

新しい価値創出に貢献する 大規模CAEシミュレーション

Large-scale CAE Simulation Supporting New Value-creation

● 貞本将太 ● 金堂剣史郎 ● 永濱由徳

あらまし

製造業の製品開発における品質向上，期間短縮，コスト削減などの課題に対して，CAE(Computer Aided Engineering)を活用した数値シミュレーションが広く普及している。従来は計算環境やソフトウェアが高精度・高性能な計算に対応しきれていなかったために，シミュレーションできる物理現象が限られていた。しかし，近年の計算機の高並列化による処理能力の向上や扱えるデータ規模の拡大，ソフトウェア自体の高性能化により，複雑な物理現象のシミュレーションが可能になってきた。富士通はこれまでに，種々の製品開発に広く用いられるLS-DYNAをはじめとするCAEソフトウェアの高並列計算への適用支援や性能評価を行ってきた。

本稿では，大規模CAEシミュレーションの活用事例として，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構様のaFJRプロジェクトにおけるLS-DYNAを用いた航空機エンジン部材のバードストライクシミュレーションを紹介する。本事例では，テストモデルを用いた評価によって高並列計算を行う上での知見を得た。また，その知見を活用して実用モデルの大規模CAEシミュレーションを行い，従来に比べて高精度な結果を得ることができた。

Abstract

In the manufacturing industry, numerical simulation assisted by computer-aided engineering (CAE) has become a widely available technology, being applied to various tasks in product development to enhance product quality for example. In this way, it is reducing time to market and costs. Previously, the computational environment and software quality did not meet the advanced requirements of high-precision, high-performance computation, and thus the application was limited to certain physical phenomena. However, the scope of application has significantly improved in recent years due to enhancements made in parallel computation, data-processing capacity, and software performance. LS-DYNA is widely employed in product development, and together with other CAE-based software, Fujitsu has been promoting their application to highly parallel computation technology, and assessing their performance. This paper presents a case of applying this large-scale CAE simulation through the aFJR Project being implemented by the Japan Aerospace exploration Agency (JAXA). In this case, LS-DYNA was employed in simulating bird strikes on aircraft engine components. In this project, we gained know-how on high-parallel computation through evaluations on test models. Leveraging the know-how, we realized a large-scale CAE simulation for a practical application model, and succeeded in obtaining more accurate results than before.

ま え が き

CAE (Computer Aided Engineering) とは、広義には工業製品の設計・開発工程を支援するコンピュータシステムのことで、特に製品や試作機の挙動を仮想的に表現する種々のシミュレーション技術を指す。工業製品の開発工程においては、試作と試験の繰り返しで膨大なコストが発生する。この工程の一部を、CAEを活用した数値シミュレーション（以下、CAEシミュレーション）に置き換えることで開発コストの低減および開発期間の短縮などが望める。

CAEシミュレーションとは、言うなれば物理現象の近似表現である。同じ現象を表現する計算モデルであれば、基本的にはデータ規模が大きくなるほどその近似精度は向上する。従来は扱えるデータ量が小さかったこと、高並列計算への未対応などの計算機性能の問題や、ソフトウェアの性能がボトルネックになるなどの問題があった。このため、製品の全体を大まかに表現したものや部品単体の計算モデルによる定性的、あるいは局所的な評価に用いられるのが主であった。一方で現在では、計算機性能とアプリケーション性能の大幅な向上に伴って、大規模データによる高精度なシミュレーションが可能となってきた。

CAEシミュレーションの可能性が広がったことで、製品開発においては試作や試験の削減だけでなく、例えば試験さえも困難な危険度の高い現象の安全性を評価することも可能となるなど、更なる高品質化・高付加価値化が期待できる。適用範囲は輸送機器やその部品、電子機器などはもとより、衣服や玩具などの設計・開発に至る幅広いものづくり分野をサポートするツールとなっている。

富士通は、スーパーコンピュータを活用した衝突解析、流体解析、分子動力学解析といった大規模科学シミュレーション技術の開発に継続的に力を入れてきた。計算機の高性能化と普及によって科学技術計算がCAEへと昇華してきた。そして今、これらの取り組みによって培われたCAEシミュレーションは、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）様の航空環境技術をはじめ、様々な分野の研究開発などで実用化が進んでいる。

