

# かたちソリューション® —構造軽量化のための5つの改良視点と具体例—

## “Katachi” Solution —Five Approaches for Weight Reduction of Structures and Some Examples—

半谷 公 司\*  
Koji HANYA

清水 信 孝  
Nobutaka SHIMIZU

中安 誠 明  
Nariaki NAKAYASU

### 抄 録

日本製鉄(株)は、建築構造分野で高度化してきた設計技術に基づく構造改良ソリューションを幅広い分野へ展開している。構造や部材の“かたち”に注目し、合理的な鋼材利用を実現するソリューションを提供する取り組みを“かたちソリューション®”と名付けている。かたちソリューション®の検討プロセス、変形モードの分離と分析の考え方、5つの改良視点を、具体的な事例をもって紹介する。

### Abstract

Nippon Steel Corporation has been widely applying the design technology of light-gauge steel structures developed through the R&D for building structures to a large variety of steel structural systems in many fields. Since better solutions for effective utilization of steel can be proposed by controlling shapes, we call the technology the “Katachi” solution. “Katachi” is a Japanese word broadly meaning member shapes and structural configurations. This report shows the process of finding better solutions, the concept of analyzing deformation and five approaches for development with various examples.

## 1. はじめに

日本製鉄(株)は、鉄鋼材料の開発と並行して、その利用技術の開発にも注力している。特に薄板構造の設計技術については、板厚1.0mm前後の鋼板を低層建築の骨組として活用する技術と、その普及や法令化のための取り組みを通じて体系化してきた。これらの考え方や技術を建築分野に限定せずに、家電製品やOA機器をはじめとする様々な構造体へ展開する取り組みを、“かたちソリューション®”と称して、その検討例や可能性について、前報<sup>1)</sup>で紹介した。2020年には、政府からカーボンニュートラルへ向けた大きな政策転換が示され、省材料化(構造の軽量化)が改めて重要なテーマになろうとしている。様々な構造体を扱う需要家各位においても、軽量化に向けたいっそうの工夫が求められているものと推察する。そこで、前報<sup>1)</sup>に続き、構造軽量化の手段として、かたちソリューション®を取り上げ、その考え方や進め方をより具体的に紹介する。

## 2. かたちソリューション®の目的

かたちソリューション®は、かたちの改良により軽量化を実現する技術群であり、構造体の重量を増やさずに構造性能を高めること、あるいは構造性能を保ちつつ軽量化することを目的とする。ここで構造性能として、“強度”と“剛性”の二種類を定義し、図1のP- $\delta$ 関係図の中で説明する。縦軸に示すPは構造体への作用力(N)を、横軸に示す $\delta$ は変形量(mm)をそれぞれ示す。また、①②③で示されるポイントの縦軸の値が強度の最大値であり、 $\alpha$ 、 $\beta$ で示される勾配が剛性である。強度を①から②へ引き上げることは、鋼材の材料強度を高めることにより可能である。一方、剛性を $\alpha$ から $\beta$ へ引き上げることができない鋼材はなく、構造を構成するパーツのサイズ(板厚、寸法)を割り増す必要がある。サイズアップを極力せずに、構造体の剛性を引き上げる対策の導出が、かたちソリューション®の主な目的である。なお剛性を高めて変形を抑制することで、座屈強度や疲労強度を改善することも期待できる。

\* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

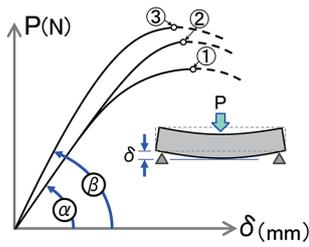


図1 二種類の構造性能（強度と剛性）

Two types of structural performance (strength and stiffness)

### 3. 検討プロセス

かたちソリューション®の主な検討フローを以下に示す。

#### 3.1 抽象化モデルの構築

計算機やソフトウェアの進化により、複雑な構造体そのままを対象にした数値シミュレーション (CAE) の実行や、デジタルツインの考え方も一般化しつつある。構造性能の評価のみ行う場合は、複雑な全体系を対象に計算した方がよいといえる。一方、構造体の大幅改良を目指す検討においては、複雑全体系のまま計算すると、改良の対象や方針を見出せないこともある。そこで、かたちソリューション®では複雑全体系を対象とするだけでなく、構造の特徴を抽象化して取り出したモデル（抽象化モデルという）を対象に検討を進めることを基本とする。具体的な計算は、汎用的な有限要素解析 (FEA) と、繰り返し計算を伴う進化的計算<sup>2,3,4)</sup>などをベースに、日本製鉄が独自開発した設計ツール群を活用する。

