The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	自動車駆動系の多目的最適設計に関する研究 : トルクコンバータ形状の最適化
Author(s)	藤田, 喜久雄; 赤木, 新介; 佐々木, 美知 他
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1996, 62(594), p. 802-808
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3195
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

日本機械学会論文集 (C 編)
62 巻 594 号 (1996-2)

論文 No. 95-0947

自動車駆動系の多目的最適設計に関する研究
— トルクコンバータ形状の最適化 — *

藤田 喜久雄[†], 赤木 新介[†], 佐々木 美知[‡]
川村 修一[§], 坂 時存[¶], 平田 隆教[¶]

Multi-Objective Optimal Design of Vehicle Power Train
— Optimization of Torque Converter Geometry —

Kikuo FUJITA, Shinsuke AKAGI, Yoshitomo SASAKI,
Shuichi KAWAMURA, Tokimori SAKA and Takanori HIRATA

Multi-objective optimal design of a vehicle power train is presented for the geometry of a torque converter. The power train is composed of an engine, a torque converter, a transmission and a final gear, and it is an essential subsystem of a vehicle in items of its acceleration performance and fuel economy, etc. In this paper, a practical method of optimizing the geometry of a torque converter is proposed, and trade-off relationships among the objectives are demonstrated by means of design optimization. In the optimization calculation the geometry is manipulated using spline curves, an appropriate evaluation method for torque converter performance is utilized, and successive quadratic programming is used as an optimization algorithm. A computational example demonstrates the effectiveness of the proposed optimization method.

Key Words : Optimal Design, Multi-Objective Optimization, Vehicle Power Train, Torque Converter, Successive Quadratic Programming

1 緒 言

自動車の駆動系は複数の要素からなる統合的な系であり，個々の要素についての最適化を考慮するとともに，全体としての総合的な最適化をはかる必要がある．しかし，従来からの設計方法では，過去の設計事例やシミュレーション，経験などに基づいて設計が行なわれることが通常であり，望ましい設計解を求めるためには，数多くの試行錯誤を必要としている．このような試行錯誤は，数学的なモデルに基づいた数理計画法の適用により，効率的に自動化することが期待できるが，そのような方法を具体的で実際的な設計問題に対して適用しようとする場合，一般に対象システムの内容が複雑になり，多目的最適化の問題となることから，設計問題そのものの合理的なモデル化を行なうことに加えて，最適化計算に適合した性能計算を行なう必要がある．

本研究では，以上のような点を踏まえて，オートマチック車における駆動系の設計問題を取り上げ，走行性や燃費などの評価項目に対してトルクコンバータ形状の最適設計法を構築する．この際，トルクコンバータの翼形状や流体現象についての理論計算式や実験データに基づいた設計知見を操作対象のモデルに内在させるべく，スプライン曲線を基本とした表現を導入して，効果的に形状を操作できるようにする．また，総合的な最適化を効率的に行なうために，まず，トルクコンバータ単体についての最適化を行なった上で，駆動系における総合評価項目に対する多目的の最適化を行なうという二段階の最適化計算を導入する．さらに，最適化計算のアルゴリズムとしては，対象モデルに内在する数量誤差にも強く，性能計算の必要回数が少ない逐次 2 次計画法を用いる．最後に，このような最適設計法を用いることにより，評価項目間のトレードオフ関係を明らかにし，本設計手法の有効性を検証する．

2 自動車駆動系とその設計問題

2.1 自動車駆動系の構成 緒言でも述べたように，自動車駆動系は，図 1にも示すような，駆動力を発生するエンジンからそれを路面に伝えるタイヤの

*1995 年 3 月 20 日 関西支部第 70 期定時総会講演会において講演，原稿受付 1995 年 6 月 9 日.
[†]正員，大阪大学工学部 (〒 **565** 吹田市山田丘 2-1).
[‡]学生員，大阪大学大学院工学研究科 (現在，富士通).
[§]マツダ株式会社 (〒 **730-91** 安芸郡府中町新地 3-1).
[¶]正員，マツダ株式会社

