

社会の発展を支える鋼材と鋼構造(インフラ分野)

Steels, Steel Products and Steel Structures Sustaining Growth of Society (Infrastructure Field)

菅野良一* 辻井正人
Ryoichi KANNO Masato TSUJII
富永知徳 尾崎文宣
Tomonori TOMINAGA Fuminobu OZAKI

半谷公司 松岡和巳
Koji HANYA Kazumi MATSUOKA

1. はじめに

社会の安全安心と発展を支える公共施設ならびに建築等の民間施設を含めて、ここでは“インフラ”と呼ぶことにするが、その種類は道路、鉄道、河川、港湾、治山、砂防、建築、住宅、電力など多岐にわたる。橋梁、基礎、護岸、堤防、トンネル、建築、住宅、工作物などがインフラを構成する具体的な構造物(ハードウェア)となるが、その多様性ゆえに様々な機能、性能が求められる。

未曾有の被害をもたらした東日本大震災に見られるように、インフラは地震、台風など自然災害に対するシェルターの機能を持つこと、つまり安全安心の確保が大前提となる。一方でインフラは、経済活動の所産でもあるがコストの一部である固定資産ゆえに、常に厳しい低コスト化要求に曝される。目覚ましい勢いで変貌する社会、経済に呼応するために短工期での実現も迫られるが、一旦建設されると長期に渡る機能担保が求められる側面も持つ。複雑な条件が要求されるのはインフラの宿命であり、長年にわたり精力的な研究開発が行われてきた所以でもある。

1779年に建造された世界初の鉄橋アイアンブリッジや旧八幡製鐵の鋼材が今に残る旧犬吠崎信号所霧笛舎(1910年建設)¹⁾に見られるように、鉄鋼は古くからインフラを支える基本材料であった。インフラの歴史は鋼材と共に作られたと言っても過言ではなく、鋼材もまたインフラの発展を契機として高性能化を進めて来た。世界の鋼材消費量約13億tonの45%は建設用であり、中国では建設用が50%を超え、インド、メキシコ、インドネシアでは60%以上と推定される。インフラ分野の鋼材需要は今後益々拡大し、ニーズも一層多様化していくと予想される。

本報では、インフラ用鋼材・建材、そしてその利用技術に焦点を当てて、過去40~50年の市場環境・条件の変化を俯瞰しながら市場ニーズの変化を辿ると共に、当社の技術開発の取り組みを論述する。併せて、インフラを取り巻く環境変化を踏まえて、今後の技術展望を示す。

2. インフラ分野を取り巻く環境とニーズの変遷

2.1 インフラ分野の変遷と当社商品・技術

図1に、社会・経済に影響を及ぼした出来事、建設された主要構造物、災害や事故、基規準や当社の建材商品・関連技術の変遷をまとめて示す。インフラ整備では、全国総合開発計画やオリンピック・万博などが大きな駆動力となっており、新幹線や高速道路、長大橋やトンネルなどの巨大インフラが建設されて来た。このような過程で、設計法も弾性設計から塑性設計などの高度な設計法に進化して来ており、騒音規制法や振動規制法等の新たな法令はインフラ建設における環境配慮を大きく促す契機となった。当社は、鋼矢板、鋼管杭、軽量圧延形鋼、H形鋼、冷間成形ボックスコラムなどの供給体制を1970年頃までに整えて、旺盛なインフラ整備ニーズに応じて来た。1980年代からは、法令や設計法の変化にタイムリーに応えた多様な建材商品や関連技術を開発し、市場に提供している(図1)。

2.2 影響を及ぼした変化と当社の取り組み

インフラを取り巻く環境と技術ニーズの変化は次の3つの視点で整理することができる。

(1) 社会の成長(萌芽→成長→成熟)に伴う環境の変化

日本の発展過程は1973年前後までの萌芽期、それ以降1990年頃までの成長期、そして現在に至る成熟期に大別できる。成長過程ごとに環境や条件が異なり、インフラに求められるニーズも変化する。萌芽期では大規模なインフラ整備が短期間に求められるために、インフラには大スパン化、大規模化、短工期化が要請される。成長期では都市化の進展と共に都市環境との調和が必要になるため、薄壁化や狭隘地対応、低騒音・振動での施工が必要となる。成熟期では、経済の成熟と共に工事費の縮減が求められる、ライフサイクルミニマム、省エネルギー等のニーズが顕在化する。これに伴って、一層の低コスト化(省材料化や省力化)、高耐久性等が指向され、ニーズが複雑化する。

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター所長 Ph.D. 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

		萌芽期									成長期									成熟期								
		1960年代			1970年代			1980年代			1990年代			2000年代			2010年	2011年										
主な出来事	国土計画 社会・経済	▼全国総合開発計画			▼新全総(高速道路、鉄道) ▼三全総(エネルギー)			▼四全総(多極分散)			▼五全総(地域自立)			▼リーマンショック														
	主要建築 主要インフラ	▼58東京タワー			▼東京オリンピック ▼大阪万博 ▼オイルショック			▼瀬戸大橋 ▼ランドマーク ▼明石海峡大橋			▼青函トンネル ▼関西空港 ▼東京湾横断道路			▼羽田空港D滑走路														
災害・事故	災害・事故	▼59伊勢湾台風 ▼新潟地震 ▼十勝沖地震			▼宮城県沖地震 ▼日本坂トンネル火災			▼阪神・淡路大震災 ▼北海道南西沖地震(津波)			▼新潟県中越地震			▼東日本大震災														
	基規準 法令・政令	▼騒音規制法			▼振動規制法 ▼建築基準法改正(2次設計)			▼耐震改修促進法 ▼建築基準法改正(性能規定)			▼住宅品質確保促進法 ▼薄板軽量形鋼造示																	
設計基準	設計基準	▼鋼構造設計規準			▼新耐震設計法(保有耐力設計)			▼道路橋示方書改訂(保有耐力設計) ▼道路橋示方書改訂(性能設計)			▼冷間成形形鋼管設計・施工マニュアル			▼限界耐力設計 ▼エネルギー法														
	土木系	▼31鋼矢板 ▼鋼管杭			▼TN工法(中堀圧入)			▼CPセグメント ▼NMセグメント ▼ハット形鋼矢板、TN-X工法			▼ガンテツパイプ ▼NSエコパイプ ▼角太橋 ▼SBHS(橋梁高性能鋼)																	
建材商品	建築系	▼55軽量延び鋼 ▼厚厚H形鋼 ▼ボックスコラム(冷間成形)			▼耐火鋼 ▼SN鋼 ▼HTUFF、SHTB(超ハイテンボルト)			▼LYP、外法一定H形鋼(ハイバー)、建築用TMCP鋼、600N級 ▼高YRハイテン(YP400、700等)			▼アンボンドブレース ▼免震U型ダンパー ▼構造用ステンレス ▼スチールハウス ▼NSF(スチールハウス3F建て)																	
	当社の取り組み	① 成長を支える大規模インフラ実現に向けた取り組み ② 地震国インフラの耐震性能向上に向けた取り組み ③ 都市化進展、環境調和ニーズに対応した取り組み ④ インフラ劣化の進展と長寿命化に対応した取り組み ⑤ イノベーションで新トレンドを創出した取り組み																										

