

An Improvement of DORAR Method for Highly Nonlinear Local Constraints

Mitsunori MIKI*, Tomoyuki HIROYASU*, Shigeru KOBAYASHI** and Taiju IKEDA**

(Received July 16,1999)

The DORAR(Distributed Optimization by Resource Addition and Reduction) method is a new parallel and distributed algorithm for optimum design of discrete systems, and has been found to be effective for the optimization of electrical circuits and discrete structures so far. This optimization algorithm consists of two processes, namely the resource reduction process and the resource addition process. In the former process, each element discards its critical resource margin which is the minimum among the resource margins with respect to global and local constraints, while in the latter process, a small amount of resources are added to all the elements. However, some elements that are not necessary in a final optimum solution ask for a great amount of resources due to their local constraints. In order to overcome this problem, a new rule is introduced about the resource reduction process in the method. In the previous resource reduction process, if a design point is out of a local constraint region, it is always moved to the constraint region. In the proposed method, a rule is developed to judge that can identify whether such a local constraint should be satisfied or not is developed. The new method is successively applied to the optimum design of discrete systems such as truss structures.

Key words : Optimum Design, Parallel Distributed Algorithm, Highly Nonlinear Constraint

キーワード : 最適設計, 並列分散アルゴリズム, 非線形性の高い制約条件

非線形性の高い局所制約条件に対する資源追加削減法の改良

三木 光 範・廣安 知 之・小林 繁・池田 大 樹

1. 緒 言

離散構造物の最適設計に対して提案された並列計算機のための最適化アルゴリズムである 資源追加削減法¹⁾(DORAR 法)(Distributed Optimization by Resource Addition and Reduction method) は, システムを構成する離散的な各要素が, 要素に関する情報を頼りに, 要素の持つ知識のみで自律的に挙動し, その結果としてシステム全体がより最適な状態へ近づくと

いう考え方である. 最適化の原理は単純で, 各要素はその設計変数である資源に余裕があれば削減し, その後, 微少資源を追加し, 削減するというものである. この手法はこれまで, 連続変数の非線形最適化問題に適用され, その有効性が検証された. 対象とした問題は, 1) 電気回路最適化問題, 2) トラス構造物最適化問題である. また, トラス構造物最適化問題については, いくつかのトラス構造物に適用され, 任意の初期値から

* Department of Knowledge Engineering and Computer Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6434, Fax:+82-774-65-6796, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

** Department of Knowledge Engineering and Computer Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6716, E-mail:shigeru@mikilab.doshisha.ac.jp

良好な最適解が得られ、かつこのアルゴリズムの有効性が数学的に検証された²⁾。また、収束性、解の精度の両者の向上をめざして微少追加資源量を段階的に低減させる方法が提案され³⁾、その有効性も確認されている。一方、局所解からの脱出を目的としたアルゴリズムの改良も提案され³⁾、局所解からの脱出がある程度実現できた。

これまで、資源追加削減法に関して以下のような目的のための研究がなされており、その成果が報告されている。1) 収束性の向上、2) 収束解の精度の向上、3) 局所解からの脱出である。従来の資源追加削減法でいくつかのトラス構造物の最適化を行った結果、良好な最適解を得ることができない場合があった。その原因は、トラス構造物の本来資源が0となる、すなわち断面積が0となる圧縮部材の断面積が残ってしまうからであり、座屈強度に関する制約条件の影響が過大であったためであると考えられる。

本研究では、そのような高い非線形性をもつ制約条件の最適解に及ぼす影響を検証し、より良好な最適解への収束解のため、資源追加削減法のアルゴリズムに改良を加えた。具体的には、良好な最適解への収束に多大な影響を与える制約条件を特異な制約条件と考え、ある要素がこのような制約条件を満たしていない場合、その要素については資源削減処理を行わないという処理を提案する。すなわち、制約条件を満たしていない要素に関しては、設計点の資源削減処理による制約条件内への移動を行わないというものである。この処理を加えるに当たり、制約条件が非線形性の高いものかどうかの分類が極めて重要になる。本研究では、経験的にその分類を行うための指針を示し、新たなアルゴリズムを提案する。以上の制約条件の分類、およびそれに伴う資源削減処理の改良を加え、トラス構造物の最適化を行うことで、提案したアルゴリズムの有効性を検証する。

2. 資源追加削減法 (DORAR 法) の概略

2.1 対象とする問題とアプローチ

資源追加削減法は、システムを構成する離散的な各要素が、要素に関する情報を頼りに、要素の持つ知識のみで、自律的に挙動し、その結果としてシステム全体がより最適な方向へ近づくという考えである。

