

技術展望

製鉄所のフィールドを活用した鋼構造技術の開発

Technological Development of Steel Structures through Construction of Steel-making Plants

菅 野 良 一*
Ryoichi KANNO

抄 録

欧米の技術導入からスタートした日本の鋼構造技術は、官営八幡製鐵所を起源とする鉄鋼製造体制の整備・強化や 1960 年代以降の経済成長を通じた技術の高度化により急速な発展を遂げた。この発展を導いた要因には、製鉄所の設備建設やそれを通じた鉄鋼メーカー技術者による技術開発への果敢な挑戦があった。本論文は、製鉄所の設備建設を通じた鋼構造技術の開発の歴史を具体的な事例を示しつつ概観し、今後の期待について述べたものである。

Abstract

Japan has become one of the advanced countries on steel structures, whose history has virtually started from the nation's first integrated steel making plant called the Imperial Yawata Steel Works in 1901. What made this possible was due partly to challenging developments by engineers in steel making companies through applications to various their own civil engineering plants. In this paper, the development history of steel structures technology through the construction of steel making plants was outlined with several examples, and then its future prospects were suggested.

1. はじめに

日本の鋼構造技術は材料も含めて欧米からの導入により始まったが、国産鋼材の本格的生産体制が整った 1901 年の官営八幡製鐵所の設立は、その自立的な発展の礎を固める大きな契機となった。1960 年代以降には、日本の高度経済成長も相まって、日本の鋼構造技術は構造のみならず鉄鋼材料も含めて飛躍的な発展を遂げた^{1,2)}。この発展を導いた要因には産学官総力を挙げた当時の精力的な活動があったのは言うまでもないが、実のところ、製鉄所の建設やそのフィールドを活用した鉄鋼メーカーの技術者による技術開発への果敢な挑戦があった。

製鉄所は多様な技術、設備の集積であり、鉄鋼材料を効率的、合理的に製造する拠点としてのみならず、社会インフラの縮図としての環境も併せ持つ。鉄鋼メーカーの設備技術者は、製鉄設備の建設で常にクリティカルパスとなる土木建築設備の短工期化や低コスト化、さらにはライフサイクルコストの低減に向けて、最新の技術を取り入れながら独自の技術開発を進めて来た。また一方では、製鉄所のフィールドを大いに活用して、マーケットでのより広い利用を目指しながら、自らが生産、供給する鉄鋼製品の合理

的な利用技術の開発も同時に行ってきたのである。

これらの製鉄所における様々な活動の成果は、日本の社会インフラ整備を支える技術として広く活用され、また世界最先端を走る日本の鋼構造技術の発展の原動力となった。このような活動の中では、研究で得られたシーズを実地に現場で確認する実証開発、また現場での生のニーズ、課題を抽出し、それを直接解決するニーズオリエンテッドな開発が同時並行的に展開されており、日本の特徴的な技術開発活動の一つと見ることができる。本報告では、製鉄所のフィールドを活用した鋼構造技術の開発の歴史を、いくつかの例を示しながら紹介すると共に、今後の期待を述べる。

2. 鋼構造の発展と鉄鋼業

災害多発地域である日本の経済成長を実現できた要因の一つに橋梁や建築などの社会インフラの整備があることは言を俟たない。1960 年代から国の重要施策である複数の国土総合計画が立案、実行された。大地震を含む様々な災害、事故にも見舞われたが、その教訓を踏まえつつ法令や設計基準が見直されて来た。これにタイムリーに呼応して社会インフラの整備を支えたのが鋼構造であり、鉄鋼材料である。

* 技術開発本部 フェロー Ph.D. 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

Timeline of various events, changes of codes and standards, and major steel materials and products

