

2023年5月31日(水)

会場B

OS23 ベンダー・ユーザーセッション ～市販ツール・サービスの可能性を探る～

[B-05] OS23 ベンダー・ユーザーセッション ～市販ツール・サービスの可能性を探る～

座長:渡邊 浩志(HEXAGON)

16:45 ～ 18:15 会場B (1F 大会議室 102)

[B-05-01] 大規模解析の計算コスト削減に寄与する「高速シミュレーションのためのモデル低次元化ツールのご紹介」 ～ Model Reduction inside

Ansys(MRiA)～

*喜多 雅子¹ (1. サイバネットシステム株式会社)

16:45 ～ 17:00

[B-05-02] 圧電性ポリ乳酸繊維を用いたカバリング系の圧電シミュレーション

*山永 哲也¹ (1. 株式会社ピエクレックス)

17:00 ～ 17:15

[B-05-03] ギャ解析ソフトウェア Transmission3Dの紹介

*山城 健太¹、山形 陽¹、長嶋 洋輔¹ (1. 株式会社アドバンストCAEソリューションズ)

17:15 ～ 17:30

[B-05-04] 商用コードによるトポロジーおよび形状最適化と3Dプリンターを用いたデジタルもの創りプロセス

*岩井 信弘¹、櫻井 文嶺¹、野村 利成¹、加藤 義孝¹ (1. SOLIZE株式会社)

17:30 ～ 17:45

[B-05-05] MPS粒子法を用いた地下鉄駅構内浸水時の可視化および人体への流体力の推定

*戸倉 直^{1,2}、永井 英一¹ (1. プロメテック・ソフトウェア株式会社、2. 株式会社トクラシミュレーションリサーチ)

17:45 ～ 18:00

[B-05-06] 繊維強化複合材製品における Composites Modeler for Abaqus/CAEを用いた FEMモデル化

*工藤 智駿¹、石川 覚志¹ (1. 株式会社IDAJ)

18:00 ～ 18:15

OS23 ベンダー・ユーザーセッション ～市販ツール・サービスの可能性を探る～

[B-05] OS23 ベンダー・ユーザーセッション ～市販ツール・サービスの可能性を探る～

座長:渡邊 浩志(HEXAGON)

2023年5月31日(水) 16:45 ～ 18:15 会場B (1F 大会議室 102)

[B-05-01] 大規模解析の計算コスト削減に寄与する「高速シミュレーションのためのモデル低次元化ツールのご紹介」 ～ Model Reduction inside Ansys(MRiA)～

*喜多 雅子¹ (1. サイバネットシステム株式会社)

16:45 ～ 17:00

[B-05-02] 圧電性ポリ乳酸繊維を用いたカバリング系の圧電シミュレーション

*山永 哲也¹ (1. 株式会社ピエクレックス)

17:00 ～ 17:15

[B-05-03] ギャ解析ソフトウェア Transmission3Dの紹介

*山城 健太¹、山形 陽¹、長嶋 洋輔¹ (1. 株式会社アドバンストCAEソリューションズ)

17:15 ～ 17:30

[B-05-04] 商用コードによるトポロジーおよび形状最適化と3Dプリンターを用いたデジタルもの創りプロセス

*岩井 信弘¹、櫻井 文嶺¹、野村 利成¹、加藤 義孝¹ (1. SOLIZE株式会社)

17:30 ～ 17:45

[B-05-05] MPS粒子法を用いた地下鉄駅構内浸水時の可視化および人体への流体力の推定

*戸倉 直^{1,2}、永井 英一¹ (1. プロメテック・ソフトウェア株式会社、2. 株式会社トクラシ
ミュレーションリサーチ)

17:45 ～ 18:00

[B-05-06] 繊維強化複合材製品における Composites Modeler for Abaqus/CAEを用いた FEMモデル化

*工藤 智駿¹、石川 覚志¹ (1. 株式会社IDAJ)

18:00 ～ 18:15

大規模解析の計算コスト削減に寄与する「高速シミュレーションのためのモデル低次元化ツールのご紹介」

～Model Reduction inside Ansys(MRiA)～

Introduction of "model reduction tool for high-speed simulation"
to reduce the calculation cost of large-scale analysis

喜多 雅子

Masako Kita

サイバネットシステム株式会社 デジタルエンジニアリング事業本部エンジニアリング事業部 メカニカル技術部
(〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町3-5-7, E-mail: kita@cybernet.co.jp)

The following two methods are conceivable as "fast calculation of transient large-scale analysis". When the distribution of the entire model is required, parallel processing calculations are used, and when focusing on changes in the value of a certain evaluation point, the method of reducing the order of the model "Reduced Order Modeling (ROM)" is suitable. I will introduce the functions and examples of Model Reduction inside Ansys that can create this ROM model at high speed.

Key Words : ROM, Krylov Subspace method

1. はじめに

「過渡的な大規模解析を高速に計算する」手法としてどのような方法が考えられるでしょうか？高性能なPCを利用する、並列処理を利用する、低次元化モデルを利用するなどが考えられます。モデル全体の分布が必要な場合、ある評価ポイントの時間変化が知りたい場合など目的によってとる手段が異なります。前者の場合には、高性能PC/並列処理計算などを利用することで計算速度を向上させるのがよいでしょう。後者の場合は、モデルを低次元化して必要な結果のみを取り出す方法が適しています。この3DのFEM解析の精度を保ちながら低次元化する方法をReduced Order Modeling (ROM) もしくはModel Order Reduction (MOR) [1]といいます。3DモデルをROM化することで、3D解析で数時間掛かる過渡解析も1D-CAEツールを利用して数十秒程度で解析可能です。本セッションではROMモデルを超高速に作成できるツールであるModel Reduction inside Ansys(MRiA)をご紹介します。

2. MRiAの特徴について

MRiAはドイツのCADFEM社が開発したクリロフ部分空間法[2][3]による線形モデル低次元化ツールです。このツールの特徴はつぎの3つになります。

(1) Ansys Mechanicalにアドオンしたツール

Ansys Mechanicalの過渡伝熱解析・熱変位解析・構造時刻歴/周波数応答解析・圧電解析・音響解析など様々なデータをROM化することができます。メインは伝熱・熱変位解析でAnsysが作成するマトリクスを取り出し、クリロフ部分空間法にてベクトル列Vを作成して低次元化した

後、Ansys Twin Builder・MATLAB/Simulink・VHDL-AMS・Modelicaなどの形式ファイルを作成することができます(図-1参照)。構造・圧電・音響解析のROM化はコマンドを利用して低次元化可能です。

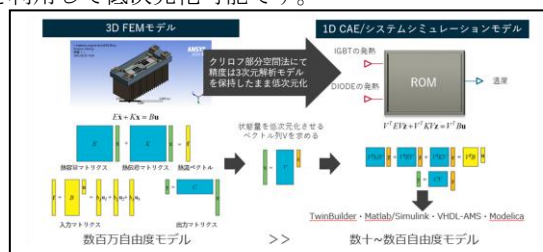


図-1 クリロフ部分空間法によるROM化イメージ

(2) 低次元化が超高速に実行できること

主によく使われる伝熱解析で説明します。

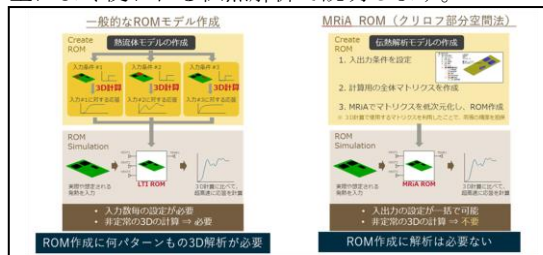


図-2 LTI ROM とクリロフ部分空間法の違い

線形・非定常ROMモデルを作成手法の一つとして線形時不変システム[4] (LTI-ROM) があります。この手法の場合、発熱体の数だけステップ荷重の3D FEMの過渡解析を実施し、その応答結果を利用して1個のROMモデルを作成します。MRiAはクリロフ部分空間法を利用しているた

め、入出力条件と次元の大きさを設定するのみで、3D過渡解析を実施することなくROM作成可能です(図-2参照)。つまり、基板上にIGBTなどのチップが多々配置されているPCU・ECUなどの場合、ROM作成時間の差は歴然です。

(3) 動的に変化するマトリクスを作成できること

ROMモデルは状態空間形式に出力されます。 1D-CAE ツールで状態空間モデルを取り込み、解析を実施しますが、温度・時間などで熱伝達に変化する現象も取り入れることが可能です。通常の熱伝導方程式を式(1)のように表記することが可能です。

$$E\dot{T} + \left(K_0 + (h - h_0)K_h\right)T = f(h_0)\left(\frac{h}{h_0}\right)T_{bulk} \tag{1}$$

- ここで：
- E ：熱容量マトリクス
- K_0 ：基準熱伝達における熱伝導マトリクス
- K_h ：熱伝達ダイナミック熱伝導マトリクス
- h_0 ：基準熱伝達率
- h ：熱伝達率
- T_{bulk} ：雰囲気温度
- $f(h_0)$ ：基準熱伝達率時の熱流ベクトル
- T ：温度ベクトル

ROMモデル作成時に利用した熱伝達を基準熱伝達とし、MRiAを利用してEマトリクス、 K_0 マトリクス、 K_h マトリクスに加えて、入力マトリクス、出力マトリクスを作成します。 h と h_0 の差分をダイナミック熱伝導マトリクスに掛け合わせることで時間変化する熱伝達を表現します。

3. 熱変位解析事例

ここでは図-3に示す工作機械モデルの熱変位解析例を紹介します。モータの発熱や切削時摩擦熱により長時間利用していると工具先端が変位します。入力にはモータ発熱・摩擦発熱・その他温度固定などで、出力は発熱体の温度および工具先端の変位量です。

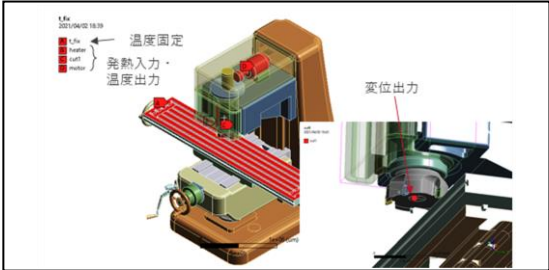


図-3 工作機械モデル入出力

過渡熱解析と静的構造解析の連成事例であり、直接連成場要素を利用したAnsysとROMモデルで同条件の解析を30,000[s]まで計算しました。ROM化したモデルの1Dシ

ミュレーションを図-4に示します。また図-5は工具先端の変位量の比較結果となります。AnsysとROMモデル結果は完全に一致していることがわかります。

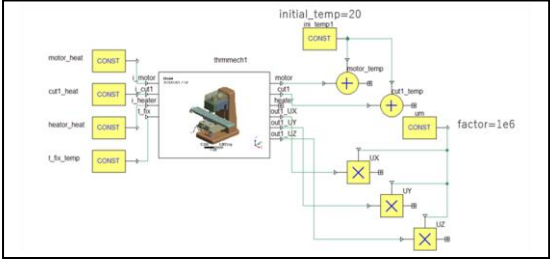


図-4 Ansys Twin Builder での 1D シミュレーション

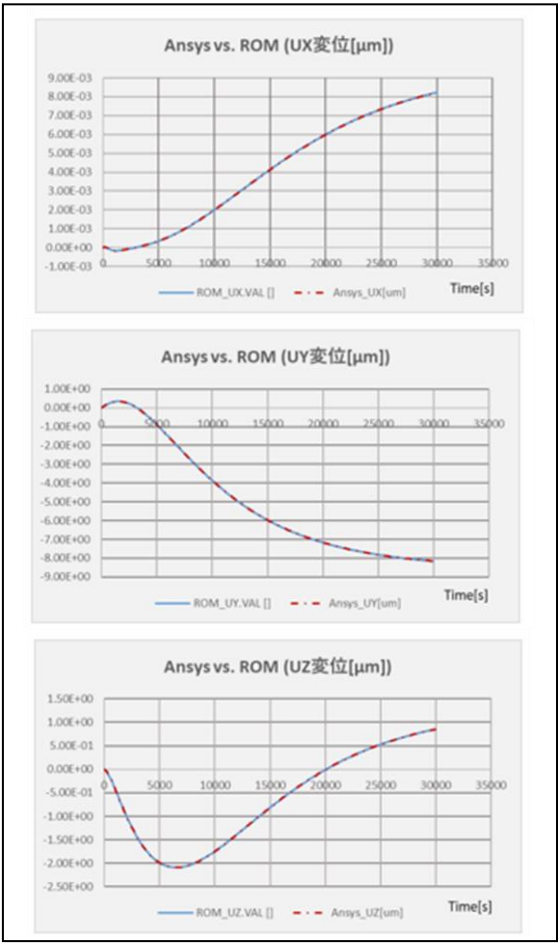


図-5 工具先端変位の結果比較

表-1 計算時間比較表

	Ansys	ROM
マトリクス サイズ	約170万	140
使用コア数	16	ROM作成：4 1D計算：1
計算時間 Δt：100[s]	2時間30分	2秒
ROM作成時間	-	8分30秒

