

CAE 解析による構造設計の最適化に関する研究（第2報）

生産技術部

田中 徹

CAE は製品を設計する段階で性能的に問題がないか、コンピュータを用いて検討するシステムであり、多くの業界で様々な製品に利用されている。しかし、CAE 解析で製品性能を適切に改善するための形状や寸法等を定量的に明らかにしたいといった県内企業の要望に対応できていない。そこで、本研究では CAE 解析に最適化技術を適用し、製品性能の改善点を定量的に見出す方法の構築に取り組む。本年度は、昨年度 CAE 解析に使用した寸法最適化アルゴリズムを企業の製品に近い解析モデルへ適用し、その有効性を確認することができた。今後、県内企業から製品や部品等の構造設計の最適化に関する相談があった際は、製品に対して改善したい評価指標である目的関数を明確にし、本寸法最適化手法を適用した CAE 解析による技術支援を行うことができる。

1. はじめに

CAE (Computer Aided Engineering) は、製品を設計する段階で性能的に問題がないか、コンピュータを用いて検討するシステムであり、多くの業界で様々な製品に利用されている。当センターへ CAE 解析システムを導入して以来、企業との共同研究や技術相談、依頼試験等に取り組むことで、解析モデルや材料モデルの作成、製品強度の定量化など解析ノウハウを蓄積している。

これらの活動によって、CAE 解析を製品設計に活用する県内企業は着実に増えてきている。これまで、企業が設計した構造モデルを用いて CAE 解析を行い、その解析結果と材料強度を比較して製品強度が確保されているかを評価することで、製品性能の改善において一定の成果が得られている。しかし、CAE 解析で製品性能を適切に改善するための形状や寸法等を定量的に明らかにしたいといった企業の要望に対応できていない。

そこで、本研究は CAE 解析に最適化技術を適用することで解析結果を評価し、製品性能の改善点を定量的に見出す方法の構築を目的に実施した。

昨年度は、簡易モデルを対象に式(1)に示す寸法最適化の適用方法を検討し、最適な寸法形状を決定することができた¹⁾。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } f(x) \quad (\text{最小化}) \\ \text{制約条件: } g(x) < \alpha \\ \text{設計変数: } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \dots (1)$$

ここで、 α は制約定数である。

本年度は、本寸法最適化手法^{2,3)}を実際の県内企

業の製品に近い解析モデルへ適用し、その効果を検証した2つの事例を報告する。事例1は貯水タンクにおいて、満水時に貯水タンク側壁の変形量が最小となる構造を決定したものであり、事例2は流路を流れる温水を 10[K]冷却できるヒートシンク構造を決定したものである。

2. 事例1：貯水タンク

2.1 解析モデル

図1に示すように、内幅 2000[mm]×内奥行 1500[mm]×内高さ 1540[mm]の貯水タンクを 1/2 三次元ソリッドモデルで作成した。

ここで、側壁の板厚さは 5[mm]とし、側壁に設ける補強材として一辺 50[mm]の等辺山形鋼（厚さ 5[mm]）を使用し幅方向の縦リブ 3 本、奥行方向の縦リブ 2 本、横リブは上下端部に各 1 本設け、その間に 2 本をそれぞれ設置する構造とした。

