

# 製品開発・モノづくりを支える CAE 技術

Computer-Aided Engineering Technology That Supports Product Development and Manufacturing

三島 英彦\*  
Hidehiko Mishima

高橋 健一郎  
Kenichiro Takahashi

中村 悠一  
Yuichi Nakamura

寺尾 岳見  
Takemi Terao

島田 茂樹  
Shigeki Shimada

近年、製造業において、製品開発やプロセス条件の最適化といったモノづくりの要素技術として、シミュレーション技術—CAE—はなくてはならないツールとなっている。CAEは物理法則に裏付けされたモノづくり、製品の機能発現を導き、さらには目に見えない現象である電磁波、熱、応力などを可視化することで設計者や生産技術者の想像力をかき立て新製品開発、新プロセスの改善へと結びつけている。また、新製品拡販のための説明やプロセスの変更申請において、実測結果に加えてCAE解析結果を求められるケースも増加している。このような状況下、有用で正確なCAE解析結果を導出するためには、現実と合致する高度なCAE技術と、その解析を高速に処理する計算機サーバーが必要である。今回、計算機サーバーにおいて計算の効率化と機能の高性能化を進めることで、これまで対応できなかったCAE解析を可能とした。その内容を各解析分野で紹介する。

Computer-aided engineering (CAE) technology, a simulation technology, has become an indispensable tool in the manufacturing industry as an elemental technology for product development and optimization of process conditions. CAE leads to manufacturing and product functions backed by physical laws. Moreover, it stimulates the imagination of designers and production engineers by visualizing invisible phenomena such as electromagnetic waves, heat, and stress, thus leading to product development and process improvements. Furthermore, CAE analysis results are increasingly being requested in product explanations and process changes. Under these circumstances, to derive useful and accurate CAE analysis results, advanced CAE technology that matches reality and a calculation server that can process the analysis at high speed are necessary. This time, we have enabled CAE analysis that could not be handled in the past by improving calculation efficiency and enhancing the functional performance of the calculation server. Here we introduce the technology for each analysis field.

キーワード：CAE、計算機サーバー、大規模解析、連成解析、計算科学

## 1. 緒言

当社では新製品、新プロセスの開発、量産品の信頼性評価にCAEを積極的に活用し、住友電工グループ全体のモノづくりの基盤強化を図っている。CAEとはComputer Aided Engineeringの略であり、理論からプロセスでの現象や製品の機能発現を計算にて予測するツールである。実測と合うことが確認できれば、試作することなしに新製品開発やプロセス最適化を行うことができる。

当社の製品開発においても、材料やプロセスの開発、その効率化に対して、CAEの高度化が求められている。具体的には、①部品から製品全体へと解析領域を広げた大規模解析、②電気・構造・流体等の複数の物理現象を組み合わせた連成解析、③原子レベルで現象のメカニズムを解明する計算科学、などの高度なCAE技術の必要性が一層高まっている。加えて、顧客からの解析要求事項も厳格化が進み、新製品拡販のための説明やプロセスの変更申請において、実測結果に加えてCAE解析結果を求められるケースも増加している。このような状況下、有用で正確なCAE解析結果を導出するためには、現実と合致する高度なCAE技術と、その解析を高速に処理する計算機サーバーが必要である。

今回、計算機サーバーにおいて一括管理システムの構築

による計算の効率化と、戦略的な独自設計による機能の高性能化を進めた結果、これまで対応できなかった高精度なCAE技術の開発が可能となり、当社の主要5事業分野である自動車分野、情報通信分野、エレクトロニクス分野、環境エネルギー分野、産業素材分野の製品における設計、製造、信頼性評価へのCAE技術活用を深化、拡大させている。そこで以下、当社の計算機サーバーの導入・運用コンセプトを紹介した上で、サーバー導入によるCAE技術の進展として、いくつかの解析分野に①～③の技術を織り交ぜて紹介する。