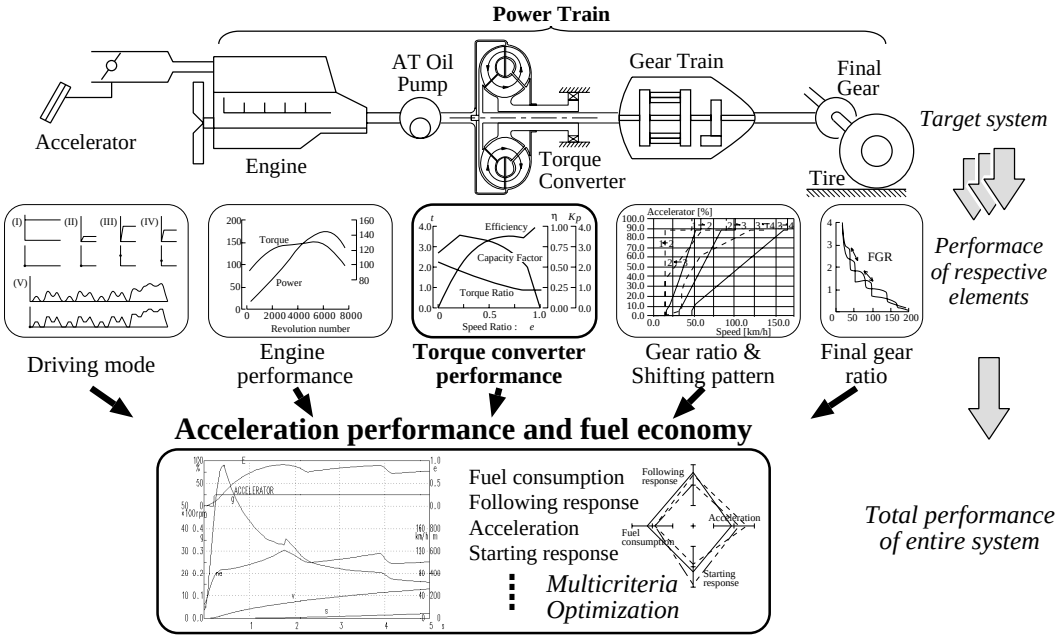


Fig. 1　Vehicle power train and its performance

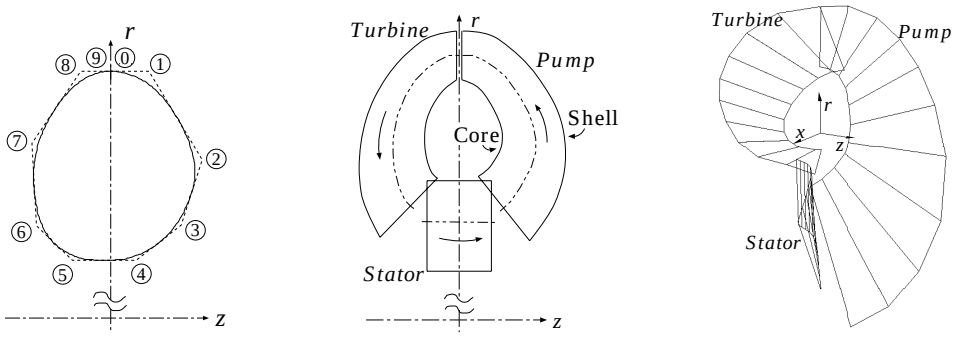
間にある，オイルポンプ・トルクコンバータ・変速ギア・最終ギアから構成される系であり，それらの総合的な機能により，両者の間で駆動力を適切に伝達する目的を担っている[(1)(2)]．したがって，そのような対象システムの設計においては，個別のシステム要素を適切に設計することに加えて，総合性能の面からの最適化をはかる必要がある．

そのような駆動系にあって，流体を媒介に回転運動を伝達する流体継手の一種であるトルクコンバータは，負荷に応じて出力回転数が変化する自動変速性や，回転運動の伝達に係わる振動や衝撃を吸収する機能などの点で，最も重要な役割を果たしており，駆動系全体の性能を考える上で，その性能を向上させることが非常に重要である．そのようなトルクコンバータの構造は，流路を形成するトーラスの内部を，ポンプ・タービン・ステータの順に各翼に沿って流体を巡回させるようになっており (詳細な形状は，後出図 2を参照)，それらの形状寸法を適切に決定することが，トルクコンバータの設計問題であると言える．

