Japan Society for Simulation Technology

《小特集》

逆問題へのAIの応用

—構造設計の場合—

矢川元基*・吉村　忍*・望月義彦*

1. はじめに

逆問題に含まれる領域は極めて広く[1]，また工学への適用も，欠陥同定・発熱源同定・応力同定・音響逆問題・物性値同定など多岐にわたっている[2]．このうち，最適設計などのシンセシス問題は，コンピュータを援用した設計すなわちCAD（Computer Aided Design）として脚光を浴びてきた．その背景には，EWSやスーパーコンピュータなどのハードウェアの飛躍的な進歩はもちろん，計算力学と総称されるFEM（有限要素法）やBEM（境界要素法），FDM（差分法）などの，設計における定量的評価にかかせない数値解析手法の発展があり，今後これらのハードおよび計算スキームの進歩とともにCADはますます発展していくものと予想される[3]．

一方，専門家のもっている経験的知識とその知識に基づく問題解決のアルゴリズムつまり推論方法をコンピュータ上に移植して，専門家と同程度の問題解決能力をもつシステムすなわちエキスパート・システムを構築する知識工学が最近注目を集めている．計算力学分野においても，この知識工学を利用した解析手法の効率化および汎用化が研究されており[4][5]，それらのエキスパート・システムを利用することによって，元来，数値解析の専門家にしか扱えなかった解析コードが，経験の浅い解析者でも容易にハンドリングできるようになると考えられる．

このような背景をもとに，CADへ知識工学的手法を適用した設計型エキスパートシステムが精力的に研究されている[6]~[18]．しかし，これまでの研究のほとんどは，どのような知識表現や推論方式が設計支援に適しているかをその対象としている．換言すれば，generate & test方式[13]の自動設計を行う設計型エキスパートシステムの設計効率という観点から設計変更の方法について比較検討した例はほとんどない．

FEMなどの数値解析手法に基づいて構造解析する自動設計では，できるだけ設計変更回数を少なくし設計効率を高めることが計算機経済性の面から重要である．このためには，設計効率を考えながら設計変更の方法を比較検討しておき，問題に応じて最適な方法が選択できるようにそれらの設計変更方法を整理しておく必要がある．

そこで本稿では，自動設計のための設計型エキスパートシステムにおける設計変更を効率的に行うことを目的として，筆者らが現在試みている設計変更方法の設計効率に関する比較を中心に紹介する．

2. 知識表現と推論方式

ここで対象としている構造設計は，FEMなどの数値解析手法に基づいており，構造物のモデリングおよびメッシングからFEMコードのハンドリングに至るまで多くの専門的知識を必要とする．

さらに，熱や機械的荷重などが同時に作用する連成現象下の構造設計においては，構造解析のみならず熱解析など多分野の知識が必要となり，従来のサブルーチン的なプログラミング手法では，知識の管理すなわち柔軟性および拡張性の点で十分には対応できない．このような背景から，ここで述べるシステムでは，構造設計に関する多くの専門的な知識をオブジェクト型知識表現を用いてモジュール化するとともに，推論方式としてデータフロー型を採用し，システムの柔軟性および拡張性を実現している[19][20][21]．ここでは，関連する知識工学的手法についてまず説明する．

2.1 オブジェクト型知識表現

オブジェクト型知識表現[22][23]とは，データ構造（入力データ・出力データ）と手続きを1つのモジュール

Application of Artificial Intelligence to Inverse Problems. By *Genki Yagawa, Shinobu Yoshimura*, and *Yoshihiko Mochizuki* (Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo).

