

## 鋼構造と鋼材開発への取組みと今後の展望

## Advances in Steel Structures and Steel Materials in Japan

辻井 正人\*  
Masato TSUJII菅野 良一  
Ryoichi KANNO

## 抄 録

1900年頃、八幡製鉄所の設備建設において国産材による鋼製建築が建設されて以来、我が国は建設分野の構造の中で多種多量の鋼材を開発、実用化してきており、現在では最も鋼構造が発展した国の一つになっている。すなわち鋼材の技術開発が鋼構造の発展に繋がり、新しい鋼構造への挑戦が鋼材の研究開発を促すという好循環がなされてきた歴史である。鋼橋や鉄骨建築を例に、鋼構造の発展に伴った高強度化、耐震性能化などの鋼材の技術革新の歴史について述べた。更に鋼材の高性能の可能性について言及した。

## Abstract

Since the first domestic construction of steel structures in the 19th century, Japan has applied various types of steel materials and members into infrastructures. Nowadays, Japan becomes one of the most advanced countries as for construction development of steel structures. This development is due to the spiral up evolutions between the research on steel materials and the construction of steel structures. This paper describes the history of innovation of high strength steel and seismic durability. In addition with the potential of steel material development, the future advance of steel structures is addressed.

## 1. はじめに

日本の建設ストックは現在約800兆円に及んでおり、毎年相当量の鋼材が使用されている。年間約2500万トンの鋼材を建設分野で消費しており、その量は国内普通鋼材需要量の約40%を占める。国民一人当たりには換算すると約200kgの鋼材量であり、実に米国におけるその量の約2.5倍に相当する。日本の建築物の約30%（延べ床面積当たり）が鉄骨造である事実が示すように、日本の鋼構造の比率は諸外国と比べて格段に高い。

日本の鋼構造は世界初の鑄鉄製橋梁であるThe Iron Bridge（1779年）から遅れること約90年、1868年にくろがね橋（鑄鉄）、そして1888年に天竜川橋梁（初めての鋼）が建設された。橋梁に遅れること約20年、大型の鉄製建築として1889年に鉄道局新橋工場（鑄鉄と鍛鉄の併用）が、そして1894年には鋼を初めて適用した秀英舎印刷工場が建設された。その後、日本初の一貫製鉄所となる官営八幡製鉄所（1901年）の完成を契機に、日本の鋼構造は大きく進展し、以後100余年を経て、日本は鋼構造に関する世界の先進国となった。

1998年の世界最長（中央スパン1991m）のつり橋“明石海峡大橋”、独立電波塔として世界一の高さ（634m）となる“東京スカイツリー”（2012年）、そして地震国では最大級となる高さ300mの“あべのハルカス”（2013年）は日本が世界に誇れる鋼構造物である。ランドマークとなる斬新な構造物を継続的に実現してきた背景には、鉄鋼材料に関する技術革新の貢献がある。日本では、鋼材性能の向上が鋼構造物の発展を促し、また逆に新しい構造物の建設が鋼材の技術革新を生んで来た。

本報文では、日本の鋼構造物の発展をレビューすると共に、その発展を支えた鉄鋼材料の技術革新を概観する。更に、鉄鋼材料が持つポテンシャルを踏まえて、鋼構造の可能性を展望する。

## 2. 鋼構造の発展と鋼材

## 2.1 国産部材を用いた初の鋼構造

明治期の19世紀末まで、日本はイギリス、ドイツ、アメリカなどの国から鋼材を輸入し、外国人設計師の設計技術に多くを頼っていた。例えば写真1に示す官営八幡製鉄所に初めて建設された建家である尾倉修繕工場はドイツの

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

グーテホフヌンクヒュッテ社の設計と鋼材によって建設された<sup>2)</sup>。本工場は現在まで稼動しており、旧本事務所等とともに今年登録された世界遺産“明治日本の産業革命遺産”の一つである。

1901年の官営八幡製鉄所の発足により、国産の鋼材が多量に生産されるようになり、設計技術の旺盛な吸収もなされ、設計、材料、建設ともにオール国産の鉄骨工場が築造されていった。その第一号といわれているのが、景山 齋（後に八幡製鉄所長）の設計により1909年に完成したロール旋削工場である。写真2<sup>2)</sup>に全景と図1<sup>2)</sup>に設計図を示す。本工場は、張間20m、桁行110m、軒高17.2mの大型工場であり、柱は溝形鋼と山形鋼の組み合わせで構成されており、母屋にはZ形鋼、胴縁には山形鋼が用いられている。小屋組は山形鋼からなる美しいフィンクトラスで構成され、山形鋼と鋼板からなるクレーンガーダーを備えていた。

これら製鉄所建設黎明期の鋼構造物を設計してきたのは



写真1 八幡製鉄所建設風景（1900年）<sup>2)</sup>  
Construction of Yawata Steel Making Works (1900)

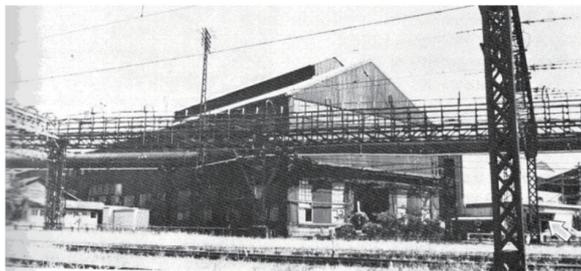


写真2 ロール旋削工場（1909年完成、1983年当時写真）<sup>2)</sup>  
Roll lathe-turning factory (constructed in 1909)

機械工学科、土木工学科、建築学科などを卒業した若き技術者たちの活躍によるところが大きい。ここで培った鉄骨造建築の技術が海軍工廠、造船所など、全国に伝播して日本の鋼構造技術の発展に繋がっていった<sup>2)</sup>。

## 2.2 建築、タワーの発展と鋼材

その後、数度の戦争を経て、日本の鉄骨造建築は1960年代の高度成長期に急速に成長した。その発展は、巨大地震との戦いの歴史であり、その結果、美しさとロバスト性を兼ね備えた高層建築物を提供して来た。日本の建築物の殆どは5階建て以下であるが、橋梁と同様に、高層建築向けに開発された鋼材、技術が順次中低層建築物に適用され、鉄骨造が広く普及する経緯を辿って来た。

図2に日本の鉄骨加工量と一般建築ならびに自立式鉄塔の最大高さの年代別推移を示す<sup>3)</sup>。併せて、開発、実用化された鋼材の名称、主な発生地震などのイベントを図中に示している<sup>4)6)</sup>。日本の鉄骨加工は相当な量に及んでおり、年間600万トン以上が約40年近く続いてきた。その加工量は橋梁における鉄鋼使用量のおおよそ10倍以上に及ぶ。1990年には現在のイギリス一国の粗鋼生産量に匹敵する約1200万トンの加工量を記録した。

