CAE 解析による構造設計の最適化に関する研究（第１報）

生産技術部
田中　徹

CAE 解析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．当センターにおいても，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，解析ノウハウを蓄積しており，CAE 解析を製品設計に活用する県内企業は増えてきている．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．本年度は簡単な形状を対象に，部材断面の高さや幅などの寸法決定に最適化手法を適用する方法について検討し，製品に適切な寸法値を求めることが可能になることを確認した．

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．当センターの CAE 解析は、1998 年に線形構造解析システムの導入にはじまり，2003 年に非線形構造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．

本研究は，CAE 解析に最適化技術を適用することで結果を評価し，製品性能の改善点を定量的に見出す方法の構築を目的としている．本年度は，スパナの様な単純な片持ち梁のモデルを対象に，胴部断面の高さや幅などの寸法決定に最適化手法を適用する方法について検討した．

２．CAE 解析と寸法最適化

機械部品は外力によって変形し，その歪みによって部品内部に抵抗力（応力）が発生する．この応力が外力と釣り合い状態にあることで，破損することなく強度的な安全性を確保できている．

部品に生じる変形量や応力値を求めるには，材料力学に基づいて構造計算する方法が一般的であるが，部品の構造が複雑になると，数式が複雑になり計算することが困難になる．

有限要素法は，物体を細かく分割し個々の小部分を対象にすることにより，ひずみ量を比較的簡単な式で近似的に表すことが出来る．その近似式を部品全体に至るまで積み重ねることで，部品に生じる変形量や応力値の近似値を得ることができる．また，この有限要素法では，細かく分割された膨大な数の小部分に対して計算をするため，コンピュータを利用して繰り返し計算を行う必要がある．近年のコンピュータの高性能化に伴い，複雑な構造の製品にも適用できるようになったことから，有限要素法が多くの CAE 解析に利用されている．

CAE 解析は複雑な形状部品に生じる変形量や応力値を求めて，部品破損などに対する強度評価等を行うことが可能であるが，解析した設計形状や寸法等が部品性能において最も適切であるかを判断することは難しい．そこで，最近では CAE 解析へ寸法最適化技術を適用する研究が注目されている [1,2]．

寸法最適化は，式(1)により評価する手法である [3,4]．

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

ここで，α は制約定数である．

材料力学に基づく設計計算が適用できない複雑な部品形状の設計において，CAE 解析の結果に寸法最

適化を適用することで，与えられた制約条件を満足し，目的とする値（関数）を最小にするような設計変数を決定することができると考えられる．

３．スパナの最適化設計

3.1 CAE 解析

(1) 解析モデル

図１に示すように，スパナを三次元ソリッドモデルとして作成した．

(2) 材料物性および解析条件

スパナの材料は構造用炭素鋼 S45C 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 に設定した．CAE 解析で設定した解析条件を図１と表１に示す．

最適化のための設計変数は，スパナの胴部断面の幅と高さ寸法とし，設計変数の範囲は幅寸法を 5.0[mm]から 10.0[mm]，高さ寸法を 5.0[mm]から 20.0[mm]とした．また，それぞれの設計変数の増分ステップは幅寸法を 0.5[mm]，高さ寸法を 1.0[mm]に設定した．

CAE 解析には線形構造・流体解析システム（ダッソーシステムズ製 SoliWorks2017）および非線形構造解析システム（ANSYS2019R1）を使用した．

3.2 制約条件

寸法最適化に適用する制約条件を設定するための値（式(1)の α）として，式(2)によりスパナの許容応力 σ_{al} を算出する [5]．

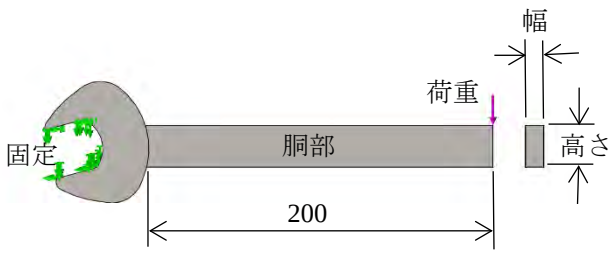

図１　スパナの解析モデル

表１　解析条件

設計変数	胴部断面の幅寸法，高さ寸法
解析タイプ	線形静解析
要素タイプ	四面体二次要素
要素サイズ	3.0[mm]
境界条件	拘束条件:ボルト把持部を完全固定． 荷重条件:スパナ端部に 100[N]．

$$\sigma_{al} = \frac{1}{f_m \cdot f_s} \cdot \frac{\zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \sigma_w}{\beta} \quad \cdot\cdot\cdot(2)$$