*東京大学工学部原子力工学科

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

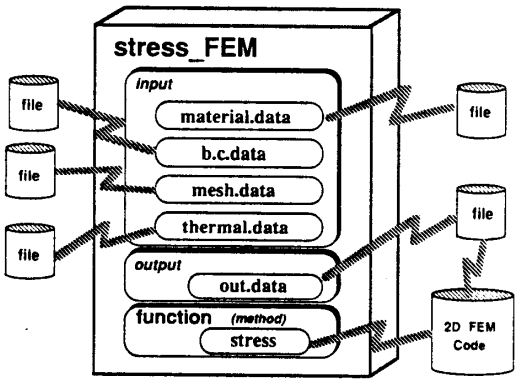


図1 "Stress_FEM" オブジェクトの概念図

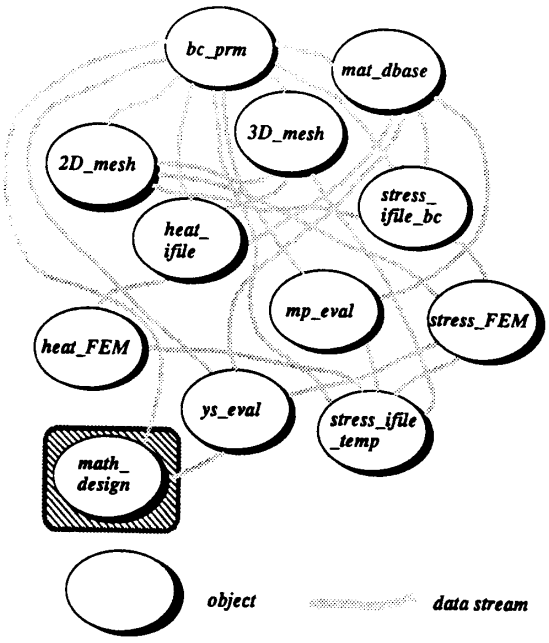
```
(Stress_FEM
 (input
  (material ("material.data" file) (elstic)
   ( ) notready )
  (b.c. ("b.c.data" file) (elstic)
   ( ) notready )
  (mesh ("mesh.data" file) (2D)
   ( ) notready )
  (thermal ("thermal.data" file) (elstic)
   ( ) notready ))
 (output
  (stress_FEM.out ("out.data" file) (elstic)))
 (function
  ( "../f77/elastic/thelstic"
    (material b.c. mesh thermal)
    shell_mode))
 (group_level 10))
```

図2 "Stress_FEM" オブジェクト（リスト表現）

内に有しており，他のオブジェクトとはデータの送受信によって通信を行う知識表現形態である．この知識表現は，知識を独立性の高いモジュールとして表現できるという理由から，設計型エキスパートシステムに適しており，船舶の設計支援エキスパートシステム[7][8]などに適用されてきた．本システムでは，この知識表現を用いて，熱解析や応力解析などのFEM解析，あるいは設計変数の設定や変更などの知識を知識ベース内に蓄える．各オブジェクトは，図1に示す"stress-FEM"オブジェクトのように，入力スロット・出力スロット・手続きスロットから構成されている．この例では，データはファイルとして整理されており，入力・出力スロットには，ファイル名がセットされる．図2に示すように具体的なオブジェクトはLISPによって記述されており，データの種類及び属性はリストによるフレーム構造によって階層的に整理されている．また，手続きとしての2次元熱弾性解析コードは，LISP内でUNIXコマンドを実行できる関数によって実行モジュールとして起動される．このオブジェクトは熱応力解析の専門家に相当するということができる．本システムの知識ベースには，図3に示されるようにこのようなオブジェクトがネットワーク状に多数登録されている．

2.2 データフロー型推論方式およびデータ識別子（タグ）の機能

データフロー方式[24]では，あるプロセスの実行に必要なデータが全てそろった段階で，プロセスが起動（発火）し，出力結果がそれを必要とする別のプロセ



heat_FEM	:	*an object that performs 2D heat conduction analysis using a FEM code*
stress_FEM	:	*an object that performs 2D stress analysis with thermal effects using a FEM code*
2D_mesh	:	*an object that generates 2D FEM mesh*
3D_mesh	:	*an object that generates 3D FEM mesh*
mp_eval	:	*an object that evaluates whether the highest temperature value exceeds the melting point*
ys_eval	:	*an object that evaluates whether the highest equivalent stress value exceeds the yield stress*
bc_prm	:	*an object that produces shape parameters and boundary conditions*
mat_dbase	:	*an object that manages the database of material properties*
heat_ifile	:	*an object that creates an input data file for heat_FEM object*
stress_ifile_bc	:	*an object that creates an input data file on boundary conditions for stress_FEM object*
stress_ifile_temp	:	*an object that creates an input data file on temperature values for stress_FEM object*

図3 オブジェクトネットワークおよび機能一覧

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

スに送られていく．プロセスの起動はこの規則に基づいて他のプロセスとは全く独立に次々と行われる．本システムでは，図1の“stress_FEM”オブジェクトのように，入力スロット内の全ての入力データがそろった段階で手続きスロットに指定されている手続きが起動し，その結果が出力スロットに用意される．

さらにこの出力データが知識ベースに登録されている全てのオブジェクトに送信され，各オブジェクトが自分の手続きの起動に必要な入力データかどうかの取捨選択を行ない，必要であればそのデータを取り込む．設計はオブジェクトがこの規則に従って次々に発火することによって自律的に進行していく．つまりデータフロー方式に基づくオブジェクト間の対話を本システムでは推論エンジンとして採用しているのである．この推論方式によって，連成問題解析を難しくしている複雑な連成アルゴリズムを意識することなく，システムの開発や設計知識の追加・削除などのシステムの機能変更を容易に行うことができる．

