

# CFDをKATANAの精神でさらなる高みへ

日本から最先端の数値流体力学を解き放つ

芝原真, Jonas Wirgart, 入江智洋, Keith Hanna



# 読者の皆様へ

自然界において流体は、構造・音響・機構・磁力・電気など、万物と調和のとれた動きをします。その無数の動きは複雑に入り組んでいて、お互いに影響しあいます。数値流体力学（CFD）とはこれらの現象を数値近似で表現しようとするもので、境界条件や化学的・生物学的反応、流体と固体の相変化や混相流、また特に乱流と移動物体に関連した非定常現象を、非常に単純化した経験的モデルで近似します。そのような単純化したモデルでの近似でありながら、CFDは固有の技術的メリットや数々のビジネス上のメリットをもたらします。技術的なメリットとしては、製品の挙動を予測でき製品検証と妥当性確認に役立ちます。ビジネス上のメリットには、コスト削減・正しい初期設計・生産性の向上・無駄の排除・製品リコールの最少化・市場投入時間の削減、などが挙げられます。

商用コンピュータ援用エンジニアリング（CAE）業界は、およそ50年の歴史があり非常に成熟していますが、マルチフィジックスシミュレーションを複雑な工業用途、中でも流体の流れや輸送に関連する現象に応用するという大きな課題に現在も取り組み続けています。またCFDは過去40年かけて、メインフレームコンピュータで動くシンプルなモデルから、CAD・PLM・クラウドといった技術革命に対応すべく進化を遂げてきました。ソフトウェアクレイドルは1984年に最初の製品を発売しました。最も早くCFD製品を世に出した企業として名を連ねていますが、そのうち日本企業はソフトウェアクレイドル社です。

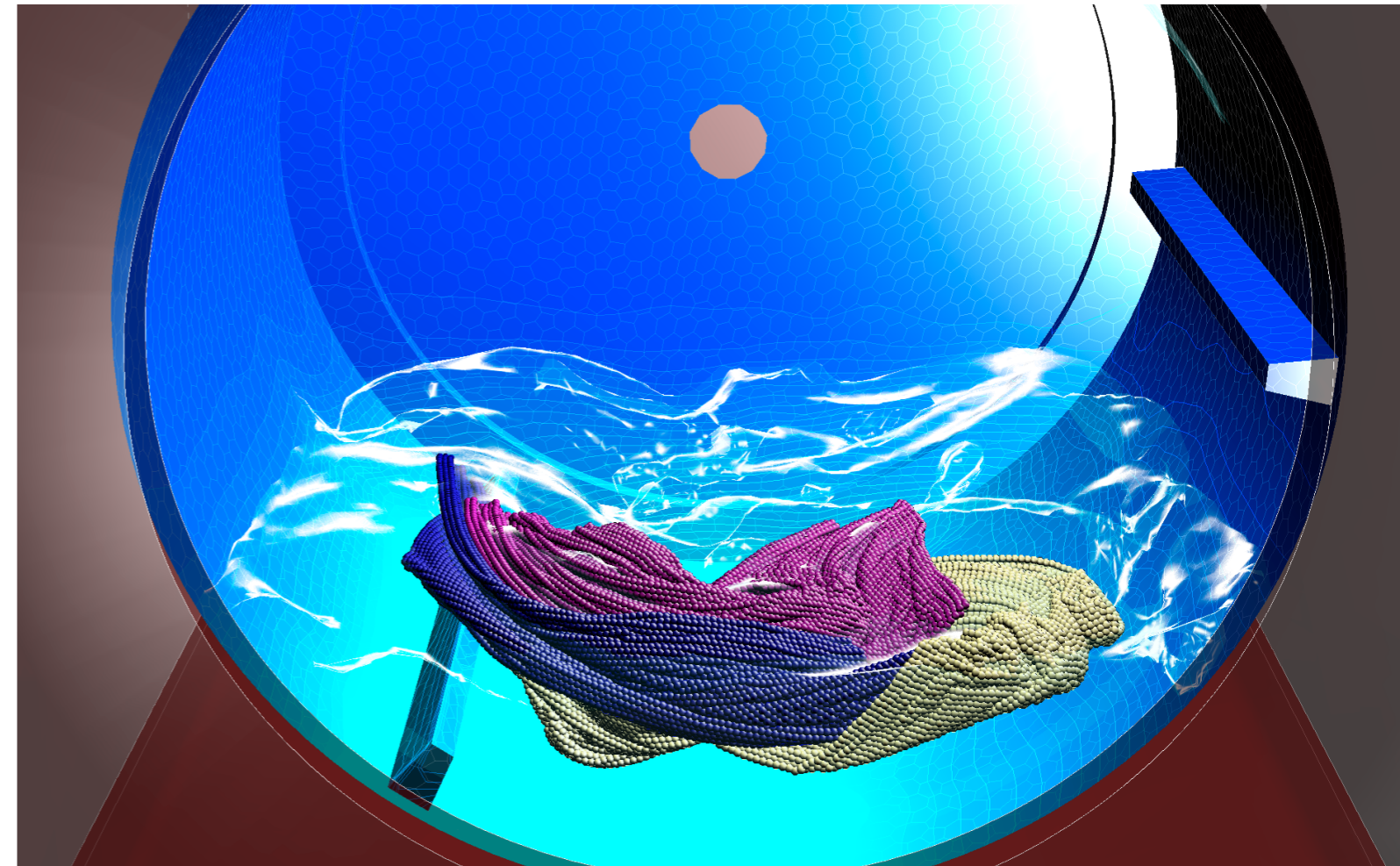
Hexagon | MSC SoftwareのCradle CFDソリューションは、総合品質・総合性能という日本の哲学を礎に、侍の刀の精神で開発されています。言葉を換えると、マルチフィジックスに主眼を置いた非常に専門性の高い高速でロバストかつ高精度なCFDソリューションを、卓越した使いやすさと共に提供することが我々のミッションです。ソフトウェアクレイドルの開発プロセスは、ユーザー主体かつ実用本位であり、チェックボックスに✓をつける目的の見掛け倒しの機能は入れません。我々の開発する機能の特徴づけるはその性能と品質のみです。ゆえにソフトウェアクレイドルは、解析者が求めるレベルの精度に加えて設計者が求めるレベルのユーザー体験を可能とするCFDソフトウェアを生み出しています。Cradle CFDツールは、まるで刀のように鋭く堅牢で、速く軽く動かすことができます。我々は、Cradle CFD製品の信頼性が高く、細かい設定なしですぐに使えるためエンジニアの作業効率向上に貢献することを誇りに思っています。ソフトウェアクレイドルのこの理念と各社の製品開発プロセスにスムーズに対応するCFD製品は、多くの一流企業から長年に渡って支持されています。

ソフトウェアクレイドルが提供する独自のCFD製品群は、クエット流れから超音速衝撃に至るまで様々な流れや現象を網羅し、航空宇宙や自動車から造船・電気と様々な業界・分野で活用されています。長年に渡り高品質なCFDツールを生み出し続けているソフトウェアクレイドルは、主力製品であるCradle CFDとMSC CoSim製品を柱としてマルチフィジックスに主眼を置いたCFDソリューションをユーザーの皆様にお届けするという戦略をとってきました。この2つの製品はCFD業界において最新の機能を備えています。Cradle CFD製品はより優れた後処理や結果の照会機能を備え、設計空間の最適化やバーチャルリアリティなどを網羅しています。MSCOneのトークンシステムを使えばクラス最高の製品とのCo-Simulation（連成解析）を簡単に行うことができ、CAEの民主化をもたらします。

ソフトウェアクレイドルは、MSC Softwareの急速に成長拡大するマルチフィジックスソフトウェア製品群とHexagonの製造業に対する長期的な取り組みに支えられ、高度なCFD機能と各種CAEソリューションとの統合を通じて世界中で不可能と言われるような複雑なCFD解析に取り組んでいます。HexagonとHexagonが提唱するSmart Manufacturingというコンセプトにより、Cradle CFDソリューションが提供する設計の「デジタルツイン」が生産および製品寿命の「デジタルツイン」とつながることが可能になります。その結果、バーチャルとリアルの実用データをつなぎ、オープンで顧客中心の製品を通じてすべてのお客様にメリットを享受いただけます。

# Table of contents

CFDの歴史 .....	4
日本の産業の歴史と総合的品質重視の生産理念 .....	6
KATANAと加速するCFDシミュレーション技術 .....	7
CFDに応用するKATANAの四原則 .....	7
KATANA：高精度なCFD .....	8
KATANA：高速なCFD.....	10
KATANA：エンジニアが使いやすいCFD.....	11
KATANA：マルチフィジックス現象に主眼を置いたCFD .....	14
設計開発段階のCFDシミュレーションでスマートマニュファクチャリングを実現 .....	17
まとめ.....	21
参考文献.....	23



## CFDの歴史

流体は我々の周囲に常に存在している。空気に、海に、そして地面に。我々の中にも存在し、外側の空間、別の惑星にまで広がっていく。流体は有史時代の夜明けの瞬間か、おそらくそのずっと前から人類を魅了してきた。流れる水の魔法や刻々と変化する気象配置が地球上の種としての人類の進歩に影響を与えてきたように。流体の効果について知見を得た最初の文明は、その灌漑システムや船体・帆の設計から古代エジプトであると考えられている。紀元前6世紀、古代ギリシアの時代にエフェソスで活動していたヘラクレイトスのようなソクラテス以前の哲学者は、現代の科学的な意味で正確に理解したわけではないものの、「万物流転」を提唱したと言われている。ローマ帝国ではとりわけ、水力や流体力の日常への利用を推進し水工学の基礎的な理解を得ていたことが、あの素晴らしい公衆浴場や下水管、何百キロにも及ぶ大規模なローマ水道から窺い知れる。そしてもちろん古代中国やインドでもそれぞれに技術者がこれらの分野について熟達していた。しかし、古の知識がヨーロッパやイタリアルネッサンスに広がり流体や流れに関する研究が再び脚光を浴びたのは、イスラムの学者が保管していた古代の写本を広めた中世に入ってからであった。偉大な芸術家であり技術者でもあったレオナルド・ダ・ヴィンチが、水・空気・血液の流れを研究していたこともわかっている<sup>(1,2)</sup>。

実際に現代数学で流体の流れや熱・質量移動の基本物理方程式が確立されたのは19世紀初頭で、フランスの数学者アンリ・ナビエとわずかに遅れてアイルランドの研究者ジョージ・ストークスが自然界における圧力・流れ・熱の影響を方程式で表してみせた(図1)。現在ナビエ・ストークス方程式と呼ばれるこの複雑な非線形結合微分方程式は全ての流体の流れを表現するものだが、歴史的に100年以上もの間、この方程式を数値で解くのは非常に困難だと示されてきた。我々がこの方程式を数値的に解けるようになったのはこの50年間で開発されてきたデジタルコンピュータのおかげである。コンピュータの発達により数値流体力学(CFD)と呼ばれる現代科学の一分野が切り拓かれてきた。

アンリ・ナビエとジョージ・ストークスの理論的研究に続き、1880年代に英国の技術者オズボーン・レイノルズが流体の流れを調査する実験を行い、科学体系に重要な発見をもたらした。この実験により層流と乱流の性質について示唆に富む演繹的結論が得られた。20世紀初旬に入るとセオドア・フォン・カルマンとジェフリー・テイラーが乱流について考察を深め、続いてドイツのルートヴィヒ・プラントルが乱流現象を表現する数式を発展させた。1920年代には英国の数学者ルイス・フライ・リチャードソンが、大気空間を区分けすれば天気を予測でき、大きな劇場のような空間に大人数を集めて「指揮者」の指示で旗を上げ下げして合図を送りあいながら手分けして計算を行えば方程式を数値的に解ける、と仮定した。これは実際のところCPUの原型の構想であった。彼は単純な構造の計算機を用いてヨーロッパを対象に天気予測の計算を約6ヶ月かけて行ったが、誤った結果が出た<sup>(3)</sup>。計算には失敗したが、リチャードソンの構想はよいところまでいっており、その後1933年にアレクサンダー・トム

が円柱を通過する流れの計算について初めて発表した。第二次世界大戦後、日本の川口光年がメッシュ上における計算を完成させ、レイノルズ数40で円柱を通過する層流の2次元CFDシミュレーションを初めて発表した<sup>(1)</sup>。

1960年代には米国ニューメキシコ州ロスアラモスのフランシス・ハーロウ率いる研究グループが、CFDにおける数値要素を取りまとめた。例えば、セル内の粒子、ALE法、渦度・流れ関数法など、現在ではおなじみのものばかりである。しかしこのとき、のちに商用CFDの「父」と呼ばれる英国ロンドンインペリアルカレッジのブライアン・スポルディングが頭角を現し始めた。10年以上に渡り草分け的な研究を行ってきたスポルディングとインペリアルカレッジの学生は、ブライアン・ローンダー、デイビッド・タッチェル、デイビッド・ゴスマン、アクシャイ・ランチャル、スハス・パタンカーら協同研究者と共に有限体積法をベースとしたCFD

