

新材料の鉄道への適用に関する動向調査

森 久史* 辻村 太郎*

The Trend survey for Application of the New Advanced Materials to the Railway

Hisashi MORI Taro TSUJIMURA

In order to use various new advanced materials for the railway technology in future, many researches have been carried out for processing of new advanced materials. This paper reports the result of investigation of these researches and their development on these new advanced materials. The research on material technology is advancing, and various new materials such as the Nano material are developing now. In order to apply new advanced materials to railway technology, investigation of properties of these materials by experiments is necessary. By investigation of the trend of the research on the new advanced materials, we would like to examine application of the new materials to the railway technology in the future.

キーワード：新材料，研究開発，構造材料，機能材料，鉄道への適用

1. はじめに

鉄道分野には金属材料，無機材料，有機材料などの様々な種類の材料が適用されている。新材料の開発が進みつつある中で，現在適用されている材料も，過去に様々な技術研究が行われて開発された新材料であった。

これまでの材料研究は材料構造のマクロとミクロからの制御によるものが主体であった。そのため，素材性能は従来特性を若干上回るだけのものが多かった。しかし，近年，高エネルギーの利用や分析技術の発展にともなう，ナノ構造制御技術等が確立され，これを材料プロセスに適用することによって新しい材料が開発されるようになってきた。

これらの材料では，材料特性が従来よりも大きく向上し，さらに，従来特性に見られなかった新機能が付与されることが示されている。新材料技術はナノ構造制御の開発によって大きく発展している。このように新材料技術の研究は日進月歩し，日々膨大な情報が報告されている。そのため，材料技術の動向を調査する場合，これら報告に基づき，材料研究や開発材料及びニーズ側の使用材料の動向について整理することが必要となる。

本調査では，学会参加及び材料研究に関わる研究者と情報交換等を行ない，新材料研究の方向の移り変わり，新材料の研究開発の動向，自動車や航空機における新材料の開発動向について調べた。また，鉄道分野における新材料の適用例について調べた。本調査では鉄道への適用調査を主題としているが，材料研究側から見た研究動向を主に報告する。

* 材料技術研究部

2. 材料研究の移り変わり

2.1 これまでの材料技術研究の遷移

材料技術の研究は，学術的な新原理原則の発見，シーズ技術，社会基盤の要求と動向（資源，経済，コスト），実用化技術（材料加工，材料製造，材料評価技術）とともに発展してきた。

材料技術研究の遷移を見てみると，産業革命以降から20世紀中期までは主に図1に示すような，添加元素を加えることによって材料組織並びに構造をミクロ的に制御された材料，ミクロ構造制御により機能を向上させた均質材料が主に研究されてきた。この頃の研究開発の成果が，現在鉄道等で使用されている金属，無機，有機材料の基本になっている。

この時代の新材料研究開発は，材料の性能のみを既存

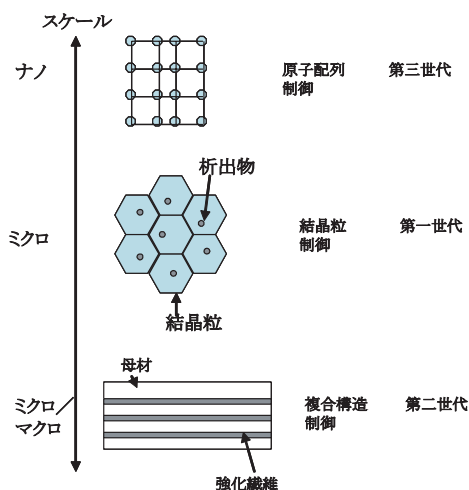


図1 材料技術研究の遷移

材よりも向上することが新材料の開発の目的であり、主に材料開発側の研究開発が主とされていた第一世代であった。その後、高度成長を迎えた20世紀後半より、材料技術開発は、材料を使用するニーズ側の立場から開発されるようになり、構造制御と材料設計を同時に行える複合材料や種々の機能を同一材料に付与する傾斜機能材料技術などが競って開発されるようになった。これらの世代の新材料は、既存材を合わせてさらに新しい機能を創成する、というコンセプトに基づいた目的で開発された材料であり、機能を付与するというを主目的として開発された第二世代の材料である。

