



最適設計における最近の話題*

山川 宏*¹, 畔上 秀幸*², 鈴木 真二*³

Recent Topics in Optimum Design

Hiroshi YAMAKAWA, Hideyuki AZEGAMI and Shinji SUZUKI

Key Words: Optimum Design, Optimization Technology, Multidisciplinary Optimization, Engineering Computation

1. はじめに

機械構造の設計において目的関数(評価関数)を最適化するような設計を求める,いわゆる最適設計は,コンピュータのハードウェアやソフトウェアの急速な進歩に伴ってその適用対象を拡大し,また,技術的にも新しい技術が導入されるなどの著しく急速な展開を見せている。広範な設計対象に対して最適設計の実用化が今後大いに期待されている。そこで以下には,本特集号の主題である「動力学における最適設計」を念頭に置いて三人の著者により,強調する意味であえて内容の一部の重複を許容して個々に自由に最近の話題や展開について述べてみた。

2. 最適設計の新しい展開

構造物の構造解析を基に,種々の制約条件下で目的関数の最適化をはかるような設計,いわゆる最適設計はかなり古くからの研究が存在するものと考えられるが,有限要素法や数値計画法を活用してコンピュータによって最適設計を行う試みは1960年代になってからと考えられている。その後,実用化という面では1980年代くらいまでは一時停滞の時期があった。その大きな理由の一つは,コンピュータそのものが手軽に使用せず,また計算コストも高額になるなどが挙げられる。すなわち,種々の解析を行うためのみにコンピュータを活用することに主眼がおかれ,通常,繰り返し解析を要する最適設計は研究面では興味が引かれたも

の,実用面では時間のおよびコスト的にも魅力のあるものではなかったものと思える。しかし多くの人々の予想をはるかに超えるエレクトロニクスの急速な発達に伴い,コンピュータのハードウェアおよびソフトウェア両面での長足の進歩は,かつての大形コンピュータに匹敵する能力を有するパーソナルコンピュータ(PC)やエンジニアリングワークステーション(EWS)を設計者にとって身近で不可欠な,かつ,強力な道具としつつある。このような状況下で最適設計は以下に述べるように種々の側面で新しい展開がはかられ,その広範な実用化が期待されている。

2-1 設計の流れと最適設計実用化の現状 設計を上流部の設計要求から下流部の生産設計への過程ごとにとらえると,その特徴を理解しやすくなる。表1

Table 1 State of art of Optimum Design

Process	Practical ←→ Research	Optimization method
Conceptual Design	Kansei design Configuration design Component design	AI Reasonings Expert system Object oriented Neural networks Genetic algorithms Fuzzy theory Cellular automaton
Preliminary Design	Topology design Multidisciplinary design Material design	same as above
Detail Design	Sizing problem Shape optimization Commercial software FEM+Mathematical programming	Mathematical programming Optimality criteria Homogenization method Neural networks Fuzzy theory
Production Design	Concurrent Engineering Robust Design CAD, CAE, FMS	same as above

* 原稿受付 1995年5月18日。

*¹ 正員,早稲田大学理工学部(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)。*² 正員,豊橋技術科学大学(〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。*³ 正員,東京大学工学部(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

はそれらの過程の各設計に対して最適設計の実用化の現況を示している⁽¹⁾。

すなわち表1からもわかるように市販の最適設計あるいは最適化のプログラムなどを使用して最適設計が行われているのは、主として基本設計の一部と詳細設計などのいわゆる下流部の過程に限られ、またその中でも部材の諸寸法を決定する、「サイジング問題」と呼ばれる問題が大半を占めていることがわかる。この種の問題は、市販の最適設計プログラムも活用できるという点で、解析の精度さえ向上すれば十分に実用化の域に入っているものと考えられる。一方、上流部の設計における最適設計は、現在のところ、将来の実用化に向けて盛んに研究の対象となっている状態といえよう。

上流部の設計の特徴としてまず多くの候補の中から適切な候補の選択といういわゆる組合せ最適化問題を多く含む点が挙げられよう。組合せ最適化問題の解法としては、数理計画法の中の整数計画法などでも一応対処できるが、変数が多い場合には必ずしも計算は容易ではない。そこで、最近では、新しい最適化計算技術とも考えられるニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなどが比較的手軽な手法として用いられてきている。また上流部の設計では、上記の組合せ最適化問題の他に、目標や制約条件のあいまい性や定性的な評価や量、あるいは感性など、人間が行う設計の場合にはある程度柔軟に対応しているが、コンピュータによる解析や設計では取り扱いが難しい問題をも含む。これらの問題をコンピュータで取り扱うためには、人工知能、ファジイ推論、ニューラルネットワークあるいは遺伝的アルゴリズムなどの、いわゆるエマージングコンピューテーション (Emerging Computation) と総称されるような新しい計算技術を活用せざるを得ないと考えられる。すなわち、上流部の設計に対しては、一つの最適化の計算技術のみならず新しい最適化の計算技術を総合的に組み合わせる必要があるのである。いずれにしても、実用化に向けて、今後の研究が大いに期待される問題である。

2.2 最適設計の新しい展開 前述の最適設計の現状から判断して以下のような幾つかの新しい展開が考えられる。

(a) 設計の上流部への展開 前述のように設計の上流部への最適化技術の適用は初期設計の創成、創造的な設計、全体的にバランスの良い設計などのいずれの観点からも最適化技術の適用が大いに期待されるところである。

