

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14165

研究課題名（和文）遅すぎず速すぎない爆燃現象を用いたマルチフラクチャー造成技術の構築

研究課題名（英文）Development of a Technology to Initiate Multiple Fractures in rock-like materials using Not-too-Fast but Not-too-Slow Loading

研究代表者

福田 大祐（FUKUDA, Daisuke）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：80647181

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：石油・非在来型天然ガスの生産性向上のために生産井周囲岩盤にマルチフラクチャーを造成する技術開発は重要な課題であり、爆燃やテルミット反応などの現象を用いた遅すぎず・速すぎない動圧の利用が解になり得ると考え研究に着手した。そこで、本研究の高度な検証のために不可欠な、岩盤の複雑破碎と生成フラクチャー内のガス圧作用から成る3次元複雑過程を高度に表現可能な解析法を独自開発し、圧力計測・破碎実験を併せることで、マルチフラクチャー造成機構とその最適化について研究を推進するための基礎を構築することに成功した。また、研究中生じた数多くの困難を解決する中で得られた知見をまとめた論文が複数の国際誌に採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、これまで不可能であった遅すぎず速すぎない動圧を用いたマルチフラクチャー造成機構を追求でき、対象岩石に対して最適な載荷特性を見出し得る点は重要である。また、既往の思考錯誤的な方法でなく、開発した解析法・コードより最適条件を満たす破碎剤の開発のクリアな指針が得られる点も極めて重要である。さらに、本研究で開発したコードの汎用性は高く、最近期待されている石炭層におけるバイオメタンの地下鉱床開発に必要な石炭層破碎や土木工学分野における構造物の高速研り技術や震災時の落石等の迅速な構造物解体等にも利用できると予想され、こうした観点からも本研究の工学・社会的な意義重要性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：As a the stimulation solutions for oil and gas wells, creation of multiple fractures that extend into surrounding rock is very important to improve productivity. Application of "not too slow but not too fast loading" may be considered as a useful solution. Due to the necessity of high-fidelity dynamic fracture process analysis (DFPA) to achieve in-depth investigation, a state-of-the-art 3D DFPA code which can simulate the very complex 3D fracture process due to "not too slow but not too fast loading" has been successfully developed. The thermit reaction of the non-explosive ingredients was investigated by measuring the generated pressure, and rock fracture test using this reaction was also conducted. By combining the measured pressure, rock fracture test and the DFPA code, the high-fidelity simulation technology for the target problem has been established, which was not possible before. The important outcomes in this project has been published in several high-quality journals.

研究分野：岩盤工学

キーワード：岩質材料 破碎実験 マルチフラクチャー造成 遅すぎず速すぎない載荷 高度3次元複雑破碎解析法 圧力計測 破碎実験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

石油・シェールガス等のエネルギー資源開発における生産性向上のためには、生産井周囲岩盤にできるだけ多くのフラクチャー(以下、マルチフラクチャ)を造成することによる流路形成とそれらの流路保持が重要となる。現在最も多用されるフラクチャー造成技術の水圧破砕では、低载荷速度と現位置応力状態に依存して、通常 2 本程度のメインフラクチャーが造成され、フラクチャー数は限られる。他方、フラクチャー数増大のために爆薬の爆轟を用いると、衝撃载荷に伴う圧砕により生産井周囲岩盤に低浸透率域が形成されることも多く、本末転倒となる。このように、如何に生産井周囲の圧砕を最小化し、マルチフラクチャ造成数とその伸張量を最大化することができるのかという問いが本研究のメインの背景である。本問いに答えるための有力な手段として、例えば非火薬類(例:ニトロメタン(以下、NM))の爆燃現象やテルミット反応等により、爆轟ほど速すぎず、水圧破砕ほど遅すぎない動圧(以下、速すぎず遅すぎない载荷圧)生成によるマルチフラクチャ造成が期待できるのではと考えた。しかし、対象とする破砕過程は、爆轟より遅いとはいえ、依然として高速载荷(例:大略数 100 マイクロ秒で 1GPa に達する)の範疇にあり、このため破砕対象の岩質材料は高速かつ 3 次元的に複雑な破壊過程を呈し、かつ生成フラクチャー内へのガス流入・ガス圧作用による更なる亀裂進展を伴う複雑な連成過程を伴う。よって、本過程を高精度にシミュレート可能な解析法無しでは、マルチフラクチャ造成機構の詳細な解明及び最適化に代表される技術開発の推進は極めて困難となる。具体的に述べれば、本研究開始に先立ち、研究代表者の過去研究において、速すぎず遅すぎない载荷圧を生成させることが可能な NM の爆燃による岩質材料の破砕機構の解明に取り組んでいた。しかし、当時開発していたシミュレータ(以下、旧解析法)は、複雑破砕はある程度表現できる一方で、適用対象が 2 次元解析に限定されるという致命的な弱点を有していたため、本研究で目指す定量・最適化の議論を行うためのプラットフォームが存在していなかった。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、速すぎず遅すぎない载荷圧に伴う複雑かつ高速な岩石・岩盤破砕過程を 3 次元かつ高度に表現・解析可能な世界初の爆燃破砕シミュレータを独自に開発し、爆燃破砕によるマルチフラクチャ造成技術とその最適化について研究を推進するためのプラットフォームの構築を目的とした。

