

委員会報告 (和文)
COMMITTEE
REPORT

【委員会報告】

構造システム最適化の現状と将来

TODAY AND TOMORROW ON OPTIMIZATION OF STRUCTURAL SYSTEMS

構造工学委員会 構造システム最適化研究小委員会

Committee on Optimization of Structural Systems

1. まえがき

数値計画法と有限要素法、およびコンピュータの三者が結合した時の可能性を示し、新しい構造設計法として「構造最適設計法」あるいは「構造総合」といわれる概念が提唱¹⁾されてから30年が経過した。

その間、米国においては航空学会を中心として、国内においては、土木学会のメンバーを中心とするグループにより主に研究活動がなされてきた。多くの紆余曲折を経ながら、現在、俗にいう「最適化技術」は、理論的にも、技術的にも、そしてそれらを支える最適化のための基本的なソフトウェアにおいても、十分実用に耐え得る段階に達したといっても過言ではないと考えられる。

1980年現在における米国航空学会における報告では、それまでの航空機への最適化技術の実応用例はほとんど無かったのに対し、1990年現在の調査では、最適構造設計の成果を部分的にでも用いた航空機が実用になるのは珍しいことではなくなった²⁾といわれているのは、上記の背景を説明している。

一方、例えば土木工学の分野においては、社会システムの複雑化、価値基準の多様化、および建設現場の環境の悪化等々により、要求される構造物あるいは何らかのシステムの設計は、益々複雑化、困難化しているものと考えられる。特に、若い世代の技術者を中心として、従来の設計法に対するフラストレーションはかなり高いレベルに達しているのは、土木工学のみではなく、他の工学分野でも同じではないかと考えられる。

このような状況を背景として、1991年に本小委員会は、構造工学委員会の中に設置された。

主な設置趣旨は、構造最適設計のためのCAEの開発による実務の応用の拡大、構造設計におけるファジィ理論、エキスパートシステムおよびAIの実用化、構造物の維持・管理システム、振動制御、耐衝撃設計、逆問題および構造同定問題、地下、海洋および宇宙における新構造物の開発、複合材料設計への最適化理論の応用に関する調査・研究であった。

また、土木工学のみならず、種々の工学分野との情報を交換するため、第1回のシンポジウム³⁾に引き続き第

2回システム最適化に関するシンポジウムを主催した。

本報告は、このシンポジウムにおいて発表された多くの理論、応用実例を記述の中心とし、国内における最適化技術の現状と、将来の多くの工学分野への応用に関する展望を提示することを目的として書かれている。

主な項目は、(1)最適化アルゴリズム・ソフトウェア、(2)ファジィ、エキスパートシステムおよびニューラルネットワークと最適化、(3)逆解析問題および構造同定問題、(4)最適振動制御、(5)形状最適化問題、(6)橋梁の設計・施工、(7)土木・建築構造物の解析・設計・施工、(8)機械・航空・宇宙工学における応用である。また、最後にあとがきとして、今後の展望、残された課題についても記述される。

2. 調査研究活動報告

(1) 最適化アルゴリズム・ソフトウェア

a) アルゴリズム

最適化における最近の最も大きな話題は何と言っても線形計画(LP)に対する新解法であろう⁴⁾。すでに1970年代後半頃から多項式オーダーでLPを解く新解法が話題となっていたがそれらのほとんどは実際に試行した結果、思った程には計算効率があがらなかった。ところが1984年米国ベル研究所のKarmarkarが発表した内点法に対しては理論的にも多項式オーダーで解けることが示され、実際何万(あるいはそれ以上)という変数をもつ大規模なLP問題に適用して大規模になるほどシンプレクス法に比して計算速度が向上することが報告された。1988年東京で開催された国際数値計画シンポジウムでKarmarkarに対しFulkerson賞が贈られたが、同時に世間を驚かせたのがKarmarkar法の特許申請だった。この特許は現在アメリカ合衆国で成立しているが、このような数学的方法の特許については現在も論争が尽きない⁵⁾。

ところで、このようなLPに対する内点法は解を求めるスピードは速いがシンプレクス法では容易な感度解析等のいわゆるpost optimality分析ができないという欠点をもっていることも注意しなければならない。

非線形計画法では制約のない場合の準Newton法、制

約のある場合の SUMT, GRG, 乗数法, 逐次 2 次計画法 (SQP) の後に続く革新的な手法は今のところ出ていない。むしろ, この分野は手法的に成熟期にあると見るのが自然で, 実際問題への活発な応用を行い, そのフィードバックが期待されるところである。なお, これらの微分を用いる方法では実際において微分計算が困難な場合も多く, 数値微分の効率化や数式処理による自動微分計算の研究も重要で⁶⁾, すでにそれらを組み込んだソフトウェアもある。

実際問題への応用の際, 重要となる最適化のヒューマンインターフェイスを重視したものに多目的計画法, ファジィ数値計画法がある⁷⁾。実際の問題はほとんど多目的問題であるが, ゴールプログラミングから出発した多目的計画法もトレードオフ分析をより行いやすくなるように工夫され, すでに手法的には成熟した感がある。幅広い工学設計問題への適用例をまとめた成書⁸⁾もある。データの曖昧さや人間の判断の曖昧さを組み込んだ上で最適解を求めようとするファジィ数値計画法の工学設計問題への適用については (2) で述べる。

新しい傾向としては, 大局的最適解を見つけるための方法として random search 法⁹⁾, 生物の進化の過程をシミュレーションすることによって近似最適解を得ようとする GA (遺伝アルゴリズム)¹⁰⁾, さらに統計力学における annealing 操作を用いた疑似焼き鈍し (simulated annealing) 法^{10), 11)}等の研究が活発になり, これらは今まで困難とされてきた組合せ最適化に積極的に応用されるようになってきた。また, 組み合わせ最適化に対しては神経回路網の力学系に置き換えて解こうとする方法^{5), 10), 12)}も注目を集めている。さらに, ハードウェアのめざましい進展によって最適化の並列処理^{10), 13)}も活発になりつつある。

b) ソフトウェア

近年最適化の教科書も豊富に出回り, ソフトウェア付きのものも多い。BASIC で書かれたものは教育用としては効果があるが, 実際問題に適用しようとするには不十分である。汎用ソフトとしては, 茨木・福島によるもの¹⁴⁾は FORTRAN で書かれており, 通常最適化からネットワークフロー等の離散最適化までほとんどすべてのタイプの手法を取り扱っている。また ASNOP¹⁵⁾は東大大型計算機センターから全国の大学, 研究機関に公開されており, 最適化の FORTRAN プログラムを自動生成する機能をもっており, 構造解析とも結合させやすいという特徴がある。ADS¹⁶⁾は Vanderplaats・Sugimoto によって最初から構造物等の工学設計への応用を企図して作成されたが, これをもとにして VMA 社によって DOT/COPES として商品化され, 日本でも売り出されている。さらに, 商業ソフトとして評価を得ているものに線形計画・2 次計画に対しては LINDO¹⁷⁾, 非線形計

表-1 各技術の長所と短所

技 術	長 所	短 所
E S	① 推論過程が論理的で透明である ② 推論結果の妥当性が説明できる ③ 知識ベースの拡張が容易	① 知識獲得の問題を抱えている ② 競合する知識の制御が困難 ③ 逐次処理が基本のために遅い
ファジィ	① 並列処理が可能で高速化できる ② 領域知識を陽に利用できる ③ 事例により調整が可能である	① 推論結果が説明できない ② 多段であいまいさ爆発を起こす ③ 知識獲得に問題を抱えている
N N	① 知識獲得の過程を必要としない ② 並列処理が可能で高速化できる ③ ノイズや破壊に対して頑健である	① 推論結果を説明できない ② 事例に過剰に適合する危険あり ③ 学習に多量の計算を要する