図1 インフラに関わる出来事、基規準、新日本製鐵の建材商品・技術の変遷

(2) 地震、台風などの災害、事故による要求性能の変化

社会の成長に関連しない変化もある。大規模な災害を契機とする要求性能の厳格化が一例である。安全安心の目標が大きく変わることにより、インフラの仕様を決める基規準が改訂され、具備すべき耐震性能や耐火性能、土砂災害抵抗性などが変化していく。科学技術の向上によりリスク評価が高精度化する場合やグローバルスタンダード化の中で設計法の枠組みが変化し、インフラへの要求性能が大幅に変化する場合もある。たとえば、構造物の損傷レベルについて複数の目標性能を設定する新しい性能評価型設計法では、損傷を制御する技術が求められることになる。

(3) 鉄鋼からの革新技術の発信、提供による市場の変化

ニーズは市場から提供されるだけではない。革新技術や新しいビジネスモデル、すなわちイノベーションにより市場に変化が生じ、それが新たなニーズを喚起する場合がある。インフラのような分野では起こり難いと考えられているが、鋼材や構造形式のイノベーションによって新しい市場やニーズが生じたケースがある。その具体例が耐火鋼、アンボンドブレース、スチールハウスであろう。火災に弱いとされていた建築用鋼材の常識を変えたのが耐火鋼であり、これを契機に無耐火被覆鉄骨の市場が生まれた。アンボンドブレースの実用化によって、地震時の損傷を特定部材に限定する損傷制御構造が普及・拡大し、スチールハウスによって1mm前後の鋼材利用が大きく進展した。

当社では、環境やニーズの変化に即応した商品・技術開発を進めて来ているが、以下の取り組みに集約できる。

- ① 成長を支える大規模インフラ実現に向けた取り組み
- ② 地震国インフラの耐震性能向上に向けた取り組み
- ③ 都市化の進展や環境調和ニーズに対応した取り組み
- ④ インフラ劣化の進展と長寿命化に対応した取り組み

⑤ イノベーションで新トレンドを創出した取り組み
3章に①から④を、4章では⑤の取り組みを述べる。

3. 市場環境や条件変化に対応した取り組み

3.1 成長を支える大規模インフラへの取り組み

長大橋建設は巨大プロジェクトの代表例であり、常に最新の鋼材、技術が投入されてきた。図2に国内の吊橋、斜張橋、トラス橋の最大支間長の推移を示す。年代と共に、吊橋、斜張橋、トラス橋の支間長拡大が図られて来ている^{2,3)}。大スパン化を支えたのが鋼材であり、当社は高性能な鋼材を開発し、市場に提供して来た(図2下欄)。

吊橋のケーブルとしては、1930年代にGeorge Washington橋で1550MPa級鋼が適用された。明石海峡大橋では1800MPa級が開発され、その後の来島海峡大橋にも適用された。斜張橋のケーブルとしては、より線のスパイラルロープ(勝瀬橋)やロックドコイルロープが1960年代に使われたが、豊里大橋以降、引張強さが大きく、弾性係数の高い平行線ケーブルが開発されている^{3,4)}。

鋼板については、建設当時日本一のトラス橋であった天門橋で調質600MPa級鋼が用いられ、港大橋では700、800MPa級鋼が大量採用された。しかし、予熱温度が高いなどの製作性の課題があったため、明石海峡大橋では低予熱型800MPa級鋼⁵⁾が開発された。その後、高強度鋼の製作性を更に改良してトータルで低コスト化する取り組みが行われ、橋梁用高性能鋼SBHS^{6,7)}が開発された。鉸桁形式の橋梁の鋼材強度は疲労とたわみによって制限されるが、SBHSには、その制限を受けない範囲の限界である降伏強度500MPaと吊橋や斜張橋に有効である700MPaがある。

SBHSでは、強度と溶接施工性の向上を両立させるた

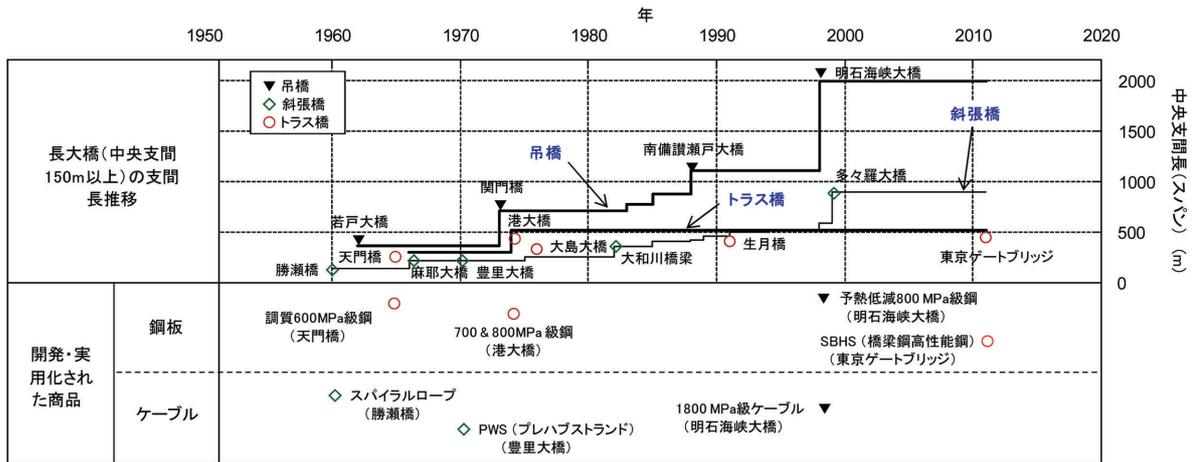


図2 橋梁の最大スパンの推移とそれを支えた鋼材

め、加工熱処理 (TMCP) 技術により合金添加量の抑制を図り、溶接時の予熱無し、あるいは予熱温度の低下を実現している。降伏強度500MPa鋼が初めて大量採用された東京ゲートブリッジでは、12%もの建設コストの低減効果が報告されている⁹⁾。このSBHSはJISに制定され、鉄道や道路の設計基準への掲載が進みつつある。