	Before 1960	1960s									1970s									1980s									1990s									2000s									2010s				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5				
Events such as national plans and disasters		▼National Development Plan									▼The 3rd Dev. Plan (Energy)									▼The 5th Dev. Plan (Self-reliance community)																															
		▼New Dev. Plan (Exp. way & railroad)									▼The 4th Dev. Plan (Multipolar land formation)																																								
		Niigata Quake ▼									▼Tokachi-oki Quake									Great Hanshin Quake ▼									Great East Japan Quake ▼																						
		▼'59 Ise-bay Typhoon									▼Miyagiken-oki Quake									▼Hokkaido Nanseioki Quake									Hiroshima Landslide ▼																						
Laws, codes and guidelines		Noise Regulation Act ▼									▼Vibration Regulation Act									▼Revised Bridge Specifications (New seismic design)																															
											▼Revised Building Standards Law (New seismic design)																																								
																				Passive Control Design Guidelines for Buildings ▼																															
Major steel products for construction		▼'31 Steel sheet pile									Drilling & pressing pile driving (TN) ▼																		▼Hat-shaped steel sheet pile																						
		▼Steel pipe pile									Soil cement mixed pile driving (Gantetsu) ▼									▼Screw pile (NS ecopile)																															
											▼Weathering steel (COR-TEN)									High strength drilling & pressing pile driving (TN-X) ▼																															
																				High performance steel for bridge (SBHS) ▼																															
		▼'55 Light-gauge hot-rolled shape									▼Roll-formed box column									SN steel (Seismic resistant) ▼									▼Bolted frame system (Hyper frame system)																						
																				Fire resistant steel ▼									▼Super high-tension bolt (SHTB)																						
		Low yield strength (LY) steel, New hot-rolled beam (Hyper beam), Low YR 600MP class steel ▼																		1000MPa class steel (HT880) ▼																															
		▼'59 Hot-rolled H-shaped beam																		▼Buckling restrained brace (Unbonded brace system)																															

表1は1960年代以降の社会動向と主だった出来事、建設関連の規基準の変化、さらにそれを受けて開発された主たる建設材料ならびに技術を並べて示したものである³⁾。世の中の変化に合わせて多様な鋼構造関連の商品、技術が開発されて来たことが概観できる。代表的な開発事例としては、1960年から1970年代の騒音規制法や振動規制法が鋼管杭の工法を低騒音・低振動化し、様々な工法がマーケットに出現したケースや、頻発する地震被害を受けた1980年代の建築耐震設計法の変化が多様な鋼材や構造要素・部品の創出を促したケースなどがある。

このような規制や設計法の変化は、一般の建設市場のみならず製鉄設備も例外なく対象となる。このため、鉄鋼メーカーの中では設備建設と商品開発の両面で精力的な技術的工夫や開発努力が行われて来た。結果として製鉄所は単に材料を製造、提供するという機能のみならず、鉄鋼材料のより広い普及を促すための利用技術の開発とその実証目的での実機適用の場としての役割も併せ持つことになった。

製鉄所の設備技術と日本の社会インフラを支えてきた鋼構
造技術には密接な関連性があったと言える。

3. 鋼構造黎明期における開発（1910年前後）

日本における鉄鋼材料を用いた最初のインフラは、今から約 150 年前に遡るくろがね橋（練鉄製）である。世界から約 100 年遅れのスタートとなった。くろがね橋をはじめにその後いくつかの橋梁や建築物が建設されたが、そこで使われた材料や設計技術の殆どは欧米からの輸入に依存していたのが実態であった。

日本における鋼構造の自立的成長は、前述したように、官営八幡製鐵所の設置以降であり、とりわけ八幡製鐵所の若きエンジニアであった景山齊氏（後の日本製鉄(株)八幡製鐵所長）による 1909 年の工場建築（ロール旋削工場、図 1）の設計、建設が契機と言われている⁴⁾。開田によれば⁴⁾、このロール旋削工場は、国産材料を使い、日本人エンジニアにより構造計画・設計が行われた初めての大規模鋼構造

