

製品の開発期間短縮と品質向上を目指した 開発設計のフロントローディング化を促進 するための取り組み

■ 片柳 厚志

Atsushi Katayanagi

近年 3DCAD にシミュレーション機能が追加されるケースも増え、設計者自身が CAE に触れる機会が増えている。そのような事情もあり、設計業務に CAE が活用され広く普及している。形状ではなく機能でモデル化する 1DCAE は、開発設計工程のフロントローディング化に有用である。設計工程におけるフロントローディングとは、可能な限り上流の工程で設計検討を多く重ねることで設計品質を高め、全体の工数を削減するという考え方である。東光高岳においても 1DCAE の設計工程への適用を進めており、本稿では 1DCAE の適用事例を 3 件紹介する。

1 はじめに

開発試験により性能の良否を判定する際、以前は複数回の試作・試験を繰り返した。現在では試作・試験前に CAE^{注1)} を適用することで、試験回数を減らしている。これにより工数が低減されることに加え、試作・試験に必要なエネルギーや材料などの資源も減り、環境にも配慮することになる。

さらに開発設計工程の手戻りを減らすため、フロントローディングの必要性が求められている。

図 1 にフロントローディングの概念を示す。横軸は製品開発工程を示し、右へ行くほど下流の工程となる。縦軸は工程の負荷を示す。図 1 の 2 つの両矢印は、上流の工程ほど設計変更が容易で、それにかかるコストも少なくすむが、逆に下流の工程になるほど設計変更が困難になり、コストも増大することを示す。

フロントローディングは、後工程で最大となっている負荷（図 1 中 (A)）を、企画や基本設計などの設計工程の初期段階にシフトすることで（図 1 中 (B)）、全体の作業量を減らすことができるとしている⁽¹⁾。

設計工程におけるフロントローディングとは、可能な

限り上流の工程で設計検討を多く重ねることで設計品質を高め、下流の工程からの手戻りを減らすことにより、全体の工数を削減するという考え方である。

製品開発設計のフロントローディング化においても、それを実践するための有用なツールとなるのが CAE である。近年、設計業務で使用される 3DCAD に CAE 機能がオプションで追加されることもあり、設計者自身で 3DCAE を実施する環境が整っている。3DCAE は 3DCAD で作成した形状データから、空間と時間で離散化した偏微分方程式を解く。そのため、3DCAE はまず形状を準備することから始める。

製品の形状や部品配置が詳細には決まっていない設計の初期段階では、3DCAE はパーツ単体の検討に適用できる場合があるが、製品全体の検討には不向きである。一方、1DCAE は製品全体を等価的な集中定数を持つ素子の集まりとして模擬し、時間で離散化した常微分方程式を解く。すなわち、1DCAE は形状ではなく機能でモデル化する。そのため、図 2 に示すように、1DCAE は設計の初期段階に適用しやすく、設計業務のフロントローディング化が可能となる⁽²⁾。

3DCAE が形状でモデル化することに対し、1DCAE は機能でモデル化するが、他にも 1DCAE と 3DCAE には表 1 に示すような相違点があり、1DCAE は 3DCAE に比べて設計工程のフロントローディング化のツールとして適している。