#### 3.2 部分構造の抽出と“変形分離”

抽象化モデルを対象に構造解析を行うと、構造体を構成する要素の中で、全体構造の剛性に寄与する部分構造（部品、要素）がみえてくる。どの部分構造が貢献するかは、検討対象により千差万別であるが、例えば、図2に示す箱状構造に捩じり力が作用する場合は、側面のパネル（側板）が鍵になることがある。この例では、側板を検討対象として抽出し、面外への曲げと、面内のせん断の二種類の変形モードが生じていることを分離して理解し、後者が支配的であることを把握することにより、側板の面外への曲げ剛性を高めることが、全体構造の性能向上策のひとつになることを導出できる。かたちソリューション®では、このような変形モードを分離して、改良方針を探る分析手法を“変形分離”と呼んでいる。

#### 3.3 5つの視点に基づく改良検討

構造体の特性を踏まえた改良策は様々あるが、かたちソリューション®では5つの視点に基づく検討を提案している。すなわち、[1]板厚組み合わせ、[2]断面形状、[3]フレーム配置、[4]接合点、[5]エンボス配置の5点であり、概要は

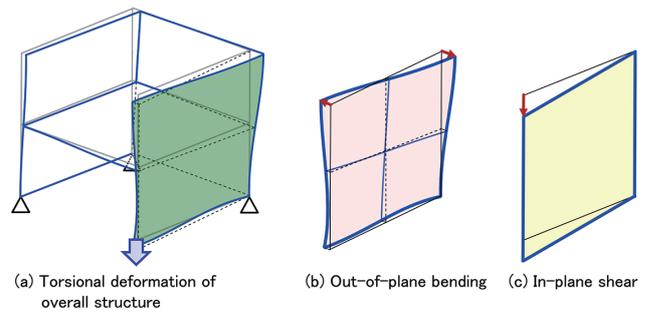


図2 抽象化モデルと部分構造（側板）の変形の一例  
Abstract model with clarified structural feature and deformation of substructure (side panel)

図3に示す通りである。次章では、それぞれの視点の考え方や事例を具体的に紹介する。

## 4. 5つの改良視点と検討例

### 4.1 板厚組み合わせ

形状を変えず構造要素の板厚を最適化する改良は広く一般的に行われている。長い箱状の構造（図4、箱梁と呼ぶ）を対象にした事例では、各要素の板厚を図3[1]の通りに変更することで、捩じれ剛性を約30%改善できる場合があることを確認している。この箱梁に生じる主な変形モードは、曲げ、せん断、捩じれ、反りの四種類である（図4）、せん断モード(d)が卓越する場合は、中央断面（図中A-B-C-D）が平行四辺形になろうとする変形を止める対策が必要であるが、その対策では捩じれモード(e)を止めることはできない。捩じれモードでは中央断面（図中A-B-C-D）はほとんど変形することなく、その回転が主となるからである。このように変形モード毎に対策が異なるため、変形分離は重要な役割を果たすことになる。

このような構造体の変形分離技術については文献5)を参照されたい。図5に示すように、設計者が任意に設定する断面iSAと、変形後の断面dSAの比較から、断面iSAの変形モードを抽出することができる技術である。

### 4.2 断面形状

部材の断面形状については、前報りでも紹介した図3[2]の八角形の事例が分かりやすい。前節の箱梁においても、変形分離の結果をふまえると、例えば、図6のような複数のオプションが考えられる。図中の短い矢印は、ねじやスポット溶接などによる接合点を示している。図6(a)-(c)のうちどれが良いかは詳細条件次第であり特定できないが、例えばelement1の左側の縦板が右側に倒れ込むような変形が顕著になる場合では、左角部（図6中の○で囲み示す部分）に注目した部分的な形状改良や、element1とelement3の組み立て方を変えるなど、いくつかの試行ができる。element1-3の全体的な変形、さらには各要素の局所的な変形モードを分離して検討することが重要である。