(b) 複合領域の設計への展開 最近、設計に対

する要求は、ますます高度化および高機能化してきており、一方では熟練者不足、生産の空洞化や経済状態の停滞などの設計を取り巻く環境の大きな変化が生じている。このような状況下で従来のような製品個別の設計や各段階における設計等のみに対する合理化や効率化だけでは対応できない多くの実際的な設計上の問題も生まれている。すなわち系全体もしくは複数の領域にまたがる設計、すなわち複合領域 (または多分野) の設計 (Multidisciplinary Design) を適切に考えなければならない場合も多く生じており、その設計の最適化は重要な問題の一つと考えられる。複合領域の設計の典型的なものとしては宇宙構造、航空機、自動車などの設計が挙げられよう。このほかには、ロボット、メカトロニクス機器の設計問題なども典型的な複合領域の設計問題といえよう。これらの設計では、例えば、構造問題を中心にとすると次のようなものが考えられる。

- (1) 制御問題と構造問題
- (2) 熱・流体問題と構造問題
- (3) 空力弾性問題と構造問題
- (4) 電磁気問題と構造問題
- (5) 性能問題と構造問題
- (6) 生産問題と構造問題
- (7) 環境問題と構造問題

複合領域の最適設計は次の観点からも重要である。

- (1) 系全体の評価関数を増加させることができ、一方では個別領域の評価関数も増加させることも期待できる場合が多い。
- (2) 既存の設計概念から脱却して、系全体としてよりバランスがよい、合理的な設計ができる可能性が大きい。
- (3) 従来は熟練者に依存していた高度の設計が可

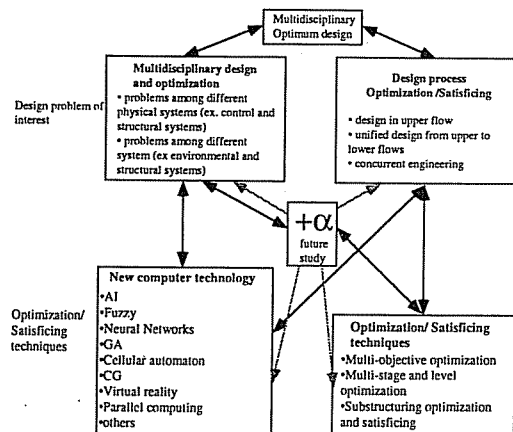


Fig. 1 Topics in multidisciplinary Design

能となる。

複合領域の最適設計の周辺には図1に示すような多くの問題がある。これらの問題については日本では、機械学会に調査・研究分科会が設置⁽²⁾され、アメリカにおいてはアメリカ航空宇宙学会(AIAA)が2年ごとに国際会議を開催している。また、ISSMO(International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization)という国際的な組織もできており、その組織により1995年5月末に第1回の国際会議が開催される。複合領域の最適設計については既に多くの研究が存在するのでここではそのいくつかをまとめたものとして文献(3)~(5)を末尾に掲載しておく。複合領域の動的最適設計問題では柔軟構造体でその制御が難しい宇宙構造物の構造系および制御系の同時最適化問題が、その必要性から研究が進んでいる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これによると、既定された構造系を基に制御系の設計を行っていた従来の設計から脱却し、制御系を含めた系全体のバランスの良い設計が求められる利点がある。その多くは、構造の部材形状のパラメータと制御系のゲインおよびセンサやアクチュエータの配置などの同時最適化問題が扱われている。さらに研究を進めて最近では構造系の位相、形状および制御系のフィードバックゲイン、センサやアクチュエータの配置などを設計のパラメータにとり、遺伝的アルゴリズムを活用した同時最適設計が試みられている⁽⁶⁾。さらに生産体制の空洞化が言われる現在、生産を初期から強く考えた設計も重要な複合領域の最適化問題の一つと言えよう。

(c) 最適化技術および計算技術面での展開

(1) 最適化技術の展開 設計の上流部や複合領域の最適化をはかる上では前述のようにAI、ファジイ理論、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、セルラーオートマトンや人工生命などに代表されるエマージェントコンピューテーション技術をこれまで以上に駆使し、またその統合的な活用が必要と考えられる。これらの多くは生物の仕組みやその適応にヒントを得た計算技術とも考えられ、その活用には改めて生物の仕組みやその適応形態を多角度から眺めてみる必要があるものと考えられる。例えば、最適化の規準として局所的なものや大局的なものをどのように使い分け、あるいは、調和させてゆくか等の大きな課題を解決する一つのヒントや環境に適応する設計のヒントなども生物の観察から得られる可能性は大であらう。

(2) 計算技術面での展開 設計の上流部や複合領域の最適化をはかる場合には、システムが大きくなるとアルゴリズムそのものは比較的簡単といえども膨

大な計算となることが多い。大規模な系の最適設計に対する従来の研究では、階層化や部分系化あるいは近似化等の方法が種々検討されてきている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。計算技術面で近年注目されている並列処理によって計算を行うことが考えられる。例えば、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムそのものの並列計算処理方法についてはこれまで研究されてきているが⁽⁹⁾、最適設計を強く意識した研究は少ない。日本機械学会において最近これらに関連の深い研究分科会が発足している⁽¹⁰⁾。