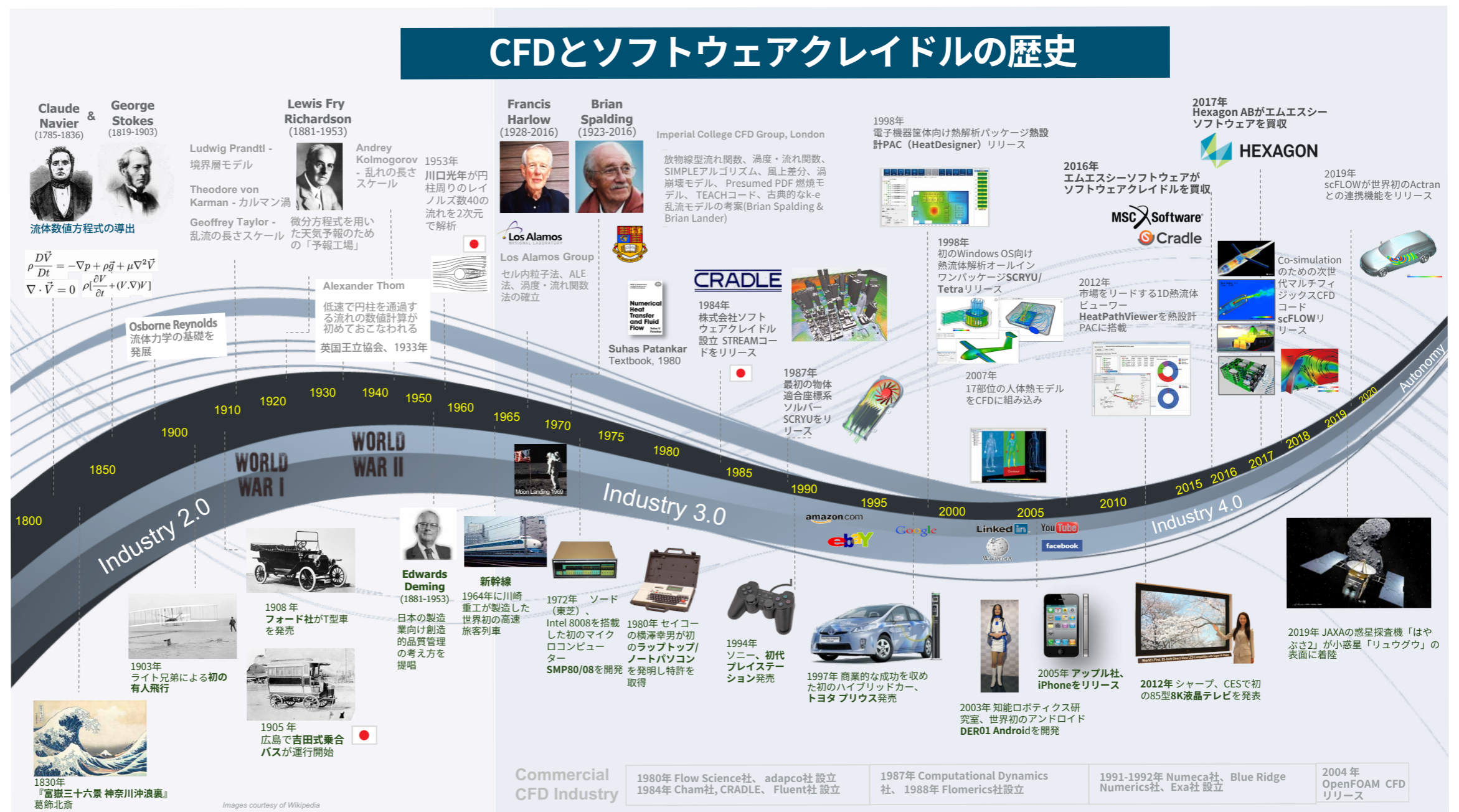


図1：CFDとソフトウェアクレイドルの歴史

メソッドを確立した。その過程で、放物線で示される速度分布の式や、渦度流れ関数法、SIMPLE法アルゴリズム、風上差分法、渦崩壊モデル、確率密度関数の燃焼モデル、TEACHコード、古典的な二方程式k-ε乱流モデルの様々な形態を生み出し都度イノベーションを起こしたが、それらのモデルやアルゴリズムは50年後の今日でも商用CFDの世界で現役である。実際のところ、1980年にパタンカーの有名著作「Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (邦題：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析)」<sup>(4)</sup>が出版されると、Fortranで書かれた数多くのCFDコードが1980年を通して生まれた<sup>(5)</sup>。読者の皆さんも、本書内の方程式を使って独自の直交座標系CFDコードを書けるのではないだろうか。そして、ここで大阪の小さなコンサルティング会社のエンジニアが登場する。加納利彦は1984年に(株)ソフトウェアクレイドルで有限体積法のCFDコードを開発しSTREAM(現在の製品名はscSTREAM)と名付けた。STREAMは日本の産業ニーズに応える商業CFDソリューションとして日本のエンジニアが開発を続けてきた。ソフトウェアクレイドルは、1980年代にCFD製品を最初に世に出した企業としてCHAM、Flow Science、Fluent、adapco等と肩を並べている(図1)。長年に渡り駒田・中西の両名が率いてきたソフトウェアクレイドルは他の商用CFD企業と同様に、直交座標系で階段状に表現するSTREAMとは対照的な物体適合座標系を使用したSCRYU(現在の製品名はSCRYU/Tetra)を1980年代後半に、続いて1998年に電子機器筐体・放熱部品の熱解析に特化したパッケージの熱設計PACを発売した。またソフトウェアクレイドルはHVAC(暖房・換気・空調)および構築環境分野における専門知識を確立し、2007年に世界で初めて温熱環境人体熱モデルをCFDコードに組み込んだ。これは人体を17の部位に区分けして表現することで快適性の指標を正確に記録しようとするもので、この人体熱モデルにより温熱環境快適性に関連する分野へのCFDの貢献度を強固なものとした。scSTREAMに含まれるHeatPathViewという特許を取得

したアプリケーションが2012年にリリースされたが、直感的に操作でき非常に使い勝手がよいもので、電子放熱部品分野におけるクレイドル製品に対する評価をより高めることとなり、今日でもCFDユーザーから厚い信頼が寄せられている。

2016年にソフトウェアクレイドルは、世界で最も古くからあるCAE（コンピュータ援用エンジニアリング）企業で米国に拠点を置くMSC Softwareの買収を受け入れグループ企業となったが、その6か月後に今度はMSC SoftwareがHexagon ABの一員となった。Hexagon ABはセンサー・ハードウェア・ソフトウェア・自律ソリューション分野で世界をリードする企業である（図1）。同2016年にソフトウェアクレイドルはscFLOWという新製品をリリースした。世界最先端で機能・精度ともに最高レベルでありながら使い勝手に優れたscFLOWは、Co-Simulationとマルチフィジックス連成解析に主眼を置いて開発されている。

MSC Softwareの一員となったことでCradle CFD製品は世界最高クラスの構造・音響・機構解析製品との連成解析が可能となった。実際に2019年には、クレイドルのFVM（有限体積法）ソルバーであるscFLOWのインターフェイスとFEA（有限要素解析）ソルバーのActran（ベルギーのFFT製品）がシームレスに統合した際に、世界で初めて連成空力音響解析機能が組み込まれた。これにより、ユーザーは複数のツールを使用せずに空力音響の絡む複雑なCFD現象を解くことが可能となった。

# 日本製 MADE IN JAPAN

## 日本の産業の歴史と総合的品質重視の生産理念

19世紀後半まで、日本は鎖国していた。しかし一旦鎖国を解き世界の商取引に目を向けると産業化に向けた動きは速く、20世紀初頭（図1）には、ヘンリー・フォードが米国デトロイトに工場を設立してT型フォードを発売するより前に吉田信太郎が純国産初のガソリン車を完成させた。第一次世界大戦後、日本は自動車産業のみならず重工業にも力を入れたが、第二次世界大戦では日本は壊滅的な敗北を喫し産業基盤を実質的に失った。製造機械は破壊され、エンジニアが生産ラインを動かすにも原材料は乏しく、その結果戦後の経済不況を引き起こした。しかし米国人研究者のエドワーズ・デミング教授が来日し、当時米国ではあまり普及していなかった彼の「総合的品質」哲学を工場運営に全面的に取り入れるよう製造業に奨励した。その結果、日本は20年かけてゆっくりと産業基盤を強化し、世界一の産業国の座を争うまでに成長した。自動車・製造・造船・製鋼・家電製品の分野においては1960年代から1970年代にかけて世界の賞賛的となった。日本の製造業は長年に渡って世界一の製品を生み出してきた。新幹線、数々の革新的な電子製品、ハイブリッド電気自動車、最先端のロボットやハイビジョンテレビなどが代表的な例である（図1）。

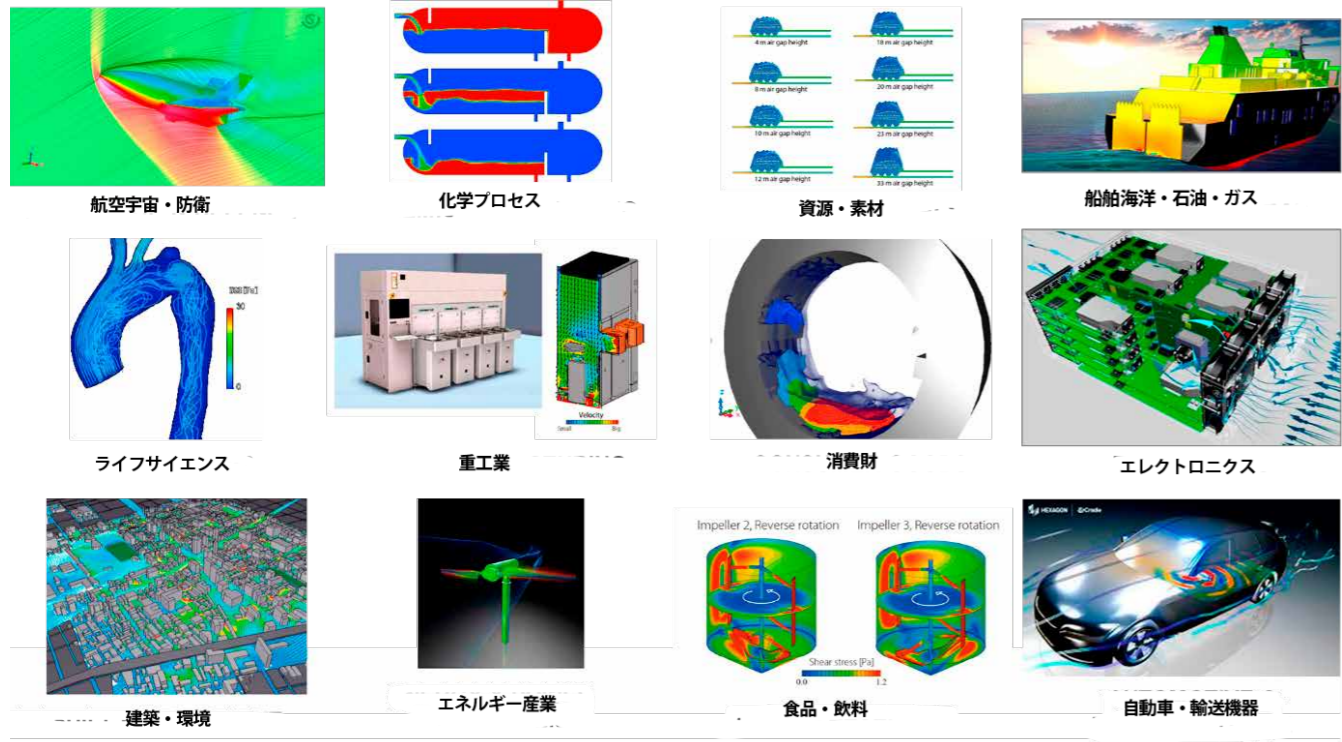


図2: 様々な産業分野におけるCradle CFD製品を使用したシミュレーション例

過去75年に渡る日本のモノづくりの変革は、日本製品の特徴とされる高い品質基準を伴っており、そのことが世界中で売れる製品の生産を可能にしてきた。

日本の産業界は有名な「ジャストインタイム生産システム」という用語を生み出したが、これが1960年代に日本の産業を世界トップクラスに押し上げた要因である。実際に、日本語のカイゼン（改善）は総合的品質重視のモノづくりを表す言葉であり、この語自体が日本の自動車部品生産ラインにおける品質管理と同義となっている。カイゼンは「変化」を意味する「改」と「良い」を意味する「善」の組み合わせで成り立っており、文字通り現状の製造工程における性能品質のたゆまぬ向上を意味する。この考えは1960年代の日本の工場に西欧・北米の同等の工場と比較して2倍の生産性をもたらし、無駄は最低限に抑えながら高品質製品の生産を可能にした。カイゼンの考え方は製造業のみならず、小売り・輸送・教育に至るまで多くのサービス産業にも採用されている。カイゼンの文化的な意味合いを「理解」するのは困難だが、日本ではカイゼンなき企業や製品はまるで味噌汁が付いていないご飯のようなもので、カイゼンあってこそ企業や製品が繁栄するのである<sup>(6)</sup>。トヨタ・三菱・日産などの自動車メーカーやソニーや日立といった電機大手からは、いかに経済の企業部門がカイゼンを取り入れることに成功したかが見て取れる。トヨタではカイゼンを、製造部門だけでなく本社における「継続的な進歩・改良」または「小さな進歩の積み重ね」と定義している。カイゼンとは、何か不具合が起こった際は仕事をストップし、上長とともに不具合を解消・改良するための提案を行うことが全社員に求められることを意味する。

日本の「ジャストインタイム生産システム」の概念は1980年代に西洋のアカデミズムにおいて「Lean Manufacturing」と再命名され、欧州と米国の産業界に広く受け入れられた。製造業はその後20世紀後半に自動化に向けて歩みを進め（いわゆるインダストリー3.0）、21世紀の現在は自律化にシフトしようとしている（インダストリー4.0の登場）。

## KATANAと加速するCFDシミュレーション技術

50年前に出現して以来、数値流体力学（CFD）は、その予測技術特性により高効率・高性能な製品開発の最前線に立ち製品開発工程に貢献してきた。これは世界中で繰り返し見られる光景で、CFDは研究開発設計工程にしっかり寄り添い、より高性能で革新的な製品をより少ない試作回数（時には試作ゼロ）で生産することを可能にしてきた。それにより、材料の無駄・廃棄率・エネルギー使用量・リコール・保証問題も削減することができた。端的に言うと、CFDは今日CFDを取り入れているありとあらゆる産業分野で「最初から正しく」「目的に合った」製品設計に役立っているのである（図2）。

世界中で、CFDは通常どんな製品設計および製造工程においても「フロントローディング」ができ、工程の同時進行が可能である。そのため、エンジニアリングシミュレーションツールのROI（投資利益率）が最大となる初期の概念設計段階で、望ましくない性能の機能を選択して設計したり、環境の悪影響を回避

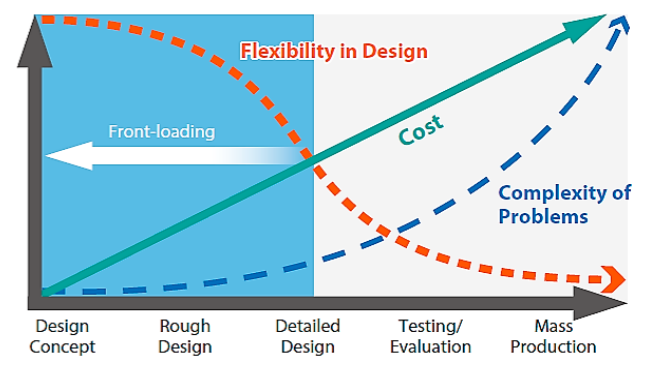


図3: あらゆる製造工程におけるCFDによるフロントローディングの効果

したりすることが可能となる（図3）。そしてCFDは試作レス製品やその製造工程を概念化し、仮想テストを行うことも可能である。すなわちCFDは、人や環境に危害を与えることなくwhat if シナリオ（起こり得る事態）を安全に検証できる非常に費用対効果の高い方法である。また、ハイテク製品の概念設計もCFD単体およびマルチフィジックスCFDシミュレーションを活用してPLM（製品ライフサイクル管理）ソフトウェアの中で行うことができる。

ここで、巨大な風洞施設を想像していただきたい。そこでの実験測定結果と同等の空力特性が風洞施設まで出向く必要なく自身のコンピュータで予測できると言えば、CFDシミュレーションの実力をわかっていただけることだろう。実際にCFDではこれまでの風洞実験で得られたよりも多くの診断データを得ており、これまで多大な費用と時間をかけた実験で得てきた抗力・揚力・ピッチングなどのデータもはるかに低コストで予測可能となった。今日ではCFDの速度は使用コンピュータに比例し、またクラウドコンピューティングの増加に伴い多くのCFD「実験」はオンラインで実行可能となっており、かつてないほどの速さで結果を得ることができる。また多くの事例が示す通り、シミュレーションで予測結果を得るまでの時間は製品開発工程上の現実的な枠内におさまっており、リアルタイム処理に近づいてきている。

## CFDに応用するKATANAの四原則

昨今世界中に商用CFDコードが溢れているが、ソフトウェアクレイドルが一線を画す理由は、高性能なCFD製品を提供するという理念を日本の刀になぞらえたところにある。刀とはご存知のとおり近代以前の日本で侍・士族が携えていた剣である（図4）。刀は概して軽量で、力強く、速く、殺傷力に優れていた。ソフトウェアクレイドルの開発理念は、世界中の協働契約を結ぶ顧客に、CFDを使用するうえで彼らが望む高精度かつ高速で生産性の高いアプリケーション志向の機能を提供・強化することである。これは顧客からの引き立ての返礼にハイレベルのソフトウェアサービスを提供する社会的契約であると見なせる。ソフトウェアクレイドルが35年以上にわたってCFD製品を開発してきた背景にはこの理念と精神があり、CFDの文脈でいうと、クレイドル製品には高精度、高速、優れた操作性、マルチフィジッ