東光高岳では設計工程のフロントローディング化のた

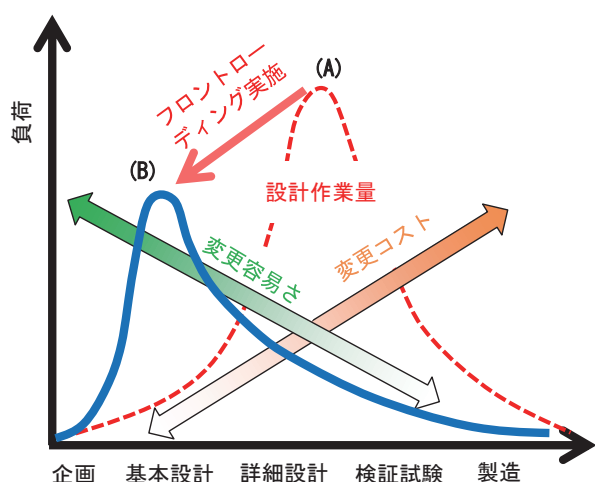


図 1 フロントローディング概念図

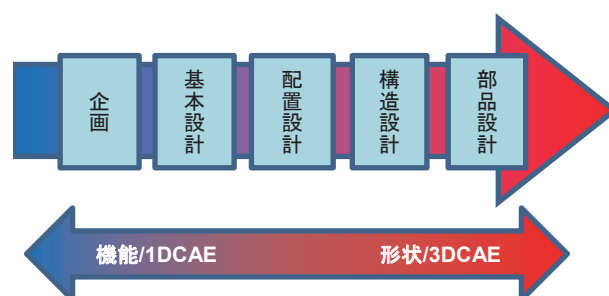


図 2 設計段階と CAE との関係

表 1 1DCAE と 3DCAE の相違点

CAE 種類	形状モデル	扱う物理領域	計算時間	適用工程
1DCAE	不要	複数	短い	上～中流
3DCAE	必要	単体	長い	中～下流

め、1DCAE による設計検討を進めている。1DCAE の適用検討の過程において実施したもののうち、下記に示すような事例を以降に紹介する。

●事例 1：SIS の電磁操作機構

1DCAE の適用検証のため、3 つの物理領域を含む既存製品を検討した事例

●事例 2：単体 VCB 操作機構

上記事例 1 に類する新規開発品へ適用した事例

●事例 3：筐体の冷却設計

上記事例 1、2 とは異なる物理領域の新規開発品に適用した事例

2 1DCAE の適用事例

2.1 SIS^{注2)} の電磁操作機構【事例 1】

1DCAE の特長が SIS の電磁操作機構の設計に適していると判断し、実際に適用してみた。本装置は、電磁力により接点を開閉する機能を有し、機構、磁場、電気回路のように異なる種類の物理領域がお互いに影響しながら動作する。

(1) 3DCAE を統合したモデル

1DCAE との比較として、3DCAE の概要を説明する。

通常、CAE ソフトはそれぞれ専門とする物理領域のみを計算する。本例では、機構は機構解析ソフト、磁場と電気回路は磁場解析ソフトで個別に計算する。電磁操作機構のように複数の物理領域がお互いに影響を及ぼしあう場合、CAE ソフトが連携せず個別に計算するのでは、設計検討に必要な計算結果が得られない場合がある。

東光高岳では、それぞれのソフトで解いた計算結果を加工し連携することで、電磁操作機構の動作を計算していた。この手法では、各 3DCAE に必要なデータ加工作業による手間が運用上の課題であった。

この課題を解消したのが、ソフトを使って 3DCAE を統合することであった。3DCAE を統合した SIS の電磁操作機構のモデルを図 3 に示す。

ソレノイドアクチュエータ^{注3)}のコイルに電流が流れることにより電磁力が発生し、ソレノイドアクチュエータのプランジャ^{注4)}が引き寄せられ、機構に接続した接点が開閉する。これは、SIS の電磁操作機構の各構成要素の働きを電気回路-磁場-機構の順に説明したもののだが、逆方向にもそれぞれに対応する相互作用の影響を受

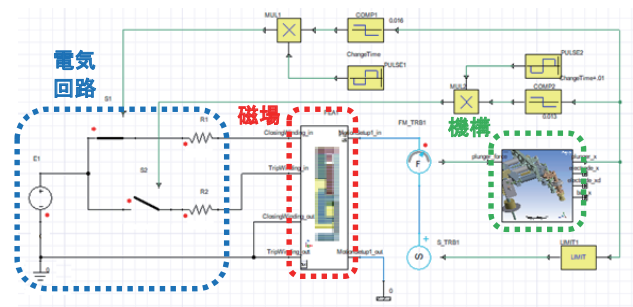


図 3 3DCAE を統合した SIS の電磁操作機構モデル

けている。3DCAE を統合することにより、相互に影響しあう物理領域を自動で計算できるようになったが、図 3 のモデル図からは磁場と機構のモデルの中身がわからないため、上記のような物理領域の相互影響の関係性は把握しづらい。