本稿では、JAXAのaFJR (Advanced Fan Jet

Research：高効率軽量ファン・タービン技術実証) プロジェクト⁽¹⁾におけるCAEソフトウェア「LS-DYNA」⁽²⁾を用いたファンブレードのバードストライクシミュレーションに関する取り組みを紹介する。

CAEソフトウェア「LS-DYNA」

CAEシミュレーションの適用分野は多岐にわたり、商用のものだけでも数多くのCAEソフトウェアがある。例えば、建造物などの動かない構造物に向けたもの、輸送機器のように場合によっては非常に大きく変形する構造物の解析を得意とするもの、津波や海象変化などの流体挙動を表現するものや、電子機器周りの電磁場の評価を得意とするものなど様々である。

LS-DYNAは、実世界の複雑な問題を模擬する有限要素法（FEM：Finite Element Method）⁽³⁾を用いた商用プログラムである。米LSTC(Livermore Software Technology Corporation)社で開発が行われており、特に短時間に物体の状態が大きく変化する次のような現象を表すのに能力を発揮する。

- ・自動車・航空機の衝突
- ・エアバッグの展開
- ・爆発

このため、衝突シミュレーションを多用する自動車メーカーにおいて高いシェアを誇る。また、近年では「One Code Strategy」のもと、一つのプログラムであらゆる現象を表現することを目指し、種々の解法（メッシュフリー法、粒子法など）や物理現象（熱流体、音響、電磁場など）に対応した機能が組み込まれている。更にはこれらを組み合わせた連成解析も可能となり、適用可能分野をますます広げている。富士通は、日本におけるLS-DYNAの拡販、顧客サポート、受託解析などを行ってきた。この過程で得た知見や顧客の声を開発元にフィードバックし、新機能追加や諸機能の改善にも取り組んでいる。

LSTCは、早くからMPP (Massively Parallel Processing：超並列処理) 版やHybrid並列版のLS-DYNAの開発に着手していた。MPP版やHybrid並列版では、大規模CAEシミュレーションを実施するために、一つの計算モデルを分割した並列計算処理を行う。MPP版の並列処理では、複数プロセスに別々のメモリ領域を割り当てて別個に計算を

行う分散メモリ方式が用いられる。一方のHybrid並列版では、MPP版の処理に加えて各プロセスが共有メモリ方式により複数スレッドで計算を行う。富士通は、これらMPP版やHybrid並列版の開発に協力している。また、LS-DYNAをスーパーコンピュータ「京」^(注)やFUJITSU Supercomputer PRIMEHPC FX10, FX100へ移植した超高並列計算への対応を支援している。

aFJRプロジェクト

aFJRプロジェクトとは、航空機の次世代エンジンの国際共同開発において設計分担を狙える技術レベルを目指したJAXAのプロジェクトである。「ファン」および「低圧タービン」について実績豊富な国内のエンジンメーカーとともに、環境適合性を向上する技術を開発・実証し、その有効性を確認することを目指している（図-1）。

aFJRプロジェクトでは、今後の旅客機に搭載されるターボファンエンジンにおけるCO₂排出削減やエンジン騒音低減の実現に向けて、高バイパス比化（エンジンのジェット部分の空気流入量よりファン部分の空気流入量を大きくする技術）が進むと予想している。従来以上の高バイパス比を獲

得するためにはエンジンを大型化する必要があるが、同時に大型化による重量増のために燃費改善効果を低下させない軽量化技術を導入しなければならない。しかし、一般に構造物の「軽量化」と「高強度化」は背反する課題であり、高精度な評価により安全性を保持する必要がある。これらの要件を満たすべく、本プロジェクトでは「先進シミュレーション技術と複合材評価技術の応用による高空力効率で軽量のファンブレードの開発」が掲げられている。