3. 研究の方法

上記の旧解析法の欠点を克服するために、“圧力計測・各種力学試験(岩石の動的強度試験)・破砕実験”に基づいて、NM の爆燃やテルミット反応等の薬剤を用いた破砕プロセスを再現可能な数値シミュレータを開発する方法を採用した。圧力計測は、爆燃材・起爆法ごとの圧力モデルパラメータ(立ち上がり速度・最大値・燃焼持続時間・燃焼伝播形態等)の特性化のために、力学試験は数値実験で使用する岩質材料の動的強度・破壊靱性・弾性波速度等の力学物性値の同定のために、また、破砕実験はシミュレータの妥当性の実証のために必須と考えた。

本研究で最も重要となるのは、速すぎず遅すぎない载荷圧に伴う岩質材料の高品質な 3 次元破砕シミュレータの開発である。そこで、3 次元破砕シミュレータに採用する手法として、Hybrid Finite-discrete method(以下、HFDEM)といった最新の手法に注目し、これに旧解析法で培った独自にノウハウを活かす方針を採用した。また、基礎検討の段階から計算量が莫大となることが判明したため、汎用 GPU(Graphic Processing Units)を用いた並列計算も導入も不可欠であったためこれにも取り組んだ。また、NM の爆燃やテルミット反応に伴うガス膨張のモデル化については、粒子法や有限体積法など CFD(Computational Fluid dynamics)の手法に着目した。その上で、HFDEM と CFD の連成シミュレータを試行錯誤で実現することを試みた。

実験面については、NM の爆燃破砕に関する計測データについては、研究代表者の既往研究で得られたデータやその他文献による報告例が手に入ったためこちらを検証対象とした。また、テルミット反応を用いた NRC と呼ばれる破砕剤の生成圧力計測および NRC を実際の岩石に用いた破砕実験については、韓国の全北大学の協力を得て実施した。

その上で、開発したシミュレータと実験結果とを比較・検証することで、シミュレータのキャリブレーションおよび高度化に取り組むことで、マルチフラクチャ造成技術とその最適化について研究を推進するためのプラットフォーム構築に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究採択前の段階において、HFDEM により静的载荷に伴う基礎的な岩石力学試験の 3 次元破砕シミュレータを極めて高度に行えることを確認していたため、速すぎず遅すぎない载荷圧を模した解析も当初問題なく実施できると予想された。しかし、本プロジェクトが採択され、実施に研究を開始した段階で、遅すぎず速すぎない载荷域を模擬的に表現でき、岩石動的破壊力学分野の実験的検討において度々用いられる Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)を用いた解析に当該 HFDEM を適用した。その結果、図 1(右上)に示すように、計算途中段階における原因不明の不安定化が生じ、観察させる高速破砕パターン(図 1 中右下の写真)とは極めて乖離した結果が得られた。実際、NM で計測された载荷圧力波形を HFDEM に導入して試験数値解析を実施したところ、同様の不安定化が見られ、この不安定化の原因を解明し、解決しなければ先に進めない事態となった。そのため、本研究開始後の各年度末の報告でも述べたように、本研究の遂行のためには、本不安定化の原因究明が再優先課題となった。そこで、HFDEM にフォーカスを置き、独自開発した 2 次元や 3 次元の HFDEM コードを用いて、多種多様な岩石の動的破砕問題の検討を通して、本不安定化の解消法を見出すことに成功した。その結