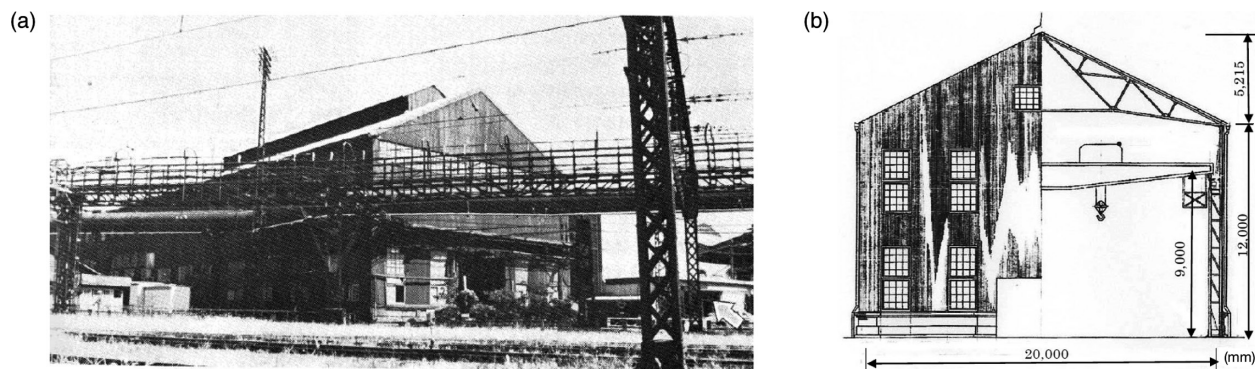


図1 官営八幡製鐵所ロール旋削工場⁴⁾ (a)ロール旋削工場(1976年撮影), (b)側面図
Roll turning lathe factory in the Imperial Yawata Steel Works
(a) Roll turning lathe factory (taken in 1976), (b) Side view

物であった。

その後鋼構造は、製鉄所内の工場建築や軍用施設の建築物などに適用され、現在に至る成長の基盤を構築したと言える。開田が述べているように⁴⁾、欧米の技術を参考にしつつ、当時最先端の技術を持つ大学に教えを請いながら、日本人エンジニア自らの力で大規模な鋼構造の工場建屋を建設して来たのである。鋼構造黎明期を支えたのは、このような大いなるリスクを負った設備技術者による製鉄設備での技術的挑戦に他ならない。鋼構造の発展は、その歴史の開始点から製鉄所フィールドでの活用が原動力となった。

4. H形鋼の製造に伴う利用技術開発（1960年代）

本格的な鉄鋼材料ならびに鋼構造技術の発展は、日本が高度成長期を迎える1960年代以降となったが、その時期には圧延H形鋼や軽量形鋼、高強度な異形鉄筋などが開発、生産され、旺盛な建設需要を支えた。とりわけ鋼構造の発展に大きな貢献を果たしたのは圧延H形鋼である。H形鋼は1959年に製造、販売が開始され、設計・接合技術が整備されたこともあり、建築物を中心に広く活用されるようになった。

1960年代は、急速な経済発展も相まって、建築物の生産性向上に対するニーズが急速に高まった時期でもあった。このような状況に応えるべく、当時の八幡製鐵がH形鋼を基本部材とした新たな構法“MONO-H構法”を提案し、開発した⁵⁾。この構法は、柱と梁をH形鋼で構成すること、弱軸、強軸を持つH形鋼柱を架構の中で最適配置して外力に合理的に抵抗する機能をもたせること、接合部を高力ボルトで簡易に構成することなどの特徴を備えたシステムであった（図2(a)）。

このMONO-H構法は1950年代に発案され、1965年前後に複数の製鉄所の社宅や社内研究棟などへの適用を通じて、その実用化が加速された（図2(b)）⁶⁾。開発や実適用においての設備技術者の貢献は必ずしも明確ではないが、製鉄所とそれに関連する施設やフィールドを活用した建材

の利用技術開発が精力的に進められた代表例である。

MONO-H構法は溶接技術やボックス柱などの普及によりマーケットで広く採用されることは無かったが、その後出現したシステム建築などを中心に鋼構造の発展に直接・間接的な影響を与えたと考えられる。この構法は約50年前に提案された技術であるが、現在のニーズにも直接応えることのできる先見の明ある技術と言えよう。

5. 新たな合成構造、コンクリート充填鋼管構造の開発（1980年代）

コンクリート充填鋼管（CFT）構造は、現在では高層・超高層建築で極く一般的に使用されているが、歴史的に見ると1980年代に製鉄所の設備支持架構に逸早く適用され、設計技術のみならず、充填コンクリートの調合（配合）設計や圧入技術が研究された。CFT構造は鋼とコンクリートを合理的に組み合わせた構造であるが（図3(a)）、当時の建築基準法で一般的に認可されていなかったこともあり、その構造合理性にもかかわらず実用化には相当な時間を要したのが実態であった。

1980年代は、強い省エネルギー要求の下に、特別な耐震設計上の配慮が必要となるトップヘビーな荷重状態となるコークス乾式消火（CDQ）設備が多く建設された時期であった。高剛性化、高強度化、高変形能化が求められたその支持架構には、当時研究フェーズにあったCFT構造の適用が最も合理的との評価が高まり（図3(b)）、設備技術者による研究開発がかなり早い時期に実施されることになった⁷⁾。