モデル規模・計算時間などについては表-1を参照ください。Ansysモデルは節点数約425,000節点であり、各方向の

変位自由度と温度自由度を持つため、約1,700,000自由度モデル（マトリクスの大きさ）となります。それに対してROMモデルは次元数140（マトリクスの大きさ）で表現することができます。ROMモデルでの1Dシミュレーションは2秒ですが、一番の注目はROMモデルを約9分で作成できることです。

4. 伝熱解析事例

(1) 大規模解析の高速化

図-6に示す6個のIGBTおよびダイオードが並んだ電子機器の熱解析事例です。強制対流によってヒートシンクは冷却されます。図-7に示す位相差を含む発熱を考慮した解析を実施するためには、時間積分間隔をこの波形が表現できるだけの微小な Δt に設定し、解析を実施します。

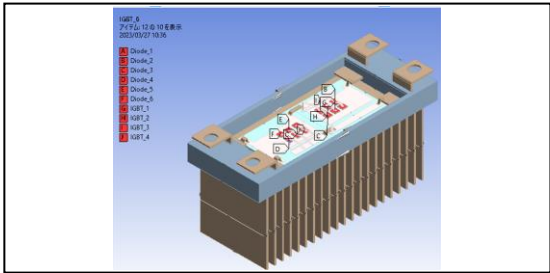


図-6 電子機器モデル図

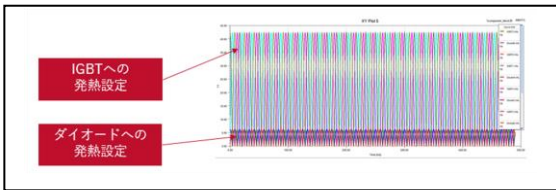


図-7 Time vs. IGBT・ダイオードの発熱

この解析では、12個の発熱体の損失を入力とし、発熱体の平均温度を出力として、MRiAでVHDL-AMS形式ファイルのROMモデルを作成し、図-8に示すようにAnsys Twin Builderにて1Dシミュレーションを実施しました。

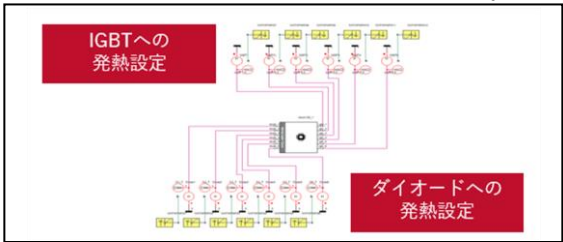


図-8 電子機器伝熱 1D シミュレーション

IGBT1の温度変化をAnsys Mechanicalと比較し、結果の精度および計算時間等を検証します。図-9には、IGBT1

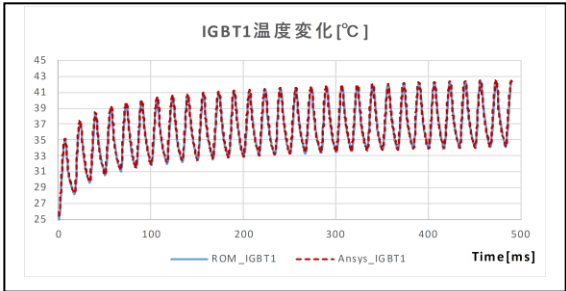


図-9 IGBT1 の温度結果比較

の温度結果を比較していますが、Ansysの伝熱解析結果と1Dシミュレーション結果が一致していることを確認できます。また、モデル規模・計算時間などについては表-2を参照ください。ROMモデル作成・計算時間が圧倒的に速いことが確認できます。

表-2 計算時間比較表

	Ansys	ROM
マトリクス サイズ	約20万	480
使用コア数	4	ROM作成：4 1D計算：1
計算時間0.49[s] $\Delta t : 0.5[ms]$	2時間50分	15秒
ROM作成時間	-	2分55秒

(2) 1Dモデルによる熱伝達・質量流量の時間変化

ここでは強制対流のファン特性が変化した場合を想定した1Dシミュレーションを実行してみました。Ansys伝熱解析機能には、熱流体パイプ要素(Fluid116)が存在し、シンプルな流路に対しては空気の流れおよび上流節点の温度、ヒートシンク壁面の熱伝達を利用して空気と固体間の熱の授受を表現することができます。熱伝達率および流体の質量流量を可変パラメータとするROMモデルを利用して作成することで、時間依存のROMパラメータを設定することが可能です。

このモデルでは、図-10に示すようにヒートシンク間に22本のパイプ要素群（Fluid）を用意しました。

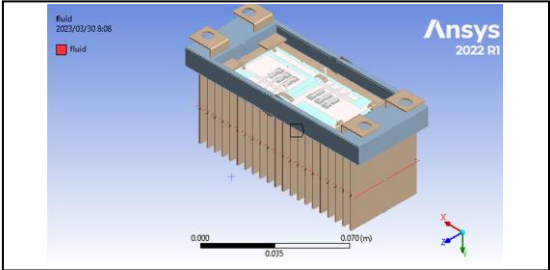


図-10 熱流体パイプ要素

このモデルの可変パラメータを含めた式は式(2)のように表現されます。フィン間の断面積は同じであるため、設定する質量流量も等しくなり、熱流体パイプ要素に対してまとめて1つの質量流量入力ピンを用意しました。ヒートシンクの熱伝達に関してはFluidの近傍節点の温度が雰囲気温度となる1つの熱伝達入力ピンを用意します。ダイナミック熱伝導マトリクスの係数値（ Δh および Δm ）が1Dシミュレーションでの入力値です。

この解析では、MRiAでModelica形式のROMモデルを作成し、図-12に示すようにAnsys Twin Builderにてブロック線図による1Dシミュレーションモデルを作成しています。図-11に示すような熱伝達・質量流量グラフと基準値の差分を入力に加えてIGBT/ダイオード毎に同じ発熱履歴を

設定しました。初期温度0℃として計算後、初期温度分オフセットして、IGBT・ダイオードにおける平均温度を出力しました。

$$E\dot{T} + \left(K_0 + \Delta h \cdot K_h + \Delta m \cdot K_m \right) T = Bu \tag{2}$$

ここで：

- K_0 ：基準熱伝達・基準質量流量における熱伝導マトリクス
- K_h ：熱伝達ダイナミック熱伝導マトリクス
- Δh ：基準熱伝達率との差分
- K_m ：質量流量ダイナミック熱伝導マトリクス
- Δm ：基準質量流量との差分
- B ：入力マトリクス
- u ：IGBT・ダイオードの発熱入力ベクトル

図-13にAnsysとの結果を比較しました。ここでは2つの素子の温度比較を実施しています。計算結果はほぼ一致していることが確認できます。

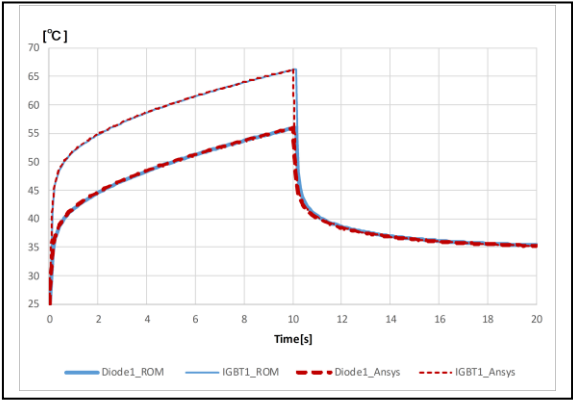


図-13 IGBT1・ダイオード1の温度結果比較

5. 最後に

本セッションでは、熱解析および熱変位問題におけるROMモデル作成および、1Dシミュレーションによる計算高速化についてご紹介しました。MRiAのROMモデル作成が高速なため、形状変更・材料変更のROMモデルも簡単に作成でき、1D解析による高速パラメータスタディが可能です。ROMモデルを活用することで、解析時間短縮・ハードリソースの削減など解析効率を大幅に改善することが可能となります。

また、本セッションではご紹介しませんでした。制御とともに利用してデジタルツインのバーチャルセンサの役割を果たすことも可能です。

参考文献

- [1] Wilhelmus H.A.Schilders, etc, Model Order Reduction, Springer
- [2] T.Bechtold, etc, Fast Simulation of Electro-Thermal MEMS, Springer
- [3] Athanasios C.Antoulas, Approximation of Large-Scale Dynamical System, SIAM
- [4] 足立修一著,MATLABによる制御工学,東京電機大学出版局

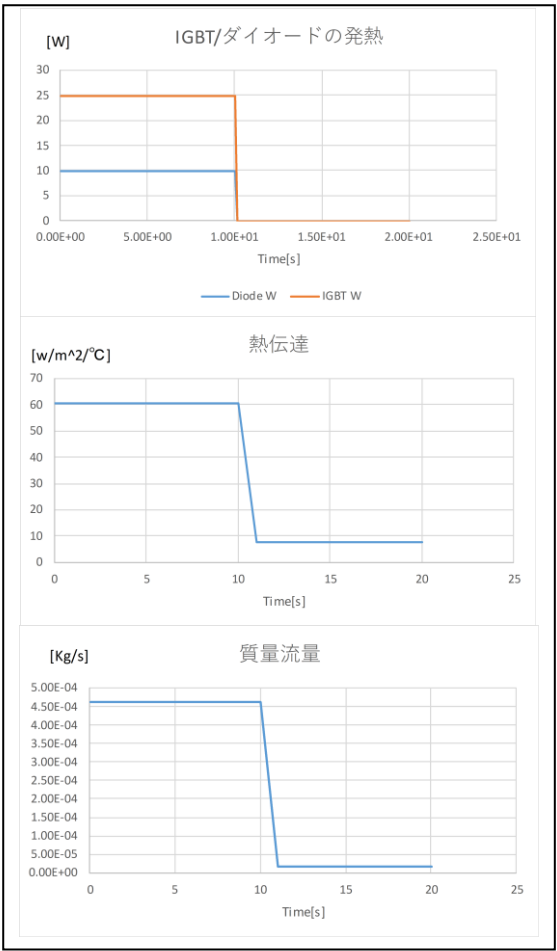


図-11 各種境界条件

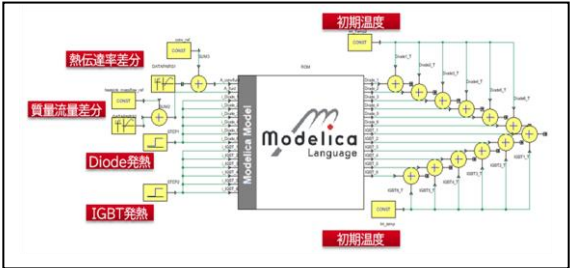


図-12 電子機器伝熱 1D シミュレーション

17:00 ～ 17:15 (2023年5月31日(水) 16:45 ～ 18:15 会場B)

[B-05-02] 圧電性ポリ乳酸繊維を用いたカバリング糸の圧電シミュレーション

*山永 哲也¹ (1. 株式会社ピエクレックス)

ギヤ解析ソフトウェアTransmission3Dの紹介

Introduction of the gear contact analysis software Transmission3D

山城 健太¹⁾ 山形 陽¹⁾ 長嶋 洋輔¹⁾

Kenta Yamashiro, Yo Yamagata and Yosuke Nagashima

1) 株式会社 アドバンストCAEソリューションズ

(〒317-0073 茨城県日立市幸町1-13-11, E-mail: contact@adv-cae.co.jp)

Multiple gears contact analysis in gearbox was a big challenge for conventional FEA software. It took a lot of time to calculate, and its solution was unstable. Also, it took much effort to make tiny mesh on the tooth surface because higher resolution was needed at contact points. Transmission3D made it possible to compute accurately in realistic time. Now we can create fine elements on tooth so easily and fast with Transmission3D, and get accurate contact patterns, bending stress and deformation.