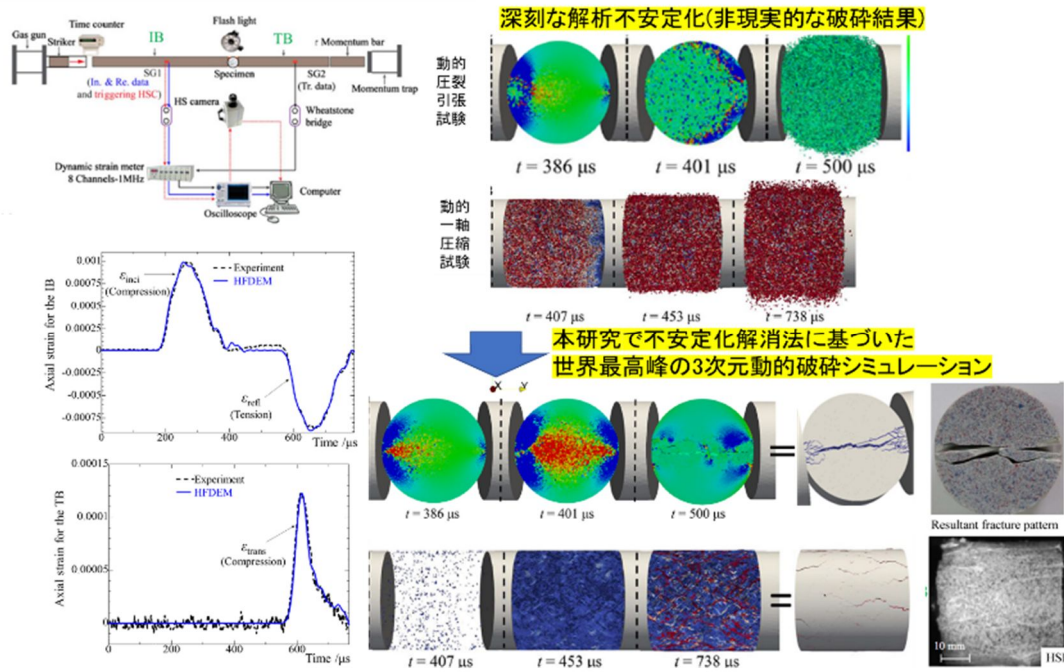


図 1 注・動的試験は、韓国の全北大学および豪州の Monash 大学の協力を得て実施

果の一例を図 1 (下部) に示す。図からわかるように、これまで世界的にもモデル化が困難であった岩石の動的複雑破壊過程を 3 次元に定性・定量的両観点から高度に表現できていることがわかる。なお、提案した不安定化解消法の解決には多大な労力を用いた。他方で、その結果として、国際会議での発表は当然として、当該分野において世界最高峰の国際雑誌に査読付き論文を 7 件掲載される業績を生むことができた点は重要であると考えられ、本プロジェクトによる極めて大きな成果であると考えている。

次に、本研究期間中に実施したテルミット反応を用いた速すぎず遅すぎない载荷に伴う圧力測定実験結果について報告する。一連の実験は、韓国の全北大学の協力を得て、全北大学で実施した。図 2 に圧力計測に用いた計測システムの外観を示す。本実験では、アクリル樹脂ブロックに装薬孔と孔内圧計測のための横孔を導入しており、装薬孔にはテルミット反応による動圧を得るために NRC を装填し、横孔には圧力センサーを独自に作成したアダプターにセットして、センサーで検知されたシグナルを増幅器に送り、増幅信号をオシロスコープで記録した。なお、NRC は非火薬類に分類されるが、高压が生成し、また起爆には雷管を用いるため、安全面に十分注意するため、防爆チャンバー内で圧力計測を実施した。なお、防爆チャンバーに強度十分な透明窓を設置し、そこから燃焼の様子を高速度カメラで観察することにより、テルミット反応の空間内伝播速度を可視化にも取り組んだ。