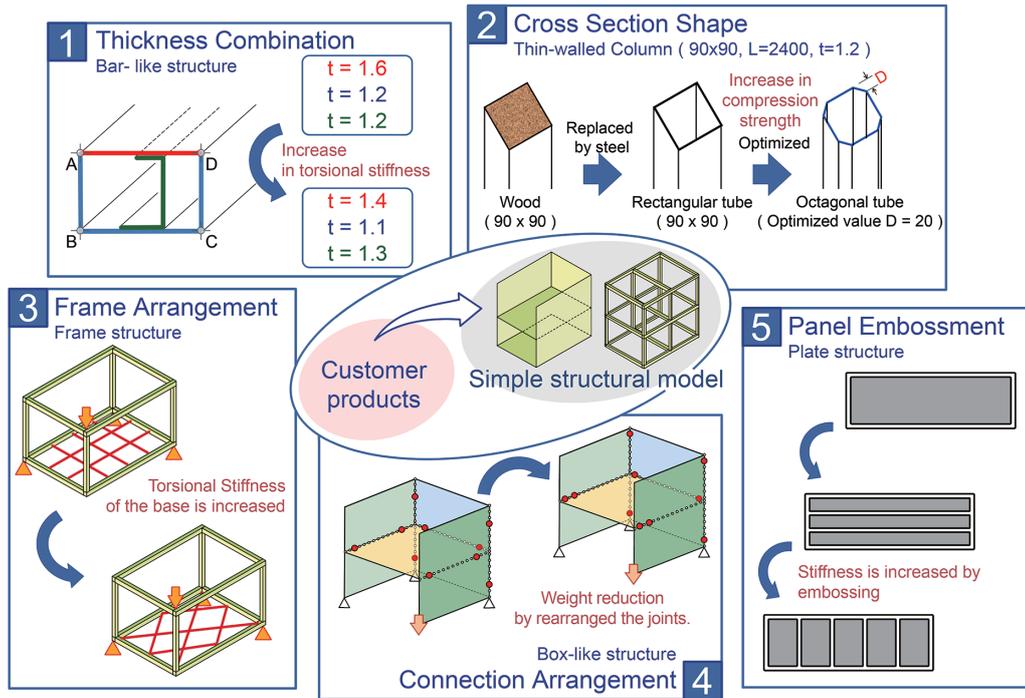


図3 かたちソリューション®における5つの改良視点  
Five approaches for improvement in the "Katachi" Solution

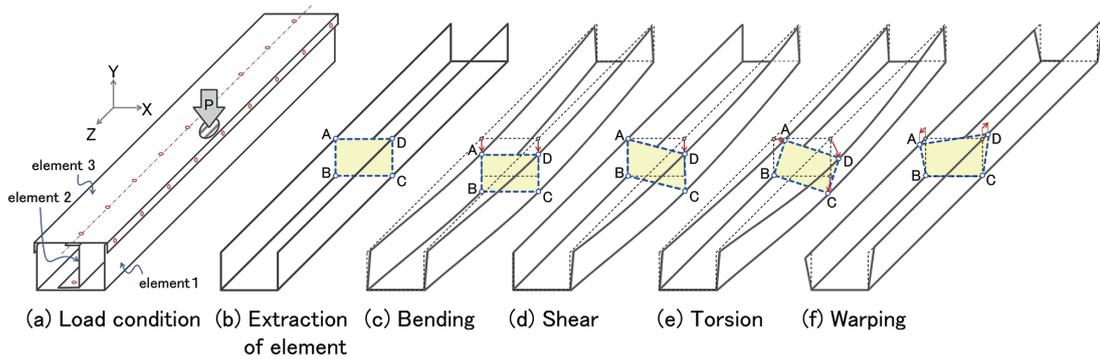


図4 箱梁の荷重条件と様々な変形  
Load conditions and multiple deformations

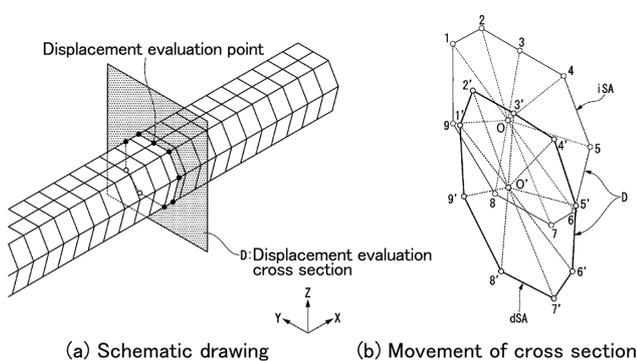


図5 構造の変形モードを把握する方法<sup>5)</sup>

Method to understand the deformation mode of the structure<sup>5)</sup>

断面形状改良の好例として、自動車のサイドシルを対象とした改良案<sup>6)</sup>を図7に示す。ピラー(図7(a)の鉛直部材)からシル(図7(a)の水平部材)への力の流れと変形モード