画に対しては GINO¹⁸⁾があり, いずれも日本の販売代理店を通じて容易に購入できる。またサブルーチンとして部品化された商業ソフトとしては NAG Library がある。その他, 特記すべきものとして, 特に海外の最適化の研究者の間ではもはや標準となっている Stanford 大学の MINOS がある。入手方法については直接 Stanford 大学に問い合わせられるとよい。

(2) ファジィ, エキスパートシステムおよびニューラルネットワークと最適化

小林¹⁹⁾によると, ファジィ, エキスパートシステム (ES), ニューラルネットワーク (NN) には次のような特徴がある。ES は知識処理, ファジィは技術処理, NN は認知処理が得意である。野球を例にとると, ボールかストライクを判定するのが NN, ファジィはその上さらに球質や投球パターンまで認知して, それに基づいてアクションを起こす打者であり, ES は監督のようなもので, 全体の状況を把握してサインを出す。この例が必ずしもそれぞれの本質や全てを表しているわけではないが, この 3 者の特徴と関連の一部を理解することは可能であると思われる。表-1 に各技術の長所と短所をまとめて示す。

最適化問題への応用という観点からみると, これら 3 方法はそれぞれ表-2 に示すような, 問題解決の方法をとっている。具体的には, ES は従来の最適化手法では発見的方法 (heuristic method) といわれるものをより洗練された形で定式化したものといえる。いわゆる ES はある意味では, 最適化問題を取り扱っているといえる。従来の最適化手法を表-2 の OR と考えると, ES と OR の差は ES では手続き型の方法をとっていないこと

表-2 各技術の問題解決方式

技 術	問題解決方式			
	手続きベース	探索ベース	知識ベース	事例ベース
O R	○	○		
E S		○	○	○
ファジィ	○	○	○	○
N N				○

にある。これに対し、ファジィでは、ファジィ数理計画法とファジィ推論の応用が考えられる。ファジィ数理計画法は、我々が通常扱う問題に数多く存在する確定的に明確な形で表現できない要因を考慮するために考えられた。また、ファジィ推論はESの推論にファジィ性を取り込むために開発されたものである。当然のことながら、ファジィ数理計画法のシステム最適化問題への応用は数多くあり、最適耐震設計^{20),21)}、最適信頼性設計²²⁾、最適塑性設計²³⁾等への応用が試みられている。最後に、NNは組合せ最適化への応用が盛んであり、巡回セールスマン問題への応用²⁴⁾が有名である。

第2回システム最適化シンポジウムでは、ファジィ・ES・NNの関係で8編の論文応募があった。ファジィ関係が5編、NNが2編、ESが1編である。ファジィ関係では、まず構造物の振動問題へのファジィ制御の応用が2編、ファジィ数理計画法に関するものが2編、ファジィ線形回帰分析の斜張橋のケーブル張力調整への応用が1編あった。ESでは定性推論の機械構造物の多目的最適設計への応用があり、NNでは被災電話網の最適復旧過程の評価と、組合せ最適化のためのニューロ・オプティマイザの開発があった。いずれの論文も上記の各手法の特徴を生かしたもので、今後の発展が期待できる。

より実用的なシステムを作り上げる、あるいは既存システムをより実用的なものとするには、これら3つの技術を融合させることが必要であると思われる。ESとファジィの融合としては、ファジィエキスパートシステム²⁵⁾があげられ、このシステムでは、入力データ、ルール等に含まれるあいまいさをファジィ集合の考え方を用いて取り扱える。ファジィとNNの融合としては、最も顕著な例としてファジィ制御におけるニューラルネット駆動型ファジィ制御²⁶⁾をあげることができ、家電分野では既にニューロ・ファジィという形で製品化がなされている。最後のファジィとNNの融合は、ある意味では最も簡単で、NNの各ノードにファジィ性をもたせる、すなわちメンバシップ値をいくつかのノードを用いて表現すれば、ファジィニューラルネット²⁷⁾を構成することができる。いずれにしても、これら3者の融合においては、各手法の特徴をより一層発揮させることが望まれる。

(3) 逆解析問題と構造同定問題

直接計測できない対象を計測できるものから推定する技術は、科学技術の進歩に大きな役割を演じてきた。土木工学の分野だけでなく、その他の工学、自然科学等の分野においても、逆問題あるいは逆解析という言葉が広く用いられるようになってきている²⁸⁾⁻⁴⁰⁾。これらに対して、順問題、順解析と言う言葉がある。構造工学の立場から見ると、構造諸元が与えられ、応答を解析することを順問題（順解析）と呼び、応答やその他の制約条件を満たすように構造諸元を決定することを逆問題と称している。すなわち、パラメータの同定だけでなくシンセシスも逆問題に包含されている。しかし、シンセシスの問題については他の節に十分に述べられているゆえここでは省略し、パラメータの推定問題に絞ることとする。

パラメータ推定問題は、分野によりいろいろな呼び方がされている。通常我が国では、パラメータ同定、システム同定、構造同定、逆解析という言葉が用いられているが、一方英語では、parameter identification, system identification, structural identification, inverse analysis, backanalysis, backcalculation等さまざまである。そのいずれも基本的には、線形あるいは非線形の最小二乗問題に帰着する。

最小二乗問題を解く方法として、準ニュートン法をはじめ各種の最適化のアルゴリズムを利用できる。しかし、アルゴリズムの適否は、対象とする問題に依存し、必ずしもオールマイティな方法は存在しない。最適化のアルゴリズムより、むしろGauss-Newton法、Levenberg-Marquart法、Kalman filter, dynamic programming filter等が用いられている。中でも、Kalman filterは理論的にも洗練されており、近年最も頻繁に利用されるようになってきた手法である。また、地盤や地盤特性の推定、あるいは、水文学における水の循環モデルの構築において、有限個のデータからある点、またはある領域におけるパラメータの値を推定することが必要となる。元来空間的にばらつきのある状態に統計的な処理が有効であり、局所的なレベルで近接する2点での相関を記述するsemi variogramとそれを用いて計算するkriging（重みの不偏推定値）を利用してパラメータの推定が行われている^{32),33)}。他方、統計学においては、線形及び非線形回帰に古くから研究されてきている。これらも、最小二乗問題であることを考えると、この分野の学問的な蓄積をパラメータ同定にも活用できるのではないだろうか^{41),43)}。

土木工学の分野において、構造、地盤、水文、コンクリート、舗装等におけるパラメータ同定、さらに、情報化施工⁴⁴⁾における工事の安全管理、非破壊試験による推定・診断^{45),46)}にも用いられている。今後、ますますこの分野の研究の重要度が増すであろう。

