

# 最適設計のための CAE 省力化技術

## Automated CAE Process Technology for the Optimal Design

静 谷 健 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部  
久 保 世 志 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部  
渡 邊 修 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主査

CAE ( Computer Aided Engineering ) ベースで最適設計を行う場合、多数の設計解の候補について数値解析を実施する必要がある。従来、計算格子生成や数値解析は手動で行われてきたが、より迅速、広範囲に最適設計の検討を行うためには、省力化や自動化による効率改善が必要である。本稿では CAE を実施するうえで人が介在する時間の多い格子生成を省力化する技術、および格子生成から数値解析実行までの一連の処理を自動化する技術について述べる。さらに、これらの技術を用いてレシプロ圧縮機吸吐弁の最適化を実施した事例を示す。

When optimizing product designs by utilizing CAE, huge numbers of design solutions need to be considered. Usually, mesh generation and computer analysis are run manually, and the time these take becomes a serious bottleneck in optimization. Therefore, improvements in the efficiency of mesh generation and computer analysis via automation or by achieving labor-saving with regards to the CAE process are needed in order to obtain a more effective way of identifying optimal designs. An automated technique, from mesh generation to computer analysis, is described in this study. Furthermore, the optimization of the shape of a reciprocating compressor valve is introduced as an example of the application of the automated technique.

### 1. 緒 言

近年、ハードウェア、ソフトウェア技術が進歩し、コンピュータによって工学的な計算を行う CAE ( Computer Aided Engineering ) と呼ばれる技術では、従来よりも大規模かつ複雑な現象を扱えるようになってきた。このため計算負荷が高い CAE による最適化設計を行う事例が増えつつある。最適化を CAE で実施するためには、多数のケースについて数値解析を実行する必要がある。多くの候補からより良い設計解を探索する手法には、設計空間全体の設計解集合から選択する方法や遺伝的アルゴリズムなどの最適手法などがあるが、いずれにしても CAE で最適化を実施するには多くの数値解析を実施しなければならない。

CAE の中核となる構造解析や流体解析を実施するうえで大きなウエイトを占めているのは、解析に必要な格子生成に要する時間である。多数の候補から最適化を行う場合、通常は対象物の形状を変更して解析を実施するが、形状変更に伴う計算格子の再生成に多くの時間を費やしている。

この問題に対処するため、幾つかの省力化技術について検討を行った。本稿では、① 既存格子を再利用して新たな格子を生成する方法 ( モーフイング、リメッシュ )

② CAD と格子生成をリンクさせて格子生成の省力化を図る方法 ③ 格子生成そのものを簡単化する方法 ( Voxel 法 )、について検討を行った。また、計算格子を生成し解析を実行する一連の手順の時間短縮を図るため、あらかじめ決められた設計変数とおりに格子生成、解析を実行する CAE の自動化を構築した。さらに、これらの技術を利用して形状の最適化を実施したレシプロ圧縮機の吸吐弁の事例を示す。

### 2. 省力化格子生成技術

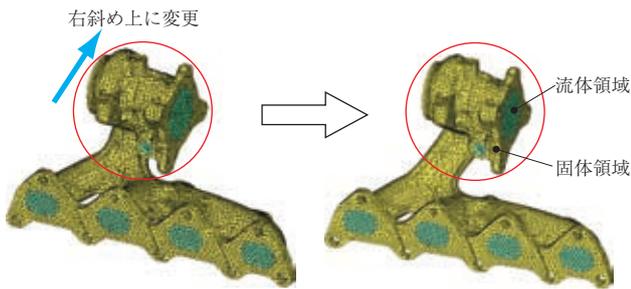
最近の格子生成に関する研究では<sup>(1) (2)</sup>、複雑な形状での格子生成の時間短縮やメモリの節約などに重点が置かれている。格子生成時間の短縮や省力化技術は最適化設計を行う場合には必須であり、さらに、自動化による効率改善を目的とし、本稿では既存格子を有効活用する手法、および CAD を有効活用する格子生成手法を取り入れ自動化を検討した。ここでは自動化に必要な格子生成技術と、これらを使った自動化システムの概要について述べる。