一般建築においては、1961年の建築物の高さ制限31mの撤廃を契機として、100mを超える高さ156mの霞が関ビルが1968年に建設された。日本における高層建築の幕開けである。その後、東京都庁第一本庁舎や横浜ランドマー

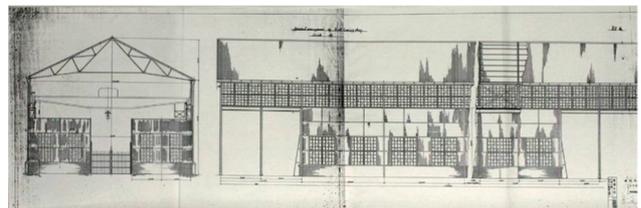


図1 ロール旋削工場設計図<sup>2)</sup>  
Design drawing of roll lathe-turning factory

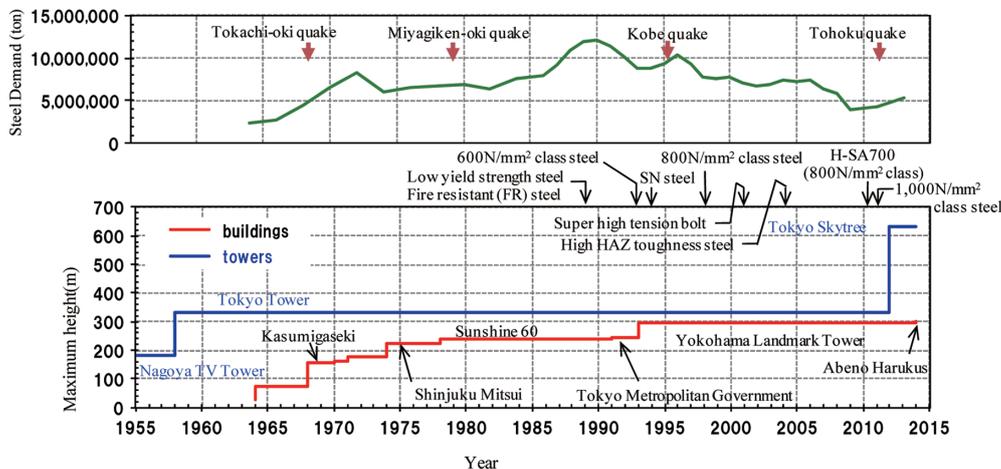


図2 日本の建築の高層化と鋼材の高強度化の歴史  
Timelines of estimated steel demand and maximum heights of buildings and towers

クタワー、最近のあべのハルカス（写真3）といった日本を代表する高層建築物が建設されている<sup>7)</sup>。また自立式鉄塔では、当時世界最高の東京タワーが建設された後、2012年に世界最高の高さとなる東京スカイツリー（写真4）が完成した。

しかしながら、日本の建築の最高高さは300mに留まっており、世界的に見れば低位である。また、その高さは約50年前の日本の最大高さの2倍に満たない。その背景には航空法上の高さ規制もあるが、世界でも稀に見る地震国であるが故のリスクがある。このため、建築鉄骨への高強度鋼の適用は橋梁より遅れて始まった。1993年に引張強度600N/mm<sup>2</sup>級鋼が横浜ランドマークタワーに適用され<sup>8)</sup>、1998年に小倉駅ビルに引張強度800N/mm<sup>2</sup>級鋼が適用された。いずれの鋼材ともに橋梁仕様とは異なり、塑性変形能力に優れた建築専用鋼である。

2010年前後には、溶接性と生産性に優れた新たな引張強度800N/mm<sup>2</sup>級鋼と建設向けで最高強度となる1000N/mm<sup>2</sup>級鋼が実建築物に適用された<sup>9)</sup>。特に800N/mm<sup>2</sup>級鋼は自立式鉄塔世界一の高さを誇る東京スカイツリーの実現に貢献した。鋼材の高強度化の一方で、写真5に示すような耐

震性能を高めるダンパー向けの低降伏点鋼（降伏強度100N/mm<sup>2</sup>級鋼、225N/mm<sup>2</sup>級鋼）が1990年頃に開発された<sup>10,11)</sup>。また、2004年には大入熱溶接でも溶接熱影響部(HAZ)のじん性確保が可能となる高HAZじん性鋼が開発された<sup>12)</sup>。以上のように建築では、高強度化のみならず、耐震性能を高めるための鋼材が精力的に開発、提供され、極大地震に対するロバスト性を備える鋼構造が実現されてきている。

### 2.3 橋梁の発展と鋼材

日本は複数の島によって構成され、河川や山地が多く存在する。このため、国内を道路、橋梁で結ぶことが重要な国家施策の一つとなった。精力的に推進された長大橋の建設では、鉄鋼メーカーが総力を挙げて最新の鋼材を開発し、その成果は、順次一般橋梁に適用されてきた。図3に日本の鋼橋受注実績の年別別推移に併せて、代表的な橋梁であるつり橋、斜張橋、トラス橋の最大スパンの推移<sup>13)</sup>、そして開発、実用化された主な鋼材、技術を示す<sup>14)</sup>。

1960年代後半から2000年代初めまでの30年以上の期間に渡り、年間50万トン前後の鋼材が橋梁に使用されて



写真3 あべのハルカス  
Abeno Harukas



写真4 東京スカイツリー  
Tokyo Skytree



写真5 地震エネルギー吸収ブレース<sup>10,11)</sup>  
Building with energy absorption dampers (buckling restrained braces)

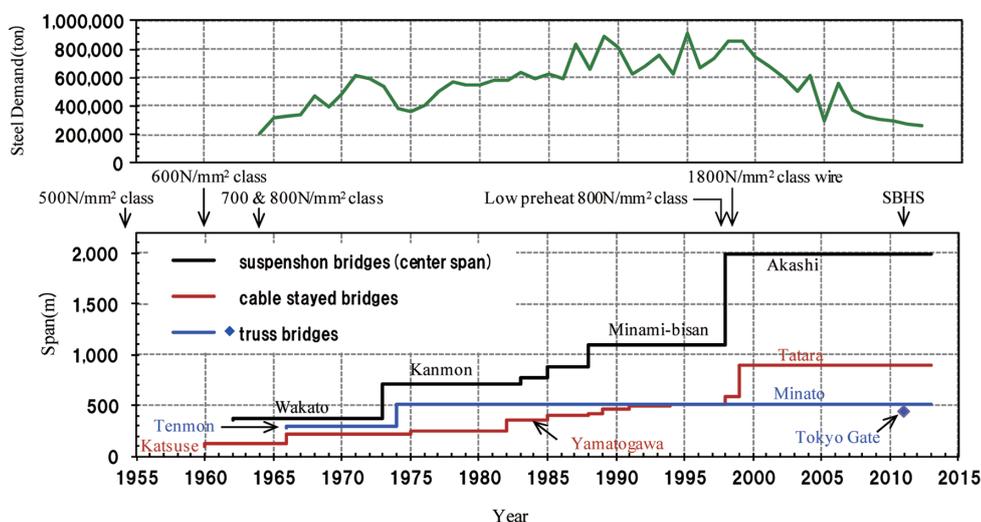


図3 日本の橋梁の長大化と鋼材の高強度化の歴史  
Timelines of estimated steel ordered and maximum spans of bridges