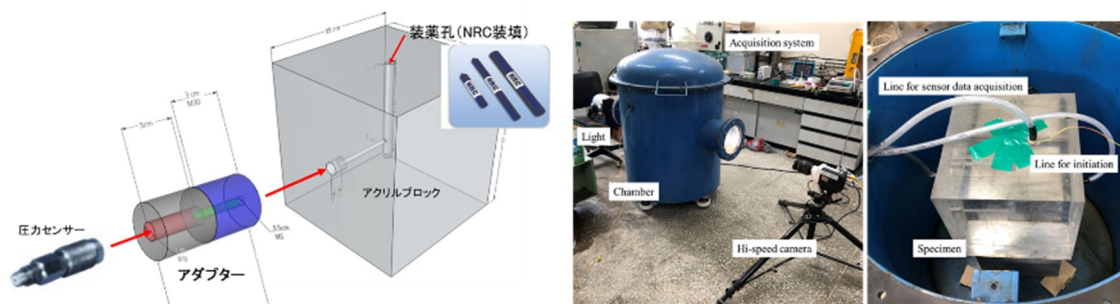


図 2

図 3 に計測された圧力波形の一例および観察されたテルミット反応の空間内伝播を示す。まず、圧力計測結果から、雷管自体による圧力特性も加味すると、NRC の薬量 10g の測定結果より、大略最大圧 80MPa 程度のピーク圧力が 100 μ s 程度の時間で達成されることがわかる。なお、薬量を増やした場合でも、この载荷速度はほぼ変わらないことも明らかにした。この結果から、NRC が本研究で対象とする速すぎず遅すぎない载荷圧を生成することに成功していることを確認した。本結果は興味深いことに、NM の圧力測定結果 (研究代表者の過去論文 Fukuda et al., Numerical simulation of the fracture process in concrete resulting from deflagration phenomena, Int. J. Fract.,180:163-175, 2012) と極めて類似した特徴を示すことを明らかにした。その際は、測定に用いたアクリル樹脂の周囲には 4 本のマルチフラクチャが造成されたが、本 NRC では、類似した载荷特性に関わらず、アクリル樹脂ブロックは 2 分されるだけの結果となった。なお、雷管についても無視できない圧力が生じているが、雷管だけで本実験を複数回実施してもアクリルに損傷は生じなかったため、NRC が破碎機構を担っていることを確認した。また、

図 3 の燃焼の空間伝播過程プロセスの可視化結果から、年商伝播速度は大略 1000m/s 程度であることが確認され、爆轟の空間伝播速度より遥かに遅い速度で空間を伝播している様子を明らかにした。