3DCAE の統合によりデータ加工作業による運用上の課題は解消したが、これはただ単に作業を自動化しただけであり、フロントローディング化の効果としてはあまり大きくはない。

(2) 1D モデル

1DCAE は複数の異なる種類の物理領域をまとめてモデル化し、形状ではなく機能でモデル化する。SIS の電磁操作機構は電気、磁場、運動の物理領域が関係しており、これらの支配方程式は以下になる。

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C_e} \int i dt + V_e \dots \dots \dots (1) \text{式}$$

$$V_m = (R_m + R_{mg}) \Phi \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

$$f = m \frac{dv}{dt} + c_d v + k \int v dt \dots \dots \dots (3) \text{式}$$

ここで、 V ：電圧、 i ：電流、 L ：インダクタンス、 R ：抵抗、 C_e ：キャパシタンス、 V_e ：逆起電力、 V_m ：起磁力、 R_m 、 R_{mg} ：磁気抵抗、 Φ ：磁束、 f ：力、 v ：速度、 m ：質量、 c_d ：減衰係数、 k ：ばね定数である。

(1) 式は電気回路のキルヒホッフの法則であるが、(2)、(3) 式には (1) 式と類似性があり、(2)、(3) 式も (1) 式と同様に回路図で表すことができる (図 4)。

各物理領域は相互に関係しており、図 4 中のコイルとギャップは異なる物理領域をつなぐ変換器の役割を

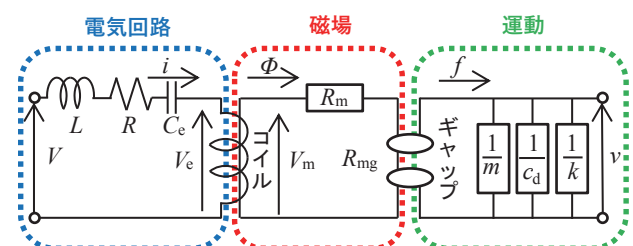


図 4 電磁操作機構の回路モデル

担っている。それらの関係式は以下となる。

$$V_m = ni \dots\dots\dots (4) \text{式}$$

$$V_e = -n \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (5) \text{式}$$

$$f = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \dots\dots\dots (6) \text{式}$$

$$R_{mg} = \frac{\int v dt}{\mu_0 S} \dots\dots\dots (7) \text{式}$$

ここで、 n ：巻き数、 μ_0 ：真空の透磁率、 S ：断面積である。これらの方程式を連立させて図4のモデルを解くのであるが、1DCAE ソフトを使えば、素子同士を接続してモデルを作成することで解を得ることができる。