Key Words : Gear contact analysis, FEA, Multiple gear types, Contact patterns

1. はじめに

本論で述べるギヤの解析とは、歯面の面圧とギヤ全体の変形と応力を全て同時に数値計算によって求めることである。ギヤの変形は弾性変形を想定し、未知数として、ギヤにかかる面圧、ギヤの変形・応力を同時に求めるような境界非線形条件における計算である。具体的には、接触する物体の非貫入条件を満たしつつ、運動方程式を解くものである。

従来の汎用FEAソフトウェアを用いて、図-1のような複数のギヤが噛合う際の面圧や曲げ応力を正確に数値計算で予測することは困難であった。ギヤの接触範囲は歯面全体の面積に比べて非常に小さく、有限要素法によりモデル化する際、接触範囲近傍で非常に小さなメッシュサイズを必要とする。また、ギヤの噛合いが進行する過程では、噛合い位置がギヤの回転に合わせて常時変化する。例えば、図-2のように、上側の図では噛合う歯が3歯であり、図の右側から左側にかけての回転の進行により噛合い位置が変化し、同時に噛合う歯が下側の図では4歯となった。この過程を再現するためには、解析ステップごとにメッシュ解像度が高い領域を変化させる必要があるが、実行するには多大な労力と時間を要する。その上、接触点近傍で非常に小さなメッシュを作成すると、そこで算出された面圧値は、メッシュサイズの影響を強く受け、一度サイズを変えると面圧値は大きく変動し、一定の数値解を得ることは非常に困難である。

ギヤ解析ソフトTransmission3Dを使用することで、ギヤアセンブリに含まれるギヤ・シャフト・軸受・ハウジング・キャリアにおける面圧、応力、変形の計算が可能である。歯面修正のような歯面形状に微小量の変更を加えるといったモデル作成や、組み立て誤差・製造誤差の反映も可能で、その影響を予測できる。本論では、ソフトウェアの特徴とギヤボックスの解析事例を紹介する。



図-1 複数のギヤが同時に噛合うモデル

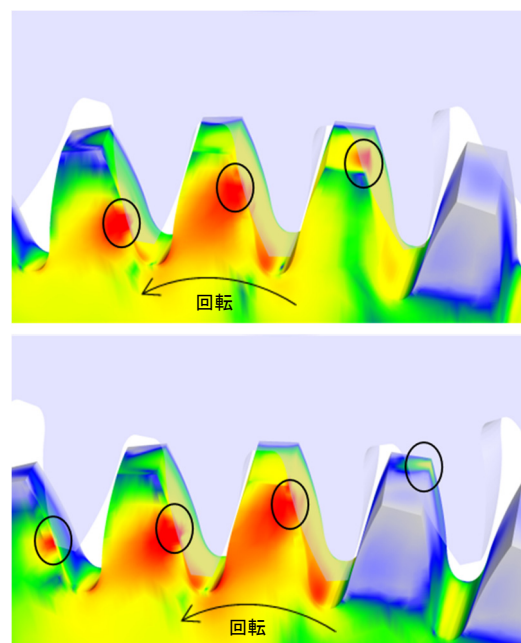


図-2 同時噛合い歯数の変化
(黒色の丸で囲んだ箇所が接触範囲)

2. ギヤ解析ソフトウェアTransmission3Dの特徴

(1) モデル作成

本ソフトウェアを使用し、ギヤボックスのモデルを作成する場合、ギヤ・軸受・シャフトのモデルは諸元を入力する形式を取る。図-3、図-4のモデル作成画面のように、各諸元を入力すると、その入力値が隣のモデルの3Dビューワーで随時反映される。ハウジングやキャリアの形状は、外部の有限要素メッシュ編集ソフトで作成したメッシュファイルをインポートし、モデルを作成することができる。解析タイプとして、静解析・準静解析・動解析(Newmark β)を選択可能である。

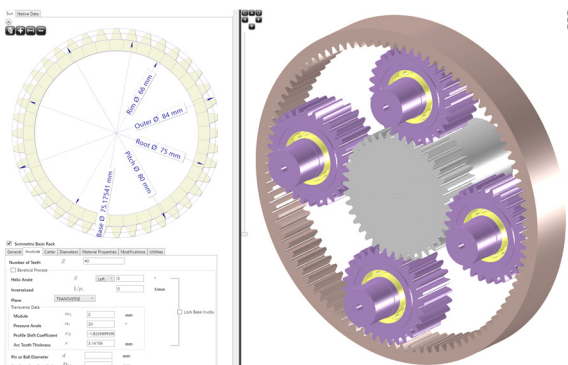


図-3 Transmission3D のギヤモデル作成画面

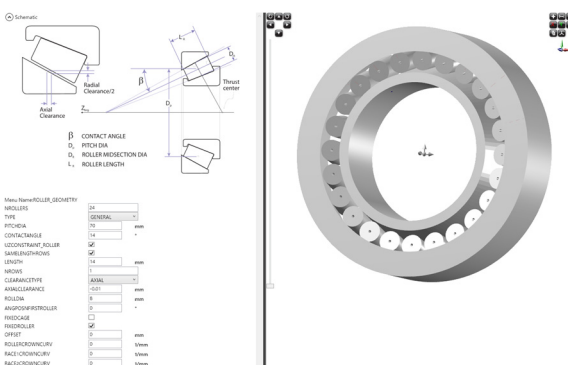


図-4 Transmission3D の軸受モデル作成画面

(2) 解析結果の確認

出力値として、歯面や軸受の面圧、ギヤ・シャフト・軸受・ハウジング・キャリアにおける応力、変形量を出力できる。その他に、ギヤの解析で頻繁に使用される指標として、伝達誤差・噛合い点の滑り速度(図-5)と転がり速度・フラッシュ温度・摩耗・疲労(図-6)・摩擦損失などの項目が出力可能である。動解析をいくつかの回転数の条件で行うと、図-7のような回転数・周波数・変位(もしくは速度、加速度)の振幅の関係を示したギヤのねじり振動のスペクトルマップを作成できる。

ギヤボックスに含まれる要素の変形や応力分布の概況を確認するため、図-8, 9, 10のような3Dビューワファイルを出力する。描画速度を高めるため、要素内部の情報は省略し3Dビューワファイルを作成している。面圧と変形、応力を同時に表示できる機能を有する。

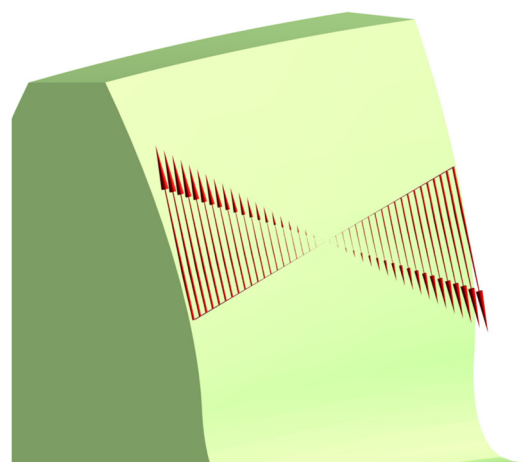


図-5 歯面上の滑り速度(赤色のベクトルの根元が接触線であり、ベクトルの長さや向きが滑り速度の大きさと向きを示す)

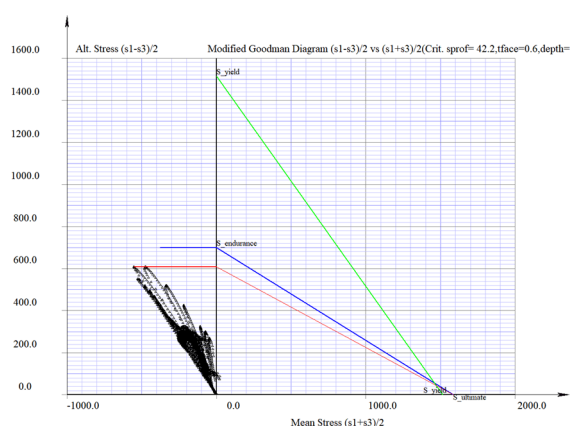


図-6 疲労損傷評価のためのHaigh線図

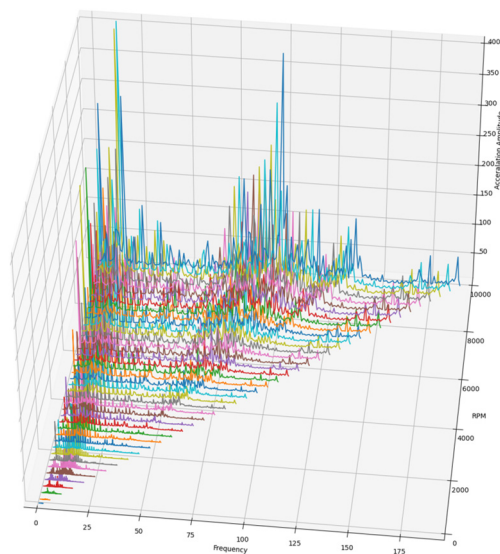


図-7 ギヤのねじり振動のスペクトルマップ

図-8では、局所的に窪んだ箇所が歯車の接触範囲を表している。図-9では、図-8の変形に加えて最小主応力を表示した。歯の手前側面を観察すると、接触面側から歯の裏側の根本部へと応力が伝播した様子が分かる。図-10では、

面圧分布を歯面から外向きに向かって伸びる棒グラフで表している。面圧がかかる方向は歯の表面から内部に向かう方向であるが、目視で確認し易くするためである。噛合い歯面の根元で最大主応力が大きい様子が分かる。

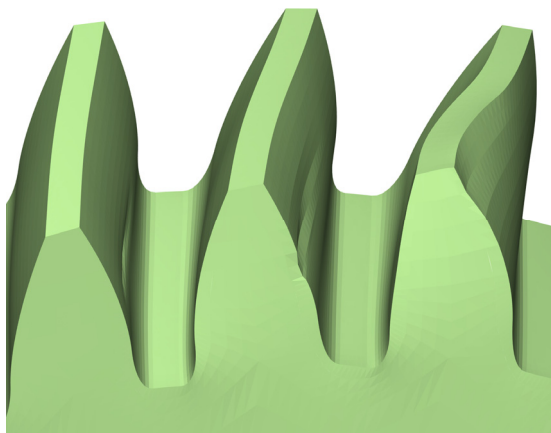


図-8 ギヤ噛合い時の変形（50倍に拡大）

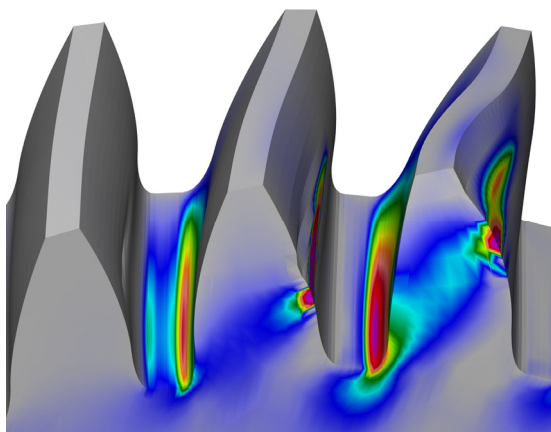


図-9 ギヤ噛合い時の変形（50倍）と最小主応力コンター

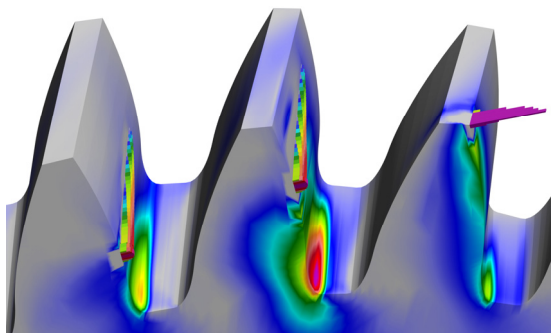


図-10 ギヤ噛合い時の面圧（歯面上の棒グラフ）と最大主応力コンター

3. Transmission3Dの解法

Transmission3Dでは、図-1のような歯車装置に含まれる歯・軸・軸受・ケーシングなどの全ての物体の変形・応力に加えて歯の噛合い部や軸受の面圧も解析できる。境界非線形条件におけるFEAソルバーである。この境界非線形条件において、噛合い箇所の圧縮力・全ての物体の変形

を同時に高速に解析するため、シンプレックス法よりも頑健な修正シンプレックス法を用いる[1]。圧縮力と変形を同時に計算する際には、接触する物体どうしの非貫入条件を満たしつつ、運動方程式を解く。

