

■片栁 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。

はじめに 1

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 少なくてすむが、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⁾。

企画	基 本 設 計	配 置 設 計	構造設計	部品設計	
4					

機能/1DCAE	形状/3DCAE
l	

図2 設計段階と CAE との関係 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。

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	

東光高岳では設計工程のフロントローディング化のた 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、 電磁刀 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るに示す。

電気				ChargeTime	Ļ	
回路。	••••	RI	磁場。****			
E1	52	R2	TripWilling in	C) + skrage be	

☆ 図 3 3DCAE を統合した SIS の電磁操作機構モデル
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 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 の統合によりテータ加工作業による連用上の 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
TDCAL は後数の異なる種類の物理領域をよとめてモデル化し、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。 $V = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C_e} fidt + V_e \cdots \cdots$
$V_{\rm m} = (R_{\rm m} + R_{\rm mg})\Phi\dots(2) $
$f = m \frac{dv}{dt} + c_d v + k \int v dt$
電気回路 磁場 運動 i p r
図 4 電磁操作機構の回路モデル
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 担っている。それらの関係式は以下となる。
$V_{\rm m} = ni \cdots (4)$ 式
$V_{\rm e} = -n \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \cdots $
$f = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \cdots (6) $
$R_{\rm mg} = \frac{\int v dt}{\mu_0 S} \cdots (7) \mathrm{rt}$

ここで, n:巻き数, μ₀: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。

		磁場 機構	
¢ C		E.	*
電気 回路			
	• • • • • • • • • •		

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。

	投入	プランジャ	遮断
位置	 接点が閉じ ている状態	接点	
	の位直		

	時間
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

义

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 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。

	小	プランジャの寸法パラメータ ト
位置		プランジャ 2 接点 1
		時間
吸引力		のギャップ 永久磁石 のギャップ
		時間

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

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。 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。

sensor 1 500 制御

図 8

C-GIS 用 VCB の 1D モデル 表 3 接占速度の比較

致 0 按 派 座 及 V 儿 我				
状態	解析結果	試験結果		
投入	1.18 Vc	Vc		
遮断	1.02 Vo	Vo		
*\/。 \/。は試験結果で相枚化した速度				

(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 その際、次のような設計上の制約があった。 成した。 1. 使用する VI の詳細な仕様が不明である。

2. 操作力発生装置は既存のものを流用する。

新たに、スコットラッセル機構注8)を追加採用する。 3. 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。

制御 スコットラッセル機構 ÷ Ŵ

- * <u>-</u> - ; 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		

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 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 1DCAE 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。

ここで, W: 換気による放熱量, ρ: 空気の密度, 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)。



図 10 ファンの P-Q 特性

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。

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が変化する。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)。



ガラリの圧力損失を求めるための CFD の例 図 11 (圧力分布図)

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, 1DCAE 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 1DCAE ソフトの方が優れている。 筐体の冷却設計の初期段階に 1DCAE 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。

a sa sara na ƙ	pressureSensor1			pressureSensor2
吸気口	Q-	ファン	排気口	Q_
schaußt2 pipe1	nowsensori	dsourcei	pipe3	volume5 exhaust1
pipe2		Ŷ		
	-	qSource2	pipe4	
1 11 1 12 12 1		Y.	·	
qSource3	heatTransfer1			流体
	* L I	0.00.00.0		
	tSource1	伝熱		

図 12 筐体冷却設計の 1D モデル

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。 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)式のようになる。

$\Delta T = \frac{1}{\rho CQ} W$

 $= R_{\rm th} W$ (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す 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。

1DCAE は形状ではなく機能でモデル化すること 2. 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る。 1DCAEによる設計工程のフロントローディ 今後も, 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

- MONOist:「設計者がフロントローディングという怪 (1)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 1DCAE:「1DCAE とは」, 1DCAE ホームページ, (2)
- https://ldcae.jp/about/ 国峰尚樹:「エレクトロニクスのための熱設計完全入 (3)門」,日刊工業新聞社(1997)

■語句説明

注1)	CAE: Computer Aided Engineering の略。 コン
	ビ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 Ø
,,	略。キュービクルに収容されたガス絶縁開閉装置の
	دار المراجع ال
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 流休の速度や圧力などを解く

片栁 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