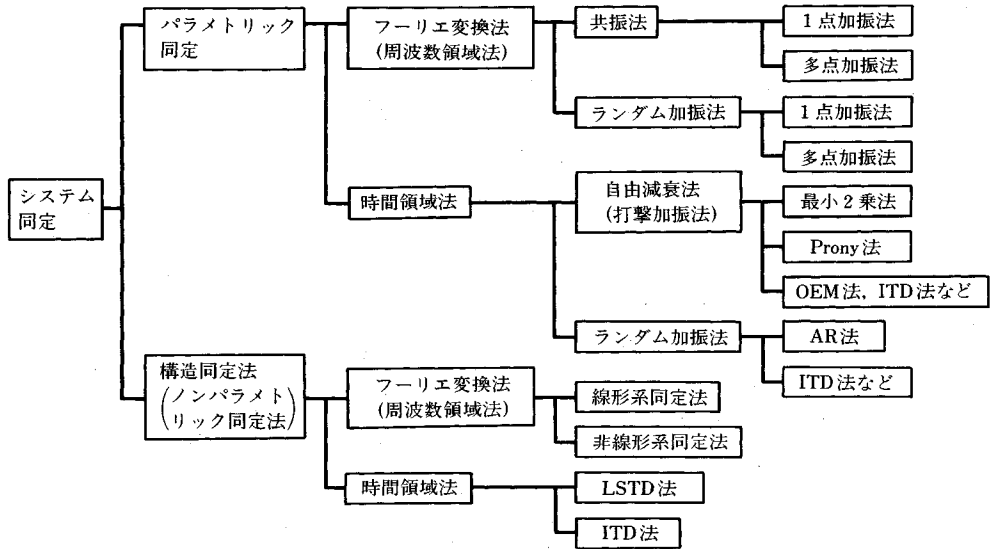


図-1 システム同定法の分類⁴⁰⁾

機械工学の分野では、実験で得られた入力・出力の時刻歴データや伝達関数から、固有振動数やモード、モード減衰定数、あるいは、質量、減衰、剛性等の特性行列を求める研究が盛んに行われている^{47)~53)}。そして実際に、設計の改善、欠陥の検出に活かされている。さらに付加剛性を用いて実験的感度解析を行い、実験的に最適設計を目指す研究も進行している。また、この分野の講習会が定期的に開かれ普及が図られている⁵⁴⁾。実験モーダル解析は、横浜ベイブリッジの減衰特性の確認試験にも利用され、土木分野での利用もはじまっている⁵⁵⁾。

土木構造部門における逆解析は、機械力学の分野とも相通ずるものがある。文献⁴⁰⁾よりシステム同定の分類の一例として図-1に示す。本図には示されていないが、構造物に作用する外乱をその応答から求めることも同定の一種である。外乱の同定は、応答に含まれるノイズに影響を強く受けるため困難な問題である。今後の課題となる。

(4) 最適振動制御

最近になって、各種構造の振動制御に関する研究やその応用が広範囲に実施され始めている。振動制御のハードウェアとソフトウェアの両者の開発にあたって、構造システムの最適化手法が数多く採用されている。ここでは、構造物の振動制御が必要な理由、振動制御法の種類、振動制御法と最適化手法の係わりと展望について述べる。

a) なぜ構造物の振動制御か？

まず構造物の構造上や機能上の理由としては、建設材料や設計施工技術の進歩により、長大かつフレキシブルな超高層ビルや長大橋梁などが建設されてきているこ

と、また、それらの有する高度な機能と環境の保持が重要となってきていることが挙げられる。また外乱として、軟弱地盤における地震動や、地形の影響を受けた風荷重のように、従来の予想を越える動的外力が作用する可能性が高くなってきている。

一方、実用的な制御が可能になってきた技術発展の成果として、各種計測センサー類の精度向上、デジタル情報処理技術の向上による制御アルゴリズムの進展、油圧アクチュエーター、ACサーボモーターなどの大型化と精度の向上などを挙げることができる。このように、構造物の振動制御に対するニーズとそれを解決する手法の進展が、この方面の研究と応用を活発なものにしている。

b) 振動制御法の種類

構造物の振動を低減・制御する手法は、外部エネルギーを全く必要としない受動型(パッシブ)制御、振動制御力の全てを外部エネルギーの供給に依存する能動型(アクティブ)制御、能動型と受動型の両者を併用したハイブリッド制御、構造系の剛性や減衰性をセンサー情報に基づいてメカニカルな機構で変化させるセミアクティブ制御などが存在する。

c) システム最適化手法との係わり

構造物の振動を、ある目標を持って制御するシステムの設計を行うに当たっては、最適化手法の応用が不可欠である。最適制御に関する研究は、航空工学や機械工学の分野で極めて広範囲かつ高度な発展を遂げている。ここでは、その概略について述べるとともに、「第2回システム最適化に関するシンポジウム」に提出された論文との係わりについて説明する。

まず、受動型の振動制御では、動吸振機(TMD)が

良く採用されるが、構造物との質量比、同調振動数、減衰特性などが設計変数となる。河野ら⁵⁶⁾は、海洋構造物の波力による振動をTMDを用いて低減する数値シミュレーションを行い、その効果を検討している。応用面では、周期の長いTMDをいかにして製作するかという問題がある。岡林ら⁵⁷⁾は、交通荷重による道路橋の不規則振動を制御するTMDの最適パラメータの決定を、感度解析により実施している。

アクティブ制御において、最もよく用いられる最適化手法は、最適レギュレーター問題である。家村ら⁵⁸⁾は、卓越振動数を有する不規則地盤振動を受けたフレキシブルな曲げ構造物の振動制御法として、アクティブ制御とハイブリッド制御とを取り上げ、最適レギュレーター問題の解から、入力情報を加味したフィードフォワード併用制御や受動型のTMDを併用したハイブリッド制御が、制振効果を高める上で有効であることを示している。鈴木ら⁵⁹⁾は、最適レギュレーター理論を用いて4層建物モデルのアクティブコントロールの振動台実験を実施するとともに、高次振動モードでのスプルーオーバーを防止するため、ローパスフィルター挿入による制御構造制約を考慮する最適制御則を適用している。

佐藤ら⁶⁰⁾は、非線形構造物の最適振動制御則として、構造物に入力されるエネルギーを考慮した時間依存型の評価関数を提案し、これを地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した構造システムの制振に応用している。

制御システムの入出力を予測したい場合、システムのパラメータを同定したい場合などには、カルマンフィルターの適用が有力である。

制御を前提とした構造設計を実施するという立場から、梶原ら⁶¹⁾は、感度解析による構造系と制御系の同時最適設計法を提案している。

複雑かつ難解な制御則を、経験則等に基づいてできるだけ単純化したいという要求から、ファジィ理論やニューラルネットワーク理論の応用が試みられている。河村ら⁶²⁾は、ファジィ最適耐震制御システムを提案している。

以上のように、構造物の振動制御におけるシステム最適化手法の応用は、極めて広範囲に及んでおり、今後益々発展して行くものと考えられる。

(5) 形状最適化問題

形状最適化問題は文字どおり「構造がどのような形であると最適化であるか」を検討する問題である。この形状最適化問題には、どのような構造物を扱うか、構造物がどのようなになっていることが最適であるとするのか、あるいは形状の変化としてどのような範囲までを扱うかによって様々な最適化問題が存在する^{63)~65)}。

最適化される構造としては、連続体や骨組構造あるいはこれらが組み合わされた構造などがある。具体的な応

用構造物については後の節にゆずることにして、ここでは2次元連続体の形状最適化問題を例に、これまでの研究について述べる。また、形状最適化を解析的に行う手法があるが、この方法では適用し得る構造に限られるため、ここでは構造解析には、有限要素法あるいは境界要素法などの離散化手法による数値解析が使われるものとして考える。

a) 問題の設定の分類・整理

これまで行われている形状最適化問題の設定を分類・整理すると次のようになる。

① 応力均一化形状を求める形状最適化問題。これは、境界あるいは領域の応力の均一化であり、各要素応力あるいはひずみエネルギーを基準値に近づける制約を与える問題である^{66), 67)}。

② 力学的な制約のもとで重量を最小とする形状最適化問題。応力や変位を制約とし、使用される材料の重量あるいは体積の最小化を考えた形状最適化問題^{68), 69)}で、重量を基準として価格に変換し最小費用を目的とする場合もある。

③ 力学的な制約のもとで載荷しうる荷重を最大化する形状最適化問題、応力や変位などの力学的な条件を制約として、載荷しうる荷重を最大化する形状を求める最適化問題であり、最大荷重設計と呼ばれている。目的関数を最大化する問題としては、力学的挙動を制約された中で地下空洞の貯蔵量を最大化する形状最適化問題⁷⁰⁾もある。