(山川 宏)

3. 最適化法に関する最近の話題

動力学における最適設計に関連した最近の話題をやや拡大して、構造設計全般に関連した話題を大まかに説明させていただくことをご容赦いただきたい。

有限要素法や境界要素法、差分法に代表される移動現象の数値解析法に関する理論体系が整えられたことを背景にして、構造設計の分野では1980年代に入って次々に開発された汎用の数値解析システムによる数値シミュレーションが実験と並ぶ性能評価方法の一つになってきた。1990年代は、実験では困難な最適化を実用レベルで行うことを目指した研究とシステム開発に力点が移されてきているように思われる。

ここでは、構造設計の分野を中心にして、最近注目されてきた最適化法の研究の動向を示唆していると思われる三つの話題について著者なりに紹介してみたい。

3・1 局所最適から全体最適へ 最初に取り上げたい動向は、局所最適だけでなく、全体最適解の探索が可能になってきたことである。いわゆる多峰性の問題に適した最適化法の研究が盛んになってきた。

現在もなお、有限個のパラメータを設計変数に選んだ最適化問題に対する標準的な最適化法は、逐次線形計画法や共役傾斜法、Newton法などに代表される数値計画法である。しかしながら、これらの方法で初期設計の選び方に関係なく全体最適解が得られる保証は凸性(目的関数の凸性と設計領域の凸性)と連続性が保証された問題に適用した場合のみであり、それらが保証されない問題に適用した場合には全体最適解に到達する保証はない。

連続性が保証された問題に対しては、トンネル法が提案されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。トンネル法は極小解に到達したならば、そこに極(pole)を持つ関数を用いて目的関数を変換して、その極小解には再度落ち込まないように工夫した方法である。

連続性が保証されない問題で、最近特にその解法に

についての研究が盛んになった問題は組合せ最適化問題である。1980年代中頃には、Hopfield-Tank⁽¹³⁾がいわゆる巡回セールスマン問題を相互結合型ニューラルネットワークを用いて解いたことから、組合せ最適化問題の一般的な解法になるのではないかと期待された。構造最適化問題への適用例も発表された⁽¹⁴⁾。しかしながら、ネットワークのエネルギー関数を設定する方法や収束安定性などの問題で、やや遅れて注目されたGA(遺伝的アルゴリズム, genetic algorithm)との比較において、最適化法としての研究の盛り上がりは小さかったように思われる。

GAは、1960年代にHollandによって提案されながら、注目されるようになったのは1980年代後半になってからである⁽¹⁵⁾。GAでは、設計変数を2進数(遺伝子, gene)にコード化して、一定の試行解(人工, population)の集合から最良な目的関数を持つ集合のみを残しながら(淘汰, selection), 再生産(reproduction)を繰り返していくことによって最適に近い解を求めようとする方法である。その際、交差(crossover)と突然変異(mutation)を加えることによって探索領域を拡大していく機能を持たせている。問題を2進数にコード化することさえできれば、簡単なアルゴリズムに従ったプログラムを利用して最適に近い解が比較的少ない繰り返しで得られることから、広い分野での利用が検討されている⁽¹⁶⁾。最適構造設計への応用例も多数発表されている⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾。

3.2 全体規準から局所規準へ 次に取り上げたい動向は、最適の規準を構造全体の状態に対して定めた全体規準によって与えた場合の最適化から、局所状態によって定めた局所規準を満たすことによる最適化の実現に関心が寄せられてきたことである。

古くは17世紀にGalileo⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が平等強さばりの考え方を示し、20世紀の初めには全応力設計⁽²²⁾(fully stressed design)の考え方が紹介されていることから、歴史に最初に登場したのは局所規準に注目した最適設計の考え方であったと思われる。その後、20世紀中頃までに数理計画法が開発され、Schmit⁽²³⁾が数理計画法を構造最適化問題に適用してからは、最適の規準を目的関数によって与えた最適化問題の解法に研究の中心が移された。その成果によって、1980年代末以降に開発されてきた汎用の構造解析システムには、通常、数理計画法による最適化解析の機能が備わり、実用に供されている。

一方、局所規準による最適化の考え方は、1960年代末に、Prager⁽²⁴⁾によって最適性規準法(optimality criteria method)として一般化された。その後、平均

コンプライアンス最小化問題のような一部の問題に対しては最適性規準を理論的に導出することによって、最適性規準法が適用できることが示され、全体規準と局所規準の関係が明確に関連付けられる領域が存在することも明らかにされている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

最近になって、この最適性規準法が再度注目されるようになってきた。その理由は、大規模構造の最適化問題に対して計算量が圧倒的に少なくて済むこと⁽²⁷⁾、さらには、本質的な理由として、大規模でかつ複雑な設計問題においては、最適の規準が全体の状態に対して与えられることよりは、むしろ、それぞれの要素ごとに満たさなければならない局所規準が与えられることの方が現実的で、かつ広範囲の設計問題に適用できるのではないかという考え方によるものと思われる。尾田は生物の適応挙動に注目して、各要素が局所ルールに従って適応挙動する細胞要素法を提唱し⁽²⁸⁾、局所ルールをニューラルネットワークを利用して決定する試みを紹介している⁽²⁹⁾。三木⁽³⁰⁾は知識工学の観点から知的自律要素の概念を提唱している。また、その概念の背景として、アダムスミスの国富論を例に挙げ、「複雑なシステムほど自動調整のメカニズムがよく働き、結果的に各要素が自身に課せられる制約だけで動いて最適化が達成できる」という考え方を示している⁽³¹⁾。