対象問題は、離散的な要素を有するシステムの最適資源配分問題とし、連続的な実数値を設計変数とし資源とする。各要素は資源の和で表され、資源の最小化

が目的である。

システムには要求される制約条件があり、複数の局所制約条件と複数の全体制約条件に分けられ、式で示すと次のようになる。

$$\text{Minimize } R = \sum_{i=1}^N R_i \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad (2)$$

$$g_{ik} \leq 0 \quad (i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, n_i) \quad (3)$$

$$G_j \leq 0 \quad (j = 1, \dots, m) \quad (4)$$

ここで、 R は資源、 g は局所制約条件、 G は全体制約条件、 N は要素数である。そして、システムの各要素が、それ自身に関する情報と局所的なルールを基にして、それ自身の資源を変化させる。このプロセスの繰り返しによりシステム全体の最適化を達成する。各要素が局所的に利用できる情報は以下で示す。

$$g_{ik} \quad (k = 1, \dots, n_i), \quad G_j \quad (j = 1, \dots, m) \quad (5)$$

$$\frac{\partial g_{ik}}{\partial R_i}, \quad \frac{\partial G_j}{\partial R_i} \quad (6)$$

ここで $g_{ik}, G_j, \frac{\partial g_{ik}}{\partial R_i}, \frac{\partial G_j}{\partial R_i}$ はそれぞれの要素の局所制約、システム全体制約、及びそれらの制約のその資源 R_i に関する感度情報である。ここで感度が高い要素とは、その条件に対する影響が大きいことを意味し、システムの中でその制約条件を満たすために必要度が高いことを意味する。

また、重要なことは制約条件を局所制約条件と全体制約条件に分離したことである。ここでは、各要素における制約条件を局所制約条件、システム全体としての制約条件を全体制約条件とした。この分離は一般的には経験的なものであり、分離することにより、各要素が他の要素の制約条件を考慮することなく自律分散的に振舞うことが可能となる。各要素の状態は最終的には全体の資源配分で決定することを考えると、完全な局所制約条件は有り得ない。しかし、その要素の設計変数の感度が十分高い制約条件は局所制約条件と考えることができる。この分離により、各要素は、他の要素の局所制約条件は見えないことになるが、このことは不都合なことではなく自律分散処理に基づく最適化法の特徴である。

2.2 資源追加削減法のアルゴリズム

資源追加削減法の最適化の原理は単純で、各要素はその設計変数である資源に余裕があれば削減し、その後、微少資源を追加するというものである。以下にアルゴリズムを示す。

1. 各要素はその要素に関する制約条件を基にその要素の資源余裕を評価する。要素の資源を R_i とすると、要素 i の k 番目の局所制約条件 g_{ik} に関する資源余裕は式 (7) で与えられる。

$$R_{mi}^{g_{ik}} = \frac{g_{ik}}{\left(\frac{\partial g_{ik}}{\partial R_i}\right)} \quad (7)$$

2. 各要素がシステムに与えられた全体制約条件に関する資源余裕を見積もる。資源 R_i の j 番目の全体制約条件 G に関する資源余裕は式 (8) で与えられる。

$$R_{mi}^{G_j} = \alpha \frac{G_j}{\left(\frac{\partial G_j}{\partial R_i}\right)} \quad (8)$$

は責任係数と呼ばれる係数で、全体制約条件を達成するための、要素の責任の重要さ、つまり全体制約に対する要素の重要さを表している。一般的には、要素数の逆数 ($1/n$) を用いる。

3. 各要素における局所資源余裕と全体資源余裕の最小値をその要素の臨界資源余裕とし、各要素は臨界資源余裕を削減する。要素 i の臨界資源余裕は式 (9) で表すことができる。この処理を資源削減処理と呼ぶ。

$$R_{mi}^{(k)} = \text{Min}(R_{mi}^{g_{ik}}, R_{mi}^{G_j}) \quad (9)$$

4. 各要素に一定の微少資源を追加する。(この処理を資源追加処理と呼ぶ) この微少追加資源量 ΔR は式 (10) で決定される。

$$\Delta R = r_{add} \times \sum_{i=1}^n R_i \quad (10)$$

r_{add} (微少追加資源割合) とは追加する資源量の総資源に対する割合である。

5. 手順 1 から 4 を繰り返すことによって最適解を得る。

3. 連続変数非線形最適化問題への適用

3.1 最適化の対象とした離散構造物

本研究で取り扱う最適化の対象とした離散構造物はトラス構造物とした。トラスとは、棒を組み合わせて

三角形を形成して外力に抵抗させる構造のことをいう。身の回りでは、送電線の鉄塔や東京タワー、そして鉄道塔などがトラス構造物として挙げられる^{4,5)}。

トラス構造物の最適化問題とは、ある節点に負荷を加えて複数の制約条件を与えたとき、最小体積のトラス構造物を設計することである。制約条件としては、局所制約条件として各部材の引張、圧縮応力および座屈強度を考え、全体制約条件として一つの節点変位を考える。部材は中実円形とし、設計変数は部材の体積である。ここでは、Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材のトラス構造物の最小体積設計問題を考える。目的は体積の最小化である。したがって、資源追加削減法における資源は各部材の体積となる。負荷荷重として、節点 8 に $1kN$ の水平荷重を付加した。また、応力制約条件として $40MPa$ を与えた。変位制約条件として、節点 8 の変位を $0.01m$ 以下とした。