④ また、最適な接触面形状を求める問題⁷¹⁾がある。

b) 形状変化の取り扱う範囲による分類

一方、検討される範囲の相違から、構造物の形状を最適化する問題は次のような段階に分類される。

① 構造物の外形が確定して、この形状を変更せずに最適化される問題。2次元連続体では外形の形状が与えられ、これに適当な各部の板厚を求める問題である。

② 構造物のトポロジーが確定しており、このトポロジーの範囲の中で形状を最適化する問題。これは、2次元連続構造では外周の形状を決める節点の座標を移動することによって最適な形状を求める問題である。節点座標そのものを設計変数とせず、外形を関数表現しその関数に使われる係数を設計変数とする研究⁷²⁾もある。

③ 構造物のトポロジーを含め形状を最適化する問題。連続体では連続体に空隙を設けるべきか、それはどこに幾つ設けるのが良いかを①、②に含め最適化する問題である。

c) 今後に向けて

形状最適化問題はこのように複雑でありながら興味深い研究である。得られる結果は、具体的構造物への適用あるいは、利用している現在の形状の妥当性の検討に役立つものと考えられる。とくに、b) で述べた構造物と

して最適化する範囲を全ての構造，すなわちトラスあるいは連続体と区別せずに最適化することができるようになれば，従来の形状の最適性の確認あるいはその改善に留まらず，新しい形状が創造されると期待される．このような研究として均質化手法による連続体から骨組を創生する研究が注目されている⁷³⁾．

(6) 橋梁の設計・施工

わが国の最適設計研究に特徴的なことは，橋梁関係のものも多く，その内容も多岐に渡っている点にある．たとえば，局部座屈を考慮した鋼柱の解析への最大荷重法の適用⁷⁴⁾，縦・横の補剛板の最適設計⁷⁵⁾といった部材レベルのもの以外にも，並列曲線桁の最適弾塑性設計⁷⁶⁾，振動感覚を制約条件に取り入れた歩道橋の最小重量設計⁷⁷⁾，2段階最適化手法を用いた格子桁の最小重量設計⁷⁸⁾，幾何学的非線形性を考慮したトラス橋の最適設計⁷⁹⁾，実用化のための大規模構造解析手法の開発⁸⁰⁾等の構造全体の最適化に関する研究もある．また，信頼性の最適化の観点から，吊橋のケーブルと補剛桁について破壊確率を目的関数とし安全性の整合化^{81),82)}を試みたものもある．また，構造設計へ多目的最適化の導入を試みたもの⁸³⁾もある．

斜張橋については，主桁，主塔，ケーブルという異なる材種により構成されている上に，斜材張力の最適化と部材断面の最適化という2つの最適化が存在するため，従来から幾つかの最適化手法の適用に関する研究があるが，最近のものでは，ひずみエネルギー最小規準より最適斜材張力の決定を行うもの⁸⁴⁾，斜張橋のプレストレストの計算が，主桁の各部材を全応力設計することにより不静定力の計算に帰着することを示したもの⁸⁵⁾，多段階決定法による主桁支持方式の異なる斜張橋の経済性比較⁸⁶⁾等がある．また，近似法と双対法よりケーブル配置と部材断面を決定する方法⁸⁷⁾は実際の歩道橋の設計⁸⁸⁾に用いられている．また，PC斜張橋に関しては，主としてひずみエネルギー最小規準より最適斜材張力の決定^{89),90)}を行っているが，コスト最小化について考察したものもある⁹¹⁾．

また，非線形最小2乗法によるシステム同定問題の応用例として斜張橋の張力調整問題があり，現場への最適化手法の適用の好例としていくつかの事例が報告されている．さらに，応用研究として，複数の価値規準を満足させるため多目的最適化手法を用いたもの⁹²⁾，技術者の直感や工学的判断を取り込めるファジィ回帰分析より調整量を決定するもの⁹³⁾等もある．

ここでは，最近の研究の概観にとどめたが，橋梁設計への最適化手法の応用は実用段階の入口まで来ていると思われる．

(7) 土木・建築構造物の解析・設計・施工

前節で述べた橋梁を除く土木・建築構造物を対象とし

表-3 対象構造別の分類 (数字は文献番号)

対象構造		解析	設計	施工
基本的な構造	トラス構造	94~97	98~104	
	骨組(はり, ラーメン)構造	105~108	109~112	
	格子構造		113	
	鋼柱		114	
実構造	基礎, セル護岸, 矢板		115~119	
	舗装	120		121
	砂防構造	121, 122	122~125	
	トンネル		126~128	126, 127
	膜構造	129	130	
構造一般		131		

た最適化に関するわが国の研究を，近年に限定して対象構造別に概観すると表-3のようにまとめることができる．

表-3に示すトラスやはりなどの基本的な構造を対象とする研究のほとんどは，最適化手法を援用した解析手法や最適設計手法を提案している．その内容は，材料非線形性^{94),96),98),101),106)~108),110)}や幾何学的非線形性^{95),110)}を考慮した研究，信頼性理論を基礎とする研究^{96),105),109),111)}，設計変数のリンキングの最適化⁹⁹⁾，動的解析に基づく設計法¹⁰²⁾など多岐にわたる．解析・設計法の提案に重点があるため，最適化手法には線形計画法や2次計画法などの一般的な数値計画法が多く用いられているが，最適性規準法^{97),110)}や多目的計画法^{99),104),111),112)}による解法も研究されている．

実構造への適用に関する研究において特徴的なことは，現行の設計基準・指針に示される諸事項を吟味し，適当な設計変数を選択したうえで制約条件・目的関数を定式化した最適設計問題(通常，非線形計画問題)^{115)~119),126)~128)}を，汎用プログラムパッケージを使用して解き^{115)~119),125),126)}多くの工学的知見を得ている点である．ただし，設計基準・指針に数式による表現が困難な事項が多い，離散的な取扱いを必要とする場合が多い，あるいは実構造上の問題点を最適化の概念で捉えるケースが少ないなどの理由から，欧米におけるこの種研究と比較すると，さらに最適化の適用の余地が残されている感がある．この点において，最適化計算を手軽に行えるようパーソナルコンピュータの活用を企図する研究^{116),127)}，施工面への適用¹²⁷⁾や維持・管理への応用¹²¹⁾など実用性を追求する研究，さらには，耐衝撃性を考慮する砂防構造物の設計^{123),125)}，近年設計・施工例が増加しつつある膜構造物への適用^{129),130)}，信頼性理論から設計用荷重係数の決定を試みた研究¹³¹⁾などは，実構造と最適化の融合を促進する役割を果たす研究として注目され

る。

以上述べたこの種分野での最適化に関する現況から、最適化への要求は今後、量・質とも拡大することが予想されるが、その推進要因として

① 最適化アルゴリズム・ソフトウェアを含めた解析・設計手法の開発、汎用化。特に、離散値・離散関数を取扱う最適化手法¹⁰³⁾。

② 実構造における問題点を解決する一手段としての最適化の概念の適用。特に、施工面への応用。

などが考えられる。また、限界状態設計法の観点から、応力、断面力、構造耐力のみならず変形(変位)量に着目した解析・設計手法^{97), 98), 107), 110), 122)}が提案され、さらに、エネルギーを基礎とする解析手法^{94), 106)~108)}やエネルギー制約を考慮した最適設計^{101), 123), 125)}も研究されている。変形性能が問題となる構造物や動的・衝撃的荷重が支配的な構造物の解析・最適設計への適用が期待される。

