

SIMULIA

COMMUNITY NEWS

#11 2015年10月号

解析者からイノベーターへと 変身する

シミュレーション駆動の
技術革新を通じた変革

カバーストーリー

EXXONMOBIL 社、エネルギー
の未来を探究する

目次

2015年10月号



6 | BMW 社



10 | ExxonMobil 社



22 | ヤマハ発動機



26 | GN ReSound 社

3 ごあいさつ

SIMULIA ワールドワイド・セールス担当副社長、Dimple Shah

4 ニュース

SIMPACT: マルチボディシミュレーションと SIMULIA との連携

5 ストラテジー

解析者からイノベーターへと変身する

6 ケーススタディ

BMW 社: パッシブセーフティ設計の試作ゼロを目指す

9 製品アップデート

6.14-4: 地盤力学分野の新機能

10 カバーストーリー

ExxonMobil 社、エネルギーの未来を奥深く探究する

15 アカデミックケーススタディ

ウェストバージニア大学: 設計の隙間をシミュレーションで埋める

18 将来展望

積層造形技術

20 アライアンス

Endurica 社、Materialise 社

22 ケーススタディ

シミュレーションがヤマハのオフロードバイクをクールに走らせる

25 TADS 教師

プロペラで教育を推進せよ!

26 ケーススタディ

GN ReSound 社: 聞いてください!

29 SIMULIA スポットライト

SIMULIA 副社長 Frans Peeters

30 Tips and Tricks

タイヤバーストのモデリング

寄稿者: ExxonMobil Upstream Research Company、BMW Group、Eduardo Sosa 氏(ウェストバージニア大学)、Parker Group、山谷真和氏(ヤマハ発動機)、Morten Birkmose Sondergaard 氏(GN ReSound 社)

表紙: ExxonMobil Upstream Research Company の皆様 - (左から右へ) Jorge Garzon 氏(上級研究技師)、Ganesh Dasari 氏(坑井運用部 技術チームリーダー)、Erika Biedegar(坑井パフォーマンス部マネージャ)、Bruce Dale 氏(地盤主任技師)、Nikolay Kostov 氏(研究技師)、Kevin Searles 氏(地盤力学顧問、および共同開発された Abaqus の新しい水圧破砕モデリング法の技術リーダー)、Matias Zielonka 氏(上級エンジニアリング・スペシャリスト)、Jing Ning 氏(上級研究技師) Claire Jones Photography 社撮影
Cover Photo by Claire Jones Photography

Dassault Systems K.K. 東京都品川区大崎2-1-1 ThinkPark Tower 20F Tel: 03-4321-3503, Fax: 03-4321-3543, simulia.jp, marketing@3ds.com,
編集長: Tad Clarke, 副編集長: Kristina Hines, グラフィックデザイナー: Todd Sabelli

3DEXPERIENCE®, Compass icon, 3DS ロゴ, CATIA, SOLIDWORKS, ENOVIA, DELMIA, SIMULIA, GEOVIA, EXALEAD, 3D VIA, 3DSWYM, BIOVIA, NETVIBES, および 3DXCITE はアメリカ合衆国、またはその他の国における、ダッソーシステムズまたはその子会社の商標または登録商標です。その他の会社名、製品名およびサービス名は、それぞれの所有者の商標またはサービスマークです。Copyright Dassault Systèmes, 2015

 SIMULIA



SIMULIA コミュニティのパワーを駆動するもの

我々シミュレーション・コミュニティの先駆者として活躍されている方々が、弊社の製品や技術を独創的に使いこなして、まったく新しい課題に取り組んでおられるのを拝見することは、我々にとって大きな刺激であり、それにはいつも驚かされます。今年ベルリンで開催された SIMULIA Community Conference (SCC 2015) は記録破りの非常にエキサイティングな大会でしたが、多くの皆様が参加され、活気あふれるシミュレーション・コミュニティは最高の盛り上がりを示しました。その基調講演やプレゼンテーション、セミナーや講習会の幅広さと奥深さも過去最高レベルであり、世界中から皆様方を始めとして SIMULIA の仲間やパートナー各社が大勢集まって、互いの成功を披露し合い、学び、そして感動しました。

こうした皆様方の積極的な関与は、SIMULIA コミュニティをさらに強固なものとしています。今年 SCC 2015 を体験できなかった方には、是非、お近くの地域別ユーザー会に参加されるか、弊社ローカルオフィスのトレーニングコースに出席されるか、あるいは SIMULIA ラーニング・コミュニティに加わって仲間とオンライン会話を楽しまれるようお勧めいたします。

さまざまな業界のユーザーの皆様が SIMULIA の製品や技術を活用して、イノベーションを推進し続けているはっきりとした証拠があります。この SIMULIA Community News でも、まさにそれが実証されています。カバーストーリーでは、弊社と ExxonMobil 社の長い協調の歴史が、エネルギー産業において同社を技術革新の最前線に押し出すことに貢献してきたことを紹介しています (10 ページ)。

変革を駆動する前向き思考の好例としては、BMW Group による BMW 6 シリーズ「グランクーペ」のパッシブセーフティ設計における試作ゼロの達成 (6 ページ) が挙げられます。シミュレーションの予測能力を活用し試作の必要性を排除するため、BMW Group は絶えず SIMULIA と協力して、我々の提供するソリューションが新型プラットフォームのニーズや厳しさを増す安全規制にも適合できるよう改善しています。

もう 1 つは、いわゆる既成の枠組みを超えた取り組みの事例です。ただし枠の外ではなく、トンネルの中での話です。ウェストバージニア大学のエンジニアは、緊急事態の際に巨大な膨張式プラグを使ってトンネルの地下空間を密封しようと考えました (15 ページ)。これは、SCC や地域別ユーザー会において、ある業界から発表された成功体験が、別の業界で新たなアイデアを生み出すきっかけとなった素晴らしい実例と言えます。この特殊な応用問題に用いられた Abaqus の技術は、もともとは自動車のエアバッグ用に開発されたものだったのです！

他にも、皆様に読んでいただきたいのは、ヤマハ発動機がオフロードバイクに対し、ラジエータアセンブリの保護対策に取り組んだ事例 (22 ページ) と、GN ReSound 社が同社の最新式補聴器に対して、避けることのできない落下事故の衝撃緩和に取り組んだ事例 (26 ページ) です。

今後、皆様がそれぞれの業界に変革をもたらそうと尽力すれば、さらに感動的なイノベーションの物語が生まれていくことでしょう。我々もまた、皆様とともに努力しながら、我が社としての責任を果たしていく所存です。

近いうちに皆様とユーザー会や講習会でお会いできるのを楽しみにしています。次は何を成し遂げたいと思っておられるのか、是非教えてください！

Dimple Shah

SIMULIA ワールドワイド・セールス担当副社長

SIMPACK:マルチボディシミュレーションとSIMULIA との連携

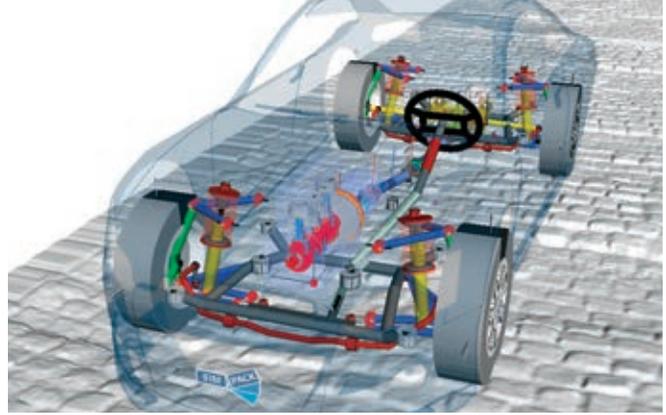
SIMULIA ワールドワイドオペレーション担当副社長, Roger Keene

ダッソー・システムズは技術主導の会社です。SIMULIA の目標は、お客様のものづくり環境において自信を持って使用できる最先端のシミュレーション技術を提供することです。我々はこうした技術を 3 通りの方法で推進しています。第一に、我々は絶えず既存製品の開発を進めており、新機能を追加し、性能を向上させ、使い勝手を改善しています。第二に、新たなシミュレーション分野へと我々を導いてくれる企業を買収することで、弊社のポートフォリオを広げます。そして最後に、我々の事業を補完するような製品や技術を有する企業と提携を進めています。

いずれの場合においても、我々は常にユーザーの皆様に対して最新かつ最適な技術を提供するよう心掛けています。代表例の 1 つが SIMPACK 社であり、2014 年 7 月にダッソー・システムズが買収しました。SIMPACK 社は最高かつロバスタなマルチボディシミュレーション (MBS) 技術を提供しています。他の MBS 製品が苦勞するような問題でも、難なく解いてしまいます。SIMPACK モデルのリアルタイム解析機能によって、たとえば、自動車エンジニアはモデルのサスペンションパラメータを調整しながら、運転シミュレータを用いた操縦安定性の変化について即座にフィードバックを得ることが可能です。

SIMPACK モデルは FEA モデルよりはるかに小規模であり、0 ~ 10kHz の周波数範囲では 50 ~ 2000 自由度程度に収まります。他の多くの MBS 製品が (コネクタを用いる Abaqus モデルも) 絶対座標を用いて連立方程式を組み立てているのに対して、SIMPACK は相対座標を使用しています。この場合、方程式の導出はより複雑になるのですが、全体として方程式ははるかに少なく済むため、計算時間が大幅に削減され、安定性と精度が向上します。SIMPACK が解くのは密なマトリクスであり、Abaqus が生成するような疎なマトリクスではありません。すなわち、Abaqus と SIMPACK のソルバーはまったく異なっており、それぞれが解くべき方程式タイプに合わせて高度に調整されています。

SIMPACK は SIMULIA ポートフォリオの残りの部分を補完する



製品です。システムモデルの一部は Abaqus のスーパーエレメントを用いて変形体にできるので、設計の進捗に合わせてモデルの忠実度を上げることも容易です。SIMPACK から得られた荷重を用いて Abaqus シミュレーションの実行が可能であり、さらに fe-safe で部品の耐久性も計算できます。また Isight によって SIMPACK ワークフローの自動化と最適化が可能であり、制御系、油圧系などシステムモデルの非機械的な部分には CATIA Systems/Dymola を利用できます。さらに、3DEXPERIENCE® プラットフォームを用いて、SIMPACK の全データを管理することが可能です。弊社製品の将来のリリースでは、こうした相互運用性を大幅に向上させていく予定です。ただし、たとえば他の FEA ツールで作成した変形体構造、Matlab/Simulink で作成した制御系、F-Tire や CD-Tire のタイヤモデルなどは、今後とも SIMPACK で使用可能です。

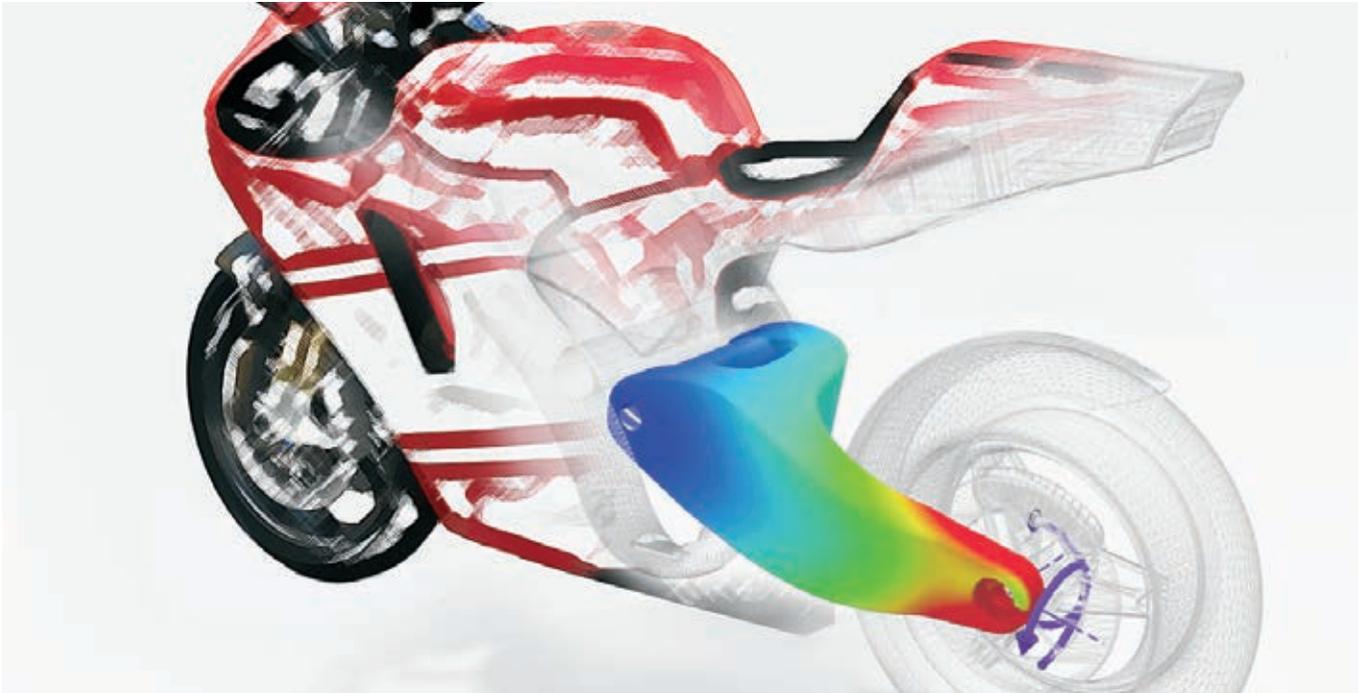
SIMPACK は特に 3 つの主要産業において有力なツールとなっています。自動車産業では、車の操縦安定性、NVH、駆動系、さらにはエンジンの機構運動のシミュレーションに広く利用されています。また鉄道産業では、SIMPACK がシステムシミュレーションの事実上の業界標準となっています。さらに最近では、風力タービンのモデリングにも幅広く使用されるようになりました。SIMPACK には、軸受、歯車、ベルトドライブ、タイヤなど、これらの分野に特有のモデリング機能が多数含まれています。

先の SIMULIA Community Conference で私が実感したのは、SIMULIA ユーザーは、弊社のツールを今までにない斬新な方法で使用して、限界を押し上げたいと思っていることです。そのため、優れた技術サポートエンジニアが、常に SIMULIA ユーザー体験の重要な要素となっています。SIMPACK 社では、フランス、ドイツ、日本、英国、そして米国の高度な技能を持つチームがこれを担当しており、顧客と密接に協力しながら、SIMPACK ソフトウェアを最大限活用できるよう保証しています。

SIMPACK の SIMULIA への統合は順調に進んでおり、2016 年には完了します。現在、SIMPACK は引き続き既存の SIMPACK 組織によって販売・サポートされていますが、2016 年の前半には、ダッソー・システムズのセールsteamが顧客関連の業務を引き継ぐ予定であり、SIMPACK 社の専門家たちはサポート、トレーニング、およびサービスに専念していきます。現在 SIMPACK 社が従業員を持たない国においても、弊社ローカルオフィスに対して SIMPACK の専門知識を高めていく予定です。

SIMPACK は SIMULIA ポートフォリオの素晴らしい補完製品であり、我々のマルチスケール・マルチフィジクス戦略の重要な要素となるものです。まだ SIMPACK についてご存じなければ、すぐにもお試しになられるようお勧めいたします。

詳細は以下をご覧ください
www.3ds.com/products-services/simulia/products/simpack



解析者からイノベーターへと変身する

我々 SIMULIA のアイデンティティは「製品と自然と生命のシミュレーション」です。この言葉は弊社ソリューションのできることが広範囲に及ぶことを表しています。たとえば製品であれば、単純な O リングから航空機まで、自然であれば、火山のマグマだまりや石油貯留層などの地質力学、そして生命であれば、弊社の「リビング・ハート・プロジェクト」や「バーチャル・ヒューマン・イニシアティブ」などが挙げられます。今日、シミュレーションは、製品、自然、および生命に関わる多くの産業で、ビジネスプロセスの重要な要素となりつつあり、結果として SIMULIA も急成長を続けています。

弊社が行っている価値ある提案は、「シミュレーションが技術革新を駆動する！」というものです。それが真実であることは、シミュレーションを利用して自社製品を変革してきたユーザーの皆様の素晴らしいストーリーの数々からも明白です。彼らは、既存製品の性能や信頼性を高めただけでなく、計算せずには到底見つけ出すことのできない新たな設計コンセプトを発見しています。それは単なる「シミュレーションベースの設計」ではありません。それは「シミュレーション駆動の技術革新」です。

シミュレーション駆動の技術革新を実践するには、3つの要素が必要です。まず、テクノロジーが必要です。それも多種多様なテクノロジーです。なぜなら技術革新は骨の折れる仕事だからです。さらに、プラットフォームが必要です。全社を挙げてシミュレーションの価値をやり上げ、共有し、明示し、制度化するためのプラットフォームです。そして最も重要なこととして、イノベーターが必要です。シミュレーションを単に「解く」ためのものと考えず、バーチャルに得られた洞察力が変革をもたらすことを正しく理解しているユーザーです。

「イノベーター」というと怖い感じがします。危険に立ち向かう人、限界に挑む人、開拓者や発明家といった印象を与えます。しかし、それはまったくの見当違いです。シミュレーションに基づく技術革

新では、リスクを減らし、失敗の淵を見極めて遠ざけ、学んだことのすべてを生かして新たな可能性を見出すことを可能にします。何か新しい可能性が発見されたなら、もう一度やり直せば良いのです。我々は SIMULIA Community Conferences において、すでに多くのイノベーターと出会ってきました。それらは、adidas 社の Dan Price 氏、Pratt & Whitney 社の Brett Staubach 氏、Airbus 社の Dominique Moreau 氏、Max Planck 研究所の Martin Hilchenbach 氏などのエンジニアです。本号でも、ExxonMobil 社の Bruce Dale 氏のストーリーを特集しています。同社は貴重な天然炭化水素資源を安全かつ効率的に採取する上でシミュレーションが大いに役立つことを理解しています。これらの模範例に限らず、皆様が技術革新に取り組むためのツールは、いつでも使える状態にあります。「パワー・オブ・ポートフォリオ」製品群から 3DEXPERIENCE シミュレーション製品、そして価値あるパートナー製品などであり、未来を見通すイノベーターによって導かれるシミュレーションベースの技術革新は、現在、すでに多くのシミュレーショングループで現実のものとなっています。

