

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22107001

研究課題名（和文）融合マテリアル：分子制御による材料創成と機能開拓の総括研究

研究課題名（英文）Comprehensive Research on Fusion Materials: Creative Development of Materials and Exploration of Their Function through Molecular Control

研究代表者

加藤 隆史 (KATO, Takashi)

東京大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70214377

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 110,900,000円

研究成果の概要（和文）：本領域は材料調和社会の実現のために、多様な成分を精密に融合し、その構造を制御した高機能材料の開発を目指した。有機材料学、無機材料学、物理学、生物学、材料工学分野の研究者を真に融合し、ありふれた素材を用いて、原料・プロセス・精密構造制御・新機能発現までを一貫して扱う新しい材料構築学の創成を目指す組織的な試みを行った。本研究課題（総括研究）では、本領域の運営を行い、11回の公開シンポジウム、12回の合同班会議および11回の若手スクールを開催し、研究成果を公開シンポジウム要旨集やニュースレター、ホームページ、出版物等において公開した。

研究成果の概要（英文）：This project focused on an innovative new research area for the synthesis of futuristic materials. We aimed to create a sustainable society where materials are in harmony with the environment. Highly functional, environmentally friendly materials were produced throughout the process of efficient use of energy and resources. This new approach involved fusion of organic molecules and inorganic substances. In this project, we have organized 11 symposiums and 12 project meetings to create this new area of materials science. Furthermore, the school for young researchers has also been organized for 11 times. The research results were open to public by the abstract books of the symposiums, the newsletters, the homepage, and publications.

研究分野：高分子材料化学

キーワード：融合マテリアル 機能性高分子 ハイブリッド材料 自己組織化 バイオミネラリゼーション 液晶

1. 研究開始当初の背景

人類の生活の向上や産業の発展に貢献してきたプラスチックやセラミックス等の材料の合成には多大な資源とエネルギーが使われている。このような状況において、自然界における生物の“ものづくり”の姿から学び、新しい材料創製の道を探ることは極めて重要である。生物は、自然と調和するありふれた元素と有機分子から常温常圧の温和な省エネルギー条件において精緻な構造物であるバイオミネラルを作り上げており、このような分子制御によって構造構築をおこなうバイオミネラリゼーションは特に注目すべき“ものづくり”プロセスである。多くの先駆的な研究があるにもかかわらず、バイオミネラリゼーションには不明な点が非常に多く、いまだに生物の知恵を活用した実用材料は得られていない。バイオミネラリゼーションを深く理解して、バイオミネラルに近い無機材料を再構築し、さらに進歩が著しい動的有機機能材料・超分子材料と融合させた「融合マテリアル」が創製できれば、社会と調和し、かつ多様で高機能の精密複合材料による材料調和社会への展開が期待される。この目的の実現のためには、個別に発展してきた学問体系である有機材料学、無機材料学、物理学、生物学、材料工学の融合が強く望まれている。それに応えるべく、本領域は関連分野の研究者を真に融合し、ありふれた素材を用い、原料・プロセス・精密構造制御・新機能発現までを一貫して扱う新しい材料構築学の創成を目指す組織的な試みである。

2. 研究の目的

本領域では、上記各分野の研究者が結集して、自然と調和して持続的に発展可能かつ快適な「材料調和社会」実現に向けて、省エネルギー・省資源・低環境負荷性、かつ高機能な材料の創製とそのための材料構築学の創成を目的とした。すなわち、従来の有機・高分子やセラミックスなどの物質を超えた、無機と有機、ハードとソフト、秩序（結晶）と無秩序（非晶）の融合による新しい材料づくり「分子制御による融合マテリアル創成」を通して、社会的な要求の高い新時代を先導する学問の構築を目指す。それにより有機・無機など物質の種類の単純な分類を超えた新しい融合マテリアル学の確立を目標とする。

高分子・ゲル・液晶などの「ソフトな機能性有機成分」を分子制御用テンプレートとして用いることにより、カルシウム・リンなどの自然と調和する生体元素からなる「ハードな機能性無機成分」の結晶化の常温常圧における精密制御の実現を目指す。有機分子が材料形成に精密に関与するプロセスを利用して形成した複合構造において、