歯面の形状精度を確保できるような図-11のような高次のFQP（Finite Quasi-Prismatic）要素を使用する[2]。

噛合い部の局所変形領域の解法については、準解析解を用いることで、噛合い部の要素の細分化を行わずに解析を実行できる（図-12）[3]。

ギヤの変形や軸のねじれを正確に解析するためには、軸のずれや傾き、回転といった（図-13）のような剛体変位も考慮する必要がある。そのため、剛体変位も自由度として計算に含める。

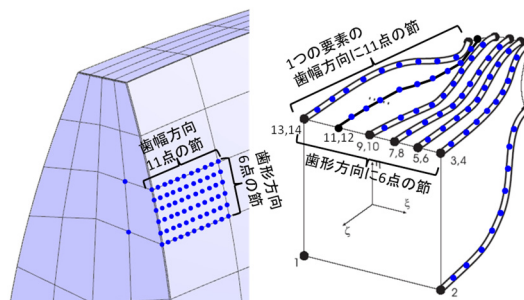


図-11 歯面に使用する FQP 要素

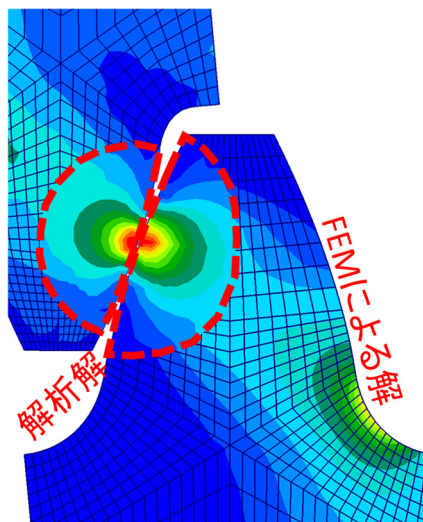


図-12 ギヤ噛合い部周辺の解法

赤い点線で示す噛合い部周辺は準解析解を使用し、それより外の領域はFEMによる解を使用する

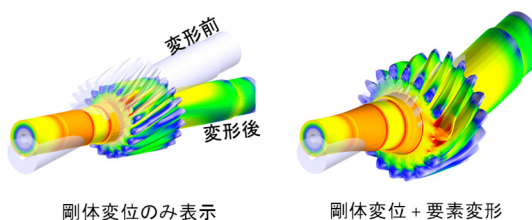


図-13 剛体変位の表示と全変位（剛体変位+要素の変形）の表示

4. ギヤボックスの解析事例

(1) 遊星歯車装置の解析

遊星歯車装置とは、図-14のようにサンギヤ・プラネット・リングギヤが同時に噛合うことで動力を伝達する装置である。通常複数のプラネットを有し、それらを支持するキャリア（図-15）サンギヤ・リングギヤが、共通の回転軸を持つ。キャリア・サンギヤ・リングギヤのうち一つを固定し他の二者を入力・出力として、減速・増速・逆転といった機能を持たせることができる。例えば、サンギヤを入力、リングギヤを固定、キャリアを出力とすると、プラネットは自転しながら、キャリアの回転に合わせて公転する。プラネットの個数が4つの場合、図-16のようにリングギヤは変形する。

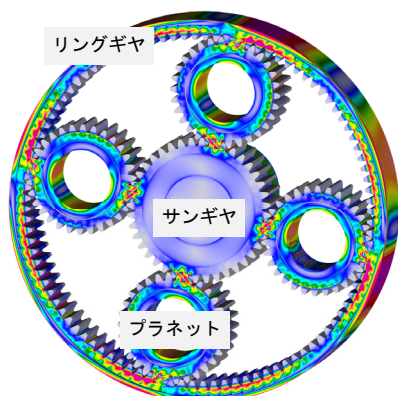


図-14 遊星歯車装置，ミゼス応力表示

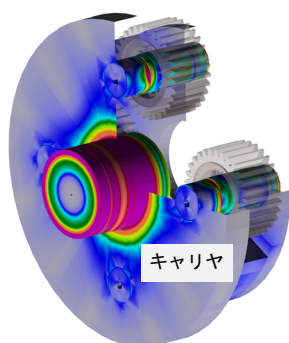


図-15 キャリア（1/4は非表示），ミゼス応力表示

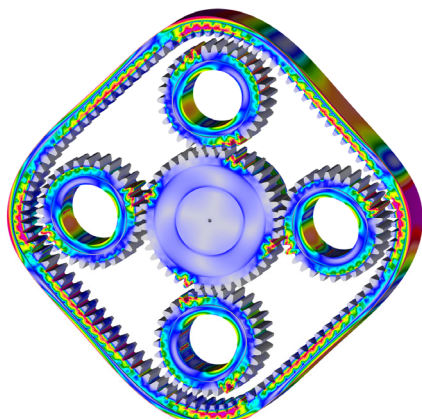


図-16 変形（50 倍に拡大）・ミゼス応力表示

プラネットをサンギヤとリングギヤの間に一つでなく、二つ配置した遊星歯車装置（図-17）や、軸方向にプラネットを複数配置した装置も解析可能である（図-18）。

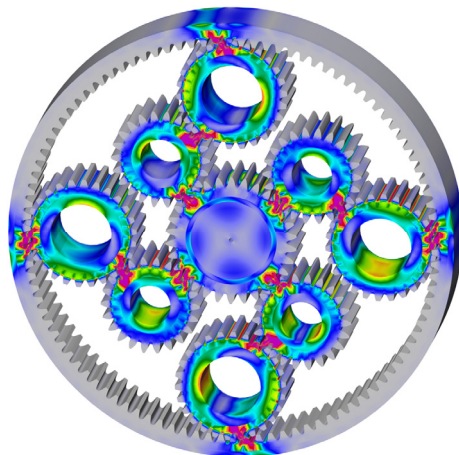


図-17 遊星歯車装置，ミゼス応力表示

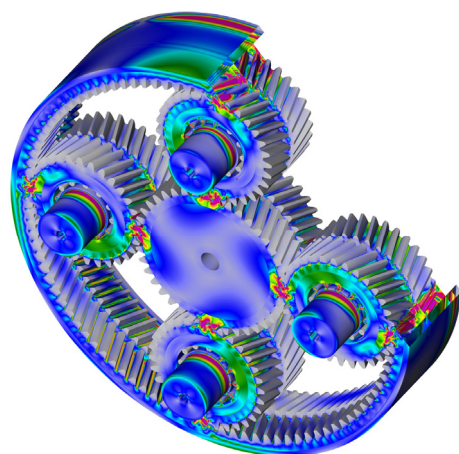


図-18 遊星歯車装置，ミゼス応力表示

図-19に示す解析事例は、遊星歯車装置に加えて複数段の歯車軸を有し、ハウジングや多数の軸受を含む風力タービンギヤボックスである。このような多数のギヤ・軸受を含む歯車装置の解析も可能である。

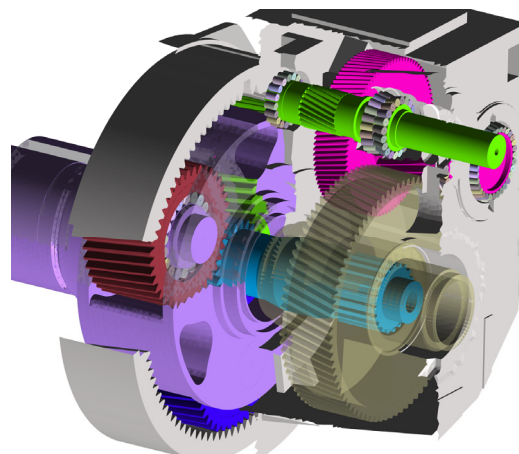


図-19 風力タービンギヤボックス

(2) 自動車終減速装置の解析

自動車用の終減速装置（差動歯車を含むのでデフと称されることもある）は、トランスミッションの駆動力を直角方向に変換する装置であり、減速歯車装置と車両旋回時の左右輪の回転差を吸収する差動装置などにより構成されている[4]。本節で紹介するのは、自動車用のリアアクスルであり、図-20, 21, 22に示すようなハイポイドギヤと図-23の差動装置（ディファレンシャルギヤ）によって構成される。動力はプロペラシャフトから入力され、ハイポイドピニオンの噛み合い部へと流れる。ハイポイドリングギヤにはキャリアが付属し、一体となって回転する（図-23）。このキャリアには、4つのベベルピニオン（図-23, 24）が付随し、キャリアの回転に合わせてベベルピニオンが公転する。これらの4つのベベルピニオンと噛み合う2つのベベルギヤ（図-25）は、それぞれ長いシャフトを有し、シャフトの先には左右輪のタイヤが接続される。この左右輪の回転数として異なる値を設定した場合、自動車が右左折する状況を模擬し、左右で同じ回転数を設定した場合、自動車が直進する状況において、ギヤの荷重・応力・変形量を解析することができる。

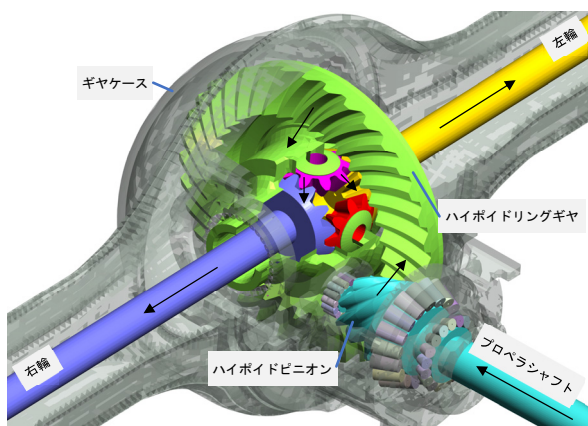


図-20 自動車用の終減速装置
黒色の矢印が動力の流れ方向を示す

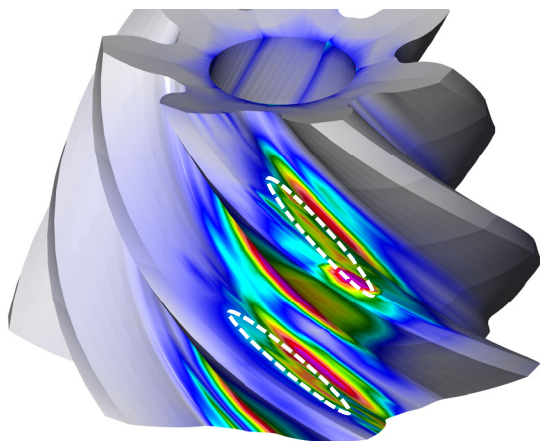


図-21 ハイポイドピニオンのミゼス応力表示
白い破線で囲んだ範囲がある瞬間の接触範囲を示す

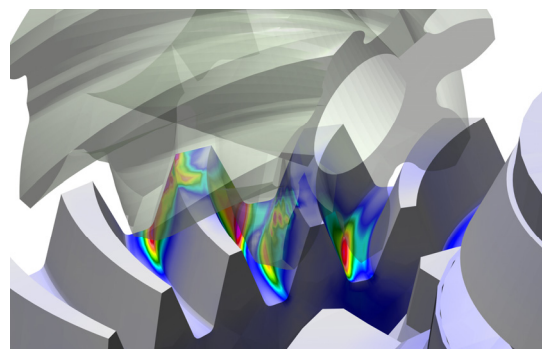


図-22 ハイポイドリングギヤのミゼス応力表示

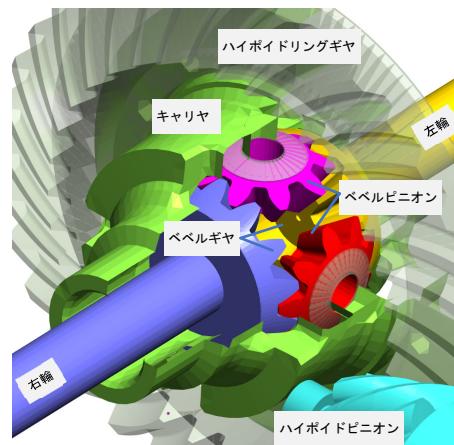


図-23 差動装置（ディファレンシャルギヤ）

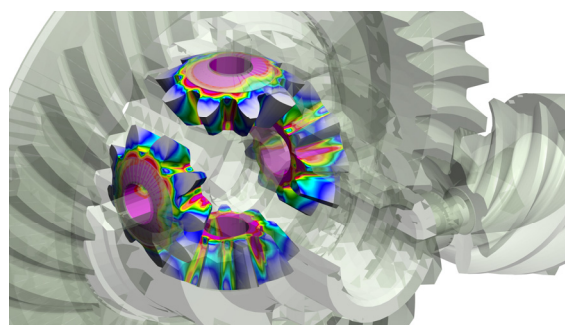


図-24 ベベルピニオンのミゼス応力表示
ベベルピニオンの軸穴にキャリアが刺さり、キャリアと共に回転する（公転）。同時にベベルピニオン自体も回転する（自転）。

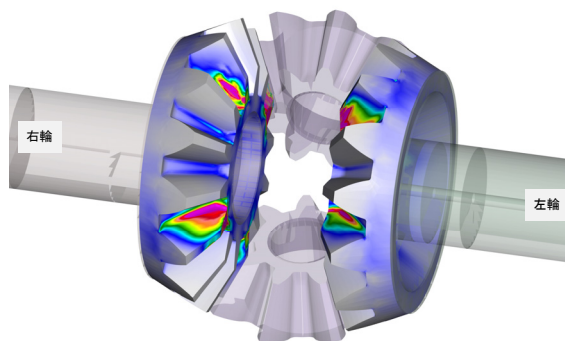


図-25 左右輪に結合されるベベルギヤのミゼス応力表示

5. まとめ

ギヤ解析ソフトウェアTransmission3Dを使用すれば、従来のFEAソルバーを用いての解析が困難であったギヤボックス全体の解析が可能である。

本論では、ギヤ解析の概要、ギヤ解析ソフトTransmission3Dの特徴と解析手法について紹介した。

また、ギヤボックスの解析事例として、遊星歯車装置と自動車用の終減速装置の解析について紹介した。

本論では触れていないが、本ソフトウェアはプログラミング言語pythonと連携することにより、ギヤ形状をCADファイル形式で出力することや、ギヤ形状の最適化や実験計画法などの解析を行うことが可能である。