2.2　自動車駆動系における性能評価と設計

図 1に示したような駆動系の性能は，個別のシステム要素単体での性能と，それらがシステムとして動作した際の性能により評価することができる．なかでも，トルクコンバータは，上述のように，流体を媒体として回転運動を伝達するものであり，その性能は，入出力軸の速度比 e に対するトルク比 t，伝達効率 η，容量係数 K_p として表される．トルクコンバータ単体での設計における性能目標は，まず，これらの諸量に対する希求値として与えられるが，そのような値は，元来，駆動系全体としての加速性能や燃費性能をもとに経験的に仮定されたものであり，最終的には，単に，トルクコンバータ，すなわち，ポンプ・タービン・ステータの各翼の形状を決定しようとする場合においても，システム全体としての性能の面から，エンジン特性やギア比・変速パターンなどを考慮した総合的な最適化をはかる必要がある．加えて，そのような総合的な評価を行なおうとする場合には，性能や経済性などの複数の評価項目に加えて，車両の持つ性質上，複数の動作状況を考慮に入れた，複数の設計目標に対する総合的な最適化が求められることになる．

一方，トルク比 t，伝達効率 η，容量係数 K_p によって代表されるトルクコンバータそのものの性能については，最近では，数値流体力学を適用した解析シミュレーションが可能になりつつあるが，実際の設計問題への適用を考えた場合，膨大な計算時間を必要とすることや，各翼形状を定めていく上での操作性の面で，それらを，直接，最適化計算などの設計処理に用いることは難しい．したがって，効率的な設計処理を行なうためには，理論的な検討や実験データの蓄積により得られている設計指針に従うことが重要である．特に，コンピュータによる数理計画法を用いた最適設計を行なおうとする場合，その枠組が基本的には，生成検査型の繰り返し計算によるものであることから，できるだけ簡便な方法で正確に性能を見積もる一方，設



(a) Center line represented with spline curve (b) 2-dimensional shell-side and core-side boundaries (c) 3-dimensional geometry

Fig. 2 Generation model for blade geometry

計対象の内容を操作する方法については，様々な設計条件や指針をその操作方法の中に陰的に含んだような，すなわち，いくつかの基本的な設計条件については，それらを明示的に最適化計算における制約条件や目的関数として記述することなく，設定された設計変数の組を任意に操作した場合においても，必ず満足されるような最適化問題の定式化が求められる．

また，全体としての総合評価についても，個別のシステム要素の特性を代表する内容をもとに，トルクコンバータに関わる設計変数から導出される性能特性を統合化し，システム全体としての評価が行なえるようにする必要がある．このような総合的な評価においても，数理計画法による設計最適化の面から，適切なサイズの簡便な評価方法が求められる．

本研究では，以上の内容を踏まえた上で，自動車駆動系の総合性能の面から，トルクコンバータの形状を数理計画法を援用した最適化処理により自動設計するための方法を提案し，その適用結果の一例を通じて，本設計法の有効性を示す．

3 自動車駆動系の性能評価モデル

本節では，上記の視点から，設計対象であるトルクコンバータの形状，トルクコンバータ単体での性能評価モデル，駆動系全体の総合性能評価モデルのそれぞれを示す．

3.1 トルクコンバータの形状操作と性能評価モデル

トルクコンバータは前述のように流体継手の一つであり，一次元流れを想定した理論解析によりその基本的な性能は求めることができ，さらに，子午流面内における 2 次元解析により，流体に作用する遠心力と圧力勾配相互の関係を求めることができる．このような解析手法の与える指針の一つは，全体としての形状が滑らかな流路を形成していることが求められることであり，それに基づいてスプライン曲線を基本とした形状生成法を導入し，そのような内容に対して，「一次元性能計算式[(3)(4)]」と「圧力バランス解析法[(5)(6)]」を用いて，トルクコンバータの性能評価を行なうようにする．

3.1.1 トルクコンバータの翼形状の表現と操作

トルクコンバータの翼形状は，図 2 (c) のような 3 次元状の複雑なものであり，その基本となる子午断面形状は，図 2 (b) に示すようなものである．上述のように，設計指針として全体の形状が滑らかであることが求められることと，最適化計算の点からは，比較的少数の設計変数によって形状変更がスムーズに行なえる必要があることから，本研究では，その子午断面における各翼の中心線をスプライン曲線を用いて表現することを基本として，以下の手順により対象形状を生成・操作するようにする．

