

## 2023 JACM 総会のご案内

岡田 裕 JACM 会長 (東京理科大)

2020年に始まった新型コロナウイルス感染症流行以前は、JACM 関連の計算力学会議開催に合わせ、JACM 総会を開催しておりました。2020年から2年間は関連国際会議がいずれもオンライン開催となったこともあり、オンライン (Zoom) で JACM 総会を開催してきました。昨年は、新型コロナウイルス感染症流行が収まりつつありましたので、対面・オンライン (Zoom) のハイブリッド開催でした。本年も対面・オンラインハイブリッドにて JACM 総会を開催する予定です。昨年同様第一部を通常の総会として名誉員証授与式や JACM Award 授賞式を行い、第二部は JACM 賞受賞者セミナーとして過去に JACM 賞を受賞された方の学術講演をしていただく予定です。本年は、2021年 Young Investigator Award を受賞された大谷智仁先生 (大阪大学) と 2022年 Computational Mechanics Award 受賞の大島伸行先生 (北海道大学) にご講演をお願いしています。

総会終了後は懇親会も予定しています。参加申込方法等詳細につきましてはメーリングリストにてお知らせする予定です。皆様のご参加をお待ちしています。

### 2023年 JACM 総会 (予定)

日時: 2023年9月9日(土) 13:30~17:00

場所: 早稲田大学 (詳細決定後、ご案内します)

参加費: 無料, 懇親会費は別途申し受けます

#### 第一部 2023 JACM 総会 (13:30~15:00)

名誉員証授与式, 2023年 JACM Award 授賞式等

#### 第二部 JACM 賞受賞者セミナー (15:00~17:00)

懇親会 (17:00~19:00)

# JACM 賞受賞者セミナーシリーズ開催報告

塩谷 隆二 JACM 副会長 (東洋大学)

第3回 JACM 賞受賞者セミナーの開催報告を致します。2023年3月4日(土)夕刻に開催しました。これは、JACM 賞受賞者の皆様の最新の研究成果を会員の皆様と共有する目的の下、JACM の取り組みとして開始したセミナーシリーズ第3回目になります。前回より対面・オンラインハイブリッド形式として開催しており、講演終了後に簡単な懇親会を開催し、意見交換と研究交流の場を持つことができました。

第3回目は下記の内容にて開催いたしました(写真1)。

日時：2023年3月4日(木) 15:00-17:00

場所：早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構

1. 開会あいさつ JACM 会長 東京理科大学 岡田裕

2. 2020 JACM YIA 柴沼一樹氏

(東京大学大学院工学系研究科 准教授)

鋼板の脆性亀裂伝播停止挙動の再現に向けた重合メッシュ法に基づく高速亀裂伝播シミュレーションモデルの開発

3. 2020 JACM CM Award 磯部大吾郎氏

(筑波大学システム情報系構造エネルギー工学域 教授)

構造動力学をはり要素で解く ～建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで～

4. 閉会あいさつ JACM 副会長 東洋大学 塩谷隆二

第3回目は約30名の方々にご参加いただいています。柴沼一樹先生と磯部大吾郎先生から最先端の解析事例をご紹介下さいました。内容については、本号の記事としてご寄稿頂いた記事をご覧ください。次回は2023年9月9日(土)にJACM 総会時に予定しております。引き続きハイブリッド開催となりますので、ぜひご参加下さいますようお願い致します。



柴沼一樹氏



磯部大吾郎氏



写真1 参加者集合写真

# 構造動力学をはり要素で解く

## ～建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで～

### Solving structural dynamics using beam elements

#### - From collapse analysis of buildings to control of robotic architectures -

磯部 大吾郎 (筑波大学)

本講演では、建物の崩壊解析に用いた ASI 法 (Adaptively Shifted Integration technique) および ASI-Gauss 法の理論、破断や接触などのアルゴリズム、それらの適用例として世界貿易センタービルへの飛行機衝突解析、進行性崩壊解析、発破解体解析、地震時棟間衝突解析、漂流物衝突解析、天井の脱落再現解析、家具の地震時挙動解析などを紹介した。さらに後半では、有限要素法に基づいて開発された並列的逆動力学計算法の理論、その適用例として様々なリンク系のフィードフォワード制御実験、トルクキャンセリングシステムなどを紹介した。詳細については、文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

#### 1. ASI-Gauss 法の理論と適用例

1980 年代に川井忠彦博士が剛体ばねモデル (Rigid body spring model, RBSM)<sup>2)</sup>を発表する。このモデルは、複数の剛体棒とヒンジばねにより極限状態でののはりの変形を効率良く表現するモデルであったが、有限要素との接点はなかった。すると、川井博士の弟子で文献<sup>3)</sup>の共著者だった都井裕博士が物理的なばねの位置とはり要素の数値積分点位置の関係を発見し、これを用いた Shifted Integration 法 (SI 法) を 1990 年に発表する<sup>4)</sup>。この手法は、塑性ヒンジが発生することが予想される位置にあらかじめ弾性ばねをシフトしておき、塑性化が判定された後に塑性ばねに変更するというものであった。やや工学的センスが必要な手法ではあるが、有限要素ではご法度であった数値積分点のシフティングを初めて採り入れた、画期的な手法であった。