2.2 現在の新材料の研究について

環境問題や省エネルギー化が求められるようになり始めた20世紀末期以降、これらに対応すべく、経済産業省(当時の通産省)が、金属材料、無機材料、有機材料の高性能化に対して新材料開発プロジェクトを立ち上げた。立ち上げられた新材料開発プロジェクトは「スーパーメタル」、「シナジーセラミックス」、「フロンティアカーボン」、「精密重合高分子」である。図2には一例としてフロンティアカーボンの概要を示した¹⁾。これらの材料開発プロジェクトが実施され、その成果として、構造をナノ制御されたナノ材料技術、加工と製造を融合した機能プロセス技術が開発された。開発成果の材料として、光応答材料、光触媒、超鉄鋼、ナノアルミニウム、ナノ複合材料、カーボンナノチューブ、フラーレンといった新機能材料が創製されはじめた。これら材料は極限環境(プラズマ、レーザー、イオン、強磁場)を利用し、図1のナノレベルの原子配列を制御することによって製造されたものであり、これまでになかった機能の発現が期待されている第三世代の材料である。

新材料開発プロジェクト後に科学技術基本計画(平成18年度)で「地球温暖化・エネルギー問題の克服」と「環境と調和する循環型社会の実現」の課題で材料技術研究が重点化され、以降、ナノ材料に関する研究開発に重点が置かれて研究が進んでいる²⁾。

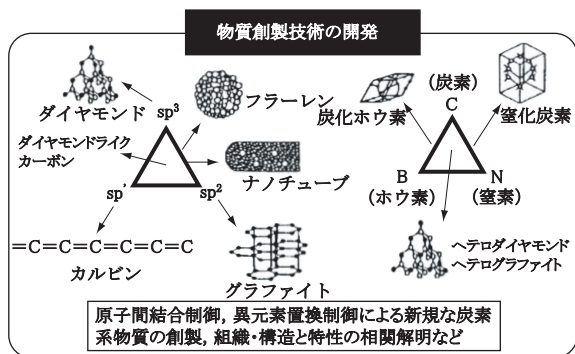


図2 フロンティアカーボンの研究開発動向

2.3 今後の新材料の研究について

今後の材料技術に関する研究では、省エネルギーと環境という視点とナノ材料に関する重点化から、エネルギー、環境に対応できるようなナノ材料の研究開発が進むと考えられる。ナノ材料の研究開発は、図3に示すように、原子レベルからナノ構造までの範囲について制御を行うものであり、図4に示すようなナノ構造を人工的に制御するような研究、例えば、原子・分子レベルの新現象・機能発現、ナノスケール物質の新機能発現、ナノアSEMBL技術による新規材料の開発、ナノ構造の精密制御に対する材料研究が進むと考えられる³⁾。

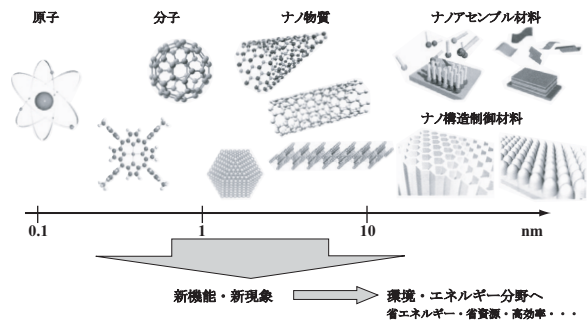


図3 ナノテクノロジーを通じた材料開発³⁾

0次元構造 (球状)	1次元構造 (針状)	2次元構造 (板状、膜状)	3次元構造 (バルク状)
超微粒子 クラスター フラーレン 量子ドット	ナノチューブ ナノワイヤ 量子細線	ナノシート ナノペレット ナノ薄膜 量子井戸	ナノセラミック ス ナノメタル
C ₆₀ 直径: 0.7nm	直径: 1mm~数十nm	厚さ: 数 nm	3次元構造 立体構造