謝辞: 本ソフトウェアの開発にあたり、長年に渡って尽力しているSandeep Vijayakar博士にこの場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- [1] Vijayakar, S.M., Busby, H.R., and Houser, D.R., “Linearization of Multibody Frictional Contact Problems”, *Computers and Structures*, Vol.29, No. 4, pp. 569-576, 1988.
- [2] Vijayakar, S.M., Busby, H.R., and Houser, D.R., “Finite Element Analysis of Quasi-Prismatic Bodies using Chebyshev Polynomials”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, 1461-1477, 1987
- [3] Vijayakar, S., “A Combined Surface Integral and Finite Element Solution for a Three-Dimensional Contact Problem”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.31, 535-545, 1991
- [4] 日本機械学会編: 機械工学便覧, デザイン編, β 4 機械要素・トライボロジー, pp.89-92, 2005

商用コードによるトポロジーおよび形状最適化と 3Dプリンターを用いたデジタルものの創りプロセス

A framework for processes of digital design and 3D printing
by using topology and shape optimization of a commercial code

岩井信弘¹⁾, 櫻井文嶺²⁾, 野村利成³⁾, 加藤義孝⁴⁾

Nobuhiro Iwai, Bunrei Sakurai, Toshinari Nomura and Yoshitaka Kato

- 1) 博(工) SOLIZE株式会社 テクニカルフェロー (〒102-0075 東京都千代田区三番町6番3号 三番町UFビル3F)
2) SOLIZE株式会社 デジタルエンジニアリング開発統括部 チームリーダー
3) SOLIZE株式会社 デジタルドリブンエンジニアリング事業部 リードリサーチャー
4) 博(工) SOLIZE株式会社 デジタルドリブンエンジニアリング事業部 リードリサーチャー

All processes from conceptual design to detailed design and actual production were carried out using digital methods. The processes involved reverse engineering, topology optimization, 3D CAD modeling, shape optimization, and actual production with 3D printing, where OPTISHAPE-TS was used for topology and shape optimization.

Key Words: Topology optimization, Shape optimization, 3D printer, 3D CAD, Digital design, CAE, FEM, CFD, Drone, Digital-Driven Engineering

1. はじめに

もの創りの過程を構造設計的な視点で概察すると、構想設計、詳細設計、CAEによる力学的特性の確認、または、試作・実験による確認、大量生産の場合には量産設計、実機製造に大別されることが一般的である。

構想設計や詳細設計においては、さまざまな最適化手法が試みられている。トポロジー最適化においては、当初、材料構成則を均質化法により求めていたが^[1], 密度法^[2]の適用による簡易なアルゴリズムで実用化が進み^[3], 中間密度(グレースケール)部分の除外を目的としたレベルセット法^[4]の商用コードへの実装^[5]により、設定した体積や質量に、より近い最適化が可能になった。

詳細設計段階においては、性能のみならず、製造要件の考慮が不可欠である。これは、製造上の制約による設計変更が行われると、開発期間の遅延のみならず、詳細設計に

おいて見込んだ性能を満たせないことも生じ得るからである。そこで、何らかの最適化手法を取り入れる場合には、性能目標の達成に加えて、製造要件を十分に考慮した検討をすることが重要となる。

本報告においては、構想設計から実機生産までのすべてのプロセスをデジタル手法で完遂することを目的に、リバースエンジニアリング、トポロジー最適化、生産要件を考慮した形状最適化、3Dプリンターによる実機生産、試走および試飛行などの実施例を紹介する^[6]。

2. プロセス概要

図-1に、プロセスの概要、用いたツールおよびデータの種類を記す。Process欄において、上下に分離されている項目のうち、上段は、後述する事例1：インラインスケート靴の開発、下段は事例2：ドローンの開発、の実施手順

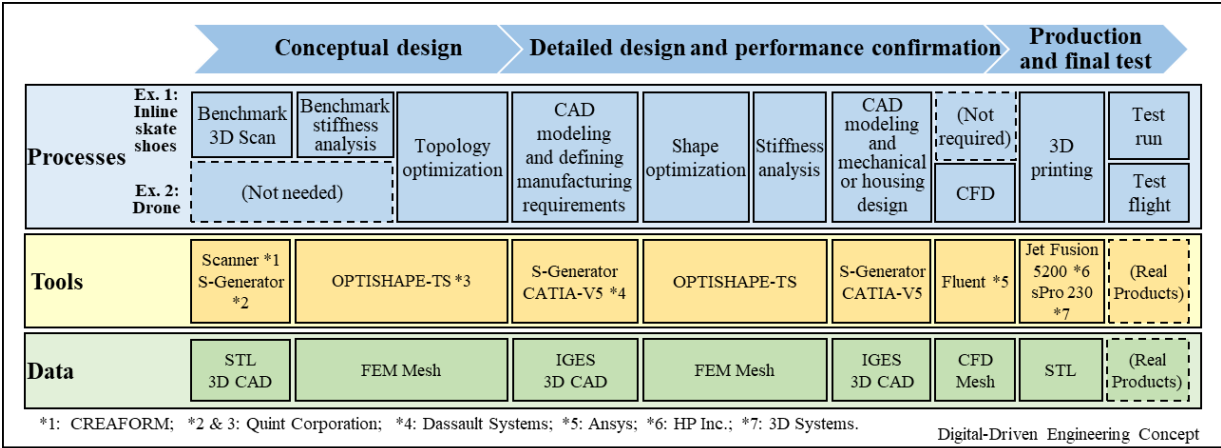


図-1 デジタルものの創りプロセスのフレームワーク

を示す。分離されていないものは、両事例共通である。

構想設計においては、必要に応じ、ベンチマークを実施する。次に、OPTISHAPE-TS (株式会社くいと) によるトポロジー最適化を実施し、おおよその構造を得る。

詳細設計においては、CADによる詳細な操作を要する。さらに、後工程のリメッシュを効率よく実施するためには、「きれいな」面や稜線が必要となる。そこで、S-Generator (株式会社くいと) を用いて、トポロジー最適化後のFEMデータをCADで読み込めるデータに変換し、主要な面や稜線を整える。次に、製造のための制約条件を付し、リメッシュ後に、OPTISHAPE-TSにより形状最適化を実施する。形状最適化により歪んだメッシュを修正後、最終確認のために剛性解析を行い、制御機器の筐体や機構部品を設計する。空気流性能が課題となる場合には、数値流体解析を実施する。

実機生産においては、上述のプロセスで作成したデジタルデータを3Dプリンターに送付し、3D造形を実行する。得られた実機を用いて試走ないしは試飛行を実施する。

3. 事例1: インラインスケート靴の開発

(1) 構想設計

a) ベンチマークモデルの作成

図-2(a) (b)に示すように、参考となる既存製品の外形形状を3Dスキャンし、STL(Standard Triangulated Language)データ化する。(c)に示すように、3D CADで自由にデータを扱うために、STLデータをS-Generatorを用いてIGES(Initial Graphics Exchange Specification)形式のデータに変換する。次に、3D CADを用いて、製品として成り立つ形状に修正するとともに、容易にメッシュ分割をするために、面の調整をしておく。

b) ベンチマーク解析

図-3(a)に示すように、FEMメッシュを作成し、対象製品の使用時に生じ得るさまざまな外力を検討し、荷重・拘束条件を設定する。図-3(b)に、剛性解析の結果の例を示す。コンターは変位を示す。得られた結果から、設計者の意図を理解し、性能目標の参考にするとともに、後述する最適化の目的関数および制約条件に織り込む。

c) トポロジー最適化

ベンチマークと同等の剛性を有し、より軽量のスケート靴の概形を創生するために、OPTISHAPE-TSを用いて、トポロジー最適化を行う。図-4(a)において、黄土色のテトラメッシュで示す領域は、許容設計空間である。緑のシェル要素で示す領域は、非設計空間である。タイヤのクリアランスや足を挿入する際の軌跡を考慮して定義した。

最適化問題を以下に定義する。

$$\text{Minimize } M \quad (1)$$

$$\text{Subject to } C_i \leq C_{Bi}, \quad (2)$$

$$\text{where } i = 1, 2, 3, \dots, 12.$$

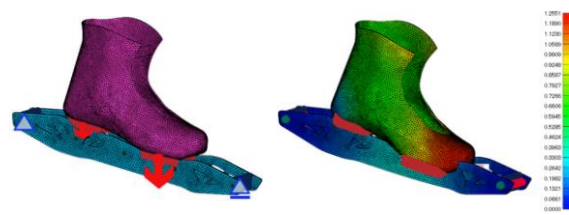
式(1)は、目的関数を示す。ここで、Mは質量である。最適

化により、Mが最小化される。式(2)は、制約条件を示す。左辺のCは最適化対象構造のコンプライアンス、すなわち、変位を荷重により除したものであり、剛性の逆数となる。右辺のC_Bはベンチマーク構造のコンプライアンスである。ここで、両辺の下添え字iは荷重ケースの番号を示す。すなわち、荷重ケース1から12において、各ケースのコンプライアンスがベンチマーク以下（ベンチマークの剛性以上）となる制約条件が付されることになる。

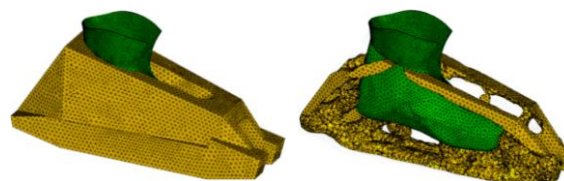
図-4(b)に、トポロジー最適化後の物質配置を示す。許容設計空間の外周の稜線近傍に多くの材料が配置されていることがわかる。図-5に、目的関数Mと制約関数C_iの履歴を示す。本例においては、131回の計算で収束し、許容設計領域と非設計（設計固定）領域の合計質量が86%低減、すなわち14%となった。なお、Mは初期質量により無次元化し、C_iはベンチマーク値により無次元化した。



(a) 3D スキャン (b) STL 化 (c) IGES 化
図-2 ベンチマークモデリング



(a) 荷重・拘束条件の例 (b) 剛性解析結果
図-3 ベンチマーク解析の例



(a) 許容設計空間 (b) 最適トポロジー
図-4 トポロジー最適化による物質配置

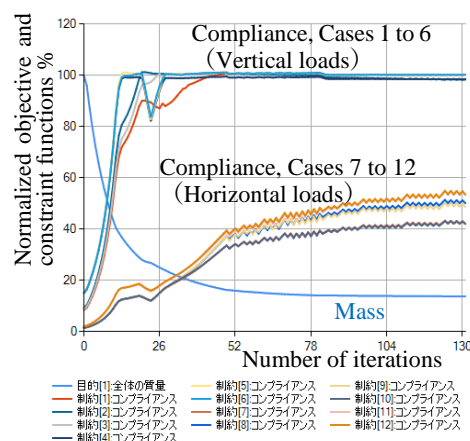


図-5 トポロジー最適化における目的関数と制約関数の履歴

(2) 詳細設計

a) FEMメッシュデータのCADモデル化

図-6(a) に示すように、S-Generatorを用いて、メッシュを修正して稜線を明確にする。次に、図-6(b)に示すようにFEMメッシュデータをCADデータに変換し、CADを用いて面を整えておく。

b) リメッシュと形状制約条件

図-7に示すように、再びメッシュ分割し、機能のための形状的な制約を付する。本例においては、タイヤ装着のためのスペース、地面との最小クリアランスおよびスケート靴を履く際の足の軌道などを考慮した。

c) 形状最適化

形状最適化をOPTISHAPE-TSを用いて実施した。設計趣旨を確実に取り入れることと、高効率な計算を目的に、最適化の収束計算を、Step 1から3に分割した。表-1に、各Stepの狙いとその理由、目的関数および制約関数を示す。