さらに、ばね (または数値積分点) を材料性状に合わせて順応的にシフティングするという、順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法) が都井・磯部により発表される<sup>6)</sup>。川井博士が剛体ばねモデルを発表した 10 年余り後の 1993 年のことである。部材の弾性状態、塑性状態のそれぞれにおいて適切な位置にばね (または数値積分点) をシフティングするため、通常有限要素法や SI 法と比べても計算効率が格段に上がった。Bernoulli-Euler のはり理論に基づく 3 次はり要素および Timoshenko のはり理論に基づく線形はり要素の両者に対し ASI 法は構築され、様々な弾塑性解析に使用された。特に線形 Timoshenko はり要素を用いた ASI 法は、1 点積分法を使用しているために片端での破断面を表現することができ、崩壊解析を実現するには最適な手法であった。

その一方で、上記の線形 Timoshenko はり要素を用いた ASI 法には、唯一弱点があった。それは、いわゆる "shear locking" を防止するために次数を低減させた 1 点積分法を用いる必要があり、そのため要素の変位関数が線形関数で表現され、弾性状態における曲げ変位精度があまり良くない、という点である。それを克服したのが 2007 年に発表された ASI-Gauss 法<sup>7)</sup>である。これは、線形 Timoshenko はり要素 2 つを一組とし、弾性状態ではそれらの応力評価点を Gauss の 2 点積分法に使用される積分点位置に配置す

るよう、数値積分点をシフティングしておくというものである。思わぬ失敗から得られた産物であったが、弾性変位解に劇的な精度向上が見られたため、18~19 世紀の天才数学者に敬意を表して名前を付け、以後様々な問題に適用している。本講演では、その理論と適用例を紹介した。

#### 2. 並列的逆動力学計算法の理論と適用例

通常、有限要素法は物体の様々な数値解析に適用され、例えば構造解析では物体内に生じる応力や変形を評価するために使われる。しかしその一方で、有限要素法により目標とする変形や動作を実現するために必要な外力やトルクを算出し、それをアクチュエータの入力信号に変換することができれば、ロボット機構のような大きく動作する物体の制御に適用することも可能となる。本講演では、このような発想に基づき開発された並列的逆動力学計算法の理論<sup>8)</sup>、およびそれを実際にロボット機構の制御に適用した事例<sup>10)11)</sup>を紹介した。

#### 参考文献

- [1] 磯部大吾郎, はり要素で解く構造動力学 ～建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで～ Fortran90・C++ソースコード付, 丸善出版, ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.
- [2] Kawai T., Some Considerations on the Finite Element Method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 16, 1980, pp.81-120.
- [3] Kawai T. and Toi Y., A Discrete Method of Limit Analysis and Its Application to Plastic Stability Problems of Structural Members, *Engineering Structures*, 5-1, 1983, pp.38-44.
- [4] 都井 裕, 骨組構造および回転対称シェル構造の有限要素解析における Shifted Integration 法について, 日本造船学会論文集, 168, 1990, pp.357-369.
- [5] Toi Y., Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 31, 1991, pp.1537-1552.
- [6] Toi Y. and Isobe D., Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36, 1993, pp.2323-2339.
- [7] Lynn K.M. and Isobe D., Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 69-12, 2007, pp.2538-2563.
- [8] 磯部大吾郎, 有限要素法を用いたリンク機構の逆動力学計算, 日本ロボット学会誌, 20-6, 2002, pp.647-653.
- [9] Isobe D., A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, *Advanced Robotics*, 18-9, 2004, pp.859-880.
- [10] 磯部大吾郎, 加藤 昭博, フレキシブル・リンク系のモデルベースド・フィードフォワード制御, 日本ロボット学会誌, 25-4, 2007, pp.625-631.
- [11] Isobe D., Nakayama B. and Kondo K., A Torque-Canceling System Using the Inverse Dynamics Parallel Solution Scheme, *Advanced Robotics*, 28-2, 2014, pp.119-132.



# 鋼板の脆性亀裂伝播停止挙動の再現に向けた重合メッシュ法に基づく 高速亀裂伝播シミュレーションモデルの開発

柴沼 一樹 (東京大学)

2023年3月4日に開催されたJACM受賞者講演会において講演した要旨を報告する。

## 1. 研究背景

近年、市場の国際化による海上物流量の増加に背景として、船体構造の急速な大型化が進行している。これらの船体構造にはこれまでにない極厚の鋼板が使用されることから脆性破壊による危険性の増大が危惧されている。脆性破壊による大規模損傷を防ぐためには、亀裂の「伝播」を制御して安全に「停止 (アレスト)」させる安全設計が必要である。しかしながら、その設計基準は極めて限定された条件下の実験結果により規定されたものであり、その妥当性や一般性には大きな懸念があるのが現状である。一方で、大規模鋼構造における脆性亀裂伝播現象を高精度に再現・評価可能な理論やシミュレーション未だ確立されていない。