図4 ナノ構造形態⁴⁾

3. 新材料の動向

3.1 これまで開発されてきた主な新材料

材料はその時代を映し出す鏡とまで言われる。これまで歴史的に見て、鉄、銅器時代を経て、セラミックスや高分子材料の開発などが進められ、現在まで、様々な研究方針にしたがって新材料が開発されてきた。例えば金属材料では形状記憶合金、水素吸蔵合金、希土類磁石、アモルファス合金、金属系超電導材料、無機材料では炭化珪素、サイアロン、酸化物高温超電導材料、高分子材料ではポリカーボネート、導電性フィルム、高分子触媒、高分子超電導材料などがある。また、これらの材料間に位置する複合材料、例えばCFRP(炭素繊維強化高分子複合材)、GFRP(ガラス繊維強化複合材)、MMC(金属基

複合材料), セラミックス/金属の組成・物性・機能傾斜型材料などが代表的な新材料として挙げられる。

3.2 これからの新材料

従来は構造並びに機能・性能を主眼とした材料が開発されてきたが、今後は省エネルギーや環境を重視した材料開発が行われると考えられる。次に、省エネルギーと環境に対する新材料について調査した。

3.2.1 省エネルギー材料技術

省エネルギーについては、未普及エネルギーの利用の具体化、高効率なエネルギー利用、エネルギーの低減化が課題となり、ナノ技術を通じて表1に示すような新材料の研究開発が進められている。

表1 省エネルギー材料技術

技術項目	技術課題	材料	材料種類
未普及エネルギーの利用	光等の新エネルギー利用	太陽電池	薄膜Si, 色素増感材料, 有機薄膜, 量子ドット半導体
		熱電変換材料	Bi-Te合金, Si-Ge合金
	光触媒	TiO ₂	
高効率なエネルギー利用	燃料電池の利用	水素貯蔵材	金属-水素化合物, アラネート系無機材料やカーボンナノチューブ貯蔵材
	電力省力化	2次電池	導電ナノカーボンチューブ電極, リチウム電極
		超電導材料	ビスマス系あるいはイットリウム系酸化物などの酸化物系
高磁性保持化	高磁性材料	ナノコンポジット磁石	
エネルギーの低減	軽量化	新規複合材料, 軽量合金	ナノカーボン複合材, マグネシウム合金

未普及エネルギーの利用の具体化の中でも、熱電変換材料として磁性体に磁気を付加したときに生じる熱量変化すなわち磁気熱量効果を示す材料が開発されたのは新しい。また、高効率なエネルギー利用において、ナノ技術の適用により保持力を増加させたナノコンポジット磁石の開発などは自動車のモータへの適用として期待されている(図5)⁵⁾。

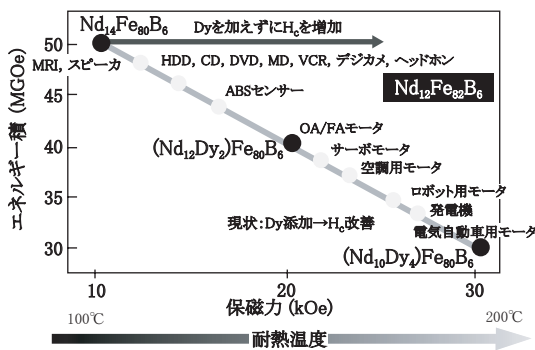


図5 磁気材料の高性能化の移り変わり適用技術⁵⁾

エネルギーの低減では自動車の車体あるいは航空機の機体の軽量化を目的とした、新規複合材料やアルミニウム合金に代わる軽量合金等の開発が進められている。

新規複合材料では、フラーレン、ナノチューブを強化繊維とした複合材料の開発が行われている。一方の軽量合金の開発では、現在使われているアルミニウム合金よりも軽量の材料の開発が目的とされ、マグネシウム合金やチタン合金が検討対象とされている。

マグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて密度が小さいために合金自体の適用によって軽量化が可能になる。一方のチタン合金の適用では、高強度薄肉材を適用することによって肉厚減を行うことにより軽量化が行えると考えられている。

マグネシウム合金は、従来加工が困難であったが、加工熱処理や超塑性変形の利用によって強度や加工性を発現できる手法が見出され、図6に示すように、アルミニウム合金や鉄鋼材料よりも優れた特性が得られている。

