

技術論文

かたちソリューション®

“Katachi” Solution

半 谷 公 司*
Koji HANYA清 水 信 孝
Nobutaka SHIMIZU中 安 誠 明
Nariaki NAKAYASU菅 野 良 一
Ryoichi KANNO

抄 録

新日鐵住金(株)は、建築構造分野で高度化してきた薄板鋼構造設計技術に基づく構造改良ソリューションを様々な分野で展開している。構造や部材の“かたち”に注目し合理的な鋼材利用に資するソリューションを提供することから、この取り組みを“かたちソリューション®”と名付けている。低層住宅、家電製品、OA 機器、食缶、貨物コンテナ、船舶、太陽光システム等での具体的な検討事例を示し、かたちソリューション®の考え方、技術の広がり・可能性について紹介した。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal 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 as “Katachi” solution. “Katachi” is a Japanese word with broader meaning of member shapes and structural configurations. This report shows some of the activity examples on low-rise residential housing, electric home appliances, OA equipment, food cans, freight containers, ships and solar systems. Various approaches and potential of “Katachi” solution are introduced.

1. はじめに

新日鐵住金(株)は住宅建築分野で、1994 年よりスチールハウス(図1)をはじめとする薄板軽量形鋼造^{1,2)}の研究開発に取り組んできた。座屈や局部変形に係る構造的な課題を克服すれば、薄板ならではの形状メリットを享受できることから、幅厚比の大きな部材の捩じれ評価、座屈設計技術の研究開発を進め、構造的性と施工性を兼備する合理的な断面形状を持つ部材(図2)の実用化に注力してきた。更にこのような設計技術を、住宅構造³⁾から家電製品やOA 機器をはじめとする様々な分野へ展開してきた。かたちに注目し鋼材利用に対するソリューションを提供することから、この取り組みを“かたちソリューション®”と名付けている^{4,5)}。本論では、かたちソリューション®の考え方、具体的な検討例、技術の広がり・可能性について紹介する。

2. かたち改良の考え方

コンピュータシミュレーション技術(CAE)の発達により、構造実験に依存しなくとも、詳細な有限要素モデルを構築



図1 スチールハウス骨組
Skeleton of steel framed house

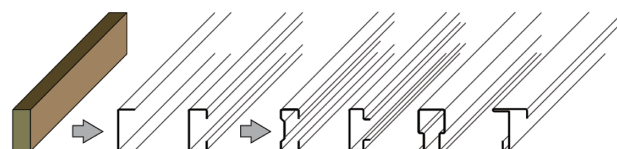


図2 様々な断面をもつ形鋼(木部材, 従来溝形鋼からの進化)
Various shapes using cold-forming technology (optimization from lumber and conventional steel member)

すれば、剛性や強度などの構造性能は精度良く予測できる。形状改良のための技術も様々あり、航空機や自動車の設計

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

では位相最適化技術⁶⁾等の高度 CAE 技術が活用されている。このような技術は特に鋳物のような密実部品の設計では非常に有用である。その一方で建築構造の設計では、設計フローを開示し、法令に合致していることを示す必要があるため、部材や構造をシンプルな棒材や骨組にモデル化する手法が採られてきた。このようなシンプルな構造モデルは、有限要素モデルに比べ評価精度は低くなるが、剛性や強度の発現機構が把握しやすくなる。かたちソリューション®は、比較的シンプルな力学モデルに基づいて構造メカニズムを把握・分析しながら、様々な数値解析や最適化手法を活用して、形状やディテールの改良策を導出するところに特徴がある。

3. かたちの具体的な改良事例と改良技術

かたちソリューション®の適用は、主に棒と骨組、板と箱、円筒の三種類の構造に大別できる(図3)。本論では分かりやすいシンプルな事例を挙げて、取組みの内容を紹介する。