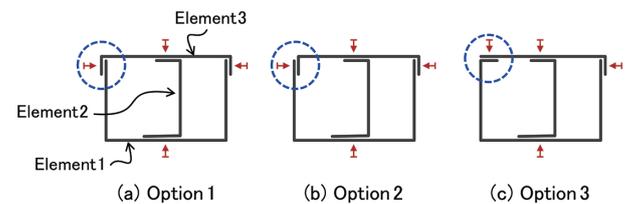


図6 箱梁の断面構成のオプション  
Configuration options of cross-section for long box-shaped member

の分析を通して、図7における(b)から(c)へ、すなわちシルの幅を狭く小さくすることで、シルとピラーの接合部の剛性を高くできることを見出している。

#### 4.3 フレーム配置

構造体の剛性を高めるための効果的な手段のひとつに、構造体の底面に配置される部品(ベースパネルという)の

捩じれ剛性を高める手法がある。前報<sup>4</sup>でも紹介したが、図3[3]に示すようなベースパネルを構成するフレームを斜めに配置する事例<sup>4</sup>が分かりやすい。この例では、特にフレーム断面がコの字型の場合に効果が大きくなる。コの字型では、図4に示す捩じれ(e)、反り(f)が生じやすいことから、剛性が極端に低下する傾向にある。図3[3]の例では、斜めに配置することで、フレーム同士がお互いの捩じれや反りを拘束しあうというメカニズムを活用している。

この事例からも分かるように、ベースパネルの捩じれ剛性を高めるためには、構成するフレーム単体の捩じれを止める策も有効である。それを実現するためには、コの字型のような開断面(open section)ではなく、パイプのような閉断面(closed section)を活用する方が良い。これは両者のサンパンンねじり定数や反りねじり定数を比較すれば理解できるので、それら定数を確認しながら設計することを推奨したい。なお図8のように、ベースパネル周囲の四辺は開断面で構成し、パネル内部に閉断面であるパイプを加工した円環を配置するような、両断面の特性を組み合わせた構成<sup>8,9</sup>の軽量化効率が高くなる場合があることも確認している。

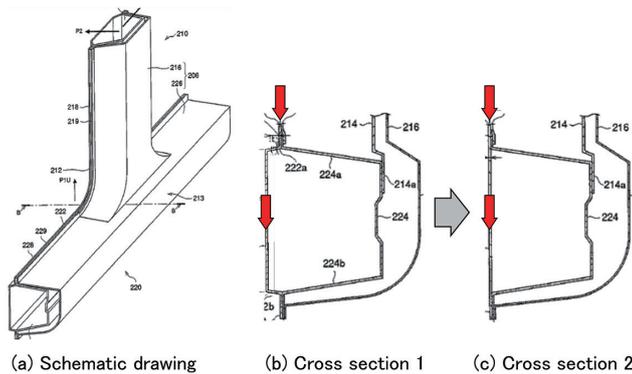


図7 自動車サイドシルの断面形状の改良案<sup>6)</sup>

Example of improvement proposal in the cross-sectional shape for automobile side sill<sup>6)</sup>

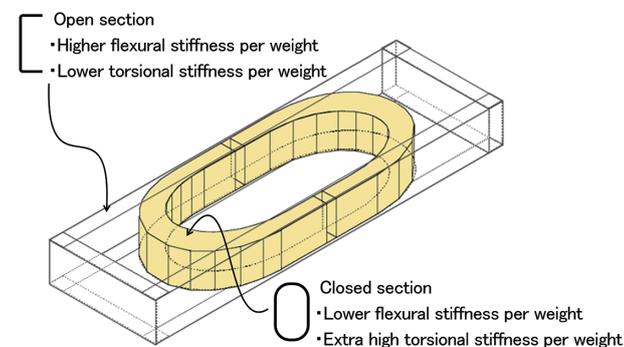


図8 開断面で四辺を構成されたベースパネルに閉断面である円環を組み込んだ事例<sup>8,9)</sup>

Example of combining open sections and closed sections in order to take advantage of the structural significance of both<sup>8,9)</sup>

