

大型溶接構造物の構造最適化設計

Structure Optimization Design for Large-Scale Welded Structures

田中 明 齊藤 和宏 高木 圭介

TANAKA Akira

SAITO Kazuhiro

TAKAKI Keisuke

最近の製造業では、早く、安く、しかも高品質な製品開発が望まれている。これらの顧客ニーズにすばやく対応するためには、実績をベースとした従来型の設計では限界があり、シミュレーション技術を用いた新しい設計手法が必須である。この新しい設計手法のベースの一つとなるものが、構造最適化設計である。当社では、エネルギー機器を中心とした大型構造物を対象として様々な構造最適化設計を進めており、構造物の軽量化、コンパクト化、開発期間の短縮に大きな効果を上げている。

Particularly in recent years, shorter delivery times, lower prices, and higher quality products have been increasingly demanded by manufacturing industries. The conventional reliance on experience and intuition is insufficient for prompt responses to these severe customer requirements. Rather, simulation models have become necessary. The basis of this new design simulation is the structure optimization technique.

Toshiba is making advances in structure optimization design using simulation, centering around energy equipment. Significant results have been achieved in reducing structural weight, as well as shortening design time and realizing greater compactness.

1 まえがき

当社では数年前から、構造最適化設計を用いて火力機器、水力機器、変電機器、原子力機器などの構造合理化を進めている。これらの機器は大型の溶接構造物が多用されており、複雑な構造である。一方、これらの機器は長年にわたり実績主体に構造適正化が進められてきたことから、単純な構造最適化設計を適用しても軽量化などの効果を上げるのは難しい場合が多い。また、適用機器によってはその最適化目的や制約などがばらばらであり、様々な最適化設計をその機器ごとに有効に活用しているとは言い難い。

ここでは、各種の最適化手法の特性を生かし、効率的に組み合わせた最適化システム適用により、従来は困難であった大型溶接構造物の構造最適化が可能となった設計手法について述べる。

2 構造最適化の種類

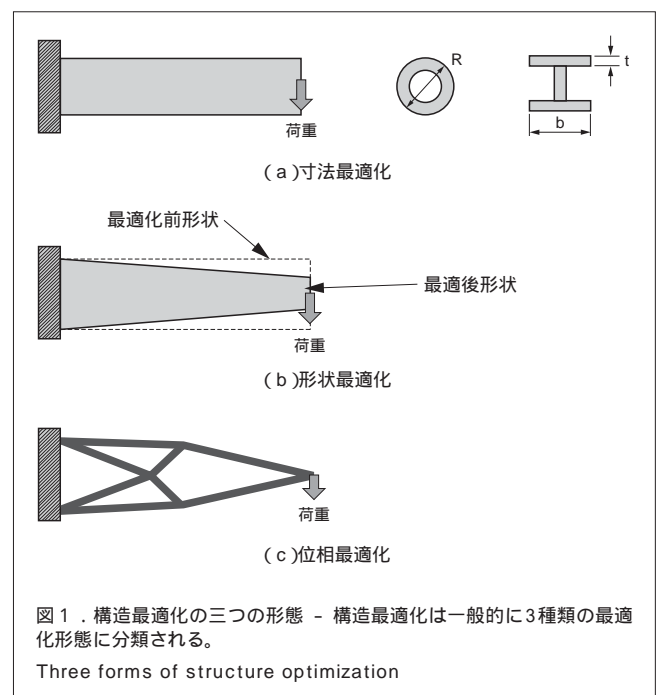
一般的に構造設計における最適化問題は数理的に次のように表される。

$$W = f(X) \quad \text{Min(又はMax)} \quad (1)$$

$$\text{ただし,} \\ g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$h_j(X) = 0 \quad j = 1, \dots, k \quad (3)$$

ここで式(1)は目的関数を表し、例えば最適化対象を重量最小化したいなどの場合は、目的関数を重量 W の最小化と定義し、 X は板厚や寸法などの変化させたい値で設計変数となる。式(2)(3)は制約条件を示すものであり、例えば、 $g_j(X)$ 、 $h_j(X)$ は構造物の変形や応力が一般的である。



次に、構造最適化の形態について簡単に述べる。構造最適化は一般的に、寸法最適化、形状最適化、位相最適化の3形態に分類される。例えば、図1に示す梁(はり)構造の場合を例に説明する。寸法最適化は、形状は一定で直径や幅、板厚などの寸法を変化させて最適化を図るものである。形状最適化は、形状と寸法を変化させて最適化を図るものである。位相最適化は、穴をあけたり自由な形に変化させて最適化を図るものである。