この秋、多くの皆様が参加される地域別ユーザー会議にピッタリのテーマは、「イノベーターであること」です。これらの会議では、皆様が他のイノベーターたちと出会えます。彼らは、皆様が自身が自社の限界を押し上げることの重要性を教えてくれるはずで、また、皆様だけがそうした任務に携わっているのではないことを実感させてくれるでしょう。シミュレーションの世界は変化しつつあり、そのため、シミュレーションのユーザーの世界も変化しています。単なる解析者でいることは、徐々に選択肢ではなくなっています。「解く」ことから「革新する」ことへ思考転換することが、この慌ただしい世の中でご自身を高める唯一正しいキャリアの道なのです。

詳細は以下をご覧ください
www.3ds.com/simulia



パッシブセーフティ設計の 試作ゼロを目指す

自動車の安全規格がメーカーにとって「動く標的」となっています。現行および将来の要件がますます厳しくなるにつれて、自動車メーカーは絶えず一歩先を行く必要があります。そのため彼らは設計しては試作することを余儀なくされています。結果として、新型車はかつてなく安全なものとなり、ハイウェイ死亡率は史上最低を記録しています。

安全要件を満たすこと、あるいはそれを上回ることが、自動車メーカーにとって優先事項であるのは明白ですが、車の安全性を改善するよう駆り立てているのはこれだけではありません。それは、今日の自動車メーカーに経済的圧力をもたらしているいくつかの要因の1つにすぎません。他にも、多様な車種や動力性能を求める顧客の声、厳しさを増す燃費基準を満たすために必要な車の軽量化、高度化する先端材料の進歩などがあり、これらすべてを、衝突安全性を犠牲にすることなく車両設計に織り込む必要があるのです。こうした状況の中、熱心な顧客を引き付けながらもコスト競争力を維持することが、自動車メーカーの継続的優先事項となっています。

R&D 部門から工場の作業場まで、そして衝突試験場から自動車ショールームまで、さまざまな現場で評価を高めているツールがあ

ります。それはシミュレーションソフトウェアです。いち早く導入した企業は、コンピュータモデリング技術の進歩と相まって、極めて有益な成果を上げながら自社の設計エンジニアリングノウハウを育て上げています。

何年も前から自動車産業のオピニオンリーダーたちが認めていたのは、次々と改訂される安全規格を満たすことの必要性から浮き彫りになった車両開発における多様な課題は、改良された設計シミュレーションによってのみ適切に対処できるものであり、それは、成功に至るための創造的でロバストでコスト効率の良い道筋を特定するために役立つというものです。そこには、ある野心的な長期目標がありました。すなわち、車のパッシブセーフティ設計において試作ゼロが可能になるレベルまで、シミュレーションの予測能力を検証し高めることです。

試作実験の限界

シミュレーションは長年にわたってパッシブセーフティ設計に利用されてきたのですが、今もなお車両開発プログラムにおいては、ごく普通に試作車が組み立てられ試験されています。こうした試作車は高価であり、組み立てて衝突試験を行うにも非常に時間がかかり

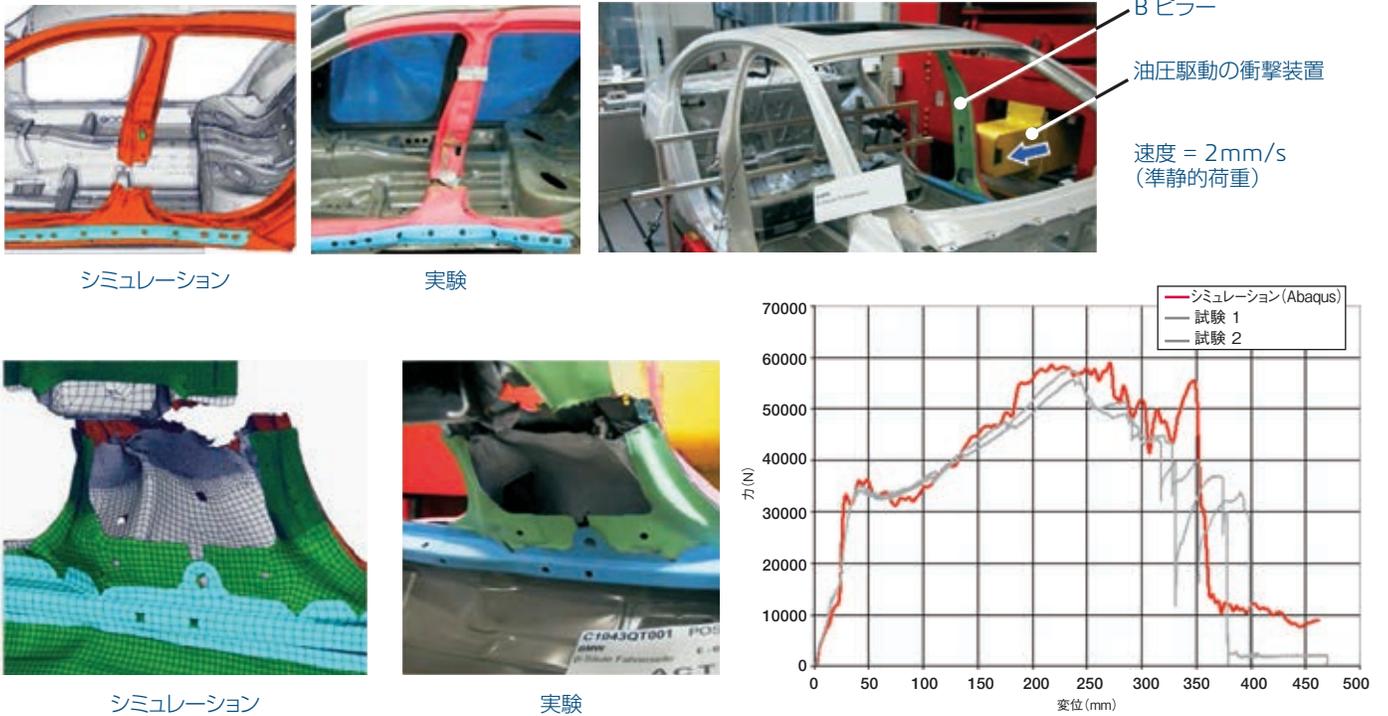


図 1. B ピラーの侵入実験における材料破壊挙動の Abaqus シミュレーション結果。試験は完全に破壊するよう意図的に実施されたため、対応する力は衝突時に生じる一般的な値よりも大きい。予測された亀裂の発生と進展は、実験データと良く相関しており、この材料モデリングアプローチを生産設計のシミュレーションに展開できることが確認された。車両

開発プログラムの初期段階でリアリスティックシミュレーションを活用することにより、全体設計モデル内でこのように正確な局所予測が可能になった。その結果、設計変更に多くのコストがかかる上に車の発売予定にも影響しかねない、後段階での問題発生を回避できるので、車両開発の効率性が高まる。

ます。それは主に、試作金型と手作りの必要性が原因となっています。この種の実物試験には他にも制限があり、そのすべてが結果に対して制約または影響を与えます。すなわち、この方法ではあらゆる荷重ケースを試験することが不可能であり、また、その試験結果は生産ラインから出てくる完成車に完全には反映されません。こうした手作りで組み立てられる試作車は、量産車の近似にすぎないからです。

野心的目標： シミュレーションによる試作の削減

高級車メーカーの BMW Group と Abaqus FEA ソフトウェアのプロバイダーであるダッソー・システムズ SIMULIA は、パッシブセーフティ設計のシミュレーション分野で、この種の製品開発の発展を目指して十年以上にわたり提携してきました。この自動車メーカーはコンピュータ支援設計 (CAD) ツールとして CATIA V5 を使用しています (これもダッソー・システムズの製品です)。

過去のシミュレーションでも、衝突時の車両の全体的挙動は正確に再現されていたのですが、チームは、損傷や破壊の生じる材料と接合部の詳細な局所的な挙動についても、同様に検討すべきであることを理解していました (8 ページの補足記事を参照)。たとえば側面衝突試験のシミュレーションでは、この荷重ケースに対する車両のパッシブセーフティ性能を正確に予測する上で、B ピラーのシートメタルとスポット溶接部における局所破壊の可能性を高精度にシミュレーションすることが必須となります。このレベルでの予測精度が、設計上の重要な意思決定がリアリスティック・シミュレーシ

ョンの結果に基づいてなされる真のバーチャル設計反復を可能にするための鍵となります。

こうした仮想化のためのパートナーシップを通じて、SIMULIA の専門家は BMW Group のエンジニアと密接に協力し、この自動車メーカー特有の要求を多く取り入れながら Abaqus に新機能を組み込んでテストしてきました。そして、シミュレーション結果と実物試験データの相関性が次第に高くなることにより、新機能の妥当性が確認されました。

その結果、車両開発の試作ゼロアプローチに着手する最初の車種として BMW 6 シリーズ「グランクーペ」が選定されたのです。

設計から量産金型へ直ちに移行

BMW 6 シリーズ「グランクーペ」の開発ではシミュレーションによる多数のパッシブセーフティ設計反復が実施され、蓄積されたシミュレーション結果を利用して設計変更が加えられていきました。そしてついに最終設計案で、すべてのパッシブセーフティ性能目標が達成可能であると想定されました。

BMW Group はこの最終設計案に自信があったので、通常行われる試作金型段階をやめ、直ちに量産金型による量産工程品にすすむことができたのです。これら初期の量産車を用いた衝突試験の結果はシミュレーションの予測結果と良く一致しており、BMW 6 シリーズ「グランクーペ」は完成しました。

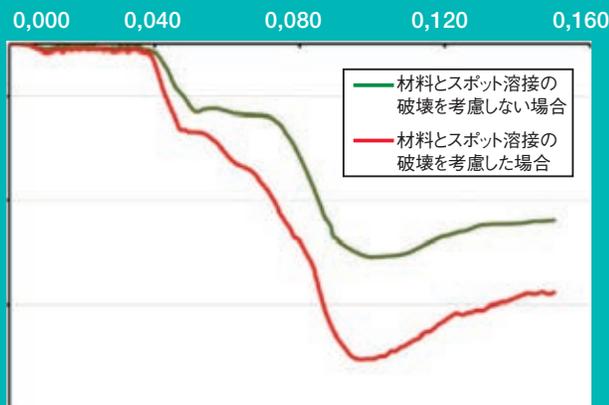
ケーススタディ

グローバルな思考とローカルなシミュレーション

衝突安全性を正確に予測するには、衝突時の車両性能に影響するあらゆる現象をシミュレーションすることが重要です。これには、車体とシャーシの全体的な変形だけでなく、シートメタルなど材料の局所破壊メカニズムや、スポット溶接や接着剤などの内部接合技術も含まれます。こうした局所破壊メカニズムに対する高精度なシミュレーション機能を開発し適用することが、BMW Group の試作ゼロ実現において重要な要素となっています。

下に示すグラフはオフセット前面衝突試験のシミュレーション結果であり、車室内への隔壁の侵入量を以前のモデリング法（緑の線）と新しいモデリング法（赤い線）で比較しています。この2つの結果は異なることがわかります。

局所破壊メカニズムを考慮していない仮想車両モデルは、すべての重要な破壊メカニズムを考慮したより完全なモデルに比べて、隔壁の侵入量を 30% 少ない目に（剛に）予測しています。すなわち、不完全なモデルでは、車室内への侵入量が実際よりも少ないため、安全側ではない予測結果となっています。この新しくより包括的なアプローチは、すべての衝突シミュレーションにおいて標準的な手法として採用されています。



Abaqus FEA によるオフセット前面衝突試験のシミュレーション結果（上図）と、そのときの隔壁の侵入量（下図）（モデルに局所破壊メカニズムを含めた場合と含めない場合）

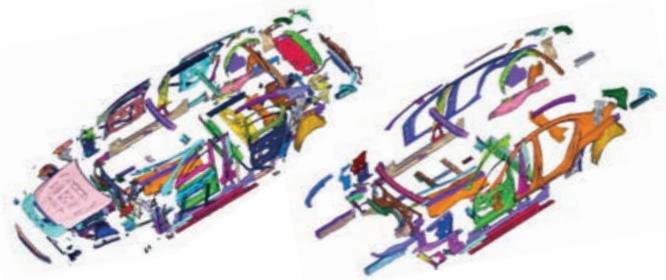


図 2. 衝突試験のシミュレーションでシートメタルの損傷の可能性をモデルに考慮することは BMW Group において標準的な手法となっている。左図は、損傷が考慮される典型的な車体コンポーネントを示している。さらに、プレス加工など先に行う成形プロセスが、損傷に影響を及ぼす場合がある。そこで右図は、成形シミュレーションを前もって実施し、その結果を対応する衝突モデル上にマッピングしたコンポーネントを示している。



図 3. 側面衝突の荷重ケースは、多くの場合、耐衝突性が最も低いケースとなる。上図は BMW 6 シリーズ「グランクーペ」に対する 2 種類の標準側面衝突試験結果であり、それぞれ、IIHS 可変形移動バリアによる側面衝突試験（左）と、FMVSS 214 ポール側面衝突試験（右）を示している。それぞれに対応する設計シミュレーション結果も示されている。パッシブセーフティ性能が正確に予測されており、試作ゼロの成功につながるものである。

進化の旅は続く

シミュレーションの高い予測レベルのおかげで、エンジニアは将来の車両設計を改善し最適化するためのより深い洞察が得られます。車両プラットフォームがマルチ材料構造へと進化し続ける中、シミュレーションはますます設計者やエンジニアにとって有益なツールとなっています。SIMULIA は引き続き BMW Group と密接に協力しながら、Abaqus のパッシブセーフティ設計シミュレーション機能が、全く新しいプラットフォームや厳しさを増す安全要件にも適合できるよう改良を加えていく予定です。

もちろん、実車衝突試験が、シミュレーションの最終価値を査定する上で決定的裏付けとなることには変わりありません。試作ゼロに向けたロードマップを作成し、それに従っていくには時間と努力を必要としますが、正確でロバスタなシミュレーション機能はその中心的役割を果たすことができ、また果たさなければいけません。それによって自動車メーカーは製品開発の道のりを通じて、パッシブセーフティの新たな節目に到達できるようになるのです。

詳細は以下をご覧ください
www.BMW.com

製品アップデート 6.14-4:地盤力学分野への新機能の追加

Abaqus 6.14.4 は Abaqus 6.14 に対するメンテナンスアップデートであり、地盤力学分野に関連したいくつかの新機能が含まれています。これらの機能の多くは、SIMULIA と ExxonMobil 社の継続的なコラボレーションを通じて開発されたものですが、石油・天然ガス分野の設計エンジニアリング業界全体も総じて興味を示されるはずで

- ・ 極限状態（粘土）塑性モデルの機能拡張

これまでの粘土塑性モデルは、等方性材料でのみ使用可能でした。しかし、一般に貯留堆積物では堆積物全体が層を成しているため、今回の機能拡張では、このモデルを使用することで積層頁岩など層状の直交異方性材料に対しても変形の調査が可能になりました。この拡張された構成モデルでは、新たに異方性降伏関数と直交異方性の弾性挙動が使用できます。図 1 は、掘削孔の周辺で亀裂が進展する様子を調査するための遠距離場境界問題の解析結果であり、掘削孔付近だけでなく遠距離場にも進展する亀裂挙動が捕捉されています。

- ・ 離散要素法（DEM）におけるユーザー指定に基づく粒子の発生

Abaqus の流体と構造を同時に解く機能は引き続き向上しています。今回、解析の過程で簡単に DEM 粒子を発生させ、数種類の粒子種からなる複雑なモデルもセットアップできるようになりました。この粒子発生機能では、シミュレーション中に任意形状の流入面を介して複数粒子種からなる混合粒子が取り込まれます。流入面については、シミュレーション中に並進・回転移動、拡大、傾斜、または縮小が可能です。混合粒子中の各粒子種には、確率密度関数によってさまざまな粒子サイズを定義できるので、異なる質量流量を持つ大小さまざまなサイズの粒子媒体（たとえば、砂、セメント、骨材の混合物など）を同時発生させることが可能です。この機能拡張は、材料輸送のシミュレーションを必要とする業界にとって明らかに有用です。たとえば、産業機器（コンベヤーベルトなど連続移動する機械類）、消費財（製造シミュレーション）、運輸・交通（タンクの充填）などが挙げられます。

- ・ 亀裂伝播方向の精度を改善する応力・ひずみ場の非局所平均化

この機能拡張は、亀裂の予測精度を改善するためのものです。亀裂先端付近の応力・ひずみ場の評価では、少し離れた場所の結果を平滑化（すなわち平均化）した方が正確になります。Abaqus/Standard で拡張有限要素法（XFEM）を用いて水圧破砕問題をモデル化する場合、連成間隙圧要素の粗いメッシュや非構造メッシュで、この種の非局所平均化を使用できるようになりました。XFEM 機能は、以前は応力-変位要素でのみ利用可能でした。

- ・ 流体パイプ要素と流体パイプコネクタ要素

この機能拡張は、貯留層モデルにおいて、地表から貯留層まで（またはその逆）の流体圧力差を予測することに役立ちます。新しく流体パイプ要素と流体パイプコネクタ要素が追加され、間隙圧自由度を用いてパイプ内の流体流れをモデル化できるようになりました。これらの要素は、間隙圧-変位の連成解析や、温度-間隙圧-変位の連成解析をモデリングする際の融通性を高めます。Abaqus は、いくつかの標準的な損失機構も内蔵しており、さらに、解析中に配管系