建築分野でも、高層化や大スパン化に伴って高強度鋼の適用が進められて来た。自立式電波塔としては世界一の高さ(634m)を誇る東京スカイツリー[®]では(図3)、添加合金量の低減により低コスト化を図った高性能鋼である780MPa鋼[®]などが本格的に使用されている。また、カシメ部を持たないシームレスフラックス入りワイヤ(日鐵住金溶接工業:SF-55)が溶接材料として採用され、溶着効率アップや水素低減による予熱温度低減などにより、高性能鋼の溶接施工効率向上と溶接部品質確保に寄与している。一方、高層建築物を中心として、大断面部材を接合するための超高力ボルトSHTB[®](1400MPa級)[®]も実用化され、接合材の高強度化も進展している。

3.2 地震国インフラの耐震性能向上に向けた取り組み

鋼材への要求性能は過去の地震被害や耐震技術の進化に伴って都度変化してきた。最も大きな変化は1981年の新耐震設計法であり、従来の弾性設計に対して塑性設計の考え方が加えられた。これにより部材や構造には、強度に加えて塑性化後の変形能力が求められることになった。1995年の兵庫県南部地震では溶接部の脆性的破断が報告され、耐破壊性に関するより厳しい性能要求が付加された。鋼材へのニーズは強度、変形能力、耐破壊性と変遷して来ており、これに対応した当社の先導的な取り組みを紹介する。

(1) 材料強度と部材強度(大断面化)の追究

建築物の高層化、高耐震性能化の流れの中で、当社は素材の高強度化と部材の断面大型化による高耐力化を追求して来た。代表的な高強度材としては、引張強度を590MPa級としたBT-HT440¹⁰⁾、780MPa級へ更にアップしたBT-

HT630¹¹⁾があり、各々ランドマークタワーや小倉駅ビルで採用された。最近では、700MPa級の降伏強度を持つH-SA700¹²⁾や高生産性で低コストな降伏比(YR)緩和型の高強度鋼¹³⁾も開発されている。断面大型化の例としては極厚H形鋼(HSGH[®])¹⁴⁾と大型ハイパービーム[®]¹⁵⁾がある。極厚H形鋼は、海外を中心に利用が進んでおり、台北101(中華民国, 2004)、Burj Khalifa(UAE, 2007)等で採用された。当社の優れた造形技術により、極厚H形鋼は外形が580×471mm、ウェブとフランジ厚が各々95、130mmまで製造可能となっている。溶接組み立てH形鋼の代替として開発した外法一定H形鋼(ハイパービーム[®])の大型化も進展しており、梁せい1000mmまで製造可能である。ハイパービームは梁せいが高く、ウェブの薄肉化、フランジの厚肉化、広幅化が可能であり、経済設計に貢献できる。

(2) 部材と骨組みの塑性変形能力の追究

塑性変形能力を追求した当社による2つの先駆的な取り組みがある。一つは素材の低降伏比化により部材の変形能力を高めた研究である。降伏比(YR)とは引張強度に対する降伏強度の比である。当社は、1981年の新耐震設計法の導入後に降伏比と部材の変形性能に関する研究に逸早



図3 東京スカイツリー[®](事業主体:東武鉄道・東武タワースカイツリー)

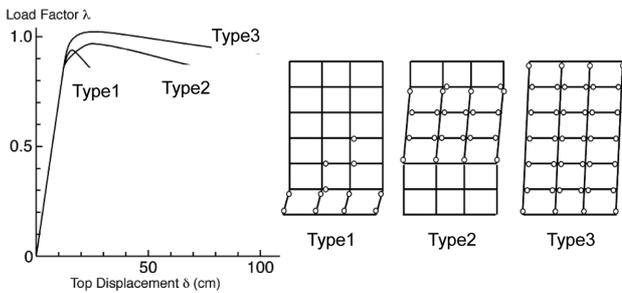


図4 骨組の破壊モードと変形能力の関係

く着手し、素材の低降伏比化により部材の塑性変形能力が大幅に向上すること等を示した¹⁶⁾。このような先駆的な研究により、耐震構造用鋼材の性能指標として降伏比が位置づけられるようになった。二つ目は建築物の骨組み全体としての変形性能を高める取り組みであり、素材の降伏強度 (YP) のばらつきに焦点を当てた研究である¹⁷⁾。骨組みの変形能力を向上させる手段として梁降伏先行型の全体崩壊メカニズムを実現する設計がある。梁を柱に先立って降伏させることにより、骨組み全体により多くの塑性ヒンジを発生させ、外力による損傷の分散を図る考え方である(図4)。当社は、確率論的手法を用いながら、降伏強度のばらつき低減(狭YP化)により骨組み全体の変形能力が向上できることを示した¹⁷⁾。強度ばらつきの低減により梁先行降伏をより確実に実現できるという知見である。

以上のような降伏比や降伏強度のばらつきに関する研究成果は、その後に規格化された建築構造用圧延鋼材 (SN材, JIS G 3136 1994) に反映された。機械的特性に関わる規定として降伏比の上限値や降伏強度の上下限値などが導入されており、建築構造の耐震性能向上に貢献している。降伏比の規定は、現在米国、欧州、中国にも広がっており、当社の取り組みがグローバル化した例でもある。

(3) 脆性的な破断を防止する耐破断性能の追究

兵庫県南部地震での脆性的破断を契機に、当社は破断現象の原因究明と防止技術確立に向けた国家プロジェクトを主導的に推進した。梁端溶接部の脆性的破断は材料の破壊靱性や降伏比、接合部ディテールに影響を受けることを明らかにすると共に、柱梁接合部ディテール、溶接欠陥の存在、材料、溶接部の破壊靱性などの要因を考慮した脆性的破断防止の具体的条件と設計フローを示した^{18, 19)}。一連の成果は、“鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン”²⁰⁾として指針化されており、鉄骨構造の信頼性向上に貢献している。また当社は、析出物活用による溶接HAZ部組織の微細化により、材料の劣化が発生しやすいた大入熱溶接(エレクトロスラグ溶接など)に対しても高いHAZ靱性を確保できる“HTUFF®鋼”²¹⁾を開発している。

全く異なるアプローチであるが、破断に対する不安を払拭したオールボルト接合構造(ハイパーフレーム®)²²⁾も開発、実用化した。この構造は、ボルト接合化により応力

集中部での溶接の排除を図った構造であり、1997年に一般認定取得を取得している(5階建て以下)。

3.3 都市化進展や環境調和ニーズ対応への取り組み

3.3.1 都市化に伴う土木構造物の発展

都市空間での土木構造物の発展は3つに大別される。一つは構造物の大規模化や高層化に伴う杭基礎の発展である。第二は、都市部の水平拡大の中での港湾、河川との仕切りの役割を果たす土留め構造の発展であり、そして第三は、都市部の鉛直方向拡大の中でのトンネル、立坑等地下空間の発展である。当社はこれら構造物の発展に対応した建材商品や技術を提供して来た。

