発 行 所　日本機械学会 計算力学部門
お問合せ　wwwadmin@jsme.or.jp

ISSN 1340-6582

日本機械学会 計算力学部門

CMD Newsletter

COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニュースレター　No. 66　　November, 2021

目 次

■ 特集 1：計算固体力学の深化・進展

・特集にあたって …… 近畿大学 …… 和田 義孝 …… 2
・き裂進展挙動への深層学習の適用 …… 近畿大学 …… 和田 義孝 …… 3
・機械的特性の観点からの材料開発への機械学習の適用 …… 慶應義塾大学 …… 村松 眞由 …… 6
・従来の J 積分法と任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元 J 積分法
……エムエスシーソフトウェア株式会社 … 荒井 皓一郎 …… 9
・レベルセット XFEM の CFRP 積層板の損傷進展解析への適用… 上智大学 …… 長嶋 利夫 …… 14

■ 特集2：安全で信頼できるCAEの利用を支える計算力学技術者の国内資格認定制度、及び海外資格認定制度との国際相互認証

・安全で信頼できる CAE の利用を支える計算力学技術者の国内資格認定制度、及び海外資格認定制度との国際相互認証
……東芝インフォメーションシステムズ株式会社 …… 吉田 有一郎 …… 20
・計算力学技術者資格制度と国際相互認証（PSE）の活用と SOLIZE の取り組み
…… SOLIZE 株式会社 …… 岩井 信弘 …… 24
・航空機エンジン開発品質保証への計算力学技術者認定制度の活用
…… 株式会社本田技術研究所 …… 陳内 鉄生 …… 27

■ 部門からのお知らせ

・講習会報告「機械学習×熱・流体工学の最先端」，３部門合同オンライン講習会
…… 東京大学 …… 高木 周 …… 29
・計算力学技術者２級（固体力学分野の有限要素法解析技術者）認定試験対策講習会
（2021 年９月１日～２日、オンライン）開催報告
…… 慶應義塾大学 …… 高野 直樹 …… 30

※目次の表題をクリックすると、本文が表示されます。

特　集　1：計算固体力学の深化・進展

特集にあたって

和田　義孝
近畿大学

計算力学は学際的分野として発展してきた歴史があります。CMDニュースレター No.59特集「計算力学の過去、現在、未来 ～３０年前にどのような未来を描いていたか～」で矢川元基先生が計算力学部門発足当時の回顧に「計算力学は、それ自身が先端技術として展開するとともに、既存の分野（機械学会で言えば、材料力学、熱・流体力学、機械力学、設計工学など）と密着した新たな融合体として発展するという両面を持っております。言い換えれば従来の分野を縦糸の1本1本とすれば計算力学は横糸に相当すると言えましょう。」と述べております。計算力学の技術を1つの糸と考えれば、各分野の専門性も他の糸といえます。この2つがらせんを描きながら30年を超える切磋した今、計算固体力学の深化と進展を特集させていただきました。

計算固体力学というと本来はだいぶ広範囲な領域に渡るものですが、30年前の先端領域であった破壊力学の深化、メッシュレス手法の進展、マルチフィジックス、マルチスケールシミュレーションの進展、そしてそれら領域とAIの融合という、最新の試みを紹介する構成になりました。本特集は、計算力学部門広報委員会幹事である篠崎明氏（みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）から相談を受け、議論を重ねた結果、寄稿いただいた諸氏の推薦をさせていただきました。また、部門長を務めていらっしゃる高野直樹先生にもご助言いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

データサイエンス分野の発展により計算機科学のみならず計算力学分野においても機械学習やAIの技術から大きく影響を受けております。その影響がどのように固体力学分野に影響を与えているか、理解するための糸口になれば幸いです。

話は最初に戻って恐縮ですが、最初に紹介いたしましたCMDニュースレター No.59特集のタイトルは、2017年に近畿大学にてCMD2017を企画・開催させていただいたときに、矢川元基先生にご相談させていただき決めた特別座談会のテーマそのものです。印象的だったのは若い世代の研究者が大変興味深かったと感銘を受けたことでした。情報があふれる世の中において、過去のリアルな話は興味が湧く対象なのだと思われます。次の30年に向けて現在の取り組みがどのようなものであるか、そして、どのように未来へつなげていくのかを皆様と一緒に模索したいと思います。

き裂進展挙動への深層学習の適用

和田　義孝
近畿大学

1.　はじめに

2012年に開催された大規模画像認識コンペティションであるILSVR(ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge)においてディープラーニング（深層学習）[1]の有効性が画像認識において示されその可能性に多くの人々が期待する状況になってもうすぐ10年の歳月が流れようとしている。しかし、計算力学や数値シミュレーションといった分野こそ、ディープラーニングとの親和性が高いと期待するもののその応用方法・利用方法については徐々に先行研究事例が増えてきているが、CAEを利用している企業全般にこの技術が普及しているとは言えない。もともと多くのデータを必要とする分野（材料設計、数値流体力学等）においては特徴量を抽出する多次元非線形マッピングの技術としてディープラーニングの利用例が複数報告されている[2]。本稿ではサロゲートモデル（代替モデル）への期待と現状、そして最も重要な予測の質を高めるための重要な視点を示す。具体例として、重合メッシュ法によるき裂進展データを生成し、どのように学習するのがサロゲートモデルの構築に有効なのかを裂進展挙動の予測を通して考察する。

2.　サロゲートモデルへの期待と現状

CAEを代替するサロゲートモデルは、AI-driven CAE10) やReal-time CAEなどと呼ぶのが適切であると思われる。しかし、まだ市民権を得たわけではない。CAEを代替することを念頭に置くと、数値を予測するためエンジニアはかなりの精度（CAEと遜色ない）を要求している。しかし、非線形の時間発展問題を数千から数万ケースも失敗しない解析の実施は現状では不可能である。つまり、学習データを用意するという点においても実験計画的な方法で学習に必要とされるデータの総量を相当量減じる必要がある。

一見、機械学習という枠組みでとらえれば大きな差がないと理解されているがよく見ると分類問題とサロゲートモデルの構築では、データの量、要求精度、データそのものの質などが根本的に異なるため適したニューラルネットワークや学習アルゴリズムなどを見出すためのさらなる調査・研究が必要である。

設計において重要な前提を図1に示す。x_nは設計変数、y_mは評価対象である。一般的にn>mであるため簡単には設計逆問題にあたる$f^{-1}(y')$が求まらない。設計とは経験による制約を与えることによりパレート解を求める最適化問題に置き換えている。現状では$y = f(x)$はCAEにより解くことが一般的であるが多くの場合で計算コストが必要である。機械学習を用いたサロゲートモデルでは学習コストは高いが、予測コストを大幅に低減する（予測時間が1/100や1/1000などになる）可能性がある。具体的なニューラルネットワークの構成は多くの文献やライブラリに提示されており比較的簡単に学習を始めることができる。

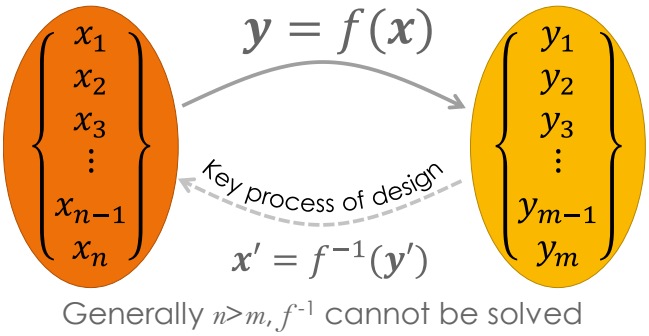


図1　サロゲートモデルの適用箇所

3.　ＣＡＥにおけるサロゲートモデル

工学応用への問題を考えると、入力と出力（予測値）の組み合わせは精度そのものに直結する重要なファクターである。また、学習データはどのように、どの程度準備すればよいのかということもいまだ定量的かつ一般的な解釈ができていない。物理現象は空間、物性、物理量（変位、速度、ひずみ、応力、温度等）が入力または出力されることになる。物理量を学習する位置の取扱いを一般化しなければ座標系依存の学習となる。こういった場合、そこから法則を見出すことは困難である。形状がパラメトリックに表現できるのであれば、正規化し入力パラメータ数を減じることができる。また荷重に関しても同様で特に弾性問題であれば単位力を考え、力の入力は削減して学習させる。

サロゲートモデルは代替モデルとして物理現象を模擬するモデルである。したがって、微分方程式を完全に代替するものではない。例えば、微分方程式を満足しているかどうかを損失として学習する手法[3]もあるが、未知の問題では当然適用できない。これまでパラメトリックに問題を解いていた場合、変数を可能な限り限定することにより現象の傾向を把握していた。例えば、ニューラルネットワークを使ったサロゲートモデルであれば多数の変数を用いて学習し、より自由度の高いサロゲートモデルの構築が可能となる。しかし、非線形問題においては解析結果の取得に時間が必要であることと解析精度の低さが問題である。繰返しの応力ひずみ関係はヒステリシスループを示し1つのひずみ（変位）に対して複数の応力（荷重）状態を示す。確実に学習できるとすれば降伏局面や背応力自体を学習させることである。しかし、実際の降伏現象は等方硬化、移動硬化の混合で生じているうえに降伏局面が連続であるとは限らない。ディープラーニングによる学習はそういったモデル化が困難な現象に対して学習できる可能性がある。したがって、学習結果の質を向上させる具体的な考え方を提示することが重要な知見になりうる。有限要素法は質の保証のための活動とその適用範囲の拡大は常に連動して進んできた。機械学習とある程度の比較が可能と思われる。こ

の比較を表1に示す。シミュレーションでは支配方程式およびその離散化手法により物理現象そのものと精度が大きく既定される。しかし、機械学習は多数のデータからルールを再構成するためデータそのものが対象とする現象を含んでいることが保証されなければならない。支配方程式の理解が必要かどうかという観点ではデータを準備するために必要といえる。連立一次方程式の解法も長い歴史がある。機械学習においては学習方法そのものと等価であると見なせる。機械学習では反復的に学習することが前提となる。学習結果の良否はデータにも依存するがこの学習アルゴリズムは最も重要な要因である。最後の重要要因は、ニューラルネットワークの構成方法である。これは表現できる関数の次数に直接関連するため、数値シミュレーションのメッシュ分割と等価であると認識できる。数値シミュレーションでは誤差評価手法により最適なメッシュを得る方法が確立されている。機械学習においては試行錯誤によりニューラルネットワークの構成を決める必要がある。これら比較を通じて予測の質向上のための具体的方法について今後議論を進めることが急務である。

表1　数値シミュレーションと機械学習の技術要素の比較：予測の質向上へ向けた比較

	数値シミュレーション	機械学習/深層学習
対象物理現象≒データ分布・特徴	支配方程式（微分方程式、経験的）	データに依存（データ統計分析）*
方程式の求解≒学習手法	連立一次方程式の解法（ソルバー）	学習方法、最適化関数、活性化関数などの組合*
離散化（メッシュ）≒ネットワーク構成表現能力	物理量変化に対応する離散化モデル（メッシュ）	ニューラルネットワーク構成（MLP, CNN, LSTM）*
その他手法依存	境界条件処理、ＭＰＣなど	転移学習など△

計算力学の分野に機械学習を導入するための、我々の重要な前提をいかに列挙する。

- 数十から数千のデータ数（統計的な分布を示せないこともありうる）
- 測定できるパラメータも数個から最大でも十数個（計測のコスト高く経験により判断したパラメータである）
- 実験計画的な2水準で計測することも多い（統計処理不可、線形の回帰は成立）
- 実験ではそれなりの程度でノイズを含むが、平均が真値を期待できない（重回帰が重宝される理由の1つ）

これらは一般的なデータサイエンスが期待しているデータの性質を満足できない可能性がある。

4.　き裂進展サロゲートモデル

本稿では、疲労き裂進展を具体事例としてディープラーニング技術を適用しき裂進展挙動が予測できるかどうかを検証した。き裂中心位置を原点としき裂先端位置およびき裂が向いている方向ベクトルから進展方向ベクトルおよび進展速度を学習し進展サイクル数および方向（き裂形状）の予測を行った。この予測はFEM解析を一切行わずに予測されるため、き裂進展位置から次のき裂進展位置を逐次予測する方法である。つまり、完全な解析レスで予測が可能である。

疲労き裂進展解析は、弾性計算（ポアソン方程式）、応力拡大係数、等価応力拡大係数、き裂進展速度、き裂進展方向を微小ステップで解析を行いその履歴（積分）として最終的なき裂進展形状が計算される。図2に等価応力拡大係数、き裂進展速度およびき裂進展方向を決定する経験則による式を示す[4)-6)]。ディープラーニングによりこれら式を陰的に再構成されるかどうかが工学分野における応用のための提示すべき具体例である。

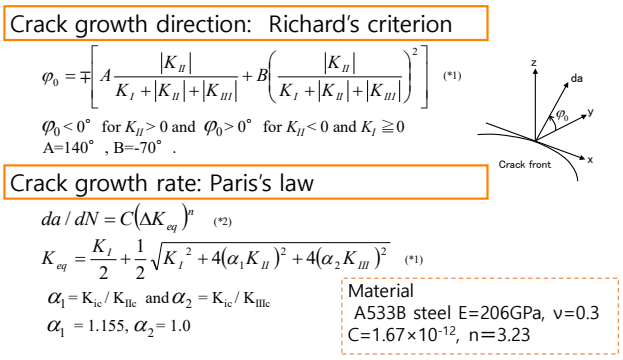


図2　き裂進展則にかかわる法則とパラメータ[6),7)]

学習データは重合メッシュ法(以下s-FEM)によるき裂進展解析[7)]を用い約5,000のデータを生成した。データをもとに、オートエンコーダ、事前学習、ドロップアウトなどのディープラーニングの技術を用いて総学習数12万回を行った。s-FEMによるき裂進展解析と同様に機械学習によるき裂進展速度の予測は1サイクル当たりの進展量ではない。1サイクル当たりの進展量は10^{-12}のオーダーのため、そのサイズではメッシュ生成ができない。したがって、最小メッシュサイズあたりに何サイクル必要か計算することで、き裂進展数値シミュレーションを連続的に行う。図3に進展形状を示す。き裂進展開始直後では大きな差異が左右のき裂先端部位でみられる。しかし、き裂進展が進むにつれs-FEMの結果と一致する。荷重方向に対して斜めに存在するき裂が繰返し荷重を受けると急激にその向きを変え、その後はほぼ水平に進展する。進展方向を変える学習データ数は全体の学習データ数のわずか4%程度にしか存在しない。

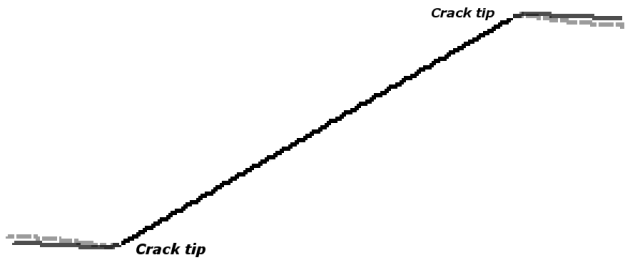


図3　機械学習によるき裂進展予測と重合メッシュ法によるき裂進展（黒実線：初期き裂、灰破線：重合メッシュ法、濃灰：サロゲートモデルによる予測）

この問題を解消した新たな学習データセットを重合メッシュ法により生成した。データの概要は、初期き裂の角度を2.5°きざみで0°から87.5°、き裂進展直後5ステップまでのデータを4倍に増やした。つまり、最初の5ステップ目までは、オリジナル＋4倍＝5倍のデータ数となった。データ拡張は、入力データのみに

±２％ノイズを与えた。このとき注意すべきはノイズの平均値は０、つまり、ノイズを入れた入力データの平均値は正解となるオリジナルデータと一致する必要がある。50万回の学習結果を図4に示す。ほぼ完全に一致しており全体にわたる累積の誤差は0.5%未満であった。図5は２つのき裂のき裂進展予測に適用した。データ拡張を施す部分がき裂進展とともに変化するためこのケースでは一様にデータ拡張を適用した。形状はやはり曲がる部分での形状に差異が見られるがき裂全長はほぼ正しく、保守的な評価が可能であることが分かる。

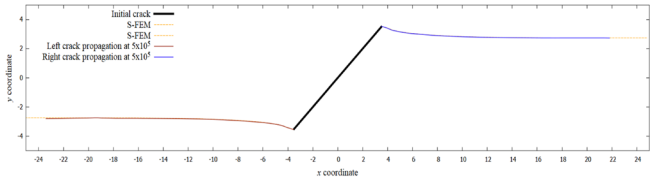


図4　データ拡張を行った高精度予測値：初期き裂角度45°、初期き裂角度は学習データから除外ししているため未学習データの予測、全体進展結果

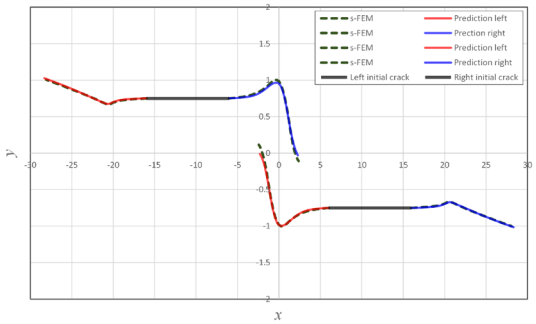


図5　相互作用によるき裂進展予測：縦と横の比を４：１として横方向の縮尺を変更した図、相互作用を表現するためにき裂先端の相対位置および進展方向を追加し、学習し予測き、データ拡張は一様に適用したため曲がりの予測精度は良くないが、き裂全長の予測は一定の精度かつ保守的に評価