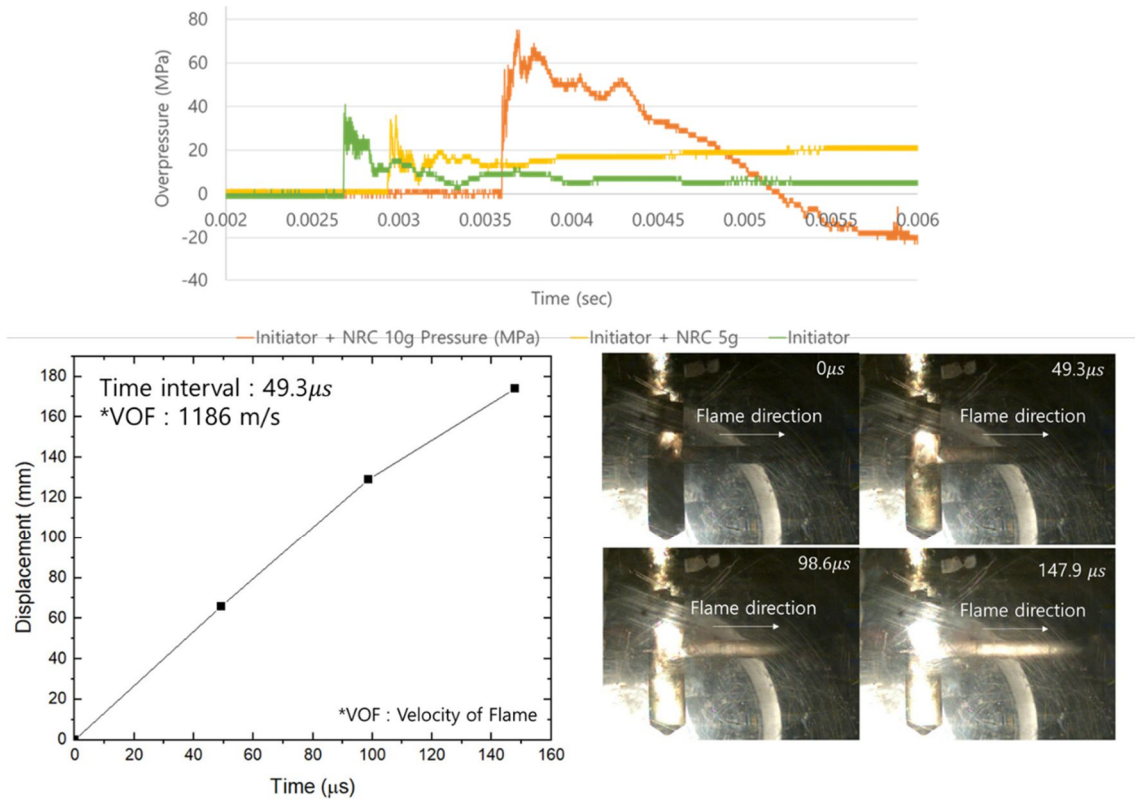


図 3

続いて、NRC による速すぎず遅すぎない载荷圧を用いて、実際の岩石ブロックの破碎試験を韓国の全北大学で実施した。600mm × 680mm × 680mm 角の岩石ブロックを複数用意し、そこに NRC の薬量を小割発破の設計式なども踏まえて試行錯誤的に設定し、破碎実験を行った。一例として、図 4 に、NRC が 50g の場合の装薬パターンと岩石ブロックの試験前後の様子を示す。なお、本試験は規模的に室内実験の実施は厳しく、全北大学内において、韓国国内の法規にのっとり防爆シートをブロックに用いて、さらにその上からラバーシートを設置し、破碎片の飛散防止に最大限配慮した(このため破壊プロセスは観察できなかった)。図 4 に示す破碎結果は典型的な破碎パターンを示しており、この場合、アクリルの場合と同様に、岩石ブロックは 2 分させるだけとなった。なお、現在破碎実験が終了している岩種は斑レイ岩のみであり、この場合、薬量を変更してもほぼ同様の破碎パターンが得られることがわかった。