CFT柱や柱梁接合部の構造性能に関する研究に加えて、効率的な施工方法である柱下部からの圧入工法の研究、その圧入工法に適したコンクリートの調合（配合）についての研究が行われ、1985年から1989年にかけて6基のCDQ設備架構に実適用された⁷⁾。このような研究は、その後の建築市場におけるCFT構造の一般化に当たっての基礎となり、現在の高層建築における幅広い普及につながった。

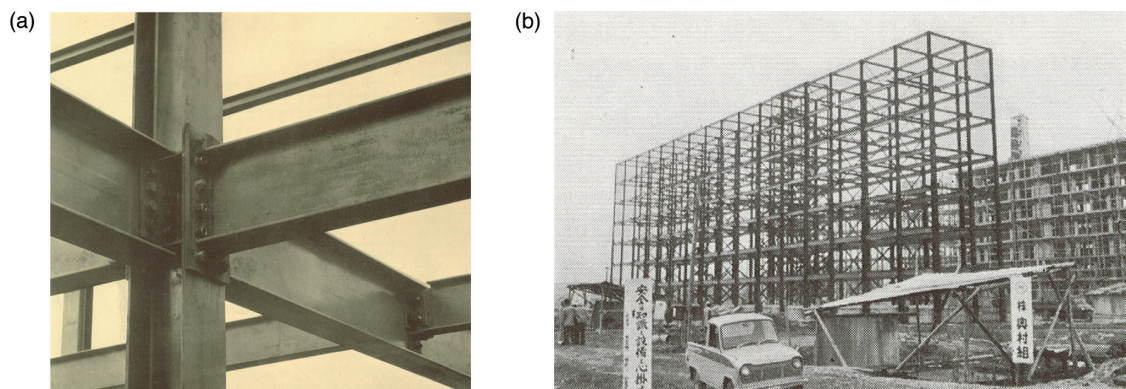
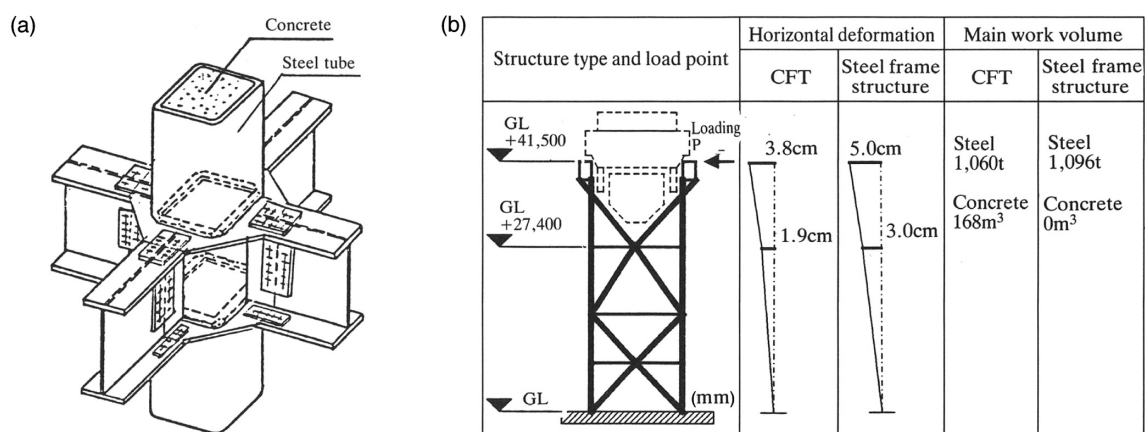


図2 MONO-H 構法と製鉄所社宅への適用例^{5,6)} (a) MONO-H 構法ディテール, (b) 花田社宅9号棟
MONO-H structural system and its application to family housing for steel making company
(a) Detail of MONO-H structural system, (b) No. 9 Hanada family housing for steel making company