#### 2.1 モーフイング

最適化計算を実施する場合、トポロジー ( 相対的な位置関係が変わらない ) に影響がない程度の微小な形状変更にて焦点をあてた繰返し計算を必要とする時がある。この

場合においては、一から格子生成するよりも既存格子の一部を変更させる方が省力化であると考え、モーフィング技術<sup>(3)</sup>を自動化システムに取り入れ格子生成時間短縮を図った。モーフィングとは既存格子を使用し、粘度細工のように物体の形状と格子を変形させる技術である。これによって格子生成まで戻らず形状を変更できるとともに、設定されている境界条件も引き継ぐことができるため、解析モデル作成に要する時間短縮が可能になると考えた。具体的には、既存格子を基に制御領域、変形領域および固定領域を設定し、制御領域を自由に動かすことによって変形領域が追従し形状と格子が変更される。

この手法は、過去に生成された格子や他人が生成した格子も有効活用できることが利点であり、変形量をパラメータ化することで、最適化に必要な形状変更の自動化を可能にした。流体・構造連成解析に用いられる、4気筒レシプロエンジン排気管の既存格子をモーフィングした例を第1図に示す。図に示すように、流体領域と固体領域の区別を



第1図 エンジン排気管モーフィング例  
Fig. 1 Morphing of engine exhaust duct

考慮せずに自由に動かすことが可能である。

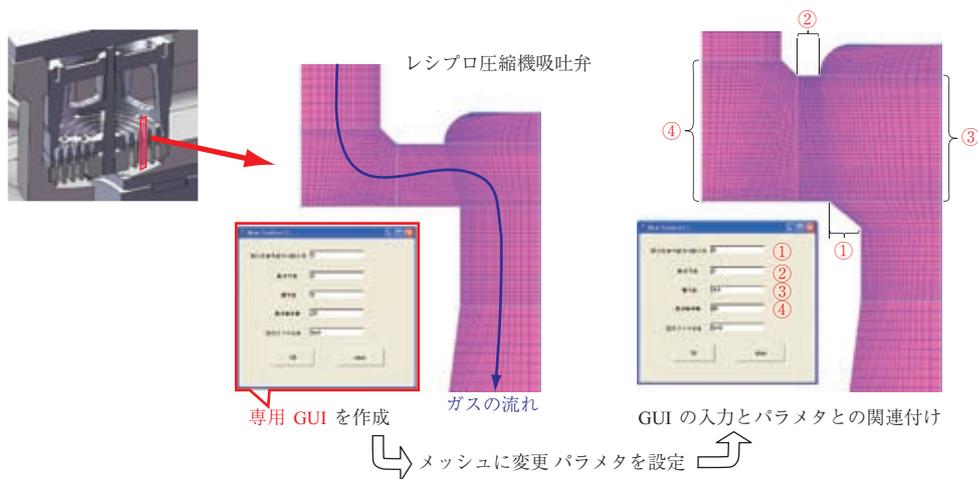
## 2.2 リメッシュ

前述のとおり、既存格子を変形させるモーフィング技術は、あくまでも既存格子を使って微小な形状変更を対象としている技術である。このため変形量が大きいと格子にひずみが生じ、解析に必要な格子解像度が保たれず計算精度が低下することが考えられる。このため大幅な形状変更を要する場合にはリメッシュ手法を取り入れ、最適化計算の自動化を実現した。リメッシュ技術<sup>(4)</sup>とは、既存格子に対して、パラメータを設定し、一部または全部の形状と格子の修正を行う。パラメータ設定はテキストファイル化することが可能であり、修正数値を代入できるような独自のGUI (Graphical User Interface) を作成し、テキストファイルと関連付けることによって、形状の確認や格子の確認などが容易にできるようになる。

以上の一連の作業をバッチ処理させれば、自動化システムに取り入れることが可能となる。この手法を用いることによって、モーフィングで生じるような形状変更に伴う格子のひずみや粗密も制御できる。レシプロ圧縮機吸吐弁流路の格子にリメッシュ技術を適用した例を第2図に示す。

## 2.3 CADでの形状変更

近年の三次元CADの普及によって、解析に必要な格子生成にCADデータを利用する方法が広まっている。CADを利用するメリットは、大きな形状変更もCADで行うことができることが挙げられる。また、一般的に数値解析による最適計算では、最適形状が得られた後に実設計