これらの無機・有機成分を真の意味で融合させることによる高度な機能を発揮させる材料の創製、それにより材料調和社会に資する材料構築学の創成を本領域の目的とした。具体的には、以下のマテリアルを創製し、新しい材料構築学の基盤とした。

(1) 自然調和型構造材料

自然と調和する制御用精密有機高分子（合成高分子・ペプチド）と無機成分を階層的複合化することにより、省エネルギープロセスによる高強度構造マテリアルの創製を目指す。主として自然界に豊富に存在する炭酸カルシウム・リン酸カルシウムなどの無機成分を用いて、常温合成・成形性向上・無害な廃棄を視野に入れ、分子からナノレベルでの構造制御を行い、自然に調和する構造材料設計・構築を行う。特に、歯や骨のような軽量性・優れた力学特性を兼ね備えた材料、カニの甲羅のような軽量性・柔軟性・強靱性を兼ね備えた自然調和材料を、有機および無機の融合により創製する。

(2) 動的融合機能材料

自己補強機能や自己修復機能を有する動的融合機能マテリアルを、動的有機高分子と無機結晶のナノ配列を精密に制御して融合させることにより構築する。液晶やゲルなどの動的ソフトマターを活用することにより、従来の有機無機複合材料には無い、刺激にตอบสนองする自己補強機能などの動的機能を発現させる。さらに、エネルギー・バイオ材料にも展開する。たとえば、電極材料、機能触媒材料、生体センサー、バイオメディカル関連素子の構築のために、ソフトとハードの融合により高機能を発揮する材料を創製する。

3. 研究の方法

本研究領域は、加藤代表を中心とする総括班による統率の下、以下の3研究項目3班集体で実施された。

A01 班：分子制御による融合マテリアルの創製（計画研究4課題、公募研究前期14課題・後期12課題）

A02 班：融合マテリアルの構造構築（計画研究4課題、公募研究前期8課題・後期11課題）

A03 班：融合マテリアルの機能開拓（計画研究3課題、公募研究前期11課題・後期12課題）総括班 計12名、連携研究者14名。

評価委員4名

國武 豊喜、南 努、檜山 爲次郎、秋吉 一成

国際アドバイザー7名

Joanna Aizenberg, Michael Aizenberg, Helmut Cölfen, Fiona Meldrum, Nico A.J.M. Sommerdijk, Stephen Mann, David Kisailus,

4. 研究成果

(1) 公開発表について

・公開シンポジウム、関連シンポジウム
本領域では、計 11 回の公開シンポジウム（内 2 回は国際シンポジウム）を開催した（下記参照）。各シンポジウムでは、領域メンバーの研究成果報告に加え、さまざまな分野で最先端の研究を遂行している国内外

の研究者の講演を組み込み、学問分野における融合を試みた。いずれのシンポジウムも参加者が 100 名を越える規模で、本領域研究の国内での関心の高さがうかがえる。また、関連学会において領域メンバーがオーガナイザーとしてさまざまなシンポジウムを開催している。

公開シンポジウム一覧

シンポジウム	開催年月日	開催場所	特別講演者	参加者
キックオフミーティング	2010.9.24	東京大学 山上会館	河本邦仁, 長澤寛道	100
第 1 回	2011.1.11	東京大学 武田ホール	秋吉一成, 黒田一幸	146
第 2 回	2011.6.17	福岡ガーデンパレス	北川 進	116
第 3 回 (国際シンポジウム)	2011.10.16~18	鳥羽国際ホテル	西原 寛, Helmut Cölfen, Nico Sommerdijk, Fiona Meldrum, 臼杵有光	117
第 4 回	2012.1.30	大阪大学 中之島センター	辰巳砂昌弘, 高原 淳	137
第 5 回	2012. 6. 8	慶應義塾大学 協生館	彌田智一, 山下正廣	187
第 6 回	2013.1.18	TKP ガーデンシティ仙台	阿尻雅文, 赤阪 健	105
第 7 回	2013.5.20	慶應義塾大学 協生館	堂免一成, 古川義純	155
第 8 回	2014.1.28	ホテル広島ガーデンパレス	(新学術領域研究「元素ブロック高分子」第 3 回公開シンポジウム合同開催)	200 以上
第 9 回	2014.5.12	大阪大学 中之島センター	原口和敏, 足立吟也	119
第 10 回(国際シンポジウム)	2014.11.2~4	東京大学 武田ホール	Stephen Mann, Helmut Cölfen, Joanna Aizenberg, Nico Sommerdijk, Fiona Meldrum, Michael Aizenberg, David Kisailus	164
第 11 回	2015.1.26	北九州国際会議場	君塚信夫	100

