

安全安心のための先進鉄鋼材料技術と 損傷メカニズム解明

津 崎 兼 彰*

1. は じ め に

2011年3月11日午後2時46分マグニチュード9.0の大地震が東日本を襲った。震源は三陸沖130 km 深さ24 km の太平洋海底であり、巨大な津波を引き起こした。被害は甚大であった。内閣府が2011年6月24日に発表した被害総額は約17兆円で兵庫県南部地震・阪神淡路大震災の被害総額約10兆円をはるかに上回った。住宅・店舗・工場などの建築物、水道・ガス・電気などのライフライン施設、河川・道路・港湾などの社会基盤施設、農地・林野などの農林水産関係、全てで多大の被害を受けた。

今回、まてりあ小特集「震災1年を機に考える今、これから我々ができること」において、“社会基盤材料の代表として構造材料の根幹である鉄鋼材料の現状を概観し、震災復興に向けたインフラ整備を念頭においた今後の鉄鋼材料開発を展望する”という宿題を頂いた。重たい宿題であり、非力の筆者には十分な回答が出来るはずもない。しかし、鉄鋼材料の基礎研究に30年以上関わってきたものとして、非力なりにしっかりと前を向いた提言を行うことは責務と考え筆をとった。

本稿では社会基盤材料の代表としての鉄鋼材料を対象として、東日本大震災の復興再生ならびに今後発生が懸念される地震・津波やそれに付随した大規模火災などによる二次災害に備え、災害発生時の被害を軽減し、災害後の復興を促進するとともに、より安全かつ豊かで質の高い国民生活を実現するために、まず現在の鉄鋼材料技術と鉄鋼基礎研究の状況について概観した上で、今後の在り方について私見を述べる。前半では、日本鉄鋼連盟が2011年8月に示した「東日本大震災からの復旧・復興に向けた提案」⁽¹⁾および新日鉄技報第391号(創刊100周年記念特集号)に掲載された菅野らによる技術解説「社会の発展を支える鋼材と鋼構造(インフラ分野)」⁽²⁾を引用して産業界の取り組みを見る。さらに、日本金

属学会を中心として策定した構造材料のアカデミックロードマップ⁽³⁾について触れる。これらを受けて、安全で安心な社会の構築に向けて、“損傷メカニズムの解明”が今後の構造材料の基礎研究にとって重要であることを指摘する。

2. 日本鉄鋼連盟からの復旧・復興に向けた提案

国土交通省では、震災の復旧・復興に向けた対応としての「安全安心なまちづくり」「地域の産業・経済の再生」とともに今回の被災地のみならず、今後想定される東海・東南海・南海大地震などへの対応のための「災害に強い国土構造への再構築」についての具体的施策を示している。これらを受けて、日本鉄鋼連盟は2011年8月に復旧・復興に向けた鋼構造技術・工法に関する提案を行っている⁽¹⁾。以下、提案書2頁の本文を引用する。

***** 今後策定される計画に基づく復旧・復興事業において、鉄鋼業界はこれまで蓄積してきた防災性能や経済性、環境性に優れた鋼構造技術や工法を十分に活かし、復旧・復興に求められる「災害に強いまちづくり・インフラ」実現のために、貢献できるものと考えており、以下の鋼構造技術・工法を提案したい。特に鋼構造は、鋼材の持つ強さと加工性、運搬の容易性、工場生産による部材の大量安定供給、品質の精度・安定性等の特性を活かし、現場施工における工期の短縮化、曲線などデザインの自由度の高さからの景観面への配慮、フレキシブルな空間創造等を可能とし、加えてコンクリートや木材等の他の構造部材との組み合わせにより、安全安心な構造物の創造を可能にする。*****

そして提案書では、(1)災害に強い公共施設・防災拠点の整備、(2)耐震性に優れた住宅などの早期復旧、(3)港湾・海岸施設などの早期復旧・整備、耐震・耐津波対策、(4)災害時に迅速対応可能な防災拠点の整備について、14の技術と工法を示している。提案書ではそれぞれにイラストや写真を配して簡潔にわかりやすく記述されている。ここではその一つの