5. おわりに

ディープラーニングおよびそれらを工学問題へ実用化するためには、技術や知見の集積が重要である。工学問題への適用に向けた実用化が日々進行している。機械学習を実施する方法も様々な分野の知見を適用し、さらにここで示したデータの質の考え方などにより、効果的・効率的なサロゲートモデルの構築が可能な事例が明らかになりつつある。一方で複雑な問題へ適用可能とするために、多くの事例、知見の獲得およびその共有が急務である。

参考文献

1) A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, ImageNet Classification with Deep Convolutional, Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012) (2012)

2) 和田義孝, 日本機械学会第30回計算力学講演会講演論文集, 大阪 (2017)

3) Shengze Cai, Zhiping Mao, Zhicheng Wang, Minglang Yin, George Em Karniadakis, Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: A review, Acta Mechanica Sinica, arXiv:2105.09506 (2021)

4) 和田義孝, ディープラーニングによる工学問題へのアプローチ(偏微分方程式の学習からき裂進展挙動の予測まで), Prometech Simulation Conference 2018 (2018)

5) H. A. Richard, M. Fulland, M. Sander S. N., Fatigue Fract. Eng. Mater Struct., 28, pp. 3-12 (2005)P. C. Paris and F. Erdogan, J. bas. Eng. Mater. Trans. ASME, Ser. D, 85, pp. 528-533 (1963)

6) 菊池正紀, 高橋 真史和, 田義孝, Y. Li,重合メッシュ法を用いた疲労き裂進展シミュレーション(第2報二つの段違いき裂の相互作用の検討), 機論A, 74, 745 (2008)

機械的特性の観点からの材料開発への機械学習の適用

村松　眞由
慶應義塾大学理工学部機械工学科

1.　はじめに

人工知能(Artificial Intelligence: AI)という言葉は1956年のダートマス会議で計算機科学者ジョン・マッカーシーが使用した．機械学習という言葉は1959年にIBMエンジニアが定義している．機械学習はその後，何度かの冬の時代を経て，第3次AIブームの只中にいるとしばしば言われる．

機械学習ではコンピューターに「推論」や「探索」をさせることにより，特定の問題に対する解を提示する．その過程ではデータに対する演算処理，統計処理を行う．第2次AIブームで「知識」としてデータを入力することが提案され，第3次AIブームは，ビッグデータと呼ばれる大規模データやその取り扱いが成熟したことにより生じた．したがって，計算機パワーの向上やネットワークの発達により現在のAIブームが起こっていると言える．

一方，計算力学という分野も1950年代～ 60年代にかけて起こっている．　特に固体の構造解析で頻繁に用いられる有限要素法の最初の論文は，1956年のBoeingエンジニアであるTurnerやカリフォルニア大学のCough，ワシントン大学のMartinらによって発表された [1]と言われ，ダートマス会議と同じ年に発表されている．構造解析も盛んに研究が進み，急速に発展したが，やはり計算機パワーの向上が大きな要因であることは間違いない．

別々の分野から独立して発展してきた機械学習と構造解析であるが，近年その融合研究が盛んにおこなわれている．その背景にはやはり計算機とネットワークの発達がある．筆者はこれまで構造解析を使った研究に従事し，組織を有する材料の機械特性を数値シミュレーションにより評価してきた．近年は，機械学習を用いて機械的特性の観点から材料開発を行う手法を提案しており，本稿では，ポリマーアロイを取り上げた研究例 [2]を紹介する．

2.　背景

炭素繊維強化プラスチックに代表される複合材料は広く産業利用され，より優れた比剛性や機能性を実現する材料が模索されている．複合材料のマトリックス樹脂を構成するポリマーアロイは，異種高分子の混合物である．ポリマーアロイには図1 に示すような様々な相分離構造が知られており，この構造が複合材料の性能を左右する．相分離構造と性能の関係は実験で盛んに調査されている[3]ほか，自己無撞着場理論を用いた数値解析による構造予測も行われる[4]．しかしながら，実験や数値解析は時間や計算資源などのコストが大きいため，ポリマーアロイ相分離構造の性能を正確かつ高速に予測する順解析手法が求められている．さらに材料開発においては，要求される機能・性能から，必要となる材料の構造・組織を提案し，その実現プロセスを提示する逆解析の枠組みの確立も望まれている．近年，機械学習を取り入れた順解析・逆解析に期待が寄せられている[5]．特に逆解析においては，生成モデルを用いてデータの分布を潜在変数空間（z 空間）に写像する手法が注目されている．生成モデルは，訓練データの特徴を抽出できるとともに，訓練データに似たデータを生成することができる．以上の背景から本稿では，機械学習を通した，材料の構造から物性値を予測する順解析，および物性値から構造を予測する逆解析を行う枠組みを提案し実際に構築することを目的とする．具体的な例としては，材料の構造に「ポリマーアロイの相分離構造」を，物性値に「Young率」を取り上げ，提案する枠組みを構築する．また，構造を表現する記述子は「画像」を利用する．

3.　提案する枠組みの概要

提案する枠組みの概念図を図2 に示す．順解析は，畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network，CNN：青矢印）で実現する．CNN は深層学習の一手法であり，画像等の空間情報を縮約して予測に重要な特徴を獲得する．ポリマーアロイの相分離構造の画像解析は，CNN が上手く機能すると期待される．逆解析は，敵対的生成ネットワーク[6]（Generative Adversarial Network，GAN：緑矢印）とCNN を組み合わせたモデルに対して，ランダムサーチを行うことで実現する．GAN は深層生成モデルの一手法であり，学習を経て訓練データの特徴が獲得された潜在変数を利用し，訓練データに類似したデータを生成する．ここでは，GAN が持つ低次元の潜在変数を網羅的に探索することで，想定した物性値を持つ構造の特定を試みる．この枠組みには次のような利点がある．

（1）実験で合成されたポリマーアロイ構造の画像で訓練したGANは，実現可能なポリマーアロイ構造に類似した構造を持つ画像を出力する．

（2）GAN が持つ潜在変数が，材料の相図などの，明示的に与えられていない特徴を獲得する可能性がある．

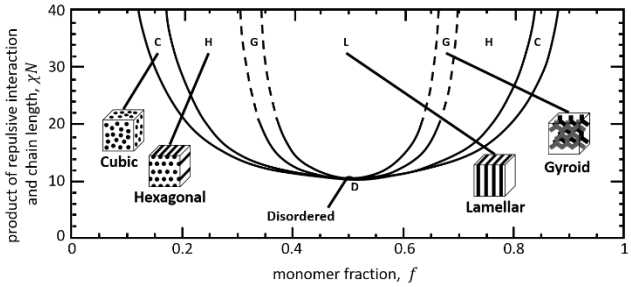


Fig.1　ポリマーアロイ相分離構造

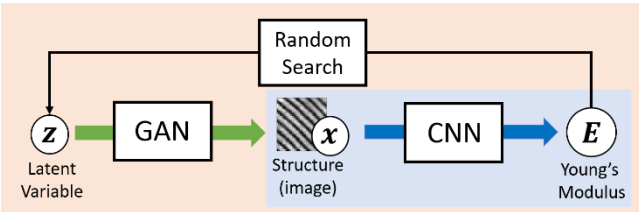


Fig.2　提案する枠組みの概要

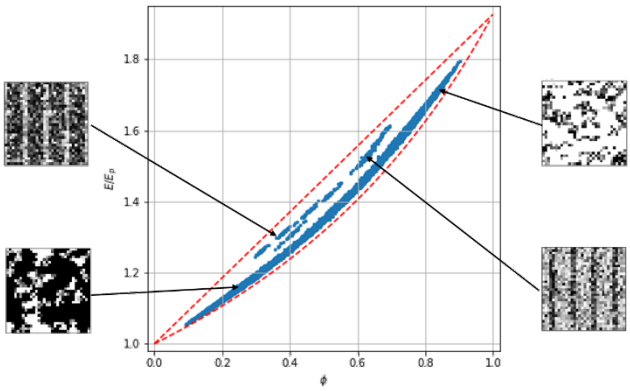


Fig.3 訓練データの体積分率とYoung率の関係

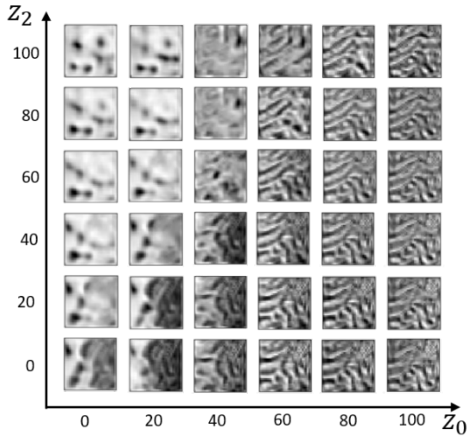


Fig.4 潜在変数空間の平面例

（3）その他の物性値に対してこの枠組みを適用する場合は，順解析を行うCNN のみを再構築すればよい．

（4）その際，訓練に時間のかかるGAN を再学習する必要がないため，計算コストが低い．

4. 方法

4.1 構造からYoung 率を予測するCNNの構築

ポリマーアロイの相分離構造からYoung 率を予測するモデルを，CNN を用いて構築した．これは，構造から物性値を計算する順解析に当たる．ポリマーアロイを2 種ポリマーの混合物と仮定し，ポリマーアロイの相分離構造を2 次元の構造として扱う．訓練には，乱数から人工的に生成した構造を持つ擬似ポリマー画像x と，Reuss-Voigt モデルを用いて計算したYoung 率Eを用いた．

作成した擬似ポリマー画像x に対して，Reuss-Voigt モデルを用いてYoung 率E を計算した．擬似ポリマー画像の各要素が持つ値は[0,1] の範囲の値を取り，その要素における2 種ポリマーの割合を表す．そのため，各要素のYoung 率は割合に基づいて2 種ポリマーのYoung 率の内挿で求めた．なお，2 種ポリマーにはポリプロピレン（Ep = 1350 MPa）とナイロン6（En = 2600 MPa）を想定した．図3 に擬似ポリマー画像の例と，それに対応するYoung 率を示した．横軸はナイロン6 の体積分率ϕ，縦軸はポリプロピレンのYoung 率に対するその構造のYoung 率の割合E=Ep を示している． Voigt モデルとReuss モデルの間に分布するデータを生成したことを確かめた．

4.2 潜在変数から構造を出力するGANの構築

ポリマーアロイの相分離構造を出力するモデルを，GAN（Wasserstein GAN）を用いて構築した．これは，物性値から構造を出力する逆解析に利用する． GANの訓練データとして，実験で合成されたポリマーアロイ相分離構造の画像を用意した．実験画像は論文(7)-(13) から引用し，全部で50 種類の実験画像を得た．各画像に対して，data augmentationを施して画像の数を増やした．

5. 結果と考察

訓練データから1000 枚をランダムに選び訓練を行った．訓練済みのGAN の4 次元の潜在変数のうち2 成分に着目して，潜在変数を変化させることで生成されたポリマーアロイ相分離構造の画像を図4に示す．図4から，潜在変数z に応じて構造x が連続的に変化しており，類似した構造が潜在変数平面上で近くなるように分布している様子が観察できた．横方向はヘキサゴナル構造からラメラ構造への変化を表現しており，縦方向は構造の細部の変化を表現しているといえる．続いて，4次元の潜在変数から3 つを選んで，Young率の分布の様子を潜在変数空間にプロットした結果を図5 に示す．図5 から，高Young 率は特定の潜在変数z に強く依存しており，Young 率E に応じて分離して分布している様子が観察できた．しかしながら，多くのz とE の関係は識別可能なものではなく，ほとんどランダムに分布しているような関係になっていることがわかった．また，E を一つ定める際には，候補となるz は複数存在することが確認された．したがって，本問題は，E からz を求める問題としては解が一つに定まらない不

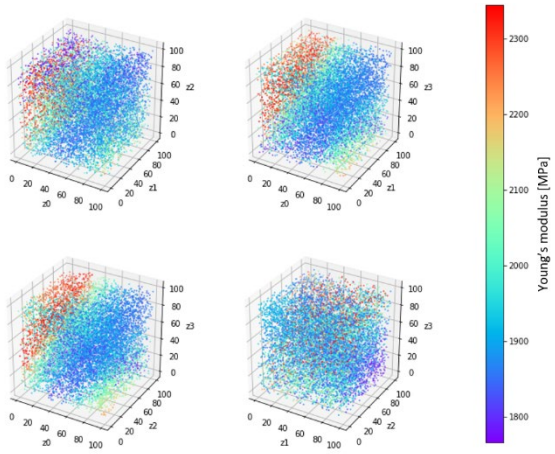


Fig. 5 Young率潜在変数空間への投影

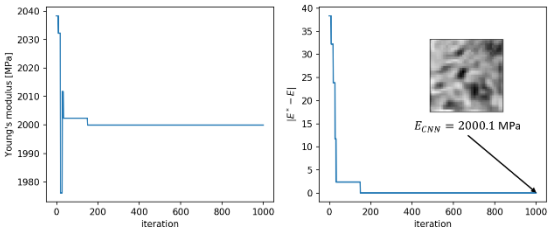


Fig. 6 ランダムサーチの実行例 (E*=200 MPa)

良設定問題であると判断される. よって，本モデルでのYoung 率 E と潜在変数z の関係は，機械学習による回帰が困難な関係であると推測され，逆解析においては，データの関係に依存しないランダムサーチのような手法が最適であると考えられる.

目標とするYoung 率をE= 2000 MPa と設定してランダムサーチを用いた逆解析を行った結果を図6 に示す. 反復回数は1000回とした. 図6 からわかるように，反復計算を繰り返すことで出力値E は徐々に目標値E に近づいている． 1000 回のランダムサーチを終えた出力値E は目標値E に十分に近い値を示している. また，GAN の出力画像もポリマーアロイに特徴的な構造を呈している.

6. 結論

機械学習とランダムサーチを用い，ポリマーアロイの相分離構造からYoung 率E を予測する順解析と，E から構造を出力する逆解析手法を提案し実行した. その結果，ポリマーアロイ相分離構造からE を精度よく予測できること，および指定したE を有するポリマーアロイ構造を予測できることを示した.

今後は自己無撞着場理論に基づくシミュレーション結果を構造として利用したGANの開発を実施予定であり，均質化法を用いて計算した複数の機械物性値を使用するCNNの開発も目指している. 訓練データを様々な手法で取得し，学習モデルを構築していくことで，本フレームワークを高精度化することができる. さらに，本手法の機械的特性を変えることで，金属やセラミックなどの他材料へと展開することも可能であり，広く応用できると考えられる.

謝辞

本研究は，修士2年生平出和也君が主に実施しました. ここに謝意を示します. また，本研究は，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（管理法人：JST）によって実施されました. この場を借りて御礼申し上げます.

文献

（1） Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. and Topp, L.J., “Stiffness and deflection analysis of complex structures”, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 23, pp. 805-823, 1956.

（2） Hiraide, K., Hirayama, K., Endo, K., Muramatsu, M., “Application of deep learning to inverse design of phase separation structure in polymer alloy”, Computational Materials Science, Vol. 190, pp. 110278, 1-9, 2021.

（3） Orimo, Y., Hotta, A., “Stress-strain behavior, elastic recovery, fracture points, and time-temperature superposition of an OOT-possessing triblock copolymer”, Macro-molecules, Vol. 44, pp. 5310-5317, 2011.

（4） Matsen, M. W., Schick, M., “Stable and unstable phases of a diblock copolymer melt”, Physical Review Letters, Vol. 72, pp. 2660-2663, 1994.

（5） Sanchez-Lengeling, B., Aspuru-Guzik, A., “Inverse molecular design using machine learning: Generative models for matter engineering”, Science, Vol. 361, pp. 360-365, 2018.

（6） Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y., “Generative Adversarial Nets”.

（7） Ruzette, A., Leibler, L., “Block copolymers in tomorrow’s plastics”, Nature Materials, Vol. 4, pp. 19-31, 2005.

（8） Nuopponen, M., Nuopponen, M., Laukkanen, A., Hirvonen, S.-P., Rytelä, M., Turunen, O., Tenhu, H., Mezzenga, R., Ikkala, O., Ruokolainen, J., “Phase behavior and temperature-responsive molecular filters based on self-assembly of polystyrene”, Macromolecules, Vol. 40, pp. 5827-5834, 2007.

（9） Lee, C. H., Tung, S.-H., “Microdomain control in block copolymer-based supramolecular thin films through varying the grafting density of additives”, Soft Matter, Vol.7, pp.5660-5668, 2011.

（10） Kim, J. Y., Jin, H.M., Jeong, S.-J., Chang, T., Kim, B.H., Cha, S.K., Kim, J.S., Shin, D.O., Choi, J.Y., Kim, J.H., Yang, G.G., Jeon, S., Lee, Y.-G., Kim, K.M., Shin, J., Kim, S.O., “Bimodal phase separated block copolymer/homopolymer blends self-assembly for hierarchical porous metal nanomesh electrodes”, Nanoscale, Vol. 10, pp. 100-108, 2018.

（11） Vukovic, I., Brinke, G.t., Loos, K., “Block copolymer template-directed synthesis of well-ordered metallic nanostructures”, Polymer, Vol. 54, pp. 2591-2605, 2013.

（12） Yokoyama, H., “Fabrication of nanoporous and nanofoamed materials using microphase separation of block co-polymers”, International Polymer Science and Technology, Vol. 41, pp. 7-12, 2014.

（13） 櫻井伸一, 正本順三, 野村春治, ”スチレン系ブロック共重合体のミクロ相分離構造制御と物性発現”, 日本ゴム協会誌, Vol. 72, pp. 526-534, 1999.