#### 4.4 接合点

箱状の構造体では、図3[4]に示すような接合点の配置を改善することにより、特に捩じれ剛性を高めることができる。前報<sup>1</sup>でも紹介しているが、これはスチールハウスの耐震壁において、壁面材とスチール枠との接合点(ドリルねじの打設位置)を面材の四隅に集中させることで、壁のせん断剛性が高まるという知見を活用したものである。日本製鉄は数理最適化技術<sup>2,3,4)</sup>に基づく解析ツールを活用してそれら検討を行っており、複数の接合点が離散的に配置される箱構造においては、実用的な剛性改良策を得ることができる。

#### 4.5 エンボス配置

鋼材のヤング率は約205GPaであり、その値を大きく変えることは難しい。すなわち材料改良により、鋼板そのものの曲げ剛性や捩じれ剛性を高めることは現時点では残念ながらできない。これは鋼材の高強度化を妨げる一因にもなる。材料の高強度を活用して板厚を薄くした際に、薄くすることによる板の曲げ剛性低下、それに伴う振動特性の悪化、あるいは板座屈の発生が問題になるからである。この対策として鋼板に様々な凹凸加工(エンボスという)を施すことは、一般的かつ効果的な手法である。ここでは、エンボスの配置方向が改良効果に大きな影響を及ぼすことを紹介する。図3[5]に示す事例の解説を図9に示す。周囲に20mmのフランジを加工した平面寸法750×250のパネルに、500Pa(約50kg/m<sup>2</sup>)の等分布荷重を作用させた場合における変形の最大値を比較したものが図9である。板厚を0.8mmとした場合では、エンボスを長辺方向へ配置したパネルCより、短辺方向へ配置したパネルE1の方の変

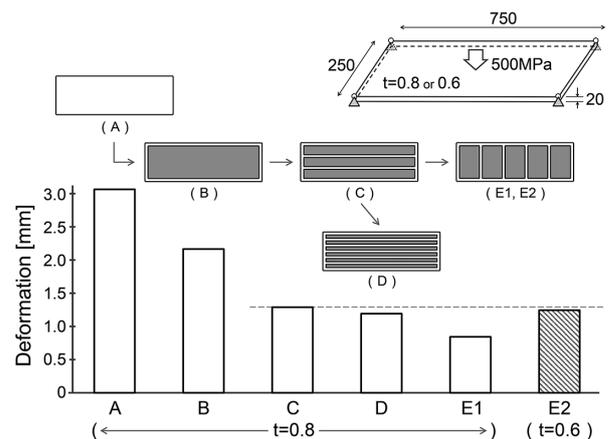


図9 エンボス配置の向きとたわみの関係

Relationship between the orientation of embossment and central deformation

- A: No embossment (t=0.8)
- B: Wide overall embossment (t=0.8)
- C: Three embossments along the long side (t=0.8)
- D: Six embossments along the long side (t=0.8)
- E1: Five embossments along the short side (t=0.8)
- E2: Five embossments along the short side (t=0.6)

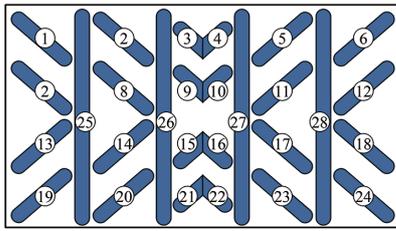


図10 試行検討用のエンボス配置  
Embossment arrangement for trial studies

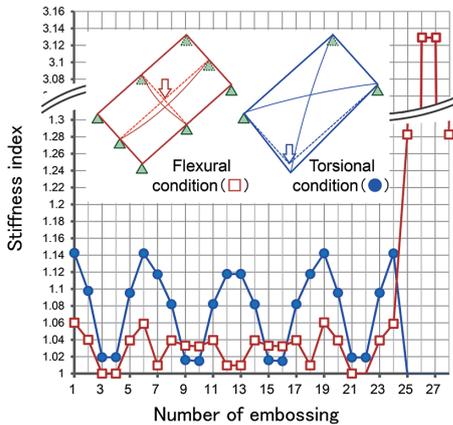


図11 剛性評価結果の一例  
Example of stiffness evaluation results

形が30%以上小さくなる事が分かる。またエンボスを長辺へ配置した板厚0.8mmのパネルCと、短辺へ配置した板厚0.6mmのパネルE2の比較から、両者の変形はほぼ同じである事が分かる。すなわちエンボス配置を90°回転させることで、曲げ剛性を保ちながら、板厚を0.8mmから0.6mmへ薄くできるのである。非常にシンプルな事例であるが、確実に効果を得られる方法であり、洗濯機<sup>10)</sup>やエアコン室外機などへの適用例がある。