3.2 離散構造物最適化のアルゴリズム

3.1 節で述べた条件のもとで、Fig. 1 に示した 8 節点 14 部材から構成されるトラス構造物の体積最小化問題を、資源追加削減法を用いて最適化を行う。そこで、2.2 節で述べたアルゴリズム、1. 局所制約条件に関する資源余裕の見積もり、2. 全体制約条件に関する資源余裕の見積もり、3. 資源削減処理、4. 資源追加処理をこの問題に即して書き換えると次のように表される。

1. 各部材は局所制約条件を基に、その部材の体積の余裕を見積もる。ここでは、局所制約条件は引張、圧縮応力に関する制約条件と、座屈強度に関する制約条件とに分けられる。そして、これらの制約条件の基に資源余裕を求める。引張、圧縮応力に関する資源余裕は式 (11) で表される。

$$R_{mi}^{t,(k)} = R_i^{(k)} \left(1 - \frac{\sigma_i^{(k)}}{\sigma_t}\right) \quad (11)$$

ここで、添え字は部材番号、添え字はその部材が引っ張りの力を受けていること、添え字は余裕、は部材応力、 $()$ は繰り返し数、は引っ張り強度を表している。一方、座屈に関する資源余裕は式 (12) で求めることができる。

$$R_{mi}^{b,(k)} = R_i^{(k)} \left(1 - \sqrt{\frac{P_i^{(k)}}{P_{cr}^{(k)}}}\right) \quad (12)$$

ここで、 P は部材の軸力、添え字 i はその部材が圧縮の力を受けていること、添え字 j は座屈強度を表している。したがって、局所制約条件に関する資源余裕は式 (13) によって表される。

$$R_{mi}^{g,(k)} = \beta_i^{(k)} \min(R_{mi}^{t,(k)}, R_{mi}^{b,(k)}) \quad (13)$$

2. 各部材は全体制約条件を基にその部材の体積の余裕を評価し、それらに責任係数を乗じたものをその部材の全体資源余裕とする。全体資源余裕は式 (14) で表される。

$$R_{mi}^{G,(k)} = \alpha \frac{G^{(k)}}{\left(\frac{\partial G^{(k)}}{\partial R_i}\right)} \quad (14)$$

3. 1, 2 で求めた局所制約条件に関する資源余裕と全体制約条件に関する資源余裕の最小値をその部材の臨界資源余裕とし、各部材は臨界資源余裕を削減する。部材の臨界資源余裕は式 (15) で表される。

$$R_{mi}^{(k)} = \min(R_{mi}^{g,(k)}, R_{mi}^{G,(k)}) \quad (15)$$

次に、資源追加処理を行う。そして各要素が変化した後、構造解析を行いシステムを新しい状態へ移らせる。

3.3 トラス構造物の最適化

3.3.1 部材の初期断面面積分布

各部材の円形断面の半径を与えた初期値を 2 種類設定した。そしてこれを基に 8 節点 14 部材トラス構造物の初期値 1 および 2 の断面面積分布を Fig. 2 に示し、これを初期値 1, 初期値 2 とする。各部材の太さを約 20% に縮小して表示している。初期体積はそれぞれ、初期値 1 では $6.044 \times 10^{-3} m^3$ 、初期値 2 では $7.159 \times 10^{-3} m^3$ であった。

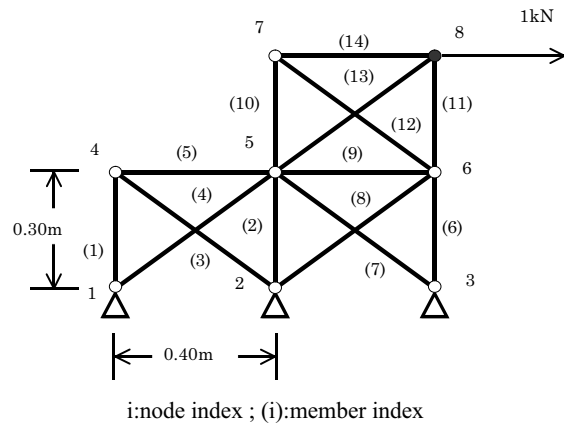


Fig. 1 A 14-member truss.

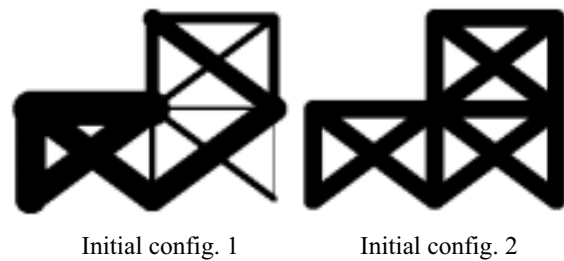


Fig. 2 Initial configurations of 14-member trusses.