従来のＪ積分法と任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元Ｊ積分法

荒井　皓一郎
エムエスシーソフトウェア株式会社

はじめに

J積分は破壊力学的評価指標の一つとして構造物の健全性評価に広く用いられている．Rice[1]によって提案されたJ積分は，実験評価法や数値解析法に関する様々な研究が行われてきた．現在では実験評価法の規格化[2]や商用有限要素法解析ソルバーへの実装なども行われており，広く活用されている．

J積分はき裂進展によってき裂の長さや面積が増大する際に解放されるエネルギを評価する式であり，任意の経路の積分によって評価が可能な経路独立性を有することが知られている．経路独立性は定式化の際に導かれるものであり，この際の仮定からJ積分には比例負荷問題に対してのみ適用可能という制約が生じる．J積分を弾塑性繰返し荷重問題などの非比例負荷状態となる問題に適用した場合，経路独立性は失われ，J積分は物理的意味を失う．これまでに様々なJ積分の拡張手法が提案されており，その一つとして非比例負荷問題へ適用可能なT*積分[3]，T^*_ε積分[4]がある．これらは二次元問題を仮定した導出を行っており，三次元問題への適用には定式化上の課題がある．筆者はT^*_ε積分[4]の定義に基づいて，J積分の定式化を再定義し，三次元の非比例負荷問題に対しても経路独立性を有する手法を提案している[5]．

本稿では従来のJ積分の定式化上の適用限界について示し，T^*_ε積分[4]の概要を紹介する．さらに筆者が提案する任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元J積分法[5]の概要について紹介する．

従来のJ積分とその拡張手法

2-1.　経路積分を用いたJ積分法

図1に示すような，き裂を有する二次元の物体を考える．ここでは有限変形問題を仮定し，き裂進展方向をX_1とした初期配置に基づく直交座標系上で議論を進める．この時，J積分は次の式で定義される[6]．

$$J = \lim_{\varepsilon\to 0}\int_{\Gamma^0_\varepsilon}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)d\Gamma^0_\varepsilon \qquad (1)$$

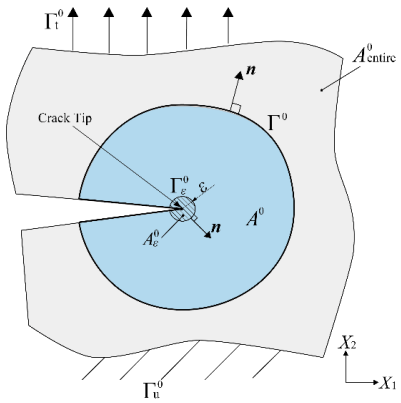


図1　き裂を有する物体とき裂先端を囲む経路Γ^0_ε，任意の経路Γ^0

ここでW^0は初期配置に基づくひずみエネルギ密度，n_iは領域表面上での単位法線ベクトル，u_jは変位，Π_{ij}は公称応力である．式(1)は図1に示すき裂先端を囲む経路Γ^0_εによって囲まれる領域A^0_εに散逸するエネルギを評価する式として定義される．積分経路Γ^0_εの半径$\varepsilon \to 0$であることから，き裂の進展によって解放されるエネルギを表す式といえる．

積分経路Γ^0_εの半径$\varepsilon \to 0$であるため，式(1)を直接計算することはできない．そこで，経路Γ^0_εの外側に任意の経路Γ^0を考える．経路Γ^0_εと経路Γ^0で囲まれる閉領域を考え，式(1)にガウスの発散定理を適用すると以下の式が得られる．

$$J = \int_{\Gamma^0}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)d\Gamma^0$$
$$- \lim_{\varepsilon\to 0}\int_{A^0 - A^0_\varepsilon}\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial X_i}\frac{\partial u_j}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)dA^0 \qquad (2)$$

ここで，弾性体もしくは全ひずみ理論を仮定し，物体力がないことを仮定すると，式(2)の右辺第二積分の被積分関数は0となり，右辺第一積分のみが残る．

$$J = \lim_{\varepsilon\to 0}\int_{\Gamma^0_\varepsilon}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)d\Gamma^0_\varepsilon$$
$$= \int_{\Gamma^0}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)d\Gamma^0 \qquad (3)$$

上式から，き裂先端を囲む経路Γ^0_εの積分と任意に設定した経路Γ^0の積分が等価であることが示される．これがJ積分の経路独立性である．なお，式(2)の右辺第二積分はき裂先端で可積分ではないため，直接計算することは困難である[3]．従来のJ積分の定式化では，前述の仮定によって第二積分の計算を回避している．

2-2.　領域積分法を用いた三次元J積分法

二次元問題であれば式(3)の経路積分を用いてJ積分計算が可能だが，三次元問題には適用できない．近年ではJ積分の数値解法として，有限要素法との相性が良く，三次元問題にも適用可能な領域積分法[7]が主に用いられる．

領域積分法を用いた三次元J積分法を導く．き裂前縁接線方向をX_3とし，図1の二次元形状に奥行きを持たせる形で三次元問題への拡張を行う．図2の領域中心のき裂前縁上で$q(X_3) > 0$，面$A'^0_{1\varepsilon}$,$A'^0_{2\varepsilon}$上で$q(X_3)=0$となり，連続かつ1回微分可能なスカラー値関数$q(X3)$を式(1)の両辺に導入し，X_3に対して微小長さΔの範囲で積分する．

$$\int_\Delta Jq(X_3)dX_3 = \lim_{\varepsilon\to 0}\int_{S^0_\varepsilon}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)q(X_3)dS^0_\varepsilon \qquad (4)$$

ここで $\int_{\Delta} q(X_3)\,dX_3 = \Delta A$ とし，ΔAを仮想き裂進展面積とする. また，Jは図2で示す領域内で一定であると仮定する. さらに領域V_ε^0を含む任意の積分領域V⁰を考え，$q(X_3)$の定義を領域V^0の内部に拡張し$q(\boldsymbol{X})$とする. $q(\boldsymbol{X})$は図2の領域中心のき裂前縁上で$q(\boldsymbol{X}) > 0$かつ領域V^0表面で$q(\boldsymbol{X})=0$となる連続かつ1回微分可能な関数と定義する. ここで積分領域V^0と領域V_ε^0 の表面で囲まれた閉領域を考え，式(4)に対してガウスの発散定理を適用する. 積分領域V^0表面で$q(\boldsymbol{X})=0$であることを用いて式を整理すると以下の式が得られる.

$$J = -\frac{1}{\Delta A}\lim_{\varepsilon\to 0}\int_{V^0-V_\varepsilon^0}\left(W^0\delta_{1i} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}dV^0$$

$$-\frac{1}{\Delta A}\lim_{\varepsilon\to 0}\int_{V^0-V_\varepsilon^0}\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial X_i}\frac{\partial u_j}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)q(\boldsymbol{X})dV^0 \quad (5)$$

式(5)の右辺第二積分の被積分関数には式(2)の右辺第二積分と同じ項が含まれる. 経路積分の場合と同様に，弾性体もしくは全ひずみ理論を仮定し, 物体力がないことを仮定すると, 式(5)の右辺第二積分は消去でき, 右辺第一積分のみが残る.

$$J = -\frac{1}{\Delta A}\lim_{\varepsilon\to 0}\int_{V^0-V_\varepsilon^0}\left(W^0\delta_{1i} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}dV^0 \quad (6)$$

上式は積分領域V^0に対する体積分で計算することが可能なため，有限要素法の数値積分を使って容易に計算することができる. また, 積分領域V^0は任意に設定した領域であるため, 式(6)は積分領域の設定に依存しない性質をもつ. これは式(3)の経路独立性と同様の性質である.

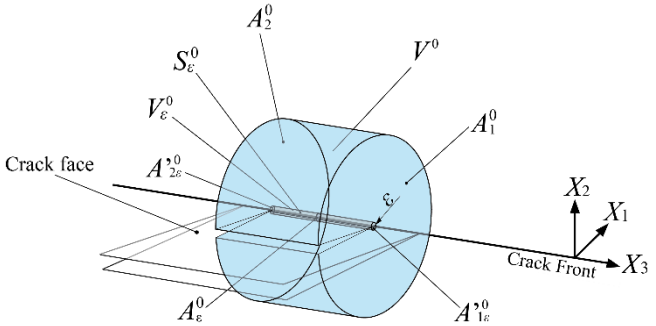


図2　き裂前縁近傍の無限小の領域V_ε^0 と任意の積分領域V^0

2-3. 経路独立性とJ積分の適用限界

経路独立性は物体力がないことを仮定し，弾性体もしくは全ひずみ理論を仮定することによって導かれる. 後者の仮定によって，従来のJ積分法は適用できる問題が比例負荷問題に限定される. 非比例負荷問題では式(2), (5)の右辺第二積分を消去した仮定が成立せず，右辺第二積分の影響が無視できなくなる[8]. 非比例負荷問題に式(3), (6)を適用した場合，経路独立性は成立せず，積分経路や積分領域の設定によってJ積分の計算結果は異なる. このような場合，式(1)と式(3), (6)は等価ではなく，式(3), (6)を用いた計算結果の物理的意味は希薄となる.

2-4. T_ε^*積分

現在までに様々なJ積分の拡張手法が提案されている. その一つに非比例負荷問題に適用可能なT_ε^*積分[4]がある. T_ε^*積分は図1のき裂先端領域A_ε^0を微小だが有限な領域であると仮定して導出され，き裂の進展によって領域A_ε^0内で散逸するエネルギを評価する式と定義される. 二次元の領域積分法を用いた場合，T_ε^*積分は以下の式で定義される.

$$T_\varepsilon^* = -\int_{A^0-A_\varepsilon^0}\left(W^0\delta_{1i} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}dA^0$$

$$-\int_{A^0-A_\varepsilon^0}\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial X_i}\frac{\partial u_j}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)q(\boldsymbol{X})dA^0 \quad (7)$$

式(2), (5)の右辺第二積分を計算することはできないが，式(7)の右辺第二積分は領域A_ε^0を有限な領域として扱うため，可積分でないき裂先端領域を領域A_ε^0に含むことで計算可能となる. T_ε^*積分は定常き裂進展問題の評価などに適用されている [4].

式(7)は二次元問題を仮定して導かれる. き裂先端領域A_ε^0を微小だが有限な領域と仮定する場合，二次元問題であれば通常のJ積分と同様の式展開となるが，三次元問題では異なる. この点を整理し，J積分を再定義したものが提案する新しいJ積分法[5]である.

3. 任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元J積分

提案手法[5]はT_ε^*積分と同様にき裂の進展に伴って，微小な有限領域V_ε^0に散逸するエネルギを評価する式として三次元J積分法を再定義したものである.

三次元問題で領域V_ε^0を有限な領域として扱う場合，J積分の導出初期段階で三次元問題であることを考慮した式展開が必要となる. 詳しい導出は省略するが, 領域V_ε^0を微小な有限領域であると仮定して導出を進めると以下の式が得られる.

$$J = \int_{\Gamma_\varepsilon^0}\left(W^0 n_1 - n_i\Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)d\Gamma_\varepsilon^0$$

$$-\int_{A_{1\varepsilon}^0}\frac{\partial}{\partial X_3}\left(\Pi_{3j}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)dA_{1\varepsilon}^0 \quad (8)$$

上式は図3に示す領域の中央部にある，領域V_ε^0を厚さ方向に縮退したディスク状の領域A_ε^0とそれを囲む経路Γ_ε^0の積分によって，領域V_ε^0に散逸するエネルギを評価する式である. 三次元問題で領域V_ε^0を有限な領域として扱う場合，式(1)と同様の右辺第一積分に加えて, 右辺第二積分を考慮する必要がある.

従来法と同様に，式(8)に対して領域積分法[7]を適用する. 式(8)の両辺にスカラー値関数$q(X_3)$を導入し，き裂前縁接線方向X_3に対して微小長さΔの範囲で積分する.

$$\int_{\Delta} Jq(X_3)dX_3 = \int_{S_\varepsilon^0}\left(W^0 n_1 - n_i \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)q(X_3)dS_\varepsilon^0 - \int_{\Delta}\int_{A_{1\varepsilon}^0}\frac{\partial}{\partial X_3}\left(\Pi_{3j}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)q(X_3)dA_{1\varepsilon}^0 dX_3 \quad (8)$$

図3に示すような積分領域V^0を考え，スカラー値関数$q(X_3)$の定義を積分領域V^0内に拡張する. 積分領域の中心部に位置するき裂前縁上で$q(\boldsymbol{X}) > 0$, 積分領域表面上で$q(\boldsymbol{X}) = 0$であり，領域V_ε^0内部のX_1 -X_2面内で$q(\boldsymbol{X})$は一定であり, X_3方向にのみ変化する連続かつ一回微分可能な関数と定義する.

式(8)の右辺第一積分について，領域V^0 - V_ε^0の表面で囲まれる閉領域を考え, ガウスの発散定理を適用する. さらに, 右辺第二積分に対してX_3に関する部分積分を行うと以下の式が得られる.

$$J = -\frac{1}{\Delta A}\int_{V^0 - V_\varepsilon^0}\left(W^0\delta_{1i} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}dV^0 - \frac{1}{\Delta A}\int_{V^0 - V_\varepsilon^0}\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial X_i}\frac{\partial u_j}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)q(\boldsymbol{X})dV^0 + \frac{1}{\Delta A}\int_{\Delta}\int_{A_{1\varepsilon}^0}\Pi_{3j}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_3}dA_{1\varepsilon}^0 dX_3 \quad (9)$$

式(9)の右辺第三積分は, 領域V_ε^0内で$q(\boldsymbol{X})$ がX_3に関する微係数だけが非0値であることを利用すると，右辺第一積分にまとめることができる. さらに物体力がないことを仮定すると最終的に以下の式が得られる.

$$J = -\frac{1}{\Delta A}\int_{V^0}\left(W^0\delta_{1i} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}dV^0 - \frac{1}{\Delta A}\int_{V^0 - V_\varepsilon^0}\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)q(\boldsymbol{X})dV^0 \quad (10)$$

式(10)はき裂前縁を含む微小な有限領域V_ε^0の内部で散逸するエネルギを表す式としてJ積分の再定義を行ったものであり，T_ε^*積分と同様に，き裂前縁近傍の領域を領域V_ε^0に含むことで計算が可能である. また，式(10)の導出には全ひずみ理論を仮定していない. そのため任意に設定した積分領域V^0に関する積分から計算が可能であり, 積分領域V^0の設定に依存しない, いわゆる経路独立性を有する.

領域V_ε^0はエネルギの散逸を評価する領域を設定するものである. そのため，非比例負荷問題では領域V_ε^0に対する依存性が生じるが, 従来のJ積分では物理的意味が希薄となる非比例負荷問題に対しても物理的解釈が可能な計算結果が得られる.

4. 数値解析例

大変形弾塑性繰返し荷重問題に対して, 従来のJ積分法である式(6)と提案手法である式(10)を適用した数値解析例を紹介する[9].

図4に示すCT試験片モデルに対して繰返し負荷を与える大変形弾塑性有限要素法解析を実施した. 得られた荷重変位曲線を図5に示す. 解析結果として得られた物理量を用いて式(6), 式(10)によるJ積分計算を行った. J積分の計算には図6に示す3種類の積分領域V^0を使用し, 経路独立性の検証を行った. また, 式(10)の計算では領域V_ε^0をき裂前縁から2層の要素として計算を行った.

従来法と提案手法を用いて算出した板厚中央部のき裂前縁節点でのJ積分値の推移を図7に示す. 従来のJ積分法である式(6)の計算結果は，負荷の増加に伴って徐々に経路独立性が失われる. 有限変形弾塑性問題では単軸負荷であっても変形の増加に伴って非比例負荷状態となる. また，圧縮負荷によって顕著に経路独立性が崩れることもわかる. 一方で提案手法である式(10)は, 積分領域の設定に関わらず, 常に同等のJ積分値が得られる. この結果から提案手法は非比例負荷問題に対しても経路独立性を有することがわかる.

さらに，式(10)を用いて算出した最終圧縮負荷終了時点でのJ積分値のき裂前縁上の分布を図8に示す. ここでは式(10)の計算結果と式(10)の右辺第一積分，右辺第二積分を分離した結果をそれぞれ示す. 右辺第一積分は従来のJ積分法と等価である. 非比例負荷状態であるため，経路独立性は失われ，積分領域の設定によって異なる値となる. また, 右辺第二積分は0ではない何等かの値を持つことがわかる. このことから，非比例負荷問題では従来法の右辺第二積分を消去した仮定が成立しないことがわかる. 非比例負荷問題では，式(10)の右辺第二積分を考慮することによって経路独立性が成立することがわかる.