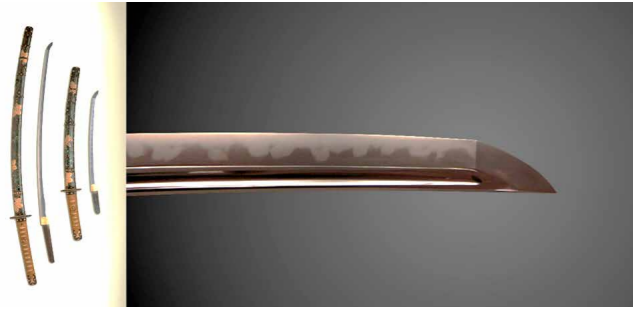


図4: 伝統的な日本刀 - 軽量かつ実用的で力強く非常に鋭い

クス志向という4つの際立った特色がある。この取り組みが功を奏し、毎年のソフトウェア契約更新率は90%を超え、世界のCFD市場においても著しく成長を続けている。

### KATANA: 高精度なCFD

全てのコンピュータ援用エンジニアリング (CAE) において精度は重要な問題であり、CFDについては精度が命と言っても過言ではない。CFDではメッシュの様相、採用した経験モデル、境界条件の質や物性値によって、予測結果が正しいものにも誤ったものにもなり得る。これはマルチフィジクス要素が強く絡む現象を解く場合にはより顕著となる。「garbage in, garbage out (コンピューターがどんなに高性能でも、不完全なデータを入力すれば、不完全な答えしか得られない)」という古い格言に対抗するには、強固な品質保証プロセスと一連の厳格なCFDベンチマークテストが必要である。これらはソフトウェア開発競争において信頼性の高い汎用CFDコードを生み出すには必要不可欠である。

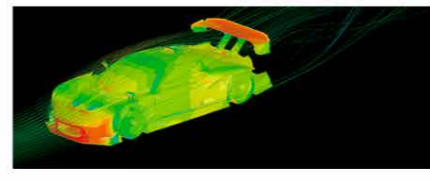
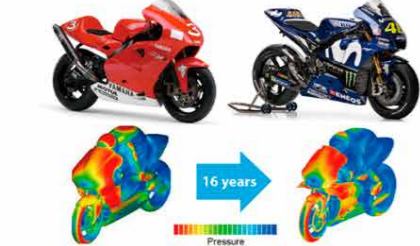
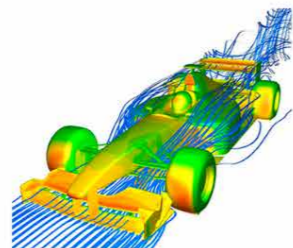


図6: Cradle CFD製品を長年使用しているモータースポーツ関連の顧客事例

日本人エンジニアは製品およびソリューションの細部にこだわることで極端に精度を求めることで世界に名を馳せている。これはクレイドルがどの製品をリリースする際にも自らに課している基準である。現在、全Cradle CFD製品のサポート対応バー

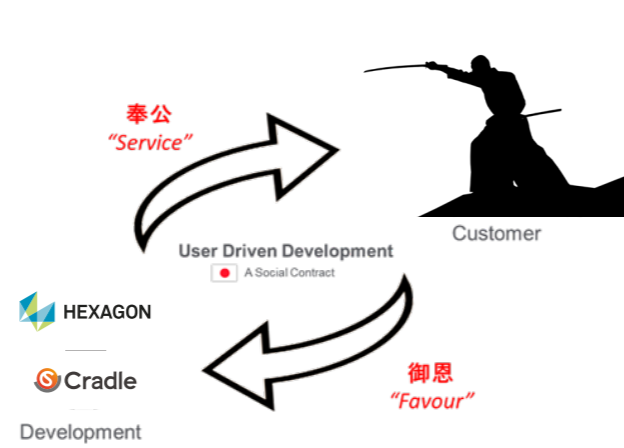
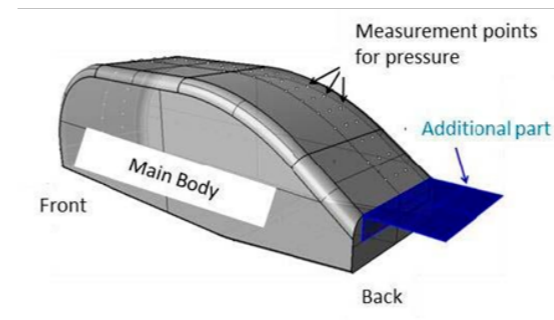


図5: “御恩と奉公”をコンセプトにしたデベロッパーと顧客の社会契約

ジョンおよび開発中バージョンはWindowsとLinux環境で稼働し、何らかのコード変更が行われた場合は夜間に自動的にリグレッションテストが実行される。Cradle CFD製品は、品質保証プロセスの一環として300以上のテストケースを通過しなければならない。テストケースには基本的な検証のほか、商用レベルのベンチマーク (40以上)、ユーザーズガイドに掲載している解析例 (134)、そしてバグ修正の確認などが含まれる。これらのテストケースを実施することで、Cradle CFD製品が細かい設定なしにすぐに使え、どんな難しいCFD現象でも解く準備ができていことを保証するのである。実際にホンダやヤマハといったモータースポーツ企業の多くに長年製品を利用いただいているが (図6)、競争の激しいモータースポーツ業界の非常にタイトな

製品設計所要時間に合わせて彼らの要求するCFD精度は極端に高いものとなる。

また、Cradle CFD製品を使用したベンチマークテストも世界中で多数実施しており、例えば公益社団法人自動車技術会 (JSAE) (図7) やアメリカ航空宇宙学会 (AIAA)、宇宙航空研究開発機



Software	Mesh Type	Number of Cell Layers in the Boundary Layer	Number of Cells Without Rear Flat Panel (Case 1)	Number of Cells With Rear Flat Panel (Case 2)	Mesher Used
AcuSolve	Tetrahedral mesh	7	24,755,000	25,795,000	AcuConsole1.8b
ANSYSFluent R14.5	Unstructured grid	17	16,000,000	16,700,000	ANSYSMeshering R14, TGridR14
FloEFD	Cartesian mesh based on octree technology	-	3,520,000		FloEFD
IconCFD	Hexahedral dominant mesh	7	37,640,000	38,300,000	IconProMesh
PAM-FLOW	Tetrahedral mesh	6	38,260,000		PAMGEN3D
SCRUY/Tetra (DES, SAS)	Tetrahedral mesh with prisms	10	27,000,000		SCRUY/Tetra
STAR-CCM+ v7.06 (IDDES)	Hexahedral	20	16,690,000	16,835,000	STAR-CCM+ v7.06

図7: 2013年JSAE 修正Ahmed bodyを使用した車体周り空気力学のCFDベンチマーク

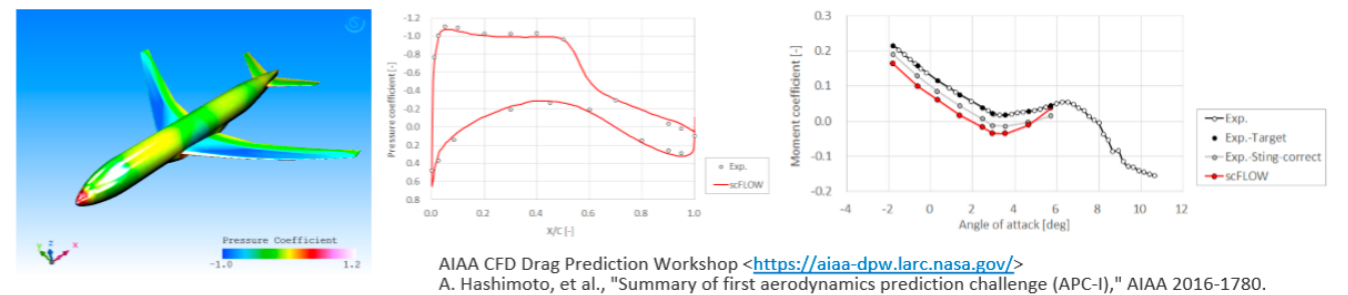


図8: 2016年AIAA APC-1の結果

構 (JAXA) (図8)、Joint Research Project (JoRes JRP) に利用いただいている。このようなベンチマークテストを実施して、CFD予測技術の精度を高く保つことに役立っている。Cradle CFD製品の卓越した性能を示す一例として、2013年に実施したJSAEのベンチマークテストがある。風洞の検証データを使用して商用CFDの精度を測るもので、1/4スケールのAhmed bodyデータを使用した。外部空力のテストには、典型的なAhmed bodyの車体後部に「追加部品」のあるモデルとないモデルを使用した。ベンチマークでは車体の様々な部分における抗力係数・揚力係数・縦揺モーメント係数・圧力係数をCFDシミュレーションで示さなくてはならない。7つの企業がJSAEのベンチマークテストに手を挙げ、その当時市場に出ていた主要な商用CFD製品はほぼ全てが参加する形となった。どのソフトウェアでもシミュレーション結果とCFD手法に関する技術情報、物理モデル、解像スケールを提示するのに3か月を擁した。図7はCradle CFD SCRUY/

Tetraのシミュレーション結果が、両方のベンチマークテストで他の古くからある商用CFDツールと比較してより実測値に近い値となっていることを示している。通常高コア数での計算を必要とするためCPU時間が膨大となる非定常での計算を行ったが、他製品の最大7倍の速度で結果を出すことができた。今日の商用CFDソフトウェア業界において、CFD結果を得るまでの所要時間は実務に使用する製品の重要な選定要因となっている。

航空宇宙産業向けでは、AIAA、JAXA、フランス国立航空宇宙研究 (ONERA) のベンチマークテストで、低速の圧縮性流れから極超音速物体に至るまでをCradle CFDソフトウェアで解析した (図8、図9)。同様に船舶業界では船体抵抗予測やプロペラ・船体・水の相互作用が、正しいCFDシミュレーション結果を出すための欠かせない因子である。図10はJapan Bulk Carrier (JBC) 船型を使用したベンチマークテストで、Cradle CFD製品が非常によい結果を出した<sup>(8)</sup>。

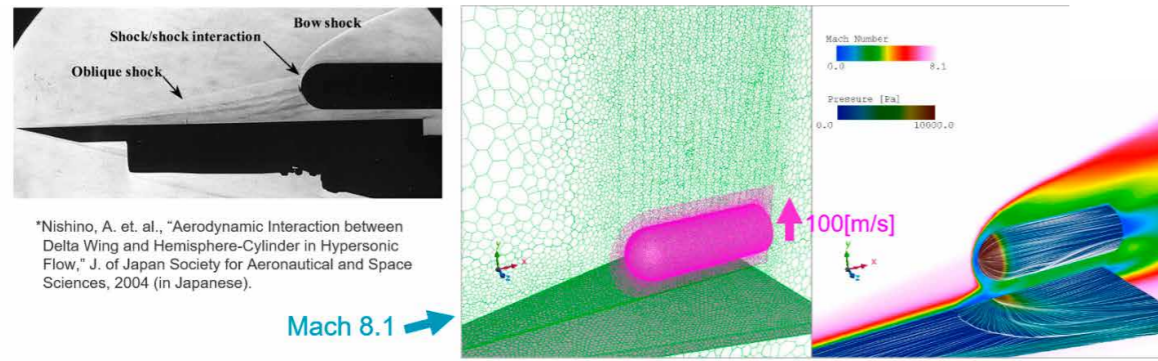


図9: scFLOWのオーバーセットメッシュを使用した極超音速で飛行するTSTO (二段式ロケット) の打ち上げロケットからオービター (本体) 切り

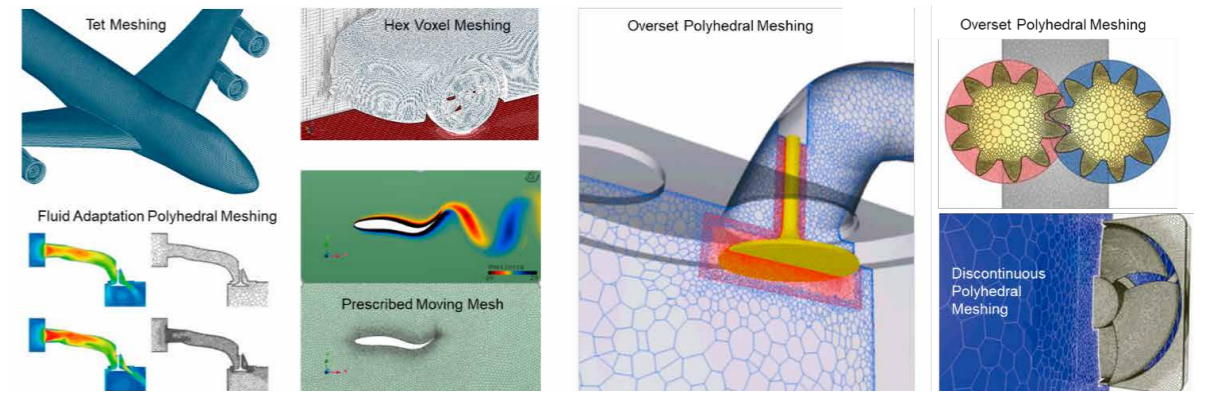


図11: Cradle CFD製品のメッシュ生成技術 - テトラメッシュ、ヘキサメッシュ、ポリヘドラルメッシュ、ボクセルベースメッシュ、オーバーセットメッシュ

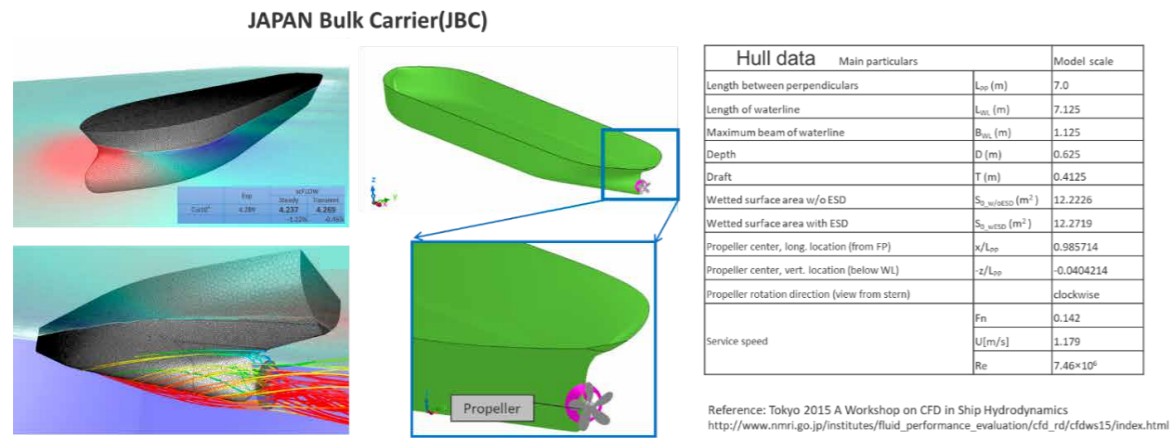


図10: scFLOWを使用したJapan Bulk Carrier (JBC) 船型の水力学船体抵抗シミュレーション

## KATANA: 高速なCFD

CFDシミュレーションにおいて理想は「リアルタイムに」結果を得ることだが<sup>(1)</sup>、実際は計算に使えるリソースが限られており、精度と計算所要時間は通常トレードオフの関係となる。そしてCFD内部の一番の時間的ボトルネックは、モデル形状修正とメッシュ生成にあり、次いでソルバーの計算速度である。これらは特に大規模解析や複雑な非定常解析において時間を要し、最後のポスト処理や結果の可視化にも影響する。ソルバーの計算速度はHPC (ハイパフォーマンスコンピューティング) と関連しており、CFDシミュレーションがマルチコアマシン・ネットワーク・スーパーコンピュータから最近ではクラウド上の大規模データ処理センターまでどのような環境で実行されるかによって異なる。