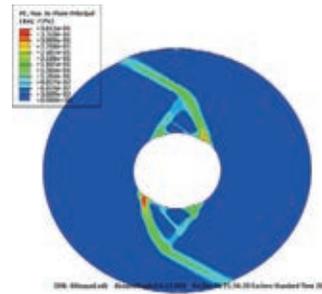


図 1. 掘削孔（白い部分）から遠方場へ向かう亀裂発生用の構成モデル

の一部の流れを制御する新しいバルブ挙動も定義できます。この機能拡張は、マルチチャンバー式のエアバッグやバルーンの膨張、空気や液体が充填されるクッション、負荷過程でチャンバーからチャンバーへ移動する流体を含んだ消費財など、複数の流体空洞が結合しているあらゆる産業問題に有用です。

- ・ 間隙圧要素に対する力学的な間隙圧荷重

この機能拡張は、亀裂面が開口した場合の流体圧力と接触圧の両方の影響をモデリングするのに役立ちます。これによって、以前は含めることが難しかった力学的サーフェスを適切に追加できるようになり、システムの全体応答にとって極めて重要な流体圧力荷重の予測が可能になります。たとえば、石油掘削作業における掘削孔のケースでは、掘削孔の側面に作用する流体圧力によって、孔壁を破壊するほど大きなフープ応力が発生する場合があります。掘削用泥水が地層に漏れ出る恐れがあります。

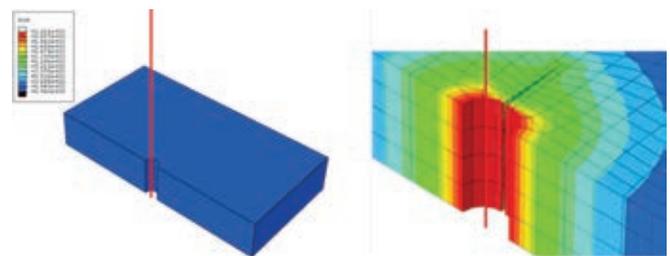


図 2. パイプ（赤色）と地盤の全体モデル（左図）と、掘削孔における亀裂発生 FEA 結果の拡大図（右図）

詳細は以下をご覧ください
www.3ds.com/simulia

EXXONMOBIL 社、エネルギーの未来を奥深く探究する

SIMULIA との長期パートナーシップが、石油・ガス業界における先進シミュレーションツールの発展に貢献

世界のエネルギー需要に大きく貢献するものとして、清浄な燃料である天然ガスの評価が、このわずか十年間で劇的に変化してきました。たとえば米国では、2000年時点のシェールガス供給量は天然ガス全体のたった1パーセントにすぎませんでしたが、現在は30パーセントであり、さらに増大しています。

一体なぜでしょう？ それは、石油・ガス開発会社の長年の技術から発展してきた革新的ソリューションが、シェール層のような非在来型資源にも巧みに応用されるようになったからです。このような地下操業は、あらゆる種類の技術課題で満ちあふれており、それらはすべて、関連する複雑な物理現象への深い洞察と理解を必要とするものです。そうした技術革新を推進するシミュレーションの利用に関して、主導的な役割を果たしている企業の1つが ExxonMobil 社です。

ExxonMobil 社は、エネルギー分野の企業としては、早く（1970年代）から Abaqus ソフトウェアを使用してきました。その関わり合いは単なる顧客関係に留まりません。ExxonMobil 社は、エネルギー分野の業績に関わるような重要課題のシミュレーション技術開発でも古くから SIMULIA と協業してきました。たとえば、ExxonMobil 社との共同研究によって、世界初の有限すべり変形機能が Abaqus に導入されています。この技術のおかげで、ねじ切り鋼管の生産チューブラーや装置の耐圧性や耐熱性が向上し、信頼性も増大しました。



同社と SIMULIA（および、その前身）の30数年間に及ぶ協力関係については、ExxonMobil 社の地盤主任技師である Bruce Dale 氏が2010 SIMULIA Community Conference の基調講演の中で初めて取り上げました。その講演から問もなくして、彼のエンジニアリングチームは SIMULIA とともに新たな取り組み

に着手しました。それは、シェールガスの採掘に関わるさまざまな課題に対処できるよう、シミュレーション機能をさらに強化しようとするものでした。この共同研究では、そうした課題に対する実用的な解決策を特定するため、最先端の汎用材料モデルや有限要素技術、数値計算法を開発することに焦点を合わせていました。

チームは、SIMULIA の担当者として直接パートナーを組む ExxonMobil 社の上級エンジニアで構成されました。特に Kevin Searles 氏は、チームの発足以来、主要な技術基盤の確立や、共同開発の運営チー



ムに対する助言に重要な役割を果たしました。また、Bill Kline 氏、Jason Burdette 氏、Erika Biediger 氏など ExxonMobil のマネージャーたちが、共同プロジェクトの期間中、常にリーダーシップを発揮されたことも重要な点でした（貢献者の皆様のプロフィールが補足記事に記されています）。

今年ベルリンで開催された SCC では、Dale 氏が再び登壇し、SIMULIA との共同パートナーシップがこの5年間でどこまで進展し、その結果得られた機能がどこまで洗練されたかについて、興味深く詳細に報告されました。SCC 以外にも、ExxonMobil 社のチームはこれらの技術を石油・ガス技術のイベントで発表しています。

「ExxonMobil と SIMULIA の共同研究によって、シミュレーションが根本的に改善され、石油・ガス業界における掘削、仕上、生産の重要課題にも対処できるようになりました。高度なシミュレーション技術と 3D による可視化は、エネルギー産業の成功にますます重要な役割を果たしています。それには、有限要素解析（FEA）、流体解析（CFD）、粒子流れ解析（PFD）などのモデリング機能が含まれます」と Dale 氏は述べています。

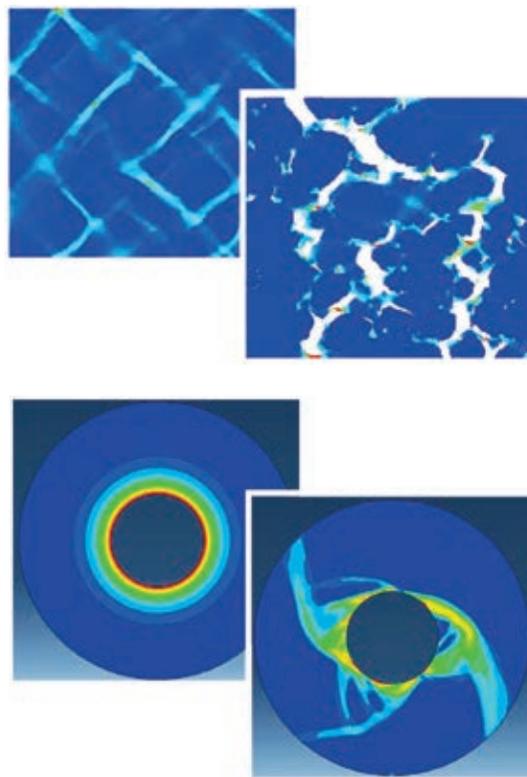
Dale 氏は1980年代に Exxon 社に入社して以来、こうした取り組みに関与してきました。最初は掘削事業をサポートするための研究・開発に従事していたのですが、そのうち管理および指導の役割を担うようになりました。彼は新しい革新的技術の擁護者であり、彼の34年間の職歴を通じて、常に革新性や創造性、卓越性を推進してきました。「ダッソー・システムズ SIMULIA の Abaqus については、私は早くから使用する機会を得たのですが、それは最新の技術を適用することで、かつては実験室や現場で試験するしかなかったことをシミュレーションできる素晴らしい手段でした」と、彼は2015年の講演後のインタビューで述べています。

「私は昔から好奇心が強く、物事の理由を探ることが好きでした。そのため、誕生して間もない技術でもすぐに使って見たくなるのです」（彼の好奇心がきっかけとなって生まれたアイデアは20もの特許を取得しており、さらに40以上が進行中です）。Abaqus のシミュレーション機能が拡大する中、Dale 氏は次のように話しています。「私は多くの非常に優秀な人々と一緒に仕事をする幸運に恵まれてきま



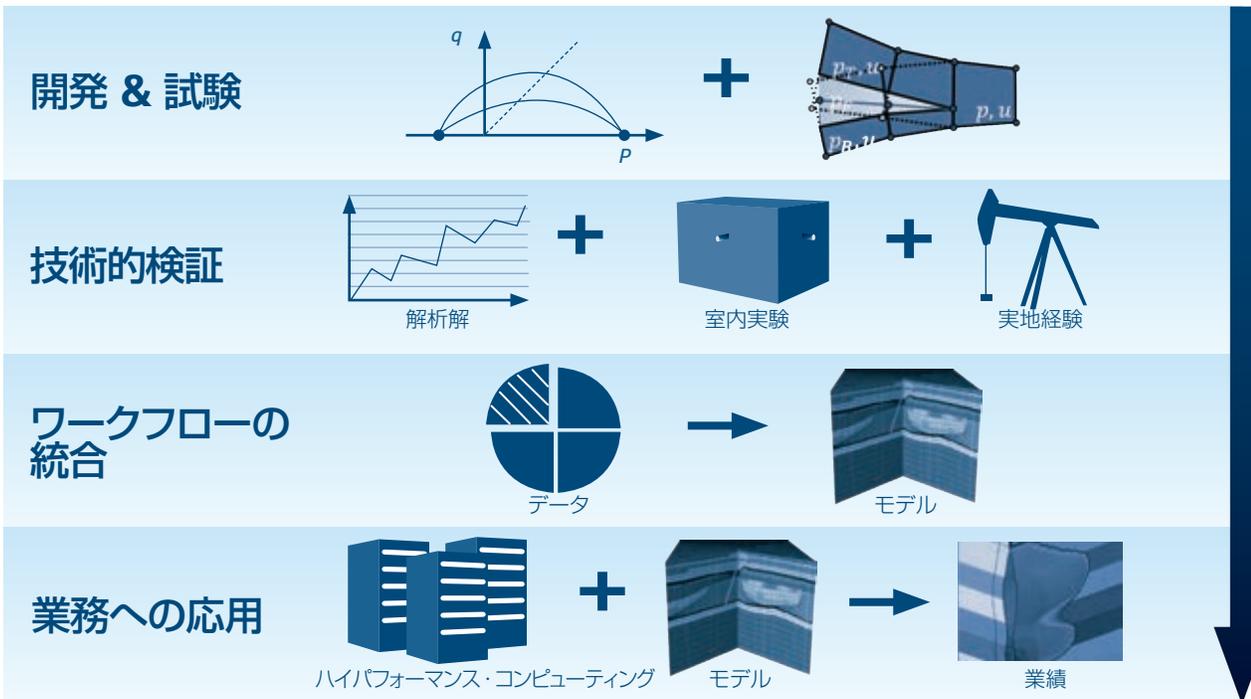
した。皆と協力してこれらのツールを使用していると、アイデアが自然と湧き出てくるのです」

シミュレーションの活用は ExxonMobil 社の競争力向上にもつながっていると Dale 氏は話しています。「いくつかの異なる事実から結論を導き出すことを可能にするシミュレーションの力は、コスト、規模、および時間の理由から、実験室では絶対に行うことのできないものです。かつては、決められた時間内に意思決定をできない場面も多かったのです」と彼は話しています。



ExxonMobil 社とSIMULIA が共同開発した最新の有限要素モデル（上図）と高度な構成モデル（下図）

共同研究の範囲



カバーストーリー

JING NING 氏



上級研究技師の Jing Ning 氏は、コーネル大学で機械工学の博士課程を修了した後、2013 年に ExxonMobil Upstream Research Company に入社しました。彼女は現在、カッタングス、再圧入、水圧破砕など、水圧入に関わるさまざまな問題のモデリングを担当しています。「今回の共同開発協定では、SIMULIA のエンジニアと一緒に働くことができ、とても良い経験をしました」と彼女は話しています。2015 SCC 論文の共同執筆者である Pablo Sanz 氏は「シミュレーションによって多少時間がかかっても精度の良い結果を業務部門へ渡せるので、結果として我々の生産性は向上しています」と説明しています。彼らの 2015 SCC 論文「Experimental Validation of Simulation Capabilities for Hydraulic Fractures Propagating in a Porous Medium (多孔質媒体中の水圧破砕伝播に関するシミュレーション機能の実験的検証)」において、Ning 氏と Sanz 氏ならびにチームメートは、流体駆動破壊の 2 つのベンチマーク研究で Abaqus のシミュレーション結果と実験結果が良く一致したと報告しています。「こうした課題の解決は、我々が追いかけている事業価値の実現にとって不可欠なものです」と Sanz 氏は話しています。

JORGE GARZON 氏、MATIAS ZIELONKA 氏



ExxonMobil Upstream Research Company の坑井パフォーマンス部門で上級研究技師を務める Jorge Garzon 氏は、イリノイ大学で土木工学の博士号を取得しています。彼は、断層破砕帯と坑井孔のすべり現象やケーシングの健全性を解析するため 3D 地質モデルの作成に取り組んでいます。「これらの最近開発された機能は、“研究コード”の洗練された物理特性と、実スケールの商用モデルでも“十分高速に”実行する能力を組み合わせています。これによって、水圧破砕部の幾何形状や、石油・ガス操業の結果として生じる間隙水圧の変化を予測できるようになります」と彼は話しています。Garzon 氏と Matias Zielonka 氏は 2015 SCC で「Advanced Fracture Modeling for Cuttings Re-injection (カッタングスの再圧入に対する最新の破壊モデリング法)」というタイトルの論文を発表しました。Zielonka 氏は、監視および坑井シミュレーション職の上級エンジニアリング・スペシャリストです。彼はカリフォルニア工科大学で航空工学と応用計算工学の博士号を取得しています。「我々が SIMULIA とともに開発した完全連成機能によって、実験室では再現不可能なシナリオをテストすることや、我々の知識を高い精度でモデルに応用することが可能になっています」と Zielonka 氏は話しています。

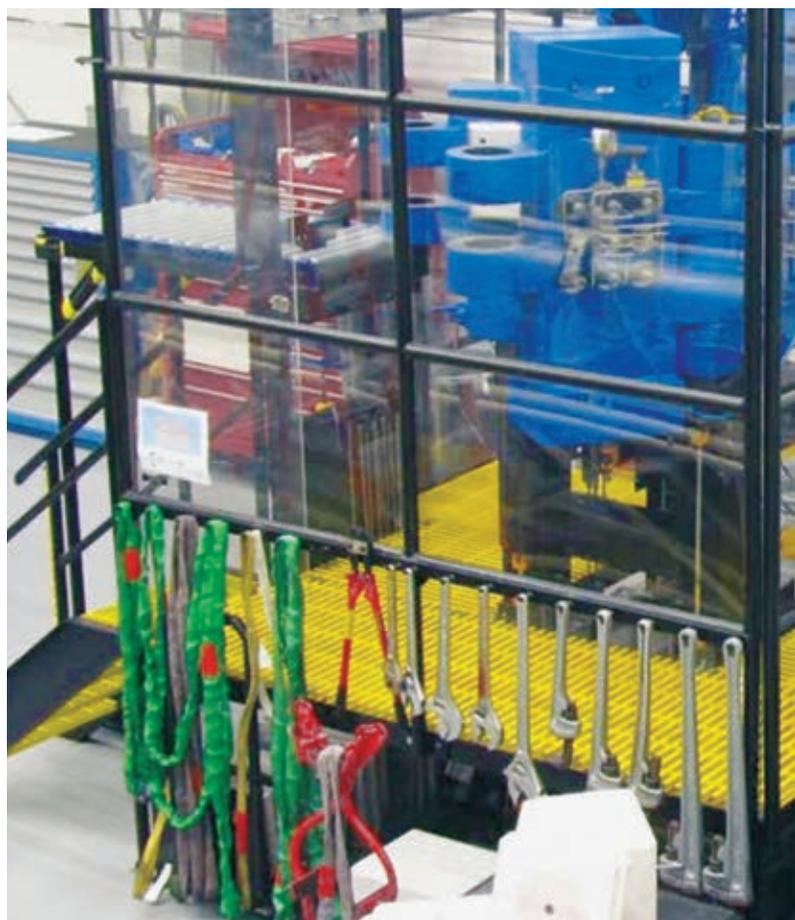
「シミュレーションによる可視化のおかげで、非常に早い段階から結果の解釈が可能になり、チャンスも危険性も見極めることができるようになりました。これには抜群の即効力があります。そのため上流業務において可視化は非常に有効であり、一部のとても手強い課題の解決に当たっては、全員が集まってさまざまな情報分析結果やデータを検討することが可能です」

Dale 氏は 2015 SCC の講演で、天然ガス資源を安全確実な方法で開発することへの彼の会社の責任について説明しました。ExxonMobil 社は、全体として環境負荷を減らしながらも、効率を向上させる最良の管理慣行を整備しています。これには、現地の地下水資源の保護、地域社会や政府との密接な協力、透明性や効果的な規制の促進などが含まれています。

また Dale 氏は、シェール層から天然ガスを採取することには、次のような複雑な物理過程が絡んでいることを説明しました。

- ・掘削（使用に適した掘削孔の構築）
- ・仕上（貯留層から地表まで管路の設置）
- ・坑井刺激（坑井と貯留岩面の結合性の強化）
- ・生産（坑井、処理施設、配管系を流れる貯留層流体の流れ制御）
- ・廃棄（処理不可能な流体を安全に深部地下層に戻すための再圧入）

ExxonMobil 社の試験設備



NIKOLAY M. KOSTOV 氏



研究技師の Nikolay M. Kostov 氏は、ライス大学で機械工学の博士課程を修了した後、ExxonMobil Upstream Research Company に入社しました。彼は現在、掘削によって誘発される破壊のモデリングと坑井孔の健全性を予測のために Abaqus を使用しています。彼とその同僚が 2015 SCC に提出した論文「Dynamic Hydraulic Fracture Modeling for Wellbore Integrity Prediction in a Porous Medium (多孔質媒体中の坑井孔の健全性予測に対する動的水压破碎のモデリング)」は、最新の粘着 (CZM) 要素を用いた Abaqus の独特な破壊モデリング機能について説明しています。「自動化ワークフローによって、時間をとても有効に活用できるようになりました」と彼は話しています。彼と彼のチームが SIMULIA とともに開発したツールは、彼らの予測シナリオの信頼度を高めています。彼は次のように指摘しています。「事前に良く分かっていない特性であっても、経験的モデルで推定することが可能です。また、不確実性領域をカバーするとき、個々の値ではなく、値の範囲を指定できます」