本事例で大規模CAEシミュレーションの対象とするファンブレードとは、航空機エンジンの前方部分に放射状に並び、エンジン内部に大量の空気を取り込むための翼であり、航空機の推進力の大部分を生み出すとされる非常に重要な部材である。運航中、特に離着陸時などの高度が低い際には航空機と鳥がぶつかってしまうバードストライクがしばしば発生する。バードストライクは日本だけでも年間1,500件以上も発生しており、⁽⁴⁾ 鳥がエンジンに飛び込んでしまうことも少なくない。このため、エンジンの品質テストとしてファンブレードの衝撃試験（バードストライク試験）が行われる。ファンブレードの耐衝撃性を確認することはエンジンの製造における大変重要な評価項目であり、この現象を的確に再現できれば技術開発に大きく寄与できる。

(注) 理化学研究所と富士通が共同開発したスーパーコンピュータ。「京」は理化学研究所の登録商標。

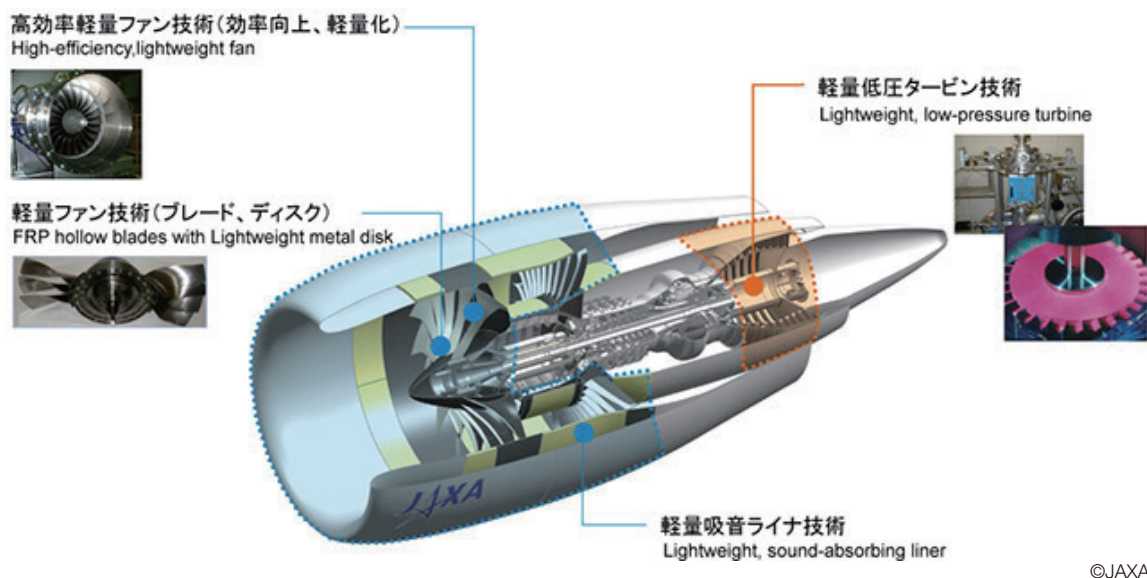


図-1 JAXA：aFJR(高効率軽量ファン・タービン技術実証)プロジェクト

ファンブレード大規模CAEシミュレーション

本章では、aFJRプロジェクトにおいて「京」に移植したLS-DYNAを用いて行ったファンブレードのバードストライクの大規模CAEシミュレーションを紹介する。一般的に、大規模CAEシミュレーションには膨大な計算資源と計算時間を要するため、効率的に計算を行う必要がある。本事例では、簡易なテストモデルを用いてLS-DYNAの大規模並列時の高速化を検討し、得られた知見を活用して実用モデルの解析を行った。

● 大規模CAEシミュレーションにおけるLS-DYNAの高速化施策

図-2は人工鳥（鳥を模した試験用の飛翔体のこと）が平板に衝突するテストモデルの変形図である。計算手法として、平板にはFEM、人工鳥にはSPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）⁽⁵⁾を用いて、これらの手法を連成した計算を行う。FEMとは、物体を重なりのない有限要素（FE）と呼ばれる格子に分割して近似計算を行うものであり、数学的にも物理学的にも信頼性の高い解法である。一方のSPHとは、粒子と呼ばれる物理量を持った評価点を物体に配置して計算を行うものであり、

粒子法と呼ばれる計算手法の一種である。SPHは有形の計算格子を用いないため、水やオイルのような流体や飛散する固体などの表現に適している。図-2では、平板に衝突した人工鳥が飛散し、衝突を受けた平板が大きく変形する様子が表現できている。本節では、このモデルを用いたLS-DYNAの高速化施策として高い効果を得られたHybrid並列版の適用と計算領域分割の最適化を紹介する。