図3 CFT構造とその特性⁷⁾ (a)CFT構造の概要, (b)CDQ設備を対象とした鉄骨造との比較

CFT structure and its features

(a) Outline of CFT structure, (b) Comparison with steel frames for CDQ equipment

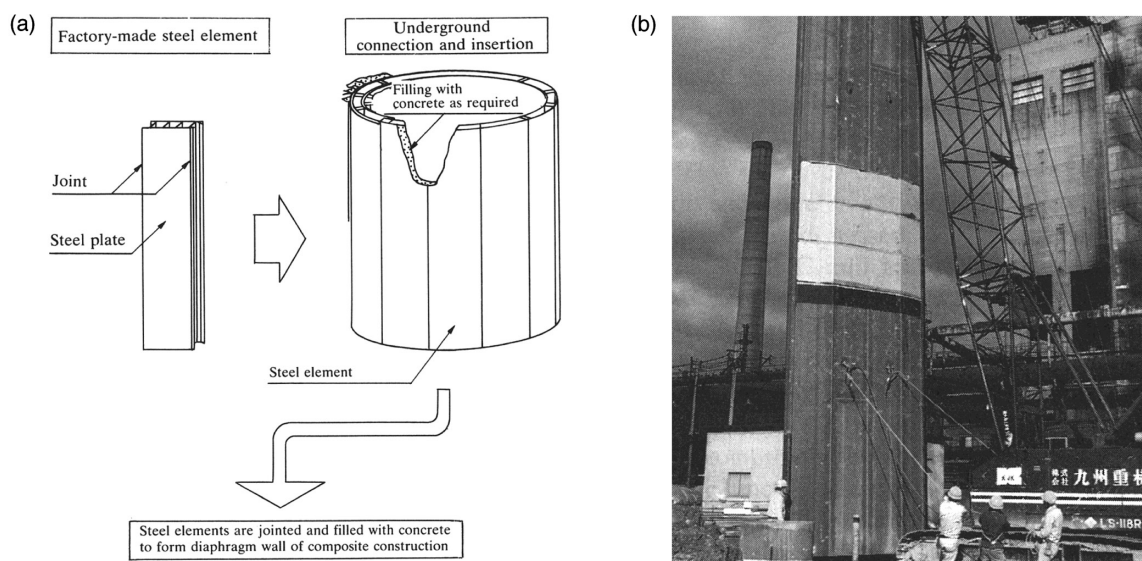
6. 新たな基礎工法, 鋼製地中連続壁の開発 (1980年代)

1980年代は, 製鉄設備や建設物の大規模化, 地下空間の有効利用ニーズの拡大などに伴って, 地中に信頼性の高い壁体を構築する構造, 工法のニーズが高まった時期でもあった。鉄筋コンクリート製の地中連続壁は従来から存在したが, 品質信頼性の問題からその殆どは仮設利用に留まっていた。壁体の鋼製化を通じて高品質化, 薄壁化, 短工期化を図り, 地中壁の本設利用を広く促す狙いで着手されたのが鋼製地中連続壁の開発である (図4(a))⁸⁾。

高品質を確保しつつ多様な条件に対応できるような鋼製エレメントや複数の工法を考案し, 鋼とコンクリートを合成化した新構造や具体的な施工方法の開発を進めた。具体的な施工方法としては, 安定液で崩壊を防ぎながら地中に溝を掘って大型の鋼製パネルを落としこむタイプ(図4(b))^{8,9)}

や比較的小型のパネルを中掘り圧入などの工法で施工するタイプなどが提案され, 開発された。本設利用ニーズが高かった製鉄所では, 開発された工法が複数の設備に実機に適用され, 新工法が有する低コスト化や短工期化などの経済効果を, 自らの設備建設で逸早く取り込む活動が活発に展開された。

実用化された構造, 工法は, その後鋼製連壁として, 壁厚や施工空間(高さ)に制約のある地下鉄などの現場を中心にマーケットで適用された¹⁰⁾。鋼製連壁とは別に, 古くから鋼矢板工法が土留め壁に用いられてきているが, 近年進んでいる鋼矢板の大断面化は鋼製連壁の影響を受けたとも見ることができる。鋼製連壁は地中壁の信頼性向上や大断面化を促す契機にもなった。

図4 鋼製連続地中壁の概要と実施例⁸⁾ (a)鋼製地中連続壁の概要, (b)大型鋼製パネルの建てこみ

Outline of continuous steel underground wall and its application example

(a) Outline of continuous steel underground wall, (b) Installation of large scale steel panel

7. 省力化ニーズに対応した建築構造ならびに基礎構造の開発 (1990年代以降)

1990年前後の急速な経済成長に伴って、建設分野の短工期化や省力化が強く求められるようになった。特に製鉄所では、省エネルギー設備の投資が活発に行われた時期であり、その設備の性格上、より早い設備の立ち上げが要求された。このような建設市場と社内設備投資上のニーズから、建築構造と基礎構造に関する省力化技術の開発がスタートした。代表的な技術として、建築構造におけるボルト接合システムと基礎構造における一柱一杭構造がある。