図5に示すのは、SISの電磁操作機構を構造と部品の構成を基に1DCAE ソフトでモデル化したものである。

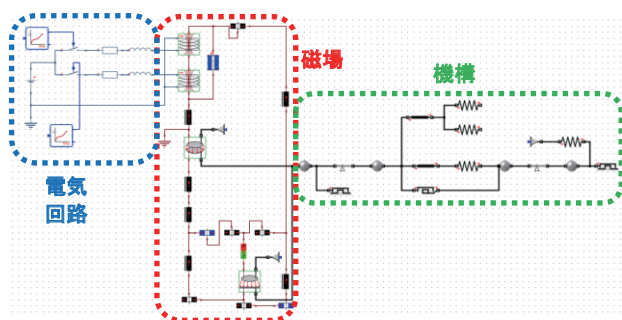


図5 SIS電磁操作機構の1Dモデル

図3、図5を見比べると、両者とも全体の構成は電気回路-磁場-機構と同様になっている。各物理領域の構成を見ると、電気回路はほぼ変わらないものの、磁場、機構に関しては詳細な形状情報がなくなっている。代わりに、1DCAEの磁場モデルは、ソレノイドアクチュエータの部品の仕様や形状などから、「磁気抵抗」、「コイル」、「磁気ギャップ」、「永久磁石」などの素子に置き換えて、磁束の流れを磁気回路で表している。機構モデルは各部品の仕様や質量などから、「レバー」、「ばね」、「ストッパー」、「マス（質点）」などの素子に置き換え、力の伝わり方を表している。このように1Dモデルは、形状はわからないが機能がわかるようになっている。

1DCAEは形状ではなく機能でモデル化するが、磁気抵抗などの素子に断面積や長さなどの寸法を設定している。図面と同様の精度は必要ないが、ある程度の寸法情報は必要であり、それらの情報は企画・基本設計時の大まかな仕様を基にする。設計工程が進み、寸法情報の詳細が決まれば、その情報を1Dモデルにフィードバックし、モデルの忠実度を向上させる。それにより計算の妥当性をより確かなものにすることができる。

計算結果は素子の種類ごとに異なる。電気抵抗の素子

なら電圧や電流が、マスなら距離や速度の時間変化がグラフで出力される。図6に接点とプランジャのストロークカーブを示す。投入・遮断時の接点とプランジャの運動の様子がわかる。接点のストロークカーブで立ち上がり部分が投入動作を示しており、中間の接点位置が動かない部分が接点の閉状態を示している。立ち下り部分は接点の遮断動作を示している。VI^{注5)}の仕様の一つに接点の速度があり、速度を解析結果、試験結果、設計仕様とで比較したものを表2に示す。

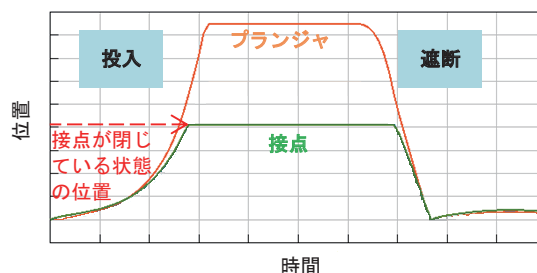


図6 SIS電磁操作機構各部のストロークカーブ

表2 接点速度の比較

状態	解析結果	試験結果	設計仕様
投入	1.03 Vc	Vc	0.67~1.33 Vc
遮断	0.94 Vo	Vo	0.53~1.14 Vo

*Vc, Voは試験結果で規格化した速度

表2より、解析結果は試験結果と数%の違いであり、設計仕様範囲にも納まっている。よって、妥当性のあるモデリングが行われたものと考えられる。本例では実際の製品の構造と部品形状から製品をモデル化したが、詳細な形状をモデル化せずとも機能でモデル化できたことより、1DCAEの適用が適切であったことが確認できた。

(3) 1DCAEによる全体最適化

前出の検証の際にあわせて1DCAEの全体最適化に関して検討した。図5の1Dモデルを見ると、個々の機能がわかり、それぞれのつながりも把握しやすいため、全体を俯瞰して把握することができる。これより、部分最適化になりやすい3DCAEに対して、1DCAEでは全体最適化しやすいという特長がある。

その特長を確認するため、パラメータによる製品性能の変化の様子を求めた。パラメータとしてプランジャの寸法を変更し、接点が閉状態を保てるかどうかを確認した。図7に寸法パラメータを変化させた場合の接点とプランジャのストロークカーブと、プランジャのギャップと永久磁石のギャップの吸引力を示す。

図7から、プランジャの寸法パラメータをある程度大きな値にすると、接点が閉状態を保てなくなり、解析条件によりモデルが遮断指示（図7中の赤色の点線）を送る前に接点が開き始めてしまっていることがわか