(1) Hybrid並列版の適用

LS-DYNAのHybrid並列版とMPP版の性能比較を表-1に示す。同一並列数の計算時間については、いずれの並列数でもHybrid並列版の方が優れた性能を示した。次に、同並列方式で並列数を2倍にした際の性能向上倍率について見ると、MPP版は計算時間0.44倍とかえって性能低下したのに対して、Hybrid並列版は1.55倍という良好な結果となった。

LS-DYNAの処理の内訳には、大きく要素計算と接触計算がある。接触計算とは、接触対象の探索や接触した物体の反力計算を指す。要素計算とは、FEや粒子といった計算単位ごとに変形を求める計算である。MPP版やHybrid並列版で行われる複数プロセスによる並列計算では、各プロセスの計算領域内の処理の後にプロセス間の同期処理を行う。

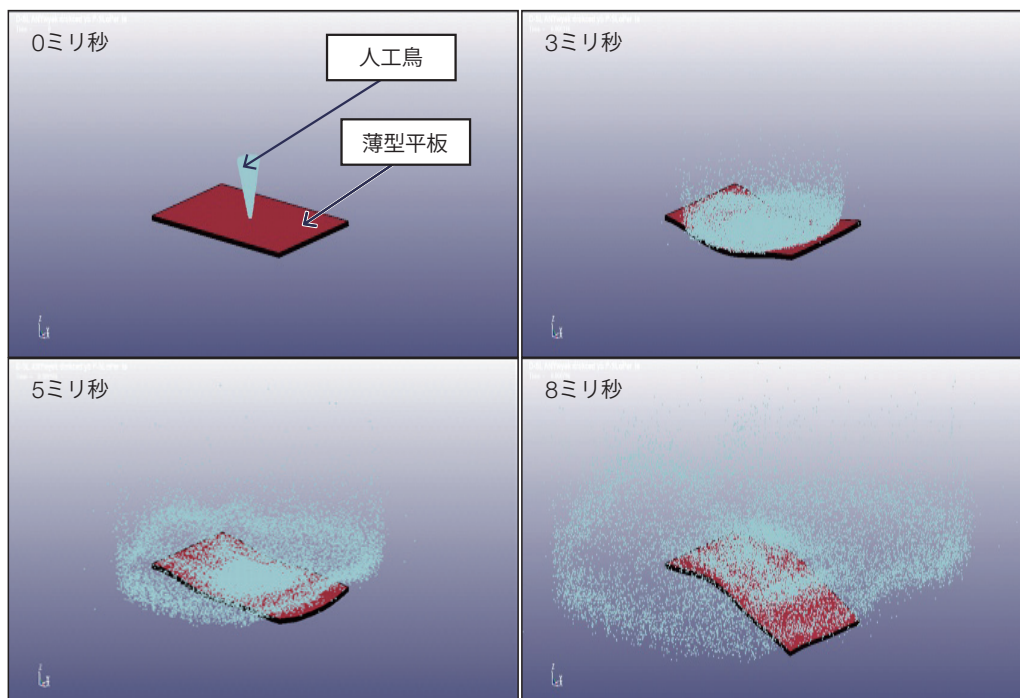


図-2 バードストライクを模擬したテストモデルの変形図

表-1 Hybrid並列版とMPP版の性能比較

モデル規模 人工鳥 (SPH粒子) : 4万粒子 平板 (FE) : 2,000万要素	時間内訳	(a) MPP版	(b) Hybrid版	比率 (a) / (b)
(x) 1,024並列 MPP : 1,024プロセス Hybrid : 128プロセス×8スレッド	総計算時間 (秒)	1,470.46	312.12	4.7
	接触計算 (秒)	612.00	1.99	307.5
	要素計算ほか (秒)	858.46	310.13	2.8
(y) 2,048並列 MPP : 2,048プロセス Hybrid : 256プロセス×8スレッド	総計算時間 (秒)	3,309.81	201.24	16.4
	接触計算 (秒)	2,559.00	2.40	1,066.3
	要素計算ほか (秒)	750.81	198.84	3.8
性能向上倍率 (x) / (y) ※ 理想は2倍	総計算時間	0.44	1.55	
	接触計算	0.24	0.83	
	要素計算ほか	1.14	1.56	