これらの手法のうち位相最適化は設計初期段階の形状を決定する場合や、現状とまったく異なった形状を求めたい場合に用いられる。寸法・形状最適化は従来までの製品に対する重量削減に有効であり、設計の中間又は後工程に用いられる手法である。従来実績を重視するエネルギー機器においては各種の最適化手法のなかでは寸法・形状最適化を用いることが多い。

3 構造最適化の適用動向

図2は第4回最適化シンポジウム2000(日本機械学会主催、OPTIS2000東京、2000年10月)における業種分野別の発表件数割合⁽¹⁾を示したものである。これによれば自動車に関する発表がもっとも多く、ついで航空機の順になっている。自動車及び航空機は様々な部品から構成されているとともに、対輸送コスト(燃料費)と重量などの関係が重要であり、輸送コストの低減のためには軽量化が必要不可欠である。したがって、重量削減に大きな効果を上げる最適化手法の適用が進んでいる。また、土木関連では耐震壁、道路橋げたなどに用いられ、家電関係ではCDプレーヤ、携帯電話に適用されている。

エネルギー機器をはじめとする重電機器については、自動車業界と比較して最適化設計の適用例が少なく、風力発電機固定子に適用された事例のほかはない。これは大量生産品と火力、水力、原子力機器といった単品生産品との相違と考えられる。また、補強が複数設置されているため、複雑で

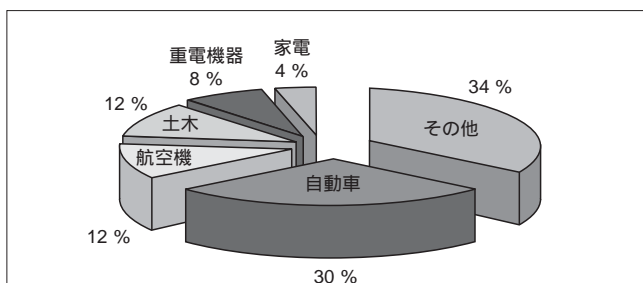


図2. 各業種別の発表件数割合 - 発表における解析対象物を分類したもので、自動車に関する発表件数が増え、航空機、土木の順で件数が減少している。

Presentation rate by industrial classification

かつ大型な溶接構造物が多いためと考えられる。特に、補強が設置された大型溶接構造物を最適化する場合、補強の構成、寸法及び設置位置、本体構造など最適化対象とする設計変数が多くなり、単一な最適化手法を用いての適用は困難なものとなる。

また、溶接構造物では、補強形態の最適化とともに、補強を省略し溶接工数低減を狙う場合も多く、製品ごとに最適化する目的が異なり、最適化適用の困難さを助長している。

4 当社における構造最適化の取組み

大型溶接構造物へ構造最適化を適用し効果を上げるためには、前項で述べた問題点をクリアにする必要がある。具体的には、各機器にもっとも適した最適化手法を選択することと、各手法を効率よく組み合わせて適用することが重要である。

当社ではこれらに対応するため、統合構造最適化システムを構築し、実機器への適用を進めている。システムの全体概要を図3に示す。

このシステムは機器形状データを三次元CADデータで受け取り、基本的にCADデータから解析モデルの作成を行う。このデータを用いて構造最適化を行うが、まず機器への最適化手法の選択と適用方法を決定する。すなわち機器形状(大きさ、補強の有無)、最適化の目的(重量軽減、補強削減など)、外力が加わる荷重条件などにより、もっともその条件に適した最適化手法を選択する。その後、感度解析を実施し、目的関数(重量など)と各設計変数(板厚、寸法)との関係を求める。その後、重量削減に影響する変数、しない変数を選択した後、実際の構造最適化を実行する。この方法の特長は、最適化前の感度解析によって最適化する変数が絞れる