(8) 機械・航空・宇宙工学における応用

機械・航空・宇宙工学における最適化の研究は、その主要部においては構造システムそのものの最適化の研究と重複する。そこでここではこの分野の特徴的な研究のみを取り上げ、その現況と将来の展望を簡単に報告することに留める。

a) 機械工学における応用

機械工学の分野では自動車に代表されるように、機械全体の形状や各種の部品の形状およびその配置は設計における大きな関心事の一つである。つまりこの分野では形状最適化(shape optimization)や最適配置(optimal layout)の研究が注目され、その実用化は大いに期待されている。

① 形状最適化

形状最適化については本報告の(5)で報告されているので詳しくは記述しないが、その中でも連続体の形状最適化は機械の外形や各種の部品の設計と関連して多くの研究が進められている。特に有限要素法を用いた場合の内外の境界上の節点の移動に伴う解析精度の悪化や計算の時間や時間の増大が最適設計の際の問題となっている。

この対策の一つとして有限要素法の誤差の評価から適応有限要素法(adaptive finite element method)と呼ばれるいくつかの方法を用いる形状最適化が研究され^{132), 133)}、その成果の一部は形状最適化のソフトウェアとして市販されている。この他には境界要素法を用いた形状最適化の研究も行われている^{134), 135)}。また最近では、ミクロ的な取り扱いに基づく“均質化手法(homogenization method)”と呼ばれる形状最適化の研究も行われ、注目に値する¹³⁶⁾。いずれにしてもこの分野の今後の研究が大いに期待される。

② 最適配置

最近の機器類はコンパクト化して限られたスペースに、しかも各部品の機能やお互いの幾何学的のみならず力学的な特性などの干渉を考慮してかに収納するかは大きな問題の一つとなっている。これらの問題の幾何学的な側面に対しては、最適配置問題として従来から例えば最適性規準法を基として多くの研究が行われている。しかし各部品の機能や力学的な干渉等を考慮しなければならない場合には、問題が複雑になり高度の最適化技術が要求される。つまりAIやニューラルネットワーク、ファジィ推論などを新しいコンピュータ技術とも考えられる技術を活用した研究が今後展開されるものと考えられる。実際、オブジェクト指向を用いた原子炉建屋内部の最適配置に関する研究¹³⁷⁾やニューラルネットワークを用いた配管系の最適支持位置の探索¹³⁸⁾の研究などが既に行われている。

b) 航空工学における応用

航空工学分野における応用としては、特にここでは複合材料の最適設計と大規模構造システムにおける最適化を取り上げて報告する。

① 複合材料の最適化

軽量かつ高強度の性質を有するために航空機材料として、各種の複合材料が活用されている。従来の設計されている複合材料よりもさらに優れた特性を得るために最適化手法が応用されて研究が進められている。しかし設計変数のパラメータの選び方¹³⁹⁾、製品に関するパラッキや信頼性の問題¹⁴⁰⁾、あるいは動的特性の評価の問題など今後さらに検討すべき問題も多い。複合材料の設計を含めて各種材料の最適設計も今後のいろいろな分野で重要な問題である¹⁴¹⁾。

② 大規模構造システムの最適化

航空機のような大規模なシステムの設計では、構造解析、熱解析、空力弾性解析、飛行制御などの考慮すべき項目は多い。個々の要求を満足しながら、一つの大きな最適なシステムを設計することは設計者にとって極めて難しい仕事である。この対策として現在、多段階最適化、部分構造による最適化、近似モデルによる最適化などの多くの手法が研究されている¹⁴²⁾。この分野にもAI、ニューラルネットワークといった新しい最適化技術は今後大きな役割を示すことになるであろう。

c) 宇宙工学における応用

ここでは宇宙工学において最近特に注目されている構造系と制御系の同時最適化問題を取り上げて報告する。衛星のアンテナなどの宇宙構造は、打上時の重量軽減のために軽量の展開構造を採用しているものも多い。このような構造は柔軟構造と考えられ、その剛体変位のみならず、弾性変位が大きな問題となる。弾性変位が容易に生ずるために姿勢制御などと弾性系の相互の干渉が新た

な問題となっている。構造系を設計した後に制御系を設計する従来の手法では、これらの問題を有効的には解決できず、構造系と制御系との一体設計とその最適化、すなわち同時最適設計が必要となる。同時最適設計の手法については、ここ数年いろいろと研究されている¹⁴³⁾。今後は構造系と制御系の両系のそれぞれの非線形性を考慮した同時最適設計も重要なものになろう¹⁴⁴⁾。ところで構造系と制御系の同時最適化問題は機械の分野でも光ディスクの設計などのコンパクト化メカトロニクス機器にも現われ始めている。また宇宙工学の分野では最適設計の概念とある意味では関係の深い、知的適応構造物 (intelligent adaptive structure) も最近の話題となっている¹⁴⁵⁾が、紙面の都合で割愛させて頂く。

3. あとがき

構造最適設計法は、解析理論と設計理論のバランスのとれた発展と融合を基本的な理念として研究され、応用されているものである。その理念と技術は、本報告で説明された種々の分野での多数の応用例より、徐々に社会的に認められてきているように考えられる。

現在はまだ、比較的少数の先見性のある技術者が、最適化技術の可能性に気づき、応用を模索している段階と考えられるが、今後のソフトウェアの整備、EWS等のコンピュータの発達・普及と共に、最適化技術は21世紀になるまでには、極めて日常的な設計のツールとして用いられているものと予想される。

今後の課題としては、シンポジウムでの特別講演における三浦の指摘²⁾にもあるように、多数の技術者が使用しやすいソフトウェアの環境を作ることがまず挙げられる。このソフトウェアの開発に関しては、最適設計のみならず、有限要素法等他の分野でも、日本が米国に大きく後れを取っているが、実務レベルでのニーズは大変高い部分でもあるので、国内からの何らかの寄与は必要であるし、そのための学会の環境も、若干変わる必要があるように考えられる。

理論的な面では、連続変数、連続関数を扱う最適化理論は十分実用的な段階に達したと思われる一方、本文中にも指摘があったように離散変数、離散関数からなる最適化問題に対する手法はまだ不十分と考えられる。最適化技術が、現在よりも一段上のニーズに応えるためには、離散性の高い最適化問題に対する実用的かつ汎用的な手法の開発も、緊急かつ重要な課題の一つと考えられる。

最適設計法の研究は、他の工学分野でも活発に研究されている課題であり、本報告は当然、土木工学における応用を中心として記述されている。必ずしも工学全般における現状を網羅しているわけではないが、設計業務のみならず、新素材・新構造の開発研究等々、多くの分野での研究の発展に寄与することができれば幸いである。

本報告は、後掲のメンバーよりなる構造システム最適化研究小委員会の研究・調査活動の一環として、本委員会が主催した第2回システム最適化に関するシンポジウムの成果を踏まえて、さらにその後の、最適化技術に関する調査・研究の結果をまとめたものである。執筆は、1. を杉本, 2. (1) を中山, 2. (2) を古田, 2. (3) を松井, 2. (4) を家村, 2. (5) を長谷川, 2. (6) を小林, 2. (7) を三原, 2. (8) を山川, 3. を杉本が分担し、最後に小委員会のメンバーによる調整作業の後に脱稿した。

ここに、深甚の謝意を表します。

本委員会の構成委員は以下のとおりである。

委員長：杉本博之(室蘭工業大学), 幹事：小林一郎(熊本大学), 古川浩平(山口大学), 古田均(京都大学), 長谷川明(八戸工業大学), 委員：家村浩和, 石川信隆, 石村久治, 石橋和美, 井上幸一, 大久保禎二, 岡林隆敏, 梶川康男, 葛西真一, 春日昭夫, 香月 智, 金吉正勝, 菊田征勇, 小西保則, 小山 健, 佐藤尚次, 鈴木 誠, 高久達将, 竹脇 出, 谷脇一弘, 田中 豊, 田村 武, 中山弘隆, 新延泰生, 野上邦栄, 平田泰久, 松井邦人, 三原徹治, 山川 宏, 山田善一。