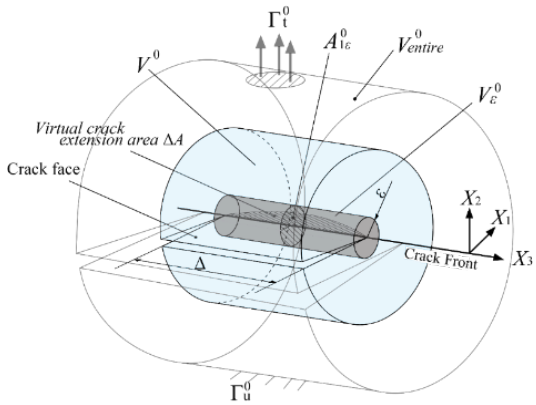


図3 き裂前縁近傍の微小な有限領域V_ε^0 と任意の積分領域V^0

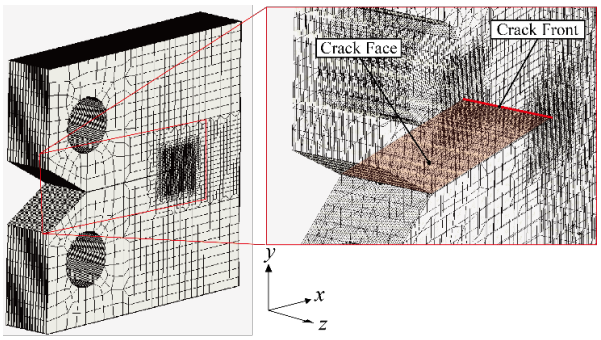


図4 有限要素法解析モデル(CT試験片)

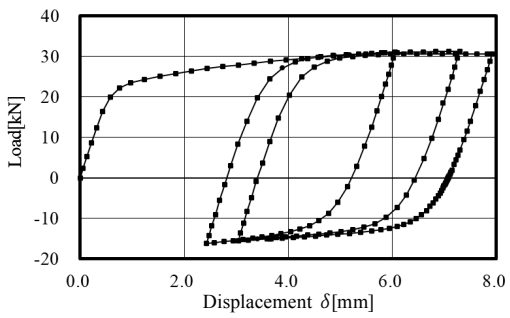


図5　有限要素法解析によって得られた荷重変位曲線

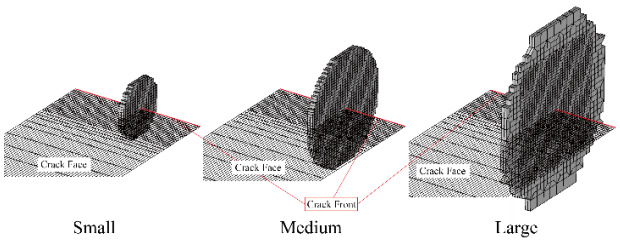


図6　J積分計算に使用する積分領域V^0

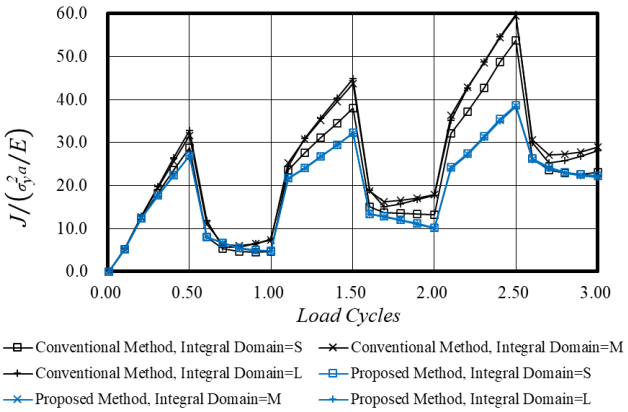


図7 従来法である式(6)と提案手法である式(10)を用いて算出した板厚中央部のき裂前縁節点でのJ積分値の推移

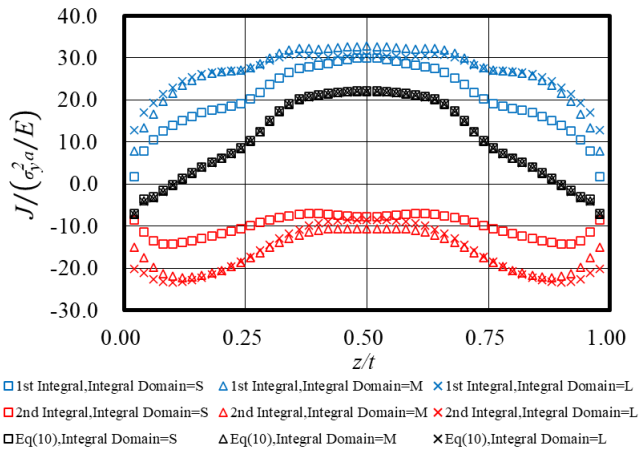


図8　最終圧縮負荷終了時点での式(10),右辺第一積分,右辺第二積分のき裂前縁上の分布

5.　おわりに

本稿では従来のJ積分法の適用限界と，筆者が提案する任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元J積分法[5]の概要について示した．

従来のJ積分法は導出時の仮定から，比例負荷問題に対してのみ適用可能という制約がある．非比例負荷問題に対して従来のJ積分法を適用した場合，経路独立性は失われ，得られたJ積分値の物理的意味は希薄になる．一方で提案する新しい三次元J積分法では，従来法のような仮定を用いずに導出を行うため，非比例負荷問題に対しても常に経路独立性が成立する．

提案する新しい三次元J積分法はき裂先端の領域V_ε^0に散逸するエネルギを評価する式としてJ積分を再定義したものである．そのためエネルギの散逸を評価する領域V_ε^0の設定に対する依存性が生じる．しかしながら，従来のJ積分法では物理的意味が希薄となる非比例負荷問題に対しても物理的意味のある結果を得ることが可能である．提案手法によって非比例負荷問題に対しても経路独立性を保証することができる．しかしながら，提案手法が評価上どこまで有効であるかの検証には実験等を交えた更なる研究が必要である．

本手法は有限変形弾塑性問題や弾塑性繰返し荷重問題以外にも，残留応力問題や傾斜機能材料に対しても経路独立性を有することが示されている [10]．また，筆者は提案手法に基づいたJ積分範囲ΔJの領域積分表示の提案も行っている[11]．従来のJ積分範囲ΔJの定式化はごく限られた問題でしか経路独立性が成立しないが，提案するJ積分範囲ΔJの領域積分表示を用いることで経路独立性が保証される．今後，低サイクル疲労き裂進展解析への適用が期待される．

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16K05988 の助成の下で実施されてきた．謹んで謝意を表す．

参考文献

[1] Rice, J. R., A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, Journal of Applied Mechanics, Vol.35, No.2 (1968), pp.379-386.

[2] ASTM E1820-15a, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[3] Atluri, S. N., Nishioka, T. and Nakagaki, M., Incremental path-independent integrals in inelastic and dynamic fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, No.2 (1984), pp.209-244.

[4] Okada, H. and Atluri, S. N., Further studies on the characteristics of the T_ε^* integral: Plane stress stable crack propagation in ductile materials, Computational Mechanics, Vol.23, No.4 (1999), pp.339-352.

[5] 荒井皓一郎, 岡田裕, 遊佐泰紀, 任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元J積分法の提案,日本機械学会論文集, Vol. 84, No.863 (2018), 18-00115.

［6］ Atluri, S. N., Energetic approaches and path-independent integrals in fracture mechanics, in Computational Methods in the Mechanics of Fracture (Edited by Atluri, S. N.), North-Holland Press (1986).

［7］ Nikishkov, G. P. and Atluri, S. N., Calculation of fracture mechanics parameters for an arbitrary three-dimensional crack, by the 'equivalent domain integral' method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.24, No.9 (1987), pp.1801-1821.

［8］ Koshima, T. and Okada, H., Three-dimensional J-integral evaluation for finite strain elastic-plastic solid using the quadratic tetrahedral finite element and automatic meshing methodology, Engineering Fracture Mechanics, Vol.135 (2015), pp.34-63.

［9］ 荒井皓一郎, 有限変形弾塑性繰返し荷重問題に適用可能な新しいJ積分とJ積分範囲ΔJ, 東京理科大学大学院, 2019, 博士論文

［10］ Okada, H., Ishizaka, T., Takahashi, A., Arai, K., Yusa, Y., 3D J-integral evaluation for solids undergoing large elastic–plastic deformations with residual stresses and spatially varying mechanical properties of a material, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 236, 107212(2020), pp. 1-27.

［11］ 荒井皓一郎, 岡田裕, 遊佐泰紀, 有限変形弾塑性問題に適用可能なJ積分範囲ΔJの三次元領域積分表示の提案, Vol. 84, No. 867 (2018), 18-00309

レベルセットXFEMのCFRP積層板の損傷進展解析への適用

長嶋　利夫
上智大学

1. はじめに

XFEM (the eXtended FEM)の誕生をXFEMに関する最初の論文 [1,2]が公表された1999年とするのならば，それから20年以上が過ぎた(2021年9月現在). 現に，2009年9月にECCOMAS (European Community on Computational Methods in Applied Science)のThematic会議の一つとしてXFEM2009がドイツのアーヘンで開催され，筆者も出席する機会を得たが，会議初日のBelytschko先生によるプレナリーレクチャーの冒頭で，「XFEM10周年」というスライドが示されたことを覚えている. もっとも文献[1,2]にはXFEMという表記はなく，それらの題目は，それぞれ「リメッシングを最小限にしたFEMによるき裂進展」,「リメッシング不要のき裂進展のためのFEM」と読める. さらに記憶をたどると，2000年11月に豊橋市で開催された計算力学部門（以下本部門）の講演会（第13回計算力学講演会）にBelytschko先生をお招きして，“The Element Free Galerkin Method and Level Sets”という題目で特別講演をいただいた. 少し補足をしておくと，1994年にBelytschko先生が，メッシュを使わずにき裂進展解析を行う方法としてElement Free Galerkin Method (エレメントフリーガラーキン法: EFGM) [3]を公表した. EFGMは，移動最小二乗法（Moving Least Squares Method: MLSM）により節点情報だけから形状関数を生成する方法を用いることが特徴である. 以降，国内外の計算力学の研究分野においてメッシュフリー法[4]（当時はメッシュレス法と呼ばれていた）に関する研究が盛んに行われるようになった. 本部門の講演会でもメッシュフリー法のOSが組まれるようになり，多くの論文と聴衆が集まるようになっていた. さて，そのときのBelytschko先生の特別講演の内容はレベルセットXFEMの話が中心だったと記憶しているが，その予稿[5]にはEFGMによるき裂解析に不連続関数の拡充とレベルセット法を用いることにより，き裂形状の表現が劇的に容易になることを述べた上で，この方法をFEMに適用したものとして文献[1,2]が紹介されている.

学問においては，用語が重要であることは言うまでもないが，2000年当時は，本部門を含めて筆者の属する国内の研究コミュニティーでは，XFEMをエックスFEMとかエックスフェムのように呼んでいたが，いつのまにか日本語では拡張有限要素法と呼ぶようになった. これは誰が最初に言い出したのか筆者には記憶がない. 一方，同時期にGFEM(Generalized FEM)と呼ばれる手法が，国際学会や学術雑誌で多数論文発表されている. GFEMとXFEMとの差異は曖昧で，本稿で後述するPUFEMのうち不連続性を有する拡充関数を用いる方法がXFEMであるという説明もしばしばなされるが，文献[6]によれば，GFEMとXFEMは，同じものとされている.

筆者は2000年頃からXFEMに着目し，様々な委託研究や共同研究を通じてXFEMを用いた応用研究を継続的に実施している. 主な対象分野は，金属材料からなる配管や圧力容器とCFRP（炭素繊維強化複合材料, Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP）積層材料の強度試験片である. 前者については，破壊力学パラメータであるK値やJ積分を用いたき裂進展解析に，後者については結合力モデルを用いた損傷進展解析に，XFEMを応用している.

以下，本稿では，まずXFEMに関する基本事項を解説してから，筆者が取り組んでいる結合力モデルを用いた準三次元XFEMによるCFRP積層板の損傷進展解析について紹介する.

2. XFEMの概要

2.1 PUFEMとXFEM

PU条件とはFEMなどで用いられる形状関数を構成するm個のすべての節点についての総和が1になる次式のような条件をいう.

$$\sum_{I=1}^{m} N_I(\mathbf{x}) = 1 \tag{1}$$

前述したEFGMで用いられる形状関数も，式(1)の条件を満足する. PUFEM [7]によれば，このPU条件を満足する形状関数を用いて変位場の近似を次式のように表す.

$$\mathbf{u}^h = \sum_{I=1}^{m} N_I(\mathbf{x})(\mathbf{u}_I + f(\mathbf{x})\mathbf{a}_I) \tag{2}$$

ここにf (x)は局所的に導入される拡充(enrich: エンリッチ) 関数であり，a_Iは拡充関数の導入により追加された基底関数N_I (x) f (x)についての節点自由度である.

f (x)として解の特性を表す関数を用いることにより，数値解の精度を向上させることが期待できる.

式(2)において，様々なf (x)の選択が可能であるが，その中でもf (x)として不連続性を有する関数を用いる方法がXFEMである. 文献[2]においては，線形破壊力学で扱われるような，二次元き裂問題においてf (x)として変位場の漸近解を構成できる4つの基底関数を用いる方法が提案された.

$$\gamma_1 = \sqrt{r}\cos(\frac{\theta}{2}),\ \gamma_2 = \sqrt{r}\sin(\frac{\theta}{2}),$$
$$\gamma_3 = \sqrt{r}\sin(\frac{\theta}{2})\sin\theta,\ \gamma_4 = \sqrt{r}\cos(\frac{\theta}{2})\sin\theta \tag{3}$$

ここに，r, θは二次元き裂先端を原点とする極座標であり，θ=0がき裂先端における（仮想）き裂進展方向になるように設定する. 式(3)で用いる4つの基底関数は，EFGMによるき裂解析 [8]でMLSMによる形状関数の基底関数として提案されたものである. 実際，文献[8]の題目に”Enriched”という表記が見られる.

式(3)におけるγ_2に着目すると，この関数は$\theta=\pm\pi$で不連続になる．このことは，き裂開口面において変位が不連続になることを意味する．γ_2のような関数は分岐関数(branch function)と呼ばれる．

文献[1]では，き裂先端だけではなくき裂から離れた点においても，式(3)で表される漸近解基底関数に座標変換を施しながら適用している．これに対して文献[2]は，き裂先端近傍のみ漸近解基底を，それ以外のき裂近傍においてヘビサイドステップ関数を用いる．

なお，定式化においては，次式に示すようなシフティングと呼ばれる近似表現も可能である．

$$\mathbf{u}^h = \sum_{I=1}^{m} N_I(\mathbf{x})\{\mathbf{u}_I + (f(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}_I))\mathbf{a}_I\} \tag{4}$$

式(4)を用いることにより，位置$\mathbf{x}_I$にある節点Iにおける節点変位$\mathbf{u}_I$と変位場の近似$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}_I)$が完全に一致する．このことは，変位に基本（変位）境界条件を与えるとき都合がよい．

2.2 レベルセット法

前述したように，EFGMにおいてき裂をモデル化する方法として，レベルセット法と組み合わせる方法が導入された[5]．レベルセット法は計算流体力学の分野などで時々刻々と変化する自由表面の形状を表現し追跡できる数値解析手法である[9]．XFEMにおいても，き裂形状を符号付き距離関数(Signed Distance Function: SDF)で表現したうえで，その節点値を用いてき裂形状を数値化する方法が導入され[10]，以降レベルセットXFEMが標準的なXFEM解析手法となる．

図1に示すように，二次元問題においてき裂線を表現するために，き裂線Γとその延長Γ_{EXT}に関する符号付き距離関数ϕ と，き裂先端においてき裂線に垂直な直線Γ' に関する符号付き距離関数ψ を次式で定義する[11]．

$$\phi(\mathbf{x}) = \min_{\bar{\mathbf{x}}\in\Gamma\cup\Gamma_{EXT}} \|\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}}\| sign(\mathbf{n}^{+}(\bar{\mathbf{x}})\bullet(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})) \tag{5.1}$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \min_{\bar{\mathbf{x}}\in\Gamma'} \|\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}}\| sign(\mathbf{n}'^{+}(\bar{\mathbf{x}})\bullet(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})) \tag{5.2}$$

ここに$\mathbf{n}^+$ は，き裂線Γ において上側を向く法線ベクトル，$\mathbf{n}'^+$は，き裂先端において直線Γ' におけるリガメント側を向く法線ベクトルである．

レベルセットXFEMにおいては，要素内の任意の位置での符号付き距離関数を，それらの節点値ϕ_I，ψ_Iと有限要素の形状関数N_Iを用いて次式で近似評価する．

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^{m} N_I(\mathbf{x})\phi_I, \bar{\psi}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^{m} N_I(\mathbf{x})\psi_I \tag{6}$$

式(6)を用いて，式(2)または(4)のf(x)を表すことができる．

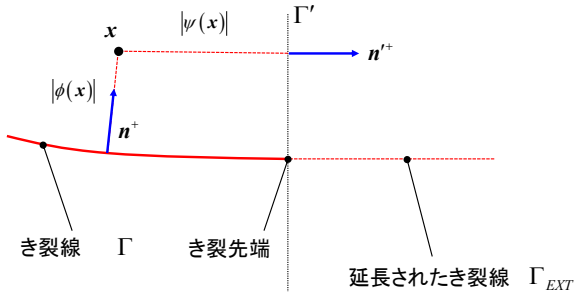


図1 符号付き距離関数による二次元き裂の表現

2.3 漸近解基底関数

XFEMにより二次元線形弾性き裂進展問題が解かれた後，すぐに三次元問題に拡張された．三次元問題においても，等方性線形弾性体については式(3)の漸近解基底関数が用いられる．き裂問題において用いられるき裂先端近傍の漸近解基底関数は，き裂先端近傍の変位場の漸近解を再構成できるものを用いるべきである．したがって，等方性以外の直交異方性体中のき裂や異種材界面き裂に対しては，厳密にはそれらに対応する変位場の漸近解を再構成できる基底関数を用いる必要がある．異種材界面き裂 [12]や，直交異方性材の界面き裂[13]に対する基底関数が提案されている．

XFEMは線形弾性問題だけではなく，非弾性問題，非線形問題にも拡張可能である．たとえば，応力ひずみ関係がべき乗則で表される非線形弾性材料についてのき裂先端近傍の応力場としては，HRR（Hutchinson, Rice, Rosengren）解が知られており[14]，HRR解を再構成できる漸近解基底も提案され[15]，弾塑性XFEM解析に用いられている．

2.4 拡充節点範囲

き裂先端近傍の漸近解基底に関する拡充節点を与える範囲については任意性があり，き裂先端を含む要素を構成する節点だけを拡充するTopological Enrichment法と，き裂先端を含む適当な範囲に含まれる節点を拡充するGeometrical Enrichment法が提案されている[16]．一方，ヘビサイド関数を拡充する節点は，必要最小限の範囲の節点を拡充しなければならない．

要素を構成する節点がすべて拡充されていない要素はブレンディグ要素と称される[17]．ブレンディング要素においては，一般に拡充した関数を再構成することが保証されないので，解の収束性に悪影響を及ぼす可能性がある．例として，図2 に示すようなXFEMによる二次元き裂解析において，"C"は漸近解基底関数の拡充節点，"J"はヘビサイド関数の拡充節点とする[11]．この場合，要素Aは，要素を構成する4つの節点で漸近解基底関数が拡充されているので，PU条件により漸近解を完全に再構成できる．一方，要素Bは，要素を構成する4つの節点のうち2つだけしか漸近解基底関数が拡充されていないので，漸近解を完全に再構成できない．一方，ヘビサイド関数を拡充する場合にはブレンディグ問題は生じない．なお，ブレンディグ問題に合理的に対処したXFEM解析手法も提案されている[18, 19]．

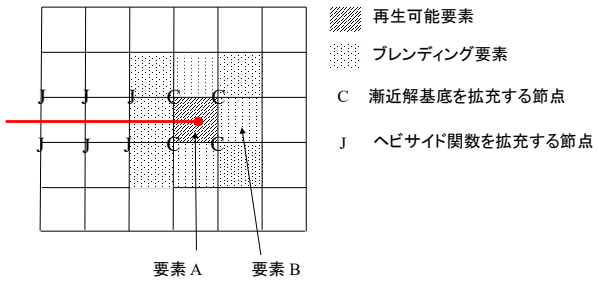


図2 ブレンディング問題

2.5 要素のパーティション

XFEMもFEMと同様に弱形式で表される支配方程式を離散化するための数値積分が用いられる．しかしながら，XFEMで不連続な関数を拡充する場合には被積分関数は不連続となるので，通常のFEMで利用されるようなルジャンドル-ガウス積分を

直接適用できない. その場合には，要素を複数個の部分領域に分割し，その領域内での被積分関数が不連続性を含まないようにしたうえで，数値積分する必要がある. このように有限要素を複数個の部分領域に分割することをパーティションと呼ぶことがある. パーティションされた領域の数値積分には，ルジャンドル-ガウス積分が適用される. ただし，近似関数は単純な多項式であるとは限らないので，積分点数の選択には注意が必要である.