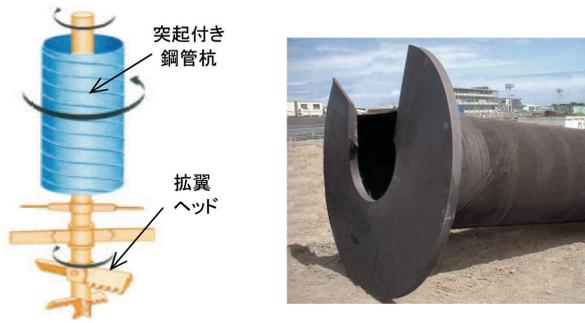
初期の杭基礎は、松杭やコンクリート場所打ち杭であったが²³⁾、構造物の大型化に伴って確実な支持力や施工品質を持つ鋼管が開発された。1963年に鋼管杭JIS規格が制定され、1971年には鋼管杭協会(現在の鋼管杭・鋼矢板技術協会)が発足しており、当社は、鋼管杭の開発、実用化、普及面で大きな貢献を果たした。

鋼矢板の利用は古く、1903年には三井本館に鋼矢板が適用された記録がある。当初は欧米からの技術導入であったが、高耐力化のニーズに応えるために、当社は新たな鋼矢板であるZ形鋼矢板を開発した(1959)。1960年頃には新たな構造である鋼管矢板を開発し、断面性能の飛躍的向上を可能とした。その後、多様なニーズに対応できる商品ラインナップの整備を継続的に展開して来ている。

都市トンネルに関しては、長らくコンクリート系セグメントが主流であったが、都市部の交通網の発達と共に分岐部や大荷重域が増える中、NMセグメント²⁴⁾やCPセグメント²⁵⁾等の鋼とコンクリートを合成構造化したセグメントを開発している。また、特殊形鋼を用いた鋼製連続地中壁(NS-BOX)²⁶⁾などの開発によりトンネル立坑の大型化、大深度化への対応を展開して来た。

3.3.2 環境に関する市場ニーズへの対応

建設を取り巻く環境意識の高まりと共に、1966年に騒音規制法、1976年に振動規制法が制定され、打撃工法に代わって先行掘削した孔内に杭を建て込む“騒音や振動を低減した埋込み杭工法”が開発された。また、排土量を抑える工法も望まれるようになった。こうした環境ニーズに呼応して開発したのが“ガントツパイル®”²⁷⁾、“NSエコパイル®”²⁸⁾である。ガントツパイル®は、地盤改良技術を応用して鋼管杭とソイルセメントを合成構造化したものであり、両者の一体化を図るために突起付き鋼管という特殊な鋼管を適用した(図5(a))。NSエコパイル®は、杭先端に大径の羽を取りつけた回転圧入工法であるが(図5(b))、回転による貫入性や支持力に関する研究が進められ²⁸⁾、この種の代表工法として普及している。排土量もゼロに近く、環境に優しい工法として評価されている。



(a) ガンテツパイル® (b) NSエコパイル®

図5 環境対応鋼管杭工法の例

3.3.3 高耐力化やコスト縮減への対応

都市化進展に伴う鋼管杭と鋼矢板の例を紹介する。

(1) 更なる高耐力化に向けた長尺・大断面鋼管杭工法

建築基礎分野では、2001年の建築基準法の改正を契機に、載荷試験に基づく独自の支持力式の採用が可能となり、より大きな支持力を発揮する杭を実用化できる環境が整った²⁹⁾。その中で開発されたのが“TN-X工法”³⁰⁾である。鋼管内に挿入した拡翼ヘッドを回転させながらセメントミルクを噴射し、地盤と攪拌して大型の根固め部を築造する工法である(図6)。杭径と根固め部の最大径は、各々φ1400mmとφ2400mmであり、N値60以上の支持層で17900kNという鋼管杭系で最大の先端支持力を発揮できる。深さ70~75mに及ぶ長尺鋼管杭への対応も可能であり、高強度鋼材(NSPP520)も適用できる。

(2) コスト縮減に対応した新たな鋼矢板

従来の鋼矢板は400mm幅を主流としてきたが、1997年の公共工事コスト縮減対策に関する行動計画以降、工事費縮減が急務となり、600mm幅の広幅鋼矢板³¹⁾、900mm幅のハット形鋼矢板³²⁾を開発した。このような広幅化により、打設枚数の削減と工期の短縮化が可能となった。

ハット形鋼矢板は現在10H、25Hの2タイプがあるが、25Hは単体としては世界でも最大級の鋼矢板である。その特徴は、幅の拡大に加えて断面性能と打設抵抗の観点で形状を最適化したこと、また継手を最外縁とすることにより(図7)、従来の鋼矢板で生じていた継手部でのせん断ずれ



図6 TN-X工法の拡大根固め部(φ2400mm)²⁸⁾

を排除し、断面性能の更なる向上を果たしたことにある。この結果、ハット形鋼矢板(10H、25H)は従来鋼矢板(Ⅲ_w、Ⅲ_w)に比べて、良好な打設性を確保しつつ、鋼材量当たりの断面性能を大きくすることが可能となった³¹⁾。

以上に加えて、新たな多用途化開発も進めている。一般に鋼矢板は、土圧、水圧等の水平方向力に抵抗するが、鉛直支持力も併せ持つ鋼矢板を開発し、土留めに加えて基礎も兼用できる鋼矢板基礎を提案している³³⁾。具体的には、先端部分を2枚のハット形鋼矢板を抱き合わせて閉鎖断面化するにより(図8)、鋼矢板の基礎兼用化を可能としたものである。この鋼矢板では、先端の閉鎖断面部において鋼管杭と同様な先端支持抵抗を発揮することができる。

3.4 インフラ劣化の進展と長寿命化への取り組み

3.4.1 残留応力制御による耐疲労性能の向上

鋼構造物の疲労問題は、運転頻度の高い鉄道や大型車両の多い道路橋で顕著となっており、定期検査や亀裂監視などの厳しい管理を強いられている。海外では疲労亀裂により橋梁などが崩壊に至った事例も報告されているが、日本でも道路標識や照明柱などの破断事故が新聞記事になった。疲労き裂の発生は、溶接部表面の溶接欠陥やその箇所における高い応力集中、さらに降伏強度に近い溶接引張残留応力の存在に起因している。ここでは、溶接引張残留応力の低減に主眼を置いた当社の取り組みを紹介する。