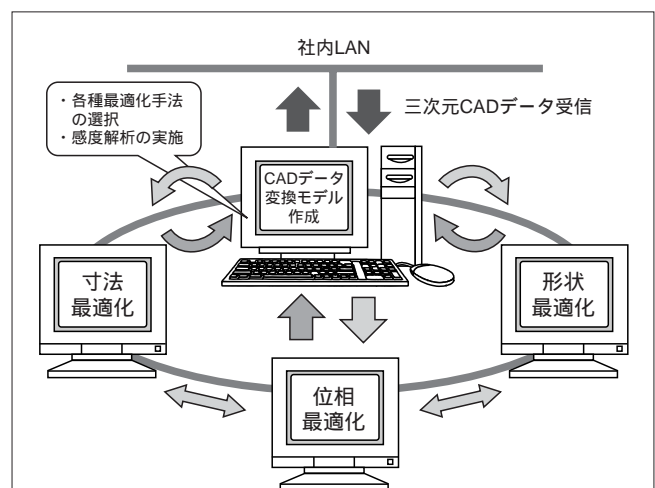


図3. 統合構造最適化システム概要 - 三次元CADデータにより形状データを受け取り、3形態の最適化手法を組み合わせ最適化を実施する。
Integrated structure optimization system

ため、複雑な構造物においても、最適化を効率的に実施することが可能な点である。また、図3に示すように、各最適化手法間は相互にデータの授受が可能であるとともに、最適化手法の選択時に各手法を組み合わせた解析が可能である。そのため、対象機器の最適化目的に合わせて、多段階の最適化解析の適用が可能となるものである。

5 大型溶接構造の適用例

5.1 蒸気タービンの復水器水室

以下に、統合構造最適化システムを用いた設計最適化の一例を示す。これは溶接構成の補強構造を簡略化する目的で進めた解析例⁽²⁾で、対象機器は蒸気タービンの蒸気を冷却する復水器水室である(図4)。図5は復水器正面の下部構造で、図に示す数字は、この解析で設計変数とした溶接補強構成の部品番号(No.1~4)を示す。ここでは最適化解析前に、まず各部品の板厚変化と設計における許容値(ここでは応力及び変形値)との寄与率を求める感度解析を実施した。図6ではこの結果を、縦軸に変形値と板厚との応答感度、横軸に部品番号(No.1~4)としたグラフで表している。つまり応答感度が低い(許容値に与える影響が少ない)部品はNo.1,2であり、部品No.3がもっとも影響が高い(許容値に与える影響が大きい)結果を示した。したがって、この部品

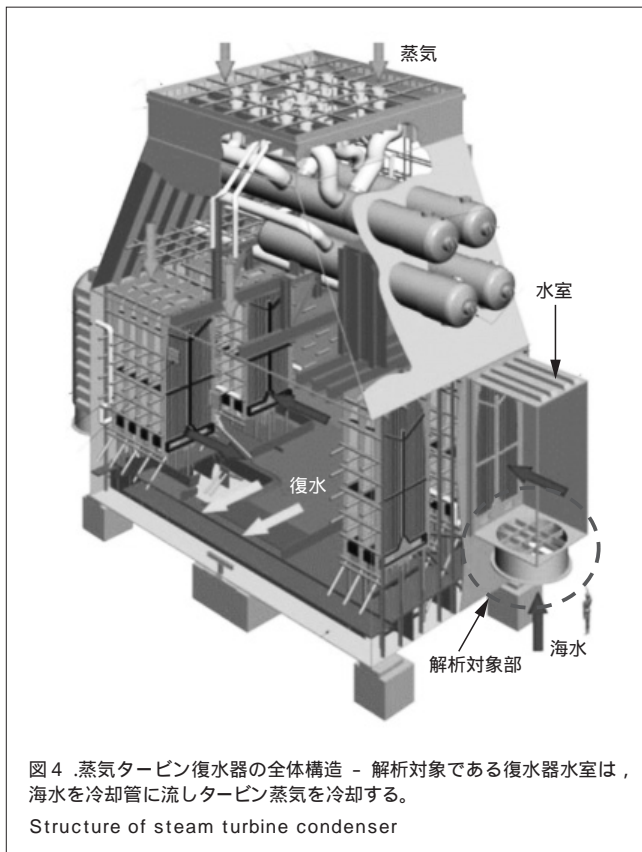


図4 .蒸気タービン復水器の全体構造 - 解析対象である復水器水室は、海水を冷却管に流しタービン蒸気を冷却する。
Structure of steam turbine condenser