GANESH DASARI 氏



Ganesh Dasari 氏は、ExxonMobil Upstream Research Company において坑井運用性と地盤力学の技術チームリーダーを務めています。Dasari 氏はケンブリッジ大学で土木工学の博士課程を修了した後、2003 年に同社に入社しました。2015 SCC 論文「Simulation of Hydraulic Fracturing of Unconsolidated Sands using Fully Coupled Poro-Elastoplastic Models (多孔質・弾塑性完全連成モデルを使用した未固結砂岩層の水压破碎シミュレーション)」において、彼のグループの成果を発表した Dasari 氏は次のように話しています。「未固結砂岩層の破碎には、複雑な破損メカニズムが関係しています。我々の現実的な材料モデルは、こうした挙動を捕捉し破碎設計を最適化する上で鍵となるものです」。

これらの高度な Abaqus モデルのおかげで、砂岩層の破碎は、硬岩に見られるような引張破壊ではなく、せん断破壊が支配的であると判明しました。「我々のモデルがこうした重要な特性を捕捉できたことに、とても満足しています。このように心強い結果が得られたことで、長さ時間を延長した実スケールの圧入問題のシミュレーションも可能になりました」と彼は話しています。



これら各採取段階の成功に影響する重要な因子を正確にモデル化するため、これまで ExxonMobil 社と SIMULIA は、流体駆動破壊 (水压破碎) の進展に対する完全連成計算法を 2 種類の最新の有限要素法を用いて開発してきました。それらは、破壊経路が平面に限定される「粘着モデル (CZM)」と、破壊経路が完全に解依存となる「拡張有限要素法 (XFEM)」です。

これら先進の有限要素法に加えて、高度な材料構成モデルも Abaqus に組み込まれた結果、軟岩に見られるような独特かつ複雑な破損メカニズムを伴った非弾性変形も考慮できるようになりました。

すべてのケースにおいて、広範囲にわたる岩石や流体の特性はもちろんのこと流体損失条件についても、半解析解と実験室規模での実験結果の両方と比較することで、手法の妥当性が徹底的に検証されました。

ExxonMobil 社は社内に独自の実験能力を構築していたので、それに合わせて、岩石の制御水压破碎に関するさまざまな 2D および 3D モデルを SIMULIA と協力して作成しました。「望ましい結果を得るために単にモデルをチューニングするのではなく、実測された入力パラメータを組み込んで、物理過程を完全に表現したので、新たに共同開発した Abaqus 計算機能の検証結果には自信があります」と Dale 氏は話しています。

これら最近開発されたシミュレーション機能は、現在、ExxonMobil 社の水压破碎業務をさまざまな形でサポートしていると Dale 氏は指

カバーストーリー

その他の貢献者

Bill Kline 氏は ExxonMobil Upstream Research Company の掘削および地盤部門のマネージャーです。彼はミシガン大学で化学工学の博士号を取得しました。Kline 氏は、一連の国際シンポジウム「Pumps & Pipes」の共同創設者であり、そこでは、石油・天然ガス、医療、航空宇宙などの専門家が団結して、共通の利益や連携の機会を探求しています。

Kevin H. Searles 博士は、テキサス州ヒューストンにある ExxonMobil Upstream Research Company の地盤力学の顧問であり、共同開発された Abaqus の新しい水圧破碎モデリング法の技術リーダーです。Searles 博士は、過去 15 年間、貯留層の圧密、熱攻法による石油増進回収、地熱回収、水圧破碎、カッピングス / 水処理などの問題を、シミュレーションも含めて世界規模で研究してきました。彼は、マルチスケール地盤力学解析、流体圧入制御、地盤力学と地震モニタリングの統合など、さまざまな手法やプロセスに関して多数の特許を取得しています。

Erika A.O. Biediger 氏はテキサス州ヒューストンにある ExxonMobil Upstream Research Company の坑井パフォーマンス・マネージャーです。Biediger 氏はジョージア工科大学で機械工学の博士号を取得しました。また 6 つの米国特許も持っています。Biediger 氏は、現在、Abaqus の新しい破壊モデリング技術の開発に SIMULIA とともに取り組んでいる R&D 技術チームを監督しています。

Jason A. Burdette 氏はテキサス州ヒューストンにある ExxonMobil

Development Company の国内掘削チームのエンジニアリング・マネージャーです。Burdette 氏はバージニア工科大学で工業力学の理学修士号を取得した後、2001 年に ExxonMobil 社に入社しました。現在の任務に就くまで Burdette 氏は、Abaqus の新しい破壊モデリング技術の開発に SIMULIA とともに取り組んでいた R&D 技術チームを監督していました。

Pablo F. Sanz 氏は、ExxonMobil Upstream Research Company の坑井圧入性および誘発地震活動チームのリーダーです。Sanz 氏は、スタンフォード大学で計算地盤力学の博士過程を修了した後、2008 年に ExxonMobil 社に入社しました。彼の研究対象は、掘削、地盤エンジニアリング、誘発地震活動などの問題に応用される、計算地盤力学と破碎の分野です。

ExxonMobil Upstream Research Company に所属する、その他の貢献者は以下の通りです。

Scott R. Buechler 氏は坑井生産および坑井刺激チームのリーダーです。

Michael S. Chelf 氏は坑井建設部門のマネージャーです。

Ranojoy D. Duffadar 氏は掘削およびサブサーフェス職のエンジニアリング・スペシャリストです。

Gilbert C. Kao 氏はエンジニアリング・アソシエイトです。

Sandeep Kumar 氏は坑井パフォーマンス部門の研究技師です。

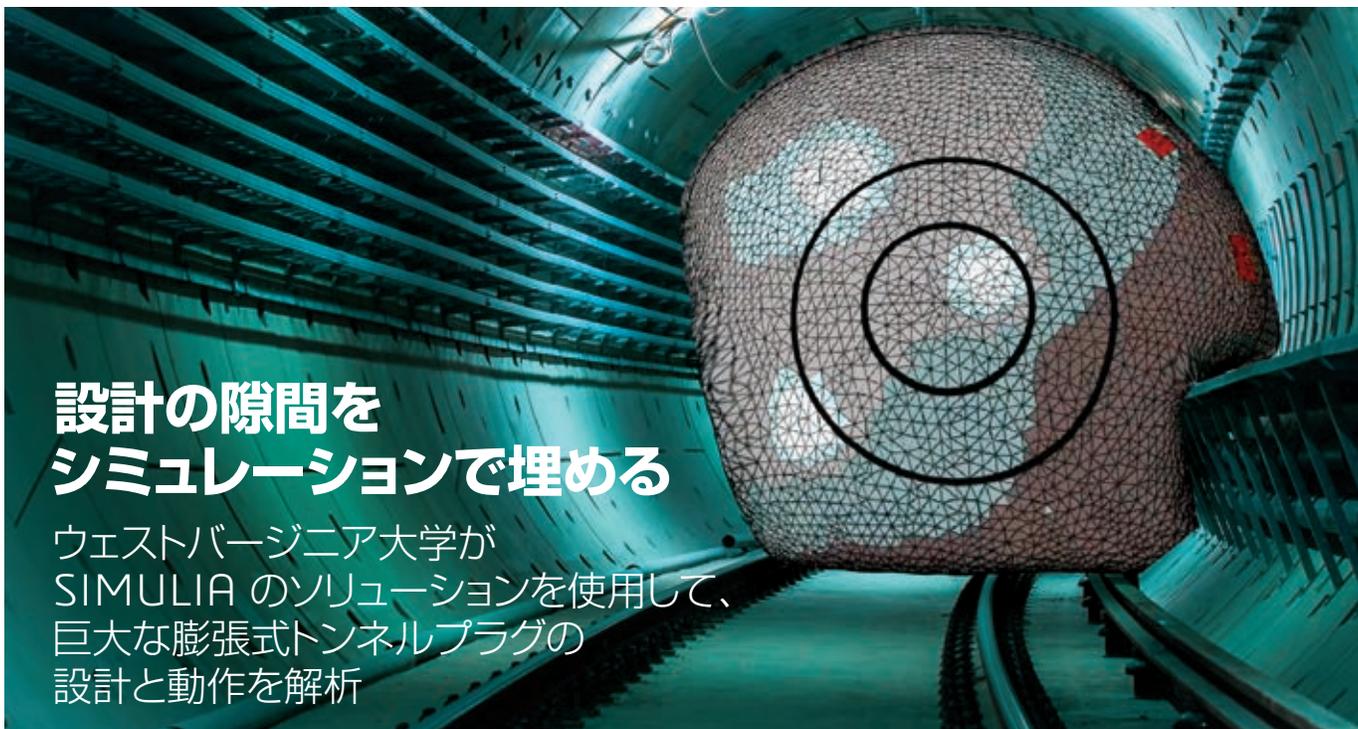
Fuping Zhou 氏は上級エンジニアリング・スペシャリストです。



摘しています。「掘削トラブルを回避することでコストが節減されます」と彼は述べています。「掘削リスクを管理することは、すなわち、小さな問題を大きな問題にさせないということです。高度な 3D シミュレーションは、頁岩の不安定性や砂中の逸泥など、掘削に関連した諸問題の予測能力を高め、リスクを軽減します。また、生産効率を向上させる画期的な回収方式の開発にも役立ちます」

Dale 氏は次のように締めくくっています。「SIMULIA との共同パートナーシップの成果は多大です。今後数十年にわたって、世界は、安全確実に、安価に、そして環境に責任を持った方法で、エネルギー供給を拡大していく必要があります。3D シミュレーションは、21 世紀のエネルギー供給の基盤を築くことで革新的ソリューションの原動力となっています」

詳細は以下をご覧ください
www.corporate.exxonmobil.com



設計の間隙を シミュレーションで埋める

ウェストバージニア大学が
SIMULIA のソリューションを使用して、
巨大な膨張式トンネルプラグの
設計と動作を解析

自動車のエアバッグが膨張する様子を想像してみてください。今度は、それが大型化した場合を想像してみてください。どのくらい大きいかというと、実にトンネルを塞ぐくらいの大きさです。そのような物体が、地下の採掘坑や地下鉄、あるいは道路トンネル内で膨らむと、間違いなく往来は遮断されるでしょう。また、洪水、火災、崩壊、その他の緊急時には、押し寄せる水や熱風、あるいは有毒な化学物質や病原菌などの侵入も防いでくれるでしょう。

こうしたプラグ装置に対するニーズは確実に存在します。かつて次のような事件がありました。2012年の秋、ハリケーン「サンディ」によってニューヨーク市の7つの地下鉄トンネルといくつかの主要な道路トンネルが冠水し、数日間にわたって閉鎖されました。1999年、イタリアとフランスを結ぶ「モンブラン・トンネル」では、マーガリンと小麦粉を積んで走っていたトラックが炎上し、トンネルに有毒な煙が充満して、50時間も燃え続けました。そして1995年3月、東京の地下鉄網ではサリンガスが撒かれました。

このような事件には、何十年も前から世界の安全当局が懸念を抱いており、彼らは危険状態を迅速にコントロールできるよう、地下鉄やトンネル、パイプラインを閉鎖するためのさまざまな方策を検討してきました。

膨張式が選ばれたきっかけ

2007年、米国の国土安全保障省は、天災・人災にかかわらず、異常事態から地下鉄網を守る「独創的な」アイデアを探るための調査を開始しました。あるアイデアは、トンネルを改造して堅固な金属製の水門などの固体構造を設置するというものでした。また別のアイデアは、その昔、英仏海峡トンネルの開発中にヨーロッパで発案されたのですが、トンネル内の重要地点に膨張式プラグを設置すると

いうものでした。

この膨張式というアイデアは、英仏海峡トンネルでは実現されなかったのですが、いくつかの理由から人々の関心を集めました。巨大なエアバッグのように、緊急時にだけ素早く膨らむプラグであれば、平常時のトンネルの往来を妨げることがありません。また、膨張式プラグは水門よりも、トンネル形状（特に、線路やパイプや通路など、トンネル内の障害物）に良くフィットします。このように「柔らかく」フィットすること、すなわち適合性こそが、気密性や水密性を実現する上でとても重要です。さらに膨張式プラグの方が水門よりもかさばらないため、設置も容易であり安価で済みます。

このアイデアは、緊急事態が予想される場所に、膨張式プラグを常設または仮設するというものでした。膨張式プラグは折り畳んで容器に格納され、自動車のエアバッグのように、いつでも起動できる状態に置かれます。そして必要なときに、近くに設置したファンまたはパイプから空気を送り込んで膨張させます。トンネルの壁に埋め込んだセンサーで起動させたり、遠隔操作で起動させたりもできます。プラグが不要になれば、空気を抜いて取り除けば良いのです。

「結果的に、我々のシミュレーションは、巨大な拘束具付き膨張式プラグの挙動を予測できただけでなく、実物試験では直接得ることのできない量の見積もりにおいても、FEAの使用が非常に有効であることを実証しました」

— ウェストバージニア大学、研究教授
Eduardo M. Sosa 氏

アカデミックケーススタディ

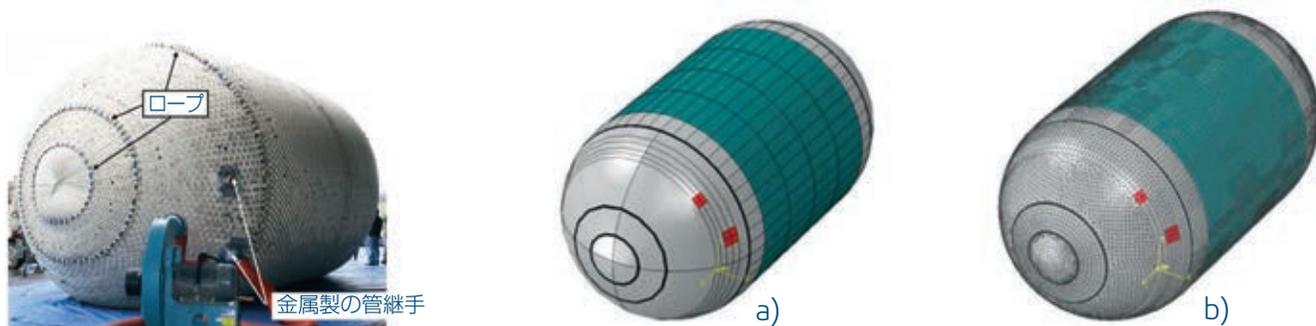


図 1. 膨張式プラグのプロトタイプ (左図) と、初期形状の Abaqus モデル: a) 形状、b) メッシュ

次の緊急時に備えて、交換品を入れ替えることや、近くに配備しておくことも容易です。

トンネルを仮想的に塞ぐ方法

膨張式概念に興味をそそられた国土安全保障省は、ウェストバージニア大学 (WVU) の機械工学科と土木工学科にコンタクトを取りました。その結果、実スケールの試験設備が建造され、実際の鉄道輸送トンネルの一区画を模した構造内で、最初のコンセプトの試験が行われました。

言うまでもなく、エアバッグをトンネル規模までスケールアップするには、格納、展開、および製造にまったく新しいアプローチが必要でした。また、実環境試験は複雑で手間がかかり、期待するほどの予測性が得られないことも判明しました。

そこで WVU はリアリスティック・シミュレーションへと方針を転換し、拘束具付き膨張式トンネルプラグに対して一連の有限要素モデルを作成しました。「コンピュータモデルの挙動を実スケールの試験結果と比較することにより、展開設計を適切に絞り込むことが可能となり、実環境の完全な展開シーケンスをより正確に予測できるようになりました」と、研究教授の Eduardo M. Sosa 氏は話しています。彼はこの研究成果を、大学の同僚である Choo-Siang Wong 氏や Ever J. Barbero 氏とともに、ベルリンで開催された 2015 SIMULIA Community Conference で発表しました。

WVU が使用した主要な解析ツールは、ダッソー・システムズ SIMULIA の Abaqus 統合有限要素解析 (FEA) ソフトウェアでした。FEA シミュレーションには、プラグの折り畳み、配置、(自重による) 据え付け、展開、および膨張の過程だけでなく、プラグとトンネルの適合性やトンネル内に存在する物体との適合調整なども含まれました。

チームの Abaqus モデルにはさまざまなコンポーネントが含まれて

いました。主要コンポーネントは膨張式プラグ本体とトンネル区画です。膨張式プラグは、両端の半球状キャップと円筒体 (図 1 参照) で構成されており、同じキャップ上には空気注入および放出するための 2 つの金属製の管継手が付いています。プラグの外周は 2 つの理由からトンネルの外周よりも大きくなっています。第一に、サイズを大きくすることで、展開後の完全に膨らんだプラグに生じるしわやたるみが補正されます。第二に、適合性が向上し、結果としてトンネルの密封性が高まります。

トンネル区画のモデル準備は、かなり簡単でした。プラグと違って、トンネルは剛体と見なせます。そのため、プラグの構造膜材は膜要素を用いてモデル化されましたが、トンネルとプラグの管継手は剛体要素を用いてモデル化できました。

折り畳みと据え付けの複雑性

プラグの折り畳みと配置のシミュレーションは、プラグモデル表面の選択された節点・要素に対する境界条件として、剛体回転と剛体移動を適用することによって実施されました。折り畳み過程の大部分は一連の幾何学変換であり、それは大まかに 3 つのステップに分解されました。すなわち、不拘束・無負荷状態の膨張、扁平化と着地 (図 2 参照)、そして転動による折り畳みです。

第 2 ステップの扁平化のシミュレーションでは、水平方向の変位と鉛直方向の重力が同時に適用されました。最後のステップである、扁平化したプラグの転動のシミュレーションでは、持ち上げおよび部分的な回転という折り目を表すための一連の動作を、回転する剛体プレートを用いて表現しました。この最後のステップでは、持ち上げと回転が 3 セット繰り返され、そのすべてで重力の影響が考慮されました。