一般的な建築構造は柱と梁を溶接で接合した形式であるが、このタイプの構造では、高度な技能を持つ溶接工の確保と共に溶接品質を管理する検査手間が課題となった。このために考えられたのがオールボルト接合システム¹¹⁾であり、建設現場での接合を全て高力ボルトで行い、短工期化と品質管理の容易化、高度技能工の不要化を図ろうとするものである。柱が閉鎖型の断面となるボックス材の場合、通常の手順ではボルト接合が困難となるため、高強度なワ

ンサイドボルトも開発された。開発されたシステムは、まず製鉄所の設備に適用され (図5)、その後、一般マーケットでの普及を目指した。

設計法の公的評価を取得したものの、1990年代の経済停滞の影響により省力化ニーズが弱まり、結果としてボルト接合システムのマーケット普及は実現しなかった。しかしながら、このシステムの開発は超高強度ボルト (SHTB) といった斬新なボルトの開発を促すことにつながった。最近、省力化、多能工化、短工期化といったニーズが急速に高まっているため、今後本システムの価値が改めて見直されていくものと考えられる。

一方基礎構造に関しては、通常の基礎は柱を一旦鉄筋コンクリートの基礎で受け、その基礎を多数の杭で支える形式が一般であるが、特に鉄筋コンクリートの基礎や基礎と基礎をつなぐ基礎梁 (地中梁) の工事が工期短縮の阻害要因となった。このため、1980年代後半より、一本の柱と一本の大径の鋼管杭をダイレクトに差し込み形式でつなぐ基礎構造が発案され、構造ならびに施工方法の開発が行われた (図6)¹²⁾。特に鋼管杭に柱を直接差し込んで、コンクリー

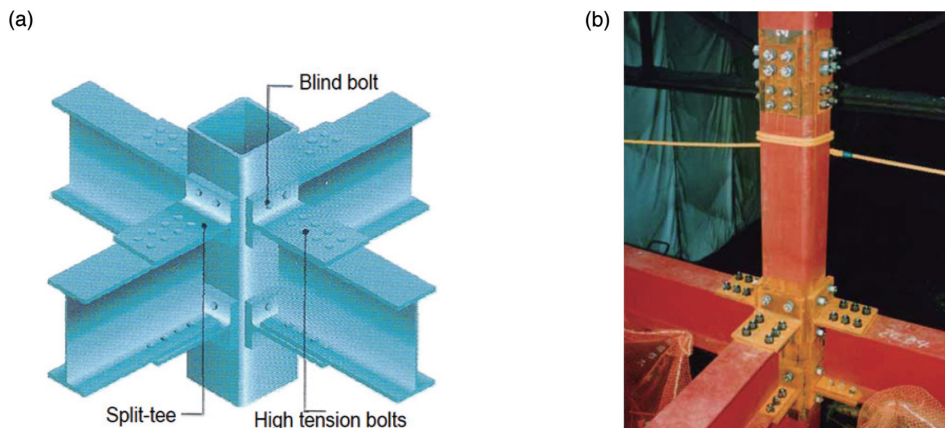


図5 オールボルト接合システムの概要と適用例 (a)オールボルト接合システムの概要、(b)適用例 (製鉄設備)¹¹⁾
Outline and application example of all-bolted frame system
(a) Outline of all-bolted frame system, (b) Application example to steel making plant