さらに，本システムでは，データにタグを付けることによって，全く同一かあるいは属性が同一のデータを選択的に送信できるようにして，オブジェクトの発火を制御している．例えば図4の例では，有限要素メッシュという点で属性的には同一である，2次元メッシュと3次元メッシュを，“(2D)”・“(3D)”のタグを付けることによって識別し選択的な送信を可能にしている．

3. 設計変更の方法

ここでは，設計変更の方法についての効率に関する比較検討を行うために，試験的手法，最適化理論による手法，双方を融合した手法，さらにファジィ制御による手法について説明する．

3.1 試験的手法

経験的手法とは，エンジニアが経験的に獲得した定性的な設計変更の方法を意味する．本システムではこの知識を図5に示すようにIF-THEN型のルール知識表現を用いて整理し採用している．図5の知識は，Rule1は，『もし最高温度が融点を超えているならば，伝熱効果及び冷却効果を高めるため板厚を薄くすると同時に冷却チャネルの半径を増加せよ.』という知識を，Rule 2は，『もし引張力が支配的で最大相当応力が降伏応力を超えているならば，引張力の影響を抑えるために板厚を厚くせよ.』という知識を，Rule 3は，『もし圧縮力が支配的で最大相当応力が降伏応力を超えているならば，これは熱膨張によるものなので，伝熱効果及び冷却効果を高めるために板厚を薄くすると同時に冷却チャネルの半径を増加せよ.』という知識を表している．なお，ΔW及びΔRは目標物理量と変更時の物理量の比に比例して変更量を決定する時のファクターで，この値の大小によって変更量を制御できる．

3.2 最適化理論による手法

本手法は，設計問題を拘束条件付きの線形あるいは非線形問題と考えた場合の数理的最適化手法に基づく設計変更の方法を意味する．具体的には，ラグランジュ未定乗数法・ペナルティ関数法などの変換法や共役勾配法などの直接法があるが，本設計変更には，FEMに基づく最適設計を効率的に行えるという観点から，ラグランジュ未定乗数法の一種である設計変更

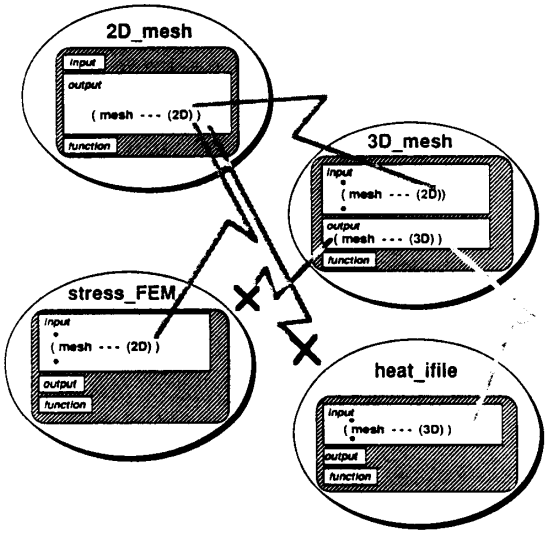


図4 タグ説明図

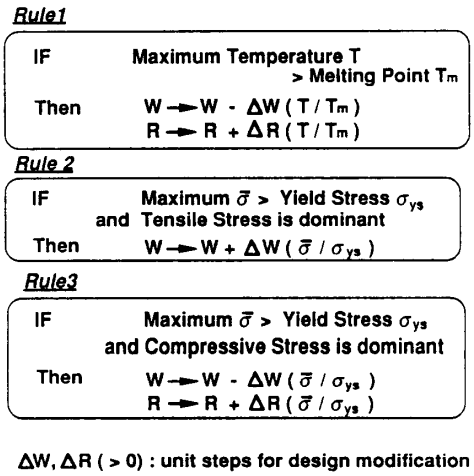


図5 設計変更における経験的手法の例

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

最小の概念に基づくシンセシス手法[25]を最適化理論による手法として採用している．

3.3 3.1と3.2を融合した手法

3.1と3.2を融合した手法とは，最適化理論による手法によって設計変更を繰り返すうちに蓄えられる経験的な知識に基づく設計変更の方法のことである．

例えば，最適化理論による手法に基づく設計変更の過程で，物理的に不可能なシフトが生じたときの処置として，

Scheme 1：設計変更において，ある設計変数が拘束条件を超えた場合，その設計変数を固定して残りの設計変数のみで，設計変更をおこなう．

Scheme 2：設計変更において，ある設計変数が拘束条件を超えた場合，その設計変数の限界値まで設計変更ベクトルを縮小する．もし，ある設計変数がその限界値上にあってさらにその限界値を超えて設計変更が行われようとした場合には，その設計変数を固定して残りの設計変数のみで設計変更を行う．