3.3.2 最適化の結果と問題点

資源追加削減法を用いて、Fig. 2 で与えられた初期値 1 および 2 を最適化した。繰り返し数 1000 回で得られた収束解 1 および 2 の断面面積分布を Fig. 3 に示す。また、初期値 1 および 2 から収束解 1 および 2 が得られるまでの体積履歴を Fig. 4 に示す。

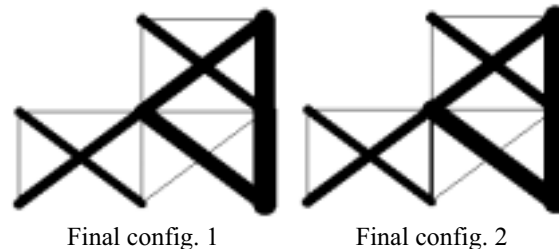


Fig. 3 Converged solutions.

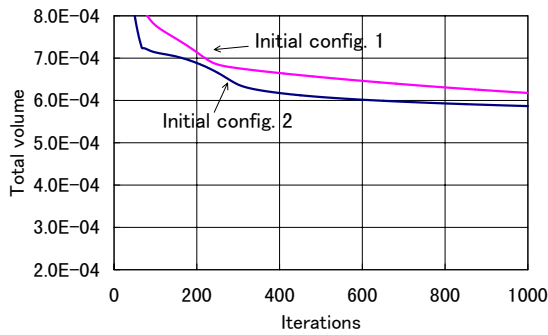


Fig. 4 Histories of the total volume of the structures during the iterations.

まず、体積履歴を示した Fig. 4 から、初期値 1 および 2 ともに繰り返し数の初期の段階で総資源量である総体積の大きさが急速に減少し、その後、緩やかに減少し、発散することなく収束していることがわかる。また、初期値 1 (Fig. 2) において、収束時における総体積の大きさは $5.867 \times 10^{-4} m^3$ であった。一方、初期値 2 (Fig. 2) では、収束時における総体積の大きさは $6.177 \times 10^{-4} m^3$ であり、収束解 1 (Fig. 3) と収束解 2 (Fig. 3) の総体積の大きさでは、約 5.2% の相違があった。この大きさはきわめて小さい値であり、収束解 1 および 2 ともに同様の断面積分布となった。また、Fig. 3 で示した断面積分布をみると収束解 1 および 2 ともに同様の断面積分布となっていることが確認できる。

しかし、ここで、この Fig. 2 に示す初期値 1 および 2 を、変位制約条件を $0.01m$ から $0.001m$ に変更し、他の引張、圧縮応力に関する制約条件、座屈強度に関する制約条件、荷重条件は同様の条件で最適化した収束解の断面積分布を Fig. 5 に示す (各部材の太さを約 20% に縮小して表示)。

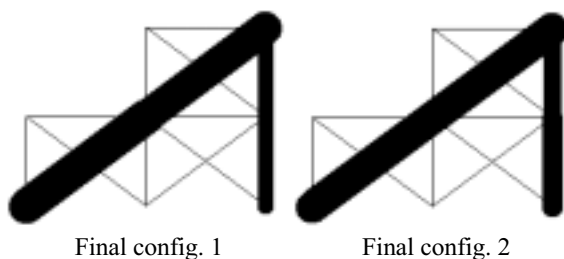


Fig. 5 Converged solutions (Case of $0.001m$ in global constraint).

これらの図中の部材番号 3, 7, および 12 の部材に注目する。これらの部材はすべて圧縮の力がかかって

いる部材である。変位制約条件が $0.01m$ のときの、これらの 3 つの部材 (3, 7, および 12) における断面積が太く残っていることがわかる。逆に変位制約条件が $0.001m$ のとき、これらの部材 (3, 7, および 12) は断面積の大きさが 0 に近い値を示した。これは、変位制約条件の違いにより生じたことである。変位制約条件が $0.01m$ のときは、トラス構造物の変形が大きすぎるため、これらの部材 (3, 7, および 12) には座屈強度に関する制約条件が強く影響したためだと考えられる。

従来の資源追加削減法のアルゴリズムでは、このような座屈強度に関する制約条件のような非線形性の高い制約条件には対応できない。それは資源削減処理をすべての制約条件に対して一律に行っているからである。

そこで、このような問題点を解決するために、多大な悪影響を及ぼす制約条件について検討する必要がある。また、このような制約条件をどのように位置付けし、資源追加削減法をどう対応させていくか検証する必要がある。

4. 特異な制約条件に対する新たな資源削減処理の提案

4.1 特異な制約条件

3.2.2 節で 8 節点 14 部材トラス構造物を、資源追加削減法を用いて最適化した結果、本来消滅すべき部材番号 3, 7, および 12 の部材の断面積が大きくなった。その原因は、座屈強度に関する制約条件の影響が過大であるからであった。