写真6 明石海峡大橋 (本州四国連絡高速道路(株)提供)  
Akashi Kaikyo Bridge

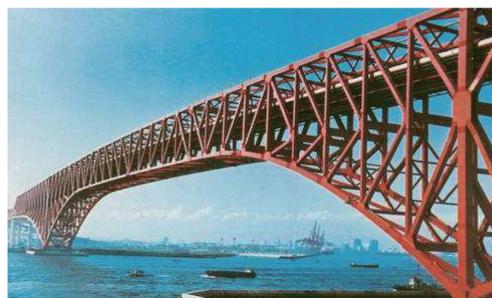


写真8 港大橋 ((一社)橋梁建設協会提供)  
Minato Ohhashi Brige



写真7 多々羅大橋 ((一社)尾道観光協会提供)  
Tatara Ohhashi Bridge



(a) Panoramic view (b) Welded panel point

写真9 東京ゲートブリッジ  
Tokyo Gate Bridge

来た。1990年代には最大となる年間90万トンを記録している。このような活発な橋梁の建設に伴って、つり橋、斜張橋、トラス橋のスパンの拡大が図られ、現時点での最大スパンは各々約2000m、900m、500mに及んでいる。いずれも、建設当時は世界1あるいは3位にあったものであり、現在でも、つり橋は明石海峡大橋(写真6)が世界1位、斜張橋では多田羅大橋(写真7)世界5位、トラス橋は港大橋(写真8)が世界3位の座にある。このような橋梁の大スパン化を支えたのが日本の高性能な鋼材である。

当初、明石海峡大橋の計画では、従来の引張強度(1600N/mm<sup>2</sup>)の鋼線を用いた場合、ケーブルが片側2本ずつの合計4本必要となり、施工費の増大や死荷重の増加を招く問題があった。これを解決したのが、引張強度を一挙に約200N/mm<sup>2</sup>アップして1800N/mm<sup>2</sup>級を達成した高強度鋼であり、これが世界一の長大橋の実現を可能とした(1998年完成)<sup>15)</sup>。現在は既に2000N/mm<sup>2</sup>級の鋼線も開発されており、つり橋の中央スパン2000m超えも可能な時代になってきた<sup>16)</sup>。

橋桁などに適用される鋼板については、1954年に引張強度500N/mm<sup>2</sup>級鋼が適用された(相模大橋)。その後1960年に引張強度600N/mm<sup>2</sup>級鋼が適用され、広く普及するようになった(西村橋、平野橋)。1974年には港大橋に引張強度700N/mm<sup>2</sup>級鋼と800N/mm<sup>2</sup>級鋼が大量に使用され、それまでのトラス橋の国内最大スパン記録を一挙に約2倍に塗り替えた。

明石海峡大橋では、補剛桁の製作性向上のニーズが高ま

り、低予熱型800N/mm<sup>2</sup>級の鋼板が開発され、橋梁の生産性向上に大きく貢献した。これを契機に、1990年代後半以降は鋼材の高強度化、高じん性化、高溶接性を同時に実現するための高性能鋼SBHS鋼(降伏強度500、700N/mm<sup>2</sup>級)が開発、規格化され、2012年に完成した東京ゲートブリッジで大量採用された。高い溶接性を兼ね備える高性能鋼の出現により、東京ゲートブリッジでは、大型トラス橋では最新のボルトレスの全断面溶接が採用された<sup>17)、18)</sup>。鋼材が新たな構造美を提供した例である。写真9に東京ゲートブリッジ全景と格点部の写真を示す。

### 3. 鋼構造物の発展に貢献した鋼材

鋼構造物の旺盛な建設と相まって、過去数十年に渡って革新的な鋼材が開発、実用化されてきた。表1に日本で開発された鋼材の主な特徴を示す。製造技術の革新によって高強度化とともに低強度化といった強度多様性、溶接性や変形能力などの機能面での多様性、そして鋼材のサイズ多様性が飛躍的に拡大した。本章では、日本の特徴的な構造物用鋼材を紹介する。

#### 3.1 高強度鋼(厚板、ケーブルならびに高力ボルト)

##### 3.1.1 鋼材(厚板)

図4に日本における橋梁と建築への高強度鋼適用の年代推移を示す。長大橋建設ニーズの高まりもあって、橋梁への高張力鋼の適用が先行し、その後建築への適用が進展した。橋梁は弾性設計が基本であったことから、1960年代までに引張強度800N/mm<sup>2</sup>級鋼までの適用が進んだ。これら高強度鋼は、専ら炭素量アップやNiなどの合金添加といった伝統的な技法に依った。

一方、建築物においてはその耐震性能に及ぼす懸念や

表1 日本の鋼材の主な技術開発  
Major characteristics of steel materials developed in Japan

Characteristics	Strength versatility	Function versatility	Section versatility
Material features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extra high strength (1800N/mm<sup>2</sup> class cable wire and 1400N/mm<sup>2</sup> bolt)</li> <li>• High strength (plates with tensile strengths of 600 to 1000N/mm<sup>2</sup>)</li> <li>• Low strength (plate with yield strengths of 100 to 225N/mm<sup>2</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High weldability</li> <li>• Low yield-to-tensile strength ratio (low yield ratio)</li> <li>• High fracture toughness</li> <li>• Narrow yield strength range</li> <li>• High geometrical accuracy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thick plates and sections</li> <li>• Large sections</li> </ul>
Production technologies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced metallurgy (microstructure control and strength ening technologies)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermo mechanical control process (TMCP)</li> <li>• Advanced smelting and refining technology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced rolling technology</li> </ul>