(1) まず，翼の流路の中心線を設定するために，図中に○印で示す番号の計 10 個の制御点の (z, r) の 2 次元座標値により定義されるスプライン曲線[(7)]を設定する (図 2 (a))．これらの制御点のうち，⓪，①，⑧，⑨ の各点の r 座標値については，以下のようにして定めるポンプとタービンの接続部におけるシェルとコアの外形線を回転軸に対して平行にするために，共通の値を取るものとし，全体として計 17 個の設計変数により中心線を操作する．

(2) 各翼に対する翼外形形状に対する中心線を以下のようにして生成する (図 2 (b) 中の一点鎖線)．

- ポンプ，タービンについては，スプライン曲線の相当部分，すなわち，⓪点から③と④の中点の部分と⑤と⑥の中点から⑨点の部分を，それぞれそのまま中心線

とする．

- ステータについては，スプライン曲線の最下点を基準に，ステータ部の長さを設計変数に加えて，中心線を定める．

(3) 各翼の外形中心線をもとに，流路面積 A を与えた上で，幾何学的な関係から，シェル側・コア側両方の翼外形形状を定める (図 2 (b) 中の実線).

(4) 各翼の出入口角度 (計 6 個)，翼角度変化率 (各翼毎に 10 代表点に対して与え，計 30 個)，タービンのオフセット角度を与えることにより，各翼の 3 次元形状を生成する (図 2 (c))．ここでは，基本的に誤差三角法[8]を用いることにより，既与の設計変数に対して，比較的良く利用される回転数と速度比における流れが最適なものになるように 3 次元翼形状を定めるようにする．

以上のようなスプライン曲線を基準にした (1) ～ (4) の生成手順を用いることにより，合計 55 個の設計変数により，トルクコンバータの形状を定めることができる．

3.1.2 トルクコンバータの一次元性能 トルクコンバータの性能は速度比 e に対するトルク比 t，伝達効率 η として表され，それらは，流路の中心線に沿った 1 次元流れに対して，流速や各翼の出入口における翼そのものの位置と傾きについての情報などから理論的に導出することができる[3][4]．容量係数 K_p についても，一般に流路の代表寸法の 5 乗に比例し，トルクコンバータの形式，構造，作動流体の性質および速度比によって比例係数を定めることで求めることができる[9]．さらに，理論的な計算式により導出されるこれらの性能曲線に対して，実験データやシミュレーション計算に基づいた補正を行なって，最適化計算で用いる性能指標を求めることができる．なお，このような補正は，元来の理論計算式が損失を考慮していないことや実際の翼には厚みが存在することなどに対応するためのものである．

3.1.3 圧力バランス解析法 上述の一次元性能は各翼の出入口における情報をもとに計算されるものであり，具体的にそのような方法で計算されるだけの性能を実現するためには，各翼に沿った部分での流れに対して条件を付加する必要がある．つまり，翼の各部における流体には遠心力と圧力勾配による力が作用しており，両者の間に不釣合が存在すると剥離などの現象を生じた場合，望ましい性能を得ることができないことになる．そこで，子午流面に対する 2 次元流れについて，流面上の微小要素に対して，流路の曲がりによる遠心力・流体の回転による遠心力・翼が流体に及ぼす力の和として遠心力を求め，また，流面に沿った回転する流路内で成立する摩擦損失・衝撃損失を考慮したエネルギー式をもとにして圧力損失を求めた上で，両者の差として圧力バランス値 F を求める[5][6]．トルクコンバータの全域について，以上のようにして定まる圧力バランス F における不釣合をある範囲内に抑えておくことにより，各部における流れの状態を評価できるようになる．

なお，このような内容は図 2 (c) のように定められる 3 次元形状をもとにして計算することができるものであり，具体的には，形状生成において定めた各翼上の 10 個の分割区間においてそれぞれ圧力バランス値を計算する．

3.2 駆動系評価モデル トルクコンバータをはじめとする，エンジン・変速ギア・最終ギアなどから構成される駆動系全体での性能は，いくつかの想定された状況に対して車両の走行状態を具体的にシミュレートすることにより評価する．その際には，車重や空力抵抗・転がり抵抗など，エンジンの出力特性，前述のようにして得られるトルクコンバータ特性 (トルク比 t と容量係数 K_p)，各ギア比とシフトパターン，アクセル開度・エンジン回転数と燃料流量との関係，ミッションおよび AT オイルポンプにおけるトルクロスなどの車両そのものに関するデータと，初速度や走行時間に対するアクセル開度の変化パターンなどの走行状態に関するデータを用い，それらをもとに，車速や加速度，エンジン回転数や使用ギア，燃料消費量などの時間変化を計算する．