* 独立行政法人物質・材料研究機構 元素戦略材料センター；センター長(〒305-0047 つくば市千現1-2-1) Advanced Steel Technology and Degradation Mechanism for Safety and Reliability; Kaneaki Tsuzaki(Research Center for Strategic Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)
Keywords: advanced steel, high performance, steel construction, degradation mechanism, assessment technique, safety, reliability
2011年11月28日受理

1. **地震や災害に強い建物**
 - ・耐震性に優れ、防災拠点や備蓄基地としても活用可能
 - ・CFT柱やダンパーの適用により揺れの少ない居住性を高めた建物も可能
 - ・津波を想定する場合は、低層階のピロティ構造化も可能
2. **工業化による品質安定、短工期**
 - ・工場生産され、建設現場での作業が少なく、高度な技術・熟練を要せずに品質が安定
 - ・加工性に優れ短工期
3. **フレキシブルな空間の創造**
 - ・柱のない大空間が可能なたため、用途変更にも柔軟に対応
 - ・壁のない開口の大きな構造や可動・移動の間仕切りにより部屋の自由なレイアウトが可能
4. **豊かなデザイン性**
 - ・鉄は強度が高く、柱・梁が細い軽快なデザインが可能
 - ・加工性が良く、曲線などの表現が自由
5. **地球環境にやさしい素材**
 - ・分解・再組立により繰返し再利用され、省資源化が可能
 - ・耐久性向上による環境負荷低減
 - ・リサイクルされ建設廃材がなく、サステナブルな建材

「②鋼構造学校施設」の工法の内容と説明を図1に引用して示す。地域の防災拠点(避難施設、備蓄基地)、幼稚園や小・中学校の併設や社会教育施設などとの複合化を可能にする鋼構造学校施設が提案されている。これを含めて提案されているすべての技術・工法はいずれも安全安心なまちづくりに貢献するものである。

3. インフラ整備と鉄鋼材料の高性能化

***** (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(図2)。成長過程ごとに環境や条件が異なり、インフラ化、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、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。

(2) 地震・台風などの災害、事故による要求性能の変化

社会の成長に関係しない変化もある。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ものではない。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、アンボンドプレース、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。アンボンドプ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1 mm 前後の鋼材利用が大きく進展した。*****

この技術解説からも、我が国の高い鉄鋼材料技術が一朝一夕にできたものではないことは明白である。図2に示すような少なくとも50年にわたる様々な出来事の中でその時々ニーズに対しての粘り強い対応がなされて、それらが今日の高い技術力へとつながっている。明石海峡大橋に貢献した高強度パーライト鋼線の1800 MPa級ケーブル、東京スカイツリーに採用された建築用高性能鋼の780 MPa高強度鋼などはこのような取り組みの中で開発されてきた。

		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																							
		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											
国土計画 社会・経済		▲総合開発計画										▲新全総(高速度路、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															
		▲東京オリンピック										▲大阪万博					▲オイルショック										▲バブル崩壊					▲国際貿易センタービル爆破テロ					▲羽田空港D滑走路															
主要建築 主要インフラ		▲58東京タワー										▲霞が関ビル										▲瀬戸大橋					▲ランドマーク					▲明石海峡大橋										▲東京スカイツリー										
		▲東海道新幹線										▲東名高速					▲関門橋					▲青函トンネル					▲開闢					▲東京湾横断道路										▲東日本大震災										
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					▲日本坂本丸沈没					▲阪神・淡路大震災					▲新潟県中越地震					▲東日本大震災					
																																▲北海道南西沖地震																				

164

4. 構造金属材料分野のアカデミックロードマップ

鉄鋼を代表とした構造金属材料分野では、研究開発から実用化まで長い年月がかかる。従って、それを支える基礎研究分野も長期的視野にたった対応が必要となる。日本金属学会においても材料戦略委員会の中心メンバーとして、社会基盤材料分野における構造材料(鉄鋼材料)のアカデミックロードマップを提示した⁽³⁾。図3がそれである。このロードマップは、日本金属学会分科会第5分科(社会基盤材料分野)の委