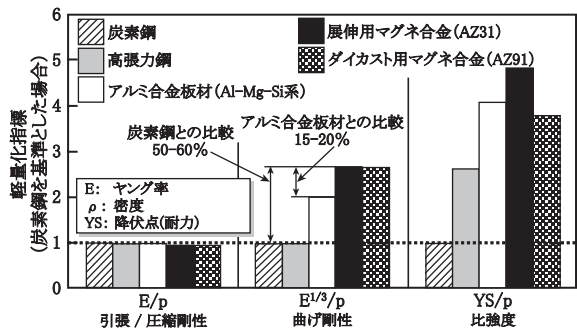


図6 マグネシウム合金の開発動向⁶⁾

3.2.2 環境に対する材料技術

現在、物質の持続可能性や環境汚染に関する検討が行われており、資源やエネルギーなどの有効利用や汚染防止に対する技術開発が強く望まれている。このことから、省資源化並びに環境汚染防止に対応できるような材料技術の動向について調べた。

(a) 省資源化に対応する材料技術

新材料の製造技術について研究開発が進められているが、現在適用されている材料に対する資源枯渇を見据えた検討もまた必要となる。この理由として、資源枯渇が生じた場合、資源の価格高騰及び供給不足が発生する可能性がある。そのために、枯渇する可能性の高い資源の利用を極力低減させた材料開発が検討されている。

その一つとしてステンレス鋼がある。現在車両構体素材として適用されているステンレス鋼は、鉄中に主要元素としてニッケル及びクロムを添加して製造されている。このニッケルは資源供給の不安定化のため大きな価格変動が生じ、その結果、ステンレス鋼自体の価格が高

騰したこともある。ステンレス鋼を例に取って説明したが、鉄道で用いられている材料は、将来的に価格高騰並びに資源枯渇する可能性の高い元素を多く含有している。

省資源化の背景の下、国家レベルで元素戦略プロジェクトや希少金属代替材料開発プロジェクトなどが推進されており、資源代替材料開発、希少資源回収技術の研究開発、回収・リサイクルに関する技術開発などが取り組まれている^{7) 8)}。

資源代替材料の開発では、材料の主要成分から、ステンレス鋼の例で示したように、資源価格高騰あるいは資源枯渇が問題となる元素を、機能並びに性能を維持しながら省略あるいは他の元素に代替する技術開発が進められている。例えば、ステンレス鋼では、低ニッケル添加ステンレス鋼などが開発されており、図7に示すように自動車、家電等に適用されている。また、回収・リサイクルに関する技術開発では、電子デバイスのオール有機化が考えられ、製造時の環境負荷低減と利用後の廃棄を考えた検討がなされている⁹⁾。



図7 低Ni添加ステンレス鋼の用途⁹⁾

(b) 環境汚染防止に対応する材料技術

ゼロ・エミッションを目指す社会では、環境汚染の防止が重要な課題となる。現在、環境汚染防止としてガス浄化を目指した吸着材料や排ガス触媒、自然模倣材料(ネイチャーテック材料)などが開発されている。

吸着材料では無機材料を中心とした層状あるいは多孔体の材料が開発されている。層状吸着材料では、加工によって層状に孔を設けられたスメクタイト、アパタイト、ハイドロタルサイトの無機材料の開発、ゼオライトやメソポア多孔性シリカの多孔材の開発がある。現在、これら多孔材に対し、さらに吸着特性を向上すべく、ナノ制御技術を適用することによって、孔への遷移金属錯体の固定、固定剤の組成制御、孔の構造制御、有機官能基の導入などの研究開発が進められている。また、排ガス触媒では、排気ガスの有毒成分を無毒化する材料が探索され、アルミナ、シリカ、セリアにナノレベルで孔を設け、白金、ロジウム、パラジウムのナノ粒子を分散させた材料の開発が行われている(図8参照)¹⁰⁾。