図3に，二次元き裂問題についてのXFEM解析において四角形要素をパーティションした例[11]を示す. 図3 (a)は，き裂先端を含まない場合，図3 (b)は，き裂先端を含む場合である. 図3 (a)に示すようにき裂線が要素を完全に切断する要素を切断要素と呼ぶ. この場合，4つの三角形形状の部分領域に分割される. 一方，図3 (b)に示すようにき裂先端が要素に含まれる要素をき裂先端要素と呼ぶ. この場合，7つの三角形形状の部分領域に分割される.

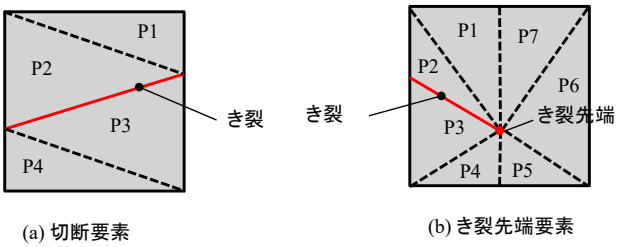


図3　XFEM解析における有限要素のパーティション

2.6　結合力モデル

DugdaleやBurenbrattは，き裂先端近傍の塑性域の大きさを線形破壊力学の枠組みで評価するために，結合力モデル(Cohesive Zone Model: CZM) を用いた[20]. CZMにおいては，き裂先端近傍に分布する結合力が作用するものとし，その分布をき裂面の表面力と相対変位との関係で表現する. あらかじめ損傷が発生する可能性がある領域に適切なCZMを導入しておくことにより，応力に基づく損傷の発生とエネルギーに基づく損傷の進展を考慮して，損傷過程におけるき裂の非線形挙動をモデル化できる. 様々な材料の損傷に対するCZMが提案されている. 結合力モデルをFEMモデルに組み込む場合には，通常インターフェース要素が用いられる. XFEMを用いる場合には，変位の不連続性を表現できる変位場の近似関数が用いられる. 一方，結合力モデルを導入したき裂（結合力き裂）の先端においては特異性が消失するので，漸近解基底関数を拡充することは妥当ではない. そのため，漸近解基底関数を用いずに，き裂先端での変位の不連続性を表現できるき裂先端要素が二次元三角形要素について定式化され，XFEMによる結合力き裂解析[21]に用いられた.

3.　準三次元XFEMによるCFRP積層板の損傷進展解析

高比強度，高比剛性を有するCFRP積層材料は，典型的な軽量構造である航空機の一次構造への利用が拡大されている. 一方，CFRP積層板は厚さ方向に繊維が存在せず，材料の特性が層間で連続でないので面外荷重に弱く，低速衝撃によっても積層板内部には損傷が発生することがあり，さらにこのような損傷が積層板の圧縮強度を低下させる危険性がある. このような衝撃損傷を有する積層構造の圧縮強度はCAI(Compression After Impact)強度と呼ばれ，積層材料を用いた航空機構造設計における重要な強度評定の一つとなっている. このような背景において，CFRP積層構造の損傷進展過程を模擬できる数値シミュレーション手法の確立が期待されている. そのために，CFRP の損傷形態である層間はく離，マトリクス割れ，繊維破断を表現できる損傷モデルを導入したFEMモデルによる強度解析が試みられている. 筆者も，CFRP積層板のマトリクス割れや層間はく離をCZMでモデル化したFEMやXFEMによる損傷進展解析を実施してきた[22-26]. ここでは，文献[26]に公表したCFRP積層平板の静的押し込み試験を対象とし実施したXFEMによる損傷進展解析を紹介する.

3.1　解析手法

多数のプライ層から構成されるCFRP積層板のプライ層間のはく離損傷を模擬するために，通常のFEMで用いられるインターフェース要素を用いてCZMを導入する. また，プライ層のマトリクス割れを模擬するために，割れが発生する可能性がある部分にXFEMを用いて不連続面を設定しCZMを考慮する. 解析対象が平板状の積層板であれば，文献[27]に示したヘビサイド関数だけを拡充した二次元三角形要素を用いたXFEMモデルを厚さ方向に押し出して得られる準三次元XFEMモデル[28](図4参照)を用いることができる.　CZMとしてCamanhoら[29]により提案された，混合モードを考慮できるバイリニア型の結合力モデルに準拠する方法を用いる. 図5(a)にバイリニア型のCZMにおける等価き裂面相対変位δ_mと表面力の関係を模式的に示す. 一般にCZMを用いた損傷進展解析は，たとえ線形弾性材料を想定した微小変形問題でも，CZMの表面力とき裂面相対変位との非線形関係により，材料非線形問題となる. この問題をニュートンラプソン法に基づく陰解法で解く場合には，しばしば収束解が得られないことがある. これは，図5(a)に示すバイリニア型の軟化直線部分に原因があるとされる. この問題を解決するために，Higuchi ら [22]は，Ridha ら[30]が連続体損傷モデルを用いたCFRPの損傷進展解析に用いた方法を参考にしてZig-zag CZM（ZCZM）を導入した. ZCZMにおいては，図5(b)に示すように，バイリニア型の軟化直線部分を，ジグザグ状の線分に置き換えることによりニュートンラプソン法による反復計算の収束性の問題を改善できる.

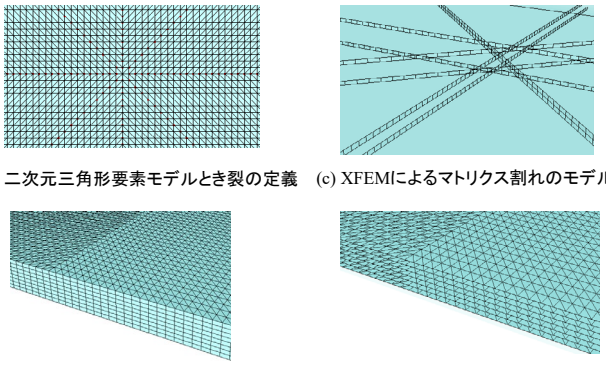
3.2　解析プログラム

前述した方法をプログラム実装して，準三次元XFEMコードNLXP3Dを開発した[23,24,28]. NLXP3Dは，二次元平面においてマトリクス割れをレベルセット法でモデル化しバイリニア型のCZMを導入し，幾何学的非線形性と圧子と積層板間の接触を考慮した損傷進展解析が実施可能である. 解法として，ニュートンラプソン法による陰解法，中央差分法による陽解法を用いることができる.

3.3　解析モデルおよび検証解析結果[26]

図6に示すような周辺を支持した長さ150mm，幅100mm，厚さ4mmの擬似等方性CFRP 積層板（積層構成：$[45/0/90/-45]_{2s}$）に直径16mmの球面状の圧子を準静的に押し込んだ場合の損傷進展解析を実施し試験結果[31, 32]と比較した. 図7(a) に示すような有限要素モデルに対して，メッシュと独立に図7(b)に示すような各プライ当たり6本のマトリクス割れをモデル化する. なお，本解析においては，前述したZCZMに加えて圧縮応力によるせん断強度の上昇を考慮できるZECZMを用いる. 陰解法により損傷解析を実

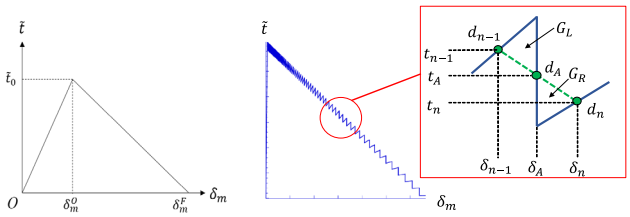
施し，圧子の押し込み量と荷重の関係を実験結果と比較して図8に示す．図8には，10本のマトリクス割れをモデル化した場合の結果も示している．解析結果は実験結果と概ね整合している．また，荷重低下点直後においてプライ層間の損傷分布をX線CTにより撮影し画像処理された結果を解析結果と比較して図9に示す．図9において実験の損傷形状をよく再現できる結果を“○”で，概ね再現できる結果を“△”で示してある．



(a) 二次元三角形要素モデルとき裂の定義　(c) XFEMによるマトリクス割れのモデル化

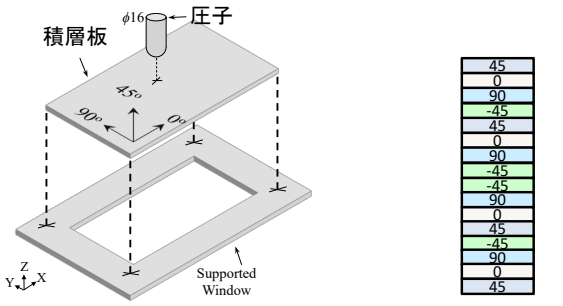
(b) 三次元5面体要素　(d) インターフェース要素によるはく離のモデル化

図4　準三次元XFEMによるCFRP積層板のモデル化



(a) バイリニア型CZM　(b) Zig-zag CZM (ZCZM)

図5　バイリニア型のCZMとZig-zag CZM



(a) QSI試験　(b) 積層構成

図6　CFRP積層平板のQSI試験

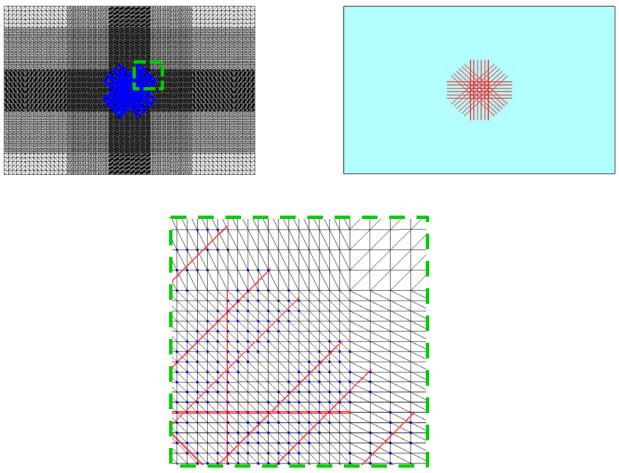


図7　6本のマトリクス割れを考慮したCFRP積層板のXFEMモデル

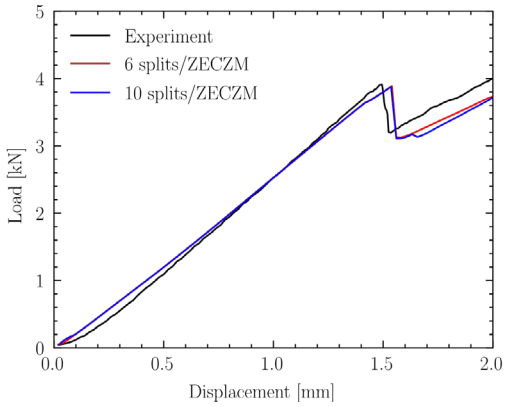


図8　押し込み量と荷重との関係[26]

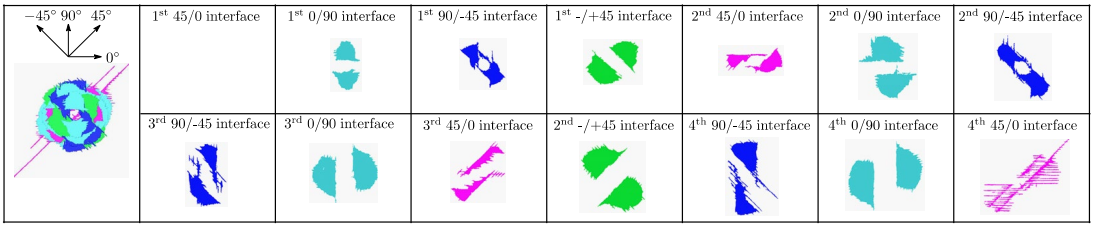
4. おわりに

本稿では，EFGM→PUFEM→Enriched EFGM→XFEM+レベルセット法といった，レベルセットXFEMの開発の過程を概説した後，その応用例として筆者が実施しているCFRP積層板の静的押し込み試験を対象とした損傷進展解析結果を示した．解析の詳細については文献[26]を参照されたい．なお，レベルセットXFEMのもう一つ応用分野として，破壊力学パラメータの評価および裂進展解析があるが，紙面の都合で割愛した．これについては，いずれまた機会があれば紹介したい．

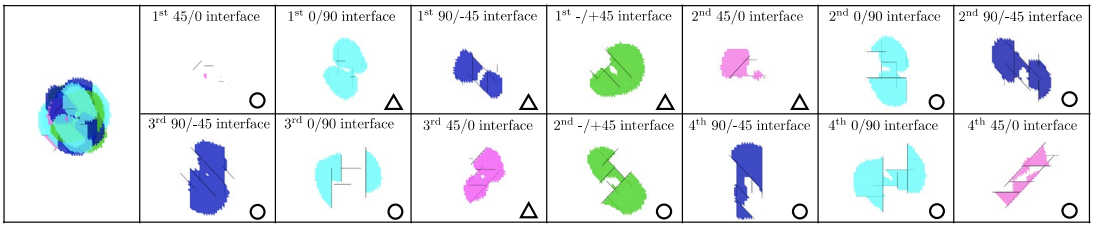
文　献

[1] Belytschko T. and Black T., Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.45 (1999), pp.602-620.

[2] Moës N., Dolbow J. and Belytschko T., A finite element method for crack growth without remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.46, (1999), pp.131-150.



(a)実験結果



(b)XFEM/6s splits/ ZECZM

図9　プライ層間における損傷分布について損傷進展解析と試験結果との比較[26][32]

[3] Belytschko T., Lu Y. Y. and Gu L., Element free Galerkin method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.37 (1994), pp.229-256.

[4] 鈴木克幸, 長嶋利夫, 萩原世也, メッシュフリー解析法, 丸善(2006-10).

[5] Belytschko T., The Element Free Galaerkin Method and Level Sets, 日本機械学会第13回計算力学講演会講演論文集, 00-17 (2000-11).

[6] Fries T.P. and Belytschko T., The extended/generalized finite element method: An overview of the method and its applications, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.84(2010), pp.253-304.

[7] Melenk J. and Babuska I., The partition of unity finite element method: Basic theory and applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 39 (1996), pp.289-314.

[8] Fleming M., Chu Y. A., Moran B. and Belytschko T., Enriched Element free Galerkin methods for crack tip fields, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.40 (1997), pp.1483-1504.

[9] Sethian H.A., Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interface In Computational Geometry Fluid Mechanics Computer Vision And Material Science, Cambridge University Press (1999).

[10] Stolarska M., Chopp D. L., Moës N. and Belytschko T., Modelling crack growth by level sets in the extended finite element method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.51, (2001), pp.943-960.

[11] 長嶋利夫, 計算破壊力学のための応用有限要素法プログラム実装, コロナ社 (2021-3).

[12] Sukumar N., Huang Z.Y., Prévost J-H. and Suo Z., Partition of unity enrichment for bimaterial interface cracks, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.59, (2004), pp.1075-1102.

[13] Ashari S.E. and Mohammadi S., Delamination analysis of composites by new orthotropic biomaterial extended finite element method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.86, (2011), pp.1507-1543.

[14] Anderson T. L., 粟飯原監訳, 金田, 吉成訳, 破壊力学(第3版)―基礎と応用―, 森北出版 (2011).

[15] Elguedj T., Gravouil A. and Combescure A., Appropriate extended functions for X-FEM simulation plastic fracture mechanics, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.195(2006), pp.501-515.

[16] Béchet E., Minnebo H., Moës N. and Burgardt B., Improved implementation and robustness study of the X-FEM for stress analysis around cracks, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.64, (2005), pp.1033-1056.

