が異なるためであると考えられる。

反発係数は衝突前の速度と衝突後のリバウンド速度の比で定義される。実験結果による平均反発係数はコンクリート 0.52、レンガ 0.62 となり、レンガのほうがコンクリートより少し大きいことが分かった。

##### (2) 卓球効果モデルにおける検証結果

地面上の物体は振動している地盤からエネルギーを獲得でき、トランポリン運動で人が蹴り出すときと同じ機能を有すると考えられる。本研究ではそれを「卓球効果」という。例えば、落ちてきた卓球ボールに向かってラケットが上向きに振られると卓球ボールは高いリバウンド速度が得られる。一方、ボールが落ちたときにラケットが下方へ移動されると、ボールの運動エネルギーが吸収され、運動が停止するか、リバウンド速度が小さくなる。物体の着地時の地面振動方向によってリバウンド運動は加速か減速となる。このような卓球効果をトランポリン現象の発生メカニズムの理論根拠とする。

本件は、振動台実験による卓球効果を検証し、卓球効果によるトランポリン現象の発生条件を明らかにする。実験装置は、加速度計を付けたブロックを上下成分の振動台で加振し、各ブロックの加速度を計測する。

1層、2層、3層のブロックモデルにおいて、正弦波の加速度で振動する。振動数は3, 4, 5, 6, 8Hz とし、振幅は 600, 800, 1200gal とした。ブロック材質による違いを比較するため、コンクリートとレンガを用いた。実験条件は振動数、振幅、ブロックの層数を変化させ、1つの材質につき 48 パターン実験した変化して実験を行った。

実験結果においては、図5に一例を示す。3層ブロックモデルで、1200gal の入力振幅(振動台の振幅)におけるトップブロックの応答波形グラフである。横軸は振動開始を 0 秒とした時間であるが、振動台の加速度が最大となった時間前後を抽出している。

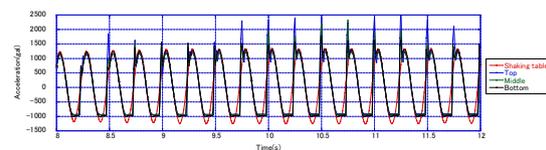


図5コンクリートブロックの応答波形(4Hz)

2層ブロックモデルや1層ブロックモデルにおいてもほぼ同じ結果となった。

いずれの実験結果により、振動台の振幅は重力加速度を超えた 1200gal となると、卓球効果によるトランポリン現象が生じたことを検証できた。

また、下向きの加速度は重力加速度に近い値で、非対称現象が説明できる。

また、加速度増幅倍率は、1000gal 以下では概ね 1.2 以下であるが、1200gal では 1.5 以上となり、最大は 3.3 倍(3900Gal)となる。

コンクリート、レンガ共に振動数が小さくなるほど加速度増幅倍率が大きくなる傾向にあった。これは、振動数が小さくなるほど、振動台の変位が大きくなるため、ブロックの自由落下の距離が長くなり、衝突時の速度が大きくなるためだと考えられる。コンクリートは重ねた内、上のブロックほど加速度増幅倍率が多くなっているが、レンガにおいては一概にその傾向は見られなかった。コンクリートの場合は、衝突により上向きの速度を持った下のブロックが、上のブロックと衝突することで、上部のブロックほど加速度が大きくなったと考えられる。一方、レンガの場合は実験後に振動台にレンガの破片が散っていたことから、衝突によりレンガが破砕し、衝突のエネルギーが分散してしまったことが考えられる。

振動台実験の結果より、鉛直下向きの加速度が重力加速度を超えることにより、地盤上の物体が自由落下し、衝突による加速度増加が発生することが分かった。振動数と加速度増加率の関係より、自由落下の距離が長い、つまり、衝突する物体の速度が速いほど衝突時の加速度が大きくなることが分かった。自由落下した物体が衝突する物体の移動方向や材質も衝突時の加速度に影響することがわかった。