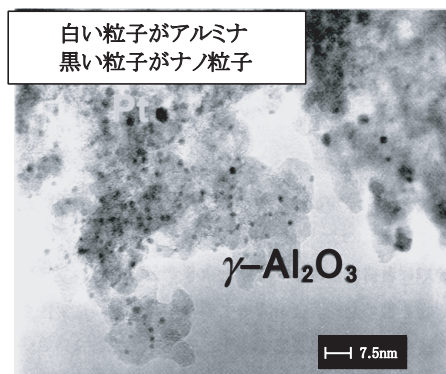


図8 排ガス触媒の顕微鏡観察像¹⁰⁾

4. 輸送分野における新材料の動向¹¹⁾

新材料の適用に関する動向を把握するために、鉄道と競合する自動車並びに航空機の新材料の適用の動向について調べた。

4.1 自動車への新材料の適用動向

自動車では、運転性能、安全性、意匠性などの昔からの課題に加え、エンジン効率の向上、環境問題への対応、軽量化が要求される。そこで、自動車に対する要求技術について材料技術の観点からまとめた。

4.1.1 エンジンの効率化

エンジンの効率向上では、エンジンの燃焼温度の上昇が検討されていることから、エンジンに適用される材料の耐熱化が求められる。現在、ステンレス鋼や鋳鉄が使用されているが、ステンレス鋼よりも加工性、高温強度、熱疲労性に優れたTRIP鋼(塑性変態誘起鋼)などが期待されている。また、最近では、エンジンの軽量・効率化に対して耐熱軽量材料の適用が考えられており、チタン合金やマグネシウム合金の適用が考えられている。

チタン合金は耐熱性に優れているが、加工性並びにコストが問題であるために、エンジンバルブやマフラなどに限定使用されている。これに対してマグネシウム合金では、エンジン用の耐熱マグネシウム合金が開発されつつある。

4.1.2 環境対策

(a) 排ガス規制の強化

自動車では排ガス規制が設けられて以降、排ガス対策について余念がない。対策の一つの方法として、排ガス中に含まれる有毒ガス成分を除去することが考えられる。現在、多孔質フィルターなどを適用した対策がなされており、今後、吸着材料や3元触媒などを積極的に使用することによって、有毒ガスの無毒化が進められると考えられる。また、排ガス対策としては、次に述べる脱化石燃料化が大きな技術課題として挙げられる。

(b) 脱化石燃料化

化石燃料の省資源対策ならびに排ガス規制の対策に対

して脱化石燃料化が根本的な技術課題となる。脱化石燃料化に対し、燃料電池車、電気自動車などの開発が進められている。

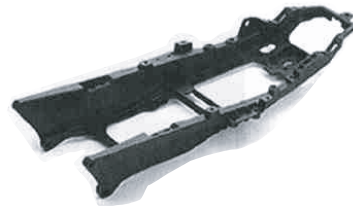
燃料電池では主に水素貯蔵の材料が求められている。一方、電気自動車では充電装置並びに駆動装置の高性能化が主要な技術課題とされている。充電装置には、主にリチウムイオン2次電池が適用されており、駆動部品には、駆動用モータの高性能化に向けた電磁鋼の開発や永久磁石の高性能化が研究開発されている。しかし、これらの高性能化においては、希土類元素を多用する方向である。省資源化とのトレードオフとなることから、ナノテクノロジーを積極的に使用することにより新材料の適用が今後増加すると考えられる。

4.1.3 軽量化

自動車では走行エネルギーの低減に向けて、さらなる車体の軽量化が必須である。現在の自動車における軽量化の検討を分けると、金属材料の軽量金属材料への代替及びFRPの適用が考えられる。自動車に適用されている金属材料使用を前提として考えた場合の軽量化の課題と開発動向を表2に示す¹²⁾。

自動車ではアルミ化及び構造変更、鋼と他の軽量合金とのハイブリッド化、従来の鋼をベースとする場合が考えられる。軽量合金を使用する場合には、コストや接合方法など、素材だけでなく最適な材料の加工方法までも見直す必要がある。また、共通することは、従来の鋼を使用する、あるいは軽量合金を使用したとしても、軽量化には構体構造の見直しが課題となり、材料技術以外の技術課題に同時に取り組むことが必要となる。また、近年、マグネシウム合金の研究開発が行われ、図9に示すように、一部の部品にマグネシウム合金が適用されは始めている。しかし、車体構造に対してマグネシウム合金を適用するためには、強度の他に剛性を確保する技術が必要となり課題は多い。

一方のFRPの適用でも、車体への適用に対して強度並



マグネダイカストフレーム(YZF-R6)