## 2. 計算機サーバーの導入・運用コンセプト

計算機サーバーの重要な性能は、CPU<sup>\*1</sup>の中核で実際に計算の処理を行うコア<sup>\*2</sup>の数、処理するデータやプログラムを一時的に記憶するメモリ<sup>\*3</sup>の容量、デジタル情報を保存するストレージ<sup>\*4</sup>の容量、CPU間の通信速度、などがある。CAE技術の高度化には計算の高速化、大規模化が必要であり、これらの高性能化が欠かせない。しかし、CAE技術の分野は、流体解析、電磁界解析、構造解析、材料設計解析、光学解析と多岐にわたり、例えば計算を高速化す

る上で重要な計算機サーバーの性能は、流体解析ではコアの数、電磁界解析はメモリの容量であるように各分野で異なる。そのため、当社では各分野の強みとなる性能をバランス良くチューニングした計算機サーバーを独自にカスタマイズ設計して導入している。世の中の計算機サーバーは年々進化を続けているが、当社でも数年毎に機能を更新、増設して高性能化を進めている。

また、計算機サーバーは複数ある拠点からも利用できるように高速ネットワーク網で繋いでいる(図1)。各拠点から大人数が同時に計算機サーバーへアクセスするため、計算ジョブ管理ソフトを使用した一括管理システムを設計して運用している。このシステムは、計算実行のため計算機サーバーに計算ジョブを入力すると、解析ソフトの種類やその計算規模に応じて自動的に最適なCPUに割り振り計算されるように設計しており、効率的な計算機サーバーの活用を可能としている。

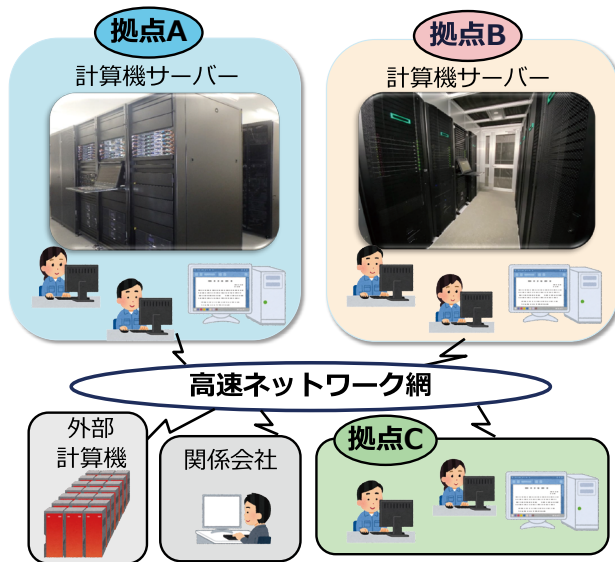


図1 高速ネットワーク網による計算機サーバーの運用

### 3. サーバー導入による各分野のCAE技術進展

高性能化した計算機サーバーの活用により、大規模解析や連成解析など、従来不可能であった解析領域や解析手法への挑戦が可能となったことから、CAE技術開発を進めている。以下、その事例を紹介する。

#### 3-1 構造解析（応力解析）

構造解析は機械や構造物の信頼性に直結する変形の大きさや強度・寿命の評価が可能であり、あらゆる分野で活用されている。近年は高精度化の要求レベルが高まり、個々の部品をより詳細にモデル化し、多数の部品の相互作用まで考慮するための大規模化や、熱・流体・電磁界などとの連成解析ニーズが高まっており、当社でも技術開発に注力

している。今回はその一例として、複数のコア<sup>\*5</sup>を持ち通信容量の増大に期待できるマルチコア光ファイバのコネクタ設計に構造解析を活用した事例を紹介する。

光ファイバ同士を接続する光コネクタは、接続損失を小さくするため、所定の力で加圧してコア同士を物理的に接触させる必要がある。従来のシングルコア光ファイバは、ファイバ中心に一つのコアのみを有するので、ファイバ接続部の中央、半径10 $\mu\text{m}$ 程度が接触していれば良いため(図2(a))、特に問題は生じなかった。一方マルチコア光ファイバは、複数のコアを有するため、全てのコア同士を接触させるのに半径50 $\mu\text{m}$ 以上の範囲を確実に接触させる必要がある(図2(b))。そのため、構造解析によりその接触半径を予測できる接続シミュレーション技術を開発し、コネクタの接続条件を最適化する必要があった。