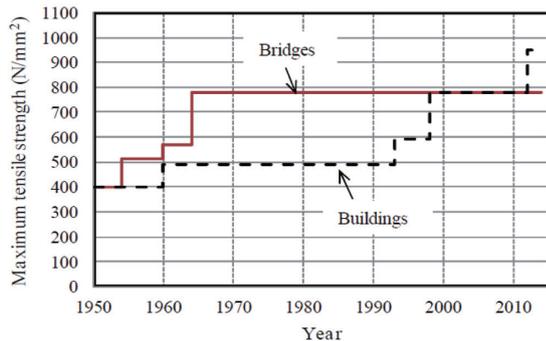


図4 鋼材の高強度化の歴史  
Timeline of maximum tensile strength

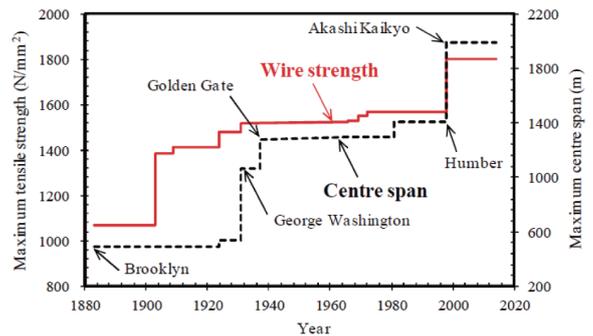


図5 橋梁スパンの長大化とワイヤ強度の高強度化  
Timeline of wire strength and center span

1980年代の弾性設計から塑性設計への移行もあり、建築物への高強度鋼の適用は慎重に進められた。1980年代後半には建築用鋼材の必要性能が精力的に検討され、建築物向け鋼材には優れた塑性変形性能が要求されることとなった<sup>4,5,19)</sup>。その結果、高強度鋼の適用が進展したのは1990年代以降となった。2000年代以降、地震エネルギーをダンパーによって吸収し、柱ならびに梁の損傷を抑制する損傷制御構造が実用化された<sup>20)</sup>。これにより、引張強度950N/mm<sup>2</sup>級の鋼材の建築物への実適用も試みられた。この高強度鋼の塑性変形能力は従来鋼より小さいが、ダンパーとの組み合わせにより建築物としての性能を確保している。構造システムと鋼材の組み合わせの最適化が適用された例と考えられる。

### 3.1.2 ケーブル用鋼線

図5には世界のつり橋の中央スパンとケーブルワイヤの引張強度の推移を示す。鋼線強度の飛躍的な拡大により、世界一の中央スパンを持つ明石海峡大橋が可能となった。一般的に高強度鋼線は炭素量を0.8%程度まで高めて、硬質層と軟質層が層状に構成されるパーライト組織により実現する。硬質層と軟質層の間隔をラメラ間隔と呼ぶが、冷間加工と熱処理により、ラメラをより明確に構成し、更にもその間隔を小さくすることが高強度化の基本となる。

鋼線は耐食性向上のために溶融亜鉛めっき処理を施すが、めっきプロセスの熱影響によってラメラが崩れるとい

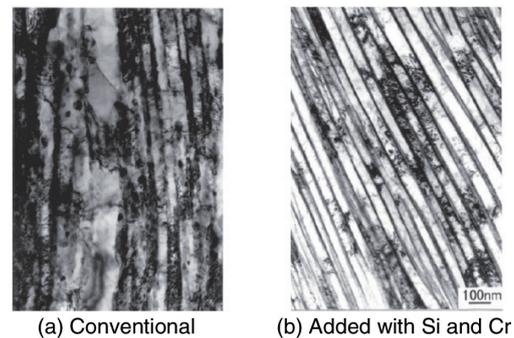


写真10 ワイヤ組織の違い  
Differences of wire configuration

う現象があり、高強度化の阻害要因となっていた(写真10参照)。Siの添加によってラメラ構成が維持できる事実が見出され、従来にない高強度鋼線の実用化に繋がった。現在では原子レベルにおける観察により、Siはセメントナイト(炭素化合物)からの炭素拡散を抑制することが分かっている<sup>21)</sup>。微細な層状組織を備える高強度ワイヤは“天然の複合材料”とも言える。

### 3.1.3 高力ボルト

リボルトの代わりに高力ボルトが日本で初めて使われたのは1958年である。図6に高力ボルトの強度推移を示す<sup>22,23)</sup>。1964年に引張強度700N/mm<sup>2</sup>級から1300N/mm<sup>2</sup>級まで規格化されたが、1300N/mm<sup>2</sup>級は直ぐに水素脆化の問題が発生し、最大強度は1100N/mm<sup>2</sup>級に留まった。

その後、1100N/mm<sup>2</sup>級も水素脆化の問題が顕在化し、1979年以降は1000N/mm<sup>2</sup>級が標準となった。水素脆化という根幹的な問題により、ボルトの高強度化は20年に渡って停滞した。

1999年に水素脆化の問題を解決し、400N/mm<sup>2</sup>もの強度アップを実現した超高力ボルト（SHTB）が開発された<sup>22)</sup>。ボルトの水素脆化は、ボルトの腐食によって生成された水素が、鋼材中に侵入し、応力集中部に移動ならびに集中して、材料の脆化を引き起こすことに起因している（図7）。このため、ボルトのねじ底などの形状を最適化して応力集中を緩和すると共に、MoやVの合金炭化物を鋼材中に生成し、その炭化物により水素をトラップして移動を抑制することによって、水素脆化の問題をブレイクスルーした。

SHTBはこれまで10年以上に渡って建築物に広く適用されてきている。現在では構造物建設の省力化に貢献する技術として高く評価され、一般的に認知される存在となっている。

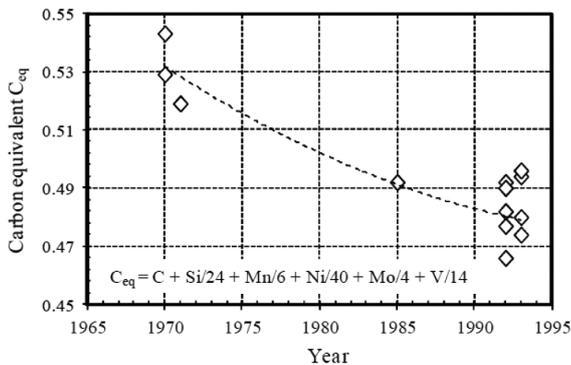


図6 橋梁用鋼 800N/mm<sup>2</sup> 級鋼における C<sub>eq</sub> の変遷  
Chronological trend in C<sub>eq</sub>

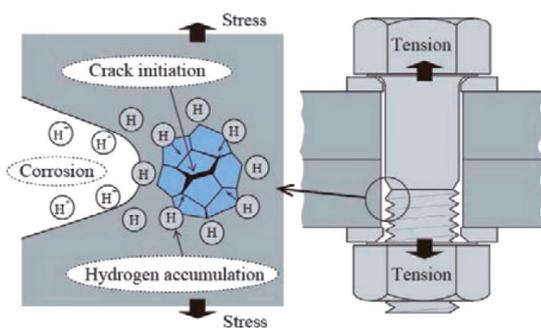


図7 水素脆化のメカニズム  
Mechanism of hydrogen embrittlement

### 3.2 橋梁用高性能鋼

1960年代に橋梁における高強度鋼の適用は急速に進展したものの、焼き入れ性確保のためにCやBなどを多く含んでいたため、低温割れなどの溶接性の問題があった。このため100℃以上の予熱が必要となる課題があり、予熱低減型800N/mm<sup>2</sup>級鋼が開発された。図8は、橋梁用の800N/mm<sup>2</sup>級鋼材のC<sub>eq</sub>の推移を示すが、鋼材の清浄化技術の進化もあり、年代と共に急速な低減が図られてきた<sup>24)</sup>。

