

最適製品設計・生産のための コンカレント・エンジニアリング

吉村 允孝*

1. 緒言

著者はこれまで、研究の一つの流れとして、工作機械の加工性能の向上のためのびり振動解析、構造解析、最適設計、CAE、などの研究を行ってきた。⁽¹⁾それらの手法・解析の基本は、一般の機械製品に対しても発展することができ、産業用ロボット、パンチプレスなどの機械製品に対する性能向上をもたらす設計解を求めるための研究が続いている。より高い性能をつ機械製品を研究・開発するには、対象とする性能を支配する特性に対するより深い洞察と理解が必要であり、さらなる研究が必要であると考えている。

もう一つの研究として、生産システム、CAD/CAM、CIM といった設計・生産の広い見地⁽²⁾から、よりよい製品設計解をもとめる研究を行ってきた。製品性能や製造コストに対する競争の激化や、これまでに経験のない製品の設計・製作、短い製品のライフサイクルなどへの対処には、設計段階で総合的に最良の解を求めるための方法論の構築が必要であると考えている。

本稿では、以上二つの流れの研究の経験を通して、製品設計と生産を統合的に考慮した最適設計問題を昨今話題となっているコンカレント・エンジニアリング⁽³⁾⁽⁴⁾との関係においてとりあげ、その特徴、有用性、問題点を明らかにした後、最適な製品を生み出すための方法論と具体的手順を述べる。

2. よりよい設計解を得るための条件と製品設計における最適化の意義

機械製品の設計者は、常に、より高い製品性能並びに低い製品製造コストをめざしている。図1は、製品性能と製品製造コストの関係を一般的に表しており⁽⁵⁾、斜線部分は、現在の技術、知識、知見で実現可能な領域に相当する。図中のPQ上の曲線は製品性能の最大化と製品製造コストの最小化という二つの目的を持つ多目的最適化問題のパレート最適解（複数の目的関数のうちのある一つの目的関数の値を改善するためには、それ以外の少なくとも一つの目的関数の値を改悪せざるをえないような解）に相当するものである。設計者は、究極的には、この曲線上の設計解をめざすことになる。いま図1の斜線領域内の点Hが、現状設計または初期設計点であるとする。設計改善

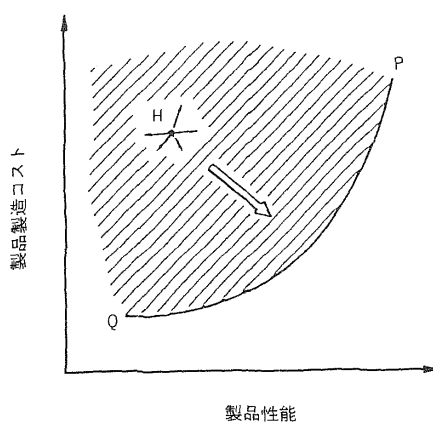


図1 製品性能と製品製造コストの関係

や改良は、点Hから矢印のような方向への移動を意味している。他方、最適設計は、PQ上での設計解を見いだすことに相当する。もし評価要因などが設計段階で系統的に解析されることなく改良や設計の決定を行って、PQ上へ設計解を移動させることは不可能である。また、このPQ上のパレート最適解では製品性能と製品製造コストの間にトレード・オフ（一方が良くなれば他方が悪くなる）関係をもつ。

通常の製品設計や最適設計では、図1の横軸の製品性能のみが主として考慮されるが、よりよい設計解であるためには、製品の機能や性能ばかりでなく製品が製造されるときに要因も考慮しなければならず、図1の縦軸の製品製造コストをも同時に評価するなど、より広い視野から最適解を求めるべきである。このことは、コンピュータによる統合生産であるCIM（Computer-Integrated Manufacturing）や次節で述べるコンカレント・エンジニアリングとも深く関係している。

3. コンカレント・エンジニアリングと最適設計・生産との関係

3.1 研究開発、製品設計、製造、販売部門の流れとコンカレント・エンジニアリングとの関係

企業においては、製品の企画、研究開発、設計、生産、販売の各業務は、それぞれの部門に分かれて行われるが、組織が大きくなれば部門間のコミュニケーションが悪くなり、より良い性能をもった

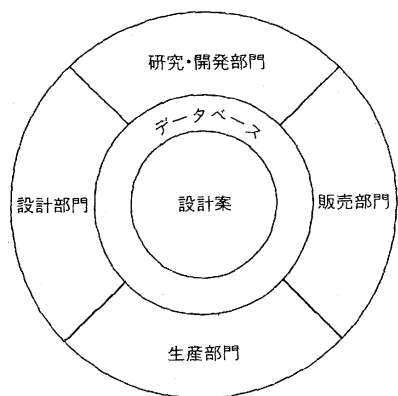


図2 コンカレント・エンジニアリングの概念図

製品をより安く作ることに對する障害となっている。また、業務が直列的（一方向的）な流れでは、製品のライフサイクルが短くなった現今の状況に對処できない。従来から日本の企業では、新しい製品の開発などにあたっては、研究開発、設計、製造、販売、管理などの各部門から人が集まってチームを結成したり、協議することが行われてきた。しかしここではコンピュータの支援のもとでそれを積極的に行おうとしていたわけではなかった。欧米では、部門間の人的な交流が困難なこともあり、コンピュータの支援のもとで同様の主旨のことをさらに有効にかつ総合的に行うことをめざして、コンカレント・エンジニアリング（concurrent engineering）という用語が、1988年頃、アメリカで生まれた。ここでは、一方向的な流れではなく、同時的に、または並列的な流れに従って製品の設計・生産に對する意思決定を協調的に行おうとする。図2は、このコンカレント・エンジニアリングの概念を图示したものである。コンカレント・エンジニアリングは、すべての部門の要因をコンピュータの援助のもとで同時に決定しようとするもので、CIMにおいて、同時的、協調的な意思決定を協調したものであるといえる。