3.1 棒材と骨組構造の改良

(1) 八角形化により局部座屈強度を高めた柱部材

角形鋼(角パイプ)(図4(b))の板厚を薄くすると局部座屈^{1,2)}が生じやすくなるため、図4(c)のような中間スチフナを設けて幅厚比を小さくする手法があるが、生産性は低下する。新日鐵住金はスチフナの代替として八角形(図4(d))にすることで幅厚比を小さくする改良策を提案している。例えば低層住宅向け角形鋼(□90mm×90mm、部材長2400mm)における、図4(d)に示す寸法D(mm)と中軸圧縮強度P(kN)との関係は、図5に示すとおりであり、軸圧縮抵抗を最大化できる板厚毎の最適寸法があることが

わかる。座屈発生メカニズム分析に基づくシンプルかつ有効な断面形状の改良策のひとつである。

(2) アルミニウム押出成形部材のスチール化

OA デスクの脚部材等では、図6(a)のような複雑な断面形状を有するアルミニウムが使われる。このアルミニウム部材の代替として、折り曲げ加工した四枚の薄鋼板要素を組み立てて構成したスチール部材を提案している(図6(b))。スチールはアルミニウムに対し、比重、ヤング率ともに約3倍であるため、アルミニウム部材と軸方向剛性が同等になるようにスチール部材を設計すれば、重量も同等になる。しかし、アルミニウム押出成形では、製造上の理由での最小板厚制限があるため、部材の要求性能に対し保有性能が過度になる場合もある。この場合では、板厚をより薄くできるスチールの方が、アルミニウムより軽い部材を提供できるようになる(図7)。

(3) 部材配置の改良により捩じれ剛性を強化した骨組

骨組の性能向上のためには、各部材の断面改良に加え、部材配置を改良する方法がある。図8に示すような骨組全体の捩じれ剛性を強化するには、底板の捩じれ剛性を高め

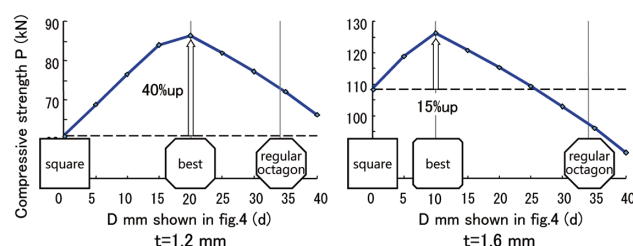


図5 角形鋼と八角形鋼の圧縮強度の比較
(□90mm×90mm, L=2400mm)
Comparison of compressive strength

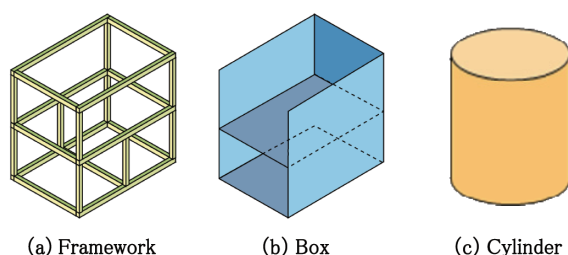


図3 シンプル構造モデルのイメージ
(a) 骨組構造, (b) 箱構造, (c) 円筒構造
Image of simplified models

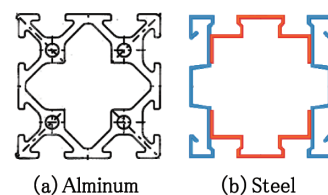


図6 部材断面図
(a) アルミニウム, (b) スチール
Sections of member

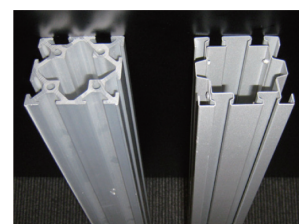


図7 アルミニウム(左)とスチール(右)
Aluminum (left) and steel (right)

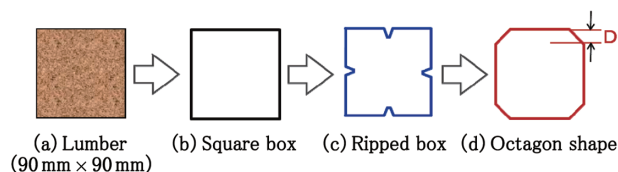


図4 木材から八角形鋼への展開
(a) 木材(90mm×90mm), (b) 角形鋼, (c) 中間スチフナ,
(d) 八角形鋼
Optimization from lumber and conventional steel member