接合部のディテール改良による応力集中度と引張残留応力の低減により疲労性能を向上したのが“U字リブ構造”³⁴⁾である(図9)。U字リブ構造は、照明柱や道路標識などのポール基部に対して三角リブ補強の代替として当社が提案したものである。U字リブの補剛による応力集中低減に加えて、リブ溶接時の鋼管の熱変形により応力集中部近傍に圧縮応力が導入され、引張残留応力を大幅に低減した点に特徴がある。応力集中緩和と引張残留応力低減の複合効



図7 ハット形鋼矢板の形状



図8 先端部分を閉鎖断面化したハット形鋼矢板



図9 U字リブ構造



図10 ステンレス鋼被覆（羽田空港D滑走路）

果により、優れた疲労寿命改善効果を持つことが報告されており、高速道路の照明ポールで多数採用されている。

特殊な装置を用いて溶接部を打撃処理して溶接部の高疲労性能化を図る技術がある。1970年に旧ロシアの技術者が開発した“Esonix® UIT (Ultrasonic Impact Technology, 超音波衝撃処理技術)”である。UITは、装置先端に取り付けた打撃ピンを高速振動させ、溶接部を打撃処理する装置である。当社はメカニズム解明も含めた基礎研究や実構造物への適用研究を進めて来ており、その結果、UITの効果はピン打撃による圧縮残留応力の導入、形状改善による応力集中の緩和、表面組織の微細化などの複合的要因によることが分かっている³⁵⁾。UITの適用により、角回し溶接継手等ではJSSC疲労等級Dが大凡2ランクアップの等級Bまで向上する結果が得られており、クレーンランウエイゲーターや橋梁での実適用が進展している³⁶⁾。

3.4.2 高性能鋼による海洋環境防食への取り組み

最近の海洋域の大型プロジェクトでは100年以上の防食寿命を要求されるようになってきている。このようなニーズに対して当社は、チタンやステンレス鋼などの高性能な材料を用いた長期防食技術^{37, 38)}を開発してきた。

“チタン”は優れた耐食性を有している一方、高価かつ鉄と溶接ができないなどの課題があり、その適用は限定的であった。しかし1990年頃、当社によって低コストなチタンクラッド鋼や低コスト接合法が開発され、東京湾横断道路の鋼製橋脚の飛沫干満帯に世界で初めて適用された。その後、紋別流海展望塔下部、夢舞大橋浮体等にも採用されている。課題となった溶接については、チタンクラッド鋼板（チタン1mmと鋼4mm）の鋼材部分と橋脚本体の鋼材とを溶接接合することにより解決している。

“ステンレス鋼”はチタンに次いで耐食性が高く、構造物に適用し得る材料と期待されて来たものの、従来の候補材、例えばSUS316L等では、無電防環境下で孔食やすき間腐食の発生が避けられず、さらに耐食性の高い材料が求められていた。当社は、海水淡水化プラントなどで実績のあるNSSC270（20Cr-18Ni-6Mo）に注目し、羽田空港再拡張プロジェクトのジャケット飛沫・干満部の防食に対して

新たな被覆防食法を提案・実用化した（図10）。この工法は、0.4mm程度の薄板ステンレス鋼を鋼管へ被覆するために新たにインダイレクトシーム溶接法を開発し、施工コストを大幅に低減したことに特徴がある。このプロジェクトでは滑走路部の鋼桁をチタン薄板パネルで被覆する新たな防食工法も提案し、採用されている³⁹⁾。

3.4.3 大気腐食環境における耐候性鋼とその利用技術

塗装不要な鋼材として耐候性鋼が広く適用されて来たが、従来のJIS耐候性鋼（SMA鋼）は、飛来塩分が一定値以下、あるいは海岸から一定以上の離れた地域に制限されている。海浜地区における耐候性鋼による橋梁建設ニーズは依然として高く、また現地環境を反映した長期耐久性の予測も求められていた。当社は、これらのニーズに呼応した耐候性鋼と耐久性評価法等を開発して来た。

JIS耐候性鋼（Cu, Ni, Cr添加）では鍍層中でのCl⁻イオンの集積（鋼表面）が耐久性を阻害していたが、一定量以上のNi添加鋼では、その性状が改善されるとの知見に基づいて開発したのが“Ni系耐候性鋼”⁴⁰⁾である。0.05mddを超える海浜地区での模擬暴露試験でも良好な耐塩害性が確認されている。Ni系耐候性鋼では、1%Ni, 3%Niの2鋼種が開発され、環境に応じた選定を可能としている。

一方、耐候性鋼は飛来塩分量や地域別の海岸からの距離により、マクロ的な適用の可否判断がなされてきた。しかし、耐候性鋼の適用性判断に求められるレベルは次第に高くなっており、よりミクロ的かつ定量的な情報提供が必要になって来ている。このようなニーズに応えるために開発した技術が、温度、湿度、硫酸化合物、風速等の環境影響を考慮した腐食板厚減耗予測技術（“YOSOKU®”）^{41, 42)}であり、より合理的な耐候性鋼の適用可否判断が可能となった。また、簡易に耐久性を定量化する“ワッペン試験法”、初期流れさびを抑制するさび安定化補助処理剤などの各種利用技術⁴²⁾も開発している。

4. イノベーションによる新トレンドの創出

4.1 火災に弱いという建築用鋼材の常識への挑戦

耐火鋼が登場する以前（1980年代）においては、大多

数の建築鉄骨造は、建築基準法の耐火構造の仕様規定(鋼材平均温度が350℃以下、かつ最高温度が450℃以下)をほぼ例外無く満たす必要があった。この当時は、鉄骨造に断熱効果の高い耐火被覆材を使用するのが当たり前と考えられていたため、“鉄骨造は火災に弱い”というイメージが根強かった。他方で、被覆施工時の劣悪環境や工期長期化、被覆材による建築デザインの制限などの問題点は既に指摘されており、耐火被覆の省略ニーズとそれに呼応できる技術開発が切望されていた。当社では、これらのニーズに応えるために、1988年に優れた高温特性を有する“耐火鋼”を開発し⁴³⁾、世界に先駆けてその実用化に成功した。耐火鋼の大きな特徴は、建築用鋼材としては世界で初めて高温規格値の設定、すなわち600℃において、常温F値の2/3以上の降伏強度を保証したことにある。