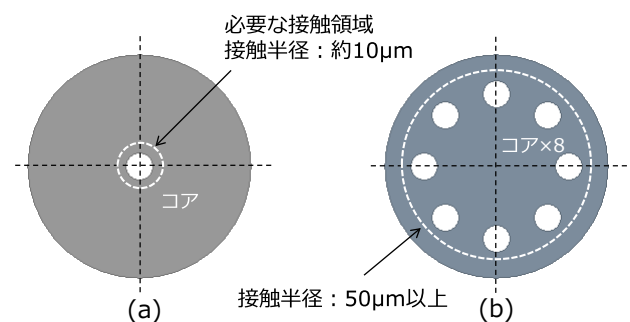


図2 シングルコア光ファイバ(a)とマルチコア光ファイバ(b)の接触半径比較

接触半径は、光ファイバ端面の形状や光コネクタとの相対位置など複数の設計条件に依存している。そのため最適な設計条件を見出すには、その設計変数の組み合わせから膨大な数の接続シミュレーションを短時間で実行して結論を導く必要があり、従来では不可能であったが、高性能な計算機サーバーによりそれが可能となった。

図3に8コアマルチコア光ファイバの接続シミュレーション結果の一例を示す。接触を示す圧力の発生領域から接触

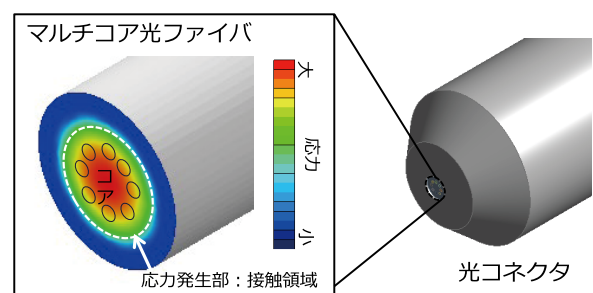


図3 接続シミュレーションによる接触半径結果

半径が得られていることが確認できる。本シミュレーション技術の活用により、8コアマルチコア光ファイバを用いたコネクタの接続損失を十分に制御できる製造条件を見出すことに成功し、試作評価でも接続損失の平均値が0.07dB以下と良好であることを確認している<sup>(1),(2)</sup>。

構造解析分野では、本事例のような製造条件導出だけでなく、強度・寿命評価技術の開発も進めている。また設計期間を大幅に短縮可能な自動最適化技術との融合も推進しており、本手法も自動化を図る予定である。

### 3-2 流体解析

流体解析は気体、液体の流動とそれに伴う熱流の評価が可能であり、構造解析に並んで多くの分野で活用されている。また、流体解析は、多数のコアを利用して計算速度を速める並列計算と相性が良く、構造解析では10~20コア程度で速度が頭打ちになるのに対し、大規模な流体解析では1000コアを使うことでほぼ1000倍の高速化が実現できるため、様々な設計シーンで活用が進んでいる。また半導体製造装置では化学反応、電気めっき装置では電流・イオン拡散・電気化学反応現象など、多様な分野との連成解析ニーズが高いのも特徴である。今回、その一例として、絶縁フィルム上に銅箔で回路形成した配線材<sup>(3)</sup>で、スマートフォンなど最先端の電子・情報機器に搭載されているFPC (Flexible printed circuits) の電気めっき厚み予測向けに、電流、イオン拡散を連成させた流体解析技術を開発した。