このように、資源追加削減法を用いた結果、収束解に影響を及ぼす非線形性の高い制約条件を本研究では、特異な制約条件と呼ぶ。8 節点 14 部材トラス構造物最適化問題においては、座屈強度に関する制約条件が特異な制約条件に相当する。

特異な制約条件とは、設計変数の感度の大きい制約条件のことをいう。しかし、必ずしもこの特異な制約条件が収束解に影響を及ぼすとは限らない。本研究で用いた 8 節点 14 部材トラス構造物以外の構造を持ったトラス構造物においては、座屈強度に関する制約条件によって影響を及ぼさず、良好な収束解を得る場合もある。

したがって、特異な制約条件が収束解に影響を及ぼすようなときに、資源追加削減法をどのように対応させるか、そしてどのようにして良好な収束解を得るか

ということを検討することが重要なのである。

4.2 特異な制約条件に対する資源削減ルールの提案

4.2.1 予備実験 (1)

特異な制約条件が収束解に影響を及ぼしたために良好な収束解を得ることができない場合が生じた。このために、Fig. 3における部材番号 3, 7, および 12 の部材の断面積が増加した。

そこで、このような特異な制約条件に対して以下のようなルールを提案し、予備実験を行う。

[ルール 1] 資源削減処理において、設計点が制約条件を破った場合、設計点を制約条件内に移動させず、そのままにしておく。

このルール 1 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用し、検証する。

4.2.2 実験の結果と考察 (1)

4.2.1 節で提案した資源削減処理における新しいルール、ルール 1 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用する。初期値は Fig. 2 に示した断面積分布をもつ初期値 1 および 2 を使用する。繰り返し数 1000 回で得られた収束解の断面積分布を Fig. 6 に示す。また収束解を得るまでの体積履歴を Fig. 7 に示す。

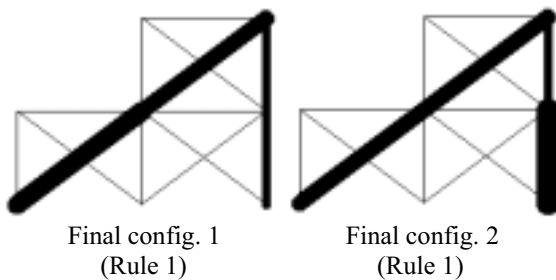


Fig. 6 Converged solutions (Rule 1).

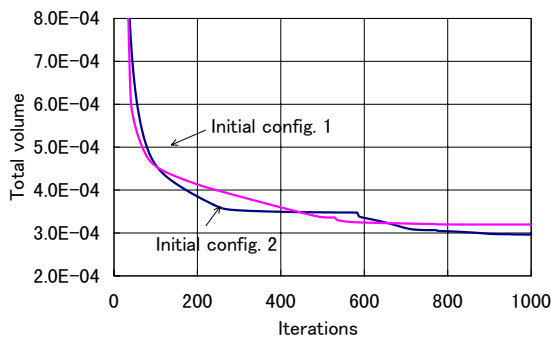


Fig. 7 Histories of the total volume of the structures during the iterations (Rule 1).

まず、Fig. 7 をみると、従来のアルゴリズムと同様、初期値 1 および 2 とともに繰り返し数の初期の段階で総資源量である総体積の大きさが急速に減少し、その後、緩やかに減少し、発散することなく収束していることがわかる。また、初期値 1 (Fig. 2) において、収束時における総体積の大きさは $2.962 \times 10m^3$ であった。一方、初期値 2 (Fig. 2) では、収束時における総体積の大きさは $3.196 \times 10m^3$ であった。

ここで、3.2.2 節で問題となっていた部材番号 3, 7 および 12 の部材は、従来のアルゴリズムを用いて得た収束解 1 および 2 の断面積分布 (Fig. 3) とルール 1 を用いて得た収束解 1, 2 の断面積分布 (Fig. 6) を比較すると、明らかに部材番号 3, 7 および 12 の部材の断面積が減少したことがわかる。

しかし、Fig. 6 をみてわかるように、収束解 1 では、部材番号 6 および 11, 収束解 2 では、部材番号 11 の部材がルール 1 を適用することにより、断面積が減少してしまった。また、制約条件を大きく破ってしまい、座屈が生じてしまった。これは設計点が制約条件を破った後、制約条件内に移動されることなく、そのままにしておいたためである。

そこで、部材番号 3, 7 および 12 のようなルール 1 を適用して改善された部材と、初期値 1 に関しては部材番号 6 および 11, 初期値 2 では部材番号 11 のようなルール 1 を適用したことにより、制約を大きく破ってしまい、問題となるような部材を区別する必要が生じた。