特に接触計算は接触対象の探索の通信コストが大きく、プロセス数が増えると通信相手となるプロセス数が増加するため総通信時間も増える。MPP版における1,024並列は、言葉のとおり1,024プロセスの並列であるが、Hybrid並列版では総並列数をスレッド数で割ったものが総プロセス数であり、当解析ケースの場合は128プロセス(=1,024並列/8スレッド)である。つまり、MPP版では同並列数のHybrid並列版に対して通信するプロセス数が8倍にもなるため、プロセス間の通信時間は長くなる。並列数を1,024から2,048に2倍にした際には更に通信時間が増え、結果的に性能低下を招いた。

以上より、Hybrid並列版ではMPP版に比べてプロセス数の増加を抑えながら高い性能を示すとともに、その有用性が示された。ただしHybrid並列版を用いた場合でも、モデル規模や模擬する現象によっては、本事例におけるMPP版の振る舞いと同様にプロセス間の通信が性能低下の原因となることがある。このため、Hybrid並列版を用いる際にも一概に並列数を増やせば良いわけではなく、設定する並列数には留意する必要がある。

(2) Hybrid並列版の計算領域分割の最適化

複数プロセスによる並列計算では、各プロセスは割り当てられた個々の領域のみを計算するため、それぞれのプロセスの計算時間が均等であるほど並列実行の性能向上率は理論値に近づく。本項では、LS-DYNAの処理方法を考慮した領域分割の工夫で実行性能が向上することを示す。

図-3はテストモデルをHybrid版で実行する際の領域分割図と計算時間である。図-3 (a), (b) は、

計算モデルをプロセス数の512領域(=4,096並列/8スレッド)に分割している。(a) は単純に解析対象全体をデフォルト設定で分割したものの、(b) は人口鳥と平板を512分割したものである。図-3(a), (b) のように領域を分割したときの1,024 (128×8) 並列と4,096 (512×8) 並列実行の計算時間を図-3 (c) に示す。分割方法を(a) から(b) にすると、それぞれの並列数で性能が改善されたことが分かる。これは、SPH粒子を各領域に均等に割り振り、計算時間の偏りを減らすことに成功したためである。LS-DYNAでは、FEMの計算が完了した後にSPHの計算が始まるため、SPH粒子を割り当てられなかったほかのプロセスはSPH計算の間は待ち状態になる。その証拠に、一部の領域にしかSPH粒子を含まない分割(a)では、並列数を増やした場合に性能低下が見られ要素計算時間が大きく増えた。分割(a)の場合、並列数が増えたことによりSPH粒子が含まれるプロセスには更に偏りが生じ、要素計算時間のバランスが大きく崩れてしまったことでこのような結果となった。一方の分割(b)では、SPH粒子も全てのプロセスに割り振ったため、要素処理が効率良く行われ、実行性能が向上した。

● 実用モデルの大規模CAEシミュレーション結果

人工鳥を模したモデルに対して、複合材の材料特性を持たせたファンブレードモデルを衝突させる計算モデルを用いて、ファンブレードのバードストライクのシミュレーションを行った。現象の時間は10ミリ秒で、開始から2ミリ秒経過するあたりから人工鳥との衝突が始まる。