図11に、耐火鋼SM50A-NFR(現規格でNSFR490A)の高温強度特性⁴⁴⁾を示す。図11より、耐火鋼SM50A-NFRは、一般溶接構造用鋼材SM50A(現規格でSM490A)と比較して優れた高温強度を有すること、その降伏強度(YP)は600℃で常温の設計基準強度の2/3(22 kgf/mm², 216MPa)以上であることが分かる。このような高温規格値を保証することで、火災の規模が小さくてフラッシュオーバー火災にはならない建物、例えば、図12(a)の自走式駐車場や図12(b)のアトリウムに対して、“無耐火被覆鉄骨造”という新たな市場の創出に成功した。さらに耐火鋼の適用により、被覆工事の省略、工期縮小の他、無被覆化による軽快な鉄骨造デザインも実現した(図12)。

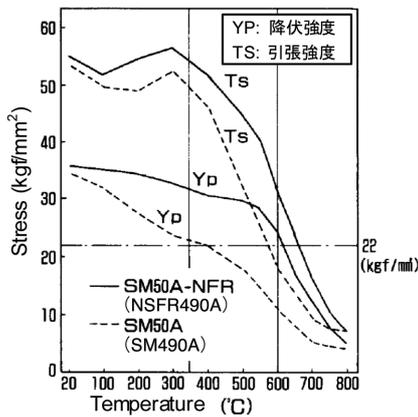


図11 耐火鋼とSM材の高温強度特性⁴¹⁾



(a) 自走式屋外型駐車場 (b) アトリウム

図12 耐火鋼の適用例

1989年には耐火鋼を用いた建築物の耐火設計ガイドラインを構築し、建築基準法の範疇を超える新たな検証法を確立している。この考え方は耐火分野での性能規定型設計法の先駆けであり、1990年には高炉各社に当社技術を開示することにより広く耐火鋼が普及することとなった。耐火鋼の開発は、今まで困難と考えられてきた無耐火被覆鉄骨造を実現しただけでなく、現在に至る性能規定型の耐火技術開発の潮流を創り出し、さらには被覆削減による省CO₂と鉄骨部材のリサイクル性向上という現在の建材開発のトレンドをも併せ持った、先駆的、革新的かつ先見性に満ちた建材開発の一例である。

4.2 座屈しないブレースへの挑戦と損傷制御構造

合理的な構造形式の一つのとしてブレース構造があるが、圧縮力の作用によりブレースが座屈するため、その耐力やエネルギー吸収能が顕著に低下する。地震力のような繰り返し力がかかる場合には、引張による塑性化と圧縮による座屈発生が交互に生ずるため、履歴挙動が極めて複雑化する。このため、“ブレースは引張材として圧縮抵抗は期待しない”とするのが構造設計の常識であったが、これに挑戦したのがアンボンドブレース⁴⁵⁾である。当社はブレースの欠点とも言える座屈発生の抑制を可能とする機構を考案し、1986年に世界で初めて実用化した。アンボンドブレースは、平板または十字形の鋼材を、アンボンド材(アスファルト等)を介して鋼管コンクリートで拘束することにより座屈を抑制したブレース材である(図13)。

アンボンドブレースは、同時期に提唱された損傷制御構造の損傷制御部材として応用され、耐震建築の一つの大きな流れを形づくる契機となった。損傷制御構造は、地震エネルギーを構造内の損傷制御部材で集中的に吸収することにより、耐震性能の向上と損傷部材交換による建築物の持続的利用を可能としたものである。損傷制御構造化の流れの中で、アンボンドブレースの性能向上に向けた新鋼材“低降伏点鋼(BT-LYP®鋼)”も開発した⁴⁶⁻⁴⁸⁾。LYP鋼を用いたアンボンドブレースは安定した履歴特性と優れた低サイクル疲労特性を持つことが実証されている。海外でも広く採用され、米国では米国鋼構造協会(AISC)規準にも組み込まれ、病院等公共建築物で適用が拡大している。

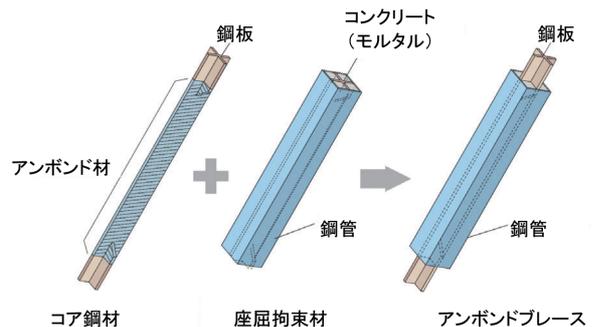


図13 アンボンドブレースの概要

4.3 大工さんも作れる鋼製住宅と“かたち”の提案

日本の鋼製住宅の取り組みは古く、その歴史は半世紀以上も前に遡る。建設戸数で現在10～20%のシェアを占める軽量鉄骨住宅がその代表である。軽量鉄骨住宅は、厚さ2.3mm以上の形鋼を溶接、ボルトにより接合して構成され、耐久性確保のために電着塗装が施されることも多い。その製作には大規模な設備と高度な技術が必要になることから、一貫工場で製造されるのが一般である。このため、その普及には必ずと限界があり、長い歴史にもかかわらず低シェアに留まっている一因となっている。

このような課題を抱える鋼製住宅の状況打開を目指した取り組みが“スチールハウス”である⁴⁹⁾。1994年にアーバンスチール研究会(現在の経産省が主催)のもとで、当社が主体となってその調査研究に着手した。スチールハウス(図14)は、当時米国や豪州で普及していた構造であり、厚さ1.0mm前後の亜鉛めっき鋼板とドリルねじ接合により構成される鋼製ツーバイフォー住宅である。薄鋼板ゆえに丸鋸での部材の切断や電動ドライバーでのねじ接合が可能という特徴を持つ。特殊技能が不要であり、大工さんでも作れるという従来の鋼製住宅にない特徴を持つ。

鋼製住宅の普及に新たな活路を拓くスチールハウスの実用化には法令、技術両面での課題・制約があったが、当社は、設計、施工、耐久性に関わる基規準の構築を先導的に推進し、2001年には薄板軽量形鋼造の告示化を果たした。これにより、厚さ0.4～2.3mmの亜鉛めっき鋼板の構造材利用が可能となり、スチールハウスが木造や軽量鉄骨と並ぶ構造として認知されるようになった。スチールハウスは、耐火認定を取得し、社宅、独身寮などの大規模な3階建てにまで適用されるに至っている⁵⁰⁾。

スチールハウスは日本における薄板鋼部材の利用を促す契機ともなった。鋼材の薄肉化は冷間ロール成形による多様な部材断面を可能とする半面、部材のねじれや局部変形

を伴う複雑な座屈の発生を招く。このため当社は、薄鋼板部材の座屈を中心とした設計技術の研究⁵¹⁾を進めると共に、形状自由度を活かす断面最適化にも取り組んで来た。図15は木製部材の鋼製化を図った例である。C形断面から出発してΣ形やΩ形、更にはJ形など⁵²⁾、多様な“かたち”の提案が可能となった。なお、ここで開発された技術は、“かたちソリューション[®]”として家電筐体などの軽量化や高剛性化にも活用されている(第1章1-3参照)。