員を中心として検討策定された。図上段がテクノロジーロードマップであり、さまざまな情報をもとに産業界と社会のニーズの動向を予測している。図下段が社会ニーズに応える材料技術開発を支える基礎研究課題としてのサイエンスロードマップである。日本金属学会分科会では、“基礎研究にロードマップはそぐわない”という考えに基づき、下段では重要基礎研究分野を示すがそれぞれに期限を設けていない。基礎研究に関わる研究者の責務は、社会ニーズと出口を十二分に考慮しつつその達成実現に必要な基礎基盤となる研究を遂行すること、との認識に基づいた判断である。そして、テクノ

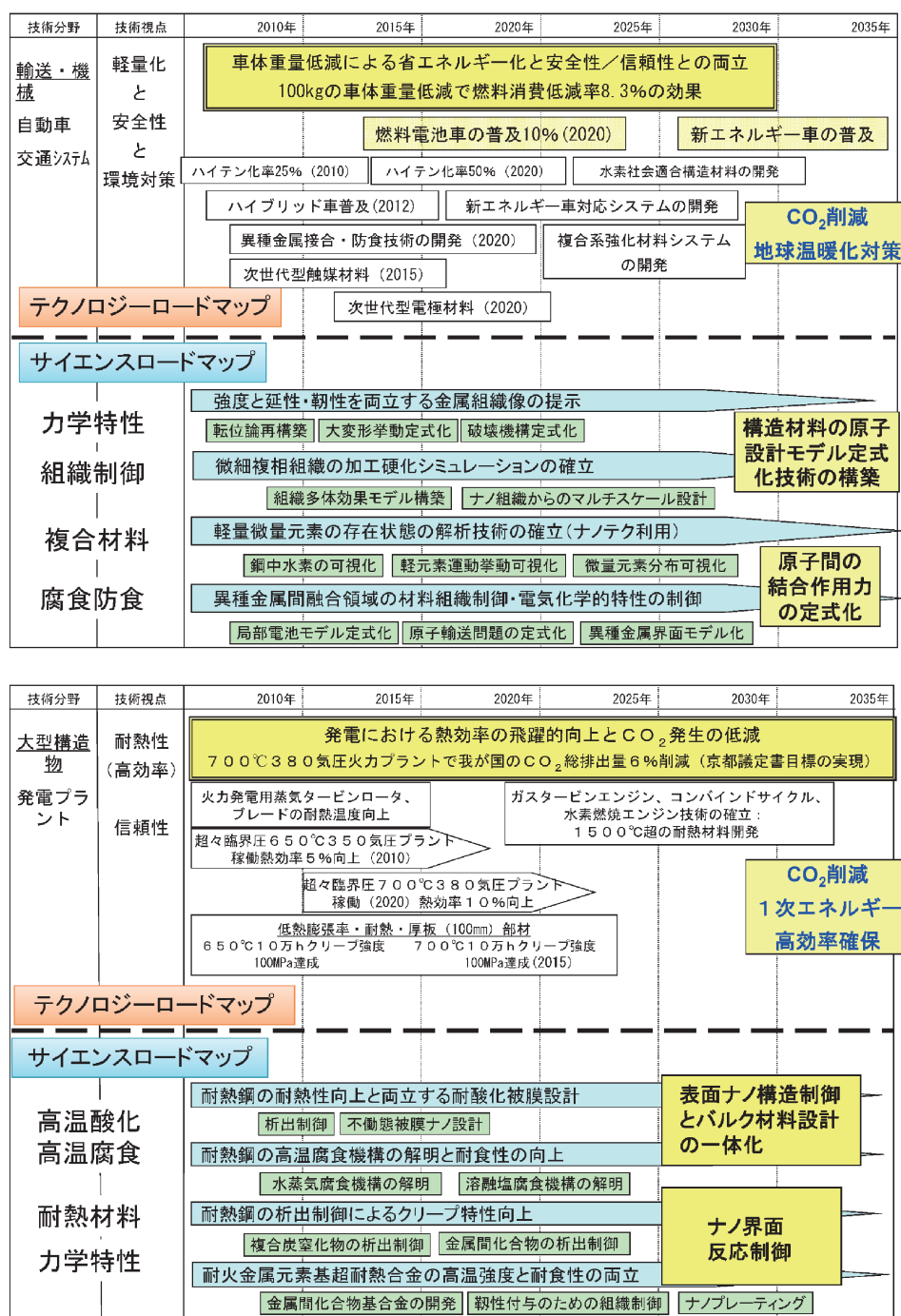


図3 構造材料のアカデミックロードマップ⁽³⁾。技術分野：自動車と発電プラント。

ロジーロードマップとサイエンスロードマップの対応によって基礎研究と実用化の関係を明らかにする狙いがあった。

本ロードマップは、2010年1月22日開催の第18回材料戦略委員会の資料「グリーンマテリアルビジョン～第4期科学技術基本計画に向けて～」の一部として提出されたものである。当時の目的は、アクションプランのグリーンイノベーションへの対応であり、自動車と火力プラントを対象とした二酸化炭素排出量削減のための材料技術が示されている。