4.2.3 問題点に対する要素の分類

ルール 1 を適用した結果、従来のアルゴリズムで部材番号 3, 7 および 12 の部材の断面積を減少させることができた。しかし、設計点が制約条件を破った場合、その設計点をそのままにしておくことから、収束解 1 (Fig. 6) では、部材番号 6 および 11, 収束解 2 (Fig. 6) では、部材番号 11 の部材の断面積が減少してしまい、大きく制約条件を破ってしまい、座屈が生じてしまった。そこで、ルール 1 を適用する必要がある部材とルール 1 を適用する必要のない部材とを区別することが必要になった。

そこで、圧縮部材に関して、収束解を得るまでの座屈制約に対する余裕の推移に着目した。Fig. 8-9 に初期値 1 および 2 における圧縮部材の、収束解を得るまでの座屈制約に対する余裕の推移を示した。

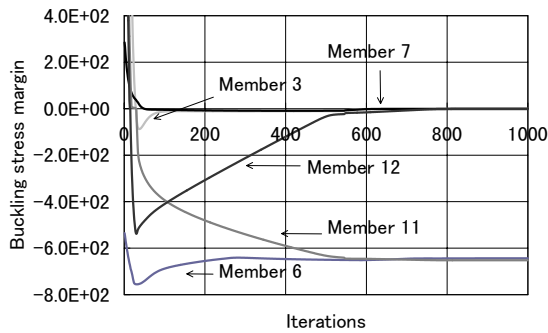


Fig. 8 Histories of the buckling stress margin of the members during the iterations (Initial config. 1).

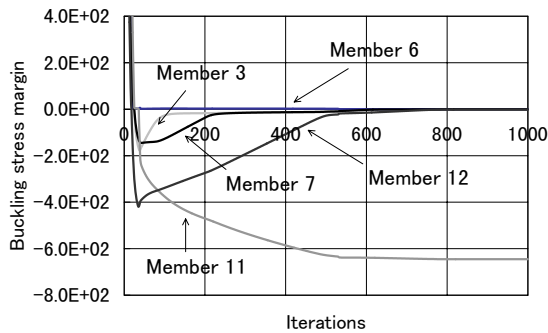


Fig. 9 Histories of the buckling stress margin of the members during the iterations (Initial config. 2).

[部材番号 3] 初期値 1(Fig. 8), 初期値 2(Fig. 9)ともに繰り返し数が増加すると共に制約条件に近づいていることがわかる。

[部材番号 6] 初期値 1(Fig. 8)では, 初期値の時点で制約条件外にあるため, ルール 1 が適用されることで, 制約条件内に移動されることなく, 制約条件を大きく破ったままであることがわかる。一方, 初期値 2(Fig. 9)では, 繰り返し数の増加と共に制約条件に近づいていることがわかる。

[部材番号 7] 部材番号 3 と同様, 初期値 1(Fig. 8), 初期値 2(Fig. 9)ともに繰り返し数が増加すると共に制約条件に近づいていることがわかる。

[部材番号 11] 初期値 1(Fig. 8), 初期値 2(Fig. 9)では, 繰り返し数の増加と共に, 制約条件から離れていくことがわかる。

[部材番号 12] 部材番号 3, 7 と同様, 初期値 1(Fig. 8), 初期値 2(Fig. 9)ともに繰り返し数が増加すると共に制約条件に近づいていることがわかる。

上の各部材の座屈制約に対する余裕の推移から次のことがいえる。

1. 部材番号 3, 7, 12 のような部材は, 制約条件を破った場合, ルール 1 を適用しても繰り返し数の増加とともに, 制約条件に近づき, かつ, 従来のアルゴリズムで問題点となっていた座屈強度に関する制約条件の影響を改善している。よって, これらの部材にはルール 1 を適用すべき部材である。
2. 部材番号 11 のような部材は, 制約条件を破った場合, ルール 1 を適用することにより繰り返し数の増加と共に, 制約条件から大きく離れていき, 座屈を生じてしまう。よって, このような部材にはルール 1 を適用すべきではない。
3. 初期値 1 の部材番号 6 のような部材は, 初期値の段階で制約条件を破っている場合, ルール 1 を適用することにより, そのままであり, 資源が与えられず太くならない。その結果, 大きく座屈を生じてしまった。よって, このように初期値の段階で制約条件を破っている場合, ルール 1 を適用すべきかどうかは判断することができない。したがって, 一度, 制約条件内に移動させてから, ルール 1 を適用し, その部材にルール 1 を適用すべきかどうかを判断する。

以上, 1, 2 および 3 から, ルール 1 を適用しなければならない部材と, 適用しなくても良い部材が分類することができた。

4.2.4 予備実験 (2)

4.2.3 節でルール 1 を適用しなければならない部材と, 適用しなくても良い部材が分類することができた。そこで, Fig. 8-9 に示した座屈制約に対する余裕の増減に着目し, 繰り返し数の初期の段階のある任意の区間で座屈制約に対する余裕の増減を判断する方法で新たな資源削減ルールを提案し, 予備実験を行う。