これらの局所規準の考え方は極めて魅力的であるが、著者は次のような見解を持っている。構造の力学的な問題に限定した場合、全体規準(目的関数)に対する最適性規準(局所規準)を理論的に導出すると、全体規準の選び方に依存して、状態方程式の解だけで最適性規準を記述できる自己随伴(self adjoint)関係⁽³²⁾が成立する場合と成立しない場合が存在する。成立しない場合には随伴方程式の解を求めて状態方程式の解とともにしてはじめて最適性規準を完全に記述できることになる。この事実を基にすると、自己随伴関係が成立しない全体規準の最適解と同一の最適解が得られるような局所ルールを得ようとした場合、局所ルールを状態方程式の解のみの関数と仮定して探索したのでは不十分で、随伴方程式の解も含めたときにはじめて同一の最適解が得られる局所ルールを見い出せる可能性がでてくることになる。したがって、局所ルールに用いる変数に何を選ぶ必要があるかは理論的に検討しなければならないように思われる。しかしながら、全体規準との関係が明確にできないからという理由だけで、都合のよい局所ルールが存在しないと結論付けるには無理があるようにも思われる。今後の研究に期待したい。

3・3 有限自由度から分布系へ 最後に取り上げたい動向は、設計変数を有限個のパラメータに選んだ最適化問題の解法から、分布関数に選んだ問題の解法に関心が寄せられてきたことである。

古くは、Galileoの平等強さばかりもはりの高さを与える分布関数を設計対象にした強度最大化問題の解であった。その後の簡単な歴史は文献(33)に譲ることにして、最近では、連続体や流れ場、電磁場などのだ円形境界値問題が定義されている領域の境界形状や連続体の位相形態を設計対象にした最適化問題の解法が提案されている。前者に関しては著者ら⁽³³⁾⁻⁽³⁵⁾が関数空間のこう配法⁽³⁶⁾を応用した方法(traction method)を提案している。現在は、振動固有値移動問題⁽³⁷⁾や周波数応答問題⁽³⁸⁾、さらに、粘性流れ場の散逸エネルギー最小化問題⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾やポテンシャル流れ場の規定領域における流速二乗誤差最小化問題⁽⁴¹⁾への適用方法が示されている。一方、後者に関しては、Bendsoe-Kikuchi⁽⁴²⁾、Suzuki-Kikuchi⁽⁴³⁾が物質を構成するミクロ構造の形状分布を設計関数にした最適化問題を定式化し、その問題に対する解法を提案している。この解法は、これまで、振動固有値移動問題⁽⁴⁴⁾や周波数応答問題⁽⁴⁵⁾に適用されている。

一方、最適性規準法を分布系の最適化問題に適用する試みはRozvany⁽⁴⁶⁾らが精力的に行っている。

(畔上 秀幸)

4. 航空工学における最適化技術の役割と展望

航空機開発は計算機による数値解析技術が最も積極的に利用される一分野である。有限要素法は、本来、航空機翼の構造設計のために開発された手法であり、理論的な正当性が裏付けられる以前に実際の設計に導入された。また差分法・境界要素法による空力計算手法も高価な風洞実験の代用としたいとする工業界の要請により、開発と同時に実用化が進んだ。このように数値計算が重要視される理由には、むだの許されない厳しい設計基準が挙げられる。例えば、構造強度は想定される最大荷重に安全率を掛けた外力に耐えることが耐空性審査要領により規定される。しかも、航空機は軽量であることが要求されるから、単に規定の外力に耐えるだけでなく、規定の外力を超えた瞬間に全ての構造が同時に破壊するという状態が理想とされる。こうした思想は、構造最適化における全応力設計の考え方そのものであり、航空機の設計はその厳しい設計要求ゆえに最適化を目指していると言える。

解析技術の実用化の次に計算機を利用した最適化技

術を求めることは自然なことで考えられる。事実、最適化に関する研究は非常に精力的に進められ、膨大な研究論文が発表されている。少し古い資料ではあるが、1964年から1980年までに、航空工学の分野で最適化に関連した文献は、DIALOGのデータベース上で総数8073件存在したことが報告されている⁽⁴⁷⁾。ちなみに分野ごとの内訳は、最適制御は4550件、空力2142件、構造1381件であった。最適化に関する研究の活発さにもかかわらず、実際の設計現場での最適化手法導入は驚くほど遅れていた。文献(47)でAshley(元スタンフォード大教授)は、46名の著名な技術者・研究者にアンケートを実施し、最適化技術の航空機開発における具体的な適用例を集めることを試みている。その結果、1980年以前のアメリカでは、実機の設計に最適化手法が実際に適用された事例はほとんど存在しないことが明らかになった。興味深い多くの研究論文にも関わらず実際の設計現場に最適化手法が浸透していない理由としては、最適化手法は単なる数値解析よりも使用法が複雑で計算コストもかさむ上、制約条件が不十分であると奇妙な結果を出力するといった技術的な問題点以外に、設計仕様で最適化手法の適用が義務づけられておらず、他のメーカーも使用していないといった慣習によるもの、また、経験豊富な技術者は設計を計算機に委ねることを嫌う傾向にあるとする心理的な要因が指摘されている。