具体的な走行状況としては，燃費，追従応答，全開加速，出足応答，などの各走行モードを想定し，シミュレーション計算により算出される以下の各項目に対して，それらを総合的に評価する必要がある．

- 燃費 … 例えば，10·15 モード燃費などを基準にして評価することができる．
- 追従応答性 … 前を走行する車両につかず離れず走ることができるかどうかを表す指標.
- 全開加速性能 … 車速が停止状態からある一定速度に達するまでに要する時間.
- 出足応答性 … 発進時の力強さを表す指標.

これらの評価項目のうち，燃費を除いた残り 3 つの項目は車両の走行性を代表するものである．なお，以上のほか，加速の滑らかさに関する指標やストール回転数をはじめとする付加的な評価項目についても，あわせて考慮する必要がある．

4 トルクコンバータの設計最適化

前節で示した評価モデルのもとで最適化計算を行なうためのモデル化および計算方法を以下に示す．

4.1 単独性能と総合性能との二段階最適化

トルクコンバータの性能は，前節で述べたように，単体としての性能と駆動系全体の中における性能の二つの内容によって評価することができる．最終的な設計結果としては後者の評価に基づいた結果が必要である一方，前者の評価計算の方が後者の評価計算に比べて格段に短い計算時間で行なうことができる．最適化計算は生成検査型の手法であり，膨大な回数の評価計算を必要とするため，本研究では，まず，トルクコンバータ単体での性能を設計目標とした最適化計算を行ない，次に，それによって得られる最適解を初期解として駆動系全体での総合性能を設計目標とした最適化計算を行う二段階の最適化計算を行なうようにする．

4.2 定式化 以下に，最適化計算のための定式化の内容を示す．

- 設計変数 … 翼形状に関する寸法情報，すなわち，スプライン曲線を表現するための多角形の頂点座標値，翼の出入口角度，翼角度変化率など，計 55 個の変数を設計変数とする．
- 制約条件 … トルクコンバータの直径と幅に関する条件，翼角度変化率の総和に関する条件，各翼出口における翼角度変化率を一定の範囲に抑えるための条件，ポンプとタービンにおける中心線の曲率半径の変化を滑らかにするための条件，ステータにおける曲率半径に関する条件，翼の重なりを防ぐための条件[1]，の各翼の形状に関する制約条件，および，各翼における圧力バランス値の平均と偏差を一定の範囲に抑えるための条件と各翼における圧力バランス値の符合を一定にするための条件，の圧力バランス解析法に関する条件，以上の条件を合わせて計 154 個の制約条件 (うち，5 個は等式制約条件) を考慮する．
- 第 1 段階での目的関数 … 伝達効率のピーク値の最大化を目的関数とした上で，速度比 $e = 0.0, 0.3$ におけるトルク比と速度比 $e = 0.3, 0.7$ における容量係数をある範囲内に収まるように制約条件を追加する．これらの内容は，過去の設計事例などに基づいた総合性能を向上させる上で一般に望ましいとみなすことができる希求値を設計指針として定めたものである．
- 第 2 段階での目的関数 … 前述の燃費および走行性を代表する計 4 項目が最適化すべき設計目標であり，適当な重み付けを行なって，それらを足し合わせることにより目的関数を設定する．このほか，ストール回転数などの諸項目についても，設定範囲からの偏差を最小化すべきものとして，目的関数に付加する．

なお，第 2 段階における多目的の評価関数は，次式を用いて「荷重和最小化法[10]」による単一化を行なう一方，重み付けの係数を適当に変化させながら，最適化計算を繰り返すことにより，それらのトレードオフ関係を比較することにより総合的な最適解を見つけるようにする．

$$J = -\sum_i w_i Z_i + \sum_j w_j \left| \min\left\{ 0, \left(O_j - Z_j\right) \right\} \right|^2 \longrightarrow \text{Minimize} \qquad (1)$$