橋梁用鋼材は強度と溶接性の観点での高性能化が図られて来たが、求められる性能は強度と溶接性に留まるものではない。1992年のアメリカにおける橋梁用高性能鋼材の研究に触発され、日本でも1994年に橋梁用高性能鋼の研究が開始された。要求性能として、降伏強度や引張強度に加えて、破壊じん性、溶接性、冷間加工性、更には耐候性が定められ、橋梁専用の鋼材としてSBHS400, 500, 700（数値は降伏強度）が開発された。2008年に新たな鋼材規格（JIS G 3140 - SBHS）であるSBHS500と700が認定され、2012年にSBHS400が追加された<sup>18)</sup>。組織の微細化により強度とじん性を両立させた鋼材であり、後述する熱加工制御プロセス（TMCP）技術により可能となった。SBHSと同じ特性の鋼材は東京スカイツリーにも適用された<sup>19)</sup>。

橋梁用高性能鋼は、既にアメリカや韓国でも規格化されているが、表2に示すように、日本のSBHSの降伏強度保証値はアメリカや韓国に比べて高い<sup>18)</sup>。じん性に関してもSBHS鋼は試験方向がより厳しい圧延直角方向であり、加えて保証値も高い。日本のSBHS鋼は総じてより高い性能を持つ。

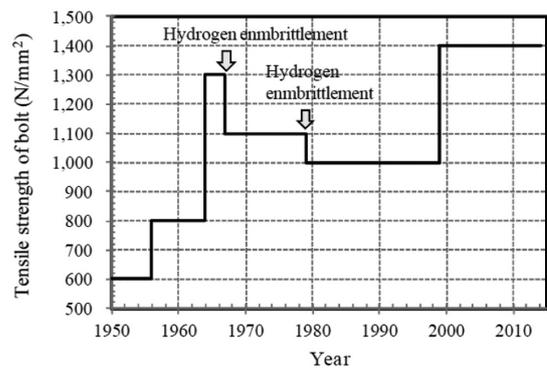


図8 高力ボルトの歴史  
Timeline of maximum bolt strength

表2 各国の橋梁用鋼材の比較  
Comparison of high performance steels for bridges

Country	Specification	Yield strength	Tensile strength		Charpy impact test		
		Minimum (N/mm <sup>2</sup> )	Minimum (N/mm <sup>2</sup> )	Maximum (N/mm <sup>2</sup> )	Minimum (N/mm <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Specimen direction
Japan	JIS G 3140 SBHS500	500	570	720	100	-5	Transverse
USA	ASTM A709 HPS485W	485	585	760	34	-23	Longitudinal
Republic of Korea	KS D3868 HSB500	450	600	N.A.	47	-5	Longitudinal

### 3.3 耐震用鋼材

1982年に建築物の耐震設計法が弾性設計から塑性設計に大きく変化した。これに伴って、鉄骨の塑性変形性能の確保に適した建築専用の鋼材（SN鋼，SA440鋼など）が開発された<sup>4,5,19)</sup>。その鋼材は、橋梁用鋼材でも規定されているじん性値や板厚方向強度に加えて、1) 降伏比（引張強度に対する降伏強度の比）の上限、2) 降伏強度の上下限という特有の性能を規定した点に特徴がある。

降伏比は部材の変形能力に直接関連する性能指標である<sup>25)</sup>。図9の簡単な力学モデルが示すように、梁端部が限界状態に達する際の塑性域の広がり $L_p$ は降伏比YRに関連し、YRが低いほど梁の塑性変形領域が大きくなる。このため、引張強度400～600N/mm<sup>2</sup>級の鋼材では降伏比80%以下とする規定が導入された。低降伏強度（YP）の鋼材は組織制御により製造されており、硬質と軟質の二層組織を基本として、組織の粒径制御によって必要な強度とYRの実現を図った。

一方、降伏強度の上下限レンジは骨組み全体の変形性能に影響を及ぼす性能指標である。図10に示すように、柱に先だって梁が塑性化するメカニズムとすることが骨組み全体の変形性能の向上をもたらす<sup>26)</sup>。梁の先行降伏を保証するためには、降伏強度のばらつきを制限する必要がある。このため、引張強度400～600N/mm<sup>2</sup>級の鋼材では、上下限の範囲を100～120N/mm<sup>2</sup>とする規定を導入した<sup>27)</sup>。降伏強度の上下限は、製造プロセス管理の高度化により実現している。

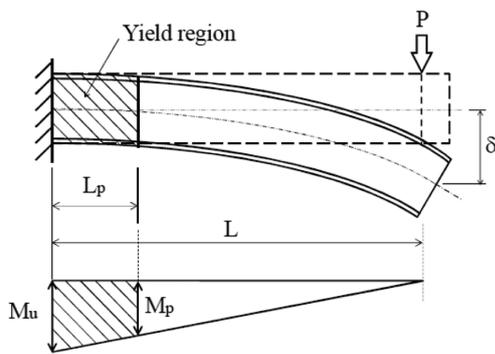


図9 片持ち梁の塑性域の発達  
Yield spreading in cantilever beam

降伏比や降伏点の上下限は日本が世界に先駆けて規定したものであり、日本から発信された性能要求である。表3に主だった国の耐震設計用に使用される類似強度レベルの鋼材の性能規定を比較して示す。降伏比、じん性値の規定共に、日本の規格が最も厳しいことが分かる。なお、欧州では降伏比の上限が規定されておらず、今後の検討の余地が残る。

### 4. 高性能な鋼材開発を支えた製造技術

日本の高性能な鋼材開発を支えた製造技術は、1) 鋼材の高清浄化、2) 組織制御のメタラジー、3) TMCP技術による組織微細化である<sup>28)</sup>。鋼材の特性は、製造上不可避免的に含まれる炭素や硫黄、燐などの含有量に影響を強く受ける。日本ではこれらの元素の量を最適化した上で、先端的なメタラジーとTMCP技術により組織を制御して材料特性を制御する技術が発展した。最も特徴的な技術がTMCP技術である（図11）<sup>29,30)</sup>。

TMCP技術は、鋼の成分、加熱温度、圧延条件、冷却条件を最適に制御し、原則として“圧延まま”で微細な組織化を図り、高強度と高じん性を両立させる技術である<sup>31)</sup>。TMCP技術は、高温域での転位導入により組織微細化を図る“制御圧延”と粒成長を抑制しつつ焼き入れ効果を得る“加速冷却”を組み合わせた技術である。この技術により、より少ない炭素量と合金元素で、溶接性に優れた高性能な鋼材を生産性高く製造することができる。写真11にTMCP鋼の組織写真を一般的な溶接構造用鋼材および