[17] Chessa J., Wang H. and Belytschko T., On the construction of blending elements for local partition of unity enriched finite elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.57, (2003), pp.1015-1038.

[18] Fries T. P. , A corrected XFEM approximation without problems in blending elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.75 (2008), pp.503-532.

[19] Shibanuma K. and Utsunomiya T., Reformulation of XFEM based on PUFEM for solving problem caused by blending elements, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 45 (2009), pp.806-816.

[20] de Borst R., Crisfield M. A., Remmers J. J. C. and Verhoosel C. V., Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Second Edition, John Wiley & Sons (2012).

[21] Zi G. and Belytschko T., New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.57 (2003), pp.2221-2240.

[22] Higuchi R., Okabe T. and Nagashima T., Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach, Composites Part A, Vol.95 (2017), pp. 197-207.

[23] 島崎紗緒里, 長嶋利夫, 結合力モデルを用いた準三次元XFEMによるCFRP積層板の損傷進展解析, 日本計算工学会論文集 (2017) Paper No.20170008.

[24] 王晨宇, 長嶋利夫, Zig-zag型結合力モデルを用いたFEMによるCFRP積層板の準静的押し込み試験解析, 日本計算工学会論文集, (2020) Paper No.20200009.

[25] Higuchi R., Warabi S., Yoshimura A., Nagashima T., Yokozeki T. and Okabe T., Experimental and numerical study on progressive damage and failure in composite laminates during open-hole compression tests, Composites Part A,Vol.145(2021).

[26] 王晨宇, 長嶋利夫, 準三次元XFEMを用いたCFRP積層板の準静的押し込み試験解析, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.895, No.20-00432 (2021).

[27] 長嶋利夫 澤田昌孝, き裂先端要素を用いたXFEMによる二次元き裂解析,日本機械学会論文集A編, Vol. 78, No. 796, pp. 1642-1655 (2012).

[28] Nagashima T. and Sawada M., Development of a damage propagation analysis system based on level set XFEM using the cohesive zone model, Computers and Structures, Vol.174, (2016), pp.42-53.

[29] Camanho P.P., Davila C.G. and de Moura M.F., Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials, Journal of Composite Materials, Vol.37 (2003), pp. 1415-1438.

[30] Ridha M., Wang C.H., Chen B.Y. and Tay T.E., Modelling complex progressive failure in notched composite laminates with varying sizes and stacking sequences, Composites Part A, Vol.58 (2014), pp. 16-23.

[31] Abisset E., Daghia F., Sun X.C., Wisnom M.R. and Hallett S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 1 – Experiments, Composite Structures, Vol.136 (2016), pp. 712-726.

[32] Sun X.C., Wisnom M.R. and Hallett S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 2 – Numerical simulation, Composite Structures, Vol.136 (2016), pp. 727-742.

特集2：安全で信頼できるCAEの利用を支える計算力学技術者の国内資格認定制度、及び海外資格認定制度との国際相互認証

安全で信頼できるCAEの利用を支える計算力学技術者の国内資格認定制度、及び海外資格認定制度との国際相互認証

吉田　有一郎
東芝インフォメーションシステムズ株式会社

1.　はじめに

製造業で計算機を使い仮想試作を実現して生産性を向上するという考え方をCAE（Computer Aided Engineering）と呼んだのはSDRC社のJ.R. Lemon[1]と言われる。（本来の）広い意味のCAEの範囲にはCAD（Computer Aided Design）、CAM（Computer Aided Manufacturing）、CAT（Computer Aided Testing）、PDM（Product Data Management：製品データ管理）、PLM（Product Lifecycle Management：製品ライフサイクル管理）等も含まれる。現在ではAR/VR（Augmented Reality/Virtual Reality）、IoT（Internet of Things）、機械学習（Machine Learning）、MES（Manufacturing Execution System：製造実行システム）等も含まれるだろう。

一般的には、設計・製造の検討事項をモデル化しシミュレーションで検討する（Modeling & Simulation）部分をCAEと考え、CAEに関連する工学、計算機科学、及び数学の学術的な研究に関連する分野を計算力学と考えることが多いように感じる。

企業におけるCAEの利用では、CAE投資から得られる利益を確実にするため、目的に適う妥当な結果を得る必要がある。目的に適う妥当な結果が利益に繋がることがビジネスの視点から見たCAEの品質であり、広い意味のCAEとの連携も重要である。

ISO9001品質マネジメントシステムの視点では、CAEの品質を支えるのはツール、プロセス、要員の3つの要素である。要員がツールを使用し、プロセスを運用するため、CAE投資の効果を確実にする施策としてCAE要員の力量の保証（質保証）は重要である。本稿では日本機械学会の計算力学技術者資格認定制度[2],[3]の現状、日本機械学会上級アナリストと英国NAFEMS PSE[4]の国際相互認証、及び海外におけるPSEの活用事例について紹介する。

2.　日本機械学会の計算力学技術者資格認定制度

日本機械学会の計算力学技術者資格認定制度は、2002年3月から日本機械学会の工学教育センター（その後、能力開発促進機構、イノベーションセンターと改編）の下に設けられた「計算力学技術者基準と認定に関する検討委員会」（委員長：吉村忍東大教授、幹事：長嶋利夫上智大教授）が中心となって準備が進められた。2003年4月に、「固体力学分野の有限要素法解析技術者」の認定に関する試行（パイロットスタディー）が行われ、2003年12月に固体力学分野の有限要素法解析技術者を対象とした計算力学技術者2級の認定事業が開始した。筆記試験に基づく計算力学技術者資格認定は世界最初と考えられる。これ以降、分野とレベルの拡大が行われ、現在では、固体力学分野の有限要素法解析技術者、熱流体力学分野の解析技術者、振動分野の有限要素法解析技術者の3分野のそれぞれで、初級、2級、1級、上級アナリスト認定の4レベルの認定事業が行われている。2019年からは計算力学技術者資格認定事業委員会（委員長：長嶋利夫上智大教授、副委員長：店橋護東工大教授、幹事：高野直樹慶応義塾大教授）としての活動になり、国内の代表的な計算力学技術者資格認定制度になった。2014年からは上級アナリストと英国NAFEMSのPSE（Professional Simulation Engineer）の国際相互認証も開始した。2020年度はCOVID19のため認定試験は初級と上級アナリストのみが実施された。2021年からは新体制（委員長：店橋護東工大教授、副委員長：神谷恵輔愛知工大教授、幹事：高野直樹慶応義塾大教授）になり、COVID19対策として1、2級試験はCBT（Computer Based Testing）で実施する予定である。図1に2003年から2019年の受験者数を示す。受験者数の累計は約2万人、合格者の累計は約1万人になっている。図2に2020年における全受験者の所属産業分野を示す。幅広い産業分野からの受験者が大多数を占めている。企業におけるCAE利用で、目的に適う妥当な結果を得るために計算力学技術者資格取得者が貢献していることが推察される。

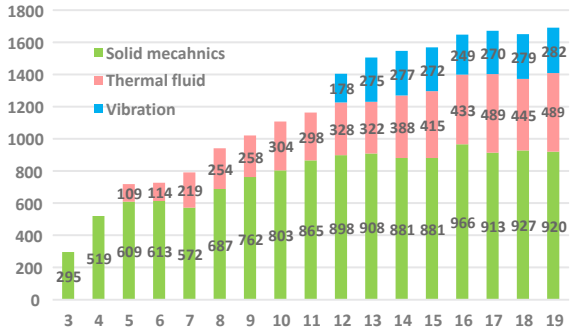


Fig.1 Number of applicants in 2003 - 2019

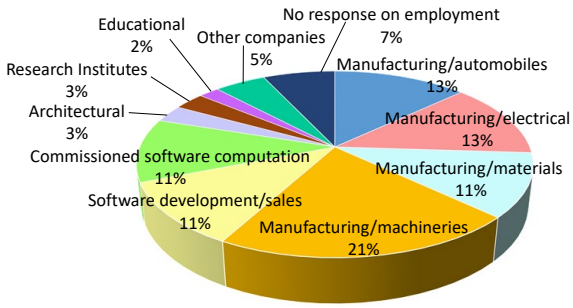


Fig.2 Distribution of industrial affiliation of applicants

上級アナリスト取得者は133名である。上級アナリストの認定レベルは、「理論及び実務の両面において幅広く深い知識と解析経験を有し、さらにCAE解析プロジェクトを企画・マネジメントできるとともに、高い倫理観を持ち、顧客や社会に対してプレゼンテーションできる。」である。ここで解析プロジェクトの企画・マネジメントとは「CAE 解析プロジェクトにおいて，CAE 解析タスク全般の企画立案，及び得られる解析精度や信頼性の保証，結果の活用法について実質的な責任を持ってあたれる能力のこと。プロジェクトの企画立案ではプロジェクトの目的と成果目標を定め、品質、コスト、納期の計画を立て、実施に際しては、計画を達成するためにリスクを考慮し、リソース（人、物、費用）を管理し、必要に応じ力量不足の要員の教育等を織り込み、各所に工夫を重ねプロジェクトを実施する。」である。

上級アナリストは複雑で難易度の高いCAE課題の解決を自身で企画し、プロジェクトチームを主導して遂行し、同時に人材も育成する力量がある。CAE投資の効果をより強化したい企業にとり上級アナリストは重要な要員と考えられる。

国際相互認証でPSEを取得した上級アナリスト（国際上級アナリスト）は累計46名、上級アナリストを取得したPSEは累計2名であり、相互の認証が実現している。

3. NAFEMSとPSE

英国DTI（Department of Trade and Industry）は、産学の要請に基づき、NEL（National Engineering Laboratory, East Kilbride, Scotland）の中に商用有限要素法ソフトウェアの完成度を高めるためのプロジェクトを置いた。その結果「有限要素法と関連技術の安全な信頼できる利用の促進」を目的として1983年にNAFEMS（National Agency for Finite Element Methods and Standards）が設立され1990年にNPOとして独立した。NAFEMSは1985年から2020年までに構造解析中心に52種類のベンチマークテストマニュアルを発行し、商用構造解析ソフトウェアの多くは品質保証プロセスの一部としてNAFEMSベンチマークテストを利用している。NAFEMSは1989年にISO9001:1987に基づく構造解析の品質保証マニュアル、QSS（Quality System Supplement）(5)を発行した（文献（5）は第2版）。2020年にはASME V&V Committeeと協力してISO9001:2015に基づくESQMS:01（Engineering Simulation Quality Management Standard）(6)を発行している。

ISO9001:2015を有限要素解析の品質マネジメントに適用する際の重要ポイントは、①精度検証された解析コード、②適切な解析プロセス、③力量ある計算力学技術者（力量は知識及び技能を適用できる、実証された能力）である。

NAFEMSは1990年代末から計算力学技術者資格制度であるRA（Registered Analyst）Schemeを開発・運用した。2010年から2012年にはEU資金を得て企業、大学と共にEASIT2（Engineering Analysis and Simulation Innovation Transfer）プログラムを実施し、成果の一つとして新RAであるPSEを開発した。EASIT2は力量ある計算力学技術者が保有すべき知識とスキルを定めることを目的とし、下記の成果物を得た。

①Educational Base：優秀な計算力学技術者が保有すべき力量を詳細に説明した記述の集合。「有限要素法」、「計算流体力学」、「動力学と振動」等、解析分野毎に分かれている。

②Competency Framework：個人のスキルを記録し、履歴を参照できるソフトウェアシステム。個人の教育を計画し結果をモニターすること等ができる。

PSEの要件は、「①ソフトウェアの使用経験及び②設計・製品認定に利用される解析の経験を含めた解析経験を詳述した資料と、③主張したい力量レベル（標準（Standard。十分に文書化された手順に基づき独力で解析ができる）、上級（Advanced。独力で解析と妥当性確認を計画できる）のいずれか）を提示しNAFEMSのアセッサの面接を受ける」である。NAFEMSは2013年6月からPSEの認定を開始している。PSEには書類審査のみで面接無しの初級（Entry）もある。

NAFEMS及びPSEは共に英国と欧州における産官学連携の成果事例と考えられる。Chartered Engineer（英国における技術者資格）等を認定する英国の規制当局である技術評議会（Engineering Council）がPSEの運用を監査し、NAFEMSがPSE資格の認定を実施している。

4. 国際相互認証の方法

日本機械学会は2014年1月に上級アナリストとPSEが等価であるという国際相互認証に関する覚書を締結し、2014年8月から固体力学と熱流体力学の上級アナリストのPSE申請受付を開始した（振動も2015年に開始）。上級アナリストとPSEは基本的に等価だが、計算力学技術者の力量の考え方に関して上級アナリストとPSEで異なる部分がある。上級アナリストのPSE申請手順を以下に示す。

上級アナリストが国際相互認証をしているPSE認定は標準（Standard）と上級（Advanced）の2種類である。また、専門分野として表1の17分野が選択可能である。ただし、熱流体力学の上級アナリストが選択可能な分野はCore Computational Fluid DynamicsとFundamentals of Flow, Heat and Mass Transferであり、振動分野の上級アナリストが選択可能な分野はDynamics and Vibration, Noise and Acoustics, Multi-body Dynamicsである。

Competency Frameworkは、Educational Baseを内蔵しており、表1に示す各技術分野に対し、学習すべき力量の記述をそれぞれ50～60項目以上有している。各記述は、内容の難易度に応じたStandardまたはAdvancedの区別と、学習用の参考書を有している。Standardを申請する場合はStandardの力量記述を、Advancedを申請する場合は、Standard及びAdvancedの両方の力量記述を学習する必要がある。PSE申請者は、申請する技術分野の力量記述の中で自身の業務に相応しい力量記述をすべて学習したことを自己申告する必要がある。各技術分野は、力量記述を学習した事に加え、十分な職務経験を有している事が必要である。上記の条件を満たしていれば、複数の技術分野を申請する事が可能である。表2にStandardとAdvancedの満たすべき能力の比較(4)を示す。StandardとAdvancedの差異は「独力で解析戦略と妥当性確認の計画を立てられる力量」、「専門家として認められること」、「スキルと専門性で他者を育成できること」である。表2の能力は項目により自己申告（Self）またはProfessional Engineer相当の2人以上の証人（Referee）による証明が必要である（日本機械学会を経由せず個人申請する場合）。

日本機械学会は、PSE申請を希望する上級アナリストから認定を希望する技術分野とレベルの申告を受け、上級アナリスト面接時の提出資料に基づいて申告された内容を審査し審査結果をNAFEMSへ提出する。

Table 1 NAFEMS Technical Areas

1	Core Finite Element Analysis	CORE
2	Core Computational Fluid Dynamics (CFD)	
3	Mechanics, Elasticity and Strength of Materials	BACK GROUND
4	Beams, Membranes, Plates and Shells	
5	Fundamentals of Flow, Heat and Mass Transfer (CFD)	
6	Materials for Analysis and Simulation	
7	Composite Material and Structures	POSSIBLE SPECIALISMS
8	Fatigue	
9	Flaw Assessment and Fracture Mechanics	
10	Thermo-Mechanical Behavior	
11	Buckling and Instability	
12	Dynamics and Vibration (Vibration)	
13	Noise and Acoustics (Vibration)	
14	Multi-body Dynamics (Vibration)	
15	Nonlinear Geometric Effects and Contact	
16	Plasticity	
17	Creep and Time-Dependency	

Table 2 PSE Certification Levels

	Standard Level	Advanced Level
	The Candidate:	The Candidate:
1	has sufficient knowledge and comprehension of theory to employ available software tools in a safe and effective manner as specified by the standard level competency statements found in the relevant technical areas of the PSE Competency Tracker;	has sufficient knowledge and comprehension of theory to employ available software tools in a safe and effective manner as specified by the standard & advanced level competence statements in the relevant Technical Areas of the PSE Competency Tracker;
2	is able to employ available software tools in a safe and effective manner and work independently, following a well-defined procedure without supervision;	plans analysis strategies and validation studies;
3	is aware of their own limitations when faced with new or novel problems;	is able to work independently on a range of complex and novel tasks;
4	conducts appropriate verification and validation activities to ensure that the results of their analyses are fit for purpose.	conducts appropriate verification and validation activities to ensure that the results of their analyses are fit for purpose;
5	-	is acknowledged as an expert;
6	-	is able to use their skills and expertise to mentor others.