ソフトウェアクレイドルでは長年に渡り全CFDコードにおいてソルバー計算速度向上に注力してきた。CFDソフトウェアの計算スピードは、メッシュのタイプや品質、コードがどのように構築されているか、モデル形状や境界条件の不具合にも左右される。さらに、実世界の物理現象は本質的に不安定で非常に複雑であるため、CFDで数値的に解くのが難しいというケースもある。ソフトウェアクレイドルのCradle CFD製品は、ポリヘドラル (多面体) メッシュを採用しているscFLOW、直交格子メッシュのscSTREAM、テトラ (四面体) メッシュのSCRYU/Tetraというライ

ンアップであるが、市場をリードする日本の大企業を多数含む世界中の大手OEM企業 (相手先商標製品の製造会社) に長年利用されていることがクレイドル製品への評価を物語っている (図11)。我々はロバストで安定性高く計算速度に秀でた信頼性のあるCFDソルバーを開発することに長年尽力している。例えば液体タンクのスロッシング現象のベンチマークテストでは、他社製品が解析に1週間かかったところCradleCFD製品は20分で結果が得られ、最大500倍の速度差があった。図12は多面体メッシュのscFLOWが解析速度に秀でているのを示す代表的な例で、一切妥協のない精度でミサイル周りの極超音速流れを解析している。

計算に1週間を費やしたCFD解析がクラッシュしたら大惨事だが、我々はそういった事態を避けるために日夜努力を続けている。scSTREAMなどに採用されている直交格子メッシュは、登場から30年たった今でもなお最速でCFD結果を得るためのCFDアプローチの1つとして認知されているが、その他にも適材適所で様々なメッシュタイプのソルバーを多数開発してきた。SCRYU/Tetraの高い評判が示すとおり、クレイドルのテトラメッシュャーはCFD業界において最速の部類に入り、境界層メッシュにおけるY+の機能がとりわけ優れている。我々は他社と比較して短期間かつ少ない工数で信頼性の高いCFD製品を開発しており、メッシュ生成・自動化・移動物体の機能が非常に優れているという顧客評価を得ている。2018年にリリースしたフラッグシッ

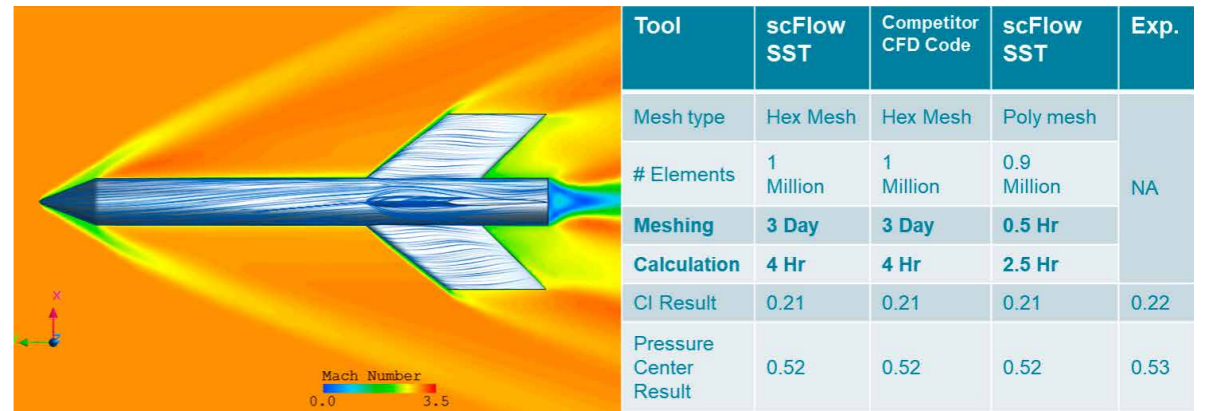


図12: 極超音速ミサイルのベンチマークテストにおけるメッシュ生成までと解析全体の所要時間

プモデルのscFLOWは、最新のポリヘドラルメッシュを採用しており、これらのベンチマークテストが示すとおり、1シミュレーションにおいて最大512コアのHPC拡張性を備えている (図13)。シミュレーションに使用するコア数が増えれば増えるほどソルバースピードが上がり、CFDコードが超線形となるアプリケーションも存在する。我々も全クレイドル製品にこのレベルの拡張性を持たせることを目指している。線形のHPC拡張性を備えるということは、顧客のコンピュータ性能が上がるほど解析スピードが上がり結果を得るまでの時間が短縮されることを意味する。また、Rescale (www.rescale.com) のクラウドプラットフォームでもクレイドルのソルバー製品を利用できるようにしており、ユーザーはオンライン上にソルバーライセンスを移し、コア数無制限でCFDシミュレーションを実行可能である。2021年には、2,000コア以上を使用したパラレルパフォーマンステストで非常に良好な結果を得ている。

## KATANA: エンジニアが使いやすいCFD

顧客からは、解析エンジニアの貴重な時間リソースのうち約60%をシミュレーションの前処理であるモデル形状修正とメッシュ生成に費やしているとの声が寄せられている。同様に、社内報告用のCFD予測の後処理と、経営陣へのプレゼンテーション用に手の込んだアニメーションを使用してCFD結果を可視化することに多大な時間を割いているという話であ

る。クレイドル (ゆりかご) という社名が示す通り、我々が顧客に提供するCFDソリューションは、顧客のフィードバックによって育てられ、磨かれ、洗練されたものとなる。ユーザーを第一に考える我々のソフトウェア開発姿勢は1984年の創業時から変わらず、その根幹となる理念はクレイドルのDNAに脈々と受け継がれている。我々は顧客-とりわけCFDの専門家でない顧客-に最良のCFDシミュレーション体験を提供することを目標としている。そのため、業界をリードするスクリプト自動化とドラッグ&ドロップ機能をオーブ

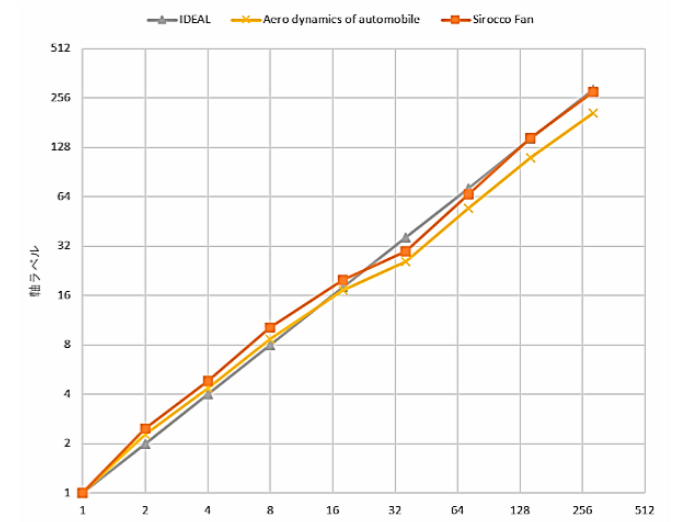


図13: 最大512コアのscFLOWのスケーリング

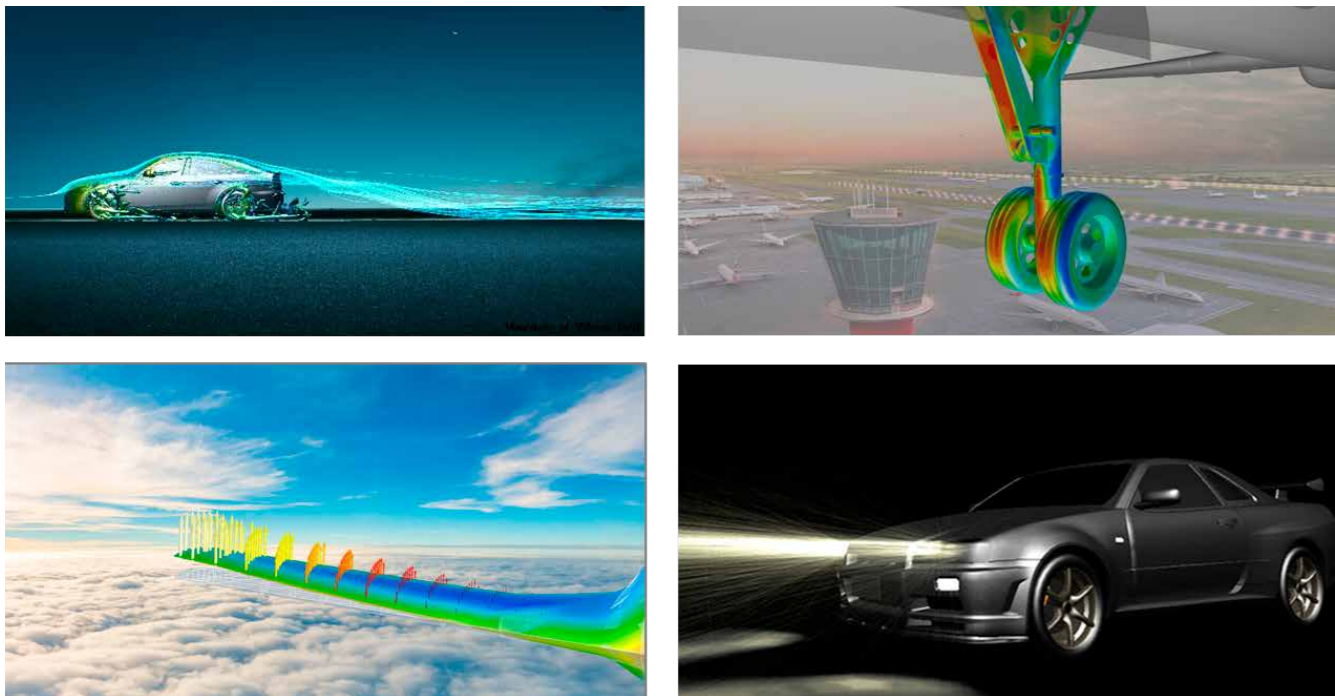


図14: Cradle CFD製品でマルチフィジックス現象をシミュレーションした結果を写實的に可視化した例

ンなエコシステムの中で提供し、顧客がそれぞれの業界のアプリケーションから、クラス最高のソフトウェアのツールチェーンにプラグインすることを可能としている。

クレイドルのCFDソフトウェアのAPIとプラグインは、業界内でも称賛され顧客からは高い評価を得ているが、とりわけ我々が得意とするマルチフィジックス現象のシミュレーションにおいての評判が高い。クレイドルのCFDソリューションとプラットフォームにおける開放性もまた、顧客が自社製品の研究開発や製造シミュレーションフローにとって最適な、クラス最高のソフトウェアを選択するための重要な指標となる。我々は顧客がクラス最高の製品を選択する支援を行い、顧客の使用ツールチェーンでCFD製品が動作するようプラグインや接続技術を提供している。

従来、CFDシミュレーションは煩雑な前処理と後処理の作業が中心であった。前処理では形状モデル修正やメッシュ生成を行い、後処理では画像やアニメーションを使ったりコンターマップやベクトル表示でシミュレーション結果をスクリーン上に可視化する。CFD結果の可視化は非常に時間のかかる作業ともなり得る。視野角度や面照明を調節したり、視覚化するデータのポイントや報告先を考えた、流跡線を調整したりと様々な事柄を考慮する必要がある。最近では写實的に結果を可視化する技術(図14)や仮想現実/拡張現実技術を使った可視化がPLM/CAE/CFDの世界でも増えてきて

いるが、シミュレーション結果から画像やアニメーションを作成するのは、特に大規模モデルの解析では手間のかかる作業となり得る。

クレイドルでは、現代の設計開発シミュレーションで求められるユーザー体験を提供すべく、マルチフィジックス解析結果表示用のポストプロセッサscPOSTを数年前にリリースした。scPOSTはオープンソースソフトウェアBlenderの品質を持ちながら、専門家でないユーザーでもプロレベルでマルチフィジックスCFD解析結果の後処理が行えるツールである。

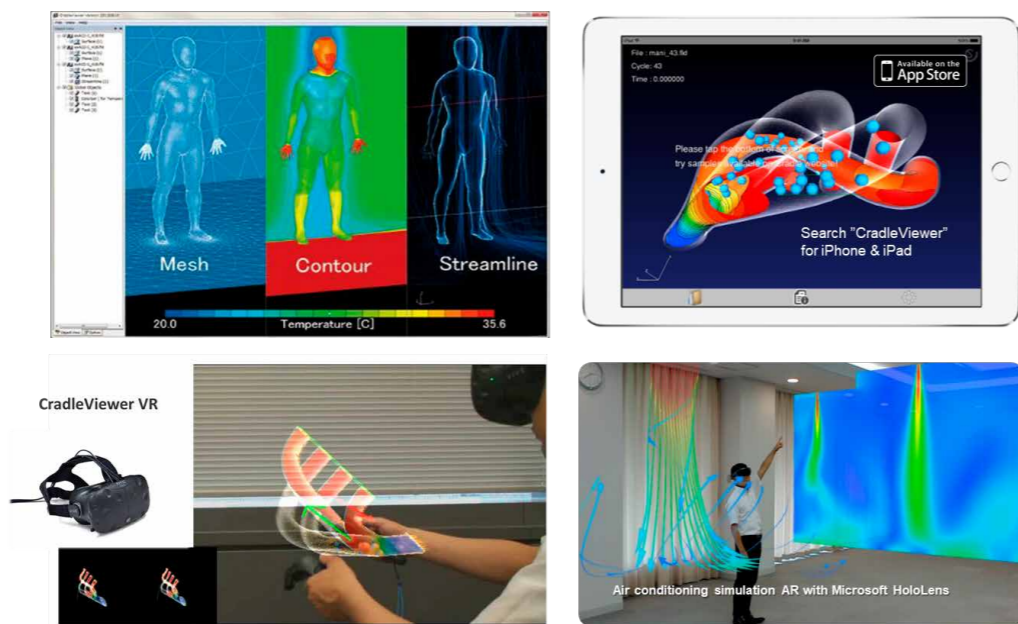


図15: Cradle CFDビューワで人体熱モデルを表示する様子、拡張現実機能を使った後処理、CFD結果をタブレット端末で表示できるアプリケーション

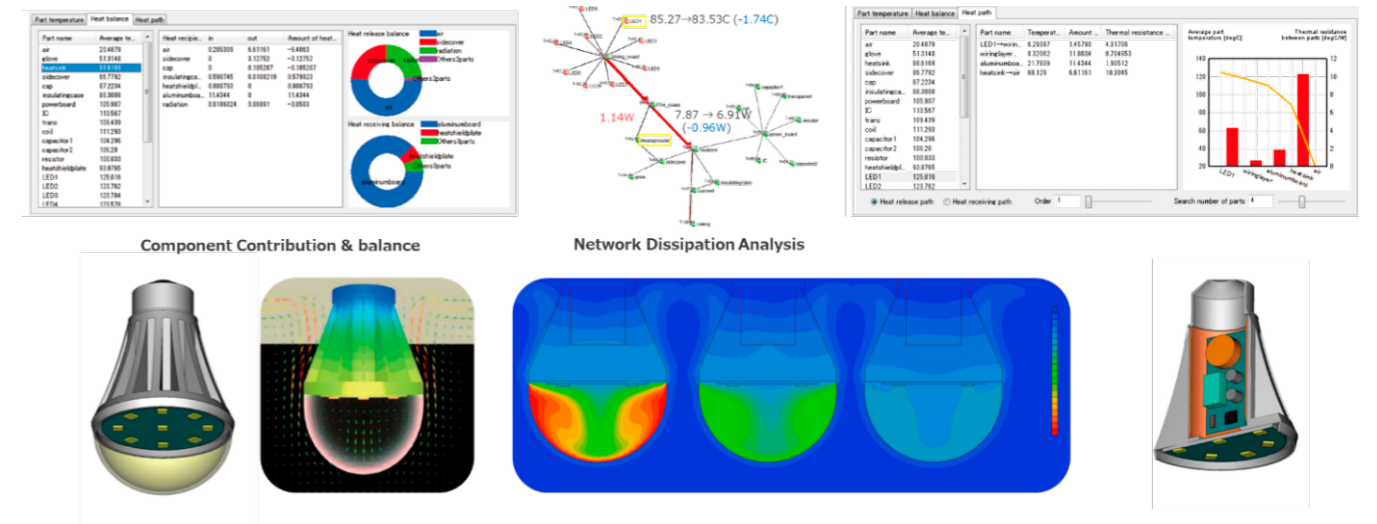


図16: scSTREAMIに搭載されているHeatPathView機能を使用してLEDライトの熱経路を表示する様子

ソフトウェアクレイドルでは顧客の声に耳を傾け、その結果上級解析者が求めるレベルの精度と設計者が求めるレベルの使い勝手を備えた製品を生み出す自分たちの技量に誇りを持っている。これは我々がソフトウェアインターフェイスのボタンやワークフローを極力シンプルにしたいと考えていることにも現れており、シンプルにすることによってエンジニアは直感的に素早く自身の望む操作を行うことができる。実際に、我々は電子機器の熱解析用にHeatPathViewのような機能を開発しているが(図16)、特許取得済みのアルゴリズムと組み込みの可視化機能によりユーザーは非常に複雑なプリント基板システムや部品上での放熱の様子を素早く確認でき、常に直感的に把握できるわけではない放熱経路を明らかにすることが可能である。