折り畳まれたプラグの配置のモデリングは、空気が抜かれて折り畳まれたプラグに重力の影響 (すなわち、格納される時のプラグの

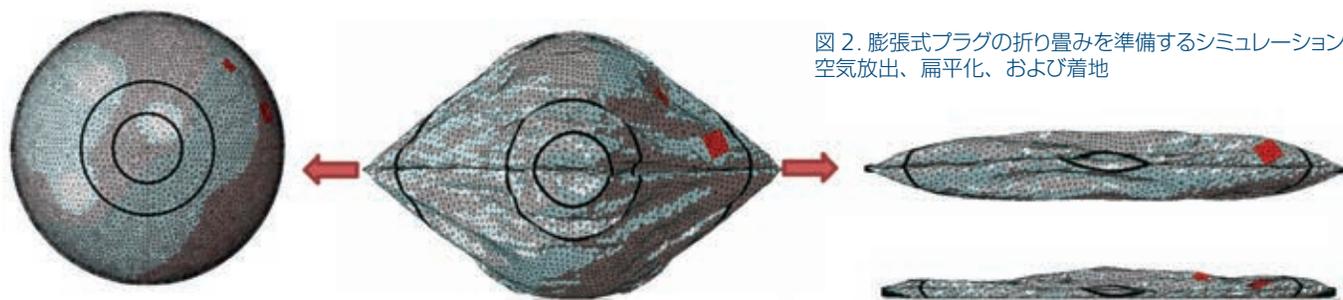


図 2. 膨張式プラグの折り畳みを準備するシミュレーション: 空気放出、扁平化、および着地

実験の様子



展開のシミュレーション #4



図 3. 膨張式プラグの展開のシミュレーション結果は、実スケール試験の展開と良く一致した

据え付け状態)が考慮されることから、プラグの展開と膨張のシミュレーションにも関係します。据え付けのシーケンスは、展開のシミュレーションを再実行する前に、折り畳みと配置によって歪んだ要素を初期状態に戻すために必要でした。このリセットは、膜面の歪みを防止して展開による運動エネルギーを最小限に抑えたので、展開のシミュレーション全体を安定化させる効果もありました。

プラグモデルの展開

WVU のエンジニアはシミュレーションに一樣圧力法 (UPM) を採用しました。それはシンプルで計算効率が高く、比較的ゆっくりした膨張のモデリングに適していたからです。Abaqus/Explicit が実装している UPM では、展開・膨張時の流体と構造の相互作用をモデル化するために表面ベースの空洞を用います。膨張シーケンスにおいて気流をより正確にコントロールするため、これらの表面ベースの空洞は、複数の内部の室を持つモデルとされました。

膨張式プラグの展開全体をモデリングするため、最初に、折り畳まれたプラグがトンネルに接して格納されました (図 3)。プラグ容器の仮想の鉛直ゲートが開くと、重力によってプラグが落下し展開を開始します。

WVU はシミュレーション精度を向上させるため、4 つ展開オプションを調査しました。最初のオプションでは、展開しようとする膜材を制御するためのロープ状の受動拘束具は、折り畳まれたプラグに含まれませんでした。また、気流をプラグ内へ誘導することも行われませんでした。その代わりに、空気がプラグに注入されると、プラグは一様に、自発的に、そして直ちに空気で満たされました。2 番目のオプションでは、ロープが含まれました。3 番目のオプションでは、マススケーリングによる動的応答を打ち消すためにロープに特別な剛性が追加されました。4 番目のオプションは 3 番目と似ていますが、他のオプションと違って、プラグ内の気流にシーケンスが定義されました (すなわち誘導が行われました)。

チームの解析結果は、最初と 4 番目の展開ケースが、実験結果と比べると、適合性に関して両極端であることを示していました。4 番目の展開ケースで定義された気流によって、シミュレーションは実スケール試験で観察された実際の挙動を最も良く再現することができたのです。

適合の重要性

適合性は、でこぼこした空間を密封しなければいけない膨張式プラグにとって非常に重要です。適合性が欠如していると、膨張したプラグとトンネル外周との間、特にコーナー部やパイプなどの障害物付近に隙間が生じます。「明らかに、そうした隙間や結果としての漏出は最小限に抑えなければいけません。シミュレーションが特に有用となるのは、このような展開設計を微調整するときです」と Sosa 氏は話しています。

プラグの織布のしわの位置と伸展も、極めて重要であることが判明しました。ある場所で膜材のしわが蓄積すると、接触している外周周辺の他の場所に隙間が生じる原因となります。隙間の存在は、明らかに展開が不十分であることを示唆しています。折り畳みパターンと展開シーケンス、受動拘束具の位置と数、さらには相互作用面の摩擦特性など、プラグ挙動のいくつかの側面を最適化することによって、しわと隙間の両方を大幅に減らすことができます。

前もって取得しておいた実測データは、チームのモデルの精度向上には役立ったのですが、実スケールの試験中に、試験設備で適合性を測定することは容易ではありませんでした。しかし FEA では、必要な適合性のシミュレーションがもちろん可能です。ここに、物体間の接触を高精度に計算できる Abaqus の特別な価値があります。WVU は、さまざまなシナリオのもとで膨張したプラグとトンネル壁との接触領域を調査した結果、実環境の展開試験と彼らのシミュレーションが極めて良く一致していることを確認しました。

「結果的に、我々のシミュレーションは、巨大な拘束具付き膨張式プラグの挙動を予測できただけでなく、実物試験では直接得ることのできない量の見積もりにおいても、FEA の使用が非常に有効であることを実証しました」と Sosa 氏は話しています。今後も研究者たちは、これらのツールを使用して、引き続き別のトンネルプラグ問題を調査する予定です。また、彼らの開発した手法が役立つと思われる他の応用分野も探究したいと考えています。

詳細は以下をご覧ください
www.statler.wvu.edu

シミュレーションは積層造形技術の発展に いかに貢献できるか

SIMULIA 産業多角化チーム James Fort, Subham Sett

3D プリンティングとしても広く知られている積層造形法 (Additive Manufacturing: AM) は、1980 年代後半から発展してきた製造技術なのですが、最近ようやく、さまざまな分野でその真価を発揮するようになりました。積層造形とは、金属、樹脂、合金、化合物などを融合または付着させながら層として積み重ねることにより、目的とする形状のパーツを製作するプロセスです。

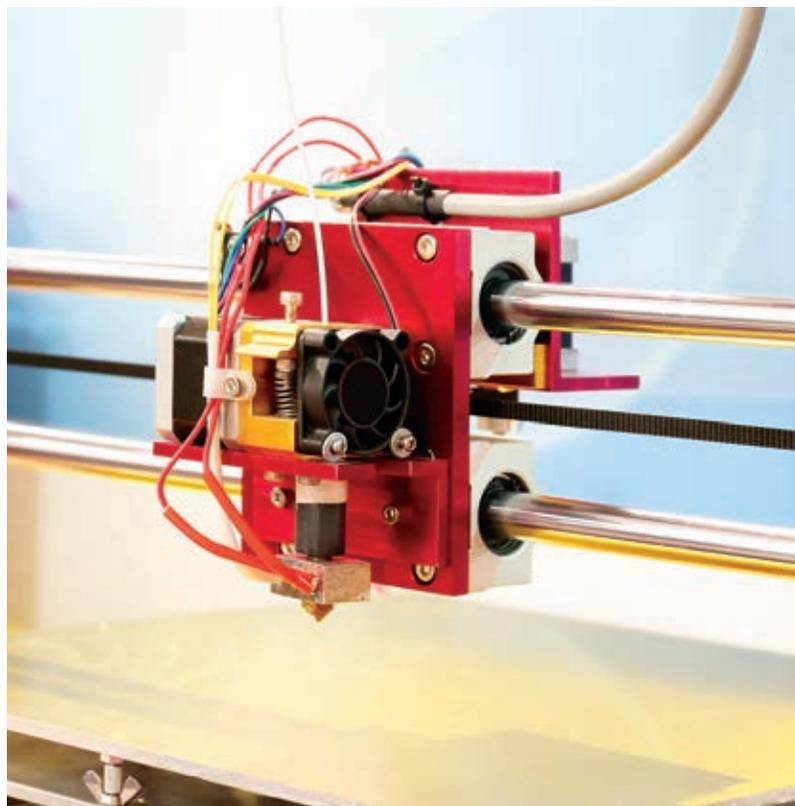
技術の進歩によって 3D プリンティングがデスクトップや家庭でも可能となり、「メイカー・ムーブメント」の波にも乗って、最近それはますますポピュラーな存在となりました。現在、AM 法の産業利用は、ラピッドプロトタイピングの枠を超えて、実パーツの直接製造から成形型の製造にまで範囲が広がっています。

義肢の製作、チョコレートのトッピングデザイン、医療現場での矯正具の製作、そして車体の製造まで、近頃はこの技術の新規利用に関する報道に接しない日がないくらいです。しかしながら、多くの AM プロセスには、今なお信頼性と予測可能性に関する重要課題が残されており、それらがパーツの品質保証に対する障壁となって、産業界でのさらなる普及拡大を阻害しています。

したがって、我々が自問すべき重要な質問は、「シミュレーションは AM 設計の信頼性にいかに貢献できるだろうか？ パーツを最初から適切にプリントできるよう設計することは可能だろうか？」となるのです。これらについて考えてみましょう。

シミュレーションが 3D プリンティングに貢献できる領域は多数あります。たとえば、機能設計の創出、格子構造の設計、材料の補正、製造工程や実稼働時性能の最適化などが挙げられます。

AM 法の特長は、伝統的な製造上の制約から設計者を解放するという点にあり、それによって彼らは、パーツの強度や性能を犠牲にすることなく、さまざまな技術的要件を満たすため、設計を新たな次元へと導くことが可能になるのです。その一例が軽量化であり、定められた機能要件を満たしながら必要最小限の材料でパーツを製造できるようになります。このような設計の創出が実現可能になったのも、SIMULIA が Tosca 製品を通じて提供しているロバストな非線形トポ

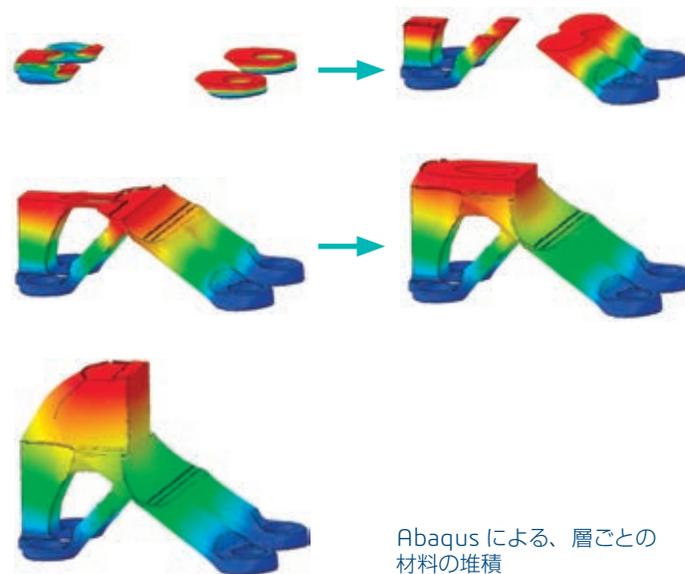
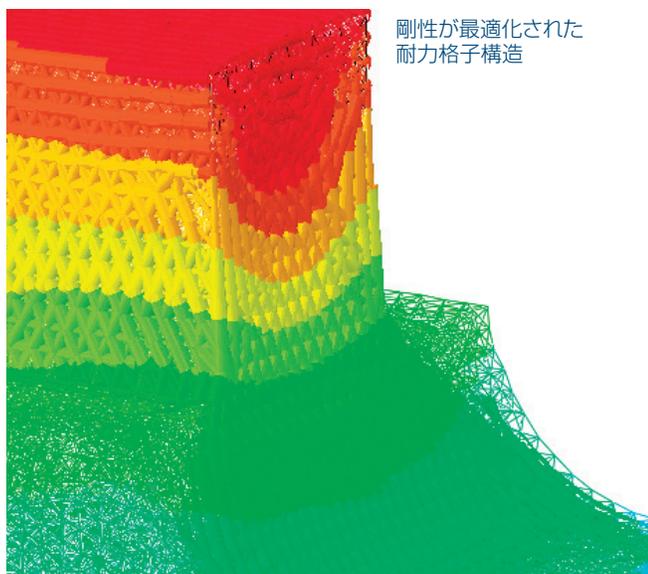


ロジー最適化などの実績ある技術のおかげです。

また AM 法では、伝統的な製造技術では到底不可能な、非常に洗練された内部格子構造を持つパーツも製造が可能となります。このような格子構造は、トポロジー最適化のみで実現されるレベル以上の、さらなる重量削減を可能にします。

この秋以降 Tosca を通じてリリースされる予定の SIMULIA の追加機能では、構造に格子を設けることが可能になり、これらの格子を調整して完全に機能的なパーツを作成できるようになります。





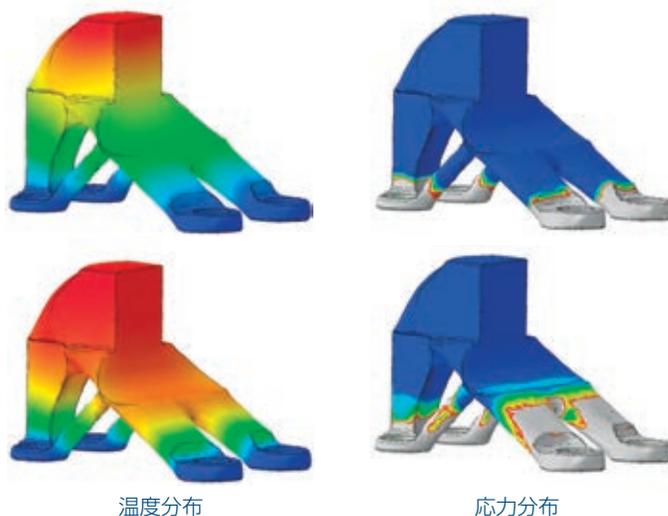
すべての AM プロセスで欠かせないのは、使用される素材の特性評価です。たとえば合金の場合、一般に、CAD-ソフトウェア-誘導経路に沿って粉末床に高強度レーザーを照射し、金属を溶融結合させながら何層にも積み重ねてパーツを造形します。局部的に溶融した金属は、熱源が移動するにつれて凝固し、下の層と固着することで融合したパーツが形成されます。このときの冶金プロセスや成長するマイクロ組織は、相変態や冷却速度、プリント速度などのマシン特有のパラメータに影響されます。

こうして出来たパーツは、鋳造などの従来製法で作られたものより強度に優れても、機械的性質に大きなバラツキがでる可能性があります。したがって、実際の製造工程のマルチスケールおよびマルチフィジクス特性を捕捉することが重要です。この点については、研究者や技術者は Abaqus をパーツのマクロ挙動に対する包括的ソルバーとして利用しながら、さらに Abaqus のユーザー・サブルーチンを用いて、マイクロメカニクスの物理挙動をモデル化することが可能です。

材料の特性評価以外にも、3D プリンティングの製造工程自体が原因で、設計したものと製造したものの間に大きなギャップが生まれる可能性があります。設計時のパーツには、応力も歪みも生じておらず、標準的な材料定義が割り当てられています。しかし AM 法（現在のところ、それは全体として熱処理の一種と見なせる）では、残留応力の蓄積、パーツの歪み、材質のバラツキなどが発生する場合があります。この点については、Isight が堆積経路、造形方向、加熱量など、製造プロセスパラメータの影響を調査するための強力なツールとなります。このツールを用いることで、パーツの実稼働条件に適合するよう残留応力を最適化し、パーツの歪みを減らし、材料挙動を改善することが可能です。それらの条件は、静的荷重でも、動的荷重でも、振動でも構いません。あるいは、すでに Abaqus を用いて解いている他の技術的問題でも構いません。最終的に、実荷重条件下で稼働するコンポーネントに求められるのは、パーツの疲労強度です。材料データの研究が進めば、fe-safe® と Abaqus の緊密な統合によって、積層造形法で製造されたコンポーネントの疲労寿命評価も可能になります。

そういうわけで、我々の最初の質問の答えは「イエス」です。シミュ

レーションは、あらゆる業界の積層造形法の質を高め、その発展をサポートする大きな可能性を有しています。そして SIMULIA ツールの幅広さをもってすれば、技術が成熟するにつれて、現在生じている問題の多くが対処可能になります。皆様は積層造形法について、どのようにお考えでしょうか？是非ご意見・ご感想をお寄せください。



パーツ造形における製造プロセスパラメータの影響

詳細は以下をご覧ください
www.3ds.com/simulia

アライアンス

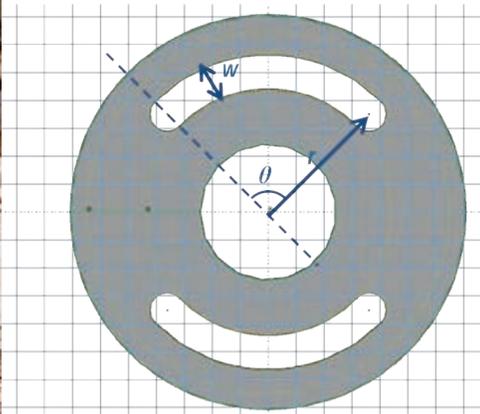


図 1. Isight の最適化で用いられた
ブッシュのすぐりパラメータ

Endurica 社: 最適化によって ブッシュ設計の限界に挑戦

自動車のサスペンション装置は、剛な部材間の境界面でクッションの役割を果たす弾性ブッシュで守られています。これがないと、部材は衝撃や振動で損傷してしまいます。ブッシュ開発者の任務は、定められた空間に収まるよう変形する形状を見つけ出すこと、荷重軸ごとのコンプライアンス目標を達成すること、そして、自動車メーカーが保証している耐久性を実現することです。