参考文献

- 1) Schmit, L.A. : Structural Design by Systematic Synthesis, Proc. of the 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, Pittsburgh, pp.105~132, 1960.
- 2) 三浦宏一：最適構造設計の応用，第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集（特別講演），pp.335~340, 1991.
- 3) 土木学会：システム最適化に関する講演論文集，1989.
- 4) 特集「線形計画の新潮流」，オペレーションズ・リサーチ，Vol.34, No.3, 1989.
- 5) 「最近の数理計画特集号」，システム／制御／情報，Vol.34, No.4, 1990.
- 6) 伊理正夫・久保田光一：高速自動微分法—グラフ，丸め誤差，ノルム—，数理解析，No.285, pp.41~48, 1987.
- 7) 特集「多目的計画法」，オペレーションズ・リサーチ，Vol.36, No.9, 1991.
- 8) Eschenauer, H.A., Koski, J. and Oszyczka, A. eds. : Multicriteria Design Optimization, Springer, 1990.
- 9) Törn, A., Žilinskas, A. : Global Optimization, Springer, 1989.
- 10) ミニ特集 最適化法の新展開，計測と制御，Vol.29, No.12, 1990.
- 11) 中野秀男・中西義郎：組み合わせ最適化問題に対する Simulated Annealing 法，数理解析研究所講義録534, pp.274~285, 1984.
- 12) 日本工業技術振興協会・ニューロコンピュータ研究部会編：ニューロコンピューティングの基礎理論，海文堂，1990.
- 13) Grauer, M. and Pressmar, D.B. eds. : Parallel Computing and Mathematical Optimization, Springer, 1991.

- 14) 茨木俊秀：福高雅夫：最適化プログラミング，岩波書店，1991.
- 15) ASNOP 研究会編：非線形最適化プログラミング，日刊工業新聞社，1991.
- 16) Vanderplaats, G.N. and Sugimoto, H. : A General-Purpose Optimization Program for Engineering Design, *Computer & Structures*, Vol.24, No.1, pp.13~21, 1986.
- 17) Schrage, L. : *An Optimization Modelling Systems*, (新村・高森共訳：実用数理計画法，朝倉書店（予定）).
- 18) Liebman, J., Lasdon, L., Schrage, L. and Waren, A. : *Modeling and Optimization with GINO*, The Scientific Press, 1986, (青沼・新村共訳：GINO によるモデリングと最適化，共立出版，1989).
- 19) 尾崎正直・小林重信：統合的問題解決の枠組みで究極の人工知能を，週刊朝日，pp.144~147, 1991.5, 3~10.
- 20) Furuta, H., Furukawa, K., Yamada, Y. and Shiraishi, N. : *Optimum Aseismic Design Using Fuzzy Mathematical Programming*, Proc. of IFIP Conf. on Computer-Aided Design, 1983.
- 21) 古川浩平・古田 均・仁多和英：一対比較法の最適耐震設計への応用に関する研究，土木学会論文集，第 368 号 / I-5, pp.393~400, 1986.
- 22) Wang, G-Y. and Wang, W-Q. : *Fuzzy Optimum Design of Aseismic Structures*, Earth. Eng. and Struc. Dyn., Vol.13, pp.827~837, 1985.
- 23) Koyama, K. and Kamiya, Y. : Application of Fuzzy Linear and Nonlinear Programming to Structural Optimization, Proc. of 1st IFIP WG 7.5 Conference, pp.233~242, 1987.
- 24) Hopfield, J.J. and Tank, D.W. : *Neural Computation of Decisions in Optimization Problem*, Biol. Cybern., Vol.52, pp.141~152, 1985.
- 25) 古田 均：ファジィ・エキスパートシステム，システム／制御／情報，第 34 巻，pp.288~294, 1990.
- 26) 林 勲：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による学習制御，セミナー「ニューラル／ファジィの応用の可能性を探る」テキスト，pp.79~89, 1989.
- 27) 古田 均・大谷裕生・白石成人：ニューラルネットを用いた RC 床版の健全性評価システムのための知識獲得法，第 6 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.377~380, 1990.
- 28) Eykhoff, P. : *System Identification, Parameter and State Estimation*, John Wiley & Sons, 1974.
- 29) Tarantola, A. : *Inverse Problem Theory, Methods for Data Parameter Fitting and Model Parameter Estimation*, Elsevier, 1987.
- 30) Glandwell, G.M.L. : *Inverse Problems in Vibrations*, Martinus Nijhoff Publishers 1986.
- 31) Bush III, A.J. and Baladi, G. Y. eds : *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, ASTM, 1989.
- 32) Jurnel, A.G. and Huijbregts, CH. J. : *Mining Geostatistics*, Academic Press, 1978.
- 33) McCuen, R.H. and Synder, W.M. : *Hydrologic Modeling : Statistical Methods and Applications*, Prentice-Hall, 1986.
- 34) Natke, H.G. and Yao, J.T.P. eds. : *Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches*, Vieweg, 1988.
- 35) Natke, H.G. ed. : *Application of System Identification in Engineering*, Springer Verlag, 1988.
- 36) 数理科学：特集逆問題，サイエンス社，No.247, 1986.
- 37) 物理探査学会：図解物理探査：地下を探る先端技術，1989.
- 38) 中溝高好：信号解析とシステム同定，現代制御シリーズ，コロナ社，1988.
- 39) 村瀬治比古・小山修平・石井良平：順・逆解析入門（パソコンによる計算機力学），森北出版，1990.
- 40) 日本機械学会編：逆問題のコンピュータアナリシス，コロナ社，1991.
- 41) 中川 徹・小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，1987.
- 42) 星谷 勝・斉藤悦郎：データ解析と応用，鹿島出版，1991.
- 43) 田島 稔・小牧和男：最小二乗法の理論とその応用，東洋書店，1986.
- 44) 土質工学会編：情報化施工とマイコンの利用，1986.
- 45) 非破壊評価小委員会：土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集，土木学会，1991.
- 46) コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，1991.
- 47) 大久保信行：機械のモーダル・アナリシス，中央大学出版会，1982.
- 48) 倉部 誠：図解モード解析入門，大河出版，1988.
- 49) 加川幸雄，石井正臣：モーダル解析入門，オーム社，1987.
- 50) 長松昭男：モード解析，培風館，1985.
- 51) 日本機械学会編：モード解析の基礎と応用，丸善，1986.
- 52) 長松昭男・大熊正明：部分構造合成法，培風館，1991.
- 53) 倉部 誠・市原千治：わかりやすい振動モード解析入門，日刊工業新聞社，1989.
- 54) 日本機械学会：じっくり学ぶモード解析の基礎と応用技術，（講習会テキスト，No.920-1）1992.
- 55) 和田克哉・高野晴夫・林 寛之・小山次郎・津村直宣：横浜ベイブリッジの振動実験，橋梁と基礎，1992-2, pp.15~18, 1992.
- 56) 河野健二・古川浩平：TMD を有する海洋構造物の動的応答解析，第 2 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp.1~6, 1991.
- 57) 岡林隆敏・竹下 渡：交通荷重による道路橋不規則振動のための動吸振器の最適設計，同上，pp.27~36, 1991.
- 58) 山田善一・家村浩和・伊津野和行・米山治男：パッシブ・アクティブ・ハイブリッド手法による曲げ構造物の振動制御，同上，pp.21~26, 1991.
- 59) 鈴木哲夫・陰山 満・野畑有秀・吉田和夫：アクティブ動吸振器を用いた高層建物の多モード振動制御，同上，pp.37~44, 1991.
- 60) 佐藤忠信・土岐憲三・橋本雅道・松島秀典：地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した震動制御，同上，pp.15~20, 1991.
- 61) 梶原逸朗・長松昭男：感度解析による構造系と制御系の最適設計，同上，pp.45~52, 1991.
- 62) 河村 廣・谷 明勲・亙理良昭・山田 稔：最大化決定を用いたファジィ最適耐震制御システム，同上，pp.7~