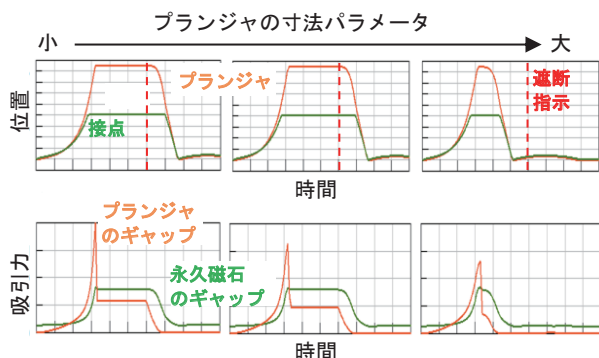


図7 プランジャの寸法パラメータを変化させた場合の各部のストロークカーブと吸引力

る。ソレノイドアクチュエータにはプランジャと永久磁石の2カ所に磁気ギャップがある。プランジャの寸法パラメータを大きくしていくと、プランジャの磁気ギャップの吸引力が減少することがわかる。これより、部品寸法の見当をつけることができる。

ここでは、磁場に関するパラメータを変化させたが、電気回路や機構側の素子のパラメータを変化させることで、磁場の場合と同様にパラメータが製品全体の動作に与える影響の程度を把握することができる。1DCAEの計算時間は、3DCAEのものに比べて非常に短い。多数の設計パラメータを検証する設計の初期段階において、計算時間は短いほど有利である。よって、1DCAEを使えば、製品全体の設計パラメータが扱え、計算時間も短いため、設計の初期段階で全体最適化が図りやすい。

2.2 単体VCB^{注6)} 操作機構【事例2】

前節でSISの電磁操作機構を題材に、1DCAEでモデル化することの有効性を確認した。本節では、1DCAEを新規開発品の初期設計段階に適用した単体VCBの操作機構の検討事例について述べる。

(1) C-GIS^{注7)} 用VCBの1Dモデル

まず、モデルの妥当性を確認するため、開発品と同容量の既存の機器であるC-GIS用VCBをモデル化した。図8にC-GIS用VCBの1Dモデルを示す。この機器については開発試験時に摺動摩擦力を測定しており、摩擦力をモデルに反映している。

表3に接点の速度を解析結果と試験の測定結果とで比較したものを示す。投入速度の解析結果が試験結果よりも2割近く速めになっている。操作力のモデルを簡略化したことが影響している可能性が考えられたが、ここでは、設計の見当をつけることを優先したため、操作力の忠実度はこのままとした。

(2) 単体VCBの1Dモデル

次に、新規開発品である単体VCBの1Dモデルを作成した。その際、次のような設計上の制約があった。

1. 使用するVIの詳細な仕様が不明である。

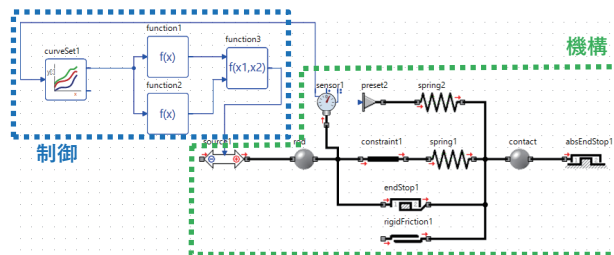


図8 C-GIS用VCBの1Dモデル

表3 接点速度の比較

状態	解析結果	試験結果
投入	1.18 Vc	Vc
遮断	1.02 Vo	Vo

*Vc, Voは試験結果で規格化した速度

2. 操作力発生装置は既存のものを流用する。
3. 新たに、スコットラッセル機構^{注8)}を追加採用する。

VIについては、仕様を入手次第モデルに反映するものとし、同容量のVIを参考に仮仕様で模擬した。操作力発生装置は、既存のものを流用するため、図8のモデルから素子を流用した。スコットラッセル機構については、設計案があったため設計情報を利用した。