3.2 コンカレント・エンジニアリングの基本概念

コンカレント・エンジニアリングを実施するには、以下のことが必要である。

- (i) 部門間のコミュニケーションを可能とするネットワークシステムの構築
- (ii) 共有されるデータベース空間の構築
- (iii) 総合的なシミュレーション技術
- (iv) 同時的検討、評価、意思決定手段

このうち (iii) は、製品の製作や検査の前に、コンピュータ上での試作品に對して、総合的な見地からコンピュータのソフトウェア技術を用いて製品に對する製品性能、機能、生産性などの検討を総合的に行おうとする⁽⁶⁾。すなわち、製品の試作、実験をソフトウェア上で実現する。(iv) は、最適化による総合的な意思決定問題である。多部門にわたる要因の同時的な意思決定は、大規模、かつ多くの目的をもつ多目的かつ離散的な変数を含む最適化問題となる。このような問題を解くに

表1 製品設計および工程設計における意思決定事項

製品設計における意思決定事項		工程設計における意思決定事項	
D1	機構	P1	素材調達工程
D2	製品の部品構成	P2	加工方法
D3	部品の接続関係	P3	使用加工機械
D4	購入部品・加工製作部品の決定	P4	使用工具・治具
D5	部品概形	P5	加工順序
D6	形状精度	P6	オペレーションレベル
D7	表面あらさ	P7	切削条件
D8	寸法	P8	素材形状
D9	寸法公差	P9	熱処理工程
D10	材料		

は、後で述べるような、多目的最適化手法、多層的最適化手法などを用いる必要がある。

4. 最適設計・生産のための意思決定

4.1 製品設計と工程設計における意思決定事項

このような広い範囲を考慮した最適設計の問題は、複雑、かつ大規模で、評価要因の多い問題となる。一般に製品設計では、必要な機能を満たすことと製品性能の評価が行われる。また生産においては、設計された機能と性能を満たす製品を、いかに低い製造コストで作るかの工程設計が問題となる。よって、設計・生産においては、製品性能と製品製造コストが主要な評価要因となる。表1は、製品設計、工程設計で定められる意思決定事項の例を示している⁽⁷⁾。

4.2 製品性能と製品製造コストの同時的評価

通常的设计最適化においては、図1の横軸に示される製品性能の改良だけが考慮される。製品製造コストや製造過程に関連する要因はほとんど考慮されない。しかし、製品設計の結果に従って処理される部品の製造に関連する要因は、製品性能に大きな影響をもつし、また製品製造コストのほとんどは、製品設計に依存しているといえる。それゆえ、製品性能と製品製造コストは、深い関係をもっている。

以下に、製品性能の評価と製造コストの評価が製品設計と製造に対して緊密な関係をもつ例を説明する。

(a) 構造部材におけるしきり板とリブに対する設計決定

一定重量のもとでより高い剛性をもつ構造部材を実現するためには、構造部材内部に仕切板またはリブが付加される。しかし、仕切板やリブの付加は、溶接費のような製造コストの増加をもたらす。図3は、構造部材の断面における縦方向の仕切板の設計パターンの例を示している。ここで、Nは溶接箇所総数である。構造部材の仕切板やリブの設計は、構造部材の剛性（製品性能）と溶接コスト（製造コスト）の両者を評価することによって決定すべきである⁽⁸⁾。

例えば、構造部材の詳細形状が、局部変形の最大値がその上限値を越えないように、以下のように溶接コスト ψ_0 を最小化するように決定される。

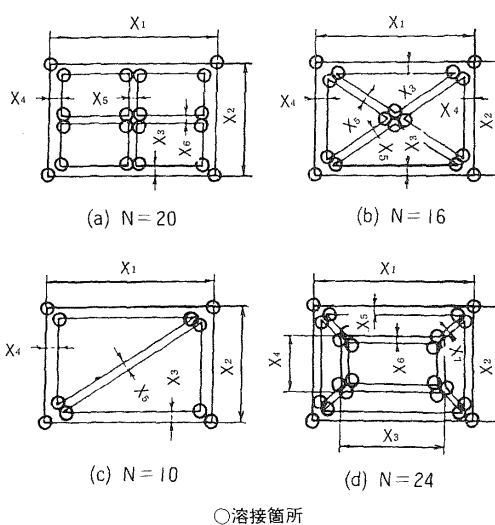


図3 部材断面形状パターン例 (N: 溶接箇所総数、 X_1, X_2, \dots, X_n : 設計変数)

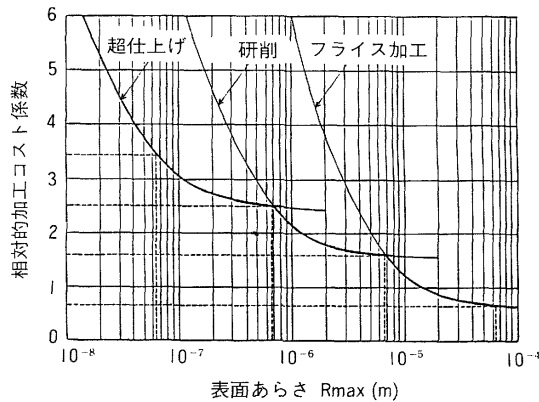


図4 最大表面あらさと相対加工コストの関係

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^n Q_i L_i \rightarrow \text{最小化}$$

$$\text{制約条件: } \psi_1 = \Delta_{\max} - \Delta^U \leq 0$$

ここで、 Q_i と L_i はそれぞれ、溶接箇所*i*の単位長さ当たりの溶接費と溶接長さである。

(b) 接触面形状と機械加工法の決定

機械部品の加工精度は製品特性（性能）と製造コストの両方に関連している。結合部の詳細形状と接触面の機械加工法は、接触面に対する機械加工費と製品特性を同時に評価することによって決定されるべきである⁽⁸⁾。このとき、最大表面粗さの大きさは単位接触面積当たりの機械加工費と結合部の等価ばね剛性すなわち結合部剛性と関係している。