Ashleyの発表後、しかしながら、航空機の開発状況は大きく変わり、最適化に対するスタンスにも変化が見受けられる。状況変化の一つは設計管理が複雑化したことにある。現在の航空機の設計には、飛行性能だけでなく、経済性、安全性、環境への適合性といった諸条件が交錯している。現実には、設計管理の不手際が主な原因で発生したいくつかのトラブルが指摘されている⁽⁴⁸⁾。設計が複雑化することは、必然的に航空機開発費の高騰を招く。設計にかかる純粋な費用はさほど大きい訳ではないが、全体の開発費の85%は概念設計と、予備設計の段階でなされる意思決定によって左右されると言われる⁽⁴⁸⁾。航空機が高価になることは、新たな航空機の開発が減少することも意味し、我が国では以前から指摘されていることであるが、一人の技術者が生涯で一度も新機種開発に携わることができなくなる状況も懸念されている。今後の航空機は、経験の少ない技術者により、厳しいコスト管理と過酷で複雑な要求のもとで設計されなければならない。

こうした状況を救うために、TQM (Total Quality Management) を現代的な計算機環境で実現するCE (Concurrent Engineering) という設計手法が推進さ

れようとしている⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。CEは設計と、それに付随する製造、保守、品質管理、価格見積等を同時に管理する手法である。伝統的なシステム工学的手法との差は、データベースと、計算機ネットワークをもとに統合化された計算機環境を構築しようとする点にある。CEに基づく設計環境では、全ての評価項目が計算機の中でシミュレーション可能で、代替案の検討は性能、コストはもとより生産方式を含めて統合的に評価される。

CEに基づく設計環境を整備する試みは、アメリカボーイング社の新機種B-777開発に見出すことができる。B-777の設計においては100%のペーパーレス設計がなされ、構造設計、強度計算、装備設計のデータベースが一元化され、設計以外に製造、ジグ設計までの全部門が同時並行的に作業を進めることが可能になった。特徴的なことは、全機FEM構造解析がこのクラスの機体では初めて可能になったこと⁽⁵⁰⁾、三次元ソリッド・モデルの採用により装備品の組立状況が計算機上でシミュレーション可能になり、装備品と構造との干渉をチェックするための実物大モックアップが全面的に廃止となったことである⁽⁵¹⁾。こうした設計環境を実現するためにボーイング社はエンジニア・ワークステーション2200台を、米日英三国の技術者間でネットワークにより結ぶ大がかりなCADシステムを構築し、世界中の各部門が同一のデータを共有することを可能にした⁽⁵²⁾。

データベースに基づく設計の計算機管理の整備は、計算機による最適化を行う環境が整うことを意味している。以下では、航空工学の代表的な分野における最適化技術の現状と展望を整理する。

4・1 構造解析 Ashleyの調査以後も直接に最適化技術が応用された機体構造はアメリカでは存在しない。しかし、実用化に向けての研究は進んでおり試作業、実験機への適用が試行されてる⁽⁵³⁾。

最も大規模な計算例は、MSC/NASTRANの最適化機能を用いて、大型旅客機MD-12の翼構造を対象としたものであろう。解析に用いられた有限要素法モデルは約9500の要素からなり、解析自由度は約10000、独立な設計変数の数は約1200であった。3種類の荷重条件に関する静的剛性と、最小寸法を制約として、構造重量の最小化が図られ、収束には5回の解析を必要とし、スーパーコンピュータCRAY X-MPにより3時間37分のCPU時間(経過時間で16時間)を要したと報告されている⁽⁵³⁾。ただし、大規模な最適化計算に標準的な数値計画法を適用する際、計算時間および計算精度の観点から設計変数の数には上限が存在するこ

とが予測される。実用的な最適化計算を行う際の設計変数の数の上限は300から600で、それ以上の大規模な計算には最適性の条件に基づく間接的な最適化計算が有効であるとの報告も存在する⁽⁵⁴⁾。

宇宙機の開発では具体的な応用例が報告されている⁽⁵³⁾⁽⁵⁵⁾。また、ヨーロッパでは構造最適化がアメリカよりも積極的であり、100程度の設計変数を持つ4000程度の自由度からなるFEM解析に基づく機体構造の最適化が実用化されている⁽⁵⁶⁾。

4・2 空気力学 好ましい空力特性を得るために機体形状を風洞実験/数値解析を繰り返し洗練させて行く一連の空力設計作業を計算機に行わせたいとする要求は古くから存在する。空力的最適化問題は、最適化問題としては形状最適化問題に属し、機体形状のパラメトリックな表現方法、信頼性のある解析コード、機体形状の修正方法を確立することが実用化のための条件となる。機体形状を修正させる方法としては、数値計画法に基づくものと、逆問題としての定式化が存在する。

数値計画法を利用する方法は、設計要求が直接的に表現でき、基本的には解析コードと最適化ルーチンを組み合わせることで実現できるという利点を持つが、解析コードの実行に時間がかかると現実的ではなくなる。その意味で、ポテンシャル流を対象とした線形の境界要素法を解析コードに選ぶ方法⁽⁵⁷⁾は現実的と言える。より厳密な解析コードとして三次元オイラー方程式に基づく計算⁽⁵⁸⁾も実施されているが、計算効率を向上させるための工夫がさらに必要と考えられる。新しい試みとしては、自動微分処理を導入し、最適化に要求させるよう配計算の効率を上げる方法⁽⁵⁹⁾や、最適制御問題で用いられる随伴変数を導入し計算効率を改善する方法⁽⁶⁰⁾が注目される。