電解めっきで厚みを均一化するためには、めっき槽の電極などの形状による電流分布の偏り、めっき液滞留等による金属イオン供給の局所減少などを抑制する必要がある。そこで、当社では製品全体（スケール：100mmオーダー）のマクロ解析と、スルーホール等（スケール：10~100 $\mu$ mオーダー）のミクロ解析のめっき厚み予測技術の開発を進めている。マクロ解析においては、製品、電極とその周辺部材を考慮した電流分布から製品全体のマクロなめっき厚み分布を予測できる技術を開発している。一方、ミクロ解析においては、めっき液の流れと電流分布が相互に影響を及ぼすためそれを考慮した複雑な計算（連成解析）が必要となる。また、製造条件決定に活用するには、短時間でこの複雑な連成解析の計算を実行し、解析結果を得る必要がある。

今回、導入した計算機サーバーを活用して、この複雑な連成解析に対して高精度かつ短時間で結果が得られるめっき厚み予測技術を確立した。図4はミクロ解析を示しており、めっき液の流れと電流分布を連成させて同時に解析することで、図5のようなめっき厚みの時間的な成長変化を可視化し、実物のめっき形状を再現することに成功した。本回路厚み予測技術の開発により、ミクロ領域からマクロ領域まで、全域の予測が可能となり、本技術の活用により製品の品質化を進めている。

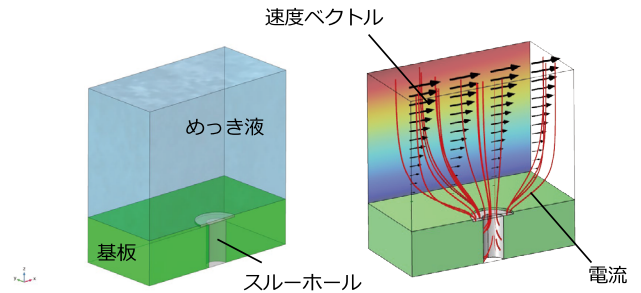


図4 めっき液流れと電流分布の連成解析

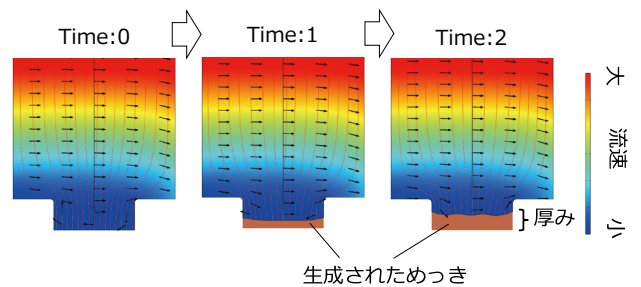


図5 めっき厚みの時間的变化

### 3-3 電磁界解析

電磁界解析は電磁界を支配する4つのマクスウエル方程式の全てを解くことで、高周波信号（電磁波）の伝搬を評価可能な手法である。高周波信号は目に見えない上に、周波数が高くなるほど、わずかな回路の変化で反射して届かなかったり、ノイズとして空間に放射されたりするため、CAEによる設計が必須となる分野である。近年、自動運転や5G向けに高速通信技術開発ニーズが急速に高まっており、本分野の活用は当社でも急拡大している。

ただし高速通信に対する電磁界解析、すなわち電磁界解析の高周波対応には二つの大きな問題がある。1点目は計算規模の問題である。周波数の約3乗に比例して有限要素法<sup>\*6</sup>におけるメッシュ分割数が増大するため、周波数が10倍になると計算規模が1000倍となる。さらに電磁界解析は隣接部位以外にも電磁誘導により直接相互作用するため、構造や流体解析と同程度の規模でも方程式が複雑となり、大量のメモリを要する。導入した計算機サーバーでは、電磁界解析向けにメモリを大幅に増やしており、急速に進む高速通信技術の開発ニーズへの対応が可能となった。

問題の2点目は設計図面と実物形状のずれの影響である。伝搬する信号波長は通信速度に反比例して短くなるため、高周波化に伴い部品の微細な形状変化が通信性能に大きく影響し、CAE結果が実測結果と乖離するという問題が顕在化してくる。この問題に対する対策として、従来の図面からではなくX線CT像からコネクタ実物の形状情報を取得して解析モデル<sup>\*7</sup>を作成する形状設計手法を構築した。