の2つの方法が考えられるとする．ここでいう，3.1と3.2の融合手法とは，両者を適用するうちに経験的に得られる，『効率の向上という観点から，どちらがより優れているか』ということに関する知識に基づく最適化理論による手法である．なお，この方法は，基本的に最適化理論による手法に基づいているので，以降，簡単のため最適化理論による手法と呼ぶことにする．

3.4 ファジィ制御による手法

ファジィ制御を適用した設計変更の方法は種々考えられるが，ここでは，経験的手法に基づく設計の変更の定量的評価性能を向上させるために，単位ステップをファジィ制御した3.1の経験的手法をファジィ制御による手法と定義する[26]．本節では，そのファジィ制御に基づく単位ステップの推定方法について具体的に説明する．

3.4.1 メンバシップ関数

変更時の物理量（最大相当応力など）の目標物理量（降伏応力など）に対する比をPとし，ファジィ集合のラベルを

Pに関しては，

1よりとても大きい → Large
1より大きい → Medium
1より少しだけ大きい → Small

単位ステップΔW, ΔRに関しては，

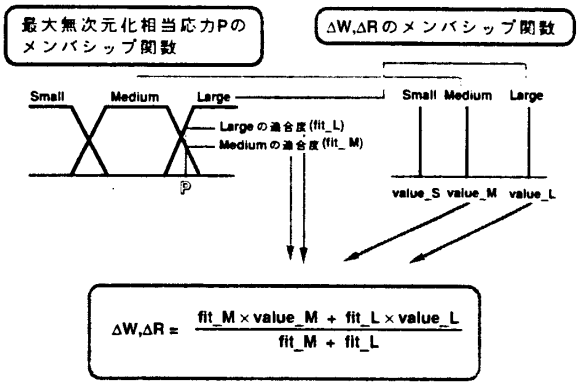


図6 経験的手法に基づく設計変更の単位ステップ推定アルゴリズム

正で大きい → Large
正で中くらい → Medium
正で小さい → Small

と定義し，**図6**に示すようなメンバシップ関数によって表現する．なお，具体的なメンバシップ関数の値については過去の経験から決める．

3.4.2 ファジィ制御規則および単位ステップの推定

ここでは，ファジィ制御規則として，次の3つを考える．

R1：IF P is Large. THEN ΔW and ΔR are Large.
R2：IF P is Medium, THEN ΔW and ΔR are Medium.
R3：IF P is Small, THEN ΔW and ΔR are Small.

単位ステップは，図6に示すように，これらのファジィ制御規則およびPと単位ステップのメンバシップ関数から推定し，もしPの値が複数のファジィ制御規則の前提部を満足した場合は，メンバシップ関数の適合度を重みとして平均をとることによって決定する[27][28]．

4. 例　　題

4.1 モデル

3章で述べた設計変更の方法の設計効率に与える効果について検討するために**図7**に示す円形冷却チャネル付き2次元核融合炉第一壁モデルの設計を行った．図中qはプラズマ熱流束を，Fは電磁力及びブランケット内圧力による機械的引張力を表している．なお，材質としては，SUS304を採用した．その物性値を表1に示す．有限要素法に基づく熱応力解析は，2次元平面ひずみ問題として行った．

4.2 破損規準

本設計で考慮している破損規準は次に示す2つである．

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

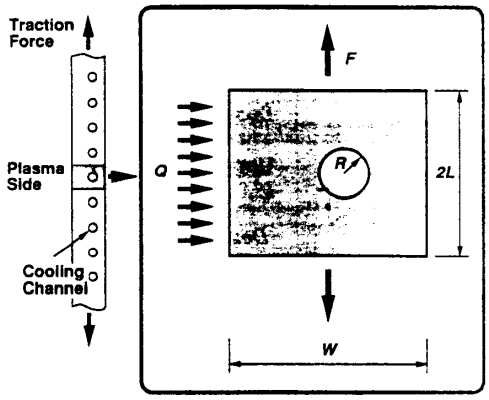


図7　冷却チャネル付き2次元核融合炉第一壁モデル

表1　SUS304物性値表
（含"mat_dbase"オブジェクト）

	Value	Unit
Thermal Conductivity	16.338	J / (m·sec·K)
Heat Capacity	512.4	J / (Kg·K)
Mass Density	7.97×10^{3}	Kg / m^3
Young's Modulus	1.87×10^{5}	MPa
Poisson's Ratio	0.275	
Linear Expansion Coefficient	17.22×10^{-6}	1 / K
Yield Stress	150.53	MPa
Melting Point	1.5×10^{3}	K