逆問題では、機体表面の圧力分布を指定して、機体形状を決定する。微小じょう乱方程式に基づく積分方程式によって機体形状を修正する方法⁽⁶¹⁾を汎用の解析コードと組み合わせる手法が実用化され、遷音速三次元翼の設計も可能になっている。この方法の難点は、指定すべき圧力分布の決め方が明確でないことにあるが、GAの手法を用いて最適な圧力分布を求める方法も発表されている⁽⁶²⁾。

4・3 誘導制御 決められた2点を、評価関数を最大(最小)にするように質点を誘導する最適制御問題は、古典的には変分法によって定式化され、ポントリヤギンの最大原理、ベルマンの動的計画法によって計算機処理が可能になった。ただし、現実的な数値計算法としては、変分原理に基づき随伴変数を導入し、

最適性の条件をもとに状態方程式と随伴方程式を数値積分するいわゆる間接法が用いられた⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾。特に文献(64)の方法はSCGRA法と呼ばれ多くの計算例が報告されている⁽⁶⁵⁾。

間接法に対して、数値計画法を直接に利用する直接法は、状態量の不等式拘束条件の処理が容易なため、近年研究が進み大規模な計算も可能になりつつあり⁽⁶⁶⁾、多目標、ファジイ目標など数値計画法の特長を活かした研究も報告されている⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾。最適制御問題は、最適化手法としては例外的に実機への応用が活発な分野で、スペースシャトルの軌道設計等に利用されているようである⁽⁶⁹⁾。

線形の動的システムにおいて評価関数を二次形式に選ぶと、最適制御理論は自動制御における最適レギュレータ理論に帰着される。大きな外乱を受け、しかも飛行状況によってシステム特性が激しく変動する航空機の制御には、最適レギュレータ理論はなじまず、現在でも古典制御理論が主流である。ただし、最悪外乱に対する応答を評価関数に選ぶ H_{∞} 制御は、強いロバスト性を持たせることが可能で、今後の応用が期待される。最適制御理論でも、最適状態量推定機構としてのカルマンフィルタは慣性航法誘導に実用化されている。

4.4 多分野最適化 翼のフラッタ特性の最適化問題は、翼の破壊にいたるフラッタと呼ばれる自励振動を対象とするもので、翼の構造解析と空力解析を必要とする典型的な多分野最適化問題である。機体製造各社は独自にフラッタ最適化プログラムを開発しており、例えば、グラマンとジェネラルダイナミクス(GD)社は1970年代に既に本格的な最適化プログラムを完成している⁽⁴⁷⁾⁽⁵³⁾。この分野では、複合材料設計をフラッタ解析に含めるテーラリング技術において最適化手法が重要な役割を演じている⁽⁵³⁾⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾。

フラッタ以外にも、翼の振動制御に制御機構を導入し制御系も含めた最適化を行う試み⁽⁷²⁾⁽⁷³⁾や、飛行経路の最適化まで含めた翼構造の最適設計の例⁽⁷⁴⁾が報告され多分野最適化の有効性が示されている。

4.5 概念設計 航空機の設計は、空力・構造・制御・推進機等の各技術分野のバランスを重要視する。概念設計の段階ではこうしたバランスの調整に最適化手法が威力を発揮できると期待されている⁽⁷⁵⁾⁽⁷⁶⁾。

概念設計に関する最近の話題は、設計空間全体の大きな傾向が容易に把握でき、離散的な設計変数も扱える田口メソッドの応用に関する研究⁽⁷⁷⁾と、概念設計の精度を上げるために概念設計の段階でかなり細かい解析を実施しようとする試みを挙げる事ができ

る。後者は、多分野最適化を機体全体の規模で実施しようとするもので、NASA ラングレー研究所では次期超音速旅客機概念設計をケース・スタディとして研究を進めている⁽⁷⁸⁾。そこでは複雑に関連する分野ごとのデータの流れを知識工学の手法を用いて整理し、分割最適化の手法を導入して巨大システムを最適化する試みがなされている。将来的には空力・構造・制御・推進といった従来からの技術分野のみならず、生産性・保守性・コスト分析をも統一的に管理し、システム全体としての最適化を図るシステムの構築が試みられよう。

ライト兄弟に与えられた課題は、操縦可能な動力飛行機を作ることだけであったが、今日では、高騰する開発費、環境問題に代表される困難な設計要求、複雑化するシステム設計、そして安全性と経済性の厳しい追求を同時に満たさねばならなくなっている。こうした状況において計算機の能力を生かした最適化技術の実用化への期待は高まっている。(鈴木 真二)

5. おわりに

以上極めて簡単に最適設計の研究および実用化の動向を三人の著者により紹介し、さらに、現在新しく展開しつつある研究を基に今後の動向等を予測してみた。本稿により読者の方々のこの分野に対する興味が増せば幸甚である。