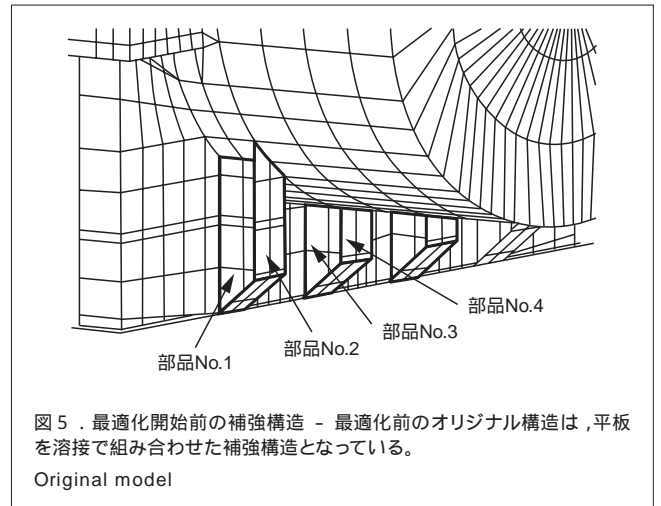


図5 .最適化開始前の補強構造 - 最適化前のオリジナル構造は、平板を溶接で組み合わせた補強構造となっている。
Original model

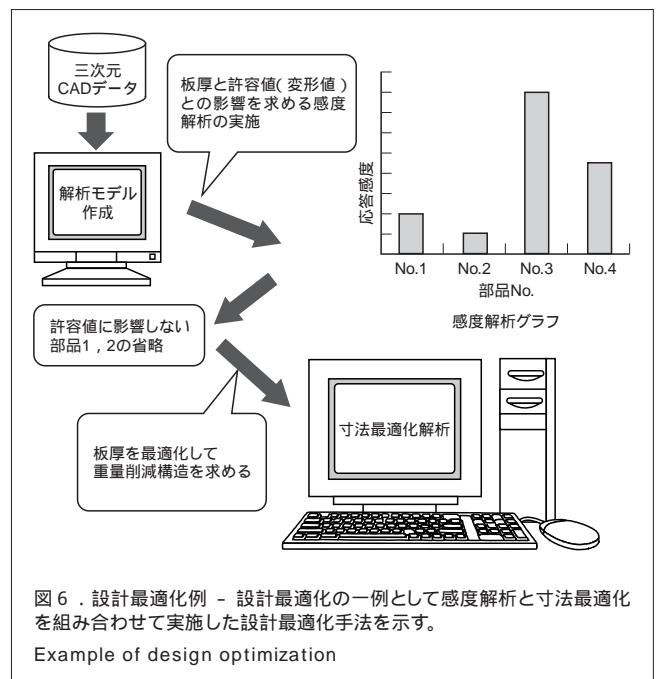


図6 .設計最適化例 - 設計最適化の一例として感度解析と寸法最適化を組み合わせて実施した設計最適化手法を示す。
Example of design optimization

No.1,2を除いて最適化する部品を絞り込む。更に、溶接工数を削減するためにもっとも影響度が高い部品No.3だけに注目し、最適補強寸法を求めるため、部品No.3だけの部分モデルを用いて解析を実施した。最適化解析は、実験計画法と有限要素法を組み合わせた寸法最適化解析⁽³⁾を実施した。すなわち補強高さ、厚さ、設置位置をパラメータとした各組合せ条件を実験計画法で作成し、その組合せごとに有限要素法で解析し、その結果を統計的に処理して最適値を求めた。最適化後の最終補強形状を図7に示す。このような最適化設計により、復水器の水室の重量を28%、溶接工数を20%削減することが可能となった。