2.2 解析する現象

貯水タンクの側壁には、水深に比例して荷重が作用する。貯水タンクが満水時に、構成している部材強度を確保しつつ、側壁の変形量が最小となる横リブの設置寸法を決定する。

2.3 材料物性

貯水タンクに使われている材料は、一般構造用炭素鋼とし、CAE 解析に使用した物性値は弾性係数 206 [GPa]、ポアソン比 0.3 を設定した。

2.4 解析条件

解析は、3.0[mm]サイズの四面体二次要素を使用し、線形静解析を行った。ここで、拘束条件は、貯水タンクの設置面（下面）を完全拘束とし、対称面に

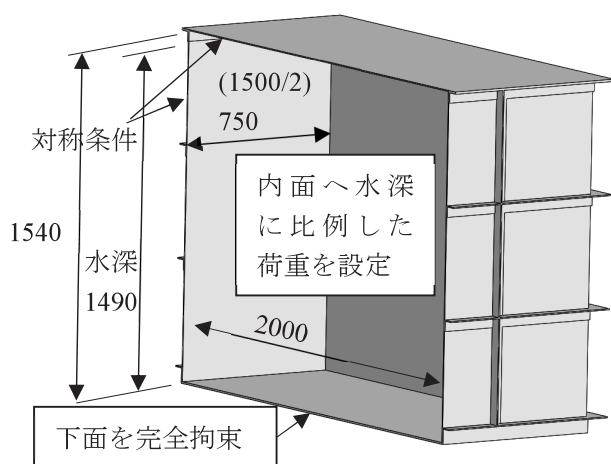


図1 貯水タンクの解析モデル（内側）

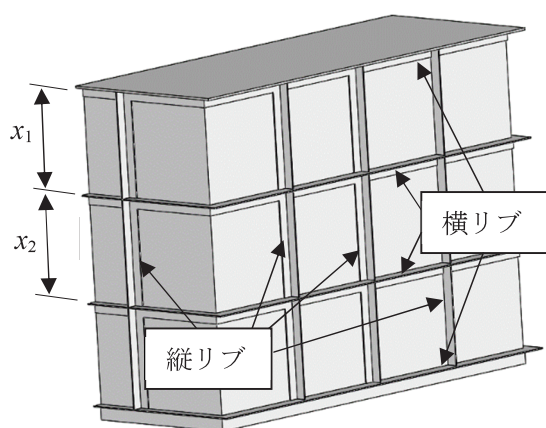


図2 貯水タンクの解析モデル（外側）

は対称条件を設定した．また，荷重条件はタンク底板から高さ 1490[mm]まで貯水されることとし，水の総重量 4470[kg]が水深に比例してタンクの内壁へ作用する設定とした．

2.5 寸法最適化手法の適用

貯水タンクの寸法最適化の適用条件を式(2)に示す．目的関数 $\delta(x)$ は側壁の変形量を最小とし，制約条件 $\sigma(x)$ は鋼材の許容応力 σ_{al} 未満とする．また，設計変数は図2に示す横リブ2本の高さ方向寸法 x_1, x_2 とする．

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的関数: } \delta(x) \quad (\text{最小化}) \\ \text{制約条件: } \sigma(x) < \sigma_{al} \\ \text{設計変数: } 200 \leq x_1 \leq 500 \quad [\text{mm}] \\ \quad \quad \quad 200 \leq x_2 \leq 500 \quad [\text{mm}] \end{array} \right\} \cdots (2)$$

ここで，寸法最適化に適用する制約条件に使用する許容応力 σ_{al} を，式(3)より算出する⁴⁾．

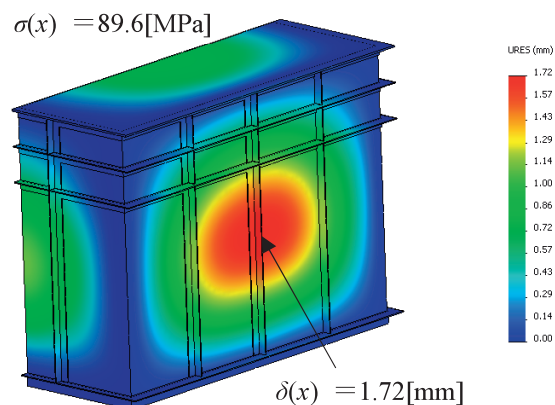


図3 寸法最適化 ($x_1=200[\text{mm}]$, $x_2=200[\text{mm}]$)