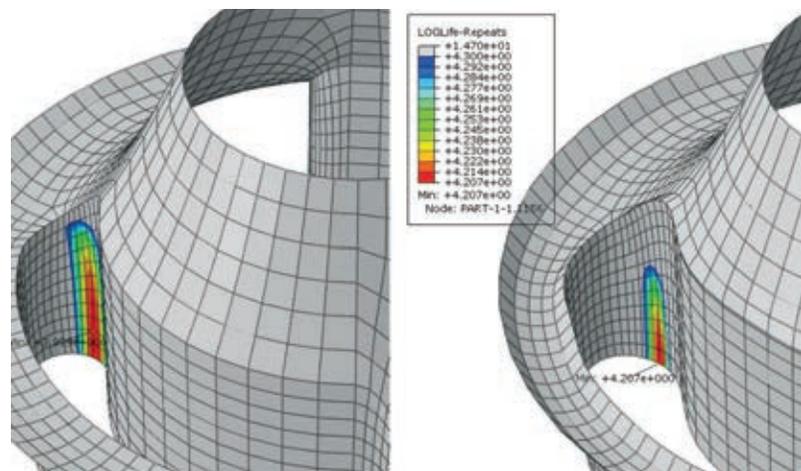
ブッシュ性能を評価するための実験プログラムには 2 万米ドルから 20 万米ドルもの費用がかかるため、Abaqus による設計オプションの選別が広く実践されています。ところで皆様は、ラバーブッシュの剛性と形状に設計制約条件を与えて、その耐久性をシミュレーションし最適化できるようになったことをご存じでしょうか？

最近実施されたベンチマークでは、全 3 方向の剛性目標を達成した上で、さらに耐久性を最適化することができました。fe-safe/Rubber™ を用いて耐久性が計算され、パラメトリック最適化ソルバーである Isight を用いて剛性目標を満たす初期形状が特定され、そして、ノンパラメトリック最適化ソルバーである Tosca を用いてブッシュのすぐり形状が微調整されました。

Isight ソルバーによって、一対のすぐりの寸法と配置が 3 つの独立変数 (図 1 の w 、 r 、および θ) を用いて決定されました。そして、この設計案の耐久性が fe-safe/Rubber によって解析され、その寿命は 9101 回の負荷サイクルであることが確認されました。次に、ノンパラメトリック最適化ソルバー Tosca に対して、すぐり形状を変化させることで疲労寿命を最大化するという目標が設定されました。8 回の反復計算の後、最適寿命が 16088 回の負荷サイクルとして得られました。図 2 は、初回と最終回の設計反復の結果です。それぞ

れのカラーコンターは亀裂発生地点を示しています。この問題では、反復プロセスは約 2 時間で完了し、結果として寿命は 76% 延長しました。

図 2. ブッシュの初期設計と最終設計の比較 : fe-safe/Rubber で
計算された疲労寿命と亀裂発生位置



詳細は以下をご覧ください
<http://edurica.com>

Materialise 社: Mimics® イノベーションスイートと Abaqus を組み合わせて患者固有の股関節を設計

スウェーデン・ルンド市のスコーネ大学病院 Rydholm 教授による発表事例

先天性疾患のために左股関節が著しく変形したスウェーデンの少女が、車椅子生活の危機に直面していました。しかし彼女は、3D プリンターで作成された Mobelife 社の aMace® インプラントと Materialise 社の Mimics および 3-matic ソフトウェアによる仮想術前計画のおかげで、今では痛みを感じることもなく、松葉杖なしでも歩けるようになりました。

Mimics® による骨盤変形部の再構成

この 15 才の少女は、レックリングハウゼン病と呼ばれる先天性疾患を患っており、これが左股関節に重度の骨格奇形を引き起こしていました。彼女の骨盤に危害を及ぼしていた神経繊維腫は手術で除去されたのですが、大腿骨骨折をきっかけに病状が悪化したため、彼女はそれから 2 年間、自宅で教育を受けることを余儀なくされました。当初、担当医は治療法が全くないか、あるいは非常に限られていると考えていたので、彼女も車椅子生活を覚悟していたのです。

スウェーデン・ルンド市のスコーネ大学病院の Rydholm 教授は、特注の寛骨臼インプラントを設計するため Materialise 社の子会社である Mobelife 社に連絡を取りました。エンジニアチームは Mimics ソフトウェアを使用して、患者の CT スキャンデータを読み込んでセグメント化し、病変部を再構成して、術前状態を分析しました。

解剖学的鑄型に基づいて、患者の生体構造に対して直接、手術計画が立案されました。これには、目標点の配置と、外科医の賛成を得た上で最良位置にカップを固定するための寛骨臼カップとフランジの位置決めが含まれていました。

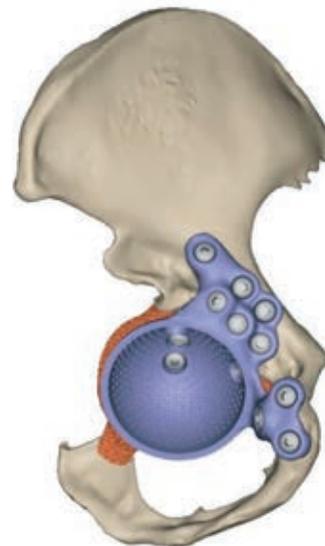
3-matic® による患者固有の寛骨臼インプラントの設計

3-matic ソフトウェアを使用して、患者の股関節構造に適合するインプラントが設計されました。このソフトウェアによって、ネジとインプラントの位置決めの正確な評価が可能になりました。患者固有のフランジが設計され、ネジの位置が決定され、そして骨質が分析されました。さらに、チームは Abaqus で有限要素解析を実施し、インプラントと骨のアセンブリが負荷や応力に耐えるかどうかを検証しました。この“3つのフランジ付きカップ”の最終設計は、外科医によって検証され、3D チャンプリンターに送られました。

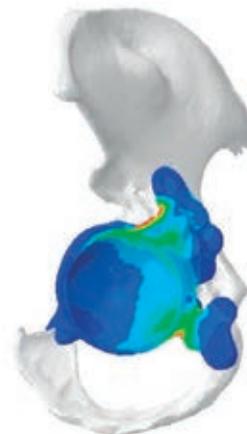
手術から間もなくして、患者は痛みから解放され、数か月後には、車椅子からも解放されました。現在、彼女は再び学校に通っています。今度は松葉杖も必要ありません！

詳細は以下をご覧ください

<http://biomedical.materialise.com/mimics>



患者固有の 3つのフランジ付きカップの仮想設計



3つのフランジ付きカップの FEA シミュレーション結果



3D プリンターで作成された特注カップ



シミュレーションがヤマハのオフロードバイクをクールに走らせる

横転のダメージからラジエータアセンブリを保護することに Abaqus が貢献

競技中にオフロードバイクが低速で倒れた場合、小さなダメージが蓄積してバイク性能が損なわれる可能性があります。たとえば、バイクが地面に倒れたときの衝撃でラジエータアセンブリが変形すると、冷却性能が低下したり、冷却水が漏れたりするかもしれません。

プラスチック製のサイドカバーを取り付けることで、ラジエータアセンブリは保護されますが、ラジエータとプラスチックカバーは、バイクが低速で横倒しになったとき、両方とも容易に変形しないよう設計する必要があります。しかしヤマハ発動機のエンジニアは、同社の水冷式オフロードバイクに対して、ラジエータとプラスチックカバーの補強すべき場所を正確に特定するには、かなりの試行錯誤が必要となることに気付きました。

「プラスチックカバーのデザインや厚み、ラジエータのブラケット、ボルト位置など、対策すべき場所を特定するには、多数の実機試験を実

施する必要があります。この実車強度を分析するための試験には、多大な時間と試作パーツが費やされます。その上、実機試験は高価であり、人為的ミスも生まれやすいのです」と、ヤマハ発動機の技術センターで研究開発部の主任を務める山谷真和氏は説明しています。

そこで山谷氏は、シミュレーションベースのアプローチの適用を決断しました。そして、単純化した実験室試験を通じて、彼らの新しい強度解析手法を慎重に検証しました。「損傷評価に必要な知識を得るため、基準値の設定を目的としたさまざまな試験構成を準備した後、我々はそれらの試験構成に対するシミュレーションモデルを作成しました。シミュレーションが実機試験の結果と良く相関していたなら、そうしたシミュレーションは効果的な設計支援ツールになるだろうと判断したのです」と、山谷氏は説明しています。

水冷エンジンを搭載したヤマハのオフロードバイクでは、ラジエータアセンブリを保護するカバーが、通常はバイクのフレーム側面に宙づ

りの形で取り付けられます。ラジエータは、ろう付けされたアルミニウム製の薄肉パーツであり、プラスチック製のサイドカバーで覆われています。超低速でカバーが地面にぶつかったとき、すなわちバイクが横転したとき（それは避けられないのですが、多くの場合、あまり格好の良いものではありません）、このようなパーツ配置が、ダメージに耐えうるだけのラジエータ強度を実現しています。しかし残念ながら、固い地面に倒れた場合、バイクはほとんど無傷ではられません。ラジエータフィンやコアサポートが曲がったり折れたり、保護プラスチックカバーが割れることも起こりえます。

「パーツ、荷重、機構など、我々の転倒シミュレーションに含めるべき重要な要素を決定するの必要があります。次に、どの荷重がどの結果に関係しているかを調べ、そして最終的に、試験結果と比較してシミュレーション精度も確認する必要があります。衝撃力と衝撃速度を正確に模擬した上で、ラジエータアセンブリとプラスチックカバーの強度を、個別にそして一体として、さまざまな荷重条件下で調査しなければいけません」と、山谷氏は話しています。

押し込み治具（図 1）を使用したヤマハの最初の台上試験は、ラジエータとプラスチックカバーの損傷を再現すること、ならびに強度対策が必要となる位置を特定することに焦点を合わせていました。この試験では、ラジエータとプラスチックカバーの強度を代表するものとして、ラジエータアセンブリの反力が測定されます。そして、サイドカバーのデザインと厚みが異なる 2 種類のラジエータアセンブリに対して試験が実施されました。

この台上試験によって、バイクが倒れたときのラジエータの損傷とプラスチックカバーの座屈が見事に再現されました。また、周辺パーツによって引き起こされると考えられていた、ラジエータコンポーネントのへこみも確認することができました。横転後のラジエータとプラスチックカバーの損傷状態を再現するため、彼らは地面とアセンブリを接触させるための下部ラジエータパーツも追加しました。

別の台上試験では、プラスチックカバーのひずみ速度依存性が分析されました。試験は 10 mm/min から 500 mm/min まで、3 通りの押し込み速度で実施されました。この結果から、プラスチックカバーの最大荷重（座屈荷重）は、速度によっても変化することが判明しました。さらに、ラジエータアセンブリのタイプとは無関係に、押し込み治具

「ヤマハにおいてシミュレーションは、強度対策の必要な場所を特定する上でも、より効果的な設計を新たに開発する上でも有効な手段となっています」

— ヤマハ発動機・技術センター、研究開発部主任、
山谷真和氏

を規定ストロークの約 20% まで押し込んだとき、カバーが座屈し始めることも分かりました。

「これは 2 つの事を意味しています。第一に、プラスチックカバーのシミュレーションでは、ひずみ速度依存性を考慮する必要があることです。第二に、ラジエータのタイプによって異なる最大反力の差は、基本的に、プラスチックカバーが座屈し始めるときの差と一致することです。プラスチックカバーの座屈を再現することが、実際、ラジエータアセンブリの最大反力を正確に決定することにつながるのです」と、山谷氏は話しています。

ラジエータに対しては、エンジニアは強度試験を 2 回実施して、同構造に熱放射フィンをモデリングすることの必要性を検討しました。最初の試験は通常のラジエータであり、もう 1 つの試験はフィンなしのラジエータです。この試験から、ラジエータに生じる全反力の約 50% がフィンによるものであることが判明しました。各フィンの厚みはわずか 0.1 mm ほどであるにもかかわらず、多数のフィンが一体となって、ラジエータ反力に大きな影響を与えていました。これらの結果をもとに、ヤマハは強度シミュレーションにフィンを含めることを決定しました。

「これらの実機試験から、我々が強度シミュレーションでモデル化すべきコンポーネントが確定しました。また、シミュレーションモデルを実物モデルと比較するための基準値も得られました」と、山谷氏は説明しています。

コンポーネントの強度シミュレーションの開発

ヤマハが仮想モデルの作成を開始したとき、彼らは準静的問題としてシミュレーションを実行しようと決めていました。それには、ダッソー・システムズの 3DEXPERIENCE 技術である SIMULIA の Abaqus FEA にあるような陽解法動解析の手法が必要でした。陽解

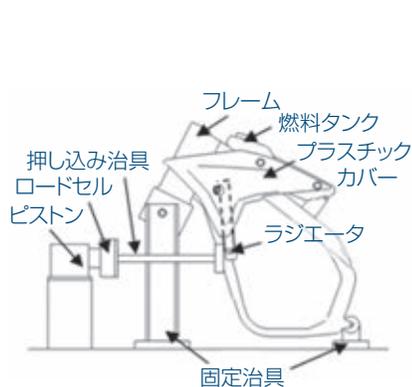


図 1. 押し込み治具を用いた、ラジエータアセンブリとフレーム構造の実機試験



図 2. 一体化されたラジエータアセンブリモデルの解析結果（2 方向の図）

ケーススタディ

法が選択された理由は、静的問題を動的に解くような場合、陽解法は完全な陰解法に比べて計算負荷が低いからです。最初、チームはカバーとラジエータのモデルを別々に作成し、次に、それらを組み合わせて全体のアセンブリモデルとしました。

プラスチックカバーのシミュレーションモデルはシェル要素でモデル化され、燃料タンクは剛体として定義されて、その参照節点を固定しています。ボルトで締め付けられる範囲も多点拘束で表現されましたが、ボルト中心軸周りには回転できるようになっています。プラスチックカバーと燃料タンクの間には接触条件を定義しています。この FEA モデルでは、複数の取り付け位置が多点拘束で結合され、参照節点の位置を強制的に変化させることができるようになっています。ラジエータカバーのプラスチック材料には、3種類のひずみ速度における試験データを用いて、ひずみ速度依存性が含まれています。それには、最大ひずみ速度における完全塑性の仮定が含まれています。

このシミュレーションから得られた最大荷重は、実物試験の値よりも約 10% 高くなっていました。「この差は、プラスチック部品の剛性が高めになってることが原因であると判断しました。その部品の厚みは徐々に変化していたからです」と、山谷氏は話しています。しかし、プラスチックカバーのシミュレーションで確認された座屈挙動については、実物試験と一致することを確認しました。

すべてのラジエータ部品は、熱放射フィンを除いて、シェル要素でモデル化されました。フィンの実際の形状を作成して、それらをラジエータモデルに組み込むには、あまりにも多くの時間がかかり、シミュレーションを無駄に複雑にするだけなので、フィンは多点拘束を利用して簡略化されました。

「Abaqus におけるフィンモデルには、実物の単位フィンの挙動と校正しながら、ハニカム用のユーザ材料を適用しました。シミュレーションでは、フィンと等価な力学的挙動を示す動的な応力-ひずみ関係を用いました。結果として、我々はソリッド要素で簡略化したフィンモデルを作成することができ、それらは実際の単位フィンの応答を十分適切に再現していました」と、山谷氏は説明しています。

ラジエータモデルのシミュレーションから得られた荷重は、実際の押し込み治具試験の結果よりも約 20% 高くなっていました。山谷氏によれば、実際のフィン表面には機械加工されたスリットが付いているのですが、モデルではそれらが省略されていたため、フィンの剛性が高めになっていました。

ラジエータアセンブリのシミュレーションの検証

最終的に、一体化したラジエータアセンブリのモデルが作成され、ラジエータとプラスチックカバーを含む、コンポーネント間の相互作用が正確に再現されました (図 2)。

まず、ヤマハは、ラジエータ、プラスチックカバー、およびそれらのアセンブリに対して、内部エネルギーと運動エネルギーの総量を確認しました。「全内部エネルギーに対する全運動エネルギーの割合は、数パーセント程度でした。これは、ラジエータアセンブリの変形を準静的問題として扱っても妥当な解が得られることを示しています」と、山谷氏は話しています。

実際、彼は次のように話しています。「ラジエータでは、試験結果と



図 3. ラジエータアセンブリの最終設計：プラスチックカバーには、バイク横転時のダメージに対する強度対策がより効果的に施されている

シミュレーション結果がほぼ正確に相関しており、同じ全体的な損傷状態が再現されていました。プラスチックカバーの座屈した部分も完全に相関していたため、我々は自信を持って、ラジエータのプラスチックカバーに対して異なるデザインを試してみることができたのです」

これらの成果を踏まえて、ヤマハは、彼らのラジエータアセンブリの強度シミュレーションが試験結果を正確に予測できるものであると確信しました。山谷氏は次のように話しています。「シミュレーションによって、実機試験時のラジエータとプラスチックカバーの挙動を詳細に分析することが可能になりました。そうした挙動を観察することは試験だけではとても困難です。ヤマハにおいてシミュレーションは、強度対策の必要な場所を特定する上でも、より効果的な設計を新たに開発する上でも有効な手段となっています」(図 3)

画像の引用元: 図 1 を除くすべての図は、第 19 回小型エンジン技術国際会議で発表された論文「オフロードバイクラジエータアセンブリの強度解析手法の開発」から引用しています。

詳細は以下をご覧ください
<http://global.yamaha-motor.com>

プロペラで教育を推進せよ!