ソフトウェアクレイドルでは桁違いのメッシュ生成スピードと競合他社よりはるかに高速なソルバーを実現しながら、CFD機能をさらに充実させマルチフィジックス解析にも対応することで、真に有用なCFDを提供できるよう努めている。我々は顧客にとって信頼のおけるCFDソリューション提供者であると共にパートナーとなり、顧客がCFD解析を成功させるのを支援したいと強く願っている。これこそが、我々が扱いにくいPLMソフトウェア製品を提供するのではなく、CFD分野における専門性を発揮する領域なのです。例えば、数十億メッシュでのシンプルな空力解析ではなく、5億以上の要素数でメッシュを生成して複雑な流体流れと熱伝達、要素移動の連成解析を行う顧客も存在する。これらは商用CFDの歴史上最も要求水準が高く複雑なシミュレーションである。

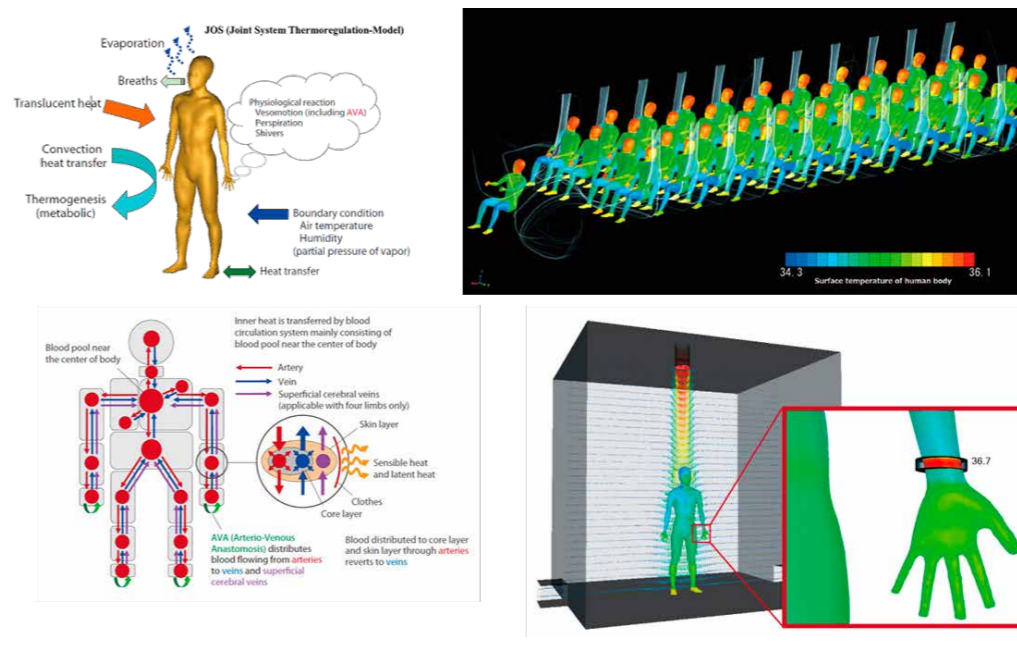


図17: Cradle CFD製品に搭載されているJOS人体熱モデル

クレイドルは商用CFD業界において最も完成度の高い人体熱モデルを考案しリリースした。輸送・建築環境分野のユーザーが温熱環境シミュレーションを行う際、人体の衣服から出ている部分も隠れている部分もすべて簡単に熱作用の知覚を評価できるようにになっている(図17)。またCradle CFD製品はCAE空間で使用する全PIDO(プロセス統合と設計最適化)ソフトウェアと連携するよう準備を進め、単なる実験計画法(DOE)ではないシミュレーション設計空間探索に力を入れている。さらにはODYSSEEパッケージと、中でも特にLUNARプラットフォーム(www.CADLM.com)の最先端の人工知能・機械学習・ROM(低次元)モデリング機能とも緊密に連携し、図18の解析結果が示すようなMSC MarcとCradle

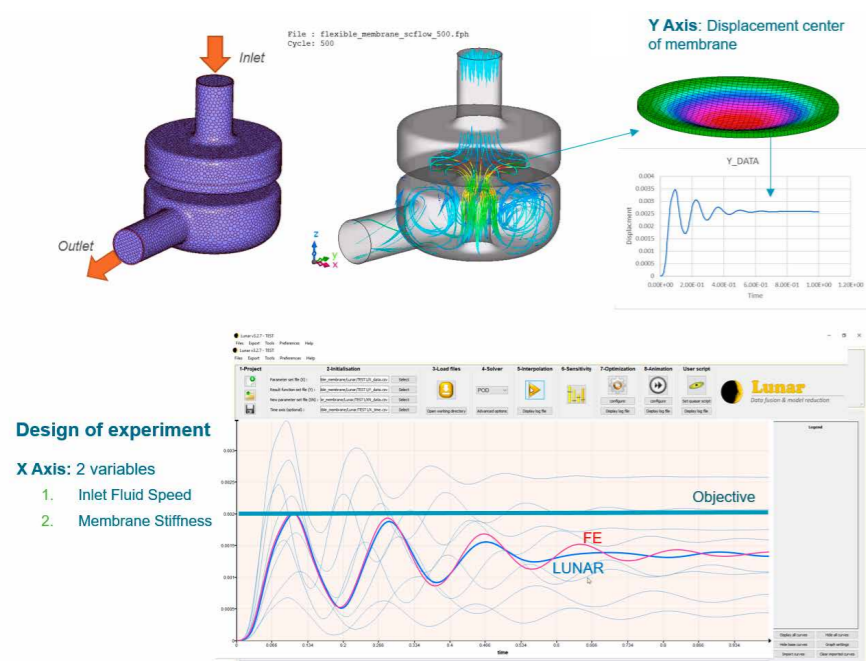
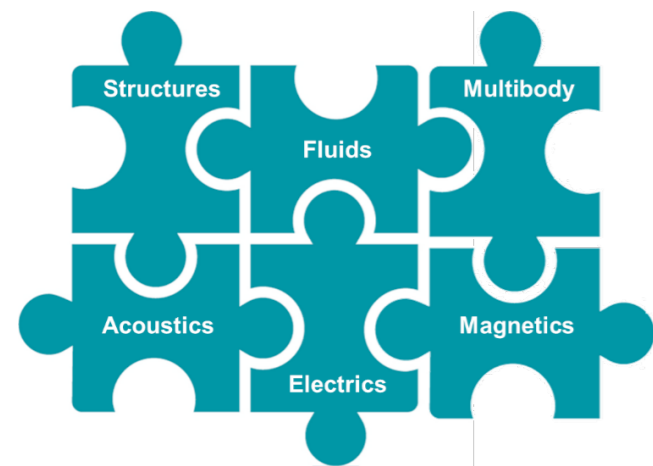


図18: ODYSSEE LUNARが導き出すROMを活用したscFLOWとMSC Marcのダイヤフラムポンプの流体-構造連成解析の高速化

CFDのscFLOWを使ったダイヤフラムポンプの流体-構造連成解析の高速化に活用している。

### KATANA: マルチフィジクス現象に主眼を置いたCFD

過去20年以上に渡り、コンピュータ援用エンジニアリング (CAE) における最高の「聖杯」は「マルチフィジクス」シミュレーション、つまり異なるタイプの物理現象を同時にシミュレーション (Co-Simulation) することであった<sup>(1)</sup>。マルチフィジクス、または複合領域物理現象のシミュレーションは、CAEにおける定義が不十分ではあるが実世界の現象のシミュレーションは本質的に相互に繋がっているべきという観点からエンジニアに



は直感的に正しく感じられる。通常流体は構造物から孤立して存在しているわけではなく、我々が住むこの実世界の音響・機構・磁力・電子といった様々な物質とともに存在し複雑なシステムを形成している。だが、長い間CAEの世界ではエンジニアたちはこれらの細分化した物理現象のシミュレーションをそれぞれに行ってきた。現実、垂直なCo-Simulationが可能な民主化されたアプリケーションというものへの究極のニーズが存在する。つまり、1つのユーザーインターフェースでマルチフィジクス現象を解析し、ユーザーが解析者であれ設計者であれそのニーズを満たすことのできるアプリケーションである。

例えば、CFDとFEAを使った流体-構造連成解析や、CFDと音響FEAを連成させた空力音響解析などがその例で、2つのアプリケーションを行ったり来たりせずに済む。

「マルチフィジクス」という言葉は1990年代に作られたもので、色々な意味でCAE業界が物理学の基礎方程式を複合的に解いてこなかったという失敗の結果生まれたと言える。ある面では、これは異なる数学的手法がもたらす実際的な問題である。例えば、有限体積法 (流体解析に最適) と有限要素法 (構造・機構・音響解析に最適) では、実世界の技術的な課題を解くうえで効率的に計算を収束させるためにベストなほうを選択する。また別の面では、複数の数学的アプローチをうまく結びつけることができなかったので、ソフトウェアメーカーは使いやすいシミュレーションツールを開発することでマルチフィジクスの課題に対処しようとしてきた。マルチフィジクスシミュレーションの例で長い間CAE開発者が悩まされてきたのが、横風になびく旗である (図19)。scFLOWのような最新のCFDコードを使用し

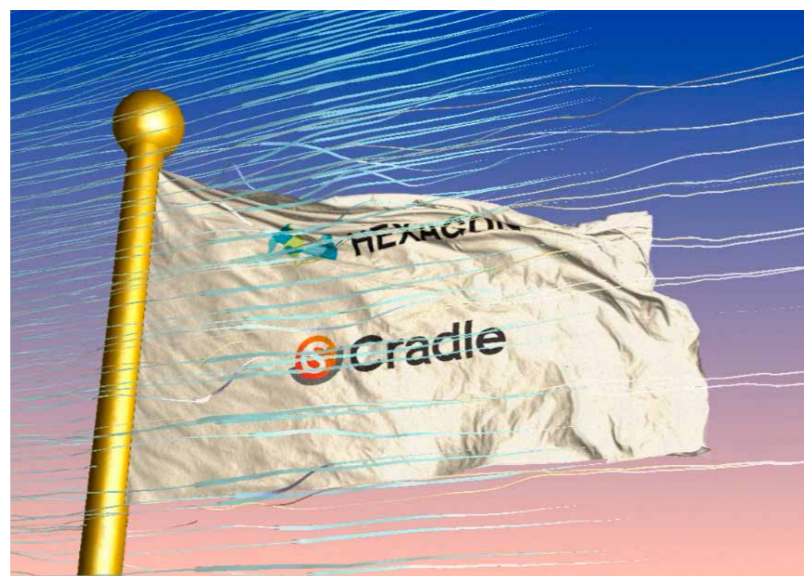


図19: scFLOWと独自のDEM連成機能を使用した風になびく旗の流体-構造連成解析

Co-Simulation 領域	使用製品	産業分野	応用事例
流体-構造連成解析 (FSI)	Nastran / Marc + scFLOW+STREAM	全て	航空機のフラッター現象、弁の開閉、MEMS、渦励起振動、サスペンション荷重、熱応力…
構造解析と空力音響解析	Nastran / Marc + scFLOW+Actran	全て	車室内騒音、ドアのがたつき、騒音振動…
機構解析と流体解析	Adams + scFLOW	全て	大規模移動粒子、車体横風の影響、冠水路…
仮想運転と車両力学解析	Adams + Vires VTD	自動車	自動運転者、先進運転支援システム検証、リアルタイムドライビングシミュレータ…
粒子解析と機構解析と流体解析	Adams + scFLOW Adams + EDEM	自動車、航空、化学プロセス	路面上の車体安定性、濾過、パルク材料取り扱い…
機構解析と非線形FEA	Adams + Marc	自動車	ドアのたわみや開閉、超過積載車量ケース (例: 縁石乗り上げ)、障害物の上を走行、バッテリーパックの変形…
1次元システム解析と機構解析と制御解析	Adams + Easy5/ Matlab / Simulink / Maplesoft / GT Suite他	全て	ロボットアーム、機械、ランディングギアシステム、車両ABS、ESC電子安定制御、TCS…

表1: MSC Software製品とのCo-Simulationに対応するCAEアプリケーションの代表例

てこの実時間8秒の短いシミュレーションを高精度で解くには、自社の離散要素モデリング (DEM) 機能と連成させて144コアのCPUで並列計算を行い約20日かかった。

2016年にソフトウェアクレイドルがMSC Softwareに買収された際、流体シミュレーションとMSC NastranやActran、Marcといった長い歴史があり信頼性の高いFEAコードとの使い勝手の良いCo-Simulationを開発するプロジェクトが始動した。

機構解析ソフトウェアのAdamsはscFLOWと連携しており、このようなソフトウェアの組み合わせは全て独自のCAEツールチェーンと連携・連成が可能である。音響解析から機構解析 (MBD)、またCFDから構造解析や陽解法衝突解析に至るまで全てのHexagon | MSC Softwareソフトウェアが連携している。その結果、数年前には幻想でしかなかったマルチフィジクスに対応したCo-Simulationが、2つのアプリケーションの連成に留まらず、ツールチェーン内の3つ、4つのアプリケーションを連携して行うことが可能となった (表1)。

図20に示すとおり、ソフトウェアクレイドルはFMI (Functional Mock-up Interfaces) を使用したscFLOWとの優れたオープン連成技術を提供している。Cradle CFDの技術は、CFD業界内でも最先端と認識されており、自由表面と重合格子機能について