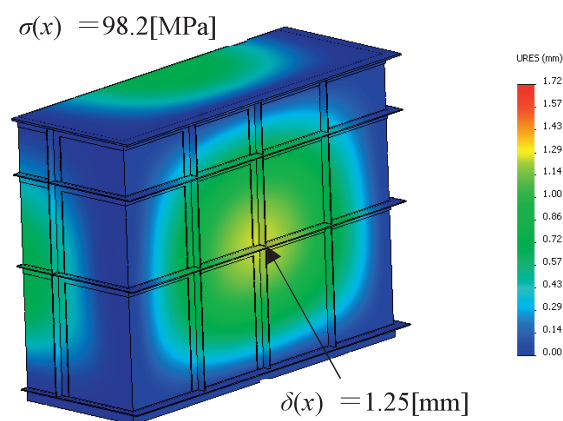


図4 寸法最適化 ($x_1=300[\text{mm}]$, $x_2=500[\text{mm}]$)

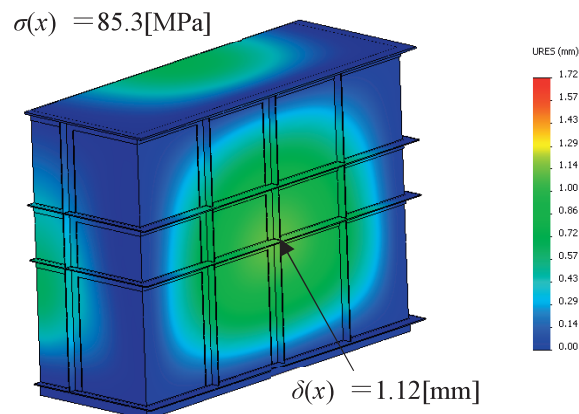


図5 寸法最適化 ($x_1=500[\text{mm}]$, $x_2=300[\text{mm}]$)

$$\begin{aligned} \sigma_{al} &= \frac{1}{f_m \cdot f_s} \cdot \frac{\zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \sigma_w}{\beta} \cdots (3) \\ &= \frac{1}{1.2 \times 1.2} \cdot \frac{1.0 \times 0.6 \times 215}{1.0} \doteq 90 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

ここで， σ_w :材料の疲労強度， β :構造の切欠係数，

ζ_1 : 寸法効果による疲労強度の低下率, ζ_2 : 表面状態による疲労強度の低下率, f_m : 疲労強度に対する安全率, f_s : 作用荷重に対する安全率である.

今回, 寸法最適化を検討するために必要な値は, 次の様に仮定して許容応力を算出した.

$\sigma_w=215[\text{MPa}]$, $\beta=1.0$ (切欠なし), $\zeta_1=1.0$ (引張・圧縮には影響が少ない), $\zeta_2=0.6$ (切削表面粗さ Ra25 程度), f_m と f_s にはそれぞれ 2 割程度の安全率を付加し 1.2 として算出すると, 許容応力 σ_{al} は約 $90[\text{MPa}]$ となる.

2.6 寸法最適化手法の適用結果

図 3 は, 設計変数 $x_1=200[\text{mm}]$, $x_2=200[\text{mm}]$ の初期モデルの結果で, 目的関数 $\delta(x)=1.72[\text{mm}]$, 制約条件 $\sigma(x)=89.6[\text{MPa}]$ である. 図 4 は, 設計変数 $x_1=300[\text{mm}]$, $x_2=500[\text{mm}]$ の時の結果で, 目的関数 $\delta(x)=1.25[\text{mm}]$, 制約条件 $\sigma(x)=98.2[\text{MPa}]$ であり, 制約条件 (許容応力 σ_{al} 未満) を満足していない. 図 5 は, 設計変数 $x_1=500[\text{mm}]$, $x_2=300[\text{mm}]$ の時の結果で, 目的関数 $\delta(x)=1.12[\text{mm}]$, 制約条件 $\sigma(x)=85.3[\text{MPa}]$ である.