(1)　温度規準：$T < T_m$

(2)　応力規準：$\bar{\sigma} < \sigma_{ys}$

ここで，Tは第一壁内最高温度，$\bar{\sigma}$は最大相当応力，T_mは融点，σ_{ys}は降伏応力である．なお，簡単のために，安全率は考慮していない．

4.3　結　果

本設計例では，熱流束qを0.1(MW/m²)に，機械的引張力Fを303.8(N)に固定した．今回は，Lを5.0(mm)に固定して，板厚(W)及び冷却チャネルの半径(R)の2つの設計変数を，先に示した温度規準及び応力規準の双方を満足するように設計する．その結果を図8，9，10に示す．実線は経験的手法に基づく設計を示し，点線は最適化理論による手法に基づく設計を示す．（　）内の数字は，満足解を得るまでに行われた，FEM解析（熱解析及び熱弾性応力解析）の回数を示す．なお，最適化理論による手法に基づく設計変更の場合，感度を差分近似で求めるために1回のシフト量計算において，試設計以外にさらに2回のFEM解析を行っている．このために図中の設計変更回数と（　）内の数字が一致していない．

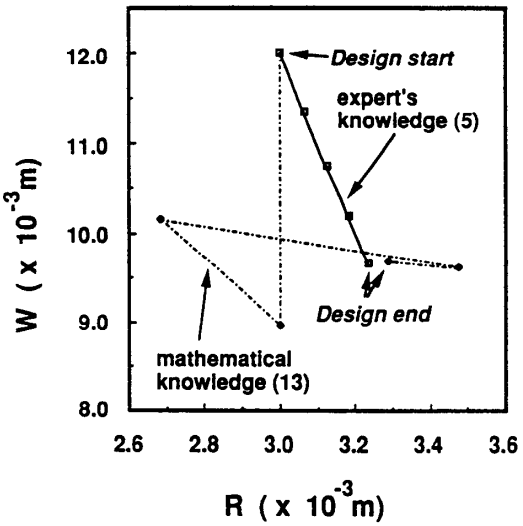


図8　経験的手法および最適化理論による手法に基づく設計変更の比較
（初期形状 W＝12.0(mm)，R＝3.0(mm)）

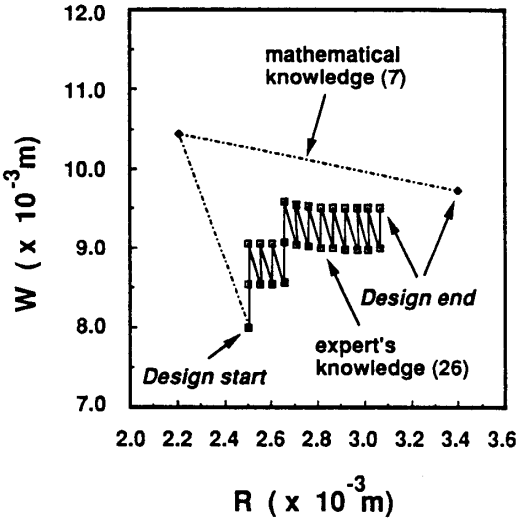


図9　経験的手法および最適化理論による手法に基づく設計変更の比較
（初期形状 W＝8.0(mm)，R＝2.5(mm)）

4.3.1　経験的手法に基づく設計変更の場合

図8に初期板厚(W)が大きい場合の設計例を示す．この場合，熱膨張による圧縮応力のために応力規準が満たされず，その結果，設計変更の知識：Rule 3が

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

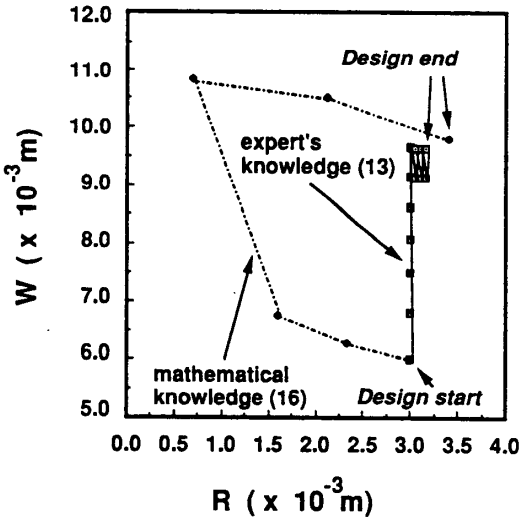


図10 経験的手法および最適化理論による手法に基づく設計変更の比較
(初期形状 W=6.0(mm), R=3.0(mm))