5. 国際上級アナリストへのアンケート調査

日本機械学会は2020年に国際上級アナリストへの無記名によるアンケート調査を実施し、PSE認証にメリットを感じているかどうか、どうなればPSE認証のメリットが向上するか、PSE申請作業の難易度、日本機械学会とNAFEMSのサポート内容は適切か他を調査した。40名の国際上級アナリストから20件の回答を頂いた。アンケート結果の一部を紹介する。図3にPSE認証のメリットに対する回答を示す、図3では65%の回答者はメリットを感じ、35%はメリットを感じてない。自由記述欄のメリットの内容は、(1) PSEを名刺に入れ、PSEを知っている人から評価された。(2)ソフトウェアベンダの対応が丁寧になった。(3)解析依頼者からの信頼が増した。(4)NAFEMS(から案内が来る) Webセミナー参加を通じ海外の計算力学技術者と交流できた。他がある。

PSE認証にメリットを感じない回答者も、上級アナリスト及びPSEの知名度が向上すれば認証のメリットは向上すると考えている。図には示さないがPSE申請作業の難易度に対しては、普通又は簡単という回答は70%。日本機械学会及びNAFEMSのサポートに対しては普通又は良いが100%だった。

6. 海外におけるPSE活用事例

先端微細半導体の製造工程で使用するリソグラフィ装置はアルゴン・フッ素(ArF) 光源や、極端紫外(EUV) 光源を用いる。液浸ArFやEUVの装置はオランダASMLが極めて大きなシェアを占めている[7]. ASMLはリソグラフィ装置開発における構造・流体等のシミュレーションを正しく実施するため、NAFEMS PSEを導入し独自のEntry Level+[8]を設定した。ASMLはEntry Level+以上を認定した技術者だけにCAEソフト利用IDを発行し、解析品質のレベルを維持している。

富岳のA64FX CPUは設計に7nmfinfet[9]を採用し、TSMCが製造した。リソグラフィ装置は液浸ArF利用と推察する。計算力学が利用する最先端のHPCの開発にNAFEMS PSEが貢献している事例と推察する。AppleのモバイルSoC(System on a Chip) A14 Bionicは5nmプロセス[10]を採用しEUVが利用される。最新モバイル機器の開発にもNAFEMS PSEが貢献している。2023年にはIntelのクライアントPC用CPU等にEUVが採用される予定[11]である。

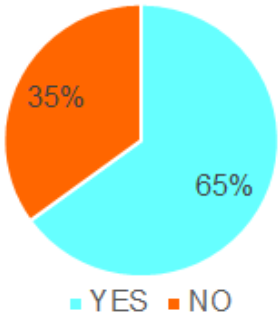


Fig.3 Benefit of PSE Certification

7. おわりに

日本機械学会の計算力学技術者資格認定制度の現状、英国NAFEMSとPSE、上級アナリストのPSE申請の方法、及び海外におけるPSEの活用事例を紹介した。

国際上級アナリストがNAFEMSコミュニティとの交流を通じて成長し、シミュレーション技術でイノベーションを加速する事により、計算力学技術者資格認定制度の知名度も向上することを期待する。

文　献

（1） Lemon, J.R., Tolani, S.K., Klosterman, A.L., Integration and Implementation of Computer-Aided Engineering and Related Manufacturing Capabilities into the Mechanical Product Development Process, CAD-Fachgesprach, (1980), pp.161-183.

（2） http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm

（3） 吉村 忍, 計算力学技術者認定事業の概要, 日本機械学会誌, Vo.121, No.121, (2018), pp.10-12.

（4） http://www.nafems.org/professional-development/certification/

（5） Smith, J.M., Quality System Supplement to BS EN ISO 9001 Relating to Engineering Analysis in the Design and Integrity Demonstration of Engineered Products Issue 2.0, NAFEMS R0013, 1999.

（6） Smith, J.M., Quality Management Standard: Engineering Simulation Quality Management Standard, NAFEMS ESQMS:01, 2020.

（7） 湯之上隆, 半導体装置市場、報じられない地殻変動…カギ握る台湾TSMCの動向、中国市場の挙動不審. / https://biz-journal.jp/2019/11/post_126627.html

（8） Huizinga, F., Introducing PSE within ASML. / https://www.nafems.org/events/nafems/2017/asml-pse-certification/

（9） 新庄直樹, HPCフォーラム スーパーコンピュータ「富岳」の開発. / https://www.ssken.gr.jp/MAINSITE/event/2019/20190820-hpcf/lecture-04/20190820_HPCF_shinjo.pdf

（10） 後藤弘茂, Appleデバイスの次の心臓となるSoC「Apple A14」. / https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/kaigai/1279689.html

（11） 笠原一輝, Intel、半導体技術首位の座を2025年に奪還する意欲的な新ロードマップ. / https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1340262.html

計算力学技術者資格制度と国際相互認証（PSE）の活用とSOLIZEの取り組み

岩井　信弘
SOLIZE 株式会社

1.　はじめに

本会が認証する計算力学技術者（CAE技術者）資格制度(1)は，2003年から始まり，固体力学，熱流体力学，振動の3分野に分かれ，初級，2級，1級，上級アナリストの順に難易度が上がります．各分野とも，2級以上からは，書類審査に加えて学科試験ないしは面接試験（口頭試問）が課されます．

図1に2021年8月26日現在の各分野，各級の合格者数累計を示します(2)．3分野を合わせた合格者の累計は2級，1級，上級の順に，5916名，2428名，133名となり，CAEを専門とする実務家にとって，既にデファクトスタンダードになっていると考えます．

2014年から，計算力学技術者についての国際相互認証制度が始まり，最上位の上級アナリストは，工学設計・解析・シミュレーションコミュニティのための国際団体であるNAFEMS(3)(4)のCAE技術者認定資格PSE (Professional Simulation Engineer)(5)の認証を申請することができます(6)(7)．PSE認証希望者は，本会に申請書を提出することにより，本会計算力学技術者資格認定事業委員会内に設置された国際相互認証WGにより審査が行われ，その判定結果がNAFEMS事務局に提出されます．以降NAFEMSが指定する所定の事務的手続をすることで，PSE認証が交付され,国際上級アナリストと名乗ることができます．

図2にPSEの累積合格者数（NAFEMSと本会との相互認証数）の履歴を記します(2)．2021年8月26日現在，固体力学分野の上級アナリストからの認証者数が30名，熱流体分野から19名，振動分野から1名，合計50名です．図1に記した本会認定の上級アナリストの38％がPSE認証を受けたことになります．

2.　上級アナリストとPSEとの差異

本会認証の上級アナリストとNAFEMS認証PSEとは，基本的に同等の資格である旨の合意のもと，国際相互認証が行われています(6)．但し，その保持・利活用において，以下2点に差異があるため，記載します．

(1) 永久資格の有無

上級アナリストは，5年ごとに更新審査(書類審査)をする必用がありますが，資格保持から10年目である2回目の更新をすると，再度の更新を必要としない永久資格となります．

一方，PSEは定期更新が必要な資格制度であるため，PSE保有者は，相互認証の前提となる上級アナリストについても，2回目以降の更新が必要となります．但し，PSEを失効するなどで保持していない場合は，上級アナリスト資格は，永久資格になります．本情報の出典は，筆者の上級アナリストの2回目更新後に，本会事務局から頂いた電子メールです．

(2)表示する専門分野の粒度

上級アナリストが資格を名刺等に表記する場合は，「固体力学」,「熱流体力学」,「振動」の3分野の別を記載することが本会事務局により推奨されています(8)．一方PSEの場合は，より細かな分野であるTechnical Areasと，専門性の度合いであるStandard ないしはAdvanced の別をNAFEMSに登録します．

表1にTechnical Areasを示します．このうちNo. 1 ～ 17までが，相互認証の対象となります．筆者がPSEの認証を受けた際のTechnical Areasは以下です．

- Beams Membranes Plates and Shells – Advanced
- Core Finite Element Analysis – Advanced
- Materials for Analysis and Simulation – Advanced
- Mechanics, Elasticity and Strength of Materials – Advanced
- Nonlinear Geometric Effects and Contact – Advanced
- Plasticity - Advanced

PSE認証者のTechnical Areas は，PSE-Certified Professionals (9)として公開され，該当分野の専門家を見つけることができます．

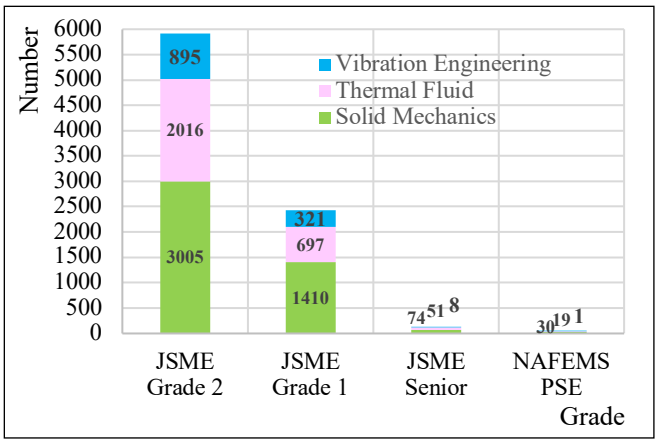


図1　本会認定CAE技術者,及びNAFEMS-PSEの累積合格者数（出典(2) の2021年8月26日現在の情報を筆者が編集, 以下同）

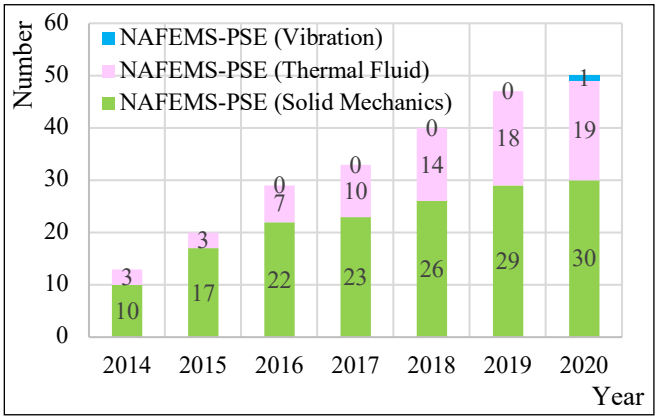


図2 NAFEMS－PSE（国際上級アナリスト）累積合格者数(2)

表1　上級アナリストが相互認証を受けることができるPSEのTechnical Areas（No. 18 ～ 26は適用除外. 文献(7)(10)を筆者が改変）

No.	NAFEMS Technical Areas	JSME Field
1	Core Finite Element Analysis	Solid, Vibration
2	Core Computational Fluid Dynamics)	Thermal-Fluid
3	Mechanics, Elasticity and Strength of Materials	Solid, Vibration
4	Beams, Membranes, Plates and Shells	Solid, Vibration
5	Fundamentals of Flow, Heat and Mass Transfer	Thermal-Fluid
6	Materials for Analysis and Simulation	Solid, Vibration
7	Composite Material and Structures	Solid
8	Fatigue	Solid
9	Flaw Assessment and Fracture Mechanics	Solid
10	Thermo-Mechanical Behavior	Solid
11	Buckling and Instability	Solid
12	Dynamics and Vibration	Vibration
13	Noise and Acoustics	Vibration
14	Multi-body Dynamics	Vibration
15	Nonlinear Geometric Effects and Contact	Solid
16	Plasticity	Solid
17	Creep and Time-Dependency	Solid
18	*Multi-physics Analysis*	(Excluded)
19	*Multi-Scale Analysis*	(Excluded)
20	*Probabilistic Analysis*	(Excluded)
21	*Electromagnetics*	(Excluded)
22	*Optimization*	(Excluded)
23	*Verification and Validation*	(Excluded)
24	*Management General*	(Excluded)
25	*Simulation Process Data Management*	(Excluded)
26	*PLM and CAD-CAE Integration*	(Excluded)

3.　弊社の取り組み

(1)資格取得の推奨

筆者の職掌であるCAE事業は，国内外に約300名のCAE専任エンジニアを擁し，CAEエンジニアリング及びCAE技術コンサルティングを主な事業としています. CAEを正しく使うことで，社会からの信任を得ることができ，エンジニア一人ひとりの技術力の向上がそのまま事業全体のブランディングとなることに鑑み，CAE専任者には本会の計算力学技術者2級以上，及びPSEの取得を推奨し，支援しています. 具体的支援内容は，受験料やテキスト代，登録料，更新にかかる費用を会社負担としています.

現時点での弊社における計算力学技術者の3分野の2級取得者の総数は17名（中途採用者が入社前に取得したものも含む）であり，そのうち1級まで取得した者は5名です. 更に上級まで取得した者は2名となり，2名ともPSEを取得しました.

(2)資格の利活用

対外的には，名刺に計算力学の資格を表記し，専門性の担保として，顧客に示しています. 採用においても，かなり考慮しています. 昇格候補者の職務経歴としても，参酌されています.

4．PSE取得の利点

(1)業界における信頼

計算力学技術者の2級以上の3分野合格者の累計が8477名（図1）であることに対し，PSE取得者の累計は50名(図2)，すなわち上記の0.6パーセントに満たず，いまだ希少であると考えます. 権威ある公的機関から認証を受けていることと，その希少性とから，専門家間において，一層の信頼が得られると考えます.

上級アナリストは，固体力学，熱流体力学，振動の3分野から選択されることに比し，PSEの場合は，表1に示す詳細なTechnical Areasも示されます. 実務のプロフェッショナルの方とお会いし，具体的な活動をするときは，お互いに業務経歴，発表論文や講演論文などを示すことが多いところ，PSEとそのTechnical Areasを示せば，自己紹介の代わりとなり，肩書として使えると思います. 筆者の場合，欧州系の自動車関連のメガサプライヤの日本法人において，一時期，CAE業務から離れ，試作・実験の責任者をしていた経験がありますが，本国のCAE部門責任者（当時の立場からは「雲上人」）から，筆者がCAEを専門としていたことは認知されていました.

(2)アカデミアへのエントリーチケット

大学及び，大学の先生に対する履歴証明として有効かと思います. 筆者の場合は，研究よりも開発が主業務であることに加え，秘匿との関係で，論文発表や講演の機会は限られます. しかし，筆者がPSEの有資格者であることを知って下さった先生方は，当該分野の専門家として筆者を認知して下さり，研究者のコミュニティへ容易に入ることができたと実感しています.

また，PSEをお持ちの知人は，大学との共同研究のために，当該大学の研究室に研究員として在籍しましたが，在籍のための適正の審査の際に，履歴証明の一部としてPSEとそのTechnical Areas を提示したそうです.

(3) NAFEMSのコミュニティへの参加

NAFEMS主催のカンファレンスやイベントの情報は，参考になり，CAEのトレンドウォッチングとしても有効と考えます. 形式も，オンラインあるいはオンラインと面直併用となっているため，参加しやすくなっています. もちろんPSEの有無にかかわらず，メンバーシップに応じた費用を払えばどなたでも参加できますが，前述のPSE保持者によると，PSEは自己紹介替わりに使え，チャットなどを通じてすぐにコミュニティに入りこめた，との感想を頂戴しました.

(4) NAFEMSの教育プログラムの活用とTechnical Areas の追加

NAFEMSにおいては，CAE分野の様々なトレーニングプログラムが整備されています(11). 形式も，e-learning, virtual classrooms, custom classes などあり，利用者への便宜が図ら

れています. 使用言語は，英語が最も多く，仏語，ドイツ語の講座もあります. 学習の継続に活用できることに加え，コースごとにPSE Competencies が記載されており，本会による相互認証の適用除外となっているTechnical Areas（表1のNo. 18 ～ 26）をNAFEMS に直接申請し，PSEに追加する際に利用できると考えます(12).

(5)モチベーション維持

NAFEMSからの情報, コミュニティへの参加, 教育プログラムへの参加などは, CAEの勉強を継続する意識づけとなります.

また, 上述のように, 上級アナリストが2回の更新を経て, 永久資格となることに対し，PSEは，以降も更新が必要であるため，CAEの研鑽を続ける動機となり得ます. 筆者が前職の試作・実験の責任者を辞してCAE職務に戻った理由の1つとして,「PSEを失効させたくない」との思いもありました.

5. おわりに

本記事執筆にあたり，計算力学技術者試験1級取得者3名に，PSEの存在の認否と，将来PSEを取得したいかを伺いました. 結果，PSEを認知していない方は1名のみでした. その一方で，1級取得者の全員が，PSE取得を考えていないとのことでした. その理由を伺うと，知名度不足を全員が指摘し,「外資に勤務するならば考慮しますが, 国内企業の勤務ではメリットが分からない」,「海外においてPSEに認知度があるならば, 海外取引が多い会社の方は興味を持つのではないか」などのご指摘もいただきました. また，PSE取得者2名に，PSEの利点について伺い，そのいくつかを4章に記載しました. 回答下さった方々に感謝申し上げます.

PSEの認知度向上を強く望むとともに，本記事がPSEの利活用について知るきっかけとなれば幸甚です.