今回の解析は, 式(3)に示す設計変数の範囲について x_1 , x_2 をそれぞれ $50[\text{mm}]$ 間隔で寸法を変化させた解析を行っている. したがって, x_1 , x_2 がそれぞれ 7 種類の寸法になり, 全 49 通りの組み合わせの中で最適解を見出そうとしている. この全 49 通りの組み合わせの中で, 制約条件 (許容応力 $\sigma_{al} (=90[\text{MPa}])$ 未満) を満足し, 目的関数 (側壁の変形量) $\delta(x)$ が最小となる図 5 に示す形状が最適解である.

3. 事例 2 : ヒートシンク

3.1 解析モデル

図 6 に作成したヒートシンクの三次元解析モデルを示す. このモデルは, $50[\text{mm}] \times 50[\text{mm}] \times 10[\text{mm}]$ の銅製のベースブロックの中間高さに $\phi 5[\text{mm}]$ の穴が $10[\text{mm}]$ 間隔で蛇行して空いており, その中を温水が流れている. そのベースブロックの上面に $50[\text{mm}] \times 50[\text{mm}] \times 5[\text{mm}]$ のアルミ製ヒートシンクを設置している. ヒートシンクには, 縦横 $5[\text{mm}]$ 間隔で円筒形状の突起を設けている.

3.2 解析する現象

ベースブロックの穴内には温水が流れており, 温水からの熱は, ベースブロックとヒートシンクを通過し, 周辺空気 ($293[\text{K}]$) へ放熱される. その際, 流入口から流入する温度 $353[\text{K}]$ の温水が, 流出口から流出する時に温度 $343[\text{K}]$ 未満 ($10[\text{K}]$ 冷却) となるヒートシンクの円筒突起形状を決定する.

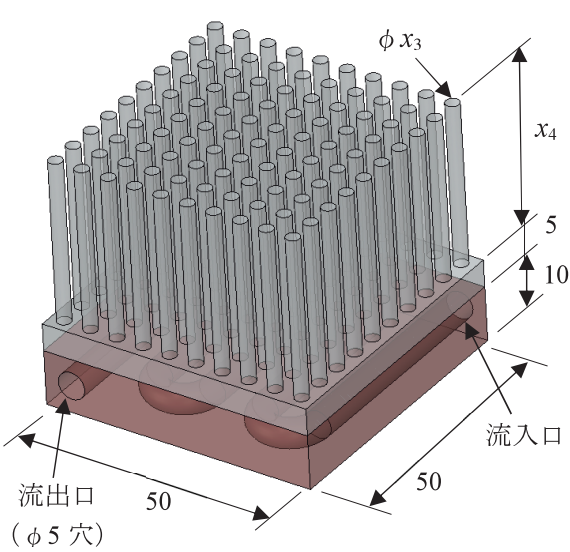


図 6 ヒートシンクの解析モデル

表 1 構造体の物性値

項 目	銅	アルミ
密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	8900	2700
熱伝導率 $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	390	218
比熱 $[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	390	900

表 2 流体の物性値

項 目	空気	温水
密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	1.04	971.8
熱伝導率 $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	0.029	0.667
比熱 $[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	1008.3	4195.3
粘性係数 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	2.03E-5	35.1E-5

3.3 材料物性

CAE 解析に使用した構造物の材料 (銅とアルミ) の物性値を表 1 に, 流体 (空気と温水) の物性値を表 2 にそれぞれ示す.

3.4 寸法最適化手法の適用

ヒートシンクの寸法最適化の適用条件を式(4)に示す. 目的関数 $M(x)$ はヒートシンクの重量を最小とし, 制約条件 $T(x)$ は流出口の温水を $343[\text{K}]$ 未満とする. また, 設計変数は図 6 に示すヒートシンクの円筒突起形状の直径 x_3 と高さ x_4 とする.