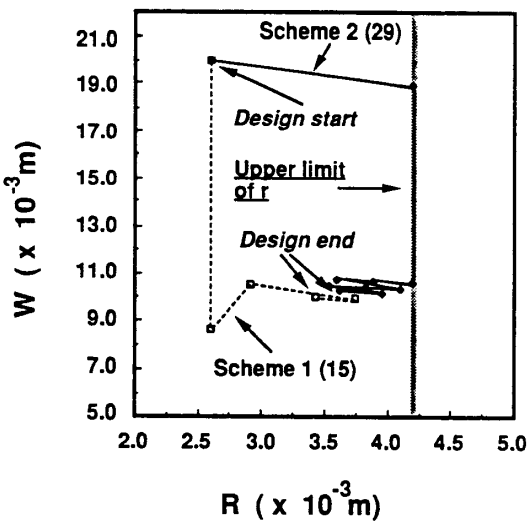


図11 Scheme 1 および Scheme 2 の設計比較

採用されて，板厚(W)及び半径(R)はそれぞれ単調に減少・増加されている．また，初期の板厚(W)が適切で半径(R)が小さい図9の場合，冷却能力を上げるために半径(R)が主に変更されている．半径(R)が適切で板厚(W)が小さい図10の場合，機械的引張力による影響を緩和するため，主に板厚(W)がRule 2の知識によって変更されている．いずれにしても図8, 9, 10の結果より，本問題では，図5に示す経験的手法のみを用いて，板厚(W)及び半径(R)の初期値に依存することなく解を得ることができることがわかる．

4.3.2 最適化理論による手法に基づく設計変更の場合

4.3.2.1 Scheme 1 および Scheme 2 の比較

3.3節で説明した Scheme 1 及び Scheme 2 に基づく設計例の1つを図11に示す．同図より Scheme 1 の方がより少ない設計変更で収束しているのがわかる．この傾向は，他のケースについても同様にみられ，本設計問題では，『物理的に不可能なシフトが生じたときの処置として Scheme 1 の方がより効率的である』ことがわかる．したがって，本節で述べる最適化理論による手法に基づく設計変更では，物理的に不可能なシフトが生じたときに Scheme 1 を採用する．

4.3.2.2 結 果

図8に初期の板厚(W)が大きい場合の結果を示す．この場合，初期設計変更の段階で，物理的に不可能なシフトが生じ，その結果，Scheme 1 が採用され，板厚(W)のみが大幅に減少される．一方，板厚(W)が適切で半径(R)が小さい図9の場合，及び，半径(R)が適切で板厚(W)が小さい図10の場合には，物理的に不可能なシフトは生じず，Scheme 1 は採用されずに設計変更が行われている．

4.3.3 経験的手法と最適化理論による手法の比較

図8に示される初期板厚(W)が大きい場合で比較すると，FEM 解析の回数は，経験的手法に基づく場合が5回に対して，最適化理論による手法のそれは13回となっており，経験的手法の方が効率的であることがわかる．図9の初期板厚(W)が適切で半径(R)が小さい場合では，経験的手法よりも，最適化理論による手法の方が圧倒的に効率的であることがわかる．しかし，これは経験的手法の変更量を決める単位ステップ ΔR や ΔW が小さな値に固定されていたためであり，たとえば，ファジィ推論の適用により今後この値を可変にすることによって効率を高められる可能性がある．

図10のように初期半径(R)が適切で板厚(W)が小さい場合には，最適化理論による手法に基づく設計変更では，解空間の存在方向に対して，大きく迂回している．ただし，経験的手法の場合との FEM 解析回数の差が3回しかない．これは，最適化理論による手法に基づく設計変更が一回の設計変更で大きく設計変数の値を変更できるためと考えられる．

以上の比較から，本設計問題に採用する設計変更に関する知識の効果について次のようにまとめられる．

まず設計の変更方向の予測性は，経験的手法の方が優れているが，目標物理量と変更時の物理量の比に比例して変更量を決定するファクタ（単位ステップ）が小さく固定されているために，解空間から遠い場所から試設計を開始した場合，経験的手法の方が満足解を

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

得るまでに多くの設計変更（FEM 解析）を必要とする．一方，最適化理論による手法に基づく設計変更では，連成問題のように設計空間における目的関数の凹凸が複雑な場合には，解空間の存在方向に対してどうしても迂回してしまう傾向があるが，これは，局所的な感度解析に基づく本手法が必ずしも大局的な見地から最適な設計変更を行えるとは限らないことによると考えられる．