内蔵部品をカバーするトップパネルやサイドパネルにおいては、自由なエンボス配置が可能となるが、多くの電装部品が固定される内部シャシーでは、エンボス配置は制限される。この場合は位相最適化ツールなどを活用することができるが、解析結果として得られる凹凸と改良効果の関係が分かりにくいことも多く、工夫が必要である。例えば、複雑にエンボスが配置されたシャシーを試行用にモデル化した事例を図10に示す。エンボスの効果は図11のように示すことができる。図の縦軸は剛性向上への貢献度を示す指標であり、変形の逆数の相対値としている。図11に示す中央に集中荷重が生じる曲げの条件 (flexural condition) では、短辺に配置した②⑥⑦の貢献度が非常に高いこと、また捩じれの条件 (torsional condition) では、①⑥⑯⑳のような斜めに配置したエンボスの貢献度が高いことが分かる。このような検討は、結果を見ると当たり前のように思われるが、これらを全て数値化して整理することが重要である。

またこれらの検討を通じて、曲げ力、捩じり力に対してバランスよく剛性を高めることができるチェッカー模様の

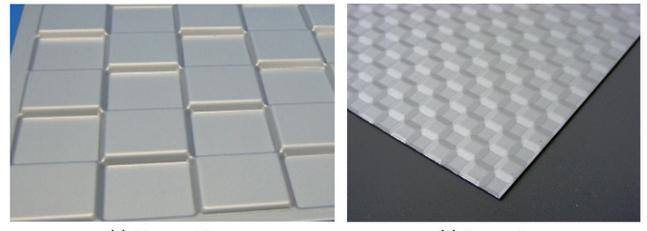


図12 チェッカーエンボスのプレス成形試作品<sup>11)</sup>  
Press forming samples of checker embossment panel<sup>11)</sup>

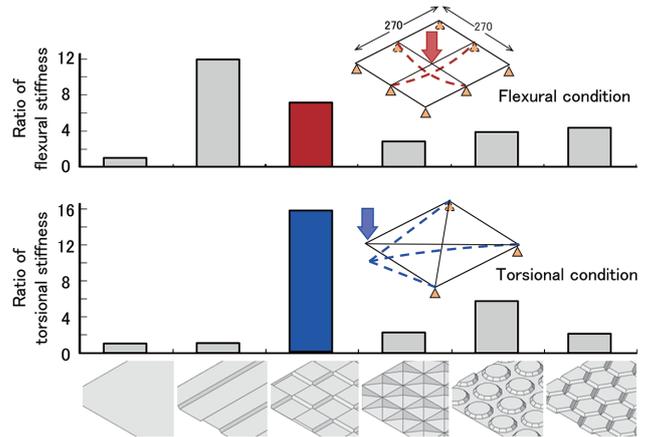


図13 曲げ剛性および捩じれ剛性の比較  
Comparison of flexural and torsional stiffness

エンボスパネル (図12)<sup>11)</sup>を提案している。その着想や形状特徴については前報<sup>7)</sup>でも触れているが、捩じれ剛性の改善効果が特に高く、他のエンボス模様と比較しても、その効果の大きさが分かる (図13)。

## 5. 構造実験技術

かたちソリューション®の基盤技術のひとつに、実現象を精度高く再現できる構造実験技術がある。日本製鉄は、荷重レベルで最大80MNに及ぶ大型のものから、図14に示す小さな構造要素やシャシーを評価できる小型のものまで様々な载荷装置を保有している。構造実験では、加える力の大きさや速さが注目されがちであるが、試験対象を試験装置へ合理的に固定する方法も重要である。この境界条件の設定こそが、構造実験においても、数値シミュレーションにおいても、実現象を再現するうえでの鍵となる。超高層ビル、低層住宅、大型橋梁、杭や矢板のような地中構造、自動車ホワイトボディ、OA家電筐体など様々な構造体を評価する中で蓄積されたノウハウを、分野を超えて相互に展開し活用することで、合理的な構造実験、ひいては実状を正確に再現した数値シミュレーションができるようになっていく。