### (3) 極端運動メカニズムの解明

まず、動的な解析機能を加えた不連続変形法 (DDA) プログラムを改良・開発し、振動台実験の再現シミュレーションを行い、改良版 DDA の適用性を検証した。

解析に用いたパラメータは、単位体積重量  $156.3 \text{ MN/m}^3$ 、ヤング率  $2.20 \text{ GN/m}^2$ 、ポアソン比 0.2 とした。地震入力は実験と同じく、振幅 600、800、1000、1200gal、振動数 4、6、8Hz である。

解析の結果、600gal から 1000gal の条件ではいずれの振動数でも加速度の増幅は見られなかった。この点は振動台実験と一致している。一方、1200gal の加速度波形を入力した場合、いずれの振動数でも PGA が 10000gal を超え、実験結果の 5 倍以上となった。また、middle, bottom ブロックの下向きの加速度も 5000gal を超えた。

表1にトップブロックの応答加速度 PGA の実験結果と解析結果の比較を示す。DDA シミュレーションによる解析結果は実験結果と概ね一致し、相対誤差は最大で 14%となった。不連続変形法を用いて、地震時のトランポリン挙動を再現できることが分かった。

表 1 実験と DDA 解析の PGA 比較

	4Hz	6Hz	8Hz
実験結果(gal)	2704	2699	2247
解析結果(gal)	2469	2692	2566
相対誤差(%)	8.7	0.2	14

次に、同観測所の地下 260m で設置した地震計で記録された波形を用いて、地表面付近の地盤加速度波形を推定する<sup>3)</sup>。一関西観測点の土質データにおいては、密度、P波速度  $V_p$ 、S波速度  $V_s$  は防災科学研究所が提供するものを用いたポアソン比、せん断剛性率  $G_d$ 、ヤング率  $E_d$  を用いて求めた。

直接減衰による解析法、散乱減衰による解析法、動的変形特性による解析法を用いた。地下と地上の水平方向の加速度波形を用いて試行的に決定し、南北方向と東西方向の加速度波形の地震応答解析を行い、観測値の PGA と解析値の PGA が概ね一致するように減衰係数を決定した。

いずれの条件でも解析による上下動の加速度は、観測結果の上下動の加速度の 1/4 程度となった。また、解析結果には上下動の加速度波形の非対称性は生じなかった。地中の観測結果は上下動より水平動の加速度が大きかったが、解析結果も同様であり上下動の加速度は水平動を上回ることにはなかった。これより、通常地震増幅理論からはトランポリン運動は生じず、一関西観測点における特異な加速度波形は別の要因によって生じたことが判明した。

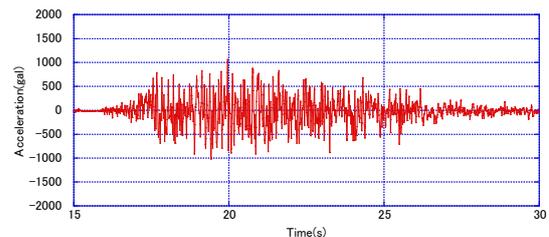


図6 動的変形特性による解析結果

3種の解析結果においては、直接減衰はひずみを考慮しないことによる誤差が生じる。散乱減衰と動的変形特性による解析結果があるが、水平動のPGAが類似している動的変形特性を用いた解析結果をDDAシミュレーション利用する。

さらに、地盤中の不連続面(ジョイント)を有すると仮定し、地震による不連続面から構成ブロックの分離運動が可能とする。地震による鉛直振動により衝突し、地表で極端異常大きな加速度の発生を検証する。