第2図 レシプロ圧縮機吸吐弁流路リメッシュ例  
Fig. 2 Re-meshing of reciprocating compressor channel

(注) ① : 切欠き寸法  
② : 幅寸法  
③ : 高さ寸法  
④ : 高さ格子数

のための CAD データにフィードバックする作業を伴う。

しかし、現状では数値解析で得られた最適形状を簡単かつ正確に CAD へフィードバックすることは困難である。このため、解析に必要な格子生成段階から CAD を組み込むことによって大きな形状変更を可能にし、CAD へのフィードバック作業を省略できる。CAD 上では基本形状を作成し、各寸法をパラメタ化することによって、形状変更を自動化することが可能であり、製品のパーツ単体を形状変更させ、これらを組合せる（アッセンブリ）ことで、複雑形状の形状変更にも対応が可能である。ここでは CAD 上での形状作成および修正方法を述べ、次に CAD データを有効に使う格子生成可能な Voxel 格子法について述べる。

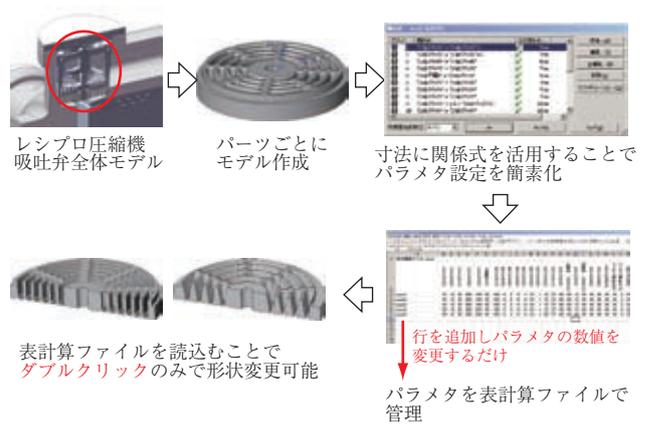
### 2.3.1 パーツ単位でのパラメタ設定

例として汎用の機械 CAD を用いた、レシプロ圧縮機吸吐弁全体モデルを対するパーツ単位でのパラメタ設定手法を示す。パーツモデル作成時に、形状変更させる寸法箇所をあらかじめ考慮しながらモデル作成を行うと同時に、寸法箇所にも名前を付けておく。形状変更の実施には、CAD 標準機能である設計テーブルを活用した。設計テーブルとはモデル作成時に付けた寸法名と数値が表計算ファイルに出力され、再度設計テーブルを読み込ませることによって寸法が形状に反映される機能である。これを活用し出力された表計算ファイル中に行を追加・編集し、再読み込みさせることで形状変更を可能にした。ファイル読み込み後、CAD 上に示されたケース名をクリックすることで、ファイルに記述された寸法が形状に反映され、自動で変更される。

しかし、複雑な形状では寸法が多数になり、変更箇所の見落としや寸法誤記入による形状不成立が発生する。これを回避するため、寸法に係数機能を使用した。これは一つの寸法を変更すれば、これに影響される寸法が関係式に沿って変更される機能である。形状変更の流れを第 3 図に示す。

### 2.3.2 アッセンブリパーツでのパラメタ設定

2.3.1 節で述べたようにパーツ単位でのパラメタを設定できるが、複雑形状では複数のパーツから形状が成り立っていることが多い。これを簡素化するためにアッセンブリでのパラメタ設定手法を示す。アッセンブリとは各パーツを一つのパーツとして組立てることをいう。各パーツ単位でパラメタ設定を行ったモデルを用意しておき、それぞれ必要なパーツ形状をピックアップして一つのアッ