Step 1を詳述すると、最適化問題は以下に定義される。

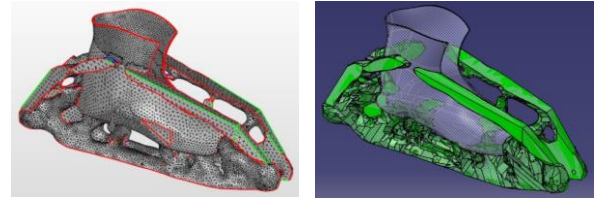
Minimize $W_M M + C_1$,
where $W_M = 3.0$. (3)

Subject to $C_i \leq C_{Bi}$,
 $t \geq t_{CR}$,
where $i = 1, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 13$. (4)

式(3)は、目的関数を示す。ここで、Mは質量、 W_M は重み関

数、 C_1 は荷重ケース1のコンプライアンスである。すなわち、重み付質量と荷重ケース1のコンプライアンスの和を最小化する。式(4)は、制約条件を示す。指定した荷重ケース*i*におけるコンプライアンス C_i がベンチマーク C_{Bi} 以下であることと、板厚 t が製造限界板厚 t_{CR} 以上であることを制約条件とする。

図-8に目的関数および制約関数の履歴を示す。形状最適化前の質量1945gは、817gになった。



(a) Mesh モデルの稜線設定 (b) CAD 化と面の修正
図-6 FEM モデルから CAD モデルへの変換

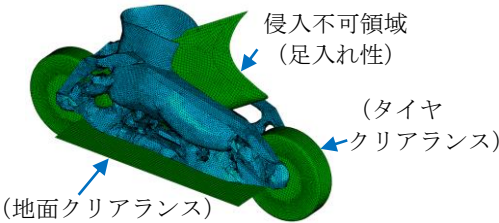


図-7 Re-mesh と機能のための制約条件付与

表-1 形状最適化における目的関数および制約関数*

	Step 1	Step 2	Step 3
収束計算	0~15	15~135	135~210
狙い	制約条件を超えたコンプライアンス(悪条件)を優先的に下げる。	目標値に近いコンプライアンスの悪化を抑えつつ、質量を優先して下げる。	質量低減と、ある程度の剛性向上の衡量を図る。
理由	形状最適化用にモデル修正した結果、コンプライアンスが制約条件を超えたため。	目標値を超えないようにしつつ、質量を最小化していくため。	僅かな質量低減のために、剛性が大きく悪化するのを防ぐため。
目的関数	Min. $W_M M + C_1$, where $W_M = 3.0$.	Min. $W_M M + W_1 C_1 + W_3 C_3 + W_5 C_5 + W_{13} C_{13}$, where $W_M = 12.0$, $W_1 = 1.2$, $W_3 = 1.0$, $W_5 = 0.9$, $W_{13} = 0.9$.	Min. $W_M M + C_1 + C_3 + C_5 + C_8 + C_9 + C_{11} + C_{12} + C_{13}$, where $W_M = 100.0$.
制約関数1	Subject to $C_i \leq C_{Bi}$, where $i = 1, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 13$.	Subject to $C_i \leq C_{Bi}$, where $i = 1, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 13$.	Subject to $C_i \leq C_{Bi}$, where $i = 1, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 13$.
制約関数2	Subject to $t \geq t_{CR}$.	Subject to $t \geq t_{CR}$.	Subject to $t \geq t_{CR}$.

*ベンチマークのコンプライアンスおよび各Step 開始時の質量により無次元化した。

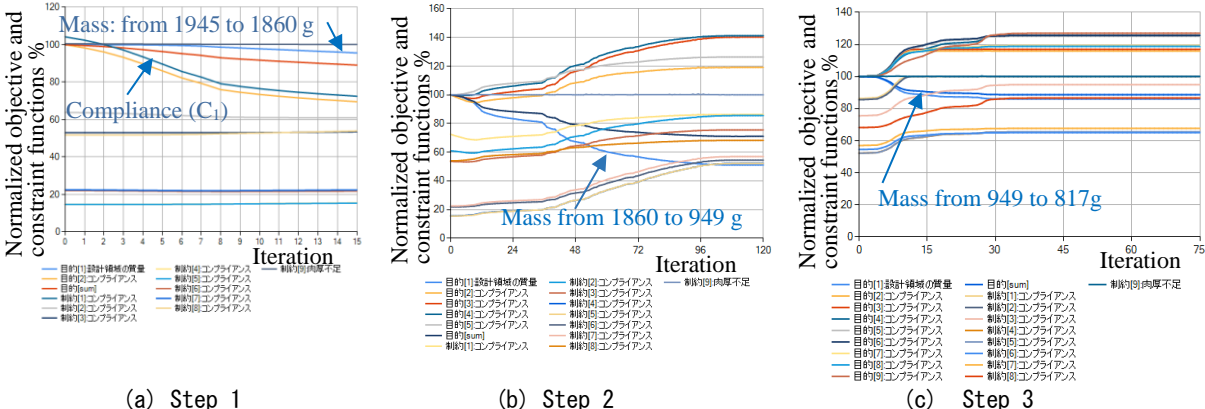


図-8 形状最適化における目的関数と制約関数の履歴

表-2の第三列に、形状最適化後の構造におけるコンプライアンス C_i を示す。Ratioは、 C_i を、制約条件である上限値 C_{Bi} で割った値である。荷重ケース1と3以外において、Ratioは100%未満であり、コンプライアンスが制約上限に達していない、すなわち、剛性に余裕があることを示す。これは、式(4)の第2式に示す板厚の制約条件が、第1式に示すコンプライアンスの制約よりも強いため、と推察される。

図-9に形状最適化前後の材料配置を示す。ロードパスと考えられる稜線はシューズのくるぶし部分に接続し、シューズ全体で剛性を受け持つ構造になったと考えられる(次節参照)。

d) 性能確認

図-10に、荷重Case 3における形状最適化後の物質配置におけるミーゼス相当応力の分布を、ベンチマークの応力分布と比較して示す。ベンチマークにおいて観察される応力集中域は、最適化により解消し、系全体で剛性を受け持つ構造になったことがわかる。

(3) 実機生産

a) 製品データ化

前節で得られた最適形状はFEMメッシュモデルであるため、S-Generatorを用いてCADデータに変換する。図-11に示すように、CADを用いて、バックルやホイールのピボットなどの機構部品を付加し、意匠面を整えて、製品データが完成する。

b) 実機生産と試走

粉末造形3Dプリンター (HP社製, Jet Fusion 5200) を

用いて、実機を生産した。

図-12に、実機による試走の様子を示す。ベンチマークと比し、軽量となったことに加え、試走者から「官能特性として振動が低減した」との感想を得た。

4. 事例2：ドローンの開発

(1) 構想設計

a) トポロジー最適化

まず、おおよその骨格を得るために、トポロジー最適化を行う。図-13に示すように、回転翼の軌跡とその取り付け部およびコントローラの筐体を非設計領域とする。図-14に、許容設計領域と、荷重条件を示す。

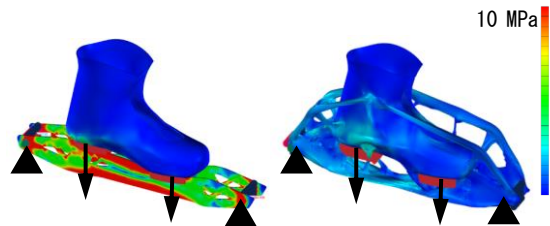
最適化問題を2つのStepにわけ、以下に定義する。

$$\text{Minimize } C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \tag{5}$$

$$\text{Subject to } M_1 \leq 0.2M_{org} \text{ (Step 1),} \tag{6}$$

$$\text{Subject to } M_2 \leq 0.6M_1 \text{ (Step 2).} \tag{7}$$

式(5)は目的関数を示す。 $C_1, C_2 \dots C_6$ は、各荷重ケースにおけるコンプライアンスであり、この合計値を最小



(a) ベンチマーク (b)最適化後
図-10 形状最適化後の応力 (荷重 Case 3)

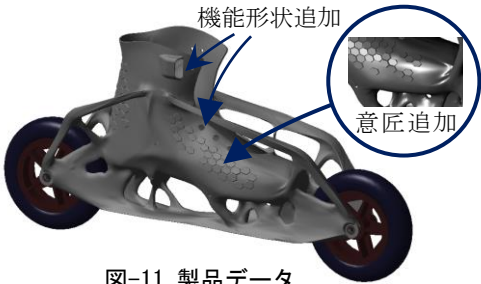
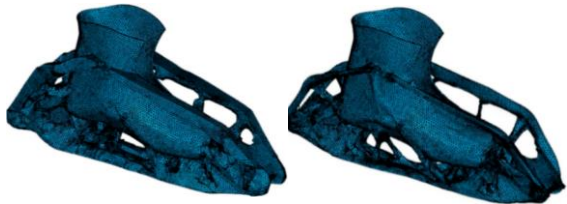


図-11 製品データ



(a) 最適化前 (b)最適化後
図-9 形状最適化における材料配置



図-12 実機による試走

化（剛性を最大化）することになる。式(6)において、 M_1 は、Step 1における質量、 M_{org} は初期質量であり、 M_1 が M_{org} の20%以下であることを制約条件とした。式(7)において、 M_2 は、Step 2における質量であり、 M_1 の60%以下、すなわち M_{org} の12%以下であることを制約条件とした。

図-15(a)に、Step 1における目的関数と制約関数の履歴、および、収束時の物資配置を示す。収束計算の初期において、質量は制約条件である60%に低減した。一方、質量低減に伴い、コンプライアンスはいったん上昇するが、質量収束後に、コンプライアンスが低減したことがわかる。

図-15(b)に、Step 2における目的関数と制約関数の履歴、および、収束時の物資配置を示す。収束の傾向はStep 1と同様であるが、より少ない計算で収束した。

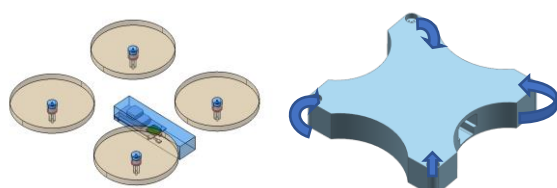


図-13 非設計領域

図-14 許容設計領域と荷重条件

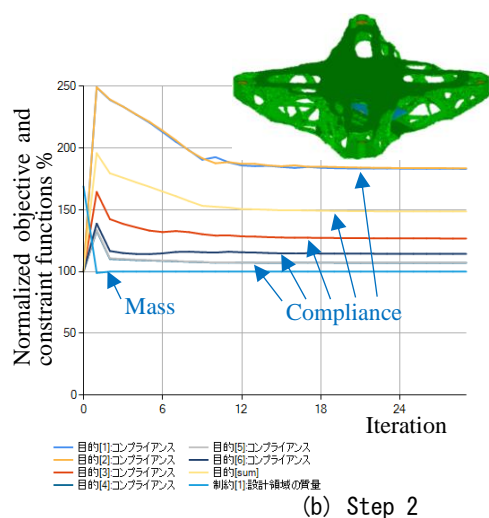
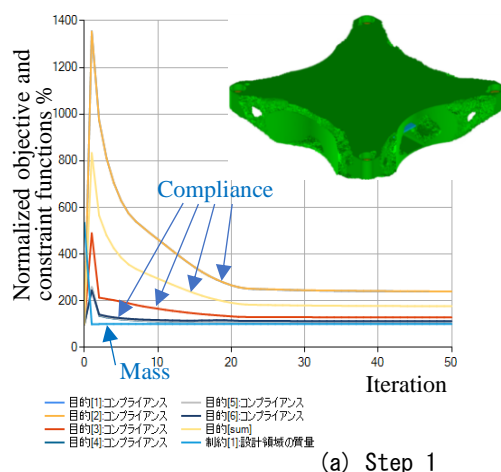