その適用事例として、車載高速通信コネクタの事例を紹介する。車載用通信コネクタにおける通信性能の設計には従来よりCAEを活用しているが、車載通信の高速化に伴い、従来の設計図面から解析モデルを作成する手法では通信性能におけるCAE結果が実測結果と乖離する問題が生じていた。例えば近年車載化されているEthernetは従来のCAN通信<sup>\*8</sup>と比べ100~10,000倍高速となり<sup>(4)</sup>、伝搬する信号波長は1/100~1/10000に短くなる。図6の上図には図面と実測（X線CT像）との形状の違いを示すが、コネクタの圧着による変形や伸び、差し込みズレなどの形状変化があることが確認できる。高周波化により微小な形状まで考慮する必要があるため、それを構成する要素数が膨大となり計算負荷が大きくなるが、導入した計算機サーバーは、この形状設計手法を可能としている。図6下のグラフに入力信号の応答状態から製品各部の特性を評価した結果を示すが、従来の図面からの手法で得られた特性インピーダンスが実測値と一致しないのに対し、本手法では実測結果と一致しており、解析精度が向上したことが確認できる。

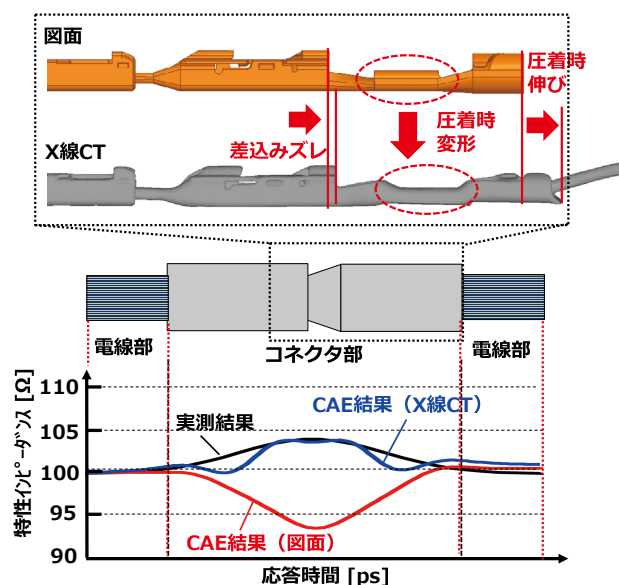


図6 車載コネクタの形状比較と通信性能（特性インピーダンス）の実測とCAE比較

同様の設計・開発を高速通信用コネクタ以外にも積極的に展開しており、今後も高周波化ニーズに合わせてインフラ整備と技術開発、双方を推進していく。

### 3-4 計算科学

計算科学はさまざまな現象を表す物理の方程式を計算機で解くことで原子レベルでの現象の理解、予測や材料の設計が可能であり、近年のコンピュータ技術の発展もあり多くの分野で活用されている。しかし、膨大な原子の挙動を計算するため計算負荷が大きく、計算領域の大規模化や計

算の長時間化が大きな課題となっていた。今回、導入した計算機サーバーで、その課題を克服しアルミ線材の時効析出シミュレーション技術を開発したので以下に示す。

軽量化でニーズが高まっている車載用アルミ線材は特定の元素を添加すると時効析出工程によって高強度化が可能となる。時効析出とは、時間経過とともに添加元素の原子が凝集して析出する現象であり、その析出物の状態（サイズ、形状、密度）で材料特性が決定される。析出物（10~100nm）の状態を制御して最適な時効析出条件を見出すには、凝集初期であるクラスタ（約1nm）の状態を正確に捉え、凝集メカニズムを解明することが重要である。しかし、サイズが小さく分析装置で容易に観察できない問題があり、クラスタの経時変化を可視化できる第一原理計算<sup>\*9</sup>による時効析出のシミュレーション技術の開発に取り組んだ。