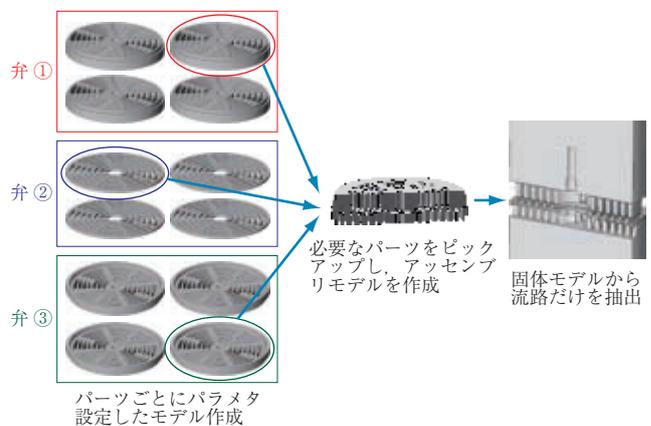
第 3 図 CAD での形状変更方法  
Fig. 3 Shape modification procedure regarding CAD model

ンブリにしていく手法を構築した。これによって各パーツの名前を入力するだけで、アッセンブリモデルを作成することが可能になる。

パーツ単位でのパラメタ設定と同様に、アッセンブリモデルでの入力ファイルも表計算ファイルで管理することが可能である。アッセンブリモデルでは基本的に構造物をモデル化しているが、流体解析では構造物以外を流路として計算するため、CAD 上でアッセンブリモデルから流体解析に必要な流路を抽出する工程も自動化した。アッセンブリモデル作成法を第 4 図に示す。

### 2.4 Voxel 法

将来的に必要となる大規模解析（格子規模が数千万点以上）や複雑形状の解析を行うためには、格子生成に要する時間がボトルネックの一つとなる。この問題を解消する格子生成法の一つに Voxel 法がある。Voxel 法は、サイコロ状の立方体格子の集合として対象をモデル化するため、基本単位となる立方体の 1 辺の長さや細分化を許容する分割数を定義するのみで、機械的に計算モデルを作成



第 4 図 アッセンブリモデル作成法  
Fig. 4 Assembly modeling

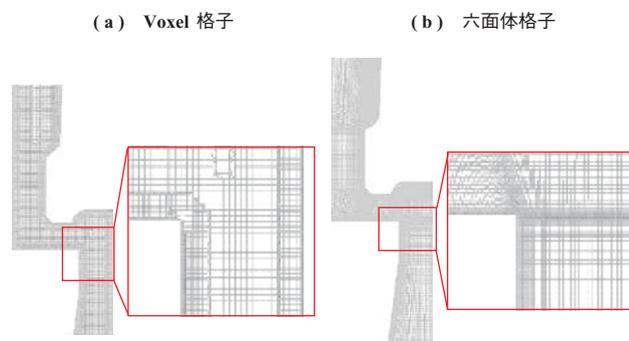
することができる<sup>(5)~(7)</sup>。

一方、立方体形状の格子で形状表現を行うため、通常の格子生成法に比べ格子数が多くなる傾向がある。このため、格子生成時間と解析時間が増大するというデメリットももつ。本稿では、コンピュータを並列で組合せ格子生成することによって Voxel 格子の生成時間の短縮を図った。今後、コンピュータの処理能力の向上によって解析時間の短縮が可能となれば、Voxel 法は、より有効な手段となる可能性がある。

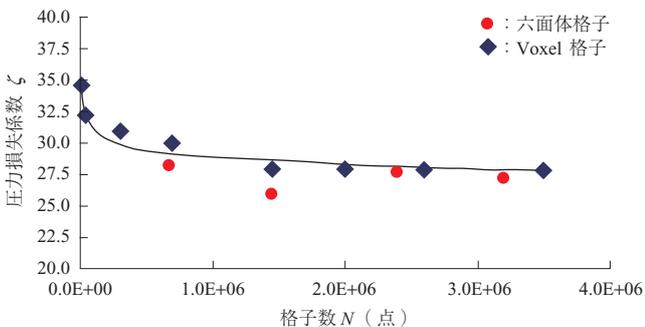
本稿では CAD 上で直接形状変更できる方法と組合せることで、多種類の形状データ (STL 形式) から対象の Voxel 格子を直接生成する方法を構築した。第 5 図に、レシプロ圧縮機吸吐弁の 1 流路モデルの Voxel 格子および従来の六面体格子を示す。また 1 流路モデルに対して、格子数および種類の違いによる計算精度の定量的な検討を行った結果を整理して第 6 図に示す。今回のケースでは 250 万点以上の格子であれば従来の六面体格子と同等の精度が得られることが確認された。