[ルール 2] ある一定区間で, 制約条件に対する余裕の大きさを比較し, ルール 1 を適用するか否かを判断する。もし, 初期値の段階で制約条件を破っている場合は, 一度制約条件内に移動させ, その後の制約条件に対する余裕の増減で判断する。

このルール 2 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用し, 4.2.3 節で述べた, 本来断面積が減少すべきではない部材と減少すべき部材が分類されるかどうかを検証する。

4.2.5 実験の結果と考察 (2)

4.2.4 節で提案した資源削減処理における新しいルール, ルール 2 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用する. 初期値は Fig. 2-3 に示した断面積分布をもつ初期値 1 および 2 を使用する. 繰り返し数 1000 回で得られた収束解の断面積分布を Fig. 10 に示す. また収束解を得るまでの体積履歴を Fig. 11 に示す.

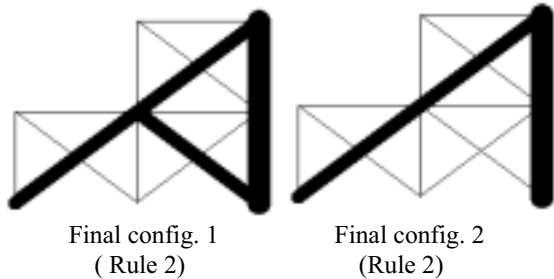


Fig. 10 Converged solutions (Rule 2).

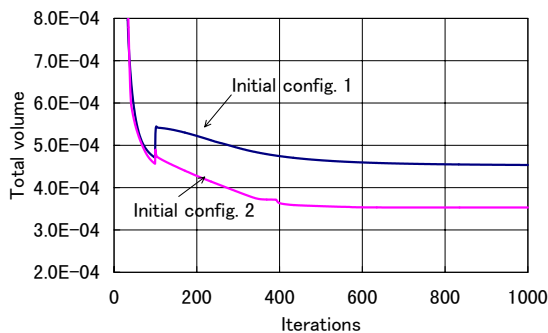


Fig. 11 Histories of the total volume of the structures during the iterations (Rule 2).

まず, Fig. 11 から, 初期値 1 および 2 とともに繰り返し数の初期の段階で総資源量である総体積の大きさが急速に減少し, その後, 緩やかに減少し, 発散することなく収束していることがわかる. また, 収束時の体積の大きさは, 初期値 1 では $4.535 \times 10^{-4} m^3$, 初期値 2 では $3.532 \times 10^{-4} m^3$ であり, 初期値 1 および 2 における体積の大きさでは, 約 29% の相違があった. ここで, ルール 2 で大きく体積の相違がみられたのは, 収束解 1 (Fig. 10) における部材番号 7 の部材の断面積の大きさが増加しているからである. この原因は, ルール 2 を適用した結果, 制約条件に対する余裕が減少したためにこの部材は必要な部材であるとみなされ, 従来の資源削減処理が適用されてしまったためである.

4.2.6 資源削減ルールの改良

4.2.5 節で述べたように, ルール 2 のような繰り返し数の初期の段階のある任意の区間で部材を分類する方法は不安定であり, 制約に対する余裕の増減だけでは部材を分類することが困難である. そこで部材の軸力の大きさに着目する. 軸力の大きい部材, つまり, その部材に大きな力がかかっている場合, その部材には体積を与えなければならない. したがって, そのような部材にはルール 1 を適用すべきではない.

そこで, 部材が座屈制約を破った後, ある任意の区間で座屈制約に対する余裕の増減を判別する方法を用い, なおかつ部材の軸力の大きさを考慮に入れ, 新たに資源削減ルールを提案する.

[ルール 3] ある一定の区間で, 制約条件に対する余裕の大きさを比較し, かつ部材の軸力の大きさを考慮しルール 1 を適用するか否かを判断する. もし, 初期値の段階で制約条件を破っている場合は, 一度制約条件内に移動させ, その後の制約条件に対する余裕の増減で判別する.

このルール 3 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用し, 4.2.3 で述べた, 本来断面積が減少すべきではない部材と減少すべき部材が分類されるかどうかを検証し, また, 4.2.5 で提案したルール 2 と比較する.

4.2.7 改良したルールの適用

4.5.3 で提案した資源削減処理における新しいルール, ルール 3 を Fig. 1 に示す 8 節点 14 部材トラス構造物に適用する. 初期値は Fig. 2-3 に示した断面積分布をもつ初期値 1 および 2 を使用する. 繰り返し数 1000 回で得られた収束解の断面積分布を Fig. 12 に示す. また収束解を得るまでの体積履歴を Fig. 13 に示す.