5.2 変圧器タンク構造

変電所などで使用される変圧器の内圧解析時タンク変形分布を図8に示す。このタンク構造は、真空引きによる外圧

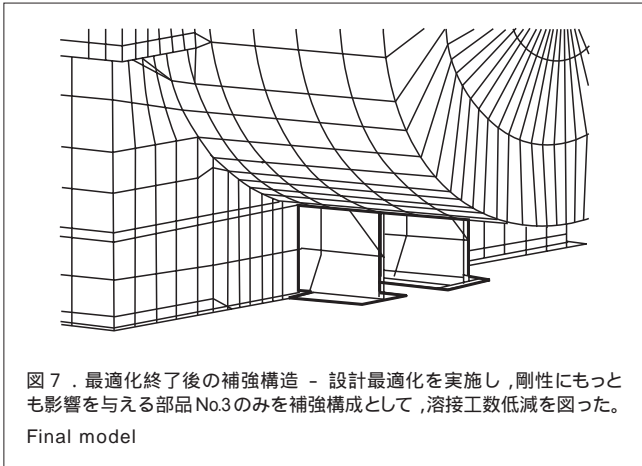


図7．最適化終了後の補強構造 - 設計最適化を実施し、剛性にもっとも影響を与える部品No.3のみを補強構成として、溶接工数低減を図った。
Final model

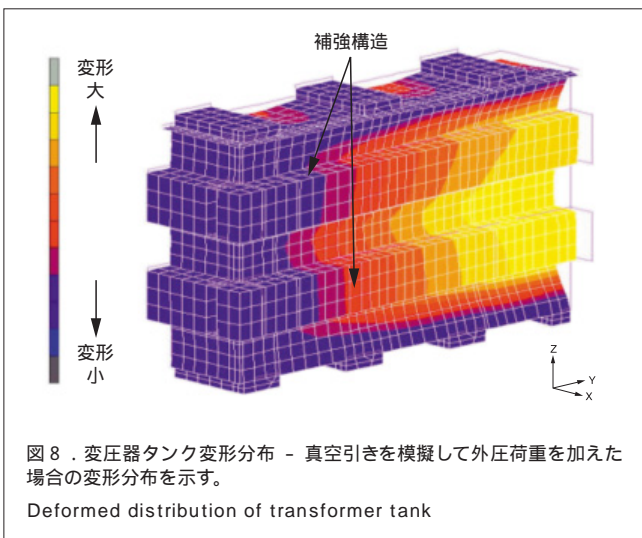


図8．変圧器タンク変形分布 - 真空引きを模擬して外圧荷重を加えた場合の変形分布を示す。
Deformed distribution of transformer tank

に耐えるように、外壁にコの字型の溶接補強構造を設けている。最適化目的は、様々なタンク寸法に合う最適な補強寸法の決定である。また、補強構成は従来構造と同じ構成とするため、感度解析は用いず、直接に実験計画法による寸法最適化のみを用いた。特にこの解析では、後の設計工程でこの最適化結果を利用するために、変形と各補強寸法との近似推定式作成に重点を置いた。また、対象の実機タンクの長手方向長さは約7m～10mであることから、変数となるタンク寸法幅を3等分に分けて解析し、寸法変動範囲を狭くすることによって解析精度向上を狙った。統計処理によって得られた設計近似推定式の例を図9に示す。推定式はタンク変形値を求めるもので、補強の長辺長さ、タンク高さなどを変数とし、a～iは解析で得られた定数である。この推定式を用いることによって、タンク寸法が変化した場合においても、補強構造の寸法を数値解析などに頼ることなく簡便に求めることが可能となり、設計工数の低減を達成した。

5.3 タービン発電機ブラケット

タービン発電機ブラケットの最適化解析例を図10に示す。

$$\text{推定値(変形)} = a - b \times X1 + c \times X1^2 - d \times X2 + e \times X2^2 + f \times X3 + g \times X3^2 + h \times X4 + i \times X4^2$$