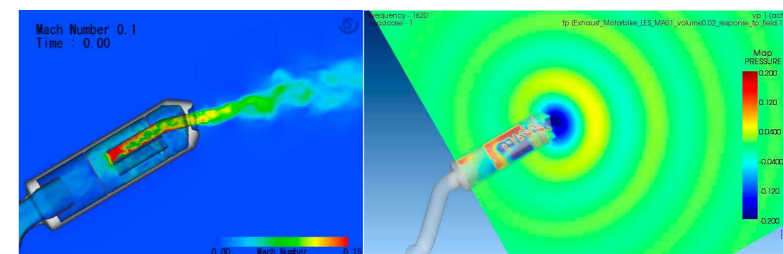


図21: Cradle CFDとMSC Actranを使用した自動車の排気部とマフラーにおける音響Co-Simulation

非常に高速で高精度かつロバストな結果をもたらすと評判である。FMIを使って簡単に物理量をサードパーティのソフトウェアとMSCのCAEソフトウェアおよびクレイドルのCFDソフトウェア間で受け渡すことが可能である。FMIは一般的な物理量設定やユーザー関数、そして様々なスクリプト言語に対応している (図20)。2019年にはscFLOW 2020がリリースされ、音響シミュレーションの分野で20年の歴史を持ち市場を牽引するMSC Actranとの独自空力音響予測連成解析機能が組み込まれた。

これによりユーザーはシームレスに空力・構造負荷を予測し、騒音や振動を評価することが可能となった (図21)。非常に複雑

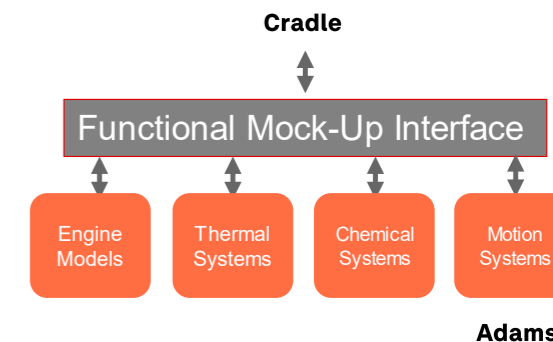
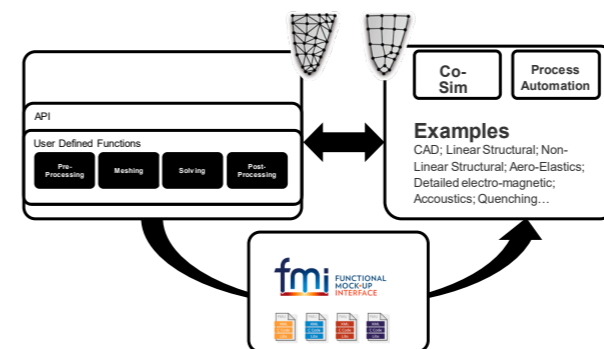


図20: ソフトウェアクレイドルのオープン連成CFDプラットフォーム (左) とFMIインターフェース (右)



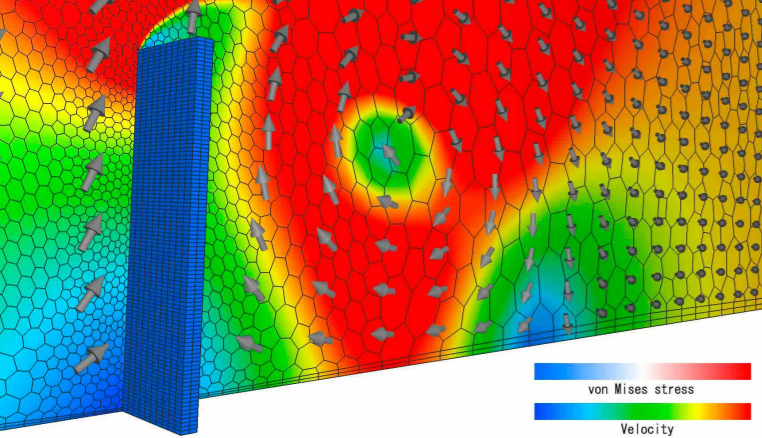


図22: MSC Nastran-scFLOW-Marcを用いたクロスフロー内の曲がりやねじれを伴う金属の揺動

で難しい動きのCo-Simulationも可能となり、図21に示すようにクロスフロー内の曲がりやねじれを伴う金属のはためきという非線形の動きをscFLOW-Marc-MSC Nastranで解析した。とりわけ機構解析ソルバーAdamsとCradle CFDのCo-Simulationでは、自由表面における大規模粒子移動の解析が可能である。

例えば、ペーンポンプやドラム式洗濯機内の流れと振動(図23)や、燃料タンクのスロッシング現象などに活用できる。機構解析とのCo-Simulationで非常に興味深いのが、冠水路を通過する車両のサスペンション効果や横風の中を走る車の様子をAdamsを使って解析したものである(図24)。MarcとCradle CFD製品のCo-Simulationでは、航空機の燃料タンクバップルや液体のクエンチング、柔軟なプレート/膜/バルブシール、そしてシロッコファンなどの解析が可能である。MSC NastranとscFLOWのCo-Simulationでは流体-構造連成解析が可能で、例えばCFD単体のシミュレーションでは非常に難しい船体プロペラとキャビテーション流れの様子を解析できる(図25)。

ソフトウェアレイドルのscFLOWを機構解析ソルバーAdamsと連成させると、ユーザーは航空機の翼とフラップを配備する様

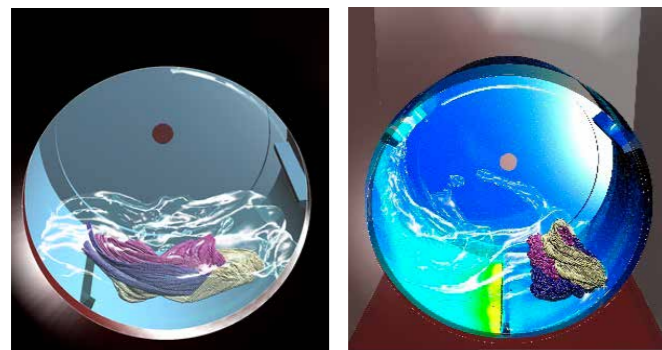


図23: MSC製品のAdams-Marc-scFLOWを使ったドラム式洗濯機の動きの機構-流体-構造連成解析

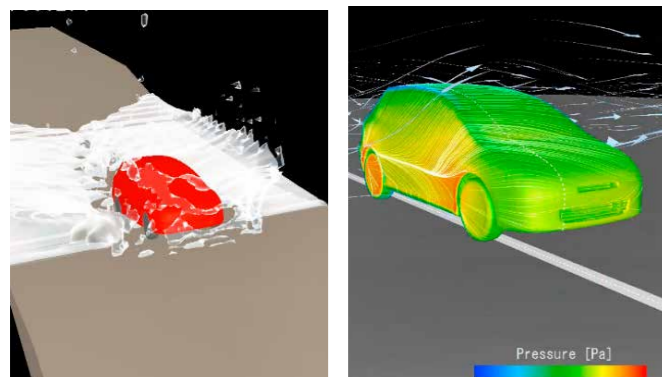


図24: MSC製品のAdamsとscFLOWを使った冠水路走行車両のサスペンションの動きと横風走行車両の挙動予測

子の空気力学シミュレーションを行うことができる。もうひとつscFLOWとMSC Nastran、またはMarcで行った興味深い空気力学のCo-Simulationがある。超音速プレートの非線形なフラッター現象で、平坦なプレート表面に通常見られない波打つ高速振動が起こりプレート表面が衝撃を受ける様子である(図26)。CFD領域で移動メッシュ機能を用いて変形予測を行い、次にMSC Nastran、またはMarcでFEAを行った。CFDで使用可能なメッシュの要素形態は、テトラ要素、ヘキサ要素、ポリヘドラル要素である。

また、チップやプリント基板(PCB)上の電子部品の熱応力予測も、難しいマルチフィジックス解析の一つである。図27は、電子チップ抵抗体がオンオフのアクションにより繰り返し発熱を受ける様子のシミュレーションである。その結果、部品の寿命が尽きると、はんだ接合部が破損し、最終的には製品の故障につながる

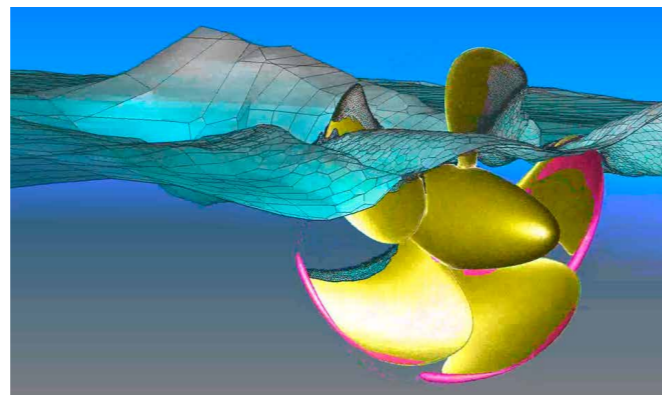


図25: MSC NastranとscFLOWを使った流体-構造連成解析でプロペラとキャビテーションが起こる自由表面流れの様子を予測

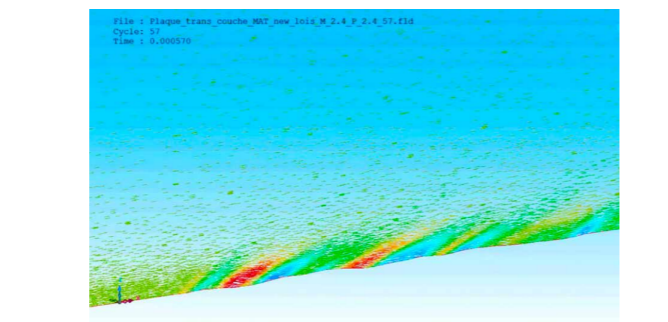
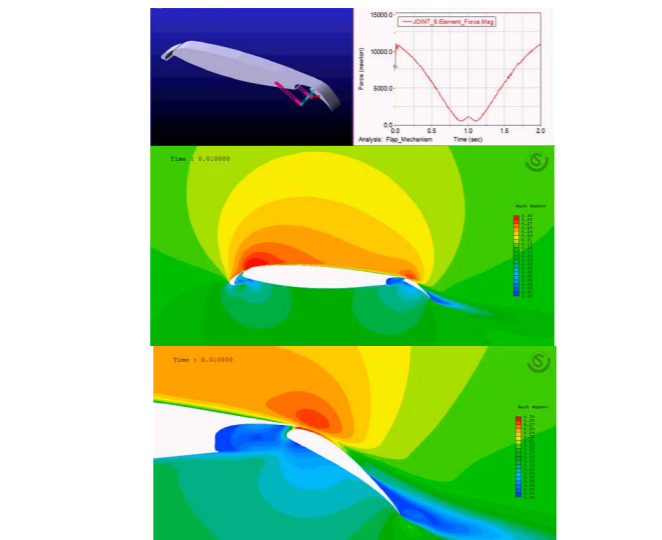


図26: AdamsとscFLOWを使った翼フラップ配備の空気力学予測(上)とMSC NastranとscFLOWを使った振動する超音速プレート表面への衝撃の流体構造連成解析(下)

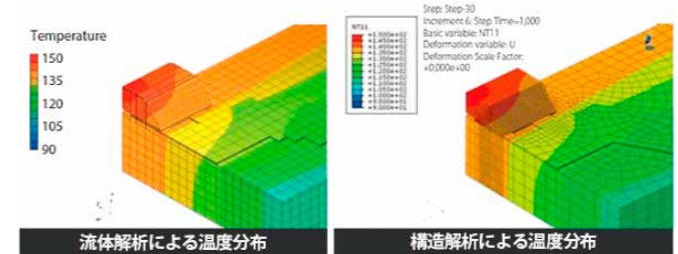
る。それを事前に予測し、応力の高い部分を特定できるかどうか非常に重要である。scSTREAMの温度分布予測結果を構造解析ソルバー(例:MSC Nastran)のメッシュにマッピングした。これにより、はんだ接合部の応力が高精度に予測可能となった。上記は白物家電の故障メカニズムや最適な部品配置を予測するうえで大変有効な方法で、scSTREAMのCo-Simulationを使うことで比較的容易に実施可能である。

最後に、MSC製品となったことによるメリットとして、MSCOneというCAEツールのトークンシステムでもCradle CFDソフトウェアを使用できるようになり、マルチフィジックスに特化したCFDシミュレーションを容易に実行できるようになったことが挙げられる。このシステムでは、設計者やエンジニアが必要なCAEソフトウェアに柔軟にアクセスでき、サブスクリプション形式のため多くの製品発注を行うことなく製品を気軽に使用することができる。これによりCo-Simulationのメリットを享受し、製品開発のイノベーションを加速させ生産性と性能を向上させることが可能となる(図29)。

MSCOneはマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの民主化に向いており、世界中で広く利用されている。例えば図28はパナソニックが開発する家庭向けシーリングファンのシミュレーションである。

パナソニックエコシステムズは室内の空気質を向上させるシーリングファンの開発に取り組んでいる。シーリングファンは羽の振動によって破損したり崩れ落ちる可能性がある。同社は安全性を確保するために流体構造連成解析を行っている。Cradle CFD scFLOWとMSC Nastranで、羽表面にかかる空力圧力と構造変形のシミュレーションを行った。Co-SimulationにはMSC CoSim Engineが使われており、Co-Simulationのタスクを管理し2つのソルバー間的高速なデータ受け渡しを行っている。シーリングファンの事例では、Co-Simulationを現実の作業環境に取り入れることにより、エンジニアはファンの羽の複雑なマル

#### 電子チップ抵抗体の熱応力解析(0-30秒)



scSTREAMの温度分布は構造解析のメッシュにマッピングされる。はんだ接続部の応力は、構造解析を用いて計算される。

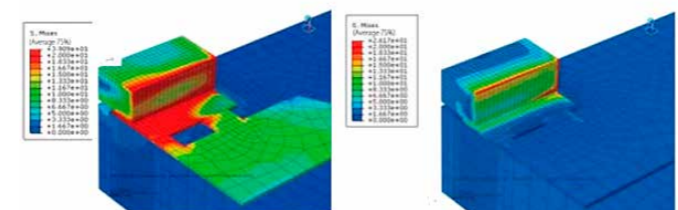


図27: scSTREAMの熱機械応力解析機能を使った電子部品のはんだ接合部における応力予測

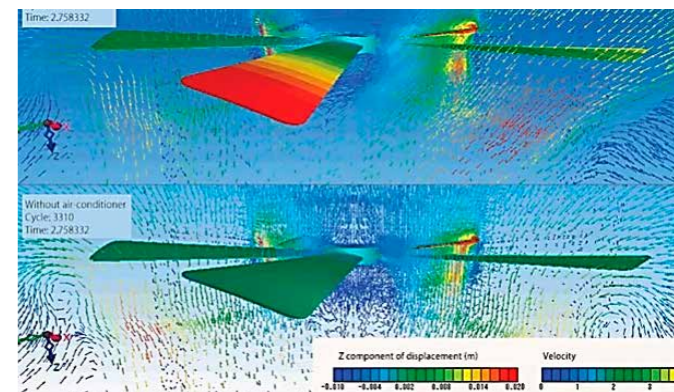


図28: scFLOWとMSC Nastranを使ったパナソニックのルーファンの流体構造連成解析

チフィジックス挙動を観察し、安全性を確保するとともに性能も向上させた製品設計を行うことができた。

#### 設計開発段階のCFDシミュレーションでスマートマニファクチャリングを実現

今日、世界の主要な産業すなわち自動車・航空・電子機器・化学プロセス処理・エネルギー・水資源・食料さらにはヘルスサイエンス等の分野において、CFDはその製品設計開発に大きな影響を与えている。CFDを活用することで流体の流れや熱伝達、材料(質量)移動を改善でき、生産効率・生産性・製品性能が向上することがこれら全ての分野でよく知られている。図30から33は自動車・航空・電子機器・船舶海洋業界におけるCFD、とりわけマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの活用事例である。設計開発予測シミュレーションソフトウェアは、顧客がイノベーションを起こし、製品要件を満たし、くわえて、かつてないほど厳格なコンプライアンスに関する法令を遵守するための新しいテクノロジーとして常に先頭に立ってきた。端的に言うと、CFDシミュレーションの使用により開発初期段階から正しく概念設計を