計算結果を図-4に示す。(a) は実用モデルの変

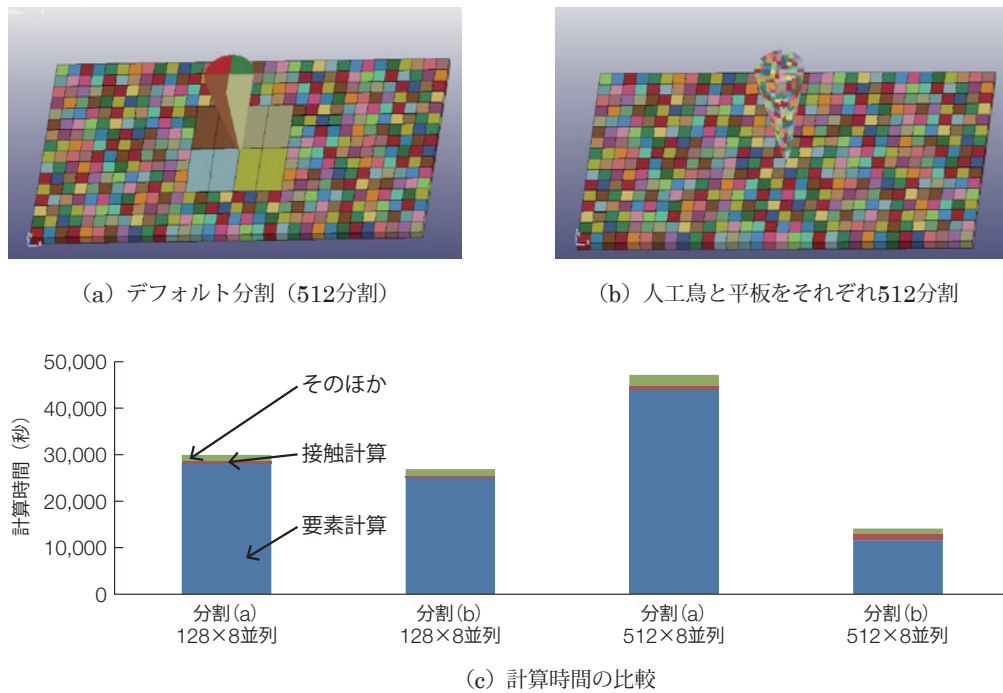


図-3 テストモデルの領域分割図と計算時間

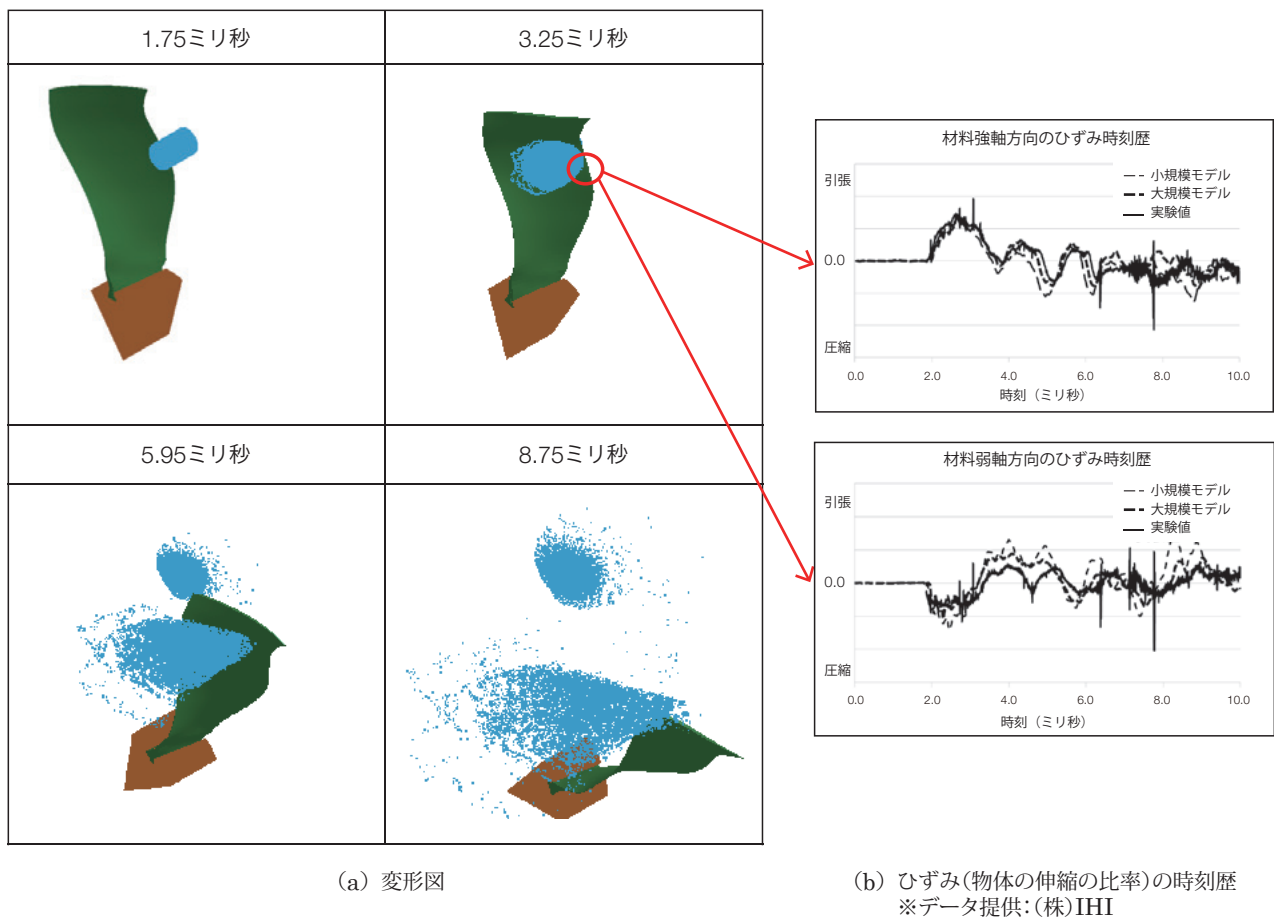


図-4 ファンブレードのバードストライクシミュレーション

形図、(b) はファンブレードの一部のひずみ（物体の伸縮の比率）の時刻歴である。ここで、太い破線は大規模CAEシミュレーションの結果であり、細い破線は従来の計算環境でも長時間を費やせば実行可能であった比較的小規模なデータの結果である。また、実線は実験値を表す。図-4 (b) のグラフでは、小規模データの結果に比べて大規模CAEシミュレーションの結果の方がより実験値に近い高精度な結果となっていることが確認できる。なお、今回得られた結果は小規模データ、大規模データのいずれのモデルでも大まかには類似していると言えることができる。このことから、定性的挙動を知りたいのなら小規模データモデルでも目的を満足できるかもしれない。しかし、ファンブレードの破壊という極限状態や、飛散した物体の挙動をより正確に評価しようとする、この精度の差は結果に顕著な影響を及ぼす可能性が高い。現象を高精度に評価できる更なる大規模CAEシミュレーションの必要性が伺える。

今後は、現在の計算モデルに対して更に材料の破壊などの諸機能を加えていき、aFJRプロジェクトにおける安全かつ高性能なファンブレードの開発の一助として貢献していく。

む す び

本稿では、新しい価値創出に貢献する大規模CAEシミュレーションの一例として、JAXAのaFJRプロジェクトにおけるLS-DYNAによるファンブレードのシミュレーション事例を紹介した。本事例では、実験に近い精度での現象模倣が可能になることを示した。昨今、様々な製品に対して安全性のみならず総合的な高品質化に向けた多くの付加価値を求められる。このような大規模CAEシミュレーションの活用を支援していくことで、より一層お客様の製品開発に貢献できると考える。