ることがひとつの有効な手段となる。新日鐵住金は一般的な格子状フレーム（図8（a））よりも、菱形状フレーム（図8（b））の方が面外への捩じれ剛性が高く、特にフレームを構成する部材が溝形鋼のような開断面の場合では、その効果が大きくなるメカニズムを見出した。これら知見に基づき、需要家商品の底板形状に合わせた最適な部材配置を提案できる骨組配置最適化ツールを開発した。設計者が用意したグラッドストラクチャ[®]を遺伝的アルゴリズム[®]で最適化するツールである。位相最適化プログラムで配置改良のための自由な発想・ヒント（図9）を得た後に、骨組配置最適化ツールで各部材の断面形状や製造上の制約を考慮した、より具体的な部材配置を導出（図10）するという、両者を組み合わせた検討フローも可能である。

3.2 面材と箱構造の改良

（1）家電 OA 筐体における面材の要求性能の分析

建築物の屋根や壁では、折板（あるいは波板）と呼ばれる面材が利用される（図11、図12）。折板の断面形状は、

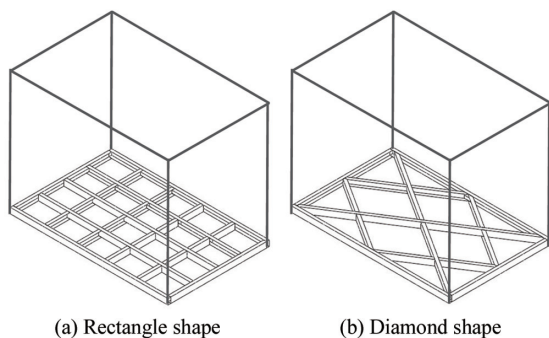


図8 骨組構造底板の骨組配置
(a) 格子, (b) 菱形

Frame arrangement for bottom plate of structure

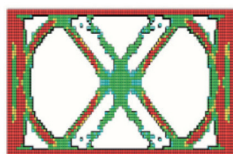


図9 位相最適化プログラムによる最適検討結果の一例
Example of study using topology optimization method

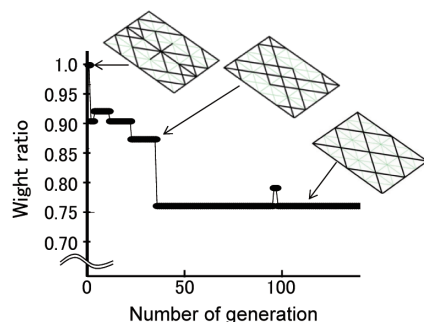


図10 遺伝的アルゴリズムによる最適化
Genetic algorithm optimization

主に折板面外への曲げ剛性と強度を向上させることを目的に設計されている。家電製品やOA機器の筐体においても、面材の面外変形抑制へのニーズは大きい。面材の曲げ強度は高強度鋼板の利用で向上させることができる一方で、ヤング率で支配される曲げ剛性は材料強度を高めても改良できないことから、面材の面外剛性向上が技術課題となる。建築構造と家電OA筐体とを比較すると、面材への要求性能が大きく異なる。建築構造へ作用する捩じれ力は骨組が負担するため、屋根、壁は面外曲げ力へ抵抗できれば良いが、家電OA筐体では捩じれ力も面材が負担する。そこで面外への曲げ剛性と捩じれ剛性を合わせもつエンボス鋼板（チェッカーエンボス鋼板 Latis[®]）の開発を進めた。

（2）チェッカーエンボス鋼板 Latis[®] の開発

面材の捩じれ剛性は、面内で直交する二方向（図13（a）のx方向、y方向）それぞれの面外曲げ剛性を高める必要がある。折板では、波形と平行するx方向の曲げ剛性は十分高いため、それと直交するy方向の曲げ剛性を高めれば