図4は、接触面の機械加工法として超仕上げ、研削、フライス加工の三種類を考えた場合の、最大表面粗さと相対的機械加工コスト係数の関係の例を示している。相対的機械加工コスト係数は、表面粗さ 1.2×10^{-5} [m] のフライス加工面での機械加工コストを基準にした種々の加工方法の加工コストの比率である。図4の太い曲線に沿って、同一の最大表面粗さに対して最小の機械加工コストが実現できる。

この設計最適化に対する定式化は、例えば、結合部剛性制約のもとで、構造部材の接触面を機械加工するのに必要な機械加工コストを最小化することで表される。

(c) グループ・テクノロジーの概念を用いた設計最適化

設計や製造に要する費用をできるだけ下げするためには、製品設計にグループテクノロジー (GT) の概念を導入することが有用である。GTは、本来、加工を主体とした製造面での合理性を追求したものであるが、製品の標準化を大きく進めるには、製品設計段階にさかのぼってGTの概念を取り入れることが必要である。一般に、特性や性能に関する要求を目的関数に選べば、その最適解は、製品を構成するすべての部品が別々の設計変数をもつことになる。部品のグループ化を行い、同一のグループ内では同一もしくは類似の部品をもつとすれば、目的関数値は、(小さい方が望ましい時) すべての部品が別々の設計変数値をとり得るとした場合より大きくなる。すなわち、GT化を押し進めることは、製造コストの減少を目的とするが、それは同時に製品性能の低下をもたらす。これより、GT化による製品製造コストの減少と性能の上昇のトレード・オフ関係を同時に評価して、設計の意思決定を行う必要がある⁽⁹⁾。

4.3 最適設計・生産のための意思決定における問題点と特徴

上述から理解できるように、製品性能と製品コストの同時的評価は、設計の意思決定上重要である。一般に、このような意思決定問題は、最小化もしくは最大化すべき評価要因を目的関数に採用し、他の評価要因に関する要求や設計変数の上・下限を制約として表される。製品設計と生産の統合的な最適化に対して、以下の定式化のパターンがある。

定式化1： 製品性能 → 最大化
制約： 製品製造コストの上限

定式化2： 製品製造コスト → 最小化
制約： 製品性能の下限

定式化3： 多目的問題

[製品性能→最大化、製品製造コスト→最小化]

設計対象の状況によって、最も適した定式化が決まるが、定式化3が最も自然なものである。

製品設計と生産のコンカレントなもしくは統合的な最適化は、一般に、以下のような問題点と特

徴をもつ。

(1) 大規模な非線形最適設計問題

統合化した設計最適化において、意思決定事項と決定変数の数が非常に増加する。それゆえ、この最適化問題は、通常の設計最適化問題よりはるかに大きなものとなる。設計最適化の定式化においては、目的関数と制約が、通常、設計変数の非線形関数となる。そのような場合、設計実行可能空間に多くの局所最適解が存在する。すなわち、大域的な最適解（例えば、図1のPQ上の解）を得ることが非常に困難になる。

(2) 多数の目的をもつ問題

統合的な設計最適化問題は、それ自身、定式化3で示したような多目的なものである。

(3) 離散的な設計変数問題

素材、製造法の選択、規格品の使用などの離散的な決定変数がしばしば製品設計と生産に関する意思決定事項に含まれる。このことは意思決定を困難にする。

4.4 最適設計・生産のための意思決定に対する基本的方法論

多くの評価要因のコンカレントな（同時的な）意思決定を有効に実施するためには、“多目的最適化手法”と“多層的意思決定手順”を使うことができる。これらは、前節での問題点を解決するための基本的な手法である。

(a) 多目的最適化

一般に評価特性を制約条件に含める時、その上限値または下限値の設定は容易でない。しかも、その設定された制約条件により最適解が決定されてしまう。そのような時、その評価特性を目的関数に含めて多目的問題として最適化する方法が有用である⁽¹⁰⁾。またこの多目的（ベクトルの）な方法では、異なる特性、評価要因を同一のレベルで評価することになり、特性間の関係、法則を見いだすことができることがある。

(b) 多層的最適化

実際にある製品を設計するとき、その設計変数の数は非常に多く、寸法や性能に関する制約も多いため、すべての設計変数を同時に決定しようとすると計算に多大な時間を要し、しかも解が局所

的な最適解に収束してしまう可能性が高い。そこで、設計過程をいくつかの層に分割し、各層ごとに評価基準および決定すべき設計変数を設定して最適化を行っていく多層的意思決定法が考えられる。これにより、各層における設計変数および制約条件の数は、すべての設計解を同時に求めようとするときよりも当然少なくなる。したがって、各層における最適化が容易になる。また、層を重ねるごとに設計可能解の範囲を小さくしていけば、ついには大域的な最適解に到達することが可能となる。もし、この多層的な分割が論理的に妥当なものであれば、最適解を容易に得ることが可能となる。すなわち、それぞれの段階での設計の意思決定問題はより単純化されたものとなっており、最適化手法（数理計画法）がより適用しやすくなる。

5. 製品設計と生産の統合的意思決定手順

上記の手法に従って統合的な最適設計解を得るための具体的方法論を以下に述べる。

(i) 製品設計と工程設計の統合的最適化のための大規模多目的最適設計

設計・生産における意思決定を統合化するには、表1にあげたような製品設計と工程設計の意思決定事項を同時に決定する必要がある。統合的設計過程は、次の手続きで構成される⁽⁷⁾。

ステップ1：製品仕様から製品形態（構造・概形）を定める。

ステップ2：製品仕様および製品形態から設計最適化のための評価特性を抽出する。

ステップ3：意思決定される事項に関して、その決定の際に考慮すべき条件を抽出する。

ステップ4：他の事項とは独立に決定してもよい事項および独立に決定すべき事項に関して、意思決定を行う。

ステップ5：ステップ4が適用されない事項を統合的な最適化の手続きにより決定する。

統合的最適化問題の目的関数 ψ は、目的関数に含める評価特性を e_j ($j=1,2,\dots,u$)、製品製造コストを C として、

$\phi = [e_1, e_2, \dots, e_u, C]$ と表される。この問題では、材料という離散的な決定変数を含むため、各材料の組合せに対応して、図5に示すような異なったパレート解集合をもつ。このパレート解集合の総数は、各部品に対する候補材料の組合せの数で定まるため多数になることが考えられ、それらの中から最終的な解を効率的に求める必要がある。また、機械製品において、各評価特性に対して一定の達成すべき水準が存在すると考えられる。したがって、目的として選択