### 3. 自動化

一般に最適化計算では、従来条件/形状とは異なる初期モデルを準備し、進化的手法や確率論的手法などの最適化



第 5 図 レシプロ圧縮機吸吐弁 1 流路モデル  
Fig. 5 Valve channel model of reciprocating compressor



第 6 図 格子数および種類の違いによる解析精度  
Fig. 6 Numerical accuracy of Voxel and hexahedral mesh for various cell numbers

アルゴリズムに従って解析を行うことで最適な条件/形状を探索する。この際、通常は数百から多い場合には数千ケースの形状検討が必要となり、格子生成やそのほかのステップを自動処理/実行することが必要不可欠となる。このため本稿においても、複数形状のモデル化や繰り返し計算を自動処理するシステムの構築を行った。

自動処理システムの構築には汎用最適化ソフトのループ機能を利用し、格子生成、解析実行およびポスト処理というすべての処理を一つの汎用最適化ソフト上で自動実行できる構成とした。

第 7 図に、構築した自動処理システムの一例を示すとともに、以下に各処理ステップの具体的内容を示す。

#### (1) 格子作成

解析用の格子を生成する部分である。最適化を行う際には、どのような条件/形状を初期データとして取得するのかが決める必要がある。本ステップでは実験計画法<sup>(8)</sup>に基づいてパラメータを変更し所望の組合せの解析格子を得ることができる。

格子の変更には、先述のモーフィングやリメッシュ技術を用いた形状変更を用いることで自動格子生成を可能にしている。ただし、初期形状の格子は事前に用意する必要がある。

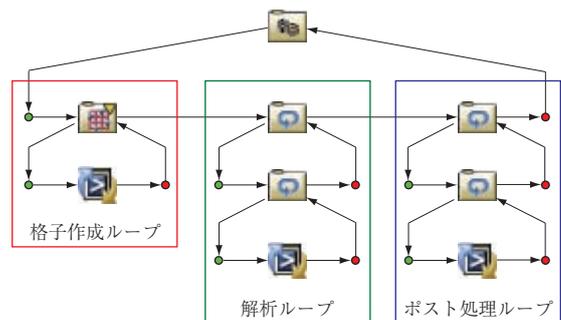
#### (2) 解析

前ステップで生成した格子を用いて実際に構造解析や流体解析を行う部分である。本ステップにおける解析の実行は逐次的に行われるが、並列計算を行うことでさらに効率化が期待できる。