図11 折板屋根
Corrugated sheet roof



図12 折板壁
Corrugated sheet wall

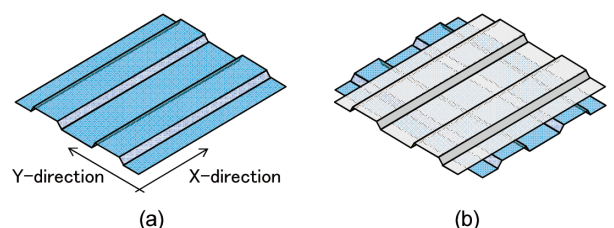


図13 折板 (a) と折板を二枚重ねる構造イメージ (b)
Corrugated sheet (a) and structure image of double layer corrugated sheet (b)

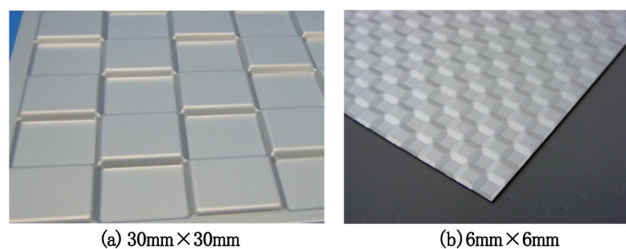


図 14 チェッカーエンボスのプレス成形試作品
Press forming samples of checker embossment panel

捩じれ剛性は向上する。そこで図 13 (b) に示すように面内で 90°回転させた 2 枚の折板を重ねる着想からチェッカー模様 (図 14) の検討を始めた。扁平な四角錐台を平面内に並べただけでは、四角錐台同士の接続部に応力集中が生じることが有限要素解析で確認された。そこでチェッカーエンボス鋼板では、凹凸同士の接続部形状を最適化することで応力集中を緩和し、面外への曲げ剛性および捩じれ剛性を大幅に引き上げること成功している。

(3) 箱構造の接合位置の最適化

家電 OA 筐体における箱構造において、面材の配置や構成は商品の機能により決まるため、大幅な変更は難しい。一方で面材同士を接合する位置は商品機能に及ぼす影響は小さく、構造性能改良のために変更する余地がある。スチールハウスの耐震壁においては、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、壁せん断剛性が向上する。これは水平力に対する壁のせん断剛性が、壁面中心から各ドリルねじまでの距離と、ドリルねじ接合各点でのせん断剛性との積の総和で算出されるためである。

この知見を、家電 OA 筐体を模擬した、150mm×150mm の四枚のパネルから構成される図 15 に示す箱体に適用すると、例えば図 15 (a) から図 15 (b) のような改良ができる。更に接合点の数は変えずに、剛性向上を目的関数とした最適化問題に位置付ければ、前述の遺伝的アルゴリズム⁹⁾を活用することもでき、所定の条件下での最適な接合点改良案 (図 15 (c)) が得られる。接合点二点を縦壁が配置されない構面に集約することで更に剛性が向上することが確認できる。複数の接合点が離散的に配置される箱構造では、このような剛性改良検討が実用的である。

3.3 円筒構造の側面凹凸形状改良による食缶の薄肉化

薄板円筒構造では、図 16 (a) に示す円筒方向の力 (軸圧縮力) と、図 16 (b) に示す円周法線方向の力 (陰圧力) によって生じる座屈現象への対策が主な課題となる。コーヒー飲料缶やパイナップル缶等の食缶では、重ね積み時に生じる軸力への抵抗 (軸圧縮耐力) と、内容物の加熱殺菌後の冷却時に生じる陰圧への抵抗 (パネリング耐力) を両立させ

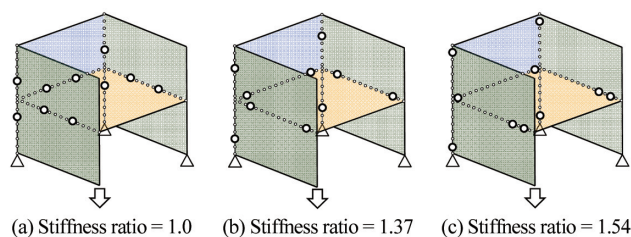


図 15 筐体の接合点改良
(a) 剛性比=1.0, (b) 剛性比=1.37, (c) 剛性比=1.54
Optimization of connection arrangement for box structure