地盤中に不連続面を有する DDA 解析モデルは、不連続面の角度は、45° と仮定した。物性値は一関西観測点のうち、最も浅い層のものを用いた。

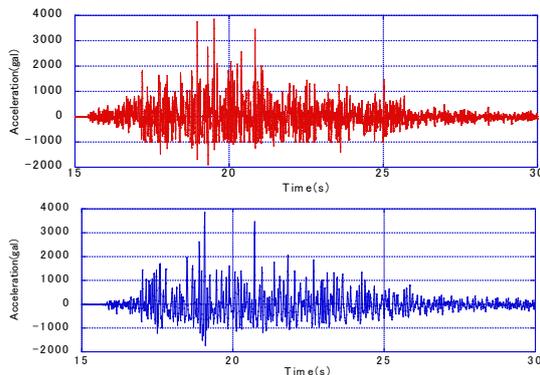


図7 解析(上図)と実測(下図)の鉛直方向の加速度波形

DDA 解析から得られた加速度波形は上方向の加速度最大値 3846gal, 下方向の加速度最大値 1899gal となった。上向きに加速度が増大するときは瞬間的に増大し、下向きの加速度は自由落下のため周期が長くなる。これにより、上下の周期の非対称性が現れる。トランポリン運動現象の特徴である加速度・周期の非対称性が再現された。

加速度が下向きに 1000gal を超える直前は上向きに 3000gal を超えるような大加速度が生じている。これは、振動台実験の結果にも見られたように、上部のブロックとの衝突により、下向きに重力加速度を超える加速度が生じたものと考えられる。

観測結果と解析結果の上向き・下向きの最大加速度と、相対誤差を表7に示す。

表7 鉛直成分の PGA の比較

	上方向	下方向
観測結果(gal)	3866	-1723
解析結果(gal)	3846	-1899
相対誤差(%)	0.52	10.2

以上の結果より、地盤の不連続面モデルによる解析で、一関西観測点の加速度波形を再現できたと考えられる。

#### (4) 高速・遠距離移動のメカニズムの解明

卓球効果に基づき地震動多重加速モデルを提案し、卓球効果を定量的に推定できるように、トランポリン現象が生じる地盤条件と地震条件を特定した上で、地震による崩土の高速・遠距離移動のシミュレーション手法を開発した。

「多重加速モデル」では、地震波形を P-phase

と N-phase に分ける。P-phase は、波が斜面の外法線方向と一致する位相で、斜面が土石を押し込んでいるので、土石が再加速されると考えられる。N-phase は反対方向の波の位相で、斜面が土石から離れるので、土石の動摩擦力が低下することが予想される。その結果、崩壊土石が遠くまで移動できる。

確立した理論と手法を地震防災に実用するために、2008年四川大地震による遠距離移動した大光包斜面崩壊において、動的な DDA による再現シミュレーションを行い、使用アプローチと実用性を確かめた。特に、地震波の入力方法の影響や、鉛直成分の影響を検討した。数値シミュレーションにより、到達距離、堆積分布、跳躍特徴および運動エネルギーを予測でき、地震防災に有用な情報を提供できる。

#### <引用文献>

- 1) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Trampoline effect in extreme ground motion. *Science*, 第332号, pp.727-730, 2008
- 2) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi: 不連続変形法 (DDA), 丸善株式会社, 2005
- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1982
- 4) Bardet, J.P., Ichi, K. and Lin, C. H.: A computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered Soil Deposits, University of Southern California department of civil engineering, 2000
5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

1. Modeling of landslide generated impulsive waves considering complex topography in reservoir area, W. Wang, G. Chen, K. Yin, Y. Wang, S. Zhou, and Y. Liu, *Environmental Earth Sciences*, 査読有, Vol. 75, pp. 1-15, 2016
2. 3D numerical simulation of debris-flow motion using SPH method incorporating non-Newtonian fluid behavior, W. Wang, G. Chen, Z. Han, S. Zhou, H. Zhang, and P. Jing, *Natural Hazards*, 査読有, Vol. 81, No. 3, pp.1981-1998, 2016
3. Distribution Pattern of Landslides Triggered by the 2014 Ludian Earthquake of China: Implications for Regional Threshold Topography and the Seismogenic Fault Identification, S. Zhou, G. Chen, and L. Fang, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 査読有, Vol.5, doi:10.3390/