(2) 研究領域内での若手研究者育成の取り組み

本領域では、融合マテリアルのコンセプトの学術分野における広い浸透と将来的な発展を目的として、研究成果を積極的に発信すると共に特に若手研究者の育成に注力して取り組んできた。以下に、本研究領域における若手研究者育成の取り組みと、参画した若手研究者の研究終了後の動向の 2 つの項目に分けて記述する。

(a) 若手スクールの開催

本領域では、若手研究者育成のための取り組みとして、特に若手スクールの開催に注力した。5 年間の研究期間において計 11 回の若手スクールを開催し、参加者数は延べ 570 人以上にのぼった（下記表参照）。若手スクールへの参加をきっかけとして 19 人が博士課程に進学したことは特筆すべき点である。若手の参加者が積極的に交流し、互いに刺激し合う様

子が伺え、その結果、材料学に関わる広い分野に精通した若手人材の育成を行うことができたと考えている。実際の運営にあたっては若手が積極的にマネジメントに関わり、創意工夫を凝らした企画を提案・実施した。国内研究機関の研究者のみならず、企業や海外の研究者も講

師として招き、関連学問分野に対する広い視野を与えると共に、研究者としてのキャリアパスに関する講演会や交流会も実施した。また、ポスターセッションにおいては若手ポスター賞を設け、若手の参加者を奨励するように努めた。

回	開催年月日	場所	参加者数 (学生数)	実施内容
1	2011/09/30 ~10/1	岡山	41 (21)	若手研究者による講演、ショートプレゼンテーションとポスターを用いたテーブルディスカッション
2	2011/10/14	東京	90 (60)	領域国際アドバイザーによる講演、若手研究者による講演
3	2012/01/31	大阪	36 (27)	若手研究者によるチュートリアルレクチャー及び研究講演
4	2012/06/09	横浜	83 (78)	同上
5	2012/11/25 ~11/27	鳥取	47 (30)	現地研究者による講演、若手研究者によるチュートリアルレクチャー、ポスターを用いたテーブルディスカッション、女子学生・女性研究者キャリアミーティング、鳥取大学乾燥地研究センター見学
6	2012/12/20 ~12/21	東京	100 (76)	新学術領域研究「配位プログラム」との若手合同シンポジウムを開催。若手教員による講演、ショートプレゼンテーション
7	2013/1/28 ~1/29	仙台	30 (24)	若手研究者による講演、ショートプレゼンテーションとポスターを用いたテーブルディスカッション
8	2013/11/24 ~11/26	蒲郡	60 (43)	領域内外の研究者による講演、ショートプレゼンテーションとポスターを用いたテーブルディスカッション、女子学生・女性研究者キャリアミーティング、東レ株式会社名古屋事業所見学
9	2014/1/27	広島	33 (27)	若手研究者による講演、ポスターを用いたテーブルディスカッション
10	2014/5/13	大阪	39 (37)	同上
11	2015/01/27	北九州	16 (13)	過去 10 回の若手スクール参加者による研究発表

(b) 若手の受賞

本領域に参画した研究室の学生・博士研究員による受賞は、5年間の研究期間において合計 222 件に上った。また、若手教員（准教授、講師、助教）による受賞は 44 件あった。特に、A01 佐藤宗太准教授、A02 佐藤浩太郎准教授、A02 高島助教が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞し、A01 松浦准教授（受賞時）が日本学術振興会賞を受賞するなど、本領域の若手は各分野から高い評価を得ている。

(3) 本研究領域に参画した若手研究者の研究終了後の動向

(a) 博士学位取得者の総数と進路

研究期間内において、本学術領域研究に関わり学位を取得した者の人数は、46 名である。このうち企業への就職が 22 名、大学等の研究機関への着任は 24 名となっている。