目的関数 : $M(x)$ (最小化)

制約条件 : $T(x) < 343 [\text{K}]$

設計変数 : $1.5 \leq x_3 \leq 2.5 [\text{mm}]$
 $10 \leq x_4 \leq 60 [\text{mm}]$

} \cdots (4)

3.5 寸法最適化手法の適用結果

ヒートシンクからの放熱状態と流出口の温水の温度について、図7は、設計変数 $x_3=1.5[\text{mm}]$, $x_4=10[\text{mm}]$ の初期モデルの結果で、流出口の温度 $T(x)=348.4[\text{K}]$ である。図8は、設計変数 $x_1=2.0[\text{mm}]$, $x_2=30[\text{mm}]$ の時の結果で、流出口の温度 $T(x)=344.8[\text{K}]$ と、いずれの結果も制約条件を満足していない。図9は、設計変数 $x_1=2.0[\text{mm}]$, $x_2=60[\text{mm}]$ の時の結果で、流出口の温度 $T(x)=342.7[\text{K}]$ となっており、制約条件の $343[\text{K}]$ 未満を満足する結果が得られている。

今回の解析では、式(4)に示す設計変数の範囲について、円筒の直径 x_3 を $0.5[\text{mm}]$ 間隔で3種類変化させ、円筒の高さ x_4 を $10[\text{mm}]$ 間隔で6種類の寸法で変化させており、全18通りの組み合わせの中で最適解を見出そうとしている。ここで、円筒の高さ x_4 は大きくなるにしたがって、制約条件を満足する結果に近づくが、目的関数（ヒートシンク重量）は増加するため、制約条件を満足した時点でヒートシンク重量が最小値をとる。このことから、図9に示す形状が最適解となる。

4. 結果及び考察

貯水タンク（事例1）、ヒートシンク（事例2）のいずれの事例も、設計変数を製品の寸法とし、それぞれの制約条件下において、目的関数を最小化するため、CAE解析に寸法最適化手法を適用している。これらの事例において、最終的に最適解が定量的に得られていることから、寸法最適化で使用したアルゴリズムが、企業製品に近い解析モデルにおいて適用可能であることが確認できた。

CAE解析に寸法最適化手法を適用する場合、改善したい評価指標である目的関数、最適化において満足しなければならない制約条件、目的関数を改善するための調整変数である設計変数をそれぞれ入力することで、最適解が得られるまで繰り返し計算を実行する。ただし、入力した設計変数の範囲に制約条件を満足する解が存在しない場合、最適解が得られないまま計算が終了することになる点は注意が必要である。

5. おわりに

「貯水タンク（事例1）」および「ヒートシンク（事例2）」に関するCAE解析に、寸法最適化手法を適用した結果、次のことがわかった。

(1) 事例1では、設計変数の全49通りの組み合わせ

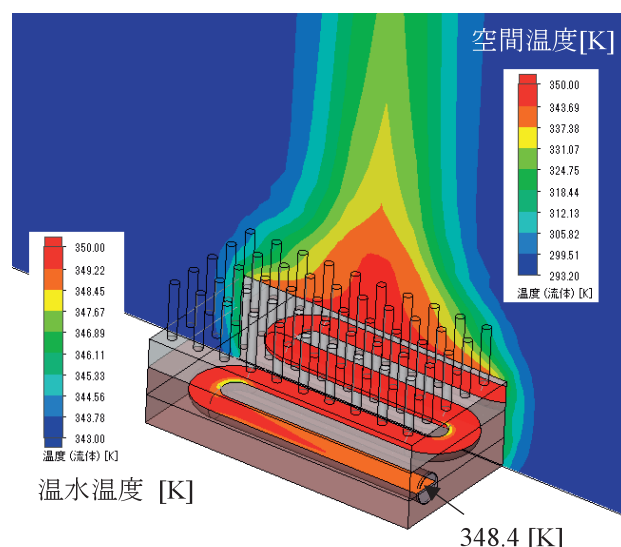


図7 寸法最適化 ($x_3=1.5[\text{mm}]$, $x_4=10[\text{mm}]$)