X1: 長辺長さ X2: 短辺長さ
X3: タンク高さ X4: 補強高さ

図9．タンク変形近似推定式 - 解析結果を統計的に処理し、タンク変形を各変数で構成し、近似式として表した。

Approximation equation for tank displacement

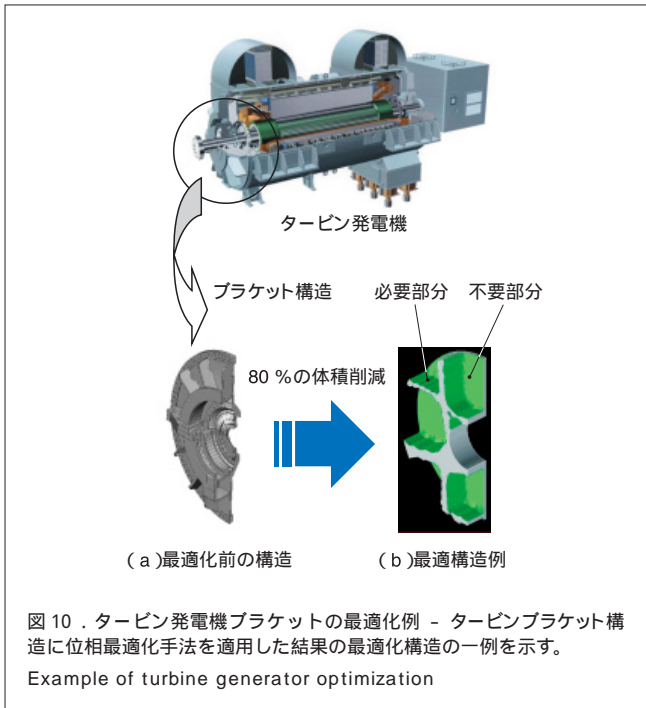


図10．タービン発電機ブラケットの最適化例 - タービンブラケット構造に位相最適化手法を適用した結果の最適化構造の一例を示す。

Example of turbine generator optimization

この部分は内部の圧力と、タービン発電機の回転子の重量が加わる部分で、強度上重要な構成要素である。

このブラケット構造に対して、目的関数を重量最小化、制約条件を内圧と自重による変形とし、設計変数を各部品板厚とした形状最適化と、位相最適化解析を実施した。形状最適化は、各部品を一つの設計変数として定義できるベースベクトル法^{(4),(5)}を用いた。具体的には、各部品の板厚変化と応力・変形を求める感度解析を実施した後、その結果に基づいて、部品を絞り込んだ最適化解析を実施した。この形状最適化解析によって、一部の部品を省略しても他部の部品厚さを調整することによって、許容変形及び応力を満足する結果が得られ、最大で20%の重量削減構造を得た。

ただし、この形状最適化は現状構造に対して適用されるため、板厚を減らしたり、不要な部品を省略したりといった最適化は可能となるが、最適な補強位置や補強構成を求めることができない。そこで位相最適化解析を用いて、従来構造とまったく違った構成についての検討を試みた。解析は、ブラケットに設置されている補強高さなどを含んだ厚肉半円

筒と仮定して行い,その位相最適化結果の一例を図10に示している。厚さ方向にリブ形状として残っているのが剛性上必要な部分であり,それ以外の部分については不必要な部分となる。

この結果,応力と変形を満足したなかで剛性を保持することによって,80%の体積削減を達成した最適形状を求めることができた。ただし,それらの形状が必ずしも製造しやすい構成であるとは言えない。したがって,得られた位相最適化の結果を基にして形状最適化解析を実施し,各部品の最適形状を求めることが重要なポイントとなる。すなわち,位相最適化によって重量を大幅に削減する新たな形状を決定し,その結果を基にして,形状最適化によって詳細形状を決定する。この手法を用いれば,重量を大幅に削減し,かつその後の設計・製造が容易となる詳細な最適形状を得ることが可能となる。

6 あとがき

当社は統合構造最適化システムを用いて,大型溶接構造物の重量削減や工数低減を図るとともに,設計最適化についての検討を進めてきた。今後は大型構造物に限らず,半導体レベルの微小部品から他分野機器への幅広い適用拡大を図る予定である。また,設計工程での構造最適化のみならず,製造工程においても構造最適化を適用し,早く,安く,高品質といった厳しい顧客ニーズに迅速に対応していく所存である。

文献

- (1) 本山恵一,ほか.“サスペンション設計用支えシステム”.第4回最適化シンポジウム講演論文集,日本機械学会.2000-10,p.117-121.
- (2) 田中 明,ほか.“重電機器溶接部への構造最適化手法の適用”.日本機械学会材料力学部門講演会論文集.19,10,2000,p.385-386.
- (3) 柏村孝義,ほか.実験計画法による非線形問題の最適化.朝倉書店,1998,156p.
- (4) 趙 希禄,ほか.“ベースベクトル法を用いた三次元構造の形状最適化”.Dynamics and Design Conference '99講演論文集.日本機械学会.1999,p.162-172.
- (5) 趙 希禄,ほか.“静的な制約条件をもつ三次元板シェル構造の振動特性最適化”.Dynamics and Design Conference '99講演論文集.日本機械学会.1999,p.139-142.



田中 明 TANAKA Akira

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主務。エネルギー機器構造物の構造最適化業務に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



斉藤 和宏 SAITO Kazuhiro

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部主務。エネルギー機器構造物の構造最適化業務に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



高木 圭介 TAKAKI Keisuke

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 金属・セラミックス材料開発部。エネルギー機器構造物の構造最適化業務に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center