時効析出の計算も大量の原子や空孔の挙動を取り扱うため計算負荷がかかるので、数百原子の計算が限界であり、実用化は困難であった。今回、導入したサーバーと計算プログラムの高速化により、数万原子という膨大な原子数の計算が可能となった。図7はアルミ線材の時効析出計算による添加元素の原子挙動を示しており、時効析出処理により原子が集まりクラスタが形成されることを示している。

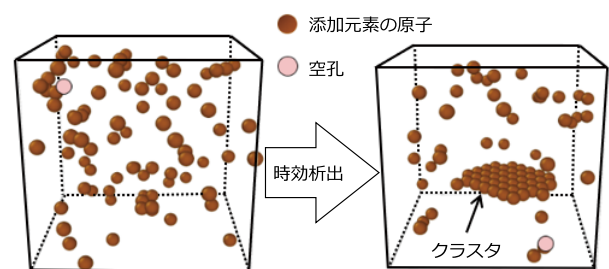


図7 アルミ線材の時効析出計算（アルミ原子は非表示）

本シミュレーション技術は時効析出条件の最適化による製品性能の向上や、製品の高強度化に有効な添加元素の探索に活用している。

### 3-5 粉体解析

粉体解析は食品、衣料品、電子材料など粉体を使った様々な製造条件の検討や装置の設計に活用されている。当社でも複数の金属を微細な粉末の状態では圧縮成形し焼き固める（焼結）粉末冶金法で製品を製造しており、その製造プロセスの最適化などに活用している。本分野では、膨大な数の粉体の運動を取り扱うため、例えば粉体の形状を球状、サイズを均一にするなど簡略化せざるを得ない。そのため解析精度が低くなる課題があった。

粉体表面へ薄膜形成する場合には、例えば大量の粉体を入れたドラムを回転させながら蒸着法などで用いられる

が、粉体群の中に埋もれ表面に露出していない粉体には成膜されない。そのため、ドラム内で粉体群が滞留なく均等に混合する必要がある。実験で大量の粉体挙動を把握することは困難であることから、各粉体の挙動を追跡することができる個別要素法<sup>\*10</sup>を用いたCAE技術の構築に取り組んだ。これまでの攪拌シミュレーションでは1000万と膨大な量の粉体の運動を取り扱うため計算負荷が大きく、実際の粒度分布を考慮しない、または粉体を粗視化する、などの近似的な工夫を適用していたため解析精度が低く、粒子の挙動を定性的にしか評価できない課題があった。しかし、今回、導入した計算機サーバーの活用で粒度分布の考慮が可能となり、高精度な粉体の攪拌シミュレーションを実現できた。

図8はドラムを回転させた時の各粉体の軌跡を示しており、各粉体の挙動を可視化できている。この解析結果から粉体群に埋もれず表面が露出している時間を算出するプログラムを開発し、各粉体の薄膜厚みを予測する手法も確立、粉体表面に形成した薄膜の厚さ分布を評価したところ、実測を再現できることを確認した。