- ijgi5040046, 2016
4. Modeling of landslide generated waves in Three Gorges Reservoir, China using SPH method, W. Wang, G. Chen, K. Yin, S. Zhou, P. Jing, and L. Chen, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol. 2, No.32, pp.1183-1188, 2016
  5. A Combined Weight of Evidence and Logistic Regression Method for Susceptibility Mapping of Earthquake-induced Landslides: A Case Study of the April 20, 2013 Lushan Earthquake, China, S. Zhou, W. Wang, G. Chen, B. Liu and L. Fang, Acta Geologica Sinica, 査読有, Vol.90, No.2, pp.511-524, 2016
  6. GIS-Based Integration of Subjective and Objective Weighting Methods for Regional Landslides Susceptibility Mapping, S. Zhou, G. Chen, L. Fang and Y. Nie, Sustainability, 査読有, Vol.8, No.4, doi:10.3390/su8040334, 2016
  7. Numerical simulation for run-out extent of debris flows using an improved cellular automaton model, Z. Han, Y. Li, J. Huang, G. Chen, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 査読有, DOI 10.1007/s10064-016-0902-6, 2016
  8. Research on Fault Cutting Algorithm of the Three-Dimensional Numerical Manifold Method, Y. Wu, G. Chen, (他 5 名、2 番目), International Journal of Geomechanics (ASCE), 査読有, DOI 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000655, 2016
  9. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta, Java, Samodra, G., Chen, G., Sartohadi, J., Geomorphology, doi:10.1016/j.geomorph.2015
  10. Exploring the velocity distribution of debris flows: an iteration algorithm based approach for complex cross-sections, Z. Han, G. Chen, Y. Li, Geomorphology, 査読有, Vol. 241, pp.72-82, 2015
  11. Effects of vertical seismic force on initiation of the Daguangbao landslide induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Y. Zhang, J. Zhang, G. Chen, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有, Vol. 73, pp.91-102, 2015
  12. A new movement mechanism of earthquake-induced landslides by considering the trampoline effect of vertical seismic loading, Y. Zhang, H. Xing, G. Chen, Engineering Geology for Society and Territory, 査読有, pp.753-757, 2015

[学会発表] (計 10 件)

1. Yingbin ZHANG, GUANGQI CHEN, Shaking table test for estimating the effects of seismic loading on the mobility of rockfall,

- The 51th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, USA, 2017.06
2. GUANGQI CHEN, Tsukasa KAWAKAMI, Yingbin ZHANG, Mechanism analysis of earthquake induced extreme motions: Clarifying extreme acceleration, The 51th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, 2017.06
  3. GUANGQI CHEN, Mechanism clarification of earthquake induced extreme motions, International Workshop on the 2016 Kumamoto Earthquake, 2017.03
  4. GUANGQI CHEN, Development of a solid-fluid simulation technique for analysis of landslide induced chain disasters, The 14th International Symposium on Geo-disaster Reduction, Chengdu, China, 2016.10
  5. GUANGQI CHEN, Next generation numerical simulation technique for discontinuous rock mechanics, Keynote Lecturer of The Second International Academic Conference on Discontinuous Rock Mechanics, Shenyang, China, 2016.11
  6. GUANGQI CHEN, Stability analysis of toppling slope using the extended NMM, The 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Houston, USA, 2016.06
  7. GUANGQI CHEN, 斜面安定および崩土運動における 3 次元数値モデリング技術, 基調講演、斜面災害における予知と対策技術最前線に関するシンポジウム 福岡 2015, 西新プラザ、福岡、2015.12
  8. GUANGQI CHEN, Hazard mapping of landslide-dam induced by earthquake, THE 15TH ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 福岡国際会議場、福岡、2015.11
  9. GUANGQI CHEN, Development of a practical solid-fluid coupling simulation technique using DDA and SPH, Keynote Lecturer of 12th International Conferences on Analysis of Discontinuous Deformation, Wuhan, China, 2015.10
  10. Jing P., G. CHEN, Simulation of the bolt mechanism using three dimensional discontinuous deformation analysis, 12th ICADD, Wuhan, China, 2015.10

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

陳光齊 (CHEN Guangqi)  
九州大学・基幹教育院・教授  
研究者番号：50293882

### (2) 研究分担者

古川全太郎 (FURUKAWA Zentarou)  
九州大学・工学研究院・助教  
研究者番号：70735985