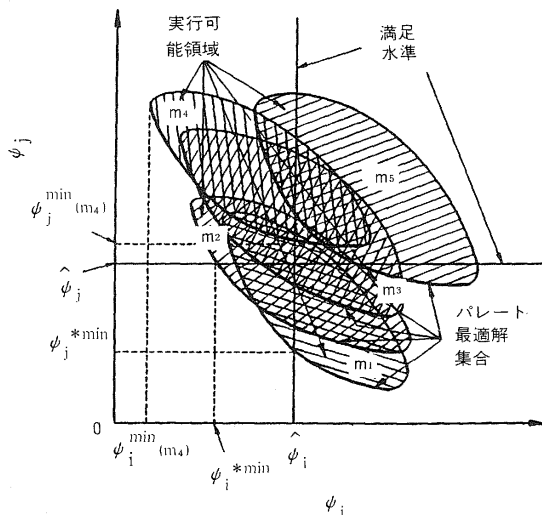


図5 目的関数空間上に離散的に現れる可能領域とパレート解集合

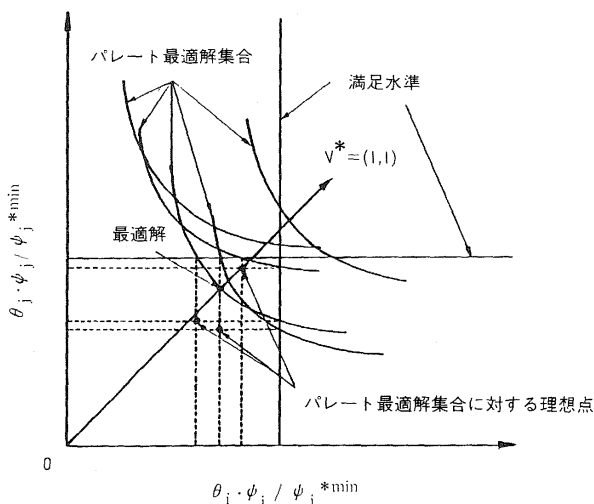


図6 変換された目的関数空間上におけるパレート解集合とその理想点

された評価特性に対して満足水準を導入し、これを満たすように解を決定する必要がある。

最適解の決定手順として、次のような基本的手続きを設定する。

[I] 最適解が存在する可能性の高いパレート解集合を求める。図6は無次元化された目的関数空間を示しており、各パレート解集合の理想点と原点との距離が最小のものを、最初に探索すべきパレート解集合とする。

[II] 満足水準を満たす範囲内で、各目的間の相対の重要度を考慮して、暫定解を定める。

[III] [II] で求められた解と比べて、さらに好ましい解がないかどうかを調べる。

性能に関する目的関数として静コンプライアンス f_s と全重量 W_T をもつ図7に示す円筒座標形ロボットに統合的最適設計過程を適用した場合、最適化問題の定式化は次のようになる。

目的関数: $\phi = [f_s, W_T, C]$ → 最小化
 制約条件: 表面粗さに関する制約、寸法公差に関する制約、寸法制約
 ここでは、部品1、2、3が設計対象である。

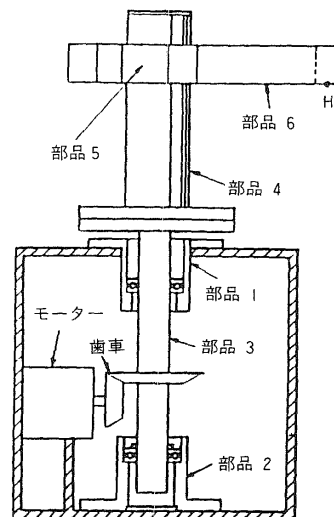


図7 円筒座標形ロボットの概観図

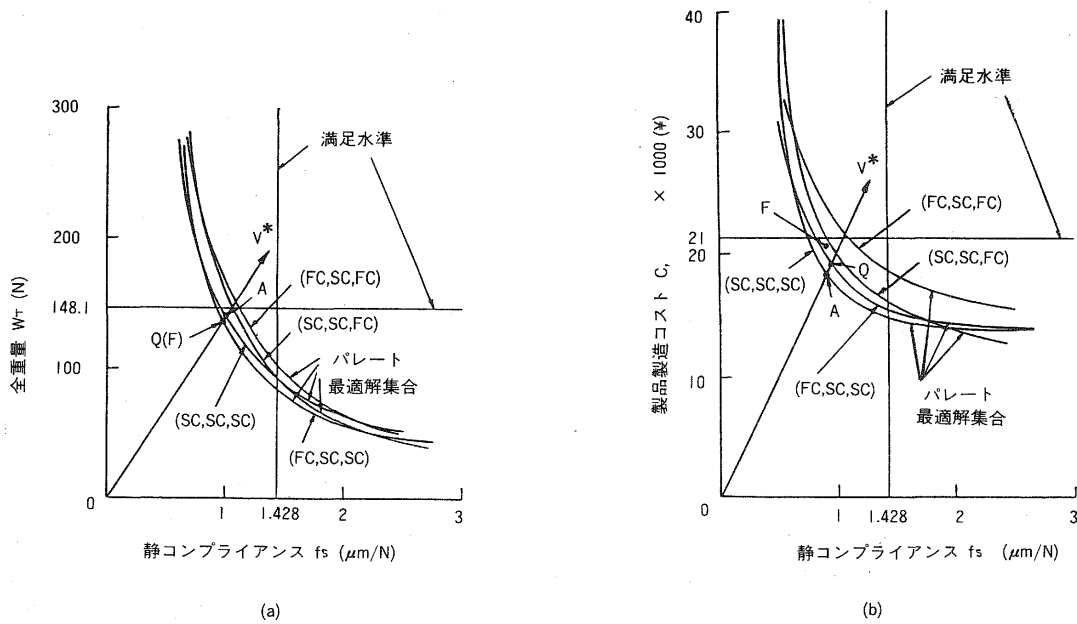


図8 パレート解集合と最適解
 [()内の記号は部品1、2、3の順に各部品の材料を示す]