ここで，Z_i は最大化すべき設計目標，Z_j は $Z_j < O_j$ という設定範囲に抑えるべき付加的な条件であり，w_i，w_j はそれぞれについての重み付けの係数である．

4.3 最適化計算 上記のように定式化された問題は，数多くの制約条件を含んだ非線形の最適化問題であり，また，最適化計算において必要となる性能評価の回数を抑制する必要があることや，設計計算式や評価式に内在する数量誤差に対するロバスト性を確保するために，逐次 2 次計画法 (Successive Quadratic Programming)[11]を最適化アルゴリズムとして用いる．

なお，制約条件付非線形最適化問題に対するアルゴリズムとしては，適用経験[12]~[14]のある一般縮小勾配法 (Generalized Reduced Gradient Method)[15]，逐次線形計画法 (Squential Linear Programing)，ペナルティ法による無制約条件非線形最適化問題についてのアルゴリズムなどの適用が考えられるが，これらを試みに本設計問題に用いた結果，一般縮小勾配法は対象モデルの数値誤差に敏感であるために探索がスムーズに行なわれないことに加えて，必要な性能評価の回数が多くなり過ぎる，逐次線形計画法は探索が振動的になって解の収束が得難い，また，ペナルティ法についても数多くの制約条件に適応することが困難であるなど，いずれも，逐次 2 次計画法を適用した場合のような比較的スムーズな最適化計算を行なうことはできなかった．

[1] 図 2に示したような形状定義における若干の重なりは最終的にはその部分を切り落とすなどで対応できるため，その程度を考慮に入れて制約条件を定義している．そのため，図 4の最適化結果においてもその程度に応じた重なりが残っている．

Table 1 Optimization results of power train performance (regularized)

Item	Case 1	Case 2	Case 3
Fuel consumption	0.99999	1.00118	0.99883
Following response	1.00092	0.99684	1.00224
Acceleration	0.99997	1.00170	0.99834
Starting response	1.00617	0.99755	0.99627

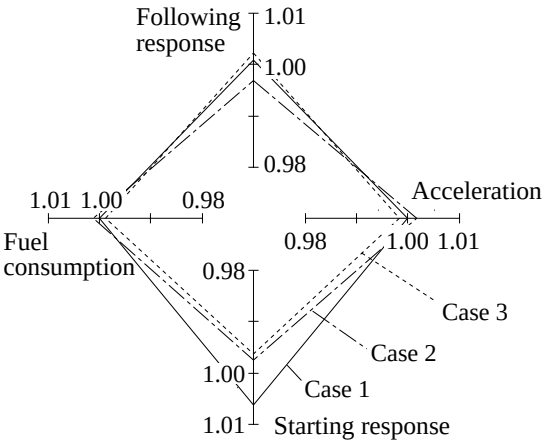


Fig. 3 Comparison of optimization results

5 計算結果

最後に，以上の最適化計算によって得られる駆動特性を表1に示す．各ケースはそれぞれ計4個の設計目標に対して異なった重み付けを行なった場合の設計例であり，図3に示すようなトレードオフの関係が存在することを確認することができる．なお，これらの数値は，各ケースを比較する便宜上，すべてを最大化すべき目的関数に変換するとともに，相互の平均を1.0とした正規化を行なったものである．一方，図4は，そのようにして得られるトルクコンバータの翼形状の一例であり，図中(a)と(c)は初期形状を，(b)と(d)はCase 1の最適形状を示している．