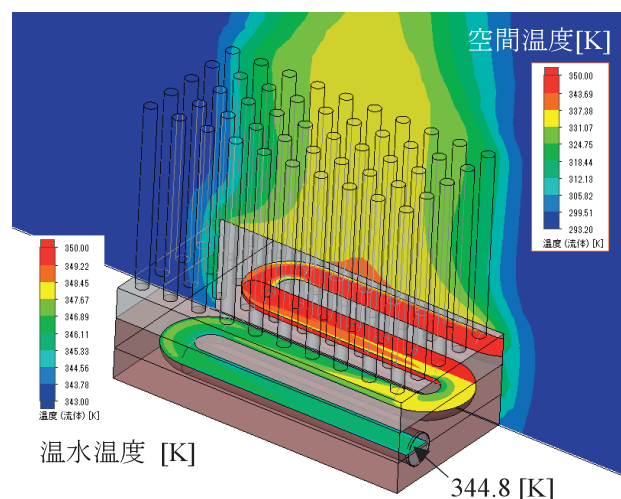


図8 寸法最適化 ($x_3=2.0[\text{mm}]$, $x_4=30[\text{mm}]$)

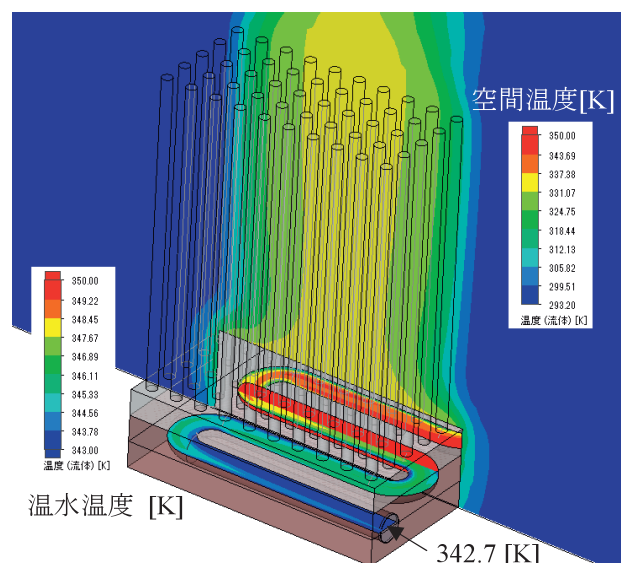


図9 寸法最適化 ($x_3=2.0[\text{mm}]$, $x_4=60[\text{mm}]$)

の中から、制約条件（許容応力 $\sigma_{al}=90[\text{MPa}]$ ）未滿を満足し、目的関数（タンク側壁の変形量） $\delta(x)$ が最小となる構造を得ることができた。

- (2) 事例2では、設計変数の全18通りの組み合わせの中から、ベースブロックの穴内を流れる温水（流入口温度353[K]）を制約条件（流出口温度343[K]）未滿に冷却できる最小重量のヒートシンクの形状が得られた。
- (3) これらの事例で最終的な最適解が得られていることから、寸法最適化で使用したアルゴリズムが企業製品に近い解析モデルに適用できることが確認できた。

今後、県内企業から製品や部品等の構造設計の最適化に関する相談があった際は、製品に対して改善したい評価指標である目的関数を十分に検討し明確にすることで、この寸法最適化手法を活用したCAE

解析による技術支援を行う予定である。

最後に、本研究を実施するにあたって使用した線形構造・流体解析システム（ダッソーシステムズ製SolidWorks2017）は平成27年度電源立地地域対策交付金により導入した。

参考文献

- 1) 田中徹：CAE 解析による構造設計の最適化に関する研究（第1報），令和元年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.28，p59-62.
- 2) 相吉英太郎，岡本卓，安田恵一郎：最適化手法の基礎，森山出版（2014）.
- 3) 畔上秀幸：形状最適化問題，森北出版（2016）
- 4) 金属材料 疲労強度の設計資料I（一般・寸法効果・切欠係数），日本機械学会（2003）.