- 14, 1991.
- 63) Topping, B.H.V. : Shape Optimization of Skeletal Structures : a Review, *Journal of the Structural Engineering, Proc. of ASCE, Vol.109, No.8, pp.1933~1951, 1982.*
- 64) Haftka, R. T. and Grandhi, V.R. : *Structural Shape Optimization-A Survey, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 57, pp.91~106, 1986.*
- 65) 土木学会：第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 1991.
- 66) 田村 武・上塚晴彦：弾性構造物の形状最適化について, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.245~250, 1991.
- 67) 片峯英次・畔上秀幸・高見昭康・沖津昭慶：連続体形状の最適化(成長ひずみ法による試み), 同上, pp.251~256.
- 68) 山崎光悦・坂本二郎：境界要素法による連続体の最小重量設計, 同上, pp.223~232, 1991.
- 69) 西尾慎治・水野良造・五十嵐将：形状最適設計システム(SOPT)の開発, 同上, pp.269~274, 1991.
- 70) 長谷川明：変位制約を受ける地下空洞の形状最適化について, 同上, pp.257~262, 1991.
- 71) 多田幸生・西原承龍：有限要素法を用いる接触面形状の最適化設計, 同上, pp.233~238, 1991.
- 72) 杉村朋之・杉本博之：形状最適化プログラムの開発に関する基礎的研究, 同上, pp.263~268, 1991.
- 73) Bremicker, M., Chirehdast, M., Kikuchi, N. and Papalambros, P.Y. : *Integrated Topology and Shape Optimization in Structural Design, Mech. Struct. & Mach. 19(4), pp.551~587, 1991.*
- 74) 長谷川彰夫・安保秀範・Mohamed MAUROOF・西野文雄：局部座屈を考慮した鋼柱の挙動に関する簡易解析と最適設計, *土木学会論文集, No. 374/I-6, pp.195~204, 1986.*
- 75) 依田照彦・桑野忠生：縦・横補剛板の耐荷力評価と最適設計の試み, *構造工学論文集, Vol. 32 A, pp.421~430, 1986.*
- 76) 今井富士夫・田島孝敏・太田俊昭：並列曲線箱桁橋の最適弾塑性設計法に関する一考察, *構造工学論文集, Vol. 34 A, pp.657~666, 1988.*
- 77) 杉本博之・梶川康男・Vanderplaats, G.N. : 振動感覚を考慮した歩道の最小重量設計, *土木学会論文集, No. 386/I-8, pp.105~114, 1987.*
- 78) 杉本博之・吉岡修治：2段階最適化による格子構造の最小重量設計に関する研究, *構造工学論文集, Vol. 33 A, pp.687~702, 1987.*
- 79) 小林一郎・三池亮次・山田善一：幾何学的非線形性を考慮したトラス構造の最適設計, *構造工学論文集, Vol. 36 A, pp.441~450, 1990.*
- 80) 林 正・平山 博：立体骨組構造物の大規模設計問題における実用的最適設計法, *土木学会論文集, No. 437/I-17, pp.133~142, 1991.*
- 81) 藤野陽三・杉山俊幸：長大吊橋における安全率の配分に関する考察, *構造工学論文集, Vol. 33 A, pp.799~808, 1987.*
- 82) 杉山俊幸・藤野陽三：長大吊橋における安全率の最適配分に関する考察, *土木学会論文集, No. 398/I-10, pp.167~176, 1988.*
- 83) 林 正・平山 博・大森龍一郎：非線形目標計画法の最適設計への応用, *土木学会論文集, No. 437/I-17, pp.125~132, 1991.*
- 84) 山田善一・古川浩平・江草 拓・井上幸一：斜張橋ケーブルの最適プレストレス量決定に関する研究, *土木学会論文集, 第356号/I-3, pp.415~423, 1985.*
- 85) 星楚正明：斜張橋のケーブルプレストレスの一計算法, *土木学会論文集, No. 374/I-6, pp.487~494, 1986.*
- 86) 小林一郎・三池亮次・佐々木高・大塚久哲：主桁支持方式の異なる斜張橋の多段階最適設計, *土木学会論文集, No. 392/I-9, pp.317~325, 1988.*
- 87) 大久保禎二・谷脇一弘：鋼斜張橋のケーブル配置および部材断面の最適設計法, *土木学会論文集, No. 428/I-15号, pp.147~156, 1991.*
- 88) 大久保禎二・谷脇一弘・浅原浩治・山下修美・和多田康男：鋼斜張橋の最適設計システムによる常盤大橋(仮称)の設計について, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.67~72, 1991.
- 89) 古川浩平・角谷 務・熊谷紳一郎・新井英雄：プレストレストコンクリート斜張橋の最適斜材張力決定法に関する研究, *土木学会論文集, No. 374/I-6, pp.503~512, 1986.*
- 90) 藤井 学・宮本文徳・小深田祥法：PC斜張橋の斜材張力および主桁プレストレスの最適化に関する研究, *土木学会論文集, No. 408号/V-11, pp.31~40, 1989.*
- 91) 古川浩平・角谷 務・新井英雄・春日昭夫：コスト最小規準によるPC斜張橋の最適斜材張力決定法, *土木学会論文集, No. 392/I-9, pp.411~415, 1988.*
- 92) 古川浩平・井上幸一・中山弘隆・石堂一成：多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究, *土木学会論文集, No. 374/I-6, pp.495~502, 1986.*
- 93) 古田 均・亀井正博・金吉正勝・田中 洋：斜張橋の架設管理へのSI法とファジィSI法の適用, *構造工学論文集, Vol. 36 A, pp.459~467, 1990.*
- 94) 大久保禎二・和多田康男：エネルギー原理およびSQPによるトラス構造物の材料非線形解析法に関する研究, *土木学会論文集, No. 374/I-6, pp.427~436, 1986.*
- 95) 半谷裕彦・関 富玲：ホモログス変形を制約条件とする立体トラス構造の形態解析, *日本建築学会構造系論文集, No. 405, pp.97~102, 1989.*
- 96) 三浦明夫・香月 智・石川信隆・佐藤尚次：弾塑性変位に関するトラス構造物の信頼性解析, *構造工学論文集, Vol. 37 A, pp.557~564, 1991.*
- 97) 古川浩平・菊池英明：単一変位制約下における一般的な最適性規準法に関する研究, *構造工学論文集, Vol. 32 A, pp.455~466, 1986.*
- 98) 三原徹治・北小路雅倫・石川信隆・太田俊昭：感度解析を用いたトラス構造物の最適弾塑性設計法とその応用例, *土木学会論文集, No. 392/I-9, pp.249~258, 1988.*
- 99) 小林一郎・三池亮次・山城久富・山田善一：設計変数のリンキングの最適化について, *構造工学論文集, Vol. 35 A, pp.373~382, 1989.*
- 100) 小林一郎・三池亮次・山田善一：幾何学的非線形性を考慮したトラス構造の最適設計, *構造工学論文集, Vol. 36 A, pp.441~450, 1990.*
- 101) 大久保禎二・林 英範：材料の非線形性を考慮したトラス