単体VCBの1Dモデルを図9に示し、表4に接点の速度を解析結果と目標値とで比較したものを示す。表4より投入速度の解析結果が目標値を4割近く下回っていることがわかる。前項にて投入速度の解析結果が実際より2割近く速くなっていたことを考慮すると、投入速度がかなり遅くなることが予測された。この結果より、操作力発生装置の出力不足やスコットラッセル機構の見直しなどの課題が見つかり、それらの対策が必要であることが判明した。

上記の課題が下流の工程まで判明しなかった場合、設計変更などで多くの工数を要し、予算、納期ともに圧迫される。今回は、設計の初期段階において対策が打てた

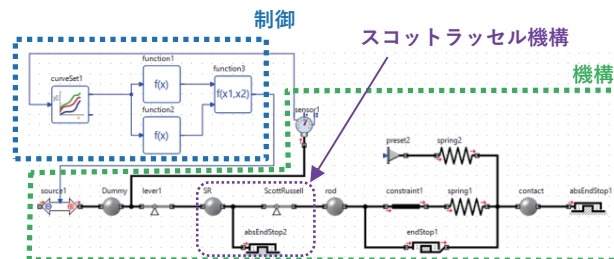


図9 単体VCBの1Dモデル

表4 接点速度の比較

状態	解析結果	目標値
投入	0.62 Vc	Vc
遮断	1.23 Vo	Vo

*Vc, Voは目標値で規格化した速度

ことにより、それらのリスクを回避することができた。

2.3 筐体の冷却設計【事例 3】

本節では筐体の冷却設計の初期検討に IDCAE を適用した事例について説明する。ここで扱う物理領域は、流体と伝熱である。

筐体内の部品が発熱する場合、筐体内部の温度を許容温度以下にするため、ファンで換気することにより筐体内部を冷却する。その際、必要な換気風量を見積もるために (8) 式を用いる。

$$W = \rho C Q \Delta T \dots\dots\dots (8) \text{式}$$

ここで、 W ：換気による放熱量、 ρ ：空気密度、 C ：空気の比熱、 Q ：換気風量、 ΔT ：空気の温度上昇である⁽³⁾。

(8) 式で得られた換気風量から、ファンの型番と台数を選定する。電卓などによる概算では、ファンの最大風量で検討を行う。最大風量は、ファンの周りに何も流れの抵抗となるものがない場合の風量である。ファンは最大風量の 1/2 の風量で動作すると見積もる。

しかし、完成した製品が概算の見積もり通りの換気風量であれば良いが、それを下回っていた場合、筐体内部の温度が許容値を超え、機器が故障する危険性がある。逆に、製品が概算の見積もりよりも大きな風量を得ていた場合、オーバースペックとなってしまう。

そこで、適切な設計をするために、より実際の製品に近い風量を見積もる際には、一般的には風量を P-Q 特性により求める。ファンには P-Q 特性と呼ばれるファン前後の圧力差と風量に関する特性がある。ファンの P-Q 特性の例を図 10 に示す。縦軸はファン前後の圧力差を静圧 (P) としたものであり、横軸はファンの風量 (Q) である。何も抵抗となるものがない場合、ファンの風量は最大となり、そのときの静圧はゼロとなる。逆に、ファンの出口を塞いで風量をゼロにすると静圧は最大となる (最大静圧)。

実際の冷却システムには抵抗があり、冷却システムの流速と圧力差 (圧力損失) には (9) 式に示す関係がある。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \zeta \rho U^2 \dots\dots\dots (9) \text{式}$$

ここで、 ΔP ：圧力損失、 ζ ：圧力損失係数、 U ：流速である。ファンの P-Q 特性と冷却システムの圧力損失 - 流速特性がバランスしたとき (図 10 の交点) がファンの動作風量となる。