図29: MSCOneはトークン方式の柔軟なプラットフォームで、設計者やエンジニアにとって世界品質のCAEシミュレーションソフトウェア製品群にスマートにアクセスできる手段である。

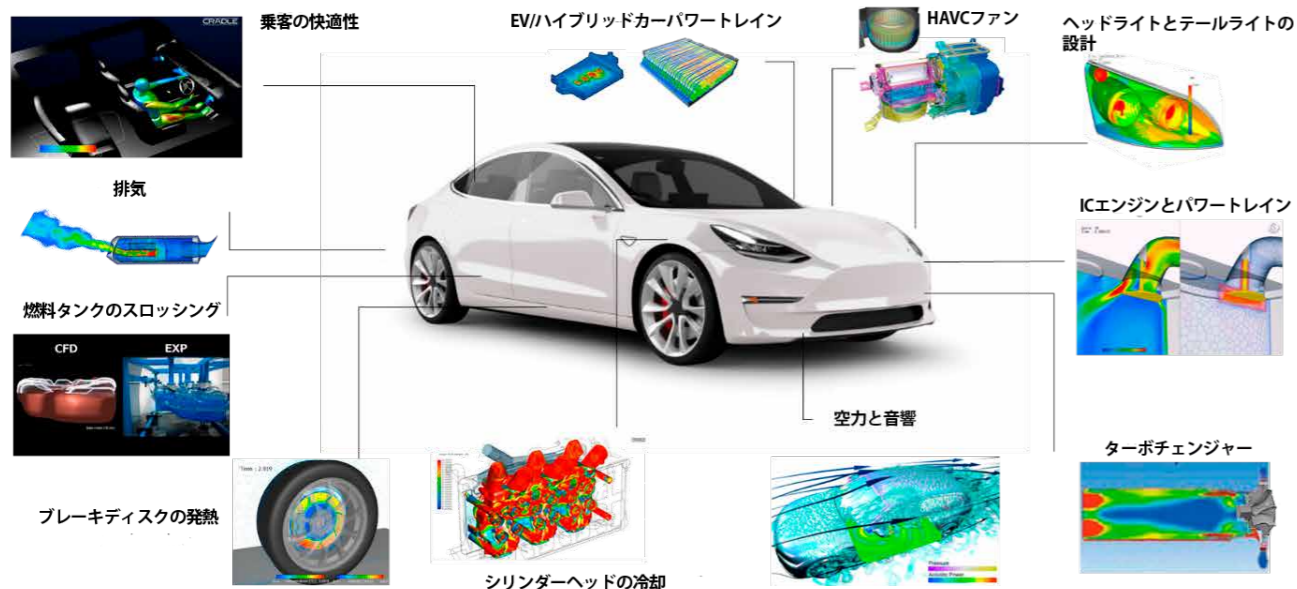


図30:自動車・陸上輸送産業におけるマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの活用事例

行うことが可能となり、作業の効率化とエネルギー使用量の削減を実現している。

自動車業界はますます厳しくなる排ガス規制に加えて、電気エネルギーへの転換と拡大する自律走行車の需要という2つの巨大な創造的破壊事例の出現により前例のない変革期を迎えている。排ガス削減目標を達成するために、全OEM（相手先商標製品の製造会社）製造車両向けパワートレインを電気エネルギーにすることが世界中で求められている。実際に、電動パワートレインが車体内部に搭載されることで製造工程における複雑さが相当低減される見込みである。1台の車に搭載する従来の燃焼機関は1400もの部品で構成されていたが、電動パワートレインの部品は200であることがその代表例で、部品数が減ることで原理的には製造が容易となる。さらに、自律走行車両が陸上輸送業界にこの先5~10年でもたらすであろう重大な創造的破

壊は、必然的に持続可能な利益となって現れるだろう。ほとんどの自動運転車両は電気自動車となることから、ほぼ排出ゼロの達成や騒音の低減、車両寿命の延長と利用の増加が見込まれる。自動車に関しては、排気ガス微粒子モデリングとともに膨大な排気および走行車が發する環境騒音のCAE予測とマフラーの流体-音響連成解析が世界中で行われている。現代の複合材料や積層造形部品のシミュレーションを高速かつ高精度に行いながらNVH（振動・騒音・ハーシュネス）のシミュレーションを行うのである。1台のセダンに100以上のCPUと5kmに及ぶケーブルが積まれる現代の自動車は、さながら車輪の上に乗る家電製品であるが、このような変化に対応するために、よりマルチフィジックスに主眼を置いたCFDがこの先必要となるだろう。

最新型のアババスやボーイングの旅客機は世界で最新鋭のテクノロジーが結集した機械のひとつであるが、設計の広範囲に

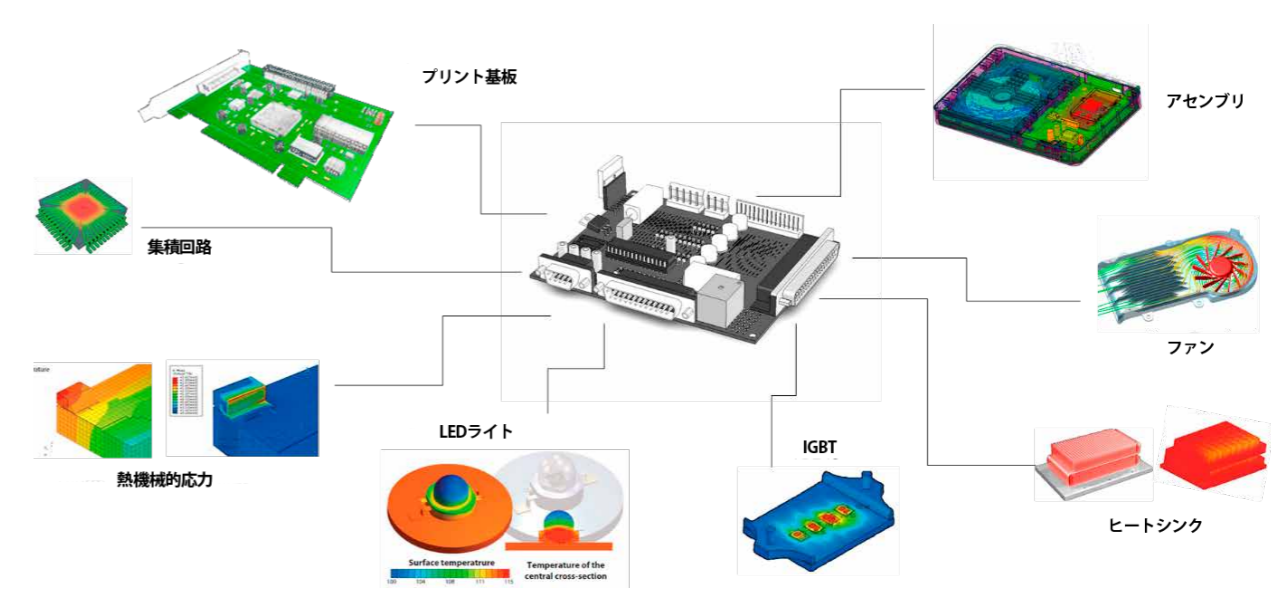


図32:電子機器産業におけるマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの活用事例

CAEを使い空力弾性や空力音響の性能を向上させている。エンジンはNASAのスペースシャトルの1/4の推力を生み出し、現状の航続距離は1回のフライトでロンドンからオーストラリアのパーズまで飛行可能であることを示している。さらに、CAEシミュレーションにより最適なファン性能や効率性の向上した部品を設計することができ、前世代機と比較して25%の燃料削減を見込んでいる。すなわち最新型は前世代機よりもエコフレンドリーな旅客機となっている。さらに、最新型のエンジン音は旧型のそれと比較して40%も低減している。ボーイングやエアバスの機体にはこのところアルミニウム合金ばかりではなく、新種のチタニウム複合材料といったより強度が高く軽量の材料も使われている。機体の軽量化にはマルチフィジックスに主眼を置いたCAEがさらに必要とされ、このICME (Integrated Computational Materials Engineering) 時代にはその傾向はより顕著である。

ICチップ上のトランジスタやプリント基板 (PCB) は多種多様な電子部品に使用されており、我々が購入するガジェットや製品に組み込まれているコンピュータプロセッサとともに、現代社会のありとあらゆるところで目にすることができる。1990年代初頭にインターネットが台頭したことで、世界中で爆発的にデータ・情報が共有されるようになり、その背後ではエコシステムを維持するために大量のデータセンターが設立された。CPUにおけるムーアの法則とは、集積回路上の面積当たりのトランジスタ数が18ヶ月ごとに2倍になる、つまり半導体の性能が18ヶ月ごとに2倍になるというもので、この50年間その法則が示されてきた。10年前にはシミュレーション不可能だったものが、今日には当たり前になるのである。そして、この15年の間にインターネットを背景としてソーシャルメディアのような産業が発達してきた。あまり知られていないが、世界の全商品の90%近くがコンテナ船に積まれて地球を横切って運ばれており、このような国際配送により

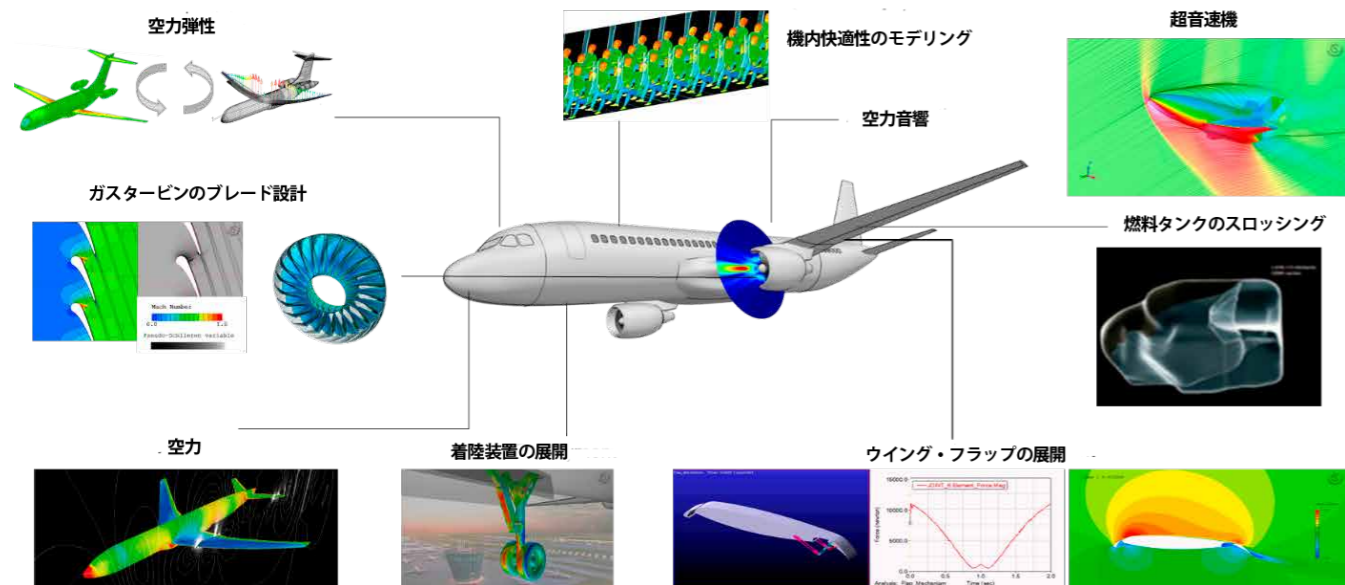


図31:航空・防衛産業でのマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの活用事例

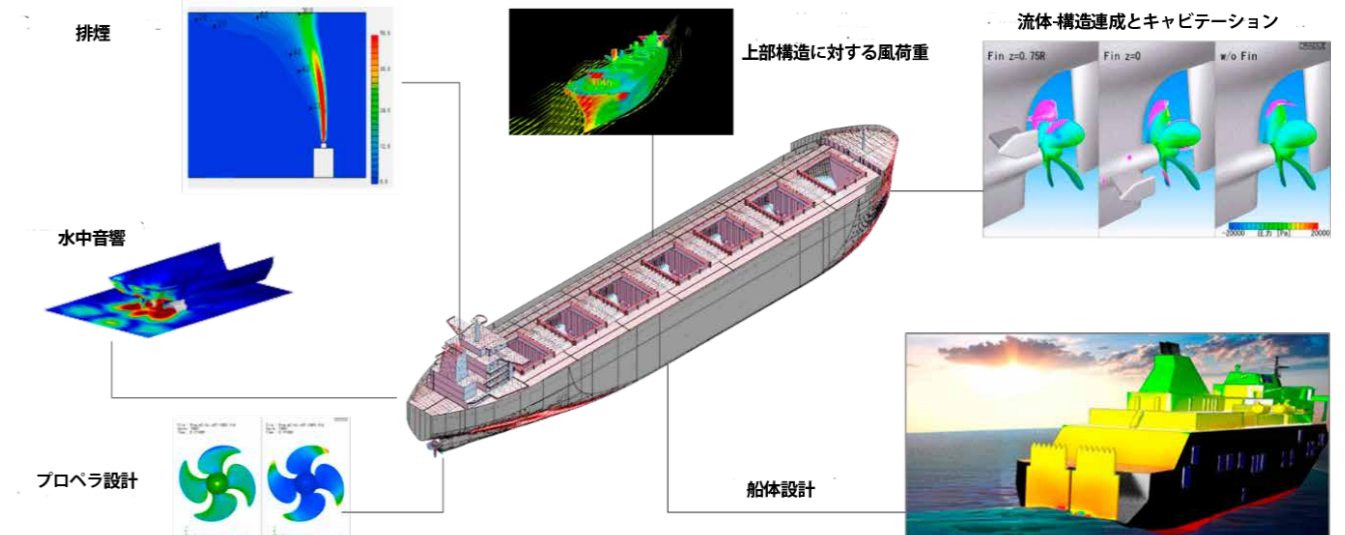


図33:船舶海洋産業でのマルチフィジックスに主眼を置いたCFDの活用事例

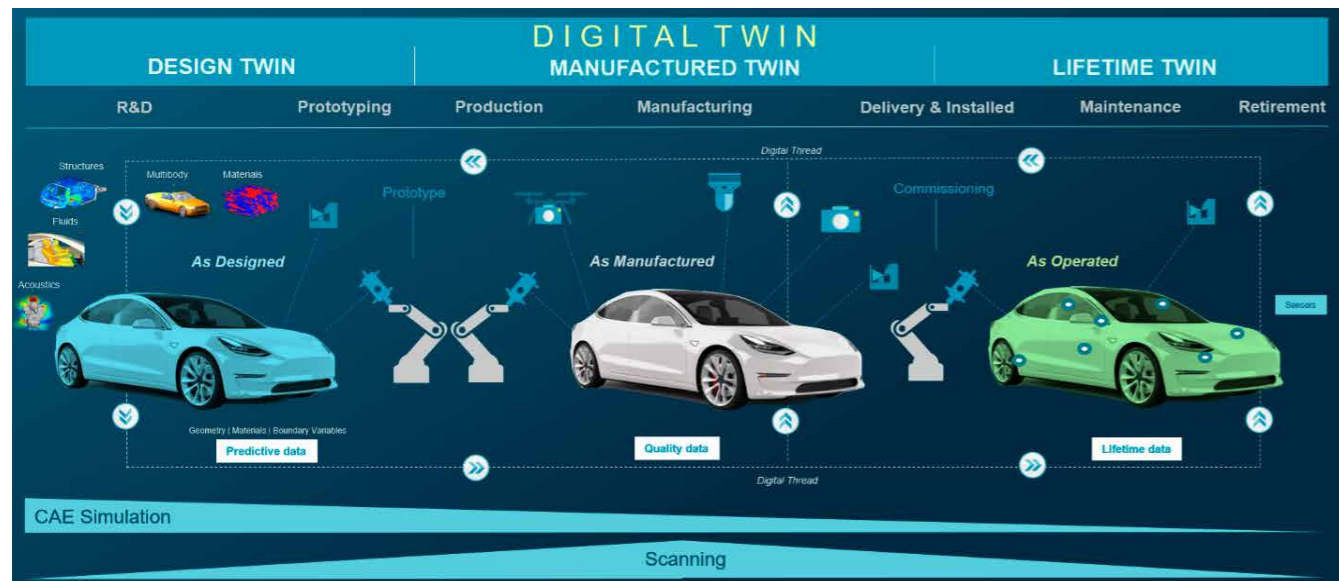


図34: CAE/CFDツールを含むHexagon Manufacturing Intelligence独自の製品群でデジタルツイン・デジタルスレッドを実現し自動車製品寿命にイノベーションをもたらす