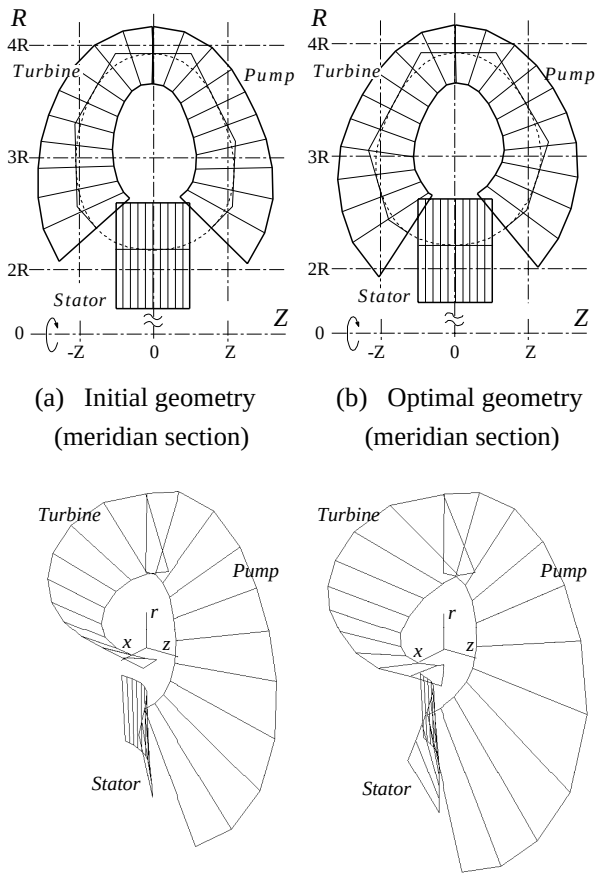
以上の最適化における計算時間は，SPARC Station 20 model 61を用いて，第1段階の最適化計算に約5分，第2段階の最適化計算におよそ10分から50分[2]であり，実用上，適用可能な範囲で最適化計算を実行することができる．

6 結 言

本研究では，自動車駆動系のトルクコンバータ形状の設計問題に対して，いくつかの設計指針を内在させた最適化計算における操作が可能な対象モデルを導入し，また，適切な評価モデルを想定することにより，設計最適化のための具体的な方法を示した．あわせて，ある設計問題に適用した結果を通じて，本方法が，この多目的最適化問題における目標間の関係を明らかにする上で有効であり，最適な設計を求めることができることを確認した．

なお，数理計画法による設計最適化の有効性は広く知られるところであるものの，具体的で実際的な設計問題に適用する場合，本研究で取り上げた自動車駆動系の設計問題に限らず，数学的な仮想問題にはない，様々な工夫が必要であるものと考えられる．

[2] 重み付け係数の値に依存して探索経路が異なるため，ばらつきが生じる．



(a) Initial geometry (meridian section)

(b) Optimal geometry (meridian section)

(c) Initial geometry (3-dimentinal)

(d) Optimal geometry (3-dimentinal)

Fig. 4 An example of optimization results

文 献

(1) 自動車技術会編, 自動車技術ハンドブック1・基礎・理論編, (1991), 自動車技術会, 87-104.

(2) 自動車工学全書編集委員会, 自動車工学全書9巻 動力伝達装置, (1980), 山海堂, 203-216.

(3) Ishihara, T., A Study of Hydraulic Torque Converters, *Report of the Institute of Industrial Science, University*

of Tokyo, **5**-7, (1955), 150-202.

(4) 石原・水沢, 流体変速機, (1966), オーム社, 77-94.

(5) 坂本・須山・坂, 圧力バランス解析法によるトルクコンバーターの高性能化, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No. 911, (1991), 9-12.

(6) Numazawa, A., Ushijima, F., Fukumura, K. and Ishihara, T., An Experimental Analysis of Fluid Flow in a Torque Converter, *SAE Technical Paper Series*, 830571, (1983), 67-76.

(7) Rogers, D. F., and Adams, J. A., (山口 訳), コンピュータグラフィックス, (1979), 日刊工業新聞社, 161-172.

(8) 大橋, 流体機械, (1975), 森北出版, 98-103.

(9) 自動車技術会編, 自動車技術ハンドブック 2・設計編, (1991), 自動車技術会, 217-218.

(10) 市川, 多目的決定の理論と方法, (1980), 計測自動制御学会, 153-159.

(11) 茨木・福島, FORTRAN77 最適化プログラミング, (1991), 岩波書店, 87-132, 167-207.

(12) 赤木・伊東・太田, “タンカーにおける配管・ポンプシステムの最適設計,” 機論, **48**-425, C (1982), 62-69.

(13) 藤田・赤木・辻本, “オブジェクト指向モデリングを用いたリンク機構の最適形状設計支援システムの構築,” 機論, **58**-545, C (1992), 310-315.

(14) 藤田・赤木・長谷・仲戸川・竹内, “制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化によるプラントの配置設計手法,” 機論 **58**-547, C, (1992), 967-974.

(15) Gabriele, G. A. and Ragsdell, K. M., The Generalized Reduced Gradient Method: A Reliable Tool for Optimal Design, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Industry*, **99**, (1977), 394-400.