図9 自動車部品へのマグネシウム合金の適用例

びに剛性を確保することが必要になる。

CFRPは、現在適用されているアルミニウム合金並びに鉄鋼材料、今後の適用が期待されるであろうチタン合金やマグネシウム合金よりも高強度並びに高剛性を示すことから、車体構造への適用にも期待が持てる。例えば、車体ボディやシャーシをFRPに置き換えた際、試算によると、約40%の軽量化が可能との結果が得られている報告もある。このことから、CFRPの適用についても今後進展していくであろうと考えられる。

4.2 航空機へ新材料の適用動向

航空機においても、エンジンの高効率化及び軽量化が課題となり、自動車の技術とほぼ相違は見られないが、自動車よりも先進的な材料の適用が見られている。

エンジンの高効率化では、ガスタービンの入口温度の増加を想定して、ガスタービンへの耐熱チタン合金の適用、ニッケル耐熱合金の高性能化、セラミック複合材料あるいはセラミック熱遮蔽コーティングのタービンブレードへの適用などが進められている。

軽量化においては、機体構造に、これまでアルミニウム合金及び鋼が主に使用され、CFRPが2次構造部材(方向舵、昇降舵)としてしか適用されていなかったが、ボーイング767以降、1次構造部材(水平尾翼、垂直尾翼)にもCFRPが適用されてきた。また、チタン合金の適用も増加して、アルミ合金と鋼の適用が減少してきた。

さらに現在、開発中のボーイング787、エアバス350では、CFRPの適用範囲がさらに拡大され、圧力隔壁、ウイングボックス等にまで適用されるようになっており、機体構造の半分以上が複合材料を占めるようになってきている。このような複合材料の適用が増加してきた理由としては、製造方法の改善、高品質のFRPの供給、検査方法の確立及び修理技術の確立が考えられる。現在、さらに複合材料の発展を目指して、カーボンナノチューブを複合化したFRPなどの開発が行われ、十数年後には適用される可能性も高い。

5. 新材料の鉄道分野への適用

鉄道分野では電力、車両、軌道などと様々な分野があり、特に車両技術や軌道に対する新材料の適用が多い。

表2 車体軽量化の各種法の課題¹²⁾

手法	課題	開発動向
アルミ化	コスト、リサイクル、接合方法、材料加工、車体構造の見直し	合金種の変更、リサイクル材使用、レーザ、摩擦溶接の適用、超塑性加工の適用
ハイブリッド(軽量材+鉄)	コスト、接合方法、異種材腐食防止、車体構造の見直し	低価格材の開発、メカニカルジョイント方法、接着接合、低電位防食
鋼ベース	溶接、疲労強度、リサイクル、張り出し成型、車体構造の見直し	低Cハイテンの開発、メカニカルジョイント、スクラップ分別

現在適用されている新材料としては、アルミニウム合金やFRP、ベイナイト鋼、C/C複合材料などがある^{13) 14) 15)}。

現在、様々な新材料の適用が検討されており、今後、さらなる軽量化や新エネルギーへの対応、メンテナンスコスト低減化などに対して新材料の適用に大きな期待が寄せられる。例えば、車体構体を軽量化するためのマグネシウム合金の適用や車体洗浄のメンテナンスコスト低減のための車体構体への光触媒コーティングの適用などが考えられる。

マグネシウム合金の車体構体への適用では、素材加工技術が必要になるが、結晶粒微細化によって加工性が向上することが明らかにされている¹⁶⁾。しかし、自動車と同様に剛性を確保するための基礎技術が必要になり、剛性確保を行うためには、図10に示すような中空押出型材の開発とマグネシウム合金中空押出型材同士の接合方法について検討する必要がある。

光触媒による車体防汚性へのセルフクリーニングでは、車体の窓ガラスに対するクリーニング効果が認められるものの、車体構体では、鉄道固有の油や金属片などの付着物が光触媒の効果を妨げるようになることによって防汚性を低下させることがわかり、今後の問題点が指摘されている¹⁷⁾。