4.3.4　ファジィ制御を適用した場合としない場合の比較

Pに関する2種類のメンバシップ関数（図12）に基

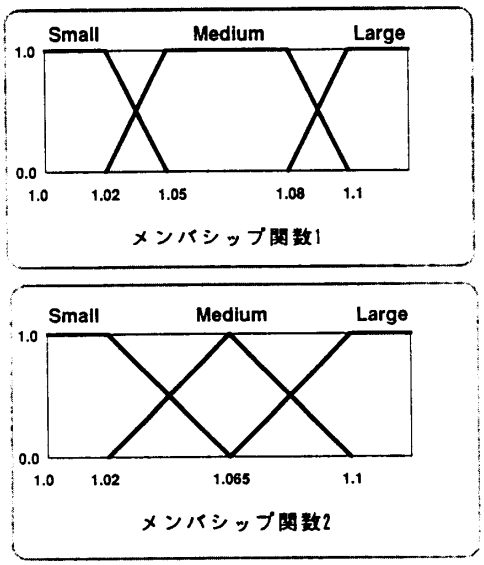


図12　最大無次元化相当応力Pのメンバシップ関数

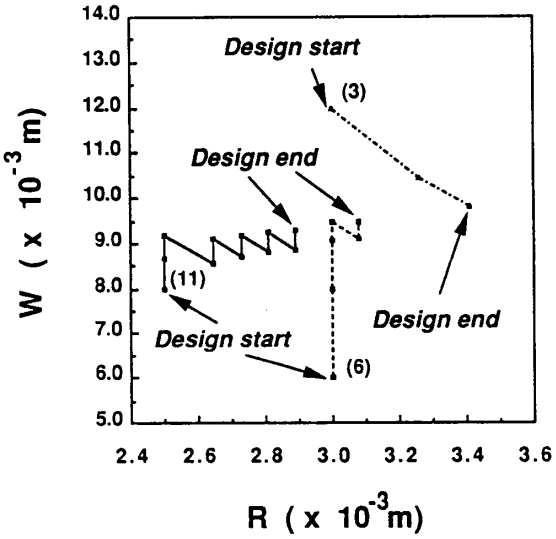


図13　メンバシップ関数1に基づいて単位ステップをファジィ制御した場合の設計変更

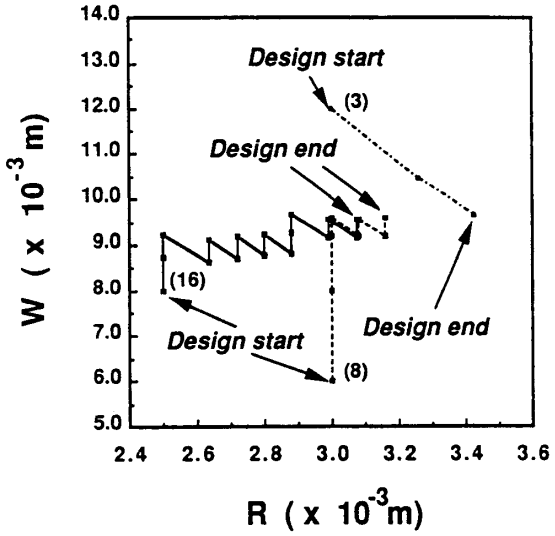


図14　メンバシップ関数2に基づいて単位ステップをファジィ制御した場合の設計変更

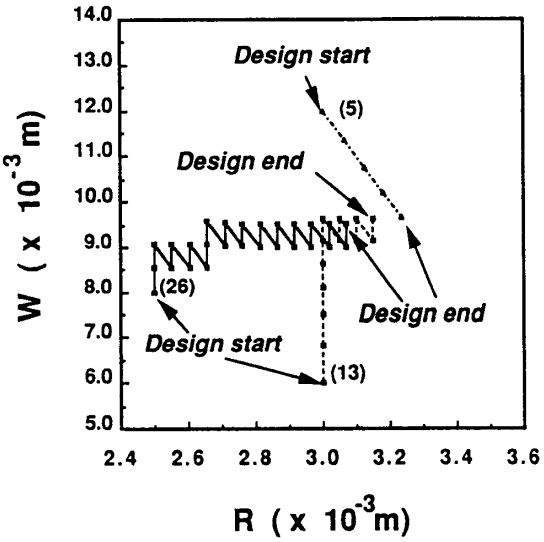


図15　経験的手法に基づく設計変更において単位ステップを固定した場合の設計変更

づいて行った設計結果を，図13，14に示す．これらのファジィ制御による手法に基づく設計では，図15の単位ステップΔW，ΔRが小さな値に固定されたこれまでの設計結果と比較して，ほぼ半数程度の設計変更回数で収束していることがわかる．初期板厚(W)が適切で半径(R)が小さい場合では，初期設計の異なる他の2つの場合ほど設計変更量がダイナミックに変化していないが，これは初期設計のPがすでに小さくかつ設計変数に対するPの勾配が緩やかなために，図12に示すメンバシップ関数では，Pが設計変更の過程を通して殆どSmall内に入っているためと考えられる．