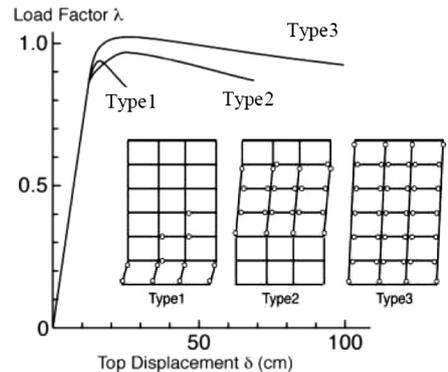


図10 梁先行降伏型の崩壊機構<sup>26)</sup>  
Collapse mechanisms and their deformation capacity

表3 各国の耐震設計基準における鋼材仕様の比較  
Comparison of steel specifications for seismic design

Country or region	Specification and designation	Yield strength		Maximum yield ratio	Charpy impact test	
		Minimum (N/mm <sup>2</sup> )	Maximum (N/mm <sup>2</sup> )		Charpy energy (J)	Temperature (°C)
Japan	JIS G 3136 SN490B	325	445	0.8	27	0
USA	ASTM A992	345	450	0.85	27 <sup>*2</sup>	21 <sup>*2</sup>
Europe	EN-10025 S355JR	355	N.A.	0.91 <sup>*1</sup>	27	20

Note: \*1 Maximum yield-to-tensile strength ration is required not in the EN-10025 but in Eurocode 3

\*2 Supplemental requirements

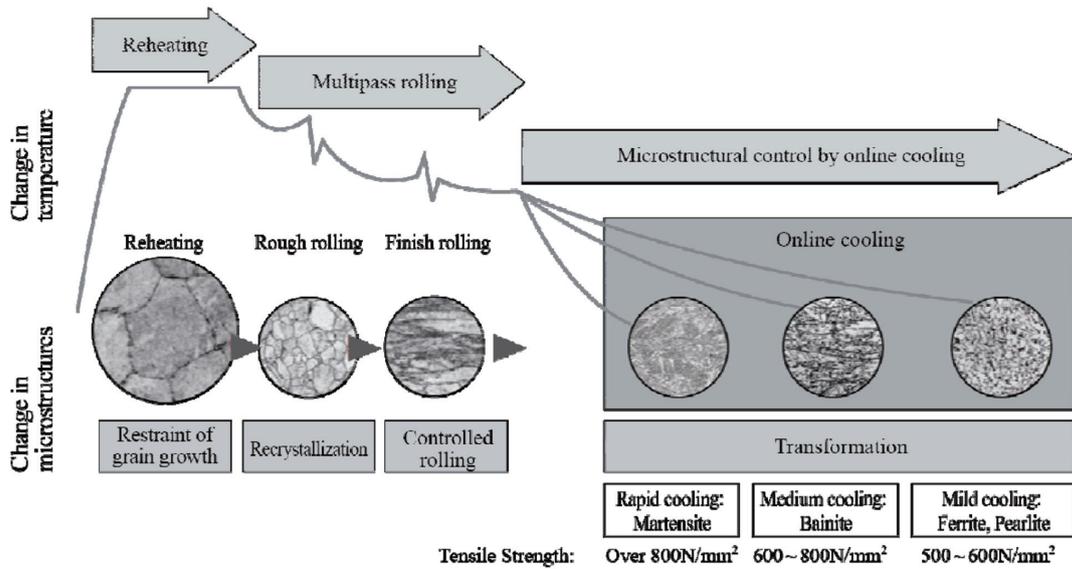


図 11 TMCP 製造技術<sup>32)</sup>  
Outline of thermomechanical control process (TMCP)

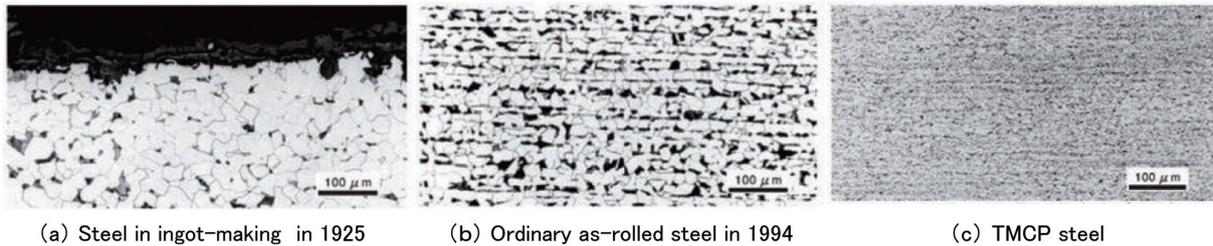


写真 11 鑄鉄 (1925 年), 圧延まま鋼材 (1994 年) と TMCP 鋼  
Comparison of microstructure of steels made by different production processes

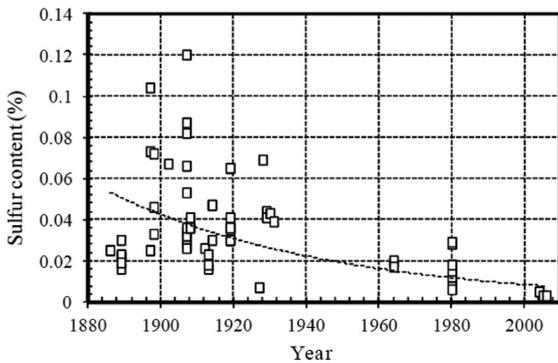


図 12 硫黄含有量の急速な減少  
Chronological change in sulfur content

1925 年に製造された鋼材の組織と比較して示す<sup>32)</sup>。通常の鋼材の粒径は  $20\mu\text{m}$  程度であるが、TMCP により  $5\mu\text{m}$  程度に微細化されている。

図 12 に実際の鉄道橋から採取した  $400\text{N/mm}^2$  級鋼の S 含有量を示すが、製鋼技術による鋼材の清浄化の進展により、年代と共に S が急速に減少していることが分かる<sup>33)</sup>。

### 5. 鋼材のポテンシャルと鋼構造の更なる発展

図 13 は主な工業材料の引張強さの範囲を示した模式図である<sup>34,35)</sup>。厚板などバルク材の鋼材強度は  $400\sim 600\text{N/mm}^2$

であるが、線材を含めると鉄鋼材料は  $200\sim 4000\text{N/mm}^2$  という強度を持つ。他の素材と比較して、炭素繊維と鉄鋼材料の強度範囲は格段に広い。これは、鉄鋼材料が鉄と炭素の合金であり、高温状態からの冷却によって相変態を起こす特徴を持つためである。炭素量や冷却速度を変えることにより様々な変態組織を得ることができ、その結果、鋼材は多様な材料特性を作り出せる。更に鋼材の理想強度は  $10000\text{N/mm}^2$  以上に達する。鋼材は発展途上であり、大きな可能性を秘めた“新素材”といえる。