参考文献

（1） 本会, 計算力学技術者資格認定事業委員会，https://www.jsme.or.jp/cee/

（2） 本会, 計算力学技術者資格認定事業委員会, データ集 https://www.jsme.or.jp/cee/data/

（3） NAFEMS, https://www.nafems.org/

（4） NAFEMS (日本語ページ), https://www.nafems.org/community/regional/japan/about/

（5） NAFEMS, PSE Certification, https://www.nafems.org/professional-development/certification/

（6） 本会, 計算力学技術者資格認定事業委員会, 国際相互認証について，https://www.jsme.or.jp/cee/nafems

（7） 日本機械学会上級アナリストとNAFEMS PSE の国際相互認証, 吉田有一郎, 2014, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmecmd/2014.27/0/2014.27_169/_pdf/-char/ja

（8） 本会, 計算力学技術者資格認定事業委員会, 資格活用のお願い, https://www.jsme.or.jp/cee/qualifer/use

（9） PSE Certified Professional, https://www.nafems.org/professional-development/certification/pse-register-of-certified-professional-simulation-engineers/

（10） 本会, 国際相互認証申請用紙（ver.3）, 様式1，https://www.jsme.or.jp/cee/uploads/sites/3/2018/08/youshiki_1.pdf

（11） NAFEMS Training, https://www.nafems.org/training/

（12） NAFEMS, PSE Competency Tracker, https://www.nafems.org/professional-development/competency_tracker/

航空機エンジン開発品質保証への計算力学技術者認定制度の活用

陳内　鉄生
株式会社本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 GT 開発室

1.　はじめに

昨今のCAE解析技術の発展は目を見張るものがある。コンピュータ自体の性能の向上やソルバ・プリポストの機能向上により、CAE解析の大規模・複雑化が進み、同時に簡易な解析であれば強度解析・評価の十分な知識がなくても簡単な講習のみで解析が行えるようになった。このような進歩はスピーディな強度検討という観点では大きな利点である一方、CAE解析の品質保証という観点ではエラーが容易に紛れ込むという問題を孕んでいる。CAE解析のエラーは製品の開発スケジュールに大きな影響を及ぼす可能性があるだけではなく、製造者責任として市場に出る前に必ず取り除かなくてはならない。開発の中で増大していくCAE解析の品質の保証をすることは重要な課題であり、その中で社内外で統一した基準となりうる計算力学技術者認定の意味合いは今後ますます重要になると考えられる。

航空業界は後述するように他の業界に先駆けてCAE解析に基づいた型式認定を行っていることから、CAE解析の品質保証が認定取得の中で重要な位置を占めている。この紙面を借りて、航空機エンジン認定でのCAE解析の役割と、品質保証における計算力学技術者資格活用の取り組みについて概要を紹介する。

2.　ホンダの航空機エンジン事業

図1にホンダにおける航空エンジン事業の事業形態を示す。筆者が所属する株式会社本田技術研究所は本田技研工業株式会社の研究開発子会社であり、ホンダの航空機エンジン事業の中では、製品の設計や型式認定書類の作成などのエンジニアリング業務を担っている。一方で、量産は米国法人のホンダエアロインクが担っている。

ホンダは1980年代に航空機エンジンの基礎研究をはじめ、2003年に独自開発した1800lbsクラスのターボファンエンジンHF118で初飛行を行った。2004年からはGE アビエーションと共同出資でGE Honda エアロエンジンズを設立し、HF118を基に2社共同で推力を2000lbsクラスに改良したHF120を開発した。図2に示すHF120は2013年12月にFAA(米国連邦航空局)か

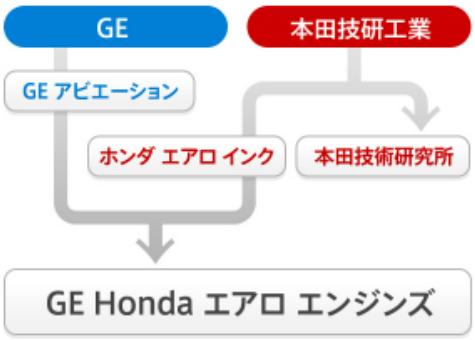


図1 ホンダの航空機エンジン事業形態

図 2　HF120ターボファンエンジン

ら型式認定(Type Certificate, TC)を取得し、その後EASA(欧州航空安全機関)をはじめ日本、中国、ロシアなどの各国の航空当局の型式認定を取得している。

また、ホンダエアロインクは2015年3月、FAAから製造認定(Production Certificate, PC)を取得し、量産エンジンの製造・出荷を開始した。FAAが新規に製造認定を発行したのは23年ぶりである。

3.　航空機エンジンの型式認定におけるCAE解析の役割

航空機エンジンの型式認定に関する法規は、米国においては14 CFR Part33 [1](連邦規則集14巻 33部) として規定されている。

14 CFR Part33は44個のアクティブなセクションからなっており、各セクションの中がさらに複数のパラグラフに分かれている。型式認定を取得するためには、このパラグラフに記載された法規それぞれについて、エンジンがそれらを満たしていることを実証しなくてはならない。

実証方法はあらかじめ決まっているわけではなく、型式認定申請者が提案しFAAが承認するものである。エンジン試験、コンポーネント試験、CAE解析、或いはそれらの組み合わせなど、申請者がFAAに対して提案し、それをFAA承認することによって、実証手法が決定する。但し、一部のセクションでは実証方法が明確に決まっていたり、FAAが推奨の実証方法をセクションの付帯文書(Advisory Circular[2])として発行しているものがある。その中にはCAE解析で試験の結果を修正する項目や、CAE解析の結果そのものが実証の根拠とする項目などがあり、それらの項目ではCAE解析を用いて法規に準拠している根拠を示すと同時に、CAE解析自体の妥当性を示さなくてはならない。

そのために重要になるものの一つが、CAE解析の品質を保証する仕組みである。航空機エンジンは、運用環境が地上から低温・低気圧下の高高度まで／砂漠から寒冷地までと多様なことから、FAAがCAE解析による実証を要求していないケースでも、試験のみで実証することが困難な項目が多い。例えば、機体のマニューバによってエンジン内部にかかる荷重は慣性力であるため

静的な試験で荷重を付与するのが難しく、かつ飛行条件も複雑であるため、テストベンチでの再現が困難である。他にも、試験条件を絞り込むのにもCAE解析が使われる。結果として、型式認定に必要なCAE解析の量は膨大になり、すべてのCAE解析について一つ一つ妥当性をFAAに示すことは現実的ではない。そのため、社内で統一した基準やCAE解析の品質を保証する仕組みを持つことによって、CAE解析の妥当性を包括的に示すことが、型式認定の取得には必要不可欠である。

さらに、CAE解析による実証は、CAE解析の品質保証だけでは達成することができない。型式認定は、個々のエンジンの耐空証明審査をエンジンの型式認定審査で簡略化する仕組みであるから、型式認定の目的は量産されるエンジンすべての耐空性の実証である。従って、型式認定は量産で発生しうるばらつきを含める必要があり、量産時の材料SPEC/製造SPECなどの品質保証計画に基づいていなくてはならない。

CAEによる実証も当然、量産の品質保証に基づいている。CAE解析は特に材料特性の影響が大きいため、量産の品質保証システムがあって初めてCAE解析の品質保証が可能であると言える。

4. CAE解析品質保証への計算力学技術者認定制度の活用

上で述べたように、航空業界ではCAE解析の品質が保証されていること認定を行う航空局に説明するのに、CAE解析の品質を保証する仕組みを持っていることが重要である。弊社では現在、下記3点を軸に設計時のCAE解析の品質保証に取り組んでいる。

I. 解析担当者の能力の技能証明
計算力学技術者1級取得の推奨

II. CAE解析評価者の能力証明
上級アナリスト・NAFEMS PSE資格保持者
航空機エンジンに特有の強度解析の実績

III. ノウハウ/手順の文書化とメンテナンス
PSE資格保持者による確認

解析担当者の技能についてはOJTの側面もあるため資格取得の推奨にとどめている。

一方で評価者にはNAFEMS PSE資格(Professional Simulation Engineer, 国際相互認証制度利用)を要求し、さらに航空機エンジンに特有の項目について過去の実績や能力に基づき評価者に割り当てている。そのため、筆者の所属している部署では筆者自身も含め複数のPSE資格保持者(国際上級アナリスト)を擁している。

また、PSEは上級アナリストよりも詳細に資格認定範囲が区切られており、26の領域についてAdvanced/Standard の2レベルの認定が行われており、国際上級アナリストの申請時には領域およびレベルの認定根拠の呈示が要求されている。弊社ではCAE解析の評価者を選定する際は、候補者がPSEのAdvanced認定を受けている項目と評価内容を考慮し選定をしている。

ノウハウ/手順の文書化とメンテナンスという点でもPSE資格者の判断を必要とすることで、文書品質の向上を図っている。

5. 海外における解析技術者資格とPSE資格活用の理由

航空用ガスタービンに於いては新規参入者がほぼいないこと、航空業界が解析技術の発展と共に業界が成長してきたことからと思われるが、各社独自の社内資格制度を持っており、PSE資格を活用している事例は聞こえてこないが、NAFEMSのカンファレンスに招かれるなど関係が全く無い訳ではない。機体側ではブラジルのEmbraer社がSPDM(Simulation process and Data management)にPSE資格を活用している例[3]がある。各国の航空局の中でも特にEASAはNAFEMSとの関係が深く、NAFEMS主催のカンファレンスでもEASAの事例が良く紹介されている。このように、NAFEMS及びPSEの資格の知名度は海外では高く、十分に通用する資格であると言える。

弊社がCAE解析の品質保証に国際上級アナリスト資格を活用に取り組むのには、上記のように海外に於いてNAFEMS PSEの知名度が高く対外的にCAE解析の品質を保証するのに最適であること、海外に量産拠点(ホンダエアロインク)を持つ弊社にとって、現地法人の社員も資格が取得可能なPSE資格は都合が良いこと、PSE資格を持つことによってNAFEMS経由でCAE解析に関する幅広い情報が得られることなどがあげられる。

6. 課題と今後の展望

計算力学技術者認定制度をCAE解析の品質保証に活かしていく取り組みの中で、いくつかの課題も見えてきた。

一つ目は、評価者として資格を運用する場合の、資格維持の体制構築である。計算力学技術者資格は、実務能力を重視しており、資格の更新にはその期間の実務経歴が必要になる。評価者の資格として国際上級アナリスト資格を用いた場合、評価の数が増えるに従って実務を行う機会が減り、実解析業務を行うことが難しくなるという現状がある。

二つ目の課題は、PSE資格に足りない項目の独自拡張である。特に材料データの処理についてはPSE資格の中でも複合材の規定があるのみであるが、実際のところCAE解析の品質保証のための材料データの計測・統計処理は、単純な材料開発とは全く違った分野で、それ単体で一つのカテゴリを構成する技術領域である。

最後に、相互認証可能な領域が、PSEの領域の一部にとどまっていることである。現在PSEの26領域のうち17の領域について相互認証が認められている。昨今適用領域が拡大している中では、OptimizationとVerification and Validation領域では相互認証が認められていない。

弊社のようにCAE解析による実証を目的とした場合、OptimizationとVerification and Validation (検証、妥当性の確認)はぜひとも相互認証に含めて欲しい領域であるが、現在は個別のPSE資格の取得や社内資格制度など幅広く対応を検討している。

OptimizationやVerification and Validationのような今後のCAE解析にとって重要な項目は、相互認証制度の発展にとっても重要だと考える。今後の相互認証制度の拡大に大いに期待したい。

参考文献

[1] 14 CFR Part 33
https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/engine_prop/engine_prop_regs/regs/

[2] Advisory Circulars for 14 CFR Part33
https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.list/parentTopicID/109

[3] Applications of SPDM in Aircraft Structural Analysis at Embraer, Britto Maria. R, NWC_19_481
https://www.nafems.org/publications/resource_center/nwc_19_481/

部門からのお知らせ

講習会報告「機械学習×熱・流体工学の最先端」，3部門合同オンライン講習会

高木　周
東京大学

計算力学部門では，昨年の9月と今年の3月に，熱工学部門・流体工学部門と合同の3部門合同オンライン講習会を開催した．コロナ禍で従来の対面式での講習会の開催が困難な状況であったが，熱工学部門からの提案で，3部門合同のオンライン講習会という初の試みを行った．通常の講習会だと機械学会の会議室や大学の講義室などを用いて最大定員100名程度で開催されるが，今回はオンライン開催であったため，参加人数の上限を引き上げることができ，実際には，100名を大幅に超える200名近い参加者があり，大変盛況であった．オンラインの強みを活かし，受講生は全国各地から講習会に参加でき，また，講師側の方も国内だけでなく，海外に在住する方にお願いすることが可能となった．実際に，3月10日に行われた講習会ではUCLAの平邦彦先生が，アメリカ（ロサンゼルス）からオンラインで接続して講義を行ってくださるなど，従来とは異なる形式での講習会が可能となった．

今回は，「機械学習×熱・流体工学の最先端」と題し，それぞれ以下の内容，講師陣で講習会を実施した．

第1回 2020年9月25日の講習会：
12:30 ～ 14:00／機械学習の基礎　津田 宏治（東京大学）
14:10 ～ 15:10／乱流×機械学習　深潟 康二（慶應義塾大学）
15:30 ～ 16:30／熱ふく射×機械学習　櫻井 篤（新潟大学）
16:40 ～ 17:40／燃焼不安定×機械学習 後藤田 浩（東京理科大学）

第2回 2021年3月10日の講習会：
11:00 ～ 12:30／機械学習の基礎 樋口 知之（中央大学）
13:40 ～ 14:40／乱流×機械学習 平 邦彦（UCLA）
14:50 ～ 15:50／伝熱×機械学習 塩見 淳一郎（東京大学）
16:00 ～ 17:00／燃焼×機械学習 中谷 辰爾（東京大学）

第一線で活躍する蒼々たるメンバーを講師としてお迎えし，機械学習の基礎に関する大変わかりやすく，また最新の理論や手法の発展も含めた講習からはじまり，それぞれ個別の分野での具体的な応用例まで，大変興味深く，役に立つ内容であった．私自身，大変勉強になり，この企画にはぜひまた参加したいと思った次第である．計算力学部門では，この3部門合同講習会を継続して企画していく予定ですので，ぜひ皆様，今後も楽しみに！

計算力学技術者2級（固体力学分野の有限要素法解析技術者）認定試験対策講習会（2021年9月1日～2日、オンライン）開催報告

高野　直樹
慶應義塾大学

2020年度はコロナ禍の中で中止となった計算力学技術者認定試験は、本年度はCBT（Computer Based Test）方式で開催されることとなった（https://www.jsme.or.jp/cee/）。After Coronaというよりは、With Coronaの新しい形態への移行であろうと感じている。認定試験は固体力学分野、熱流体分野、振動分野のそれぞれにおいて、2級、1級、上級アナリストがある。この認定試験を実施する計算力学技術者資格認定事業委員会と同じ学会内ではあるが、独立した組織である計算力学部門では、2005年から固体力学分野2級試験の対策講習会を開催してきた。本講習会も2020年度は試験の中止の決定とともにお休みとなったが、本年度は2021年9月1日(水)、2日(木)の2日間の午後を使って、オンライン講習会（Zoomを利用）として無事リスタートを切ることができた。

本年度の講習内容と講師（敬称略）は以下の通りである。

1. 数学・数値計算法の基礎
　　塩谷　隆二（東洋大学）
2. 固体力学の基礎
　　高橋　昭如（東京理科大学）
3. 有限要素法の定式化
　　松田　哲也（筑波大学）
4. 有限要素法の実践・要素テクノロジーの基礎
　　奥村　大（名古屋大学）
5. モデリング・境界条件の使い方の基礎
　　松本　敏郎（名古屋大学）
6. プリポスト処理・結果の検証の基礎
　　和田　義孝（近畿大学）

2019年度までは、関東地区、東海地区、関西地区でそれぞれ別の日程で対面形式の講習会を開催してきたが、本年度はオンライン講習会の特性を生かして、各地区で担当していた講師陣がネット上で集結して実施した。対面形式だった時には朝から夕方までまる一日をかけて講習会を実施したが、オンラインでまる一日は結構疲れる（主催者側も）と思い、午後だけを使い、しかしながら、各項目とも講義時間を以前より10分増やすことができ、時間不足、詰め込みという過去の課題点も若干ながら解消できた。さらに、講習会テキストは受講者に事前に郵送で届けたが、以前よりも大きく印刷して（1ページにスライド2シート、以前は6シート）、総ページ数も約2.5倍の127ページとした。

なお、テキスト残部は有料（会員3,000円、非会員5,000円）で販売している。学会HP（https://www.jsme.or.jp/event/21-44/）末尾の教材の案内を参照いただきたい。

これまでは10月～11月に開催してきたが、今年は9月1日～2日という早い日程となり、したがってテキストを事前郵送するために参加申込締切も8月16日となってしまった。ご参加いただけなかった受験者も多くおられると思うので、講習会テキストを入手いただき、一人でも多く、試験対策の一助としていただければ幸いである（ニュースレター発行日が、固体力学分野2級試験が開催される12月10日までに日程的余裕があることを願いつつ）。

講習会は、認定試験の標準問題集第10版に準拠しており、基本的に標準問題集に収録された問題で構成されている。ある意味で、分厚い標準問題集から講師陣の目で厳選したハイライトとなっているといえよう。前記の内容を網羅したコンサイスな書籍はなかなか見当たらない。講習会テキストは、問題と解説・正解のセットで構成され、ページ数のほとんどは解説である。解の検証に用いる標準問題集末尾の「よく使う材料力学公式」も掲載されており、独立した教科書としてご利用いただけるものとなっている。このことから、企業における社内教育、テレワーク中の自主的学習に最適ではないかと考える。また、大学研究室内で学生さんにもご活用いただければ幸いである。

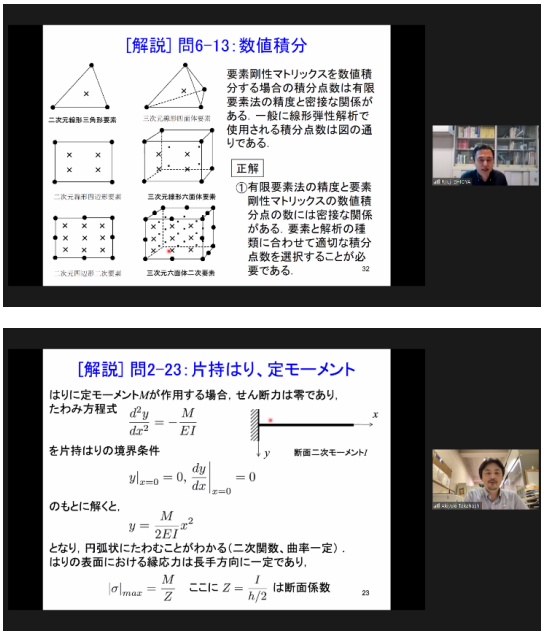


図 オンライン講習会のスナップショット（上：数学・数値計算法の基礎、下：固体力学の基礎）

次年度も講習会は続行しますので、受験にかかわらず、有限要素モデリングの背景となる理論等の習得・教育にご活用ください。

《各行事の問い合わせ、申込先》
日本機械学会計算力学部門担当　近藤 愛美　E-mail: m.kondo@jsme.or.jp
〒162-0814 東京都新宿区新小川町4番1号 KDX飯田橋スクエア2階　TEL 03-4335-7610　FAX 03-4335-7618

計算力学部門ニュースレター No. 66 : 2021年11月15日発行
編集責任者：広報委員会委員長　倉橋 貴彦
ニュースレターへのご投稿やお問い合わせは下記の広報委員会幹事までご連絡ください。
なお、各記事の文責は著者にあります。
広報委員会幹事　篠崎 明　E-mail: akira.shinozaki@mizuho-ir.co.jp
みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部
〒101-8443　東京都千代田区神田錦町2-3
TEL 03-5281-5415　FAX 03-5281-5331