二酸化炭素排出量削減は依然として日本そして世界にとっての重要な課題であることに変わりはない。我々が今なすべきことは、これらのロードマップをブラッシュアップすると共に、災害に強い安全安心な国づくりのための材料技術アカデミックロードマップを新たに策定することである。

5. 今改めて構造材料研究の位置づけについて

災害に強い安全安心な国づくりのための材料技術アカデミックロードマップの検討に入る前に、改めて構造材料研究の位置を技術体系の中で確認しておきたい。図4は、技術にはフロンティア型技術とインフラ型技術があることを示している⁽⁴⁾。フロンティア型技術は社会の枠組みと社会認識を変え、より便利な社会と多様性のある社会を生み出すことに寄与する。クローン技術やIT技術がこれに含まれる。一方、インフラ型技術は社会の枠組みは変えずにその中をより豊かにすることによって、より健全な社会と自然調和的な社会の構築に寄与する。環境対応材料技術、安全安心材料技術がこれ

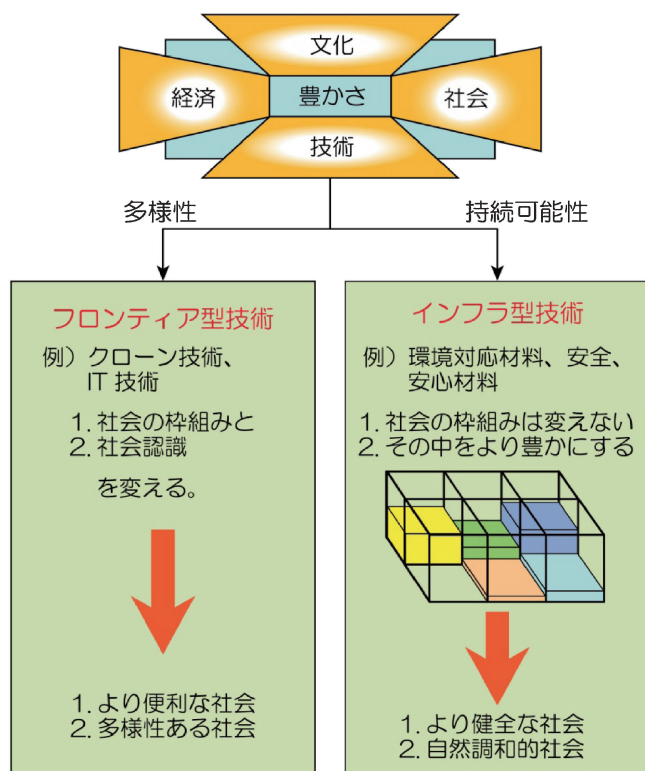


図4 豊かさを達成するためのフロンティア型技術とインフラ型技術⁽⁴⁾。

に含まれる。構造材料および構造材料技術の大半がインフラ型技術に含まれる。社会の枠組みを変えるものではないために一見地味であるが、その重要性は今回の震災で再認識されたと思う。