図-15 トポロジー最適化 目的関数および制約関数の履歴と最適物質配置

(2) 詳細設計

a) FEMメッシュモデルのCADモデル化

図-16に示すように、トポロジー最適化後に得られたメッシュモデルをS-Generatorを用いて、CADモデルに変換し、CADを用いて面を整える。次に、最適化解析のための境界条件を付与し、再度メッシュ分割をする。

b) 形状最適化

形状最適化問題を以下に定義した。

$$\text{Minimize } M \quad (8)$$

$$\text{Subject to } C_i \leq C_{ui}, \quad t \geq t_{CR}, \quad (9)$$

$$\text{where } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

式(8)において、 M は目的関数を示し、最小化する。式(9)は、制約条件を示す。 C_i は、荷重ケース i のコンプライアンスであり、 C_{ui} はその最大許容値である。 $C_i \leq C_{ui}$ 以下であること、および、板厚 t が製造限界板厚 t_{CR} 以上であることが制約条件となる。

図-17に目的関数と制約関数の履歴および最適化後の物質配置を示す。形状最適化により、許容設計領域の質量は、形状最適化前の11%となった。

c) 空力特性の確認

構造最適化後の設計形状が、空力性能、特に、揚力を大きく棄損していないか、Fluent(v 2020 R1, Ansys)を用いた空気流解析により、確認する。

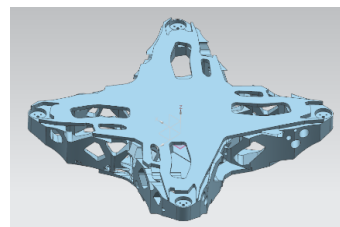


図-16 CAD化と面修正

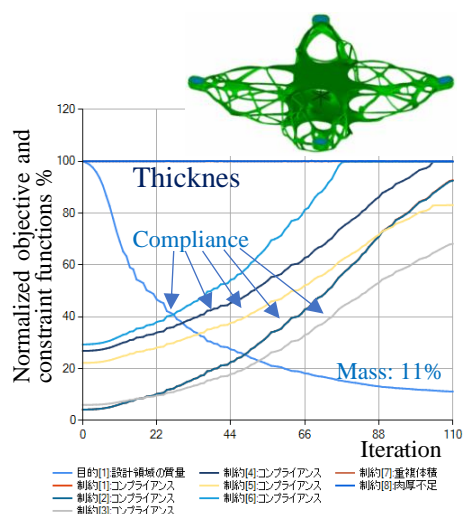


図-17 形状最適化 目的関数および制約関数の履歴と最適物質配置

解析条件を以下に定義する.

- 時間：定常
- プロペラ回転数：9000 rpm
- 旋回流の計算：MRF (Multi Reference Frame)^[7]
- 乱流モデル（デフォルト設定）：SST- $k\omega$ ^[8]
- 境界条件


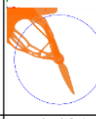
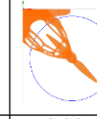
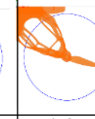
Inlet:0.8163 m/s

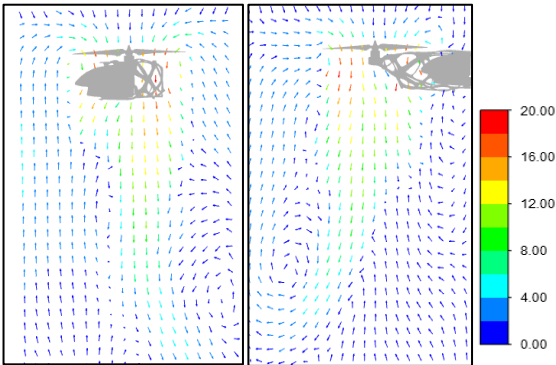
Outlet:圧力一定

流れ場全体に一定速度(0.8163 m/s)の下降流
表-3に、プロペラ回転角度と揚力との関係を示す.
Ratioは、当該揚力の平均揚力に対する比である. プロペ
ラの回転角度による揚力の変化は、最大で3%であった.

図-18に、プロペラの回転角度と等しい角度、かつ、プ
ロペラの軸位置断面における速度ベクトルを示す. 角度
により、速度ベクトルの差異が観察されるが、揚力への影

表-3 プロペラ回転角度と揚力との関係

Angle deg.	0	70	94	126
Figure				
Force N	4.341	4.481	4.225	4.375
Ratio %	99.7	102.9	97.0	100.4



(a) 0 deg (b) 94 deg

図-18 速度ベクトル



図-19 完成した実機



図-20 実機による試験飛行

響は限定的であった. ただし、地面や壁などとの近傍の挙
動が課題となる場合においては、局所的な風速分布の影
響を受けるため、詳細な検討が推奨される.

(3) 実機生産と試験飛行

図-19に完成した実機, 図-20に試験飛行を示す. 初回の
試行において、計画通りホバリングをすることができた.

5. まとめ

インラインスケート靴およびドローンの開発を例に、
構想設計、詳細設計および実機生産までのすべてのプロ
セスをデジタル手法で実践した. リバースエンジニアリ
ングにより目標性能を検討し、トポロジー最適化により
構想設計を行った. 詳細設計においては、生産要件を考慮
した形状最適化を実施することで、前工程に戻るること
なく検討を完了した. 3Dプリンターにより実機を生産し、試
走および試験飛行により、機能を確認した.

謝辞:株式会社くいとと代表取締役会長 石井恵三 博士
と同社の方々に、トポロジーおよび形状の最適化につい
て、懇切丁寧な御教示を賜った. 深甚なる謝意を表する.

参考文献

[1] Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, No2, pp. 197-224, 1988.

[2] Rozvany, G. I. N., Zhou, M. and Birker, T.: Generalized shape optimization without homogenization, *Structural Optimization*, Vol.4, pp.250-252, 1992.

[3] 株式会社くいとと：技術コラム「OPTISHAPE-TSの理論」，2023，
<https://www.quint.co.jp/jp/Qrepo/techcolumn/>.

[4] 山田崇恭，西脇眞二，泉井一浩，吉村允孝，竹澤晃弘：レベルセット法による形状表現を用いたフェーズフィールド法の考え方に基づくトポロジー最適化，日本機械学会論文集（A編）75巻753号，pp. 550-558，2009.

[5] 株式会社くいとと：HiramekiWorks「そもそもレベルセット法によるトポロジー最適化って？」，2023，
https://www.quint.co.jp/jp/pro/hws/hws_fnc-opt.htm.

[6] 岩井信弘，櫻井文嶺，野村利成，加藤義孝：「設計X構造最適化X3Dプリンティング，創った，走った，飛んだ？」，くいとと交流会，2021，
<https://www.quint.co.jp/jp/semi/qusrsemi2021.htm>.

[7] Luo, J. Y., Issa, R. I. and Gosman, A. D.: Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference, *I. Chem E. Symposium Series*, 136, pp. 549-556, 1994.

[8] Menter, F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*. 32(8), pp. 1598-1605, 1994.

MPS粒子法を用いた地下鉄駅構内浸水時の可視化 および人体への流体力の推定

Visualization of Subway Flooding and Estimation of Fluid Force on Human Body
using MPS Particle Method

戸倉 直¹⁾, 永井英一²⁾

Sunao Tokura and Eiichi Nagai

- 1) 博(工) プロメテック・ソフトウェア(株) & (株)トクラシミュレーションリサーチ (E-mail: tokura@prometech.co.jp)
2) プロメテック・ソフトウェア(株) (東京都文京区本郷三丁目34-3, E-mail: nagai@prometech.co.jp)

It is an urgent issue to reduce the human damage caused by natural disasters caused by frequent occurrences of abnormal weather in recent years. Therefore, in this paper, we propose a method of predicting the fluid force on the human body in an actual structure by simulation using the MPS particle method. After verifying the fluid force on the human body under the steady flow condition, we evaluated the fluid force that the human body receives when the subway station is flooded. In addition, realistic visualization of the disaster situation is the important content for disaster prevention efforts. Therefore, a visualization tool that was developed to allow analysis engineers to create realistic visualization images from simulation results with low cost is introduced.

Key Words : MPS, CFD, Particleworks, SIMUNIMA, photoreal, VR, XR

1. はじめに

近年の異常気象の多発による自然災害がもたらす人的被害の軽減が喫緊の課題となっている。市街地や河川内などの比較的平坦な場所での浸水による人体への負荷などは室内実験により検討されているが、実際の構造物内への水の浸入により発生する流体力は、現場の構造と水の侵入経路や流量により大きく変化することが考えられる。浸水によってもたらされる人体への動的な流体力の大きさによって危険度を定量的に検討することが可能となるが、様々な構造物内での流体力の測定を現場で行うことは事実上不可能である。そこで本稿ではMPS粒子法[1]を用いたシミュレーションによる構造物内での人体への流体力予測の方法について提案する。本稿では浸水による危険度が高いと想定される具体的な構造物として地下鉄駅構内をモデル化し、人体が受ける流体力の評価を行う。またこうした災害の状況をリアルに可視化することは防災意識向上など防災への取り組みのためのコンテンツの提供にも資するものと考えられる。そこで解析技術者が大きな工数をかけることなくシミュレーション結果からリアルな可視化映像を作成するために開発された可視化ツールとその応用事例についても紹介する。

2. 人体にかかる流体力計算の検証

具体的な構造物内における浸水計算に先立ち、定常流れ場における人体への流体力をMPS法により求め、先行研究[2]で公開されている実験結果との比較を行った。シミュレーションに用いたモデルを図1に示す。流路として幅

2,000mm、奥行き2,000mmのポリゴン壁を用いた。MPS計算ではポリゴン壁に生成した距離関数により構造物形状を定義し、流体との相互作用を計算している[3]。流路の流入境界側に幅2,000mmの矩形流入口を設定した。流入口の高さと流入口からの流速は実験条件に合わせて設定した。また流出境界側には水位を可能な限り一定に保持するため、厚さ200mmの流動抵抗領域を設定した。この流動抵抗内の粒子には速度に比例した抵抗力が負荷され、過度な流出を抑制する効果を持たせている。さらに流入境界から500mm下流に人体モデルを設置した。500mmというのは正確には人体モデルの重心位置に相当する。この人体モデルはもとより自動車衝突解析用人体ダミーHybrid-III 50th%ile FEMモデルであり、MPS計算に用いるために関節の隙間を埋めて閉じたSTL形式ソリッドモデルに改造した。Hybrid-III 50th%ileダミーは米国平均男性の身長

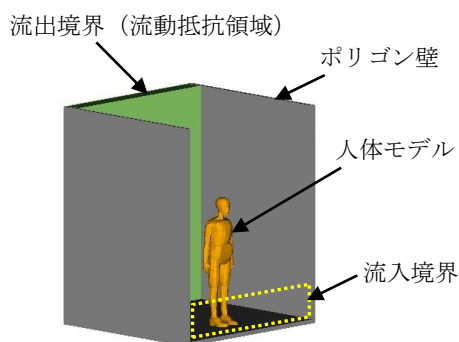


図-1 流体力計算モデル形状

1, 750mmに基づいてモデル化されているが、参考文献[2]では身長1, 500mmの子供が河川内で受ける流体力を想定して実験を行っているため、これに合わせてシミュレーションに用いる人体モデルを身長1, 500mmにスケーリングした。人体モデルは閉じたポリゴンで構成されており、流体粒子から受ける圧力が力に換算され、人体にかかる流体力が求められる。計算条件としては一定の流入速度を与え、流れが定常状態に達した10秒後まで計算した。計算条件は以下の3ケースである。

- (1) 流速 $u=1.0\text{m/s}$, 水位 $d=350\text{mm}$
- (2) 流速 $u=1.5\text{m/s}$, 水位 $d=500\text{mm}$
- (3) 流速 $u=2.0\text{m/s}$, 水位 $d=700\text{mm}$