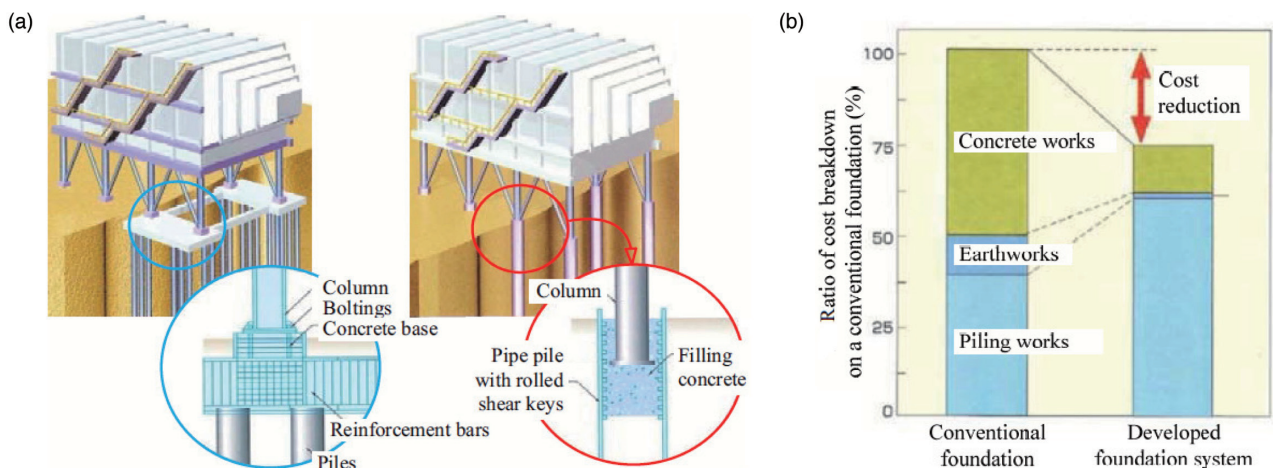


図6 一柱一杭工法と在来工法の比較¹²⁾ (a)一柱一杭工法と在来工法の構造比較、(b)コスト比較例
Comparison between developed one-pile/one-column foundation and conventional foundation systems
(a) Comparison of structural detail, (b) Comparison example of cost

トを介して強固に接合するためのディテールに工夫が重ねられた¹³⁾。ボルト接合システムと同様に、製鉄所の設備に実機に適用され（製鉄所では400か所以上の杭に適用）、短工期化や省力化メリットを享受すると共に、一般マーケットへの普及を目指して公的認証の取得も進められた。この一柱一杭接合は、サットインパイルと呼ばれ、省力化ニーズの強い豪州の資源プラントのプロジェクトでも採用されている。製鉄所で開発された技術がグローバルに活用されるという価値ある実績を残した。

8. 設備老朽化に伴う鋼構造の健全性評価技術の開発（2000年代以降）

社会の成熟とともに、橋梁等インフラの老朽化は大きな技術課題となっており、今後は益々その対応技術開発の重要性は増すものと想定される。臨海地に位置し、また歴史的にも古い製鉄所の設備もその例外ではなく、屋外設備の代表であるベルトコンベア架構では腐食に伴う構造劣化の問題が発生している。

このような背景の下、トラス構造であるベルトコンベア架構を対象に、部材の腐食状況を考慮した構造物の残存耐力の評価技術や構造物の高次振動性状に基づいた部材の劣化度評価などの研究が精力的に実施された（図7）^{14), 15)}。これらの研究を通じて、部材の残存強度は部材の最小断面積で概ね評価できること¹⁴⁾や部材の高次振動モードから部材の腐食レベルが評価できる¹⁵⁾と言った貴重な知見を得た。研究の過程では、製鉄所の腐食した架構から直接切り出した部材を利用したり、供用中の架構を直接活用して振動性状を調査するなど、製鉄所のフィールドを最大限に活用した取り組みが進められた。

研究は現在も継続中であるが、社会の成熟度が増すにつれて重要性が高まる維持管理技術について、合理的な損傷ならびに寿命評価技術を提供するものとして期待される。

なお、製鉄所などの産業インフラは社会インフラと共通点が多いこともあり、製鉄所のフィールドはサステナブルな社会を実現するための貴重な研究開発の場を提供し続けることが可能である。

9. まとめと今後の期待

日本の鋼構造の進化を支えて来た駆動力の一つとして、製鉄所のフィールドを活用した技術開発の例について複数の事例を紹介した。社会インフラを支える構造、材料、施工技術の開発には、実際のフィールドでの適用が不可欠である。過去の鋼構造技術発展の歴史を俯瞰すると、製鉄所というフィールドを大いに活用し、時にリスクを負いながら新技術に挑戦して来た製鉄技術者の貢献があった。そのような挑戦は、官営八幡製鐵所設立直後から続くDNAとも見ることができる。環境変化などにより、開発した技術の中には期待した普及を果たせなかったケースもあったが、開発技術の特徴を改めて振り返ると、現在の市場ニーズにマッチングするものが多く存在した。

製鉄所のフィールドは社会インフラの縮図とも言え、製鉄所での課題はそのまま社外インフラでの課題に連なっており、その逆もまた真である。インフラを取り巻く課題は、新設から維持管理へ、初期コストからライフサイクルコストへというように益々複雑化してきている。このような環境の変化に柔軟に対応できる新たな技術を提案、開発し、製鉄所のフィールドでの実機適用を通じて自らがその利益を享受しつつ、併せて社会にタイムリーに提供し続けることが重要である。本論文で示された歴史と伝統を引き継ぎながら、鋼構造を基本とした革新技術を開発していくのが鉄鋼メーカーの土木建築技術者の重要な使命であり、このような活動を通じて社会の持続的成長に向けて貢献して行くことが重要である。