#### (3) ポスト処理

解析を終えると得られるファイルを読み込み、所望の応答値や図を出力するポスト処理を行うステップである。

本稿で構築した自動処理システムはそれぞれの処



第 7 図 自動処理システム例  
Fig. 7 Automated system

理をバッチ実行によって操作しているため、本稿で検討していない CAE ソフトウェアでも、バッチ実行が可能であれば本自動処理システムに適用することが可能である。

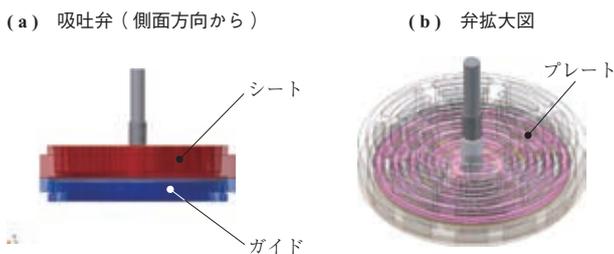
#### 4. 省力化技術の適用事例

3章で構築した自動処理システムを適用した事例として、レシプロ圧縮機の吸吐弁形状最適化について述べる。

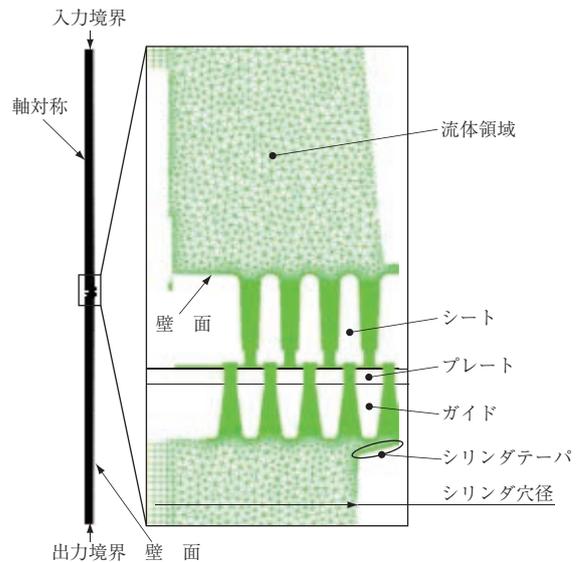
レシプロ圧縮機では、軸動力の約 25% を機械的損失と吸吐弁およびシリンダ流路での圧力損失に費やしており、この損失を可能な限り低減し、より高効率な圧縮機を開発することが求められている。そこで吸吐弁に着目し、弁での圧力損失が低減される最適な弁形状を検討した。従来では、高解像度かつ大規模な流体解析の結果を基に設計を行うことが多い。このため、4章では、より短時間で流体解析の可能な簡易モデルを定義し、先述のリメッシュ技術を組み入れた自動処理システムを利用し、タグチメソッド<sup>(8)</sup>によって新たな弁形状を検討した。

##### 4.1 モデル化と流体解析条件

第 8 図に本稿で対象とする吸吐弁の構成を示す。流入側のシート、流出側のガイドおよびその上下運動によって弁の開閉をつかさどるプレートの三つの構成部品で成り立つ吸吐弁の全開状態を対象とした。現象が再現できる程度に第 9 図に示すような簡易解析モデルを定義した。流体解析は圧縮性の定常解析を行い、支配方程式はナビエス



第 8 図 レシプロ圧縮機吸吐弁  
Fig. 8 Configuration of reciprocating compressor valve



第 9 図 吸吐弁流路解析モデル  
Fig. 9 Analytical model of valve channel

トークス方程式である。

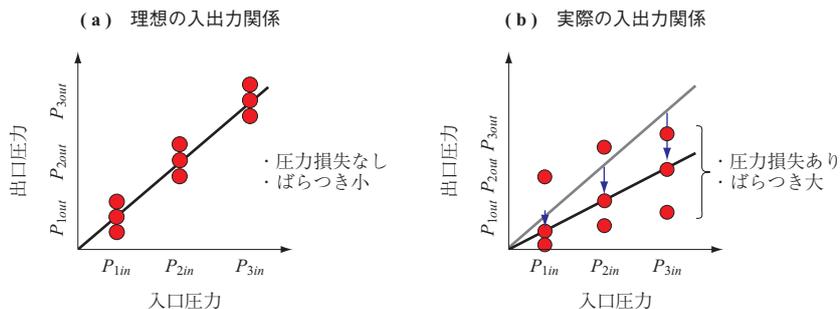
さらに解析条件を第 1 表に示す。

##### 4.2 タグチメソッドの適用

タグチメソッドとは品質工学的手法とも呼ばれ、ロバスト性を考慮した古くから利用されている設計手法の一つである<sup>(8)</sup>。吸吐弁の特性は第 10 図に示すような線形の入出力関係で考えられ、圧力損失の全く生じない状態が理想である。ここで、入口圧力  $P_{in}$ 、出口圧力  $P_{out}$  である。実際の吸吐弁では圧力損失が生じるため、必ず入口圧力に対して出口圧力は低くなる。またどのような入口圧力のもとで使用されても、一様に圧力損失の小さいロバスト性をもつ吸吐弁が理想である。

第 1 表 解析条件  
Table 1 Analysis conditions

計算条件	m1	m2	m3
基準質量流量 (kg/s)	0.21	0.26	0.31
シート部流速 (m/s)	40	50	60
入口流速 (m/s)	15.38	19.22	23.06
入口圧力 (Pa)	78.94	123.35	177.62