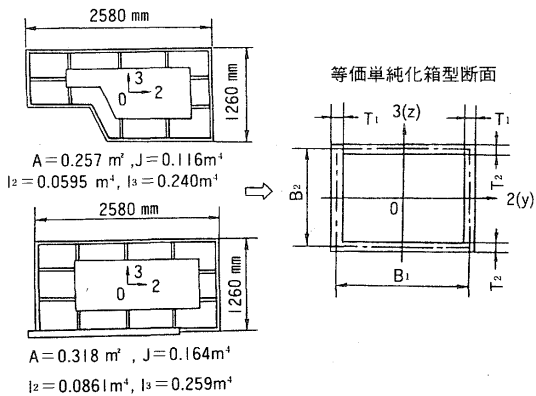


図9 実際のコラム部材の断面形状例と等価単純化

表2 単純化モデルを用いた多層最適設計法の手順

層	段階	ステップ	内容
第1層	単純化	ステップ1	機械構造の分割
		ステップ2	構造部材の単純化
		ステップ3	結合部の単純化
		ステップ4	機械構造全体モデルの構築
第2層	最適化	ステップ5	機械構造全体モデルの最適化
第3層	具体化	ステップ6	決定変数の感度解析
		ステップ7	構造部材の具体化
		ステップ8	結合部の具体化
		ステップ9	機械構造全体への合成と評価

図8は、 f_s と W_T および f_s と C の目的関数空間を示しており、点Qは最初に探索されたパレート解集合上での設計解、点Aが最適解に相当する(図中のSCは素材として軟鋼材、FCはねずみ鉄材を表す)。

(ii) 単純化モデルを用いた多層的最適設計法

4.3節であげた問題点(1)を解決するための一つの方法として、単純化構造を媒体とする多層最適設計法がある(11)。表2にその手順を示すように、この方法では、設計の最適化過程を“単純化”、“最適化”と“具体化”の三つの層に分けている。

まず第1層の単純化において、対象とする実際構造と等価な構造特性値をもつ、数学モデルやシミュレーションモデルを構築する。図9の左図は、実際の工作機械におけるコラム部材の断面形状例を示しているが、これらを図9の右図に示すように等価な断面特性値をもつ等価単純化箱型部材に置き換える。他方、複雑な接触面形状をもつ実際の結合部は、等価な剛性とエネルギー消散能力をもつばね要素および減衰要素の構造要素にモデル化する。

次に、第2層の最適化において、その単純化されたモデルに対して数理計算手法を用いて最適化を実施する。このモデルでは、実際構造に比して設計変数の数が大幅に減少しているため、数理計算手法の適用が容易であり、かつ解が局所的な最適解に収束する可能性を小さくすることができる。

最後に、第3層の具体化において、最適化によって定められたすべての事項が満たされるように、実際の機械構造の具体的な形状と寸法を決定する。このとき、最適化段階では考慮されていない付加的な設計上や機能上の要求を加味する。最適化によって定められた要求値の数が多くてすべてを満足させることが困難な場合には、目的関数に対する感度を評価して、要求値に許容される範囲を設定する。また実際の構造部材には局部変形を防止するなどの目的で、リブやしきり板があり、さらに機能面からの必要上種々の要素が付け加えられている。図3に示す断面形状のパターン例のうち断面形状(c)が選ばれたとすると、設計変数 X_1, X_2, \dots, X_5 が最適断面特有値を満たすように決定される。また結合部の具体化においては、摺動や固定などの機能上の要求事項や実際の設計において考えなければならない事項を考慮に入れて、適切な結合部パターンを種々の結合部形状パターンから選ぶ。以上のようにして具体化された構造部材と結合部を合成して、詳細形状をもつ全体機械構造になる。

この多層最適設計法における単純化層と最適化層は、製品設計プロセスのうちの基本設計に相当し、具体化層は詳細設計に相当する。通常最適設計では、その詳細な設計がほしいと与えられたモデルに対して、その詳細な値を定める方法が用いられるが、これでは設計の自由度は低く飛躍的に斬新な製品を創成することは難しい。それに比べて、多層最適設計法では、詳細設計を決定する上での自由度が大きく、大幅な設計改善と新たな設計が生まれる可能性がある。以下に、この単純化モデルを用いた最適設計法を製造コストの最小化に適用した場合の設計法を述べる。

表2の多層最適設計法を、加工精度と切削能率の制約のもとで工作機械構造の製作費（材料費、

表3 単純化モデルを用いた多層最適設計法における製品製作費最小化の手順

第1層	単純化	単純化モデルを設定する	
第2層	最適化	材料費を最小にするように、構造部材の断面寸法を決定する	
第3層	具体化	1	溶接費を最小にするリブの配置・枚数、詳細設計を決定する
		2	機械加工費を最小にする結合面の形状と加工方法を決定する

機械加工費と溶接費)を最小化する問題に適用した場合の手順は、表3のようになる⁽⁸⁾。材料費は、機械構造全体の単純化モデルでの剛性や振動特性の評価により第2層で最小化されるが、機械加工費と溶接費は、具体的な詳細形状の決定と同時に、第3層で最小化される。溶接費の最小化(第3層の具体化1)では、4.2節(a)で述べたように、構造部材の詳細形状が、構造部材に生じる局部変形量の最大値がその許容量を越えないという制約のもとで、溶接費を最小化するように決定される。機械加工費の最小化(第3層の具体化2)では、4.2節(b)で述べたように、結合部の詳細形状と結合面の加工方法が、結合面の機械加工費を最小にするように決定される。