## 6. おわりに

計算機とソフトウェアの発展により、構造体の特性は構造実験を行わずとも、数値シミュレーション技術 (CAE) に

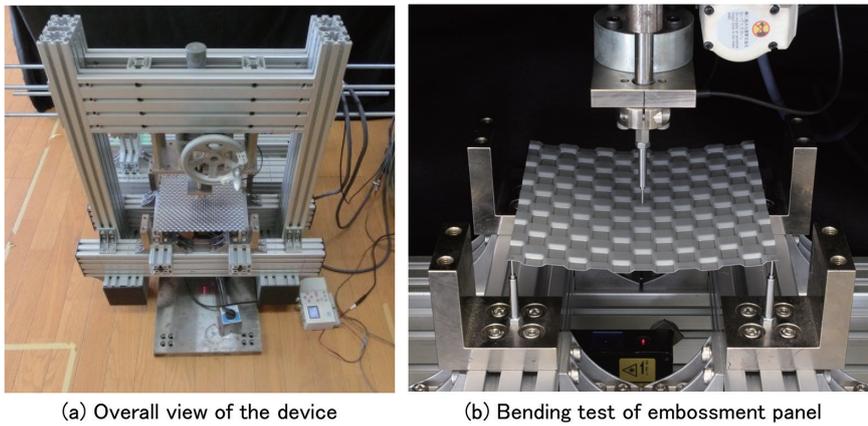


図 14 家電筐体の構造要素やシャシーの構造性能を評価するための小型試験装置  
Small test equipment for evaluating the structural elements of home appliance housings and the structural chassis

より評価できるようになっているが、CAEを活用しても、軽量化に資する形状改善案が自動的に得られるわけではない。個々の構造体の特性や荷重条件を考慮しながら、変形モードを分離し詳細に分析することによって、実現可能な改良案を導出できるようになるのである。数理最適化技術や人工知能を活用するとしても、それらを実務設計で扱えるようなツールへ組み上げ、具体的で有効な“解”へ繋げるためには、かたちソリューション®の中で提案する構造の改良視点を持っておくべきであろう。日本製鉄は、鉄鋼の素材技術と、かたちソリューション®をはじめとする多くの利用技術を合わせた総合提案力を、引き続き強化していく。

#### 参考文献

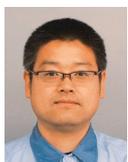
- 1) 半谷公司, 清水信孝, 中安誠明, 菅野良一: 新日鉄住金技報. (398), 83-88 (2014)
- 2) 清水信孝, 河合良道, 半谷公司, 藤内繁明, 原富志夫, 眞有信博, 高田豊文, 坂本二郎: 新日鉄住金技報. (410), 98-104 (2018)
- 3) 坂本二郎, 小林桂介, 北山哲士, 清水信孝: 座屈解析に進化計算を適用した薄板軽量形鋼造の断面寸法最適化. 日本機械学会論文集. 83 (854), (2017)
- 4) 清水信孝, 半谷公司, 高田豊文: 面外力(曲げ・ねじり)を受ける平面骨組の最適部材設計配置. コロキウム構造形態の解析と創生. 日本建築学会, 51-56 (2014)
- 5) 清水信孝, 河内毅: 構造体の部材における変形モード分析方法, 変形モード分析方法を用いた構造体の補強方法, 構造体の変形モード分析用コンピュータプログラムおよび記録媒体, 特許第 6319451 号 (2018)
- 6) 清水信孝, 野村成彦, 上西朗弘: 自動車車体の結合構造, 特許第 4943115 号 (2012)
- 7) 半谷公司, 清水信孝, 菅野良一: フレーム構造体および箱状構造体特許, 特許第 5532184 号 (2014)
- 8) 半谷公司, 佐藤浩一, 山崎達也, 今井健二: フレーム, 特許第 5240133 号 (2013)
- 9) 半谷公司, 佐藤浩一, 山崎達也: 車両用フレーム, 特許第 5392149 号 (2013)
- 10) 宮坂明博: 特別講演第 177 回春季講演大会渡辺義介賞受賞記念特別講演, ふえらむ. 24 (7), 22-26 (2019)
- 11) 清水信孝, 半谷公司: パネル, 特許第 4932968 号 (2012)



半谷公司 Koji HANYA  
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



中安誠明 Nariaki NAKAYASU  
鉄鋼研究所 鋼構造研究部  
鋼構造研究第二室 第二課長



清水信孝 Nobutaka SHIMIZU  
鉄鋼研究所 鋼構造研究部  
鋼構造研究第二室長