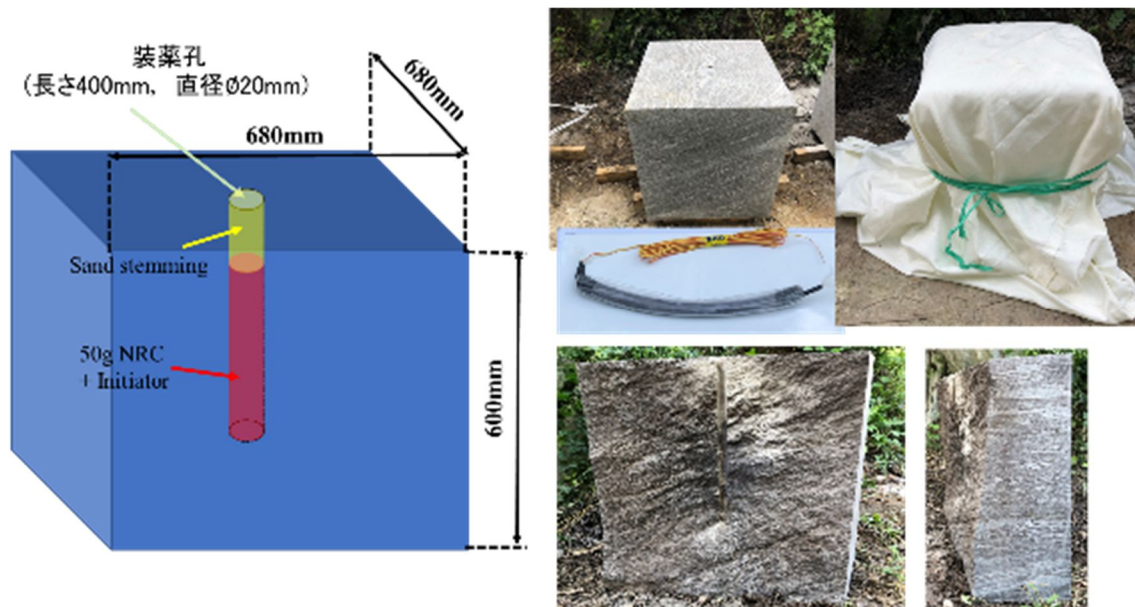


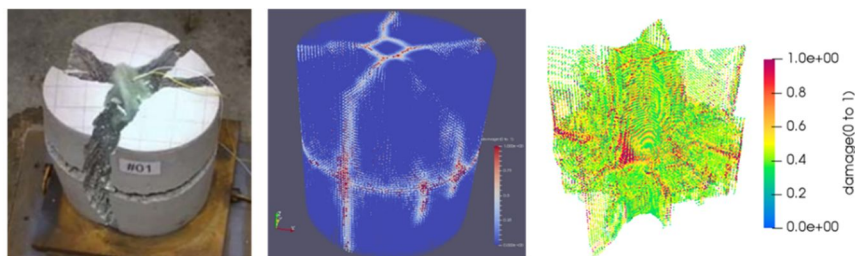
図 4

以上の実験的知見および上記で不安定化を克服した高度 3 次元破碎シミュレータに基づき、最終年度では、速すぎず遅すぎない载荷圧に伴うマルチフラクチャ造成シミュレータの開発に取り組んだ。まず、圧力モデルについては、これまで提案している圧力モデルを計測された圧力波形に対してフィッティングし、それをシミュレータに実装した。なお、CFD による燃焼ガス解析法については、Smoothed

Particle Hydrodynamics (SPH)法や有限体積法など種々のスキームに基づいた手法を開発し、連成を試みたが、生成き裂内部にガスがうまく流入しない現象が見られた。この解決法については、本研究期間内に解決することが困難であると考えられたため、ここでは Gas Expansion Model (GEM) という手法を提案し、実装することにした。GEM では、図3の燃焼伝播特性等の実験的な事実に基づき、装薬孔から3次元的に広がるガスゾーンを設定し、独自開発のアルゴリズムにより装薬孔から直接連結しているき裂ネットワークを抽出し、ガスゾーンに含まれている連結き裂にガス圧を作用させるモデルである。これにより、当初の目標よりは若干妥協を迫られたものの、目標とするマルチフラクチャ造成シミュレータを形にすることに成功した。そこで、開発したシミュレータを用いて NM および NRC (テルミット反応) の破碎パターンの再現解析を行うことにした。

図5に圧力計測結果 NM および NRC の実証実験を模擬した数値実験結果を示す。なお、NM の破碎実験は、山地・中森 (山地 宏志, 中森 純一郎: 放電破碎によるコンクリートの破壊機構, 三井住友建設技術開発センター報告第 12 号 pp.67-72, 2014.) によって実施されたコンクリート破碎実験を対象とし、他方で NRC については、図4で報告した岩石破碎実験を対象とした。なお、斑レイ岩自体の物性が未知であったため、全北大学の SHPB を用いた動的引張・動的圧縮・動的せん断試験を行うことで岩石の物性の同定を行った。NM の破碎実験と数値実験を比較すると、極めて良い対応を示しており、実験および数値解析の観点から装薬孔周囲にマルチフラクチャが造成されていることがわかる。これにより、開発したシミュレータにより極めて合理的な結果を得ることができることを明らかにした。他方で、NRC の解析結果については、上述したように、実際の破碎実験では供試体を 2 分するような主破断面が観察されたが、数値実験結果は、装薬孔周囲にマルチフラクチャが造成されることを示している。この差異については、今回対象とした岩石が内部に割れ目構造を含む斑レイ岩であったためである可能性が高い。なお、花崗岩ブロックについても既に用意してあるが、コロナ禍のため、韓国国内の情勢および研究代表者が韓国へ渡航できる機会の見通しが今後全く不明であるために、今後機会を見つけて実施していきたい。

NM



実験: 山地 宏志, 中森 純一郎: 放電破碎によるコンクリートの破壊機構, 三井住友建設技術開発センター報告第12号pp.67-72, 2014.