以上の社会的・学術的背景に対し、著者らは2次元問題を対象として重合メッシュ法を基礎とした高速亀裂伝播モデルを提案し、通常の有限要素法を用いた方法と比較して計算に要する自由度を大幅に低減可能であることを示すことで、大規模構造体における脆性亀裂伝播現象の高精度な再現・評価に向けた可能性を見出した[1]。

本研究では、重合メッシュ法を基礎として、3次元構造体における高速亀裂伝播・停止現象を高精度・高効率に再現可能なモデルを提案する。Generation phase 解析による精度検証、Application phase 解析による妥当性検証を行い、V&Vの両面からその有効性を確認した。

## 2. モデル

大規模構造物における脆性亀裂伝播・停止を高精度に再現するためには、 $10^0$  m オーダーの構造部材中における亀裂前方  $10^4$  m オーダーの領域の応力場を高精度に評価する必要がある [2]。この実現には、(i) 高精度、(ii) 高計算効率、(iii) アルゴリズムの簡潔性、および、(iv) 弾塑性問題への適用性、を全て満足する必要がある。しかし、本研究では、重合メッシュ法に基づく高速亀裂伝播モデルを構築することで、標準の有限要素法、アダプティブメッシュ法、拡張有限要素法といった従来の手法の有する全ての課題を解決した提案を行った。

本研究の提案手法では、構造体全体を比較的低解像度のグローバルメッシュでモデル化し、高速で移動する亀裂前縁近傍場により高解像度のローカルメッシュを導入する。

実構造物に生じる脆性亀裂は一般にモード I 破壊である事実を考慮して、亀裂は対称面に対する境界条件によってモデル化する。動的亀裂伝播はローカルメッシュを対象とした節点力解放法でモデル化し、節点力の解放に関する各計算ステップの終了時点でローカルメッシュの更新を行う。(詳細は文献[3]を参照)

ローカルメッシュはその時点の亀裂前縁形状に基づき生成する。このため、対象構造が有限の大きさを有し、亀裂前縁が表面に達する場合、ローカルメッシュの一部がグローバルメッシュの外側にはみ出ることになる。この場合は Heaviside 関数によるエンリッチメントを用いることでグローバル・ローカルメッシュ間の不整合に起因した精度

低下を効果的に解消することができる[4]。

鋼の脆性亀裂伝播・停止挙動は亀裂前縁近傍の局所応力により説明可能であることが明らかとなっているが[2]、本研究では簡単のために典型的な弾性体として知られるPMMAを対象とした。PMMAの高速亀裂伝播・停止挙動は動的応力拡大係数により記述可能であるとされるが、本研究では、領域積分形式により動的J積分を評価した。

## 3. 精度検証 (Verification) [3]

本研究で開発した重合メッシュ法に基づく高速亀裂伝播モデルの精度検証を目的として、最も基本的な3次元問題である無限体中を高速伝播する円形亀裂を対象とした Generation phase analysis を実施した。従来の有限要素法では実現不可能な低計算コストでかつ高精度が実現可能であることを実証した。

## 4. 妥当性検証 (Validation)

従来、弾性体を対象とした多くの高速亀裂伝播・停止試験が実施されてきたが、そのほとんどは2次元的な評価に限定されており、3次元問題としての高速亀裂伝播・停止挙動を詳細に検証できるような結果は著者の知る限り公開されていない。そこで、ここではまず、弾性透明樹脂 (PMMA) を用いた高速亀裂・停止実験を実施し、最新の高速度カメラを用いた高速亀裂伝播停止挙動の亀裂全円形状計測を行った。さらに、開発したモデルによる Application phase analysis によって得られた高速亀裂伝播・停止挙動に関する予測結果と実験結果の比較を行うことで、開発したモデルの妥当性を実証した。

## 謝辞

本講演で紹介した研究は科学研究費補助金 基盤研究 (A) 「革新的亀裂伝播制御を実現する脆性亀裂アレスト設計戦略」(課題番号: 22H00242) の助成により実施したものである。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] K. Kishi, Y. Takeoka, T. Fukui, T. Matsumoto, K. Suzuki, K. Shibamura\*, Dynamic crack propagation analysis based on the s-version of the finite element method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 366 (2020), 113091.
- [2] F. Yanagimoto\*, K. Shibamura, K. Suzuki, T. Matsumoto, S. Aihara, Local stress in the vicinity of the propagating cleavage crack tip in ferritic steel, *Materials & Design* 144 (2018), 361-373.
- [3] K. Shibamura\*, K. Kishi, T. He, N. Morita, N. Mitsume, T. Fukui, S-version finite element strategy for accurately evaluating local stress in the vicinity of dynamically propagating crack front in 3D solid, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 399 (2022), 115374.
- [4] T. He, N. Mitsume, F. Yasui, N. Morita, T. Fukui, K. Shibamura\*, Strategy for accurately and efficiently modelling an internal traction-free boundary based on the s-version finite element method: Problem clarification and solutions verification, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 404 (2023), 115843.