表2に示す単純化した構造モデルを用いた多層設計最適化手順は、グループテクノロジーの概念を用いた設計最適化にも適用しうる⁽⁹⁾。通常設計最適化においては、機械構造は、最終設計の詳細形状に従ってモデル化される。しかしそのようなモデル化においては、詳細な実際形状が既に決定されてしまっているため、同一または類似の機械部品を設計最適化の後にできるだけ多く使うことは困難である。単純化した機械構造を用いる設計最適化においては、詳細な設計は、具体化段階で決定されるため、同一または類似の機械部品の使用が容易となる。

(iii) 多層モデル化を用いた製品設計と生産の統合的最適化手順

製品設計の意思決定には、種々の特性とコストが評価される。表4は、それらを評価しうる形状モデルを単純化のレベルに対応して整理したものである。このとき、より単純なモデルで評価が可

表4 形状モデルの単純化のレベルと評価しうる構造特性および製造コストの関係

形状モデルの単純化のレベル	評価しうる構造特性	評価しうる製造コスト
概形のモデル化	候補材料に対する構造重量の概算	候補製造法を用いた場合の製造コストの概算
主要形状のモデル化	静的・動的変位、固有振動数、熱変形、構造重量	基本形状製作に要する製造コストと材料費
詳細形状のモデル化	静的・動的応力と歪分布	詳細形状を実現するに要する機械加工費と溶接コスト

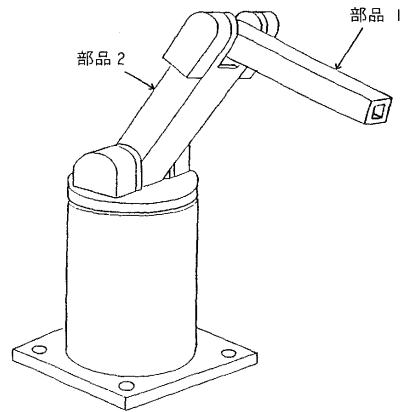


図10 多関節ロボットの概観図

能なものは、多層的な意思決定の流れの上位で決定すべきである。このような思想のもとに、製品性能と製品製造コストの統合的最適化過程を次の3つの層に分割する⁽¹²⁾。

第1層：材料および素材調達工程候補解の抽出

第2層：主要寸法、材料および加工条件の決定

第3層：詳細形状、寸法および加工条件の決定

各層では、後の表5で例を示すように部品間の結合部形状の記述に重点をおいたモデル化を行う。これにより製品性能および製造コストの評価が容易となる。

以下に第1層から第3層までの意思決定の流れを、図10に示す多関節ロボットの設計に適用した例を用いて説明する、設計対象部品はロボットの腕となる部品1と部品2である。

(a) 材料、素材調達工程の候補解の抽出(第1層)

この層においては、既に部品の概形は決定しているものとして、その形状を実現するための材料および素材調達工程の候補解を以下のように抽出する。

(1) 部品の形状に従って、第1層で考慮すべき寸法箇所を指定し、その寸法の取り得る範囲を指定する。第1層において考える部品1、部品2の形状を図11に示す。第1層において考慮する寸法は、部品1の断面の幅 L_{11} 、 L_{12} 、肉厚 L_{13} 、 L_{14} 、部品2の断面の幅 L_{21} 、 L_{22} 、肉厚 L_{23} 、 L_{24} である。長手方向の寸法は必要以上に大きくしても作動性が悪くなり、製造コストも高くなるので寸法制約の下限値をとるものとする。

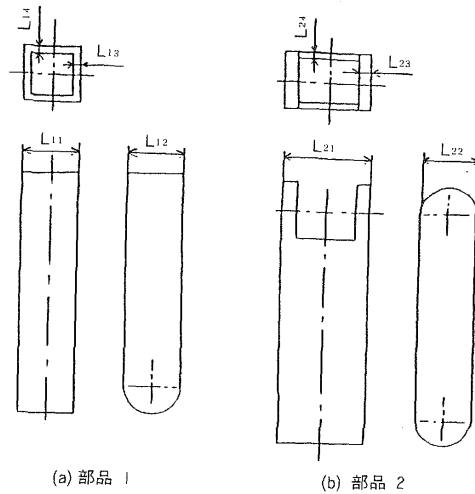


図11 第1層、第2層において考える部品形状

(2) 部品の形状に従って、可能な材料および素材調達工程の候補解を抽出する。

(3) 部品の形状に従って、形状記述データを作成する。部品1の形状記述データを表5に示す。

(4) (2)で抽出されたそれぞれの候補解に対して、材料費 C_m 、素材調達工程にかかる費用 C_s を算出し、第1層における製造コスト C_1 を $C_1 = C_m + C_s$ とする。

(5) 第1層で考慮する性能を指定し、(3)で作成した形状記述データよりそれらの値 P_{i1} を算出する(ただし、 P_{i1} は小さい値をとるほど性能がよいものとする)。この設計において重要な性能は、ロボットアームの先端Hの変位であり、

表5 第1層、第2層における部品iの形状記述データ

A	B	C	D	E
1	1	(125, 89.5, 0) (155, 37.5, 0)	$L_{11}, L_{12}, L_{11}-2L_{13}, L_{12}-2L_{14}$	2
2	2	(155, 37.5, $L_{11}/2$) (155, 37.5, $L_{11}/2-L_{13}$)	$L_{12}, 0$	2
3	2	(155, 37.5, $L_{11}/2-L_{13}$) (155, 37.5, $L_{13}-L_{11}/2$)	$L_{12}, L_{12}-2L_{14}$	2
4	2	(155, 37.5, $L_{13}-L_{11}/2$) (155, 37.5, $-L_{11}/2$)	$L_{12}, 0$	2

材料: M_1 , セグメント数: 4, A: セグメント番号, B: 断面形状 (1: 長方形, 2: 半円, 3: 円), C: 両端面の中心点座標, D: 断面寸法, E: 他の部品との接触状態 (1: 接触なし, 2: 固定接触, 3: 相対運動接触)