計算にはMPS粒子法CFDソフトウェアParticleworks V. 7.2 (プロメテック・ソフトウェア製) [4]を用いた。空間

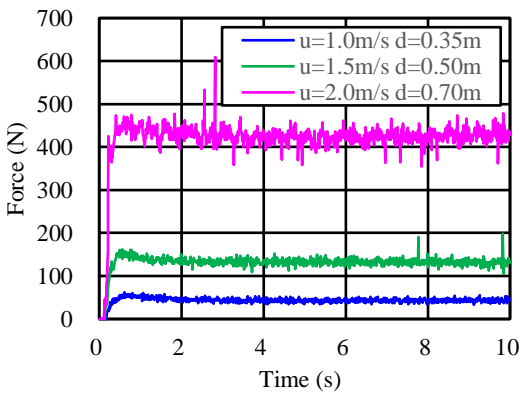


図-2 人体モデルにかかる流体力履歴

表-1 人体にかかる流体力の比較

ケース	条件		結果 (N)		実験に対する誤差 (%)
	流速 (m/s)	水位 (mm)	実験 [2]	計算	
1	1.0	350	40	43	7.0
2	1.5	500	138	132	-4.3
3	2.0	700	380	440	15.8

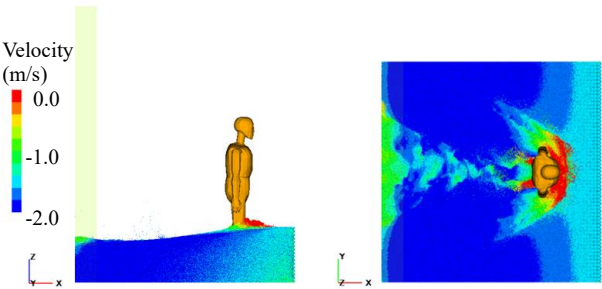


図-3 シミュレーション結果 (10 sec.)
(流速=1.5m/s, 水=0.5m)

解像度を定める粒子径は5mmとした。シミュレーションにより得られた流れ方向 (x方向) の力の履歴グラフを図2に示す。ほぼ定常状態となった4~10秒の流体力の平均値を算出し、実験結果と比較した。その結果を表1に示す。また上記ケース2の結果画像を図3に示す。実験に使われた人体模型とシミュレーションで用いた人体モデルの形状が異なるため厳密な比較は困難であるが、傾向としてはほぼ実験を再現しているとみなせる範囲であると考えられる。

3. 地下鉄駅構内浸水シミュレーション

大雨や高潮、洪水、津波などにより地上にある地下鉄入り口から駅構内へ水が流入した状況を想定したシミュレーションを行った。近年の異常気象災害では十分起こりうるシナリオである。こうした大規模な空間への水の流入はメッシュ分割が不要な粒子法に適した課題であると考えられる。図 4 に地下鉄駅構内の形状モデルを示す。通路最上段から最下段の床までの高さは 6,600mm であり、階段 1 ステップの高さは 200mm である。最上段から 19 段下がった位置に踊り場があり、ここで階段の角度が約 46 度に曲がっている。さらに 14 段下がって最下段のフロアにつながっている。リアリティを出すために最上段と最下段にカラーコーンを 1 本ずつ、さらに最下段フロア柱脇にゴミ箱を置いた。これらは剛体粒子でモデル化し

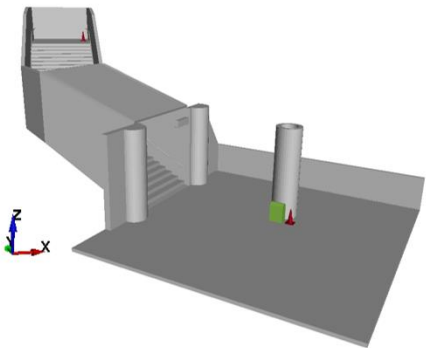


図-4 地下鉄駅構内モデル形状

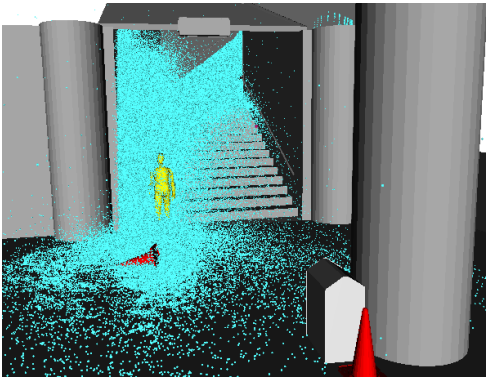


図-5 地下鉄駅構内浸水シミュレーション

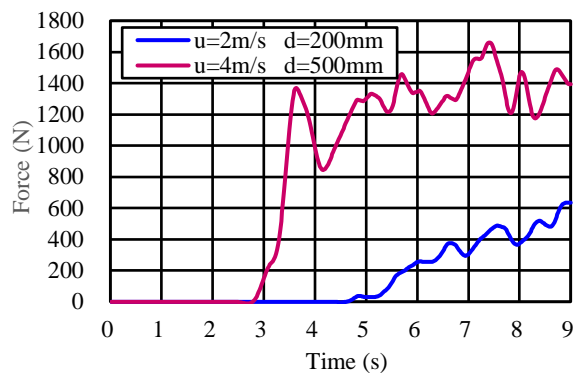


図-6 人体モデルにかかる流体力履歴

ている。前述のように壁や床などの構造物は距離関数を用いて流体粒子と相互作用するが、すべての床、壁、天井をモデル化に含めると距離関数を保持するメモリー容量が不必要に増大するため、シミュレーションでは水粒子が接触する床や壁のみを含むモデルを使用した。可視化に際してはリアルなイメージを構築するため、後に示すようにこのモデルに可視化用の壁、床、天井等の形状データを追加して全体のイメージを構築している。また工学的な目的としてはこのモデル内の階段最下端床面に成人男性人体モデル（身長 1,700mm）を置き、人体にかかる流体力を求めた。流入境界としては通路の幅に相当する 4,000mm の矩形流入口を設置した。条件は以下の 2 ケースを設定した。粒子径は 20mm とした。

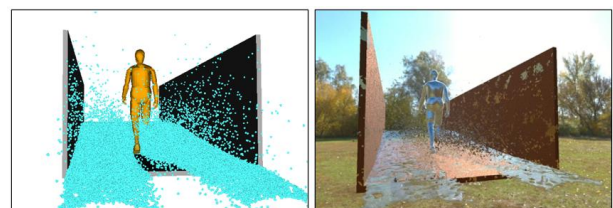
- (1) 流速 $u=2.0\text{m/s}$, 水位 $d=200\text{mm}$
- (2) 流速 $u=4.0\text{m/s}$, 水位 $d=500\text{mm}$

図5に上記ケース2の3.5秒後における静止画像、および図6に人体モデルへ負荷される流体力履歴グラフを示す。同グラフよりケース1のような比較的流速が遅く、水位が低い場合であっても大きな流体力が作用し、身体のバランスを保つのが困難であることがわかる。これは流入時の流速が遅くても階段を流れ落ちる過程で流速が増し、人体の位置では5~7m/s程度に加速されるためである。ケース2では人体周りの流速は10m/s以上となり、一般的な成人の場合、その場にとどまることはほぼ不可能であると考えられる。

4. シミュレーション結果のリアルな可視化手法

防災意識向上や防災教育のため、災害を体験的に学習するための映像コンテンツの重要性が増している。こうした映像コンテンツ制作のためシミュレーション結果はそのベースとなる重要な情報を与えるが、解析技術者にとってフォトリアル映像制作のための工数を割くことは容易ではない。そこで、本稿で使用したParticleworksの結果を比較的容易にフォトリアル映像素材に変換するためのツールSIMUNIMA（シムニマ）（プロメテック・ソフトウェア製）[5]が開発されている。SIMUNIMAは

Particleworksに限らず、CAE解析の結果ファイルをアニメーションやCG、あるいはXR映像制作のための汎用的なファイルフォーマットであるAlembicファイルに変換するソフトウェアである。具体的には形状データとして構造物を表すポリゴン、サーフェイスデータ、流体や粉体を表す粒子（ポイント）データを変換する。また数値計算結果として得られた物理量も変換データに含めることができる。MPS計算では流速、圧力、温度、粒子数密度などが変換の対象となる。実際のフォトリアル映像作成のためには背景画像と形状モデルへの映り込み、モデルの質感や光の反射、陰影などの効果が不可欠である。このような画像作成ツールとしてはゲームエンジンUnity（Unity Technologies社）、Unreal Engine（Epic Games社）、3DCG制作ソフトウェアMaya（Autodesk社）、Blender（Blender Foundation）など多数あるが、これらのソフトウェアを使いこなすことも一般の解析技術者にとってはかなり負荷のかかる作業となる。そこでUnity内から解析結果ファイルの変換と、解析で用いた形状データへのマテリアルの割り付け、動画作成などを一貫して行えるSIMUNIMA for Unityというメニューが用意されている。これはUnityの機能であるUnitypackageと呼ばれるAsset（素材）データセットとして提供される。この中にはいくつかの背景とともに、金属や木材、水、オイルなど複数のマテリアルデータが内蔵されている。これを用いることで、Unity内からParticleworks（もしくは他の解析ソフトウェア）の結果をAlembicファイルに変換し、レンダリング処理を通常の解析後処理の拡張として行うことが可能となる。図7に



(a)オリジナルのシミュレーション結果画像 (b)レンダリング処理画像

図-7 シミュレーション結果のリアル映像化の例

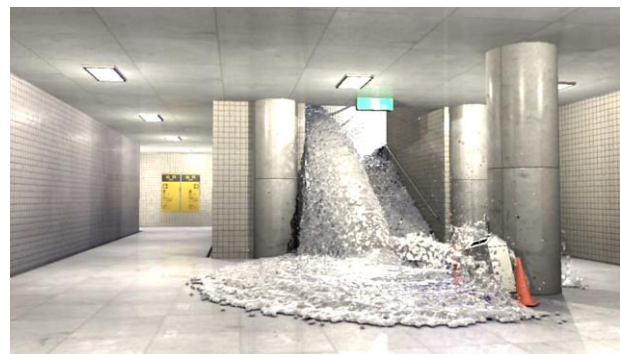


図-8 地下鉄駅構内フォトリアル画像

簡単なモデルのシミュレーションのオリジナル画像とリアル映像処理画像の比較を示す。モデルは人物、壁と路面一体モデル、水流の3パートからなる。水は計算ではMPS粒子でモデル化されているが後処理でSTLフォーマットのサーフェイスに変換されている。これをSIMUNIMA for UnityでAlembicファイルにフォーマット変換し、人物、壁と路面、水にそれぞれシルバー、錆びた金属、水のマテリアルを割り付けた。それにUnityのAssetのひとつであるSkyboxとよばれる画像データで背景をレンダリングしている。Skyboxは単純な2次元画像と異なり、同図でもわかるように水や人物、壁の表面に空が映りこんでいる。そのためSkyboxの背景を変更することでモデル表面の色彩も背景に合わせて変化する。こうしたグラフィックツールを用いることで複雑な映像処理を意識することなく自動的に処理することが可能となる。図4、5で先に示した地下鉄駅構内モデルに、シミュレーションでは含まれていない壁や天井、通路遠景等を追加し、レンダリング処理した画像を図8に示す。こうした画像は2D動画としてだけでなく、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）用にVR映像化することで、あたかも浸水時に自分がその場にいるかのような臨場感にあふれた映像コンテンツを、比較的低コストで作成することができる。

5. まとめ

広範囲な空間における流体挙動を効率的に計算可能なMPS粒子法を用いて、定常平坦流れ場において人体に作

用する流体力を数値計算で求め、これを実験と比較して精度検証を行った。その結果、ほぼ妥当な結果となることが確認できた。これを基に実際の構造物内における浸水時の人体への流体力の評価方法について検討した。さらに解析技術者が数値シミュレーションの延長として活用でき、防災意識向上に役立つ低コストな浸水時リアル映像制作手法について示した。大規模な数値シミュレーション技術が成熟するにつれて、こうした社会基盤全体の防災対策への活用がいつそう期待される。

参考文献

- [1] S. Koshizuka and Y. Oka: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol.123, pp.421-434, 1996
- [2] 岡本隆明, 戸田圭一, 當麻泰史, 流水によって人体が受ける流体力と水難事故の危険性に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 493-498, 2018年6月
- [3] 原田隆宏, 越塚誠一, 島崎克教, MPS法における壁境界計算モデルの改良, Transactions of JSCES, Paper No. 20080006, 2008年3月
- [4] Particleworks WEB サイト,
<https://www.particleworks.com/>
- [5] SIMUNIMA WEBサイト,
https://www.prometech.co.jp/simunima_ja.html

18:00 ～ 18:15 (2023年5月31日(水) 16:45 ～ 18:15 会場B)

[B-05-06] 繊維強化複合材製品における Composites Modeler for Abaqus/CAEを用いた FEMモデル化

*工藤 智駿¹、石川 覚志¹ (1. 株式会社IDAJ)