(b) 領域内研究者の昇任等

本領域に参画した研究者の研究期間内における昇任は、下記の通りである。教授への昇任：6 件、准教授への昇任：8 件、講師への昇任：2 件、助教への採用：3 件、主任研究員への昇任：1 件、企業への採用：1 件。特に、A01 灘グループの伴野 PD は、本領域に参画後、自身の従来の研究とは異なる新しい研究課題に取り組み中で着実に成果を挙げたことが評価され、株式会社 IHI・研究員に選抜採用さ

れたことは特筆すべき例である。

(4) 共同研究の推進

本新学術領域研究は、省エネルギー・省資源・低環境負荷型の新しい材料構築が可能となる学理の創成を目的として取り組み、有機および無機の分子を巧みに融合し自然調和性に優れた材料を構築するための様々な方法を提示することができた。その研究成果は、新しい材料構築学として、従来十分には交流のなかった有機化学、高分子化学、無機化学、物理学、生物学、工学、計算科学など諸分野を横断する学問の融合を進めるものとなった。

また、高分子学会が発行する欧文雑誌である *Polymer Journal* の特集号(自己組織化特集号、融合マテリアル特集号)に掲載され、2012年6月号および2015年2月号として発刊された。本誌は、分野を横断した研究者が、融合マテリアルの学問領域にて取り組まれた成果を、高分子のキーワードで集約したものである。融合マテリアルの概念は、材料の構築と機能開拓に関連する様々な分野の交流を促進している。

「外部シグナルに応答して内包物を放出する有機無機ハイブリッドカプセル」(機能材料 印刷中、片桐清文・青島貞人ら)や「有機分子の制御による異方的結晶成長と無機/有機ハイブリッド構造の形成」(セラミックス 47巻、坂本健・新垣篤史・清水克彦・西村達也・加藤隆史)など、複数の班にまたがり専門分野の異なる研究者が融合マテリアルのアイデアに基づく新しい材料技術に関する成果をまとめた総説が掲載された。これらは領域内での強い連携による厚みのある成果といえ、材料、研究領域、そして研究者の融合が円滑に進んでいることを表している。融合マテリアルの概念を広めるための総説として「融合マテリアル: 分子制御による材料創成と機能開拓」(未来材料 12巻、加藤隆史・大槻主税)や「融合マテリアル: バイオミネラル化を超える機能材料創製へ向けて」(高分子 60巻、加藤隆史)を発表し、多くの研究者に対して本領域のポイントである生物に倣った分子制御による材料創製と機能開拓のアイデアを知らしめた。また、日本の科学技術のさらなる発展を目指し、「日本の化学、これからが本当の勝負 - 今から世界に貢献できなければ意味がない」(化学 2012年4月号、加藤隆史)が意見論文として掲載された。

本研究領域が新学術領域研究として発足してから、様々な研究プロジェクトや

学会などでも、“融合”をキーワードに用いていることから、本研究領域が当該学問分野に大きなインパクトを与えていることが理解できる。関連の学協会において、融合マテリアルに関連した様々なセッションが開催され、融合マテリアルの概念や成果が多くの研究者に伝えられた(高分子学会の討論会において計4回、日本セラミックス協会秋季シンポジウムにおいて計2回、バイオマテリアル学会、日本化学会において、それぞれ1回)。

他の新学術領域研究(「ナノメディシン」, 「バイオアセンブラ」, 「ソフト界面」, 「配位プログラム」, 「元素ブロック」)との合同シンポジウムが開催され、従来の学会では交わらないような研究者間の交流が行われた。また、異なる新学術領域研究に関係する若手研究者間での交流も行われ、融合マテリアルの概念の広い波及が行われた。

材料開発の基盤となる学問領域で新しい概念を築いたことは、産業分野への波及効果も大きい。本領域研究が主催したシンポジウムにおいても、企業からの参加者はのべ91人となった。さらに、領域関係者のアウトリーチ活動も新しい材料開発に対して理解に大きな貢献を果たしたと言える。

5. 主な発表論文等

【解説論文】(計3件)