5. 今後の技術展望

5.1 災害、事故に対する更なる安全性の確保と鋼材

今回の東日本大震災から得た教訓の一つは、災害の規模が想定可能か否かという根幹的課題であろう。数十年レベルの限られたデータから予測する手法には所詮限界があり、インフラには予想外の外力に対する抵抗性を高め、また損傷を受けても容易に修復できる機能を持たせる必要がある。このための技術の方向性は、構造物の“リダンダンシーの活用”であり、スケルトン・インフィルのように役割に応じて構造物を分割する“階層化”⁵³⁾であろう。

部材や構造の一部が喪失しても崩壊しない構造にするのがリダンダンシーの活用である。このような考え方は東日本大震災を踏まえた対津波防波堤でも提案されている⁵⁴⁾。合理的な構造形式や設計法の開発が今後の課題であり、従来以上に変形能力や破壊抵抗に優れた鋼材が求められる。一方、階層化については、国家プロジェクトである“新構造システム⁵⁵⁾”で提案されたように、構造物の中で水平力と鉛直力の分担を明確に分離するような“機能分担化”が進展し、適材適所の鋼材利用が進展していくと予想される。リダンダンシー・階層化のいずれの方向でも、強度、変形能、耐火性など、鋼材への必要性能も多様化され、安全を担う構造、部材には益々高い性能が要請される。

5.2 グローバル化と日本の安全、安心等技術の価値

新興国におけるインフラ整備の活性化に伴って、今後急速に鋼材の需要が拡大して行く。図16に世界鉄鋼協会(WSA)や日本鉄鋼連盟(JISF)のデータに基づいた建設向け鋼材消費量を大きい順に示す(データ未公開の一部の国を除く)。中国は桁違いであるが、インドの消費量は既に日本や米国を凌いでおり、メキシコ、タイ、ブラジル、エジプト、トルコなどはドイツ、イタリアなどの先進国に迫るレベルにある。1人当たりの建設向け鋼材消費量や名目GDPという点では、インドやインドネシアなどは先進国の1/10から数分の一に留まっていることを踏まえると、世界のインフラ成長ポテンシャルは極めて大きい。

中国など、独自の設計基準を開発している国もあるが、多くの新興国では欧米等先進諸国の設計・施工技術に基づくところが多い。自然災害、たとえば地震の起こり易さなどは国によって異なり、地域のローカリティーを考慮した



(a) スチールハウスのスケルトン (b) ねじ接合

図14 スチールハウスの概要

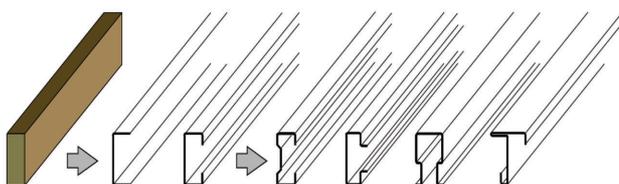


図15 様々な断面をもつ形鋼(木部材の鋼製化)

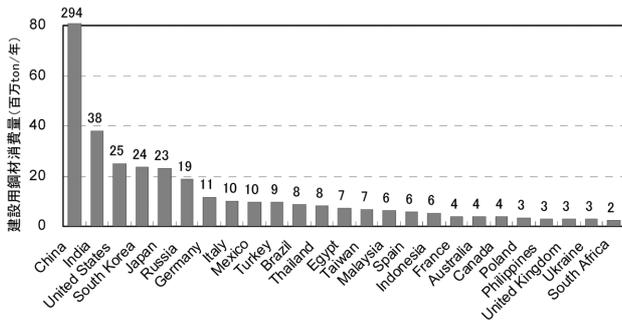


図16 国別の建設向け鋼材使用量(2010,世界鉄鋼協会他)

設計,建設が必要となる。とりわけ,地震や津波に対する不安は国際的にも強まっており,また,生活レベルの向上と共に過密化する都市内環境への関心も高まっている。地震や土砂災害への対応技術や環境調和型の施工技術などは日本の最も得意とするところであり,鋼材を中心とした日本の安全安心技術,環境調和技術がグローバルに展開できる可能性が大いに広がっていく。

5.3 サステナビリティに対する指向性の高まり

社会の持続的成長が議論される中,インフラのサステナビリティ(持続可能性)への注目が急速に高まっている。欧米や日本では既に建築物の環境性能評価制度が提案され,実際に活用されている(日本の評価システムはCASBEE)⁵⁶⁾。これらの評価制度の中では,地球環境,周辺環境にいかに対応しているか,ランニングコストに無駄がないか,利用者にとって快適か等の性能が定量的に評価される。建築物を中心としたインフラの仕様は,これらの評価制度に強く影響を受けていくことになる。

鋼材は,軽量性,耐震性,耐久性,リサイクル性,解体容易性などで優れており,サステナビリティ面で優れた材料と評価できる。しかしながら,これらの特徴が適切に考慮された性能評価は十分に確立されていないのが実態である。表1は日本,米国,欧州の評価システムについて,特に鋼材の特徴をどの程度考慮しているのかを比較したものであるが,評価にはばらつきが大きい。グローバル規模でのインフラの成長が期待される中,サステナビリティ

表1 主要な環境性能評価システムの比較

鋼材の優位性	日本 (CASBEE)	米国 (LEED)	欧州 (BREEAM, EPD)
強度	考慮	なし	なし
粘り強さ	考慮	なし	なし
耐久性	考慮	なし	考慮
非可燃性	なし	なし	なし
リサイクル性	なし	考慮	考慮
解体・分解容易性	考慮	なし	なし
CO ₂ 排出量	考慮	なし	考慮

に対する要求が増大し,その中で鋼材の持つ特徴を大いに活かせるチャンスが拡大していくものと予想される。

6. まとめ

過去の市場環境・条件の変化を俯瞰しながら市場ニーズの変化と当社の取り組みを辿り,今後の技術的展望を述べた。前半では,インフラを取り巻く環境変化は,社会の成長,災害や事故による要求性能の変化,鉄鋼からの革新技術の発信・提供によりもたらされたことを述べ,当社の5つの特徴的な取り組み(大規模インフラ,高耐震化,都市化進展,インフラ劣化・長寿命化,新トレンド創出)を紹介した。後半では,今後の技術展望として,安全性の確保と鋼材,グローバル市場での可能性,サステナビリティへの対応の3つの視点で鋼材の可能性を述べた。本報を通じて,鋼材ならびに利用技術はインフラ整備と共に発展し,社会の成長に伴う多様なニーズに応じて来たこと,当社は技術開発を先導して新たな技術トレンドの創出にも貢献して来たことを示した。鋼材は,今後ともインフラを支える重要な要素であり続けることは間違いなく,当社は多様化するニーズにタイムリーに応えた先進技術を継続的に創出し,グローバルに提供していく所存である。