TADS (Teachers at Dassault Systemes) プログラムは、ダッソー・システムズの社会貢献活動の一環として、サイエンス、テクノロジー、エンジニアリング、および数学 (STEM) 分野における教育の推進を目指し 2013 年に創設されました。このプログラムの主な目標は、STEM キャリアについて直接体験してもらうことによる「教師の育成」、教室で使う学習モジュールを教師に作成してもらうことによる「生徒の教育」、および、地域の公立学校コミュニティに対してダッソー・システムズの認知度を高めることによる「コミュニティの啓蒙」の 3 点です。SIMULIA での 6 週間の研修期間中に、TADS 教師は、彼らが教室で使用したり他の教師と共有したりできるカリキュラム・モジュールを作成します。

SIMULIA R&D QA マネージャの David Duke が、2015 年度の TADS 教師である Donn Chu 先生と Marta Hidalgo 先生の担当です。彼らはロードアイランド州プロビデンスのマウント・プレザント高校に新設された「シスコ・アカデミー」から参加しました。同アカデミーは、コンピュータとネットワーク技術について学び、遊び、体験する機会を生徒に提供することを目的としています。

あなたのポジション / 学校 / クラス / 担当は何ですか？

DONN: 私はマウント・プレザント高校で、コンピュータ情報システム (CIS)、Cisco ネットワーキング、ウェブデザインを教えています。私の職責は、学校の技術教育設備の管理、トレーニング、そして先生方に対する技術統合の支援です。

MARTA: 私はマウント・プレザント高校で、コンピュータサイエンス、基礎工学、そして ELL を教えています。

あなた自身についても少しお聞かせください。

DONN: 私はプロビデンスのいくつかの学校で 17 年間教師を務めてきました。ロードアイランド・カレッジの中等教育科を卒業した後、ナショナル大学の教育工学科で教育学の修士号を取得しています。

教師としての私の任務は、子供たちが彼らの人生において、十分な知識を得た上で責任ある選択を行えるように支援することです。彼らを教えることで、私自身も一学生として、そして生涯学習者として勉強し続けることができます。

MARTA: 私は 12 歳の時、ドミニカ共和国からプロビデンスに移住し、ホープ高校に入学しました。4 年間の ESL コースを修了した後、ジョンソン・ウェールズ大学に入学してコンピュータ / ビジネスアプリケーションと情報学の学士号を取得し、さらにビジネス教育学の修士号を取得しました。

どうして TADS 教師になろうと思ったのですか？

MARTA: ELL (English Language Learners) の生徒たちに、英語を学びながら STEM コースを受講する機会も提供したいと思ったからです。マウント・プレザント高校では、生徒の 30% が ELL クラスです。

「プロペラ推進」プロジェクトを選んだきっかけは何ですか？

DONN AND MARTA: DONN / MARTA: 3~4 週間コースの CTE/STEM 教材として「プロペラ推進」プロジェクトは、生徒たちがエンジニアリングの概念を探究できるように工夫されています。生徒たちは協力し合って、プロペラ動力ボートを設計し組み立てま



(左から右へ) Donn Chu 先生、Marta Hidalgo 先生、David Duke

「教材としてのシミュレーションは、暗記するだけで十分な "浅い学習" とは大きく異なり、生徒を "深い学習" へと引き込んで彼らの理解力を高めます。シミュレーションの効果は絶大です!」

— Donn Chu 先生

す。そして出来上がったボートをテストして、必要なら設計し直して、最後に他のチームと一緒にボートレースを行います。このプロジェクトは、我が校の基礎工学クラスの生徒にとって「Academy's Robotics on the Water (AROW)」競技会の準備に役立つでしょう (<https://providenceschools.wordpress.com/2015/03/19/participation-in-coast-guard-academys-robotics-on-the-water-competition-arow-more-than-doubles-in-its-2nd-year/>)。我が校の生徒は今年の競技会で 2 位だったのですが、この新しいカリキュラムによって、来年は 1 位を獲得できるものと期待しています。

このプロジェクトから何を学ぼうとしましたか？

DONN AND MARTA: DONN / MARTA: このプロジェクトは、工学的スキル、問題解決能力、そして、必須となる思考能力に重点を置いています。目標は、生徒に調査を行わせて、SOLIDWORKS の使い方を学ばせ、エンジニアリング・デザイン・プロセス (EDP) を理解させ、それを適用させて、工学問題に対し実行可能な解決策を生み出せるようにすることです。

生徒に最も身に付けて欲しいことは何ですか？

DONN: うまくいけば、彼らはエンジニアリングが感動を呼ぶものであることを理解し、STEM キャリアを検討するかもしれません。

MARTA: 私も、我が校の ELL 生徒の何人かは STEM キャリアに挑戦させたいと思っています。プロビデンスに住み続けようが、世界の別の場所を選ぼうが、それは彼らの人生に多大な影響を及ぼすことでしょう。

シミュレーションにはどのような価値があるとお考えですか？

DONN: 教室でシミュレーションを利用することの意義は、「話だけなら忘れてしまう。やって見せてくれれば思い出す。夢中にさせてくれれば理解できる」という中国の諺に凝縮されています。教材としてのシミュレーションは、暗記するだけで十分な「浅い学習」とは大きく異なり、生徒を「深い学習」へと引き込んで彼らの理解力を高めます。シミュレーションの効果は絶大です。



聞いてください!

補聴器メーカーの GN ReSound 社では、製品設計の改良と開発期間の短縮に SIMULIA のツールが役立っています

デンマークの GN Store Nord 社は音響処理分野の世界有数のメーカーです。Jabra ブランドのワイヤレスヘッドセット製品で知られる同社には、1869 年創業の電信会社に始まる、素晴らしい技術進歩の歴史があります。かつては Great Northern Telegraph Company という社名でしたが、その後、事業の多角化を進め、現在はいくつかの子会社を通じてさまざまな音響機器を販売しています。

その一社が GN ReSound 社であり、多種多様な補聴器とそのアクセサリを設計・製造しています。同社の使命は明快です。それは人々が「聞こえ」を再発見できるような解決策を絶えず生み出すことであり、それによって人々が豊かで活動的で充実した生活を送れるようにすることです。

こうした使命は非常に的を射たものと言えます。世界保健機関によれば、40 デシベル(dB)以上の音に対して感受性が低下した聴覚障害者は、世界の人口の 5 パーセント以上にも上ります。すなわち 3 億 6 千万もの人々が、静かな会話に参加することも、夜の優しい雨音を楽しむこともできないのです。そして、その約 10 分の 1 は子供です。

もちろん、ある程度の「普通の」難聴者はそれ以上に多くいます。その大部分は加齢が原因であり、75 才以上の約半数が経験します。他にも、頭部外傷、慢性耳感染症、特定の薬物、耳鳴り、職場でのストレスなど、すべてが難聴の原因となり得ます。しかし幸いなことに、これらの問題の多くは補聴器を使うことで簡単に解決できるのです。

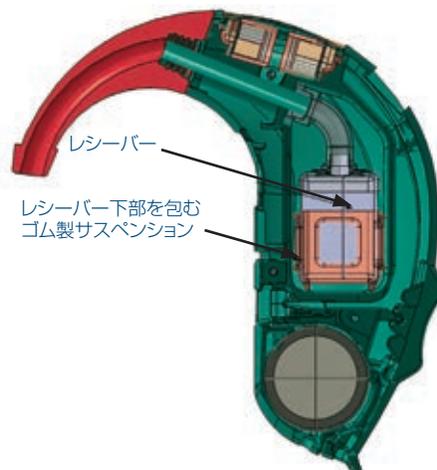


図 1. 補聴器の構造

GN ReSound 社は補聴器に先端技術を盛り込んでいます。かさばる箱と人目につくコードは、耳穴や耳裏にぴったり収まるスマートなデジタル機器に取って代わられました。そして、不格好なラップ型のアナログ集音器の時代から続いた補聴器の悪いイメージは完全に消え去りました。同様に音質も向上しており、ノイズ処理ソフトウェアが暗騒音をカットするとともに、より自然で明瞭な聞き取りを実現しています。GN ReSound 社はそのためのアプリも提供していて、同社の 2.4 GHz ワイヤレス型補聴器

は、ブルートゥース搭載のスマートフォンやアクセサリに接続することが可能です。一言で言えば、GN ReSound 社は人々の「聞こえ」を手助けする会社です。

シミュレーションの重要性

より小さく、より高性能な補聴器を設計することは、簡単な仕事ではありません。最新の電子機器を爪先ほどのパッケージに収めるには、高度なエンジニアリングと製造技術が必要です。また、たとえ最良の設計であっても、管理された実験室条件から外れると、うまくいかない場合があります。補聴器は、温度や湿度、振動、衝撃などの環境条件に影響されやすいのです。しかし、GN ReSound 社がダッソー・システムズのリアリスティック・シミュレーション・ブランドである SIMULIA の Abaqus 統合 FEA に目を向けたのは、こうした故障モードのテストだけが目的ではありませんでした。

GN ReSound 社の研究開発施設（デンマーク・バレルブ）で働く上級音響エンジニアの Morten Birkmose Sondergaard 氏は次のように説明しています。「最近の補聴器開発においては、製品化までの期間を短縮するとともに、デバイスごとの要件の達成率も上げていく必要があります。そのためには、開発プロセスの早い段階から、確実に性能を予測して、設計を改善できるようにすることがとても重要です」

GN ReSound 社のチームが研究開発施設で Abaqus を使い始めたのは 14 年以上も前のことです。それ以来、シミュレーションはすべての新製品開発プロジェクトで必須のタスクとなっています。Sondergaard 氏は「シミュレーションなしでは、私もチームも仕事にならない」と話しています。

「Abaqus がなかった頃、我々は製品試験に試行錯誤アプローチを使うしかありませんでした。今ではシミュレーションのおかげで、トラブルの可能性を迅速に把握して、設計の質やロバスト性を改善できるようになりました。その上、シミュレーションによってプロジェクトの前倒しが可能となり、早い段階から多くの知見を得ることで、実現しうる最良の出発点がもたらされます」

仮想空間で落としてみる

こうしたプロジェクトの 1 つでは、耳掛け型（BTE：Behind The Ear）補聴器を硬い地面に自由落下させたときのシミュレーションを実施する必要がありました。

高品質な音響再生のための精巧なメカニズムを内蔵したレシーバーは、補聴器を落としたときに壊れやすいのですが、これはバッテリー交換時などによくある事故です（図 2）。Sondergaard 氏によれば、

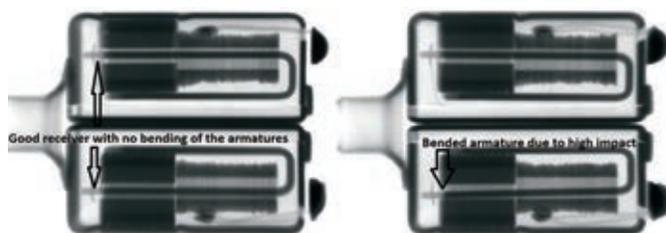


図 2. 補聴器レシーバーの X 線写真：損傷のない状態（左図）と電機子が曲がった状態（右図）

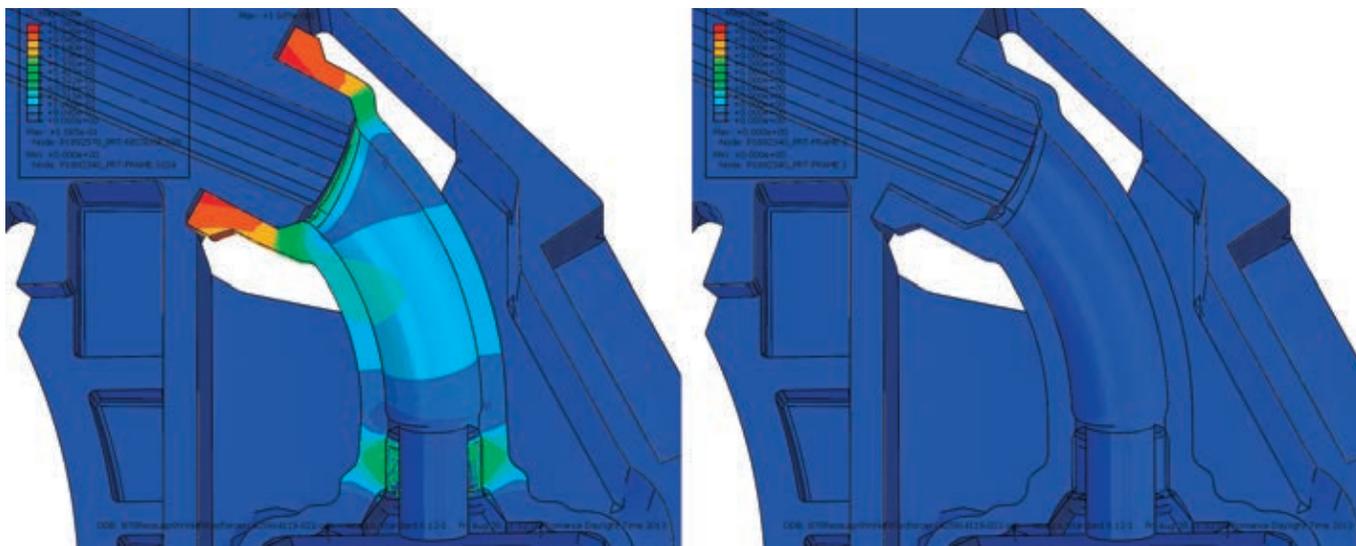
製品が小型化するにつれて、こうした事故の影響を把握することがますます重要となり、内部部品の設計段階で、ほとんどミスは許されなくなっています。

チームはこのテストを 2 つのシミュレーションに分割して実施しました。最初のシミュレーションでは、レシーバーを包むゴム製サスペンションをモデル化する必要がありました。このサスペンションは、レシーバーを振動から保護し、フィードバックを防止するためのものですが、落下に対する主な防護にもなっています。まず補聴器アセンブリの STEP ファイルが Abaqus/CAE にインポートされました。そして、各コンポーネントに材料特性とメッシュパラメータが割り当てられました。ゴム製サスペンションには、この材料の応力-ひずみ関係が、動的せん断係数と組み合わせて使用されました。次に Abaqus/Standard を用いて、サスペンションに「収縮嵌合」機能が適用されました。これによって、剛体としてのレシーバーにゴムを覆い被せた状態が模擬され、所定の位置に取り付けられたときのゴムの粘弾性挙動が評価されます（図 3）。

2 番目のシミュレーションでは、BTE 補聴器が地面に自由落下したときの最後の 2 ミリ秒間がモデル化されました。Abaqus/Explicit で補聴器モデルに速度条件を適用することにより、レシーバーが衝撃を受けたときの G 値を求めることができました。これが特定のレベルを超えると、内部の微小な電機子が曲がって、その伝送能力が損なわれます。チームは前もって最大許容値を 14,000 G と決定していましたが、Abaqus は、その速度条件でぶつかった場合、ピーク値が最大 15,000 G になると予測しました。この値はレシーバーの限界値を優に上回っています。

このような小さなデバイス内部の実際の G 値を測定することは不可能なので、衝撃時の高速ビデオ映像を用いてシミュレーション結果

図 3. ゴム製サスペンションの絞りばめ解析：変形状態のサスペンション（左図）と変形前のサスペンション（右図）



ケーススタディ



図 4. 高速ビデオ映像を用いた衝撃の記録：衝撃の 0.9 ミリ秒後（左）、衝撃の 0.1 ミリ秒後（中央）、衝撃の瞬間（右）。デバイス中央のレシーバーの動きに注目すること

との相関が調査されました（図 4）。多数の衝撃試験が実施され、落下力を模擬するために、振り子によって補聴器の各側面に繰り返し衝撃が加えられました。そしてケースごとに、物理的損傷度合いと Abaqus で計算された G 値との相関が検討され、モデルの妥当性が検証されました。

データに耳を傾ける

その結果、製品エンジニアは、このデータを用いてレシーバー周りの設計を見直すことができました。「最初のシミュレーションでも、衝撃時に内部パーツがどのように動き回るのかが確認できました。Abaqus は、問題に対する我々の理解を深め、それらの解決策について新たなアイデアを生み出すことに役立ちました」と Sondergaard 氏は話しています。衝撃時にサスペンションとその貴重な積載物が動き回るのを抑えるため、何種類かの小さなゴム製タブが追加され、最終的に一貫して 11,000 G まで低下した製品が得られました。

レシーバーの試験は、電機子の曲げを確認するための試験だけではありません。ここにわずかでも狂いがあると、高調波歪みが生じたり、レシーバーとすぐ隣のマイクロホンとの間でフィードバックループが生じたりするため、振動・音響試験も実施する必要があります。そこで、GN ReSound 社は SIMULIA の Tosca を使用して、ゴム部品の構造最適化を実施しました。その結果、最高の振動・音響安定性を実現した、理想的なトポロジーを見つけ出すことができました。

これまでの成果をもとに、チームは SIMULIA のツールを用いたシミュレーションの取り組みをさらに拡大できるだろうと期待しています。「プロセスの自動化と設計探索のための Isight も試しており、今後は Isight と Tosca を Abaqus と組み合わせでどんどん使っていくつもりです」と Sondergaard 氏は話しています。他にも、シミュレーションの将来計画としては、BTE モデルで剛体としていた部品の多くを弾塑性体に置き換えて、衝撃時の挙動をより正確にシミュレーションすることや、モデルの材料特性をより厳密に定義することなどが予定されています。

また、初期のテストでなされていたいくつかの仮定が正しかったかどうかとも検討する予定です。たとえば、サスペンションとレシーバー

「究極の目標は、顧客のために最高の製品を開発することです。SIMULIA のツールは、まさにそのことに役立っています」

— GN ReSound 社、
上級音響エンジニア Morten Birkmose Søndergaard 氏
Senior Acoustic Engineer, GN ReSound

の間は“結合拘束”条件になっていますが、これは両材料間の摩擦係数が分からないための代替手段として設定したものでした。さらに、試験デバイスに対する“打撃”は、どのシミュレーションでも全く同じ位置と方向で与えられていましたが、それは、実環境条件の因子の 1 つであるバラツキを排除していることになるため、今後の解析ではこのばらつきまで含める必要があります。

「シミュレーションは、我々の補聴器の複雑さにも十分対処可能であることを証明しました。そのため、我々はずっと大規模なモデルにも問題なく取り組めるものと確信しています。Abaqus や Tosca のようなツールのおかげで、間違いなく我々の革新性は向上しました。新たなモデルをより精密に構築するための時間も短縮され、さまざまな課題に対する理解と知識も深まっています」と Sondergaard 氏は話しています。

「適切なモデルを早く作れば作るほど、より多くの利益がプロジェクト全体にもたらされます。これはとても重要です。なぜなら我々が今開発している音響技術は、1～2年後の補聴器に利用されるからです。もちろん究極の目標は、顧客のために最高の製品を開発することです。SIMULIA のツールは、まさにそのことに役立っています」

詳細は以下をご覧ください
www.gn.com/About-GN/GN-ReSound

SIMULIA スポットライト: Frans Peeters

SIMULIA のヨーロッパ担当副社長である Frans Peeters が、この春ベルリンで開催された 2015 SCC の基調講演で引退を発表したとき、聴衆は総立ちになって彼に長い拍手を送りました。それは、Hibbitt, Karlsson & Sorensen (HKS) から ABAQUS そしてダッソー・システムズの SIMULIA へと成長した会社に 21 年間勤め上げた結果としての当然の名誉でした。

彼はプレゼンテーションを終えると、我々に彼のキャリアのハイライトと将来プランについて語ってくれました。

SCN: HKS に入社したきっかけは何ですか?