自動車の分野では車体軽量化の強いニーズを受けて、過去数十年の間に鋼材の高強度化が急速に進展した<sup>36)</sup>。1990 年代後半には  $400\text{N/mm}^2$  級であった鋼材の引張強度が現時点では  $1200\text{N/mm}^2$  級まで向上した。このような高強度化は、硬質と軟質の複合組織を持つ DP 鋼や不安定なオーステナイトのマルテンサイト変態誘起塑性効果を持つ TRIP 鋼などの新たな鋼材の開発により達成された (図 14)<sup>37)</sup>。現在では、 $25\sim 30\%$  という大きな伸び性能を持つ引張強度  $1000\text{N/mm}^2$  級鋼も報告されている。また、ホットスタンプと呼ばれる熱間プレス活用の活用により、 $1500\text{N/mm}^2$  以上の高強度化 (一部は  $1800\text{N/mm}^2$ ) も実現されており<sup>38,39)</sup>、鋼材は急速な進化を遂げている。

以上のように自動車分野を中心に鋼材の性能向上への旺

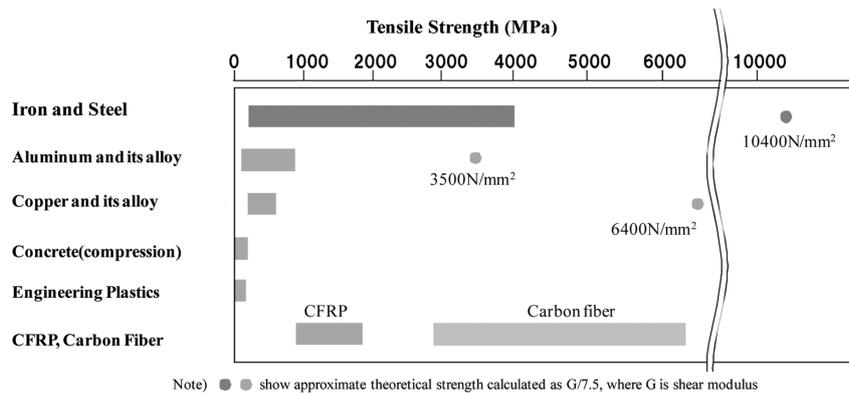


図 13 産業に使われる材料の引張強度の比較  
Comparison of tensile strength of various industrial materials

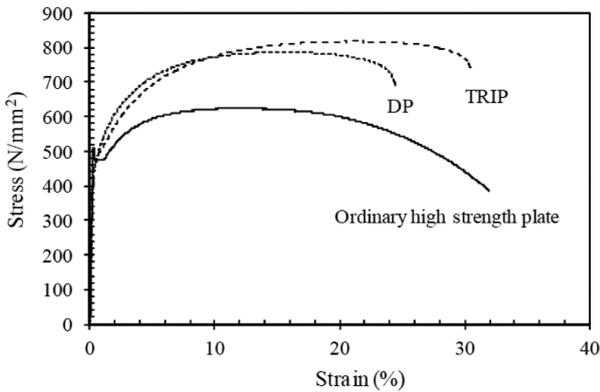


図 14 鋼材における応力-ひずみ関係の比較例  
Comparison of stress-strain relationships

盛な挑戦が続けられている。一方、一層の高強度化<sup>40)</sup>や高ヤング率化<sup>41)</sup>、更には疲労亀裂伝播を抑える高耐久性化<sup>42)</sup>などが研究開発されており、これらの新鋼材開発は、鋼構造の可能性を今後一層拡大していく駆動力となるものである。

社会基盤を形成する構造物に目を転ずれば、様々な社会ニーズとその視点が存在する。ますます高まる自然災害リスク（地震動、土砂災害、洪水、津波、液状化、噴火）やテロなどを含む人的災害リスク（交通事故、大規模火災・爆発）、産業インフラストラクチャも含めた構造物劣化対応（劣化診断、LCCA、アセットマネジメント）、サステナブル社会実現に向けた課題（各種エネルギー利用の多様化、省エネルギー、環境保全、快適化）、少子高齢化、労働者不足への対応（建設省力化、ロボット化、マルチマテリアル）、社会高度化に向けた新空間開拓（洋上、深海、大深度地下、超高層、宇宙）や建設ソフトウェア、技術のグローバル市場への展開などが主な対象となる。これらは、革新的材料の開発に加えて、構造技術（構造システム、設計・評価技術）や、場合によってはビジネスモデルの開発も必要となる“広範な課題群”であるといえる。

これら多種多様な課題群は現在のところ、国内の技術課題であると捉えることができるが、今後の東南アジアを中

心とした建設市場の拡大に伴い、グローバルな課題群になっていくのは必至である。鋼材が活躍する場面も更に大きく広がりを見せていくと考えられ、一層の鋼材の多様化、高性能化（強度、剛性、エネルギー吸収能、耐食性、耐火性など）が求められていくと予想できる。

## 6. おわりに

本報文では、日本における鋼構造物の発展と鉄鋼材料の技術革新についてレビューを行った。本レビューを通じて、日本では鋼材性能の向上が鋼構造物の飛躍を促し、また逆に新しい構造物の建設が鋼材の技術革新を生んできた。建築物では、建築物の高層化に伴って鋼材が高強度化し、降伏比の上限や降伏強度のばらつき制限などが規定された耐震性能に優れた鋼材開発が進められた。橋梁においては、つり橋の中央スパンと鋼線強度との関係に見られるように、鋼材の高強度化が橋梁の大スパン化を支え、それに拍車をかけた。

また、様々な高性能な鋼材の開発を支えた代表的な製造技術として日本がいち早く実用化した TMCP 技術を紹介した。自動車分野の高強度鋼の研究事例を通じて、鋼材の強度ポテンシャルはまだ高く、開発途上の“素材”であることを示した。日本で開発された高性能鋼は、新興国を中心に今後グローバルに拡大していく建設市場の発展に貢献するものであり、日本で見られた“鋼構造と鋼材の間の相互に革新を生み出す関係”が、広く世界にも展開されていくことを期待する。

## 参考文献

- 1) Kanno, R., Tsujii, M.: Advances in Steel Materials and Steel Structures in Japan. IABSE Nara Conference, 2015
- 2) 開田一博：日本における鉄骨構造建築の導入と発展過程に関する研究. 2009, p. 27-29, p. 60-76
- 3) Wikipedia: List of Tallest Structures in Japan, [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_tallest\\_structures\\_in\\_Japan](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_structures_in_Japan)
- 4) 計良光一郎：建築建材技術の動向と今後の展望. 新日鉄技報.