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

5. 結　　言

本稿では，自動設計のための設計型エキスパートシステムにおける設計変更の方法の効率について，冷却チャネル付き核融合炉第一壁の2次元設計問題を例に紹介した．今後，より複数の現象が複雑に連成しあった環境下の構造設計が要求されるようになると予想されるが，そうなると，非常に多分野の専門的知識を必要とし，本稿で紹介したような知識工学的手法によって，設計に関する知識を管理しやすいモジュールとして整理することは不可欠になると考えられる．

さらに，そのような複雑な連成問題では，設計変数の許容空間上にできる物理量の凹凸はますます激しくなり，自動設計の観点から設計変更は非常に困難になると予想され，最適解はおろか満足解さえ得られないといった状況に陥るかもしれない．そういった状況では，設計変更の方法として経験的手法がすぐれているとか，最適化理論による手法がより効率的であるといった狭い視点からの議論ではなく，より広い視野からの柔軟な設計変更方法の模索が必要になってくると思われる．本稿がそのきっかけになることを期待したい．

参 考 文 献

1) たとえば，特集—逆問題，数理科学，サイエンス社，No. 274 (1986)
2) たとえば，逆問題のコンピュータ手法とその応用講演論文集，日本機械学会，**890-34** (1989)
3) たとえば，特集-スーパーコンピューティング，コンピュートロール，コロナ社，**26** (1989)
4) 矢川，吉村：機械の研究，**39-11**，1175 (1987)；**39-12**，1307 (1987)
5) 矢川，吉村：日本機械学会誌，**92-847**，503 (1989)
6) たとえば，特集—インテリジェントCAD，コンピュートロール，コロナ社，**25** (1989)
7) 赤木，藤田：日本機械学会論文集（C編），**54-505**，2300 (1988)
8) 赤木，藤田：日本機械学会論文集（C編），**54-500**，1017 (1988)
9) 赤木，藤田：第6回設計シンポジウム講演論文集，（日本機械学会．精密工学会　共催），16 (1988)
10) 赤木，藤田：第7回設計シンポジウム講演論文集，（日本機械学会．精密工学会　共催），43 (1989)
11) 多田，松本，三輪，矢野：第7回設計シンポジウム講演論文集，（日本機械学会．精密工学会　共催）40 (1989)
12) 瀬口，田中，山口：第67期全国大会講演会講演概要集，日本機械学会，**890-50**，419 (1989)
13) S. Mittal, C. L. Dym and M. Morjaria: PRIDE: An Expert System for the Design of Paper Handling Systems, COMPUTER, IEEE, 102 (1986)
14) Y. Nakashima and T. Baba: OHCS: Hydraulic Circuit Design Assistant-A Knowledge-Based System for Kayaba Industry Co., Ltd., Proc. 1989 Conf. on Innovative Applications of Artificial Intelligence, American Association for Artificial Intelligence (1989)
15) M. N. Huhns and R. D. Acosta: Argo: An Analogical Reasoning Systems for Solving Design Problems, Tech. Report No. AI/CAD-092-87, Microelectoronics and Computer Technology Corp. (1987)
16) たとえば，計測と制御，特集-知識システム，**27** (1988)
17) J. H. Garrett and A. Jain: Proc. 4th Conf. on Artificial Intelligence Applications, THE COMPUTER SOCIETY of IEEE, 96 (1988)
18) S. W. Norton and K. M. Kelly: Proc. 4th Conf. on Artificial Intelligence Applications, THE COMPUTER SOCIETY of IEEE, 152 (1988)
19) 矢川，吉村：東京大学工学部紀要，A-26，44 (1988)
20) S. Yoshimura, G. Yagawa and Y. Mochizuki: Proc. 10th SMiRT Conf., Vol. N, 79 (1989)
21) 吉村，矢川，望月：逆問題のコンピュータ手法とその応用講演論文集，日本機械学会，**890-34**，119 (1989)
22) R. G. Smith: Proc. of 8th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 855 (1983)
23) 槌野，柴田：Computer Today オブジェクト指向言語の新展開，サイエンス社，No. 21，29 (1987)
24) J. B. Dennis: Lecture Notes in Computer Science, **19**, 362 (1974)
25) 中桐，野口，谷：構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，**12**，97 (1988)
26) 吉村，望月，矢川：第67期全国大会講演会講演概要集，日本機械学会，**890-50**，155 (1989)
27) 菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社，88 (1988)
28) 高橋，冨山：日本原子力学会誌，**29-8**，732 (1987)

NII-Electronic Library Service