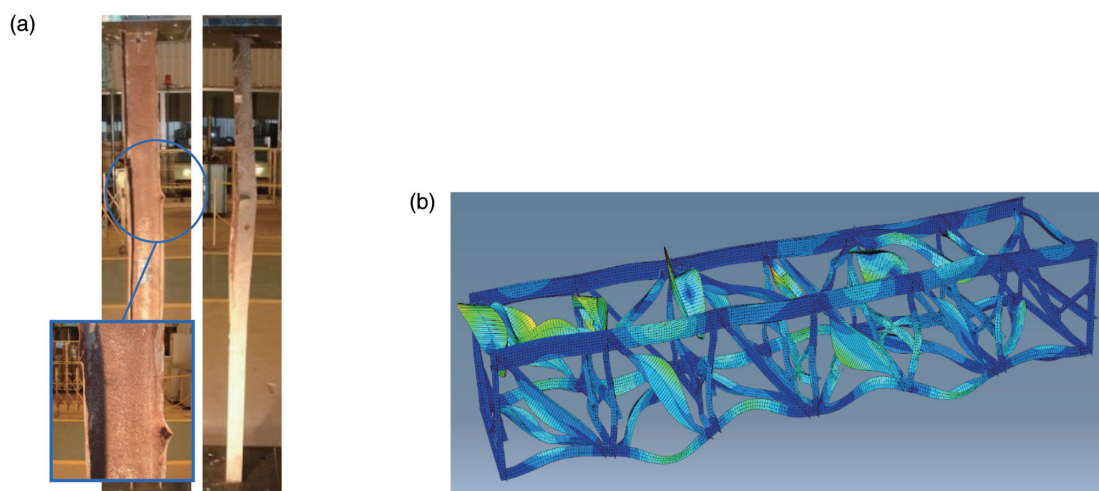


図7 腐食部材の耐力評価とトラス構造の損傷評価例 (a)腐食部材の座屈試験状況¹⁴⁾, (b)高次振動モードに基づく損傷評価例
Strength evaluation of corroded member and damage evaluation of truss system
(a) Column buckling test of corroded member, (b) Damage evaluation based on high frequency vibration mode

参考文献

- 1) 菅野良一：第 225・226 回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 2016, p. 21
- 2) Kanno, R.: Structural Engineering International. (3), (2016)
- 3) 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 (2011)
- 4) 開田一博, 尾道健二：日本建築学会計画系論文集. 73 (628), 1349 (2007)
- 5) 八幡製鐵(株)建材開発部：季刊カラム. (15), 36 (1965)
- 6) 梅村魁, 大澤胖, 村上雅也, 田村良治：季刊カラム. (14), 13 (1965)
- 7) 雑喉良介, 詫摩賢治：製鉄研究. (335), 58 (1989)
- 8) 沖本眞之, 菅野良一, 藤井康盛, 伊佐隆善, 川上圭二, 田崎和之：製鉄研究. (328), 68 (1988)
- 9) 菅野良一, 小門武, 沖本眞之, 伊佐隆善, 猪野完：合成構造の活用に関するシンポジウム論文集 (土木学会). 1986, p. 287
- 10) 鱒田実, 田崎和之, 石田宗広, 佐野陽一, 今福健一郎：新日鉄技報. (368), 27 (1998)
- 11) 永田匡宏, 志村保美, 宇野暢芳, 田中浩史：新日鉄技報. (368), 58 (1998)
- 12) 龍田昌毅, 豊島径, 松井延行, 妙中真治, 富永智矢, 永津亮祐：新日鉄住金技報. (403), 160 (2015)
- 13) Taenaka, S., Kanno, R., Akashi, Y., Naito, H., Mochizuki, T.: Proc. of the 10th Intl. Conf. on Advances in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures. 2012, p. 800
- 14) 久積和正, 菅野良一, 富永知徳, 今福健一郎, 藤井堅：鋼構造論文集. (2016) (掲載予定)
- 15) Hornarbakhsh, A., Nagayama, T., Shohel, R., Tominaga, T., Hisazumi, K., Kanno, R.: Smart Structures and Systems. 15 (3-4), 787 (2015)



菅野良一 Ryoichi KANNO
 技術開発本部 フェロー Ph.D.
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511