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．

σ_w＝240[MPa]，β＝1.0（切欠なし），ζ_1＝1.0（引張・圧縮には影響が少ない），ζ_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 として式(2)より算出した．

$$\sigma_{al} = \frac{1}{1.2\times1.2} \cdot \frac{1.0\times0.6\times240}{1.0} \fallingdotseq 100\ [\mathrm{MPa}]$$

４．結果および考察

CAE 解析で得られた設計変数の組み合わせ 176 組のスパナモデルの応力値を図２に示す．解析結果のうち，制約条件である許容応力 σ_{al} が 100[MPa]以下の応力値が得られた範囲を図２の ■ に示す．ここで，制約条件を満たす設計変数の組み合わせは 61 組あり，1 組の最適寸法を求めることができていない．そこで，部品コストに関係する材料費用を抑えるために，部品の質量 m を目的関数とする．

制約条件を満たす 61 組の設計変数（図２の ■ 範囲）の中で，設定した目的関数（部品質量 m）の結果を図３に示す．この結果から，部品質量 m が最小となるのは，胴部断面の幅 5.0[mm]，高さ 19.0[mm]（図３の □ 部）の寸法になることが分かる．

次に，材料力学に基づいた構造計算を用いて，2 章で述べた寸法最適化の式(1)をスパナモデルに適用する．このモデルに材料力学の片持ち梁の式 [6]を制約条件とし，目的関数は部品質量に関係する胴部の断面積を適用する．また，設計変数の範囲は 3 章で示した CAE 解析の条件にあわせた．これらのことをまとめると式(3)となる．

$$\left.\begin{array}{l} \text{目的関数：} f(x) = x_1 \cdot x_2 \ \text{（最小化）} \\ \text{制約条件：} g(x) = \dfrac{\gamma}{x_1 \times {x_2}^2} < \alpha \\ \qquad\qquad\qquad \text{（部品応力を求める式）} \\ \text{設計変数：} 5 < x_1 < 10,\ 5 < x_2 < 20 \\ \qquad\qquad\qquad \text{（単位 mm）} \end{array}\right\} \cdot\cdot(3)$$

ここで, x_1 は胴部断面の幅, x_2 は胴部断面の高さ, γ は荷重や形状により決まる係数（1.68×10^5），α は 3 章で算出した許容応力 σ_{al} である.

式(3)より算出した結果を図 4 および図 5 にそれぞれ示す．寸法最適化による結果のうち，制約条件を満たす範囲を図 4 の ■ に示す.

この結果から，制約する値 α 以下とする制約条件を満たす設計変数の組み合わせは 57 組になる. この中で胴部の断面積が最小になる（部品質量 m を最小にする）のは，胴部断面の幅 5[mm]，高さ 19[mm]（図 5 の □ 部）の寸法の時である．これは，前述の CAE 解析を用いた寸法最適化と同じ結果である.

今回，スパナの最適化設計において，CAE 解析に設定する設計変数を，製品の強度を確保しつつ，材料使用量を抑えることを目指して寸法最適化の制約条件や目的関数を検討した結果，最適な設計寸法を定量的に決定できることが確認できた．このことから，製品設計を行う際に，材料力学に基づく構造計算が適用できない複雑な部品形状において，CAE 解析に寸法最適化の手法を適用することで，最適な寸法値を求めることが可能になると考えられる.

５．おわりに

CAE 解析に寸法最適化手法を適用して「スパナの最適化設計」を行った結果から次のことがわかった.

(1) CAE 解析による強度評価だけでは，許容応力以下を満たす設計変数の組み合わせが 61 組あり，1 組の最適寸法を求めることができない.