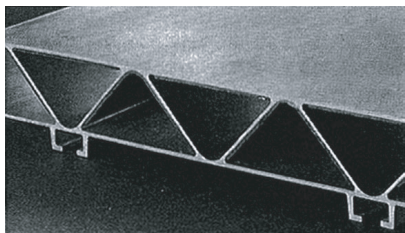


図10 中空押出型材の外観

鉄道分野へ新材料の取り組みについていくつかの例を挙げて示したが、新材料を鉄道技術に対して適用するためには、鉄道固有の使用環境において、新材料の主要性能が十分に発揮できるかどうか、また、性能の耐久性について考えることが必要になる。しかし、鉄道固有の環境において性能を把握する以前に、新材料の特性を評価する指標が必要になると考えられる。新材料は新しい特性を有する材料であり、例えばJIS規格の適用が可能かどうかの判断について不明な点が多い。

以前、新材料の適用を考える上で、1982年に新材料の試験・評価に関する国際協力（ベルサイユ規程（VAMAS））で試験標準化が示された。鉄道に新材料を適用する上で、新材料の性能について熟知するとともに、材料特性の評価や標準化の検討も必要であると考えられる。

6. おわりに

材料の技術開発は進歩しつつあり、ナノ材料等の新材料や環境問題を解決するための材料開発が行われている。今後、鉄道分野に対して新材料を適用するには、性

能を熟知した上で、適用に関する十分な検討が必要である。今後本稿に述べたような様々な新材料の動向を見極め、自動車や航空機の動向を参考にし、鉄道固有の要求特性の検討に重点を置いて取り組む予定である。

文献

- 1) 吉川昌範, 大竹尚登: 次世代カーボンテクノロジーへの挑戦(経済産業省フロンティアカーボンテクノロジー)(精密工学の最前線), 精密工学会誌, Vol.67, No.7, pp.1047-1050, 2001
- 2) 文部科学省科学技術学術政策局: 第三期科学技術基本計画の概要(特集 文教・科学技術施策の進展 -- 平成18年度の展望), 文部科学時報, No.1562, pp.11-13, 2006
- 3) 佐々木高義: Nano-driven エネルギー・環境材料, 環境・エネルギー材料アウトック, Vol.1, No.1, pp.61-62, 2008
- 4) 長田実: ナノスケール物質・材料, 環境・エネルギー材料アウトック, Vol.1, No.1, pp.64-65, 2008
- 5) 宝野和博: 永久磁石材料, 環境・エネルギー材料アウトック, Vol.1, No.1, pp.50-51, 2008
- 6) 小島陽: 高性能マグネシウム合金の新展開, 軽金属, Vol.58, No.10, pp.526-548, 2008
- 7) 原田幸明: 希少資源・元素の現状, までりあ, Vol.46, No.8, pp.543-548, 2007
- 8) 西村睦: 元素戦略ー持続可能性への挑戦, 材料の出番ー, までりあ, Vol.46, No.8, pp.539-542, 2007
- 9) 高橋明彦, 松橋透: までりあ, Vol.47, No.10, pp.501-506, 2008
- 10) 阿部英樹: 環境・エネルギー材料アウトック, Vol.1, No.1, pp.76-77, 2008
- 11) 辻村太郎: 輸送分野における新材料の動向, RRR, Vol.66, No.4, pp.2-4, 2009
- 12) 中西栄三郎, 藤原東彦: ライフサイクル消費エネルギー低減における軽量車体構造の可能性検討, 日本鉄鋼協会第42回白石記念講座論文集, pp.16-34, 2000
- 13) 酒井康士: 鉄道車両へのアルミニウム合金適用の現状と今後の展開, 軽金属, Vol.56, No.11, pp.584-587, 2006
- 14) 佐藤幸雄: 耐シェリング用ベイナイトレールの開発, RRR, Vol.55, No.7, pp.26-29, 1998
- 15) 土屋広志, 久保俊一: C/C複合材のパンタグラフすり板への適用, RRR, Vol.66, No.4, pp.10-13, 2009
- 16) 野田雅史, 船見国男, 清水秀治, 森久史, 辻村太郎: AZ31マグネシウム合金の高温変形中における組織変化と機械的特性, 日本金属学会誌, Vol.71, No.9, pp.678-683, 2007
- 17) 森久史, 伊藤暁, 加藤大二郎, 坂本肇章, 辻村太郎: 新幹線車両外板に対する酸化チタン光触媒コーティングの効果, 材料, Vol.55, No.2, pp.194-198, 2006