概算検討する場合に、冷却に必要な風量をファンの最大風量の 1/2 と見積もったが、実際には冷却システムの圧力損失により風量に変化する。筐体の冷却システムにおいて主に流れの抵抗となるのは、吸・排気口のガラリ^{注9)}やフィルタなどである。これらの仕様には圧力損失係数もしくは圧力損失 - 流速特性が記されている。圧力損失係数はそのまま (9) 式に適用することができるが、圧力損失 - 流速特性が記載されている場合は、その特性を (9) 式で近似して圧力損失係数を求める。そのどちらでもない場合は、3D データなどを入手し、CFD^{注10)}でパラメトリックスタディを行い、圧力損失係数を求める (図 11)。

ファンの P-Q 特性と冷却システムの圧力損失特性がわかれば、ファンの動作風量を求めることができる。一般的な手法としては、表計算ソフトを用いることがあげられる。しかし、ファンや吸・排気口の数を増やすと、表計算ソフトのシートの改造が必要であり、他に機能を追加したい場合なども、シートの作成者以外の者による対応は困難である。一方、IDCAE ソフトであればファンやガラリ、フィルタに相当する素子を画面上で自由にコピーして配置し、冷却の風の流れを考慮してそれぞれの素子を接続すれば良い。モデルの扱いやすさや見やすさでは IDCAE ソフトの方が優れている。

筐体の冷却設計の初期段階に IDCAE を適用したモデルを図 12 に示す。吸・排気口はそれぞれ 2 カ所とし、ファンは排気口それぞれに 1 台としている。

吸・排気口にはパイプ要素を使用し、ガラリとフィルタの圧力損失係数と、ガラリの有効面積を設定している。ファンは流量源要素を使用し、ファンの最大静圧と最大風量から 1 次式で近似した P-Q 特性を設定している。

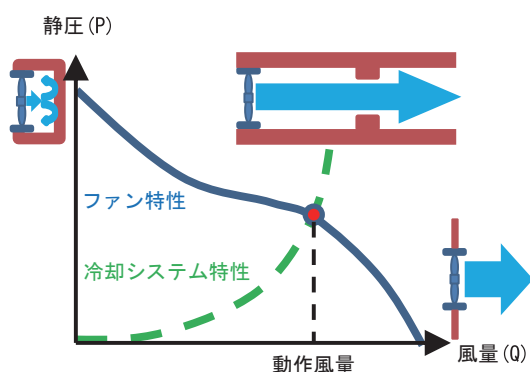


図 10 ファンの P-Q 特性

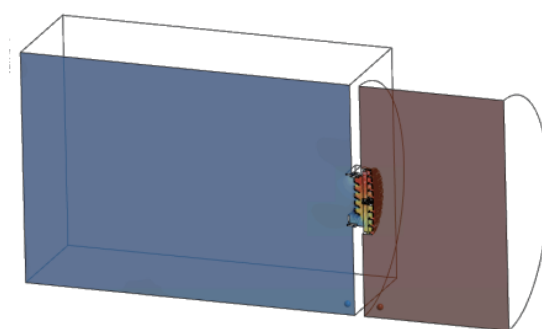


図 11 ガラリの圧力損失を求めるための CFD の例 (圧力分布図)