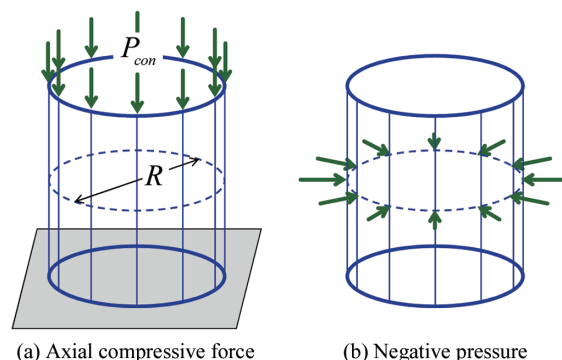


図 16 円筒構造への作用力 (軸圧縮力と陰圧力)
Required strength of cylinder

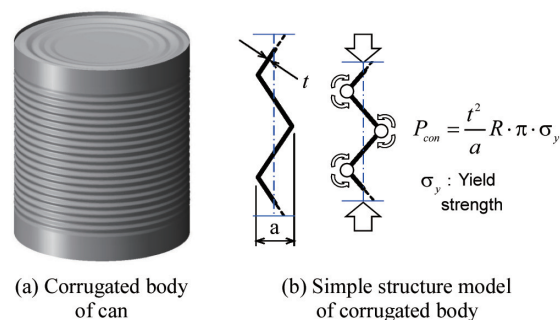


図 17 缶胴部の波形加工と構造モデル
Corrugated body of can and its simple structure model

る必要がある。パネリング耐力を向上するためには、円筒部断面を波形に加工する方法 (図 17 (a)) が有効であり、既に多くの食缶で採用されている。波形を深くするほどパネリング耐力は上昇するが、軸圧縮力に対する偏芯が増大するため、軸圧縮耐力は逆に低下するという、二律背反の傾向を示す。

新日鐵住金はこれらの構造特性を分析し、両特性を確保するための改良策を提案している。ひとつの波形断面要素を三角形から台形状にすることで断面二次モーメントを増大させつつ、波形の高さを抑制することで、軸圧縮力に対する偏芯量を最小化するという考え方である (図 18)。例えば直径 150mm のパイナップル缶を対象にした場合では、この考え方により 10% 弱の軽量化効果が得られることを確認している。このような形状改良検討を効率よく行うために、有限要素解析と合わせて、図 17 (b) に示すようなシンプル