文 献

- (1) 山川, 最適化デザイン, (1993), 240, 培風館.
- (2) 日本機械学会研究分科会 PSC-238 「複合領域の設計における最適化および満足化に関する調査・研究分科会」, [主査: 山川宏 (早稲田大学)].
- (3) 5th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Florida, (1994).
- (4) 山川, 構造系と制御系の同時最適化問題, 第2回デザイン・エンジニアリングプラザ, 制御システムのコントロールとデザイン, 日本機械学会セミナー教材, No. 920-50 (1992), 39-54.
- (5) 岩壺・ほか1名, 機械構造物の構造系と制御系の同時最適化に関する研究動向と今後の課題, 機論, 59-559, C (1993), 3-9.
- (6) 浮田・ほか, 遺伝的アルゴリズムを用いた構造系の位相, 形状と制御系の同時最適化に関する研究, 日本機械学会第72期通常総会講演論文集, IV (1995), 334-336.
- (7) Sobieski, S. (Rozvany, G., ed.), Optimization by Decomposition in Structural and Multidisciplinary Applications, *Optimization of Large Structural Systems*, 1 (1993), 193-234.
- (8) Thomas, H.L. and Vanderplaats, G.N. (Rozvany, G., ed.), The State of Art of Approximation Concepts in Structural Optimization, *Optimization of Large Structural Systems*, 1 (1993), 271-288.
- (9) Shonkwiler, R., Parallel Genetic Algorithms, *Proceed-*

- ings of the fifth International Conference on Genetic Algorithms, (1993), 199-205.
- (10) 日本機械学会研究協力部会 RC 134, 計算力学システムとその新技術への応用研究分科会, (主査: 矢川元基).
- (11) Levy, A. V., Montlvo, A., Gomez, S. and Calderon, A., *Lecture Notes in Mathematics*, (Hennart, J. P. ed.) No. 909 (1982), 18-47.
- (12) 山崎, トンネル法による大域的最適解の探索, 日本機械学会第69期全国大会講演会論文集, No. 910-62 (1991), 673-675.
- (13) Hopfield, J. J. and Tank, D. W., Neural computation of decisions in optimization problems, *Biol. Cybernetics*, 52 (1985), 141-152.
- (14) 尾田・水上, ニューラルネットワークによるトラス構造物の最適設計, 機論, 59-557, A (1993), 273-278.
- (15) Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms*, Addison-Wesley Publishers. (1989).
- (16) Belew, R. K. and Booker, L. B. (ed. s), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, (1991), Morgan Kaufman Publishers.
- (17) 荒川・山川, 2次元構造物の遺伝的アルゴリズムを用いた最適トポロジーに関する研究(第1報, 基礎的アルゴリズムの提示), 日本機械学会第5回計算力学講演論文集, No. 920-92 (1992), 287-292.
- (18) 山川・高木, 遺伝的アルゴリズムを用いた設計の進化に関する研究, 日本機械学会第2回設計工学・システム部門講演会論文集, No. 920-13 (1992), 105-110.
- (19) 坂本・尾田, 遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法, 機論, 59-562, A (1993), 1568-1573.
- (20) Galilei, G., *Mathematical discourses and demonstrations*, (Illustrations), Leiden, (1638), 105-122.
- (21) Banichuk, N. V., *Problems and Methods of Optimal Structural Design*, (1983), Plenum Press, New York.
- (22) Gallagher, R. H. (Gallagher, R. H. and Zienkiewicz, O. C., ed. s), *Fully stressed design, Optimum Structural Design—Theory and Applications—*, (1973), 19-32, John Wiley & Sons.
- (23) Schmit, L. A., Structural design by systematic synthesis, *Proc. of Second Conference on Electronic Computation ASCE*, New York, (1960), 105-122.
- (24) Prager, Q., Conditions for structural optimality, *Comput. Struct.*, 2 (1972), 833-840.
- (25) Na, M., Kikuchi, N. and Taylor, J. E., Optimal modification of shape for two-dimensional elastic bodies, *J. Structural Mech.*, 11 (1983), 111-135.
- (26) Na, M., Kikuchi, N. and Taylor, J. E., Optimal shape remodeling of linearly elastic plates using finite element methods, *Int. J. Numer. Mech. Engng.*, 20 (1984), 1823-1840.
- (27) Canfield, R. A., Grandhi, R. A. and Venkaya, V. B., Optimal design of structures with multiple constraints, *AIAA J.*, 26-1 (1988), 78-85.
- (28) 尾田・岡田, 細胞要素法(その概念と応用例), 日本機械学会第1回最適化シンポジウム講演論文集, No. 940-25 (1994), 7-12.
- (29) 尾田, 形態形成のための局所ルールとその一般化, 日本機械学会第7回計算力学講演会, No. 940-54 (1994), 362-363.
- (30) 三木, 知的自律要素法による離散的システムの最適化, 日本機械学会第1回最適化シンポジウム講演論文集, No. 940-25 (1994), 63-68.
- (31) 三木, やわらかい最適化, 日本機械学会第1回最適化シンポジウム講演論文集, No. 940-25 (1994), 141-144.
- (32) Olhoff, N. and Taylor, J. E., On structural optimization, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 50 (1983), 1139-1151.
- (33) 畔上, 領域最適化問題の一解法, 機論, 60-574, A (1994), 1479-1486.
- (34) 畔上・呉, 線形弾性問題における領域最適化解析(方法によるアプローチ), 機論, 60-578, A (1994), 2312-2318.
- (35) 下田・呉・畔上・桜井, 汎用FEMコードを利用した領域最適化問題の数値解析法(方法によるアプローチ), 機論, 60-578, A (1994), 2418-2425.
- (36) Cea, J. (Haug, E. J. and Cea, J., ed. s), Numerical methods of shape optimal design, *Optimization of Distributed Parameter Structures*, 2 (1981), 1049-1088, Sijthoff & Noordhoff, Alphen aan den Rijn.
- (37) 呉・畔上, 固有振動問題における領域最適化解析(方法によるアプローチ), 機論, 61-583, C (1994), 930-937.
- (38) 呉・畔上, 周波数応答問題における領域最適化解析(方法によるアプローチ), 機論, (投稿中 No. 94-1213).
- (39) 片峯・畔上, 粘性流れ場の領域最適化問題の解法(方法によるアプローチ), 機論, 60-579, B (1994), 3859-3866.
- (40) 片峯・畔上, 粘性流れ場の領域最適化解析(対流項を考慮した場合), 機論, 61-585, B (1995), 1646-1653.
- (41) 片峯・畔上, ポテンシャル流れ場の領域最適化解析, 機論, 61-581, B (1995), 103-108.
- (42) Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Meths Appl. Mech. Engng.*, 71 (1988), 197-224.
- (43) Suzuki, K. and Kikuchi, N., A homogenization method for shape and topology optimization, *Comput. Meths Appl. Mech. Engng.*, 93 (1991), 291-318.
- (44) Diaz, A. R. and Kikuchi, N., Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method, *Int. J. Numer. Methods Engng.*, 35 (1992), 1487-1502.
- (45) Ma, Z. D., Kikuchi, N. and Hagiwara, I., Structural topology and shape optimization for a frequency response problem, *Computational Mechanics*, 13 (1993), 157-174.
- (46) Rozvany, G. I. N., *Structural Design via Optimality Criteria*, (1989), Kluwer Academic Publishers.
- (47) Ashley, H., *J. of Aircraft*, 19-1 (1982), 5-28.
- (48) Roskam, J., *Aerospace America*, 29-9 (1991), 26-29.
- (49) Burgess, M. A., *Aerospace America*, 29-9 (1992), 22-25.
- (50) 戸塚・ほか1名, 第32回飛行機シンポジウム講演集, (1994), 185-188.
- (51) 田島・ほか2名, 第32回飛行機シンポジウム講演集, (1994), 181-184.
- (52) Proctor, P., *Aviation Week & Space Technology*, (1994), 36-37.
- (53) Miura, H., ほか1名, *AIAA*, 92-4726-CP, (1992).
- (54) Dodd, A. J., ほか2名, *J. Aircraft*, 27-12 (1990), 1028-1036.
- (55) Woo, T. H., *AIAA J.*, 25-10 (1987), 1396-1404.
- (56) Petiau, C., ほか1名, *AGARD*, No. 280, 23-1-23-16.
- (57) 松本・ほか1名, 航空宇宙学会誌, 41-479 (1993), 712-720.
- (58) Reuther, J., ほか2名, *AIAA Paper*, 92-2633 (1992).
- (59) Bishop, C., ほか1名, *Computing Systems in Eng.*, 3-6 (1992), 625-637.
- (60) Reuther, J., ほか1名, *AIAA Paper*, 95-0123 (1995).
- (61) Takanashi, S., *J. Aircraft*, 22-8 (1985), 655-660.
- (62) 大林・ほか1名, 第8回数値流体力学シンポジウム集, (1994), 153-156.
- (63) Bryson, A. E., ほか1名, *J. of Applied Mechanics*, 29-2 (1962), 245-257.
- (64) Wu, A. K., ほか1名, *Optimal Control Applications and*