排出されるCO2は今日世界中で排出されている温室効果ガスの2%を占める。

全船体の二酸化炭素排出量を30%削減する取り組みが世界中で始まっており、より優れた船体とプロペラを設計することでエネルギー（燃料）効率を高めようとしている。また、環境に優しいエンジンを使用し、水面下の騒音を削減することで海洋生物を被害から守る取り組みも行われている。

デジタルトランスフォーメーション (DX) は全製造業が取り組んでいる昨今のメガトレンドだが、実際の製品や資産を仮想的に表現した「デジタルツイン」や、仮想と現実で表現した製品や資産をプロセスでつなぐ「デジタルスレッド」の増加と共に、しばしば製造業のデジタル化に関する議論の中心テーマとなっている。(10)

つまり、製造オペレーション中に得られる仮想の予測データと実際の計測データを使用することが、かつてないレベルの生産性と製品性能をもたらすスマートマニュファクチャリングを実現する鍵となる。DXと関連するいわゆる「インダストリー4.0」へ向かう動きにより、製造業の多くは「すぐに使用可能な」情報を効

率よく使用する必要に迫られている。すぐに使用可能なデータをスマートに活用することで製造ライフサイクル期間を短縮し、製品を改良し、最終的には産業の持続可能性を促すことができる。最新のCAE/CFD設計開発シミュレーションは、製品ライフサイクル管理におけるデジタルツインとしてDXの大部分を担っている (図34)。

製造企業の異なる組織、とりわけ研究開発部門・設計部門・生産製造部門において「サイロ化」つまり組織が縦割りで横のつながりが無いというのはよくある光景だが、多くの組織においてそれが生産性の向上を阻害する要因となっており、CAEを使った設計開発・生産ソフトウェア・最終製品の品質保証が、本来可能であるはずで且つなされるべき連携をお互いに取れていないという状況にある。このような異なる部門で作成されたデータもまた「サイロ化」され、生産工程の効率化や製品品質の向上、生産リソースの無駄の削減などを実現する機会の損失を招く原因となり得る。産業分野向けモノのインターネット (IIoT) やクラウドベースのデータ管理を通じて一つの製品のライフサイクル全体のデータを繋げることで、得られた知見をリアルタイムに他部門の業務に活用でき、その結果優れたコラボレーションや迅速な回答と意思決定を促すこととなる。ビッグデータ解析の出現もまた、製造企業が重要な関連データのパターンを迅速に定義づけることを後押しし、適切な機会を十分に活用して改良すべき最も重要な部分を迅速に判断することを可能にしている。このように一つの製品のライフサイクル全体における仮想データと実データを「デジタルスレッド」として繋げ、活用することをスマートマニュファクチャリングと呼び、その動きはますます広がっている。

CAE設計開発シミュレーション (Cradle CFDソフトウェアを含む) では何ペタバイトものデータを生成しており、CFDがかつてないほど広がるにつれて生成されるデータ量がさらに増えるだろう。データが生成されるスピードは我々がそれらを活用するスピードを凌いでおり、今日のビジネスシーンと製造業が直面する



図35: CAEシミュレーションデータは現代のスマートマニュファクチャリングにおけるデジタルツインの一角を成す

唯一最大のテクノロジー課題はこの生成されるデータを活用することである。今日では250億ものデバイスがインターネットに繋がっており、その数が2025年には2倍以上になるという予測についてどう考えるだろうか。この数字は、生み出されるデータ量と活用されるデータ量の隔たり (ギャップ) はより一層大きくなることを意味している。この「データ活用ギャップ」はHexagonが得意とする部分で、顧客の製造サプライチェーンにおけるデータの見える化を進めることができる。今日の製造業が直面する最大の課題の1つが、工場のデータを把握しテスト工程の間にそのデータを評価することである。製品開発者は予備テスト・本テスト・事後テストの情報を簡単かつシステムティックに記録し、その後それらのデータを紐づけて複雑な関係情報を作成したいという要望を持っている。この要望に応えるため、テストデータに始まりCAEツールやそのエンドユーザーがそのデータを消費するに至るまでの全てを把握・管理することに焦点を当てたエンジニアリング・ライフサイクル・マネジメント (ELM) ツールをデータプロセス管理システム内に取り入れる必要がある。ELMはデータを把握するための複数のメソッドを備えており、通常ウェブベースのインターフェースでデータの検索・比較・検証ができ、ユーザーは権限を付与されたデータのみを閲覧できるよう多段階のアクセスセキュリティが施されている。

MSC SoftwareのMaterialCenterやSimManagerをプロセスエンジンとして使用すると、仮想テストの自動化やレポート作成、その他多様な作業をブラウザでそのまま実行することが可能である。Hexagon独自のCAD/CAMおよびCAEソフトウェアシミュレーションやテストソリューションを精密計測機器を用いて活用することが今後20年の自律型スマートマニュファクチャリングを創造する鍵となるだろう。今後は、CAE/CFD/CAMのデザインツインを使った優れた予測シミュレーションで仮想データを生み出し、センサーや製造機械でマニュファクチャリングツインの実データを生み出していく。そしてインターネットにつながったあらゆる

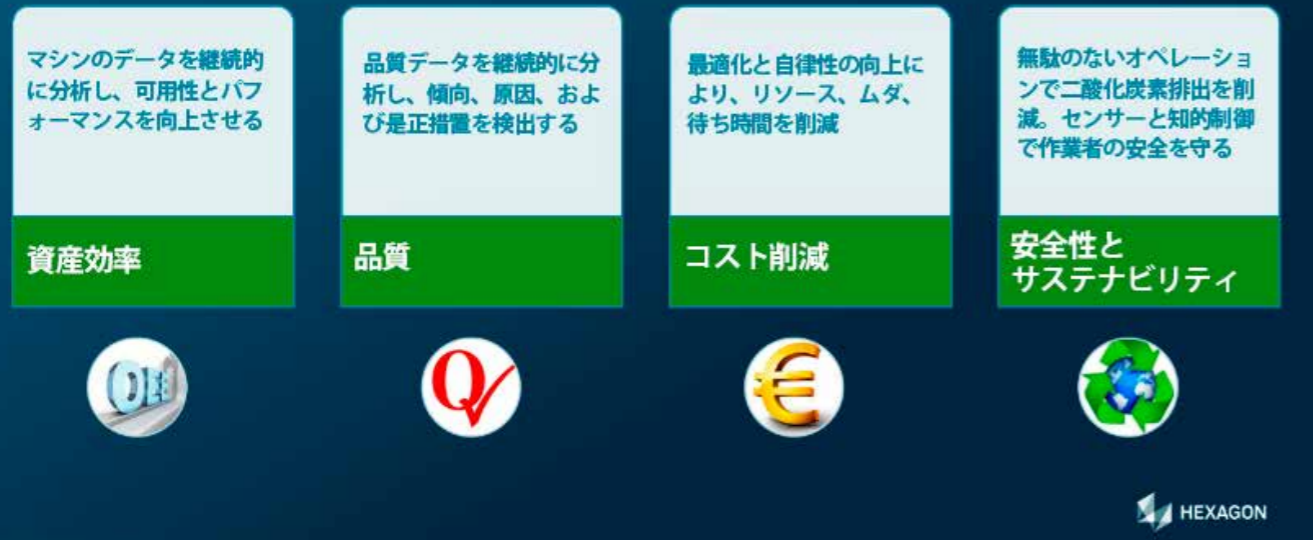
デバイスと相互にデータのやり取りをする機能をすでに備わっているライフタイムツインと組み合わせることで、製造工程の末端までの価値をより深く理解することができるだろう。

このように製造工程の端から端までのデータを活用することで、製造コストの低減、製品の市場投入時間の短縮、製品の顧客別パーソナライズ、などのビジネス上のメリットをダイレクトに促進する。Cradle CFDは、現代のスマートマニュファクチャリングに向けたHexagon独自のアプローチを活用し、顧客のスピード感を持った研究開発および製造を支援していく。

## まとめ

Computational Fluid Dynamics (計算流体力学・CFD) 業界は、この50年で飛躍的な成熟を遂げた。しかし、マルチフィジックスに主眼を置いた、使い勝手のよいCFDツールへのニーズは益々高まっている。これは、我々が住む世界では、多くの現象がマルチフィジックスの組み合わせであり、こうした現象をCFDの観点から全ての産業分野にわたって、正確かつ効果的にシミュレーションすることが重要だからである。ソフトウェアアクレイドル、Hexagon及びMSCソフトウェアMSC SoftwareはCo-Simulationという難題に取り組み、実世界における工学用途のための、有用なマルチフィジックスソリューション及びツールチェーンを提供してきた。そして、これらすべてはトークンベースのライセンスシステムMSCOneに集約されている。Cradle CFDツール群は全てのユーザーにとって使い勝手のよい実用的な設計となっている。それは、同ツール群が高いシミュレーション解析精度を提供しているのはもちろん、設計者レベルのユーザービリティやユーザーエクスペリエンスに加え、多くのメッシュ機能、自動スクリプト、設計中心モデル、API、オープンなエコシステム、ポスト処理機能まで提供しているからである。

# スマートマニュファクチャリングの利点



20世紀、日本は急速な産業化を経験した。それによって特に消費財および製造工程の向上において、瞠目すべきイノベーションがもたらされ、グローバルな結果を生んだ。Cradle CFDソフトウェアは、日本の総合的な品質における製造技術革新を取り入れ、ユーザーエクスペリエンスとユーザーサビリティに優れた、ロバストでスピードが速く、正確でマルチフィジックスに主眼を置いた、ユニークで革新的なCFDツール群を生み出すことで、CFD分野で新しいフロンティアの開拓を可能にしている。

我々は、Cradle CFDソフトウェア開発におけるバックボーンとなる哲学を「刀-KATANA」と呼んでいる。それは、刀は侍が持つ、日本伝承の切れ味鋭く強力な剣であることに由来している。マルチフィジックスに主眼を置いたCFDシミュレーションは、原理的には簡単に聞こえるかもしれない。しかし、多くの商用CAEベンダーはポイント的なフィジックスシミュレーションソリューションを数十年にわたって提供しているが、弱連成CAEであれ、強連成CAEであれ、使用可能な工業グレードのエンジニアリングアプリケーションのための連成ソリューションの搭載には至っていない。多くのCFDユーザーが直面する一般的な「マルチフィジックス」の問題には、流体-構造 (FSI、VIV)、流体-音響、流体-構造-機構、及び流体-機構があるが、これら全てをCradle CFDソリューションで取り扱うことが可能である。

現在、世界の多くの製造業では、CFDの利用を加速させ、概念設計のフロントローディングから、開発、製造、製品のライフサイクルに至るまで、CFDをより身近なものにすることが求められている。

実際、最初の設計アイデアから、試作、金型製作、製造、使用、そして最終的な廃棄やリサイクルに至るまで、販売可能な製品を生産するためのすべての段階でCFDを利用可能である。現在CFDは、仮想設計、仮想テストおよび製品の最適化を最初の物理的試作の前に行うことができ、コンピュータハードウェア、ソフトウェアの進歩によってこれが可能となっている。そ

の結果、企業は時間とコストを節約することができ、不必要な試作品作成、物理的なテスト、金型の削減だけでなく、リコールや廃棄、手戻りといった無駄を最小限に抑えることができる。Hexagonは他にはない、スマートマニュファクチャリングを実現するための完璧な製造「デジタルツイン」を提供しており、付随する「デジタルスレッド」も提供している。デジタルスレッドとは、デジタルツインからマニュファクチャリングツインおよびライフタイムツインまでのプロセス全体を貫く使用可能なデータのことである。本アプローチは、CFDが民主化され、マルチフィジックスに主眼を置いたCFDが製造業においてごく当たり前になることで、より一層広く普及していくことだろう。

## 謝辞

1. "Back to the Future; Trends in Commercial CFD" by J. Parry & K. Hanna, NAFEMS World Congress, Boston, USA, 2011
2. "The Democratization of CFD", Hanna R.K., Weinhold, I., Mentor Graphics White Paper, 2017:
3. "Lewis Fry Richardson: scientist, visionary and pacifist" by A. Vulpiani, Lett Mat Int, 2014, 2:121-128
4. "50 Years of CFD in Engineering Sciences: A Commemorative Volume in Memory of D. Brian Spalding, Akshai Runchal, Springer Nature, Book, ISBN 978-981-15-2670-1, 2020
5. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Patankar, S., Taylor & Francis, ISBN 9781315275130 1980
6. "Understanding the Japanese Word, Kaizen" Website accessed July 2020.
7. "JSAE Benchmark of Automotive Aerodynamic Test Measurements"; Website accessed July 2020
8. "Tokyo 2015 Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics"; Website accessed July 2020
9. "Co-simulation - Breaking the Back of Multiphysics CAE Simulation" by K. Hanna, Engineering Reality Magazine, MSC Software, Volume VIII - Winter 2018, 73-79
10. "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers", by A. Rasheed, O San & T. Kvamsdal, IEEE, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143, 2020

## 謝辞

本白書は当社のRomain Baudson、Diego d'Udekem (FFT, Belgium)、Keith Perrin (MSC Software, UK) および 藤山啓太 (ソフトウェアクレイドル、日本)らの多大なる尽力によるものであり、何年にもわたる議論の上出来上がったものである。私たちは、35年以上にわたるソフトウェアクレイドルの創業者とリーダーたちの長い輝かしい歴史と、そのすべてのCFD製品に織り込まれた独特のDNAを受け継ぐことができたことに感謝しています。



HEXAGON



Hexagonは、センサー、ソフトウェア、自律型ソリューションのグローバルリーダーです。当社は産業、製造、インフラ基盤、セーフティ、モビリティの分野で効率、生産性、および品質を高めるためにデータを活用しています。

当社のテクノロジーは、都市エコシステムと生産エコシステムの繋がりと自律性を促進し、発展性のある持続可能な未来を創造します。

Hexagon Manufacturing Intelligence事業部に属するMSC Softwareは、オリジナルソフトウェア開発を行う上位10社の1つで、エンジニアリングプロセスに革新をもたらすシミュレーションソフトウェアとサービスを製造業のお客様に提供する、エンジニアリングシミュレーションのリーディングカンパニーです。詳細はmscsoftware.comをご覧ください。Hexagon Manufacturing Intelligence事業部は設計からエンジニアリング、製造、計測に至るまでデータを活用したソリューションを提供し、お客様のさらにスマートな製品製造を支援します。

Hexagon (Nasdaq Stockholm: HEXA B)に関する詳細はhexagon.comをご覧ください。また、@HexagonABのフォローをお願いします。