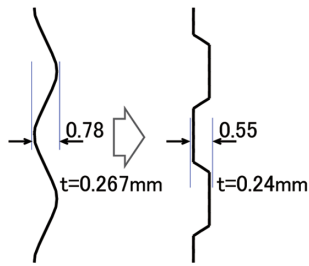


図 18 缶胴部断面の改良
Optimization of section shape

な構造モデルで評価する点が、かたちソリューション®の特徴のひとつである。

4. 更なる広がり

これまで主に建材から家電 OA 筐体までの展開を紹介してきたが、技術の展開先はそれにとどまるものではない。

(1) 貨物コンテナ角柱薄肉化

直方体の海運コンテナ（図 19）の四隅には、図 20 (a) に示すようなΩ形の断面を持つ角柱が用いられる。コンテナが数段積み上げられた際に角柱に大きな圧縮力が作用する。軽量化のためには鋼材を薄くしつつ柱の圧縮強度を確保する技術が必要である。これには材料の降伏強度（YS）を高めることが有効であるが、YS のみの向上では十分な薄肉化が図れない場合がある。例えば、図 20 (a) に示す形状を持つ角柱を対象にした検討では、YS を 400 N/mm^2 から 550 N/mm^2 に高めることで、柱の板厚を 6.0 mm から 4.5 mm へ薄くできるが、YS を更に高めても 4.5 mm より薄くすることはできない（図 20 (b)）。これは鋼材のヤング率に支配される局部座屈の発生によるものであるが、ここで前述の八角形の考え方を導入して、図 20 (c) に示す形状に改良すれば、幅厚比が小さくなり局部座屈を抑制できる。その結果、YS を更に 700 N/mm^2 まで高めることができ、板厚は 3.5 mm まで薄くできる。高強度鋼材と形状改良の組み合わせで、約 40% の軽量化が実現される例である。このように、かたちソリューション®は、高強度鋼材を利用する際に生じる、剛性低下（弾性座屈強度低下）に係る課題を克服するための手段のひとつでもある。

(2) 貨物船波形隔壁の薄肉化

ばら積み貨物船等の大型船舶構造では、貨物庫を仕切る複数の波形隔壁が設置される（図 21）。船体の重心を下げて横風や横波に対する安定性を保つため、空荷航行時は甲板まで海水を充填するが、この際に作用する水圧への抵抗確保が隔壁の要求性能の一つとなる。この荷重条件は、折板屋根（図 11）へ積雪荷重が作用する場合とほぼ同じであるが、板厚は全く異なり、建材では 1 mm 前後であるのに対し、船舶では 20 mm を超える場合もある。一方で折

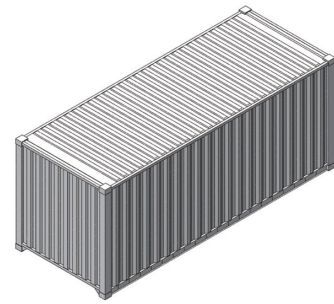


図 19 貨物コンテナ
Freight container

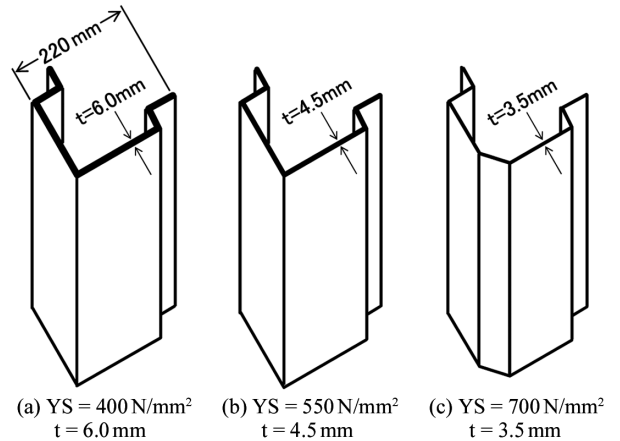


図 20 コンテナの角柱
Corner post of freight container

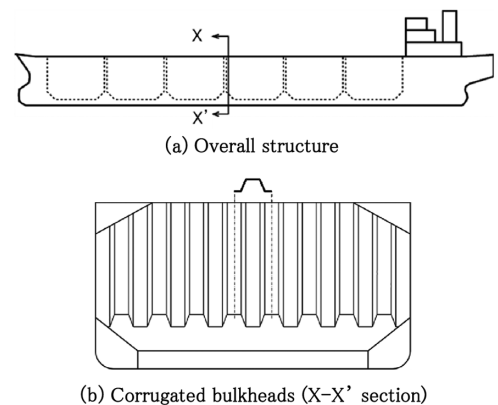


図 21 ばら積み貨物船の模式図
(a) 全体構造, (b) 波形隔壁 (X-X' 断面図)
Schematic illustration of bulk carrier

板屋根の平面部幅は 50 mm 程度であるのに対し、船舶隔壁の平面部幅は 1 m 程度と大きいため、両者の幅厚比はほぼ同じである。

一般的な隔壁の 1 ユニットは、図 22 (a) に示す構造であるが、上述の水圧による局部座屈を防止するためには、図 22 (b) のように平面部中央に縦リブを設けることが有効な手段となる。図 22 の検討例では隔壁重量は 8% 程度軽減できると計算される。溶接疲労等は当然個別に検討する必要があるが、座屈性能向上という視点からは、板厚 20 mm の船舶隔壁は幅厚比の大きな“薄板構造”であり、板厚