参考文献

- 山崎鯛介,菅野良一 ほか:日本建築学会計画系論文集.(670),(2011)
- 古屋信明:橋梁と基礎.98(8),43-48(1998)
- 奥川淳志,鈴木周一:橋梁と基礎.98(8),49-98(1998)
- 森山彰:橋梁と基礎.98(8),130-131(1998)
- 岡村義弘,田中睦人 ほか:新日鉄技報.(356),62-71(1995)
- 本間宏二,田中睦人 ほか:新日鉄技報.(387),47-52(2007)
- 小西拓洋,高橋和也,三木千寿:土木学会論文集.No.654/I-52,91-103(2000)
- 山口種実,岡田忠義 ほか:新日鉄技報.(365),22-30(1995)
- 宇野暢芳,久保田学 ほか:新日鉄技報.(387),85-93(2007)
- 渡部義之,石橋清司 ほか:新日鉄技報.(380),45-49(2004)
- 徳納一成,岡村義弘 ほか:新日鉄技報.(365),37-43(1997)
- 吉田譲:JSSC.(74),4-5(2009)
- 鈴木孝彦,鈴木悠介 ほか:新日鉄技報.(387),64-73(2007)
- 長谷川博行,山口種美 ほか:新日鉄技報.(368),77-82(1998)
- 河内醇,板橋義則 ほか:新日鉄技報.(343),9-17(1992)
- 桑村仁,志村保美:日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿).No.21179,873-874(1987.1)
- 桑村仁,佐々木道夫 ほか:日本建築学会構造系論文集.(401),151-162(1989.7)
- 鈴木孝彦,石井匠,森田耕次:建築技術.140-149(2001.9)
- 古谷仁志,植森龍治 ほか:鋼構造論文集.7(27),(2000)
- 独立法人建築研究所監修:鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説.日本建築センター,2003,p.179

- 21) 児島明彦, 清瀬明人 ほか:新日鉄技報.(380), 2-5 (2004)
- 22) 永田匡宏, 志村保美 ほか:新日鉄技報.(368), 68-76 (1998)
- 23) 豊島光夫:基礎工. 2003.1号, 2-8 (2003)
- 24) 中村稔, 山口隆志 ほか:新日鉄技報.(368), 38-43 (1998)
- 25) 広沢規行, 中島正整 ほか:新日鉄技報.(387), 35-40 (2007)
- 26) 鱒田実, 田崎和之 ほか:新日鉄技報.(368), 27-37 (1998)
- 27) 岡扶樹, 木下雅敬 ほか:新日鉄技報.(368), 11-18 (1998)
- 28) 佐伯英一郎, 大木仁:新日鉄技報.(372), 40-48 (1999)
- 29) 辻井正人:建築技術.(10), 170-173 (2008)
- 30) 平田尚, 山下久男 ほか:新日鉄技報.(387), 17-23 (2007)
- 31) 是永正, 鳥崎肇一 ほか:新日鉄技報.(368), 19-26 (1998)
- 32) 原田典佳, 龍田昌毅 ほか:新日鉄技報.(387), 10-16 (2007)
- 33) 加藤篤史, 原田典佳 ほか:第55回地盤工学シンポジウム, 2010, p.95-102
- 34) 近藤哲己, 杉本雅一:新日鉄技報.(380), 95-100 (2004)
- 35) 野瀬哲郎:溶接学会誌. 77 (3), (2008)
- 36) 富永知徳, 松岡和巳 ほか:鋼構造論文集. 14 (55), 47-58 (2007)
- 37) 香川祐次, 中村俊一 ほか:土木学会論文集. No.435, IV-15, 69-77 (1991)
- 38) 佐藤弘隆, 石田正己 ほか:新日鉄技報.(377), 34-38 (2002)
- 39) 木下和宏, 藤川敬人 ほか:チタン. 59 (1), 40-45 (2011)
- 40) 紀平寛, 田中睦人 ほか:新日鉄技報.(380), 28-32 (2004)
- 41) 紀平寛, 田辺康児 ほか:土木学会論文集. No.780, I-70, 71-86 (2005)
- 42) 藤井康盛, 田中睦人 ほか:新日鉄技報.(387), 53-57 (2007)
- 43) 千々岩力雄, 為広博 ほか:新日鉄技報.(348), 55-62 (1993)
- 44) 作本好文, 大橋守 ほか:日本建築学会構造系論文集.(427), 107-115 (1991)
- 45) 杉沢充, 佐伯英一郎 ほか:新日鉄技報.(356), 38-46 (1995)
- 46) 山口種美, 中田安洋 ほか:新日鉄技報.(368), 61-67 (1998)
- 47) 佐伯英一郎, 杉沢充 ほか:日本建築学会構造系論文集.(473), 159-168 (1995)
- 48) 佐伯英一郎, 杉沢充 ほか:日本建築学会構造系論文集.(472), 139-147 (1995)
- 49) 河合良道, 菅野良一 ほか:新日鉄技報.(369), 8-17 (1998)
- 50) 川上寛明, 村橋喜満 ほか:新日鉄技報.(387), 74-84 (2007)
- 51) 半谷公司, 菅野良一 ほか:新日鉄技報.(369), 18-27 (1998)
- 52) 杉田浩司, 半谷公司 ほか:新日鉄技報.(369), 46-51 (1998)
- 53) 作本好文:新日鉄技報.(387), 7-9 (2007)
- 54) 国土交通省航空局:第1回空港の津波対策検討委員会・委員会資料(概要版). 2011.6.28, p.23
- 55) 新構造システム建築物研究開発合同委員会:革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト. JSSC. (59), 25 (2006)
- 56) 川津行弘, 横尾昇剛 ほか:日本建築学会技術報告集.(21), 201-210 (2005)



菅野良一 Ryoichi KANNO
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター所長
Ph.D.
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



松岡和巳 Kazumi MATSUOKA
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主幹研究員 工博



辻井正人 Masato TSUJII
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主幹研究員 Ph.D.



富永知徳 Tomonori TOMINAGA
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員 工博



半谷公司 Koji HANYA
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員 工博



尾崎文宣 Fuminobu OZAKI
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員 工博

執筆協力



石濱吉郎 Yoshiro ISHIHAMA
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE
鉄鋼研究所 接合研究センター所長,
ウエルテックセンター所長
工博



中安誠明 Nariaki NAKAYASU
鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター
主任研究員