それは定量的には静コンプライアンス f_s で評価できる。またロボットアームの軽量化によって先端の変位は小さくなり、また、作動性も良くなり、小さな動力で作動させることが可能となる。製造コストに関しても、材料が同じ場合には質量が小さいほど製造費用は小さくなる。第1層においては、このロボットアームの軽量化に重点をおき、重量 W_T を評価対象とする。(2) で挙げたそれぞれのケースについて性能の評価対象である重量 W_T を計算する。ただし(4)の製造コスト、(5)の重量は、第1層で考慮する寸法がその下限値をとったときのものである。

(6) 第1層における製造コストおよび性能の満足水準をそれぞれ C_1^u 、 P_{ji}^u とし、候補解のうち、 $C_1 > C_1^u$ または、 $P_{ji} > P_{ji}^u$ となるような候補解を除外する。

(b) 主要な寸法、材料および加工条件の決定 (第2層) この層で行うことは、第1層で残った複数の候補解に対して、主要な寸法を決定し、そのうちで製造コストが最小となる解を1つ選択することである。

(1) 形状記述データより、第2層における加工コスト C_{c2} および加工時の送り量 S_{k2} と切削速度 V_{k2} を算出する。

(2) 第2層で考慮する性能を指定し、形状記述データよりその値 P_{j2} を算出する。ここでは、評価する性能は、重量 W_T と静コンプライアンス f_s とする。

(3) 各候補解に対して、第2層までで評価される製造コスト $C_2 = C_1 + C_{c2}$ を目的関数として、目的関数 C_2 の最小化を行う。これより、すべて

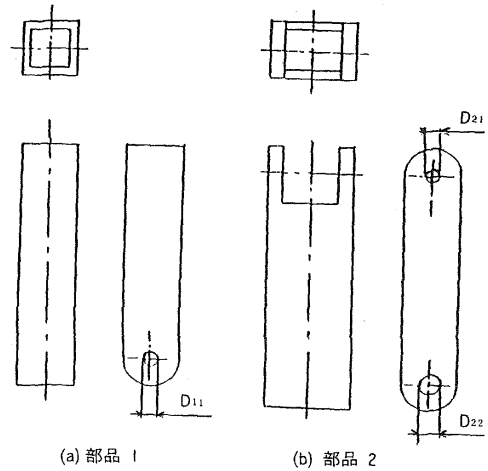


図12 第3層において考える部品形状

の候補解のうちで製造コストが最小になるものを、第2層における解とする。

(c) 詳細な形状、寸法および加工条件の決定 (第3層) この層で行うことは、第2層まででは扱わなかった箇所の詳細な形状とその寸法、および加工条件を決定することである。

(1) 第3層で考慮すべき寸法箇所を指定し、その寸法の取り得る範囲を指定する。部品1、部品2の形状を図12に示す。考慮する寸法は、部品1の駆動軸をはめ込む穴の直径 D_{11} 、部品2の駆動軸をはめ込む穴の直径 D_{21} 、 D_{22} である。

(2) 形状記述データより、第3層における加工コスト C_{c3} および加工時の送り量 S_{k3} と切削速度 V_{k3} を算出する。

(3) 第3層で考慮する性能を指定し、形状記述データによりその値 P_{j3} を算出する。ここでは、軸に生じる垂直応力の最大値 σ_{max} およびせん断応力の最大値 τ_{max} が、軸の許容応力を越えない

ように設計する。

(4) 第2層で得られた解に対して、第3層までで評価される製造コスト $C_3=C_2+C_{c3}$ を目的関数として、目的関数 C_3 の最小化をはかる最適化問題を解く。これより、詳細な形状、寸法および各加工面を加工するときの送り量、切削速度を決定する。

この最適化問題を解いて得られた結果は、例えば以下の通りである。詳細寸法については、 $D_{11}=2.5$ 、 $D_{21}=2.5$ 、 $D_{22}=3.5$ (cm)。加工については、すべての穴はドリルによって下穴をあけた後、中ぐりを行うものとする。このとき、製造費用を最小に加工条件は、すべての穴について、ドリルによる下穴あけでは、送り量0.20 (mm/rev)、切削速度125 (m/min) である。中ぐりでは、送り量0.15 (mm/rev)、切削速度352 (m/min) である。

(iv) ユーザーのニーズを考慮した設計の意思決定

市場のニーズの多様化に対応した設計・生産をおこない、しかも、その設計・生産を効率よく進めるために、製品設計部門を中心として、コンカレント・エンジニアリング的に設計・生産・販売部門での要求を統合化した設計法⁽¹³⁾が考えられる。ここでは、一般消費財とは異なった特徴をもつ産業用機械を対象製品とする。

まず、産業用機械市場における需要分析を行う。ここでは、次の2つ調査を実施することによって、ある製品に対する市場のニーズが調査できるものとする。

- (1) 製品の購買決定の際に重視される製品属性(性能・価格など)を特定するための調査
- (2) 各ユーザーの購買予定台数、および各製品属性に対する希望値、重視度の調査

(1) では、個々のユーザーレベルではなく、市場全体の傾向として、どのような製品属性をもとに購買決定が行われているのかを調べる。すなわち、設計・生産段階で評価すべき製品属性を特定するための調査である。(2) では、各ユーザーが、(1) の調査で特定された各製品属性に対して、実際にどの程度の属性値を希望し、各属性を

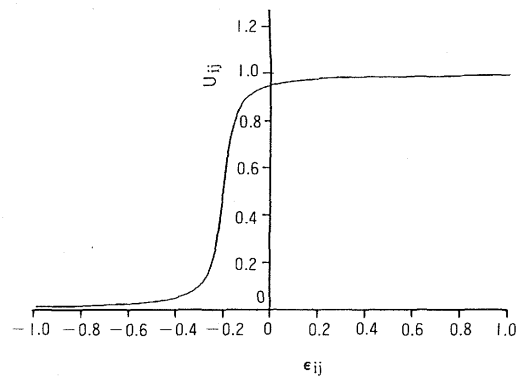


図13 製品属性値とその部分効用の関係

どの程度重視しているのかを調べる。

多様化した需要をもつ市場においては、ユーザーをニーズの類似性に基づいていくつかのグループに分け、各グループに対して特定の製品を設計・生産することが有効である。そこで、収集された需要に関するデータをもとに、クラスター分析を用いて、ユーザー間のニーズの類似性を測定し、いくつかのグループに分割していく。