(2) 許容応力以下とする制約条件に部品質量の目的関数を適用することで 1 組の最適寸法を求めることができる.

(3) CAE 解析に寸法最適化手法を適用した場合と，材料力学を利用した寸法最適化手法を適用した場合を比較したところ，いずれの結果も同じ最適寸法を得ることができた.

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，この寸法最適化手法を適用して支援する予定である.

最後に，本研究を実施するにあたって使用した線形構造・流体解析システムは電源立地地域対策交付金, 非線形構造解析システムは公益財団法人 JKA の補助により導入した.

参考文献

1） 劉建中，久保光徳，青木弘行，鈴木邁，吉田旺弘：形態設計における寸法最適化問題の応用，デザイン学研究 Vol41,No3,　pp.9-16　(1994).

2） 尼子龍幸，西垣英一，西脇眞二，小島芳生，菊

Hight [mm] \ Width [mm]	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
5.0	1021	936.3	852.6	796.4	741.5	690	644.9	588	557	514.3	490.5
6.0	729	670.7	610.7	572.6	533.9	492.4	459.2	424.1	397.1	371.7	348.5
7.0	561.5	509	477.4	440	405.8	384.8	353.3	330	303	277.7	263.2
8.0	439	398	365.5	338.3	311.3	296.1	273.7	252.7	233.9	215.5	207.5
9.0	353.6	322.6	296.5	275.6	254.2	237.9	220.6	208.5	190.9	175.2	166.6
10.0	295.4	268.6	250.8	231.1	217	199.7	189.8	175.8	162.1	146.2	138
11.0	240.4	221.7	205.4	191.2	178.2	166.8	155.2	143.9	134.6	122.3	114.8
12.0	205.5	191.3	175.6	165.6	152.1	141.6	131.8	123.1	113.3	105.5	100
13.0	182.9	169.8	155.5	142.3	134.1	126.3	117.6	106.4	100.5	94.3	89.5
14.0	153.9	144.5	132.2	124	115.4	108	101	93.8	87.8	81.7	76.0
15.0	139.1	129.2	119.3	110.1	102.3	95.0	89.4	84.7	77.1	70.6	68.3
16.0	124.8	116.8	108.7	98.1	93.6	86.1	81.8	77.0	69.1	67.0	61.8
17.0	110.9	100.2	92.9	87.3	82.1	77.2	72.1	66.6	62.1	56.4	55.1
18.0	103.9	94.6	86.7	81.4	76.4	70.3	65.7	62.6	55.6	53.0	49.5
19.0	90.3	83.7	78.4	74.8	68.2	65.0	61.6	58.6	56.1	52.0	50.3
20.0	88.1	81.9	76.7	70.3	62.3	63.3	59.9	57.2	54.5	50.9	49.1

図２　CAE 解析の結果（応力値）

Hight [mm] \ Width [mm]	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
5.0	159.3	163.2	167.1	171	174.9	178.8	182.7	186.6	190.5	194.4	198.3
6.0	167.1	171.8	176.5	181.1	185.8	190.5	195.2	199.8	204.5	209.2	213.9
7.0	174.9	180.4	185.8	191.3	196.7	202.2	207.6	213.1	218.5	224	229.4
8.0	182.7	188.9	195.2	201.4	207.6	213.9	220.1	226.3	232.6	238.8	245
9.0	190.5	197.5	204.5	211.5	218.6	225.6	232.6	239.6	246.6	253.6	260.6
10.0	198.3	206.1	213.9	221.7	229.5	237.3	245.1	252.9	260.7	268.4	276.2
11.0	206.1	214.7	223.3	231.8	240.4	249	257.6	266.1	274.7	283.3	291.9
12.0	213.9	223.3	232.6	242	251.3	260.7	270	279.4	288.8	298.1	307.5
13.0	221.7	231.9	242	252.1	262.3	272.4	282.5	292.7	302.8	313	323.1
14.0	229.5	240.5	251.4	262.3	273.2	284.1	295	306	316.9	327.8	338.7
15.0	237.4	249.1	260.8	272.5	284.2	295.9	307.6	319.3	331	342.7	354.4
16.0	245.2	257.7	270.1	282.6	295.1	307.6	320.1	332.6	345	357.5	370
17.0	253	266.3	279.5	292.8	306.1	319.3	332.6	345.9	359.1	372.4	385.7
18.0	260.8	274.9	288.9	303	317	331.1	345.1	359.2	373.2	387.3	401.3
19.0	268.7	283.5	298.3	313.2	328	342.8	357.7	372.5	387.3	402.2	417
20.0	276.5	292.1	307.8	323.4	339	354.6	370.2	385.8	401.4	417.1	432.7