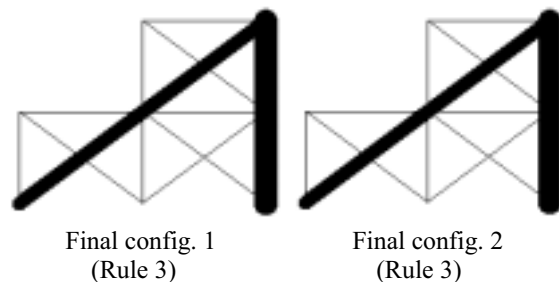


Fig. 12 Converged solutions (Rule 3).

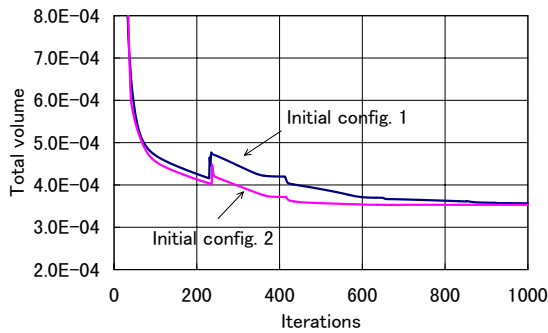


Fig. 13 Histories of the total volume of the structures during the iterations (Rule 3).

まず, Fig. 13 から, 初期値 1 および 2 とともに繰り返し数の初期の段階で総資源量である総体積の大きさが急速に減少し, その後, 緩やかに減少し, 発散することなく収束していることがわかる. また, 収束時の体積の大きさは, 初期値 1 では $3.566 \times 10^{-4} m^3$, 初期値 2 では $3.530 \times 10^{-4} m^3$ であった. 初期値 1 および 2 における体積の大きさでは, 約 0.8% の相違があった. この大きさはきわめて小さい値であり, 収束解 1 および 2 とともに同様の断面積分布となった. また, Fig.12 で示した断面積分布から収束解 1 および 2 とともに同様の断面積分布となっていることが確認できる. またこのルール 3 を適用した結果, 収束解 1 および 2 とともに, きわめて良好であるといえる. Fig.12 に示した断面積分布をみてわかるように, 部材番号 3, 7 および 12 の部材の断面積が減少し, かつ 4.2.5 節で述べた問題点をも解消し, 従来のアルゴリズムで問題であった特異な制約条件の影響を改善している.

5. 結 論

本論文では, 特異な制約条件に対して, 離散構造物の最適設計に対して提案された並列計算機のための最適化アルゴリズムである資源追加削減法を改良し, 連続変数非線形最適化問題である 8 節点 14 部材トラス構造物に適用した. 得られた結論は以下の通りである.

1. 従来の資源追加削減法のアルゴリズムでは, 良好な収束解を得ることができなかった. その原因は資源削減処理において, 制約条件外にある設計点を一律的に制約条件内に移動させるからである.
2. 制約条件の中には, 収束解に悪影響を及ぼす特異な制約条件があり, この特異な制約条件とは, 設

計変数の感度の大きい制約条件のことをいう. しかし, 必ずしも悪影響を及ぼすのではなく, 問題の条件が変化することにより収束解に悪影響を及ぼさない場合もある.

3. 特異な制約条件に対して, 制約条件外にある設計点を制約条件内に移動させず, そのままにしておくという, 従来の資源削減処理に新しいルールを提案し, 適用した結果, すべての要素に適用するのではなく, 適用するものと適用しないものを分類することが必要である.
4. 要素の分類方法として, 制約条件に対する余裕の推移によって分類する方法を用いた結果, 一部, 良好な収束解を得ることができなかった. したがって, 制約条件に対する余裕の増減によって分類する方法だけでは, 要素の分類はきわめて困難である.
5. 制約条件に対する余裕の増減に, その要素に関する知識における重要度を加えて要素を分類する方法を用いた結果, きわめて良好な収束解を得ることができた.

なお, 本研究の一部は同志社大学学術奨励研究費によって行われた. ここに記して謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) M.Miki, M.Furuichi, Y.Watanabe "Smart Distributed Minimization of the Volume of Discrete Structure" Proc, AIAA, SDM Conference, pp.2344-2352 (1996).
- 2) Mitsunori Miki, Tomoyuki Hiroyasu, Taijyu Ikeda "Parallel Distributed Optimization by Resource Addition and Reduction", ISHPC, High Performance Computing, Lecture Notes in Computer Science 1615, Proc. Second International Symposium, ISHPC99, pp.194-205 (1999).
- 3) 池田大樹 "資源追加削減法における追加微小資源パラメータの決定" 日本機学会第 11 回計算力学講演論文, pp47-48 (1998).
- 4) 平井一男, 水田洋司, 内容保, 「構造力学入門」(森北出版株式会社, 東京, 1997) pp.78.
- 5) 宮本祐, 「構造工学」(技報堂出版株式会社, 東京, 1994) pp.37.