1. 加藤隆史, 融合マテリアル: バイオミネラル化を超える機能材料創製へ向けて, 高分子, **60**, 685-689 (2011). [査読無]

2. 加藤隆史, 大槻主税, 融合マテリアル: 分子制御による材料創成と機能開拓 未来材料, **12**, 49-53 (2012). [査読無]

3. 加藤隆史, “日本の化学、これからが本当の勝負 - 今から世界に貢献できなければ意味がない”, 化学, 2012年4月号, 18-19. [査読無]

【学会発表】(計0件)

【図書】(計1件)

最先端材料システムワンポイントシリーズ「自己組織化と機能材料」, 執筆代表者加藤隆史, 共立出版 (2012).

【その他】(計1件)

Takashi Kato, Hirotsugu Kikuchi and Hiroaki Imai, "Fusion Materials: Creative development of materials and exploration of their function through molecular control", *Polym. J.*, **47**, 77.

【ホームページ等】

ホームページ [日本語版]:

<https://www.fusion-materials.org/>,
英語版

<https://www.fusion-materials.org/en/>

トップページに新着のトピックスを配置して最新の情報を提供している。研究成果やニュースレターをPDFファイルでダウンロード可能である。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 隆史 (KATO, Takashi)

東京大学 大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 70214377

(2) 研究分担者

垣花 真人 (KAKIHANA, Masato)

東北大学 多元物質科学研究所・教授

研究者番号: 5023366

青島 貞人 (AOSHIMA, Sadahito)

大阪大学 大学院理学研究科・教授

研究者番号: 50183728

今井 宏明 (IMAI, Hiroaki)

慶應義塾大学 理工学部・教授

研究者番号: 70255595

大槻 主税 (OHTSUKI, Chikara)

名古屋大学 大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00243048

灘 浩樹 (NADA, Hiroki)

独立行政法人産業技術総合研究所環境管理技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 90357682

鳴瀧 (菅原) 彩絵 (NARUTAKI

SUGAWARA, Ayae)

名古屋大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10508203

菊池 裕嗣 (KIKUCHI, Hirotsugu)

九州大学 先導物質化学研究所・教授

研究者番号: 50186201

新垣 篤史 (ARAKAKI, Atsushi)

東京農工大学 大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 10367154

片桐 清文 (KATAGIRI, Kiyofumi)

広島大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30432248

竹岡 敬和 (TAKEOKA, Yukikazu)

名古屋大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20303084

富田 恒之 (TOMITA, Koji)

東海大学 理学部・講師

研究者番号: 00419235

(3) 連携研究者

田中 賢 (TANAKA, Masaru)

九州大学 先導物質化学研究所・教授

研究者番号: 00322850

梅津 光央 (UMETSU, Mitsuo)

東北大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70333846

川下 将一 (KAWASHITA, Masakazu)

東北大学 大学院医工学研究科・准教授

研究者番号: 70314234

佐藤 宗太 (SATO, Sota)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構・准教授

研究者番号: 40401129

和田 健彦 (WADA, Takehiko)

東北大学 多元物質科学研究所・教授

研究者番号: 20220957

長田 実 (OSADA, Minoru)

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテク

トニクス研究拠点・准主任研究者

研究者番号: 10312258

佐々木 善浩 (SASAKI, Yoshiharu)

京都大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90314541

今野 巧 (KONNO, Takumi)

大阪大学 大学院理学研究科・教授

研究者番号: 5201497

津田 哲哉 (TUDA, Tetsuya)

大阪大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90527235

城崎 由紀 (SHIROSAKI, Yuki)

九州工業大学 若手研究者フロンティア

研究アカデミー・准教授

研究者番号: 71572812

陣内 浩司 (JINNAI, Hiroshi)

九州大学 先導物質化学研究所・特任教授

研究者番号: 20303935

田中 敬二 (TANAKA, Keiji)

九州大学 大学院工学研究院・教授

研究者番号: 20325509

織田 ゆかり (ODA, Yukari)

九州大学 大学院工学研究院・特任助教

研究者番号: 20625595

三浦 佳子 (MIURA, Yoshiko)

九州大学 大学院工学研究院・教授

研究者番号: 0335069