ユーザーのニーズは、次のように定量的に評価する。まず、ユーザー j が製品属性 i に対して感じる効用 U_{ij} は、属性 i の属性値 Z_i がユーザー j の希望値 Z_{ij}^* からどの程度離れているかを示す値 ϵ_{ij} によって、図13に示すように変化するものとする。すなわち、製品属性値が希望値に近づく (ϵ_{ij} が 0 に近づく) ほど、効用 U_{ij} は上がり、希望値を越える (ϵ_{ij} が 0 より大きくなる) と、効用 U_{ij} はあまり変化しないものと仮定する。

そして、ユーザー j が感じる製品の効用 U_j は、 n_a を製品属性の総数として、各製品属性の効用

U_{ij} と各属性の重要度 α_{ij} (ここで $\sum_{i=1}^{n_a} \alpha_{ij} = 1$) を用いて、次のように表現する。

$$U_j = \prod_{i=1}^{n_a} U_{ij}^{\alpha_{ij}}$$

このようにユーザーをモデル化することにより、ユーザーが製品に対して感じる効用、すなわち、製品に対する満足度が表されることになる。すなわち各製品属性が希望値に近いもしくは希望値よ

上記のような各ユーザーのモデル化をもとに、グループ分けされたグループとしての満足度 U を、そのグループを構成するユーザー j の満足度 U_j をもとに次式のように定義する。

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n_g} (N_j U_j)}{\sum_{j=1}^{n_g} N_j}$$

ただし、 N_j : ユーザー j の購買予定台数

n_g : そのグループを構成するユーザー数

このグループとしての満足度 U は、0 から 1 の値をとる。ここでは、この値を 1 に近づけることが、このグループを構成するユーザーのニーズをより満たす製品を設計・生産することになると考える。

ここで需要分析に基づく最適設計過程を次の 3 つ層に分割する。

第 1 層 : 設計候補解の抽出

第 2 層 : 設計候補解に対する基本設計と最適設計候補解の選択

第 3 層 : 最適設計候補解に対する詳細設計

この際、各層において考慮する部品形状モデルを、素材から完成品へ至る製造過程での形状に一致させることにより、各層において製造情報も同時に考慮することが可能となる。

上記の各層 (層番号を k とする) においては、設計する製品がユーザーのニーズを最大限に満たすように、グループとしての満足度 U を目的関数とした次のような最適化問題を解く。

$$\text{目的関数 : } U = \frac{\sum_{j=1}^{n_g} (N_j U_j)}{\sum_{j=1}^{n_g} N_j} \rightarrow \text{最大化}$$

制約条件 : $\psi_{jk} \leq 0$ ($j_k = 1, 2, \dots, M_k$)

ただし、 ψ_{jk} : 制約条件に加えられた製品属性を含む制約

M_k : 第 k 層で考慮する制約条件の数

6. 結言

よりよい製品設計解を求めるために、コンカレント・エンジニアリングと関連づけて、製品設計と生産の意思決定事項を統合的に決定するための方法論を述べた。

機械製品に対するよりよい設計解をめざすには、対象とする特性の解析・解明のみならず、より広い視野にたったコンカレント的な設計の意思決定が、今後、必要不可欠になるものと考えている。

参考文献

- (1) 吉村允孝 : 工作機械の静剛性および振動特性の解析と設計への応用, 機械の研究, 42巻, 1号, 1990, pp.152-162
- (2) 人見勝人監修, 中島勝・吉村允孝・吉田照彦編集 : CIM への道 : コンピュータによる設計・生産・管理, 1991, 共立出版
- (3) D. Brazier and M. Leonard: Concurrent Engineering : Participating in Better Designs, Mechanical Engineering, January 1990, pp.52-53.
- (4) M. Yoshimura : Concurrent Optimization of Product Design and Manufacturing, Handbook of Concurrent Engineering (Edited by Parsaei and Sullivan), Chapman and Hall, 1993 (to be published).
- (5) M. Yoshimura: Integrated Optimization of Product Design and Manufacturing, Control and Dynamic Systems, Vol.48, Part4 (1991, Academic Press), pp.167-219.
- (6) E. J. Haug: Integrated CAE Tools in Design for R&M, Proceedings of the ASME Design Technical Conferences - Concurrent Engineering of Mechanical Systems, DE-Vol.22, (1990), pp.1-13.
- (7) 吉村允孝, 井谷浩二, 人見勝人 : 機械製品における製品設計と工程設計の統合的最適化に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 54巻, 505号 (1988年9月) pp.2313-2322.
- (8) 吉村允孝, 竹内芳裕, 人見勝人 : 工作機械構造物の多層最適設計 (製作費, 加工精度および切削能率に関する評価), 日本機械学会論文集 (C編), 50巻, 459号 (1984年11月) pp.2210-2218.
- (9) 吉村允孝, 疋田理, 人見勝人 : グループ・テクノロジーの概念を用いた機械構造システムの最適設計, 日本機械学会論文集 (C編), 51巻, 466号 (1985年6月) pp.1399-1405.
- (10) H. Eschenauer, J. Koski and A. Osyczka (Eds.): Multicriteria Design Optimization, Springer-Verlag, (1990).
- (11) 吉村允孝, 浜田年男, 由良憲二, 野池清文, 人見勝人

：機械構造システムの多層最適設計（単純化構造を媒体とした振動特性に関する最適化と具体設計の探索），日本機械学会論文集（C編）50巻，452号（1984年4月）
pp.724-732.

(12) 吉村允孝，竹内淳：機械製品に対する統合的CAD/CAMにおける多層的意思決定，日本機械学会論文

集（C編），58巻，549号（1992年5月），pp.1534-1542.

(13) 吉村允孝，竹内淳：ユーザーのニーズを考慮した産業用機械に対する設計システムの研究，日本機械学会・第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集，（1992年12月）.