PEETERS: 私はある年代になって、改めて上質であることの価値を正しく理解しました。最初、私は David Hibbitt とともに別の会社で働いていたのですが、後に HKS に入社して彼と再会したとき、ふるさとに帰ったような気がしました。そして、この会社と社員が、市場に完全なるソリューションを提供しようと全力で取り組んでいることを知りました。彼らは、人々にその技術を活用してもらうだけでなく、それに基づく製品や手法の上質さも認めてもらおうとしていました。そういう意味では、私は David らを通じて、彼らが当初から自分たちを市場でどのように位置付けようとしていたか理解したのです。

SCN: これまでの SIMULIA の技術の進歩については、どのようにお考えですか?

PEETERS: 当初、この技術はいくらかの知見を定性的に得るために利用されていました。もちろんその頃はまだ、モデル規模やハードウェア、そして技術自体にも限界があって、良い予測が得られないこともたびたびでした。しかし 1990 年代頃、特定の業界のニーズに応える形で、具体的なワークフローの開発が始まりました。我々は完全かつ徹底したソリューションを提供しようと努めた結果、お客様から高い評価を得ることができました。

約 10 年前、我々はアセンブリ解析に進出しましたが、そのとき私は目を見張りました。自動車や飛行機のような非常に複雑な構造であっても、我々は高い予測性をもって、最先端の非線形解析を実行することができたのです。それは我々が 20 年前に見たものとは大違いました。ついに、この技術を用いて実際の挙動を予測できるレベルにまで到達したのです。これは特に、実物試験が不可能で、仮想試験に頼らざるを得ないケースで貴重です。

SCN: SCC の意義について、少しお聞かせください。

PEETERS: 我々のソフトウェアが発展するにつれて、この技術を開発していくには、ユーザーの皆様と会って知識を共有することが非常に重要であるとすぐに気付きました。HKS が英国・オックスフォードで最初の Abaqus ユーザーカンファレンスを開催したのは 1988 年です。私は 1994 年に HKS に入社して以来、ヨーロッパと米国で交互に開催されたワールドワイド・カンファレンスのすべてに出席してきました。当時は、私自身がそのいくつかを企画して、ホテルを手配したり、舞台裏のすべての作業をこなしたりしたものです。

現在、SCC は大規模な専門家向けイベントとして大成功を収めています。しかし、我々は常にこれまでの原則に従って、ユーザーの皆



様に新機能に関する最新情報を提供するとともに、彼らが我が社の技術からどのようなメリットを引き出して、どのような成功を取めたかを披露してもらう場としなければいけません。

SCN: ところで、今後どうされる予定ですか?

PEETERS: 私はちょっと働き過ぎていたので、妻と一緒にゆっくり旅行したいと思います。また、何人かの可愛い孫にも恵まれたので、今は彼女らと一緒に過ごしながらか成長を見守ることも大きな楽しみです。

SCN: お孫さんには、エンジニアになるよう勧めますか?

PEETERS: どうでしょうね。私の子供は 2 人ともエンジニアですが、妻は冗談で「家には 3 人もエンジニアがいるのに、私は今も自分で自転車を直さなきゃいけないのよ!」と言っています。もちろん、エンジニアリングには何も悪いところはありません!

私はこの分野で仕事できたこと、そして、私を常に支えてくれた業界の皆様のお役に立てたことをとても誇りに思います。また、大勢の興味深い方々と交流できたことや、技術の進歩に貢献できたことを非常にうれしく感じています。

Frans Peeters (後列中央)



スモールオーバーラップ前面衝突シミュレーションにおける タイヤバーストのモデリング

スモールオーバーラップ前面衝突では、車両の外縁が主な荷重伝達経路となります。しかしながら、この部分はクラッシュゾーンで十分に保護されていません。ほとんどの場合、タイヤとホイールだけでなくサスペンション装置も衝撃力にさらされます。リジッドバリアに衝突したタイヤは、通常、タイヤとホイールが破断してバーストする場合と、ビード外れによってその気密が失われてバーストする場合があります。タイヤバーストはサスペンション装置の運動や変形に影響を与え、結果として車両の衝突安全性にも影響を与えます。

タイヤバーストによって生じるタイヤ圧の低下を考慮することは、車両衝突時の応答を正確に予測する上で重要です。したがって、材料の破断が原因で引き起こされるタイヤバーストと、タイヤとリム間の嵌合性の喪失によるビード外れが原因で引き起こされるタイヤバーストを正しくモデリングすることが、スモールオーバーラップ衝突を再現する上で鍵となります。本記事では、衝突シミュレーションでタイヤバーストを考慮するための Abaqus によるタイヤの有限要素モデリングについて紹介します。

タイヤのモデリング

最初のステップでは、二次元軸対称タイヤ膨張解析用のモデルを作成します。これには、軸対称ソリッド要素を用いたタイヤのトレッド部およびサイドウォール部のモデリング、軸対称表面要素の埋め込みによるタイヤのベルトおよびカーカスのモデリング、そして軸対称シェル要素を用いたホイールのモデリングが含まれます。

次のステップでは、膨張解析の終了後に、二次元モデルを 360 度回転することによって、回転対称形状の三次元タイヤモデルを作成します。Abaqus/Standard において *SYMMETRIC MODEL GENERATION オプションの“FILE NAME”パラメータを用いると、ファイル（拡張子 .axi）に三次元モデルが作成されます。このファイルには、節点、要素、および断面定義が含まれています。

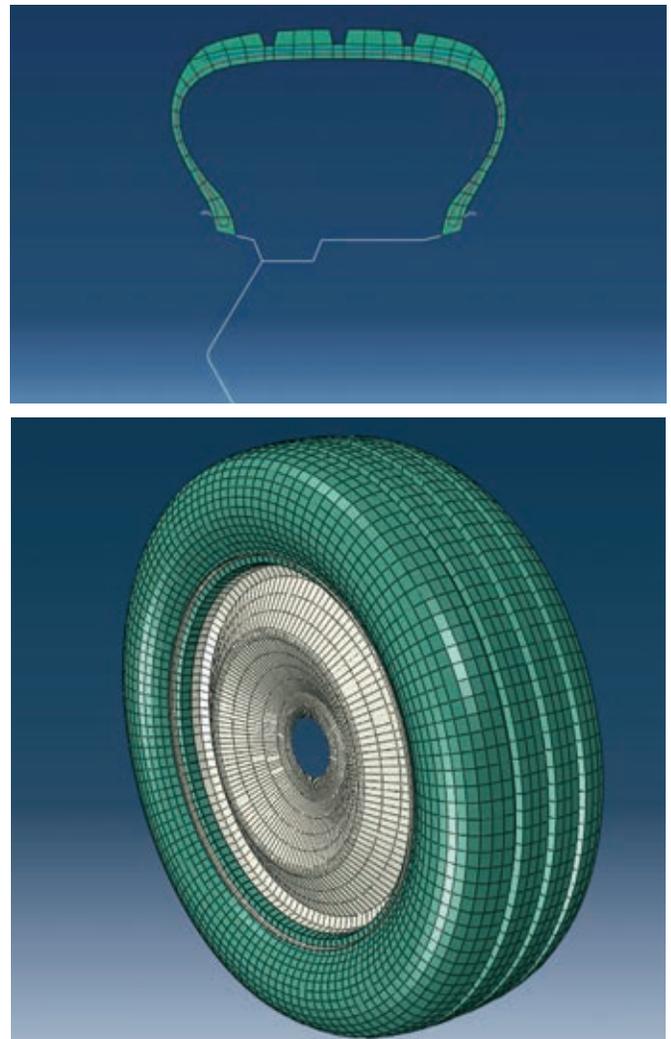
タイヤバーストのモデリング

タイヤバーストを再現する上で重要なのは、タイヤとホイールリムの材料損傷破壊と、ビード外れの 2 つの破壊メカニズムのモデリングです。したがって、三次元タイヤモデルに次のような修正を加える必要があります。タイヤのサイドウォール部とホイールリムは、ビード外れを考慮できるように、分離可能な 2 つの独立した領域としてモデル化する必要があります。スチール製のビードは、推奨のタイヤ圧で膨張させたときも、タイヤが原形を保持するだけの抵抗力や摩擦力を維持するようにモデル化する必要があります。今回は、3D はり要素を用いてビードをモデル化しました。タイヤのトレッド部とサイドウォール部の材料特性については、衝突時のゴム材料の損傷破壊を表現できるものでなければなりません。それによって、タイヤに裂け目が生じ、タイヤから空気が漏れ出てバーストできるようになります。衝撃角度や衝撃速度などの条件に依存して、どちらかの破壊メカニズムがタイヤバーストを誘発します。これらの破壊メカニズム（材料の損傷破壊およびビード外れ）のどちらが先に発生しても、それに続いてタイヤがバーストし、タイヤ圧が急低下

して、サスペンション装置に対する支持が失われます。

タイヤの内圧をモデル化するためには、Abaqus の流体空洞機能が用いられます。タイヤとリムの内側を覆う表面要素によって閉じた領域を定義します。このとき、表面要素はタイヤおよびリムの内面と節点を共有するように作成します。タイヤ圧は、この閉じた領域の体積に関連付けられます。材料の破壊をモデル化するため、トレッド部とサイドウォール部のゴム材料に対して、超弾性材料を損傷条件と組み合わせて使用します。材料が損傷して要素が削除されると、ゴム材料の内側の面に定義されていた表面要素は、圧力差によってタイヤの外側へ押し出されます。そして流体空洞の体積が急激に膨張し、それに伴ってタイヤ圧が低下します。ビード外れを考慮するには、タイヤとリムが接触している領域（図 2 に赤色で示す領域）を、次のようにモデル化する必要があります。リム上にある表面要素のリング部（一端がタイヤのサイドウォールとつながっている部分）を細かくリメッシュします（図では 3 分割）。これによって流体空洞の閉じた領域上に 2 列のフリーな節点（図中の浮いた 2 節点を含む

図 1. タイヤのモデリング



2列のリング)が作成されます。そして剛性が無視できる程度の材料特性を持ったシェル要素のリングを両サイド 2 つ追加して、表面要素の 2 つのリングとそれぞれ節点を共有させます。タイヤとリムが分離しないときは、フリー節点が所定位置を維持するように、シェル要素とリムの両リング間に接触を定義します。より適切な接触条件にするため、フリー節点をオフセットさせて、リムと同じ位置になるのを避けます。ビード外れが生じると、フリー節点はその隙間を通り抜けることができます。その結果、体積が増大して、タイヤ圧を低下させます。このモデリングの概要が図 2 に示されています。赤いラインは、シェル要素が重ねられた表面要素を表しており、タイヤとリム間の隙間を閉じることで、流体空洞の閉じた領域を定義しています。

シミュレーション結果

縦衝撃、横衝撃、および 45 度衝撃の 3 種類のシミュレーションが実施されました。縦衝撃では、インパクトがタイヤのトレッド部に接触したとき、同時にリムとタイヤトレッドが接触した場所でゴム材料が損傷しました。その結果、急激に圧力が低下してタイヤがバーストします。横衝撃では、インパクトがタイヤのサイドウォール部に接触したとき、サイドウォール部がリムから分離します。その結果、急激に圧力が低下してタイヤがバーストします。45 度衝撃では、材料の損傷とビード外れの両方が生じて、タイヤを減圧させます。

図 2. タイヤバーストのモデリング

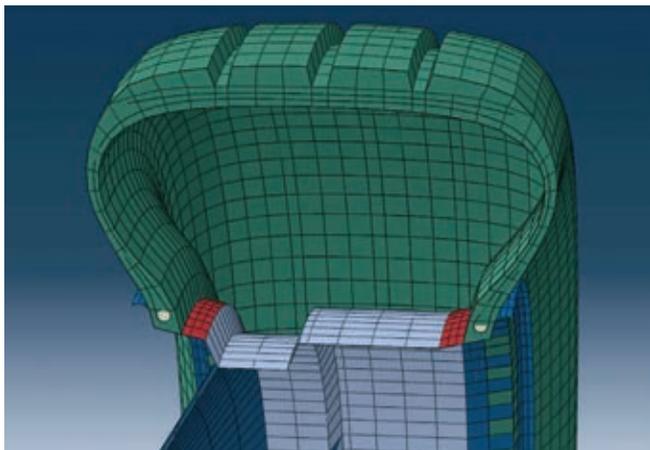
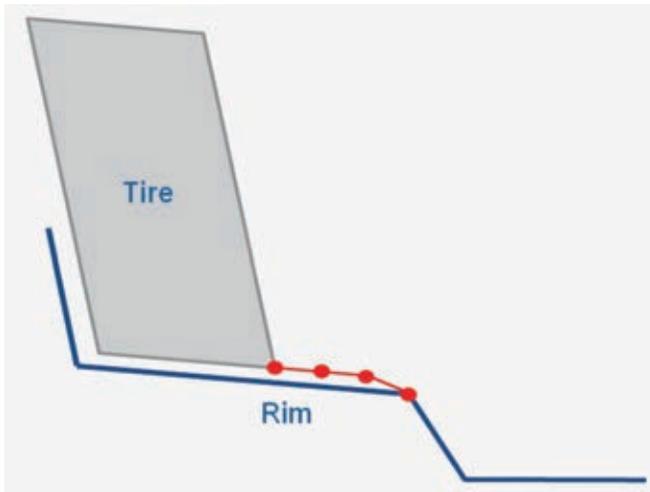


図 3. シミュレーション結果

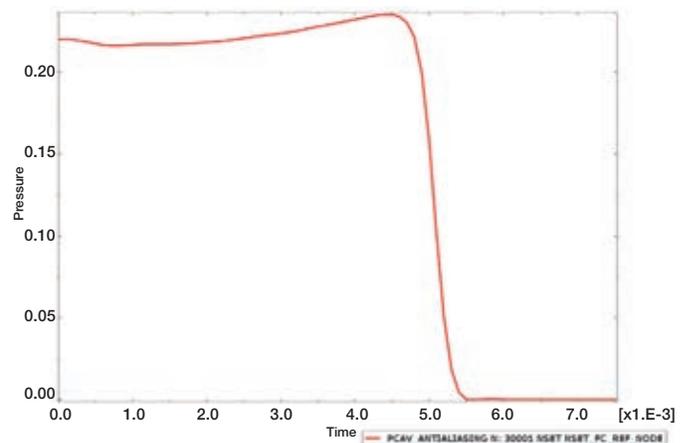
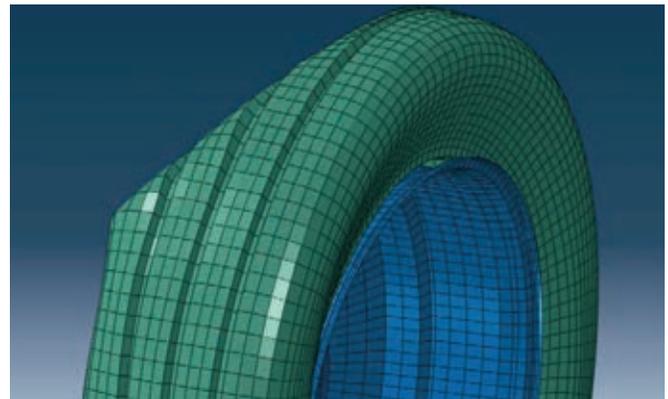
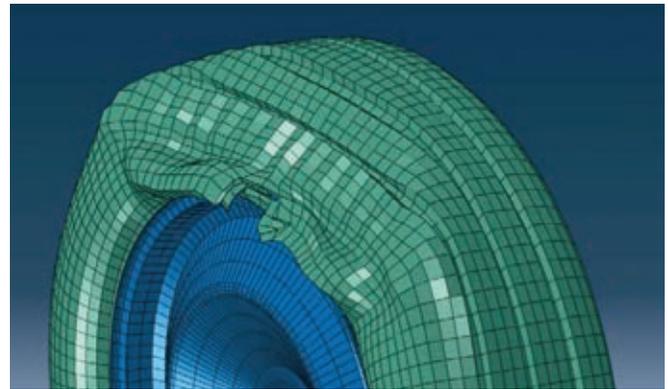


図 3 は 45 度衝撃のシミュレーション結果を示しています。約 4 ミリ秒の時点でまず材料が損傷を受けた後、約 4.5 ミリ秒の時点で反対側のビードが外れます。反対側では、衝撃によってリムがタイヤのサイドウォールよりも速く移動するためです。シミュレーションから、流体空洞の圧力曲線が得られます。それによると材料が損傷した後も圧力は上昇を続けています。これは、空気の漏れる速度が、衝撃による圧力上昇よりもまだ低いからです。しかしその 0.5 ミリ秒後には、圧力が低下し始めます。そして約 5.5 ミリ秒の時点で、完全にタイヤの空気が抜けます。バーストの過程は、最初に材料の損傷が観察されてから圧力がゼロになるまでの、トータル 1.5 ミリ秒間です。

詳細は以下をご覧ください
www.3ds.com/simulia

SIMULIA の専門家による トレーニングをお役立てください!



SIMULIA のローカルオフィスでは、定期的にトレーニングコースを開催しています。基本の紹介コース（たとえば「Isight の紹介」）から、特定の解析テーマや応用問題をカバーした上級コース（たとえば「Abaqus/Explicit - 応用トピック」）まで、さまざまなコースがあります。

1 日間の実習が含まれているコースもあります。オンラインによるトレーニングも用意されています。また、オンサイト・トレーニングの開催も可能です。皆様が特に興味のあるテーマに合わせてカスタマイズいたします。詳細については、お近くの SIMULIA ローカルオフィスにお問い合わせください。

詳しくは **visit www.3ds.com/simulia-training** をご覧ください。