- の最適設計法に関する一考察, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.169~174, 1991.
- 102) 菊田征勇・松井邦人・新延泰生: 共振3波を受ける構造物の最適設計, 同上, pp.211~216, 1991.
- 103) 杉本博之: 近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.79~88, 1991.
- 104) 亀廻井寿明・杉本博之, 中山弘隆: 構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.117~126, 1992.
- 105) 飯塚 稔・三原徹治・石川信隆・古川浩平: 最適化手法を用いた大規模構造物の信頼性解析, 土木学会論文集, No.380/I-7, pp.121~130, 1987.
- 106) 大久保禎二・藤脇敏夫: コンプリメンタリーエネルギー最小化によるはり構造物の材料非線形解析法, 土木学会論文集, No.398/I-10, pp.227~236, 1988.
- 107) 三原徹治・北小路雅倫・石川信隆・太田俊昭: 相補掃出法を用いた立体骨組構造のホロノミック弾塑性解析, 構造工学論文集, Vol.35 A, pp.383~392, 1989.
- 108) 大久保禎二・牧野耕司: コンプリメンタリーエネルギー最小化による剛節平面骨組構造物の材料非線形解析法, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.37~48, 1990.
- 109) 三原徹治・飯塚 稔・石川信隆・古川浩平: 安全性指標を制約とした骨組構造物の最適塑性設計, 構造工学論文集, Vol.32 A, pp.475~484, 1986.
- 110) 三原徹治・石川信隆・古川浩平・太田俊昭: メカニズム生起規準に基づく最適弾塑性設計法, 構造工学論文集, Vol.33 A, pp.715~724, 1987.
- 111) 白木 渡・北沢正彦・久保雅邦: 多くの限界状態を有する構造システムの最適信頼性設計法, 構造工学論文集, Vol.37 A, pp.565~575, 1991.
- 112) 三原徹治: 満足化トレードオフ法による骨組構造の最適塑性設計, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.217~222, 1991.
- 113) 前出78)
- 114) 前出74)
- 115) 古川浩平・飯田 毅・高瀬幸紀・森山 彰: 根入れ式鋼板セル護岸の最適設計に関する研究, 土木学会論文集, No.380/I-7, pp.419~428, 1987.
- 116) 松井邦人・多田昭仁: パーソナルコンピュータを利用した鉄塔くいの基礎の最適設計, 構造工学論文集, Vol.34 A, pp.639~648, 1988.
- 117) 田中孝昌・石川信隆・香月 智・田蔵 隆: 橋脚の鋼管杭基礎の最適設計に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.34 A, pp.649~656, 1988.
- 118) 石川信隆・田中孝昌・香月 智・田蔵 隆: 鋼管杭基礎の最適杭本数の決定に関する一考察, 土木学会論文集, No.404/I-11, pp.341~350, 1989.
- 119) 笹木敏信・満尾 淳・亀廻井寿明・杉本博之: 仮設鋼矢板締切の設計最適化に関する研究, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.193~198, 1991.
- 120) 松井邦人・井上武美・三瓶辰之: 舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.107~114, 1990.
- 121) 角川浩二: 最適制御モデルを用いた道路舗装修繕ライフ・サイクル費用の最小化: 解法とその評価, 土木学会論文集, No.397/VI-9, pp.59~66, 1988.
- 122) 三原徹治・石川信隆・香月 智・星川辰雄: 最適化手法を利用した骨組構造物の弾塑性解析と設計法, システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.15~20, 1989.
- 123) 石川信隆・星川辰雄・香月 智・飯田 毅: 衝撃荷重を受けるアーチの最適ライズ比に関する一考察, 同上, pp.29~34, 1989.
- 124) 香月 智・石川信隆・大平至徳・鈴木 宏: 礫中詰材のせん断抵抗力を考慮した鋼製砕砂防ダムの解析と最適設計に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.37 A, pp.1507~1518, 1991.
- 125) 石川信隆・山本恭嗣・鈴木真次・飯田 毅: 鋼製アーチ式砂防ダムの最適耐衝撃設計法に関する基礎的考察, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.199~204, 1991.
- 126) 古川浩平・吉見憲一・瀬戸口博昭・中川浩二: 硬岩トンネルのスリーブプラスティング孔設計の最適化に関する研究, 土木学会論文集, No.379/VI-6, pp.107~115, 1987.
- 127) 吉見憲一・鈴木雅行・古川浩平・中川浩二: 手動式削孔機を用いた硬岩トンネルのスリーブプラスティング孔設計の最適化と実施工への適用, 土木学会論文集, No.421/VI-13, pp.203~212, 1990.
- 128) 梨本 裕: 高森貞彦・今田 徹: 大深度低強度地山におけるトンネル設計の合理化, 土木学会論文集, No.427/VI-14, pp.183~191, 1991.
- 129) 坪田張二・吉田 新: 最適化手法を用いた膜構造物の裁断図解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.395, pp.101~111, 1989.
- 130) 大澤義明: 凸曲面の三角形分割とドーム設計への応用, 第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.205~210, 1991.
- 131) 洪 起他・高梨晃一: 信頼性理論に基づく最適設計一強度の経年劣化を考えた構造物の荷重係数一, 日本建築学会構造系論文報告集, No.418, pp.81~86, 1990.
- 132) Kikuchi, N.: Adaptive Grid Design for Finite Element Analysis in Optimization, Computer Aided Optimal Design, NATO ASI (Editor: Mota Soares), pp.493~562, 1986.
- 133) Babuska, I. and Dorr, M.: Error Estimates for the Combined h and p Versions in the Finite Element Method, Number. Math, Vol.25, pp.257~277, 1981.
- 134) Barone, M.R. and Yang, R.J.: Boundary Integral Equations for Recovery of Design Sensitivities in Shape Optimization, AIAA. J. Vol.26, No.5, pp.589~594, 1988.
- 135) Hajela, P. and Jih, J.: Adaptive Grid Refinement in BEM-Based Optimal Shape Synthesis, International Journal of Solid & Structures, Vol.26, No.1, pp.29~41, 1990.
- 136) Beusoe, M.P. and Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, pp.197~224, 1988.
- 137) 赤木新介・藤田喜久雄: 設計エキスパートシステムの基礎と応用, pp.193~196, コロナ社, 1990.
- 138) 原 文雄: ニューラルネットワークによる動荷重場での

- 配管システムの最適構造の決定, 計算力学 [II], pp. 76
~86, コロナ社, 1991.
- 139) 福永久雄・飯野 明: 積層パラメータの特性と積層材の
最適設計への応用, 第 32 回構造強度に関する講演会,
(1990); pp. 104.
- 140) 中易秀敏: 確率材料設計と最適化, 機械学会第 1 回デザ
インエンジニアリングプラザ, セミナー 6 資料, pp. 292
~301, 1991.
- 141) 平野 徹: 人工知能による材料設計, 文献 138) の
pp. 33~52.
- 142) Sobieski, J.S. and Haftka, R.T. : Interdisciplinary and
Multilevel Optimum Design, 文献 132) の pp. 656~702.
- 143) 山川 宏: 構造最適化と最適制御の混合問題 (構造系と
制御系の同時最適化問題), 機械学会 講習会教材 (これ
からの制振・制御技術), No. 890-49, pp. 31~47, 1989.
- 144) 山川 宏・橋本克巳・白濁二郎: 非線形特性を考慮した
構造系と制御系の同時最適化に関する研究, 機械学会第
2 回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, pp. 137
~142, 1991.
- 145) 名取通弘: 知的構造物の概念, 第 14 回造船学会夏季講座
資料, pp. 471~474, 1988.
- (1992. 4. 21 受付)