NRC

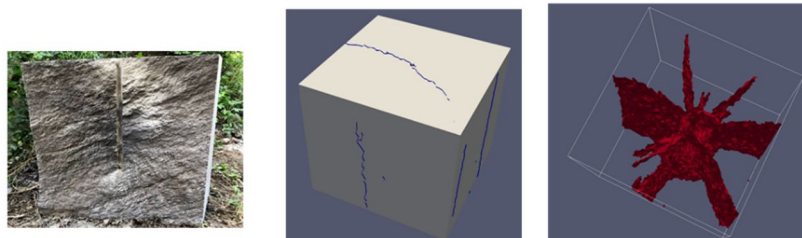


図 5

以上より、当然まだ多くの課題を残してはいるものの、本研究の遂行により、当初目的として設定したマルチフラクチャ造成の関する高度な技術的検証を行うためのプラットフォームを構築することに成功したと考えている。また、研究中生じた数多くの困難を解決する中で得られた知見をまとめた論文が複数の国際誌に採択された点も極めて重要であると考えられる。さらに、今回開発したシミュレータ、最近期待されている石炭層におけるバイオメタンの地下鉱床開発でマルチフラクチャや、爆燃現象が火薬類取締法の対象外という利点を積極的に利用して、土木工学分野における構造物の高速斫り技術や震災時の落石等の迅速な構造物解体等 (注: ただ高速に壊すだけでなく高度なフラクチャー進展制御が必要) にも利用できると予想され、これらの点で本研究の工学的な意義・波及効果・普遍的な重要性があると考えられ、本研究を実施した意義は大きいと結論する。今後は、本研究で構築したプラットフォームをさらに発展させ、破碎対象となる岩石・岩盤の内部構造と载荷特性が如何にマルチフラクチャの造成・非造成に影響を与えるかを明らかにし、こうした条件ごとに最適な载荷特性を見出していきたいと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fukuda Daisuke, Mohammadnejad Mojtaba, Liu Hongyuan, Zhang Qianbing, Zhao Jian, Dehkoda Sevda, Chan Andrew, Kodama Jun-ichi, Fujii Yoshiaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Development of a 3D Hybrid Finite-Discrete Element Simulator Based on GPGPU-Parallelized Computation for Modelling Rock Fracturing Under Quasi-Static and Dynamic Loading Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 1079 ~ 1112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-019-01960-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fukuda Daisuke, Mohammadnejad Mojtaba, Liu Hongyuan, Zhang Qianbing, Zhao Jian, Dehkoda Sevda, Chan Andrew, Kodama Jun-ichi, Fujii Yoshiaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Development of a 3D Hybrid Finite-Discrete Element Simulator Based on GPGPU-Parallelized Computation for Modelling Rock Fracturing Under Quasi-Static and Dynamic Loading Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 1079 ~ 1112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-019-01960-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Han Haoyu, Fukuda Daisuke, Liu Hongyuan, Salmi Ebrahim Fathi, Sellers Ewan, Liu Tingjin, Chan Andrew	4. 巻 127
2. 論文標題 Combined finite-discrete element modelling of rock fracture and fragmentation induced by contour blasting during tunnelling with high horizontal in-situ stress	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	6. 最初と最後の頁 104214 ~ 104214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmms.2020.104214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mohammadnejad Mojtaba, Dehkoda Sevda, Fukuda Daisuke, Liu Hongyuan, Chan Andrew	4. 巻 12
2. 論文標題 GPGPU-parallelised hybrid finite-discrete element modelling of rock chipping and fragmentation process in mechanical cutting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 310 ~ 325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jrmge.2019.12.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fukuda Daisuke, Mohammadnejad Mojtaba, Liu Hongyuan, Dehhoda Sevda, Chan Andrew, Cho Sang Ho, Min Gyeong Jo, Han Haoyu, Kodama Jun-ichi, Fujii Yoshiaki	4. 巻 43
2. 論文標題 Development of a GPGPU parallelized hybrid finite discrete element method for modeling rock fracture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 1797 ~ 1824
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nag.2934	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Han Haoyu, Fukuda Daisuke, Liu Hongyuan, Fathi Salmi Ebrahim, Sellers Ewan, Liu TingJin, Chan Andrew	4. 巻 103
2. 論文標題 FDEM simulation of rock damage evolution induced by contour blasting in the bench of tunnel at deep depth	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tunnelling and Underground Space Technology	6. 最初と最後の頁 103495 ~ 103495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tust.2020.103495	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fukuda Daisuke, Liu Hongyuan, Zhang Qianbing, Zhao Jian, Kodama Jun-ichi, Fujii Yoshiaki, Chan Andrew Hin Cheong	4. 巻 138