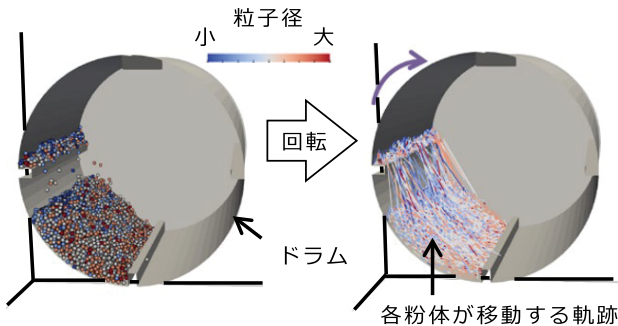


図8 粒度分布を持つ粉体の攪拌シミュレーション

本手法は製品の品質向上や低コスト化を目的とした最適な攪拌条件の検討や装置設計に活用している。

#### 4. 結 言

当社に限らず、新製品開発やプロセス改善、量製品の信頼性評価で行われている設計、試作、実験、検証のサイクルにおいて、CAEの活用が不可欠な状況となっている。製品や製造プロセスに応じてカスタマイズしたCAE技術を迅速に開発して活用することが競争力の鍵となるが、そのためには大規模解析、連成解析、計算科学など「高精度な計算モデルの構築」とその計算を可能とする「計算機サーバーの高性能化」をバランス良く推し進める必要がある。本稿では、その事例を紹介した。DX（デジタルトランスフォーメーション）にも結び付く、これらの活動では事業部門／開発部門と解析部門が一体となった活動が不可欠で

あり、同時に解析部門以外でもCAEを日常的に活用できるようにすることがポイントとなる。今後の取組みでは、それらに向けたCAE使用環境の整備を行い、モノづくりの基盤強化を推進していく。

#### 用語集

##### ※1 CPU

Central Processing Unitの略で中央演算処理装置。周辺機器やソフトウェアから受け取るすべての指示を処理する部品。

##### ※2 コア (CPU)

CPUの中心部分で実際に計算処理を行う場所。近年では、ひとつのCPUに複数のコアを持ち、一度に複数のデータ処理を行う「マルチコア」が主流。

##### ※3 メモリ

コンピュータで処理するデータやプログラムを一時的に記憶する部品で、主にコンピュータの処理速度を高速にする役割を担う。

##### ※4 ストレージ

コンピュータ内で扱ったデータやプログラムなどのデジタル情報を保存・記憶する装置やシステム。大容量の保存や長期的な記憶が可能。

##### ※5 コア (光ファイバ)

光を伝搬する導波路。光ファイバは中心部のコアとその周囲を覆うクラッドからなっている。コアはクラッドと比較して屈折率が高く設計されており、光は全反射という現象によりコア内に閉じ込められた状態で伝搬する。

##### ※6 有限要素法：FEM (Finite Element Method)

構造物を複数の有限個の要素（メッシュ）に分割して数値解析を行う解析手法。要素は計算精度に大きく影響し、より細かく分割した方が理論解に近づくが、要素数も増え計算負荷が大きくなる。

##### ※7 解析モデル

有限要素法の計算に必要で、計算機で計算するため解析対象物を単純な形状をした要素（メッシュ）に分割したもの。

##### ※8 CAN通信

Controller Area Networkの略で、主に自動車の電子制御ユニット間などの通信に用いられる規格で、最大1Mbpsでの通信が可能。

## ※9 第一原理計算

経験則に頼らず、量子力学に基づいた法則から理論計算だけで様々な物理量を求めていく手法。

## ※10 個別要素法：DEM (Distinct Element Method)

多数の個体粒子の運動を、粒子ごとの並進および回転の運動方程式に基づいて時刻歴に解き進める解析手法。

## 参 考 文 献

- (1) T. Morishima, K. Manabe, S. Toyokawa, T. Nakanishi, T. Sano, and T. Hayashi, "Simple-Structure low-loss multi-core fiber LC connector using an align-by contact method." Optics Express, Vol29, Issue 6, pp.9157-9164 (2021)
- (2) 森島哲 他、「低損失LC型マルチコア光ファイバコネクタ」、住友電工テクニカルレビュー第199号、pp12-17 (2021年7月)
- (3) 春日隆 他、「ナノ導電ペーストによる薄型フレキシブルプリント回路」、SEIテクニカルレビュー第186号、pp4-7 (2015年1月)
- (4) 川内偉博 他、「車載Ethernet物理層シミュレーション技術」、SEIテクニカルレビュー第194号、pp19-23 (2019年1月)

## 執 筆 者

三島 英彦\* : 解析技術研究センター グループ長



高橋健一郎 : 解析技術研究センター グループ長



中村 悠一 : 解析技術研究センター グループ長



寺尾 岳見 : 解析技術研究センター グループ長  
博士 (工学)



島田 茂樹 : 解析技術研究センター 部長



\*主執筆者