6. 安全安心材料技術のロードマップ策定に向けて

災害に強い安全安心な国づくりのための材料技術として何が大切だろうか。今回の震災では「想定外のxx」という表現がなされることが多々あった。しかし、これで済まされては被災者の方々に申し訳が立たない。技術者・研究者としては真摯に我々の備えが不十分であったと認め、その実態を検証し今後の対策を練るべきである。災害からインフラの損壊を守るために何が必要か。また、そこに暮らす人々に安全と安心を実感していただくために何が必要か。

大きな自然災害ではインフラの損壊が問題となる。しかし、自然災害に限らず日常さまざまなところでモノが壊れて事故がおこっていることを忘れてはならない。これらの事故では必ずと言ってよいほど材料が破損している。金属材料は、製造された直後が一番健全で、使用中に特性が劣化する。そして一定以上の外因を長時間にわたって与えると材料は必ず壊れる。疲労、クリープ、腐食、水素による遅れ破壊

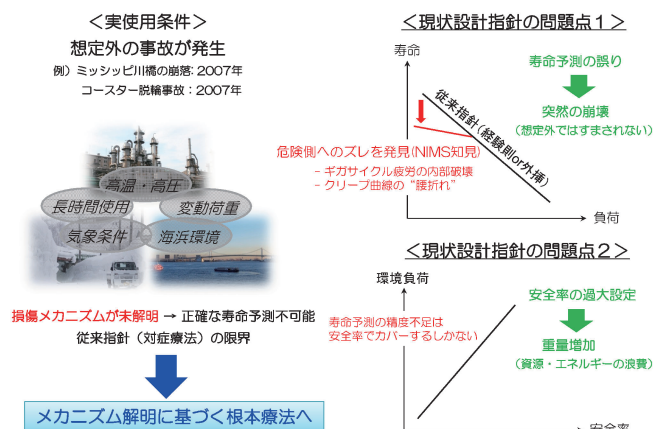


図5 損傷メカニズム解明の重要性。

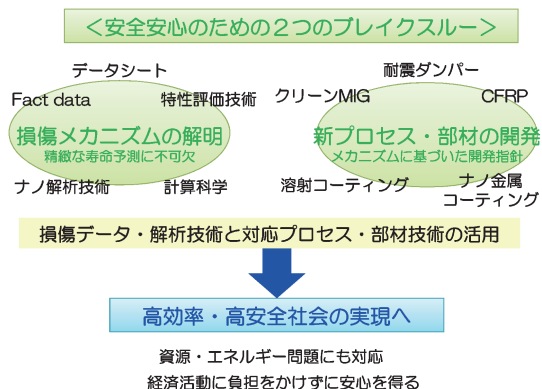


図6 損傷メカニズムの解明と新プロセス・部材の開発による高効率・高安全社会の実現。

損傷メカニズムの解明には21世紀の手段であるナノ解析技術と計算科学の適用が不可欠である(図6)．損傷メカニズムが解明されれば寿命予測が高精度化されるだけでなく、損傷をおさえる的確な対応によって安全安心で高性能な新たな部材の開発にもつながるのである．図6に示す事例はNIMSにすでにある技術シーズを参考に描いたものである．これをオールジャパンで描き直すことが必要である．

随分と以前に“夢の金属3つ”というのを同僚と語り合ったことがある。“さびない鉄”，“つかれないアルミ”，“やすいチタン”である．やすいチタンはともかく，残りの二つは使用時における損傷克服が夢達成の条件である．All our dreams can come true, if we have the courage to pursue them. 追いかけていなければ夢は達成されない．すでに，レアメタルを使わないユビキタス元素だけの低合金耐候性鋼⁽¹²⁾や疲労限を持つアルミ合金⁽¹³⁾などへの挑戦がなされている．これらの取り組みでは耐候性と疲労限の発現のメカニズム解明が同時に行われており，夢達成の可能性は高い．損傷メカニズムの解明は，安全安心とともに夢の材料を生み出し我々