第 10 図 吸吐弁の入出力関係  
Fig. 10 Characteristics of valve channel

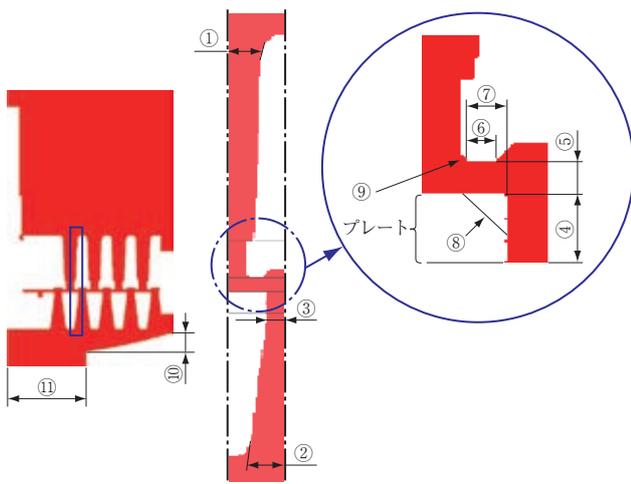
従来形状吸吐弁の流体解析の結果から、プレート部を通るガスのはく離によって大きな圧力損失が生じていることが分かった。そこで吸吐弁流路内形状のうち、圧力損失の発生箇所の形状を変え得る計 11 種類の設計パラメタを第 11 図に示すように定義した。設計パラメタはすべて 3 水準である。

また、入/出力はそれぞれ入口/出口圧力とし、誤差因子として、入口流量変動と作動ガスの温度変化の 2 種類を考慮した。第 2 表に評価条件を示す。

検討する形状の組合せは、L36 直交表と呼ばれる設計パラメタの組合せ表に従い 36 種類に決定した。すなわち第 2 表から、検討する全形状につき 12 通りの解析条件で合計 432 ケースの流体解析を行い、得られた出口圧力を用いて次式で定義した圧力損失係数を求めた。

$$\zeta = \frac{P_{Sout} - P_{Sin}}{1/2 \rho U^2} \dots\dots\dots (1)$$

$\zeta$  : 損失係数  
 $\rho$  : 気体の密度



- (注) ①: シート入口幅 ⑥: 封止幅  
 ②: ガイド出口幅 ⑦: シート出口幅  
 ③: ガイド入口幅 ⑧: プレートテーパ  
 ④: プレート厚さ ⑨: 封止部テーパ  
 ⑤: リフト量 ⑩: シリンダテーパ  
 ⑪: シリンダ穴径

第 11 図 設計パラメタ  
 Fig. 11 Design parameters of valve channel

第 2 表 評価条件  
 Table 2 Evaluation conditions

信号因子 誤差条件	m1	m2	m3	流量変動 (%)	温度変化 (℃)
	40 (m/s)	50 (m/s)	60 (m/s)		
n1	y11	y12	y13	5	-140
n2	y21	y22	y23	5	25
n3	y31	y32	y33	-5	-140
n4	y41	y42	y43	-5	25

$U$  : 入口流速  
 $P_{Sout}$  : 出口静圧  
 $P_{Sin}$  : 入口静圧

ここで本稿では、これまで手動で作成していた解析格子をリメッシュ技術によって自動生成し、さらに、432 回の流体解析および各ケースの圧力損失係数算出までの全工程を自動処理システムで実施した。第 3 表に 3 章で構築した自動処理システムを用いた場合と従来の手動による方法とで本最適化の検討に要する時間を比較して示す。ただし、従来の手動による方法は 1 ケースの格子生成、解析実行およびポスト処理に要する時間から見積もった値である。格子生成時間で比較すると、200 倍以上の大幅時間短縮が可能になった。

### 4.3 結果

432 ケースの流体解析の結果から選定した最適形状の吸吐弁内のガスの流れの様子を従来形状と比較して第 12 図に示す。

第 12 図に示すように、最適形状の全圧分布からはプレート端部での流れのはく離が抑制され圧力の損失が低減されていることが分かる。これは、シート側からガイド側への流路形状が従来形状に比べ、より直線に近い滑らかな形状となっているためであると考えられる。また流速分布を見ると、ガイド出口以降のガスの流れが直線に近づいており、偏りの小さい安定した流れとなっていることが分かる。