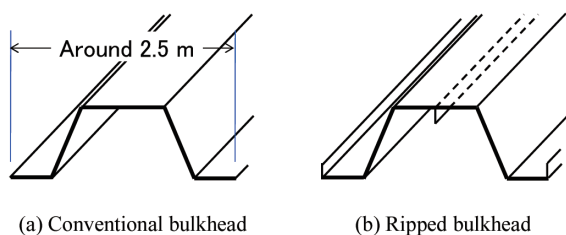


図 22 波形隔壁の形状改良検討の一例
(a) 一般的な隔壁, (b) 中間保剛を設置した隔壁
Example of optimization study for corrugated bulkhead



図 23 ディンプル鋼管 (左) と太陽光架台杭への適用 (右)
Pipe with dimple on the surfaces (left) and an example of application for foundations of the solar systems (right)

1.0mm の建材屋根壁と同じように、かたちソリューション®での薄肉化提案が可能となる。

(3) 鋼管杭の形状改良への貢献

食缶向けに検討した円筒構造の凹凸設計の考え方はディンプル鋼管杭¹⁰⁾の形状設計へも展開している。ディンプル鋼管は熱間成形で鋼管周囲に図 23 に示すような一定間隔の窪みが設けられており、主に小径の杭として利用され、周囲のセメントや土壌とのグリップ力を高める効果を持つ。窪みの深さと材長方向強度との関係についての考察や改良検討は、図 17 (b) に示す食缶で提案した考え方に準じている。

以上のように、住宅柱 (四角形) とコンテナ柱 (Ω 形),

折板屋根と貨物船隔壁、食缶と鋼管杭とは一見するとそれぞれ全く異なる構造であるが、“かたち”という視点で共通性を見出せば、改良の考え方や手段は同じである。商品の分野を越えて、形状や機能の類似性や相違性を見出し、相互に応用展開できることが、かたちソリューション®のもつ価値であり、魅力である。

5. 今後の展望

新日鐵住金が鉄鋼メーカーとして得意とする素材技術に、接合技術 (溶接、かしめ、接着等)、成形加工技術 (プレスフォーム、ロールフォーム、ハイドロフォーム)、そして紹介した“かたちソリューション®”を加えた総合提案力により、鋼材利用によるトータルコスト低減ソリューションを積極的に進めていく。

参照文献

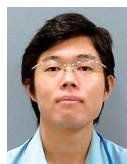
- 1) 日本鉄鋼連盟：薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き、技報堂出版、2002.6
- 2) 半谷公司、菅野良一、森野捷輔：日本建築学会構造系論文集、(567)、157-164 (2003)
- 3) 杉田浩司、半谷公司、村橋喜満：新日鉄技報、(369)、46-51 (1998)
- 4) 久保祐治、半谷公司、児玉真二：新日鉄技報、(391)、48-56 (2011)
- 5) 菅野良一、辻井正人、半谷公司、松岡和巳、富永知徳、尾崎文宣：新日鉄技報、(391)、57-66 (2011)
- 6) 西脇眞二、泉井一浩、菊池昇：計算力学レクチャーコース トポロジー最適化、丸善出版、2013.1
- 7) 藤井大地：建築デザインと最適構造、丸善、2018.10
- 8) 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎 -GA の謎を解く-、オーム社、2007.3
- 9) 日本海事協会：鋼船規則 CSR-B 編 ばら積貨物船のための共通構造規則、2010.3
- 10) 妙中真治、茂手木優輝、寺田好男、山本和人、大沢隆、榎本邦広、高木優任：新日鉄住金技報、(397)、99-105 (2013)



半谷公司 Koji HANYA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
博士 (工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



清水信孝 Nobutaka SHIMIZU
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
博士 (工学)



中安誠明 Nariaki NAKAYASU
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主任研究員



菅野良一 Ryoichi KANNO
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 Ph.D.