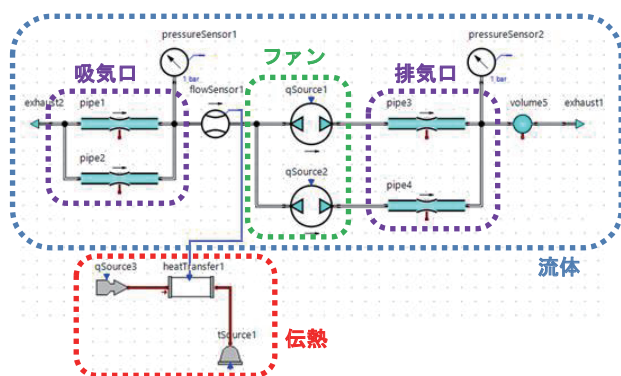


図12 筐体冷却設計の1Dモデル

以上が流体部分のモデルの概要であるが、冷却設計であるから伝熱部分もモデル化する必要がある。(8)式を変形すると、(10)式ようになる。

$$\Delta T = \frac{1}{\rho C Q} W$$

$$= R_{th} W \quad \dots\dots\dots (10)式$$

ここで、 R_{th} は熱抵抗である。換気空気による熱の伝わり方を熱抵抗で表し、換気による伝熱をモデル化している。発熱体は熱源素子、周囲温度は温度源素子を用いている。熱抵抗のパラメータである換気空気の風量（ Q ）は、流体部分の流量センサの出力を参照している。

以上、簡単なモデルではあるが、筐体の冷却設計の初期段階において、内部の部品がある発熱量のとき許容温度を超えないように、ガラリ、フィルタ、ファンの組み合わせを検討することができる。

3 おわりに

本稿では、設計の初期段階に1DCAEを適用した取り組みについて紹介した。1DCAEの特長を以下に示す。

1. 1DCAEは異なる物理領域を連携し、製品全体をモデル化することができる。
2. 1DCAEは形状ではなく機能でモデル化することができる。
3. 1DCAEの1回の計算時間は短いため、パラメータを変え多くの回数計算することができる。

以上の点より、1DCAEを設計の初期段階に適用することで、設計工程のフロントローディング化を促進することができる。加えて、製品を機能の集まりとして考えるため、全体の見通しが良くシンプルな表現になり、より本質的な検討も深まる。

本稿では1DCAEの設計ツールとしての側面を述べた

が、1DCAEを扱うには物理現象や工学の理解が必要となるため、設計者教育にも有用であると考えられる。

今後も、1DCAEによる設計工程のフロントローディング化を推し進めていきたいと考えている。フロントローディングによってできた時間の余裕を使ってお客さまが満足するアイデアを検討し、付加価値の高い製品づくりを心がけていきたい。

参考文献

- (1) MONOist：「設計者がフロントローディングという怪物に立ち向かうための“3つの武器”」，MONOist ホームページ（2020公開），
<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2003/11/news002.html>
- (2) 1DCAE：「1DCAEとは」，1DCAE ホームページ，
<https://1dcae.jp/about/>
- (3) 国峰尚樹：「エレクトロニクスのための熱設計完全入門」，日刊工業新聞社（1997）

■ 語句説明

- 注1) CAE：Computer Aided Engineeringの略。コンピュータ上で技術的な支援を行うシステムのこと。
- 注2) SIS：Solid Insulated Switchgearの略。固体絶縁開閉装置のこと。充電部をエポキシモールドなどの固体絶縁物で絶縁した開閉装置。
- 注3) ソレノイドアクチュエータ：電磁力を利用して、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する部品のこと。
- 注4) プランジャ：ソレノイドアクチュエータ内の部品の一つである。鉄などの磁性体でできており、ソレノイドアクチュエータ内部で発生させた電磁力により運動する。
- 注5) VI：Vacuum Interrupterの略。真空バルブのこと。真空を利用し電流を遮断する部品。VCBの主要部品である。
- 注6) VCB：Vacuum Circuit Breakerの略。真空遮断器のこと。開閉装置の一種。
- 注7) C-GIS：Cubicle-type Gas Insulated Switchgearの略。キュービクルに収容されたガス絶縁開閉装置のこと。
- 注8) スコットラッセル機構：機構の一種。直線運動の方向を変える機能を持つ。
- 注9) ガラリ：空気の出入り口に設置する装置のこと。雨水の侵入を防ぐため、羽板とよばれる板状の部品を複数枚平行に配置した構造をしている。
- 注10) CFD：Computational Fluid Dynamicsの略。コンピュータを使い、流体の速度や圧力などを解く。

片柳 厚志

戦略技術研究所 技術開発センター 解析・試験技術グループ 所属