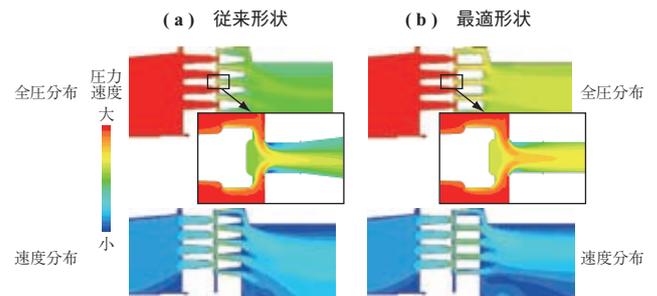
第 13 図に、最適形状の入出力関係を従来形状と比較して示す。凡例の n1 ~ n4 は第 2 表に示した誤差条件を表す。

第 13 図から、最適形状においてガス温度変化がばらつきに与える影響は従来形状から変わらず小さい。最適形状

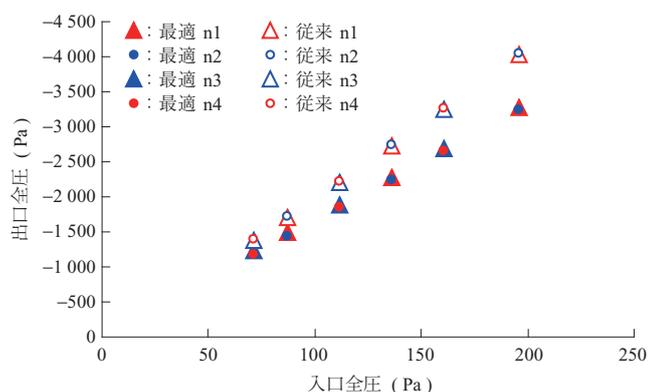
第 3 表 自動処理による効率改善効果

Table 3 Improvement of efficiency by use of automated system

項目	手動 (従来)	自動 (今回)	効率改善量
格子生成	1 200 s/ケース	5 s/ケース	240 倍
数値解析	40 min/ケース	30 min/ケース	1.3 倍



第 12 図 従来形状および最適形状の流れ場比較  
 Fig. 12 Comparison of flow distribution for original and optimal shape



第 13 図 最適形状の入出力関係  
Fig. 13 Characteristics of optimal valve

における圧力損失係数は従来形状に比べ約 27%の低減効果が得られた。

## 5. 結 言

本稿では、CAE ベースで最適設計するための省力化技術について述べた。既存格子変更技術、CAD 形状変更技術、Voxel 法、CAE の自動化について述べ、さらにこれらの技術を使用した例について紹介した。これらの技術を構築したことによって、従来、CAE に費やされていた時間が大幅に短縮され、CAE による最適化検討がより身近なものとなった。

## 参 考 文 献

(1) 小川隆申：適合直交格子のための格子生成

法 日本機械学会論文集 B 編 70 巻 2004 年 pp. 340 - 347

(2) 岩田正子, 雷 康斌, 姫野龍太郎：直交 4 分木格子を用いた熱流体数値計算 日本機械学会論文集 A 編 70 巻 2004 年 pp. 449 - 455

(3) 谷 直樹, 大山 聖, 山西伸宏：遺伝的アルゴリズムと格子モーフィングを使用したロケットエンジン用タービン翼形状最適化 数値流体力学シンポジウム講演論文集 21 巻 2007 年 D10-4

(4) 永田晴典, 雷 忠：超音速機高揚力装置形態に関する格子自動生成 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集 40 巻 2008 年 pp. 271 - 274

(5) W. N. Dawes, S. A. Harvey, S. Fellows, C. F. Favaretto and A. Velivelli : Viscous Layer Meshes from Level Sets on Cartesian Meshes 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (2007) 555

(6) 雷 康斌, 岩田正子, 姫野龍太郎：ボクセル法による流体構造連成解析 日本機械学会論文集 A 編 70 巻 2004 年 pp. 434 - 441

(7) 矢川元基, 藤澤智光：メッシュフリー法の新展開 日本機械学会論文集 A 編 70 巻 2004 年 pp. 330 - 337

(8) 立林和夫：入門タグチメソッド 日科技連 2004 年