2. 論文標題 Modelling of dynamic rock fracture process using the finite-discrete element method with a novel and efficient contact activation scheme	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	6. 最初と最後の頁 104645 ~ 104645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmmms.2021.104645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 福田大祐・LIU HONGYUAN・CHO SANG-HO・児玉淳一・藤井義明
2. 発表標題 独自開発の2・3次元FDEMシミュレータの最近の適用事例および今後の展望
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Fukuda, S.H. Cho, H. Liu, A. Chan, J. Kodama, Y. Fujii
2 . 発表標題 Application of peridynamics to dynamic fracture process analysis of rock-like materials
3 . 学会等名 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, Okinawa, Japan, 2019, Paper ID:RDS-R-0145 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D.Fukuda, M. Mohammadnejad, H.Liu, H. Han, J. Kodama, Y. Fujii
2 . 発表標題 Recent development and application of hybrid finite-discrete element simulator for rock failure process
3 . 学会等名 Proc. of the 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future, Dec. 1, Okinawa, Japan, 2019, Paper ID:2-3-1 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Han, D. Fukuda, H. Liu, E.F.Salmi, E. Sellers, Andrew Chan
2 . 発表標題 Hybrid finite-discrete element analysis of smooth blasting in the TASQ Tunnel
3 . 学会等名 Proc. of the 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future, Dec. 1, Okinawa, Japan, 2019, Paper ID:2-3-2 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Liu, D. Fukuda
2 . 発表標題 Some Developments and Engineering Applications of GPGPU Parallelized FDEM
3 . 学会等名 The Fourth Australasian Conference on Computational Mechanics, University of Tasmania, Sandy Bay Campus, 28-29th Nov. 2019., PaperID:C4.1 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Mohammadnejad, H. Liu, D. Fukuda, A. Chan, S. Dehkhoda
2. 発表標題 Three dimensional FDEM simulation of rock cutting
3. 学会等名 The Fourth Australasian Conference on Computational Mechanics, University of Tasmania, Sandy Bay Campus, 28-29th Nov. 2019., PaperID:C5.4 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田 大祐・趙 祥鎬・LIU Hong・CHAN Andrew・児玉 淳一・藤井 義明
2. 発表標題 ペリダイナミック理論に基づいた爆燃・爆轟等の高速載荷に伴う岩質材料の破壊過程解析
3. 学会等名 第 47 回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会「土木会館」2 階 講堂, 会議室, 2020 年 1 月 9 日~10 日, 講演番号6
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Fukuda, M. Mohammadnejad, H. Liu, A. Chan, SH CHO, SW Oh, GJ Min, J. Kodama, F. Fujii
2. 発表標題 GPGPU-based 3-D Hybrid FEM/DEM for Numerical Modelling of Various Rock Testing Methods
3. 学会等名 12th ANZ Young Geotechnical Professionals Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Liu, D. Fukuda, M. Mohammadnejad, H. Han, A. Chan
2. 発表標題 Three-dimensional Hybrid Finite-discrete Element Modelling of Rock Failure Process
3. 学会等名 ARMS10(the ISRM 10th Asian Rock Mechanics Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Fukuda, H. Liu, M Mohammadnejad, A. Chan, S.H. Cho, GJ Min, J.Kodama, Y. Fujii
2. 発表標題 Development of 2-D Hybrid FEM/DEM Method Code Using GPGPU
3. 学会等名 ARMS10(the ISRM 10th Asian Rock Mechanics Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田大祐
2. 発表標題 発破シミュレータの最近-どんなものがあるか？主に岩石の動的破壊力学の見地から-
3. 学会等名 2020年度動的破砕技術研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福田大祐：北海道大学ホームページ https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/rml/daisuke/japanese.html 福田大祐：Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Daisuke_Fukuda2 福田大祐：Researchmap https://researchmap.jp/daichang1129 Fukuda Daisuke - Google Scholar Citations http://scholar.google.com/citations?user=r1dSYFsAAAAJ&hl=en
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	University of Tasmania	Monash University	CSIRO	他1機関
韓国	Jeonbuk National University			