- (368), 7-10 (1998)
- 5) 内田直樹, 小林紳也: 鋼構造建築の変遷 (特集 鋼構造耐震設計の原点を考える). 建築技術. 103-111 (2001)
  - 6) 廣田実: 建設構造用鋼材の技術史 (特集 新ランドマークを支える鉄鋼材料). 特殊鋼. 2-4 (2013)
  - 7) 平川恭章: あべのハルカスの構造設計・施工概要. 日本鋼構造協会機関誌. 18-21 (2013)
  - 8) 山口種美, 岡田忠義, 長谷川博行 ほか: 建築用構造鋼材の開発と実用化. 新日鉄技報. (356), 22-30 (1995)
  - 9) 村上行夫, 杉本真隆, 福田浩司: 鋼構造材料開発の最近の動向: 高強度化 (第4回) 建築分野での超項高強度鋼材の実用化に関する取り組み. 日本鋼構造協会機関誌. 42-46 (2014)
  - 10) Kasai, K., Nakai, M., et al.: Current Status of Building Passive Control in Japan. Proceedings of 14WCEE. 2008
  - 11) Kasai, K., Matsumoto, Y., et al.: Recent Development of the Seismic Resistant Steel Structures in Japan. EUROSTEEL 2014
  - 12) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治 ほか: 微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術“HTUFF”の開発. 新日鉄技報. (380), 2-5 (2004)
  - 13) 日本橋梁建設協会: 橋梁年鑑 2014. 2014, 194p
  - 14) 菅野良一, 辻井正人, 半谷公司, 松岡和巳, 富永知則, 尾崎文宣: 社会の発展を支える鋼材と鋼構造 (インフラ分野). 新日鉄技報. (391), 57-66 (2011)
  - 15) 高橋稔彦, 樽井敏三 ほか: 橋梁ケーブル用 180kgf/mm<sup>2</sup> ワイヤの開発. 鋼構造論文集. 119-126 (1994)
  - 16) 樽井敏三, 西田世紀, 吉江淳彦 ほか: 2000MPa 亜鉛めっき鋼線及び 2300MPa 級 PC ストランド用線材の開発. 新日鉄技報. (370), 45-50 (1999)
  - 17) 三木千寿, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 橋梁用高性能鋼材 (BHS500, 700) の提案. 土木学会論文集. 1-10 (2003)
  - 18) 田中睦人: 東京ゲートブリッジに用いた橋梁用高性能鋼材 (SBHS) (材料開発最前線 東京ゲートブリッジにおける新材料と技術). 未来材料. 19-25 (2012)
  - 19) 廣田実, 山口徹雄, 鈴木孝彦: 鋼材 東京スカイツリーを支える極厚高強度鋼材. 溶接学会誌. 237-240 (2013)
  - 20) Kitaoka, S., Fukuda, K., Ichinohe, Y., et al.: Application of 1,000 MPa Class Ultra-high Strength Steel to the Building. IABSE Nara Conference, 2015
  - 21) 丸山直紀, 植森龍治, 森川博文: 電界放射型分析電子顕微鏡 (FE-AEM) の金属材料研究への応用. 新日鉄技報. (359), 6-11 (1996)
  - 22) 宇野暢芳, 久保田学, 永田匡宏 ほか: 超高力ボルト SHTB®. 新日鉄技報. (387), 85-93 (2007)
  - 23) 田中淳夫: 鋼構造における高力ボルト接合. 鉄と鋼. 587-592 (2002)
  - 24) 中西保正, 井元泉, 焼野保雄: HT780 高張力鋼の予熱条件に関する研究. 日本鋼構造協会年次論文報告集. 1994, p. 449-456
  - 25) Kato, B.: Rotation Capacity of H-Section Members as Determined by Local Buckling. J. of Constructional Steel Research. 13, 95-109 (1989)
  - 26) Kuwamura, H., Sasaki, M.: Control of Random Yield-Strength for Mechanism Based Seismic Design. J. of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE). 116 (1), 98-110 (1990)
  - 27) 志村保美: 建築鉄骨「材料編」. 溶接学会誌. 311-316 (2011)
  - 28) 岩崎正樹, 松尾充高: 製鋼技術開発の歩みと今後の展望. 新日鉄技報. (391), 88-93 (2011)
  - 29) 新日鐵住金製品カタログ 鋼板. 新日鐵住金(株), 2015, 57p
  - 30) Nishioka, K., Ichikawa, K.: Progress in Thermomechanical Control of Steel Plates and Their Commercialization. Science and Technology of Advanced Materials. 13, 1-20 (2012)
  - 31) 牧正志, 古原忠 ほか: 鋼の加工熱処理の変遷と今後の動向. 鉄と鋼レビュー. 100 (9), 1062-1075 (2014)
  - 32) 本間宏二: 日本発祥の技術 橋梁用高性能鋼 SBHS. 橋梁と基礎. 19-22 (2014)
  - 33) 池田学, 北健志, 木村元哉, 中山太士: 鉄道橋に用いられた古い鋼材の予ひずみによる材料特性への影響. 鋼構造論文集. No.73, 107-117 (2012)
  - 34) 矢田浩: 鉄器時代はまだ終わらない: 力学的性質から見た鉄と鋼. ふえらむ. 185-190 (1996)
  - 35) 新日本製鐵(株): 鉄の厚板・薄板がわかる本 (牧正志氏インタビュー). 日本実業出版社, 2009, p. 137-143
  - 36) 高橋学: 薄板技術の 100 年—自動車産業とともに歩んだ薄鋼板と製造技術. 鉄と鋼. 82-93 (2014)
  - 37) 高橋学: 自動車用高強度鋼板の開発. 新日鉄技報. (378), 2-6 (2003)
  - 38) 高橋学, 末廣正芳 ほか: くらしと移動を豊かにする鋼材 (自動車分野). 新日鉄技報. (391), 27-36 (2011)
  - 39) 野田克敏, 梅谷有亮 ほか: 材料. 自動車技術. 141-145 (2013)
  - 40) Nagai, K.: Ultrafine-grained Ferrite Steel with Dispersed Cementite Particles. J. of Materials Processing Technology. (117), 329-332 (2001)
  - 41) Kuwamura, H.: Mechanical Behaviours of High Young's Modulus Steel, Proceedings of the Third Pacific Structural Steel Conference (PSSC). 1992, p. 265-270
  - 42) 吉江淳彦: 造船, インフラ, 輸送分野における鉄鋼材料利用技術および溶接技術の変遷と課題. 第 191 回西山記念技術講座. 2007, p. 129-156



辻井正人 Masato TSUJII  
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 Ph.D.  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



菅野良一 Ryoichi KANNO  
技術開発本部 フェロー Ph.D.