- Methods*, 1-1 (1980), 69-88.
- (65) 加藤, 工学的最適制御, (1988), 東大出版.
- (66) Betts, J. T., ほか, *J. of Guidance Control and Dynamics*, 15-1 (1992), 198-206.
- (67) Suzuki, S., ほか 1 名, *J. of Guidance Control and Dynamics*, 17-2 (1994), 297-303.
- (68) 鈴木, 第 32 回飛行機シンポジウム講演集, (1994), 295-298.
- (69) Jhonson, I. L., *J. Spacecraft and Rockets*, 12-12 (1975), 765-769.
- (70) 磯貝, 第 35 回構造強度講演会, (1993), s 1-s 11.
- (71) 戸田, 第 29 回構造強度講演会, (1987), 288-291.
- (72) Livne, E., ほか 2 名, *J. of Aircraft*, 27-12 (1990), 979-992.
- (73) Suzuki, S., ほか 1 名, *J. of Aircraft*, 30-2 (1993), 268-274.
- (74) 鈴木・ほか 1 名, 第 1 回最適化シンポジウム, (1994), 85-90.
- (75) Jensen, S. C., ほか 2 名, *J. of Aircraft*, 18-2 (1981), 76-81.
- (76) 赤木・ほか 2 名, 航空宇宙学会誌, 41-468 (1993), 27-33.
- (77) Olds, J. R., *AIAA Paper*, 92-4791-CP (1992).
- (78) Sobieski, J. S., *NASA TM*, 107622 (1992).
-