本稿掲載の事例は、JAXA様「aFJRプロジェクト」の委託を請け富士通が実施したものです。執筆に当たり株式会社IHI様、JAXA様には事例掲載のご許可や原稿の推敲など、多大なご協力をいただきましたことを深く感謝いたします。なお、本稿の結果は理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです。

参考文献

- (1) JAXAホームページ航空技術部門：aFJR（高効率軽量ファン・タービン技術実証）プロジェクト。
<http://www.aero.jaxa.jp/research/ecat/afjr/>
- (2) Livermore Software Technology Corporation.
<http://www.lstc.com/>
- (3) T. Belytschko et al. : Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2000.
- (4) 国土交通省：2015年バードストライクデータ。
http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk15_000001.html
- (5) J. J. Monaghan : Smoothed particle hydrodynamics. Annual review of astronomy and astrophysics, Vol.30, p.543-574, 1992.

著者紹介



貞本将太 (さだもと しょうた)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
TCフロンティアセンター
LS-DYNAを用いたコンサル業務などに従事。



金堂剣史郎 (こんどう けんしろう)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
TCフロンティアセンター
LS-DYNAを用いたコンサル業務などに従事。



永濱由徳 (ながはま よしのり)

テクニカルコンピューティング・ソリューション事業本部
TCフロンティアセンター
LS-DYNAや関連パッケージの拡販業務などに従事。