図３　CAE 解析の結果（目的関数）

x_2 [mm] ＼ x_1 [mm]	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
5.0	1351	1228	1126	1039	964.8	900.5	844.2	794.5	750.4	710.9	675.4
6.0	938	852.7	781.7	721.5	670	625.3	586.3	551.8	521.1	493.7	469
7.0	689.1	626.5	574.3	530.1	492.2	459.4	430.7	405.4	382.9	362.7	344.6
8.0	527.6	479.7	439.7	405.9	376.9	351.8	329.8	310.4	293.1	277.7	263.8
9.0	416.9	379	347.4	320.7	297.8	277.9	260.6	245.2	231.6	219.4	208.4
10.0	337.7	307	281.4	259.8	241.2	225.1	211.1	198.6	187.6	177.7	168.8
11.0	279.1	253.7	232.6	214.7	199.3	186	174.4	164.2	155	146.9	139.5
12.0	234.5	213.2	195.4	180.4	167.5	156.3	146.6	137.9	130.3	123.4	117.3
13.0	199.8	181.6	166.5	153.7	142.7	133.2	124.9	117.5	111	105.2	99.91
14.0	172.3	156.6	143.6	132.5	123.1	114.9	107.7	101.3	95.71	90.68	86.14
15.0	150.1	136.4	125.1	115.4	107.2	100.1	93.8	88.28	83.38	78.99	75.04
16.0	131.9	119.9	109.9	101.5	94.22	87.94	82.44	77.59	73.28	69.42	65.95
17.0	116.8	106.2	97.37	89.88	83.46	77.9	73.03	68.73	64.91	61.5	58.42
18.0	104.2	94.75	86.85	80.17	74.44	69.48	65.14	61.31	57.9	54.85	52.11
19.0	93.54	85.04	77.95	71.95	66.81	62.36	58.46	55.02	51.97	49.23	46.77
20.0	84.42	76.75	70.35	64.94	60.3	56.28	52.76	49.66	46.9	44.43	42.21

図４　構造計算の結果（応力値）

x_2 [mm] ＼ x_1 [mm]	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
5.0	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45	47.5	50
6.0	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
7.0	35	38.5	42	45.5	49	52.5	56	59.5	63	66.5	70
8.0	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80
9.0	45	49.5	54	58.5	63	67.5	72	76.5	81	85.5	90
10.0	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
11.0	55	60.5	66	71.5	77	82.5	88	93.5	99	104.5	110
12.0	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120
13.0	65	71.5	78	84.5	91	97.5	104	110.5	117	123.5	130
14.0	70	77	84	91	98	105	112	119	126	133	140
15.0	75	82.5	90	97.5	105	112.5	120	127.5	135	142.5	150
16.0	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152	160
17.0	85	93.5	102	110.5	119	127.5	136	144.5	153	161.5	170
18.0	90	99	108	117	126	135	144	153	162	171	180
19.0	95	104.5	114	123.5	133	142.5	152	161.5	171	180.5	190
20.0	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200

図５　構造計算の結果（目的関数）

池昇：First Order Analysis における最適設計法，日本機械学会講演会論文集，pp.128-129 (2001).

3）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).

4）畔上秀幸：形状最適化問題，森北出版 (2016)

5）金属材料 疲労強度の設計資料 I（一般･寸法効果･切欠効果），日本機械学会 (2003).

6）松浦章，北久保昭三，原田昭，三石健男：材料力学（下），職業訓練法人日本技能教育開発センター (1993).