

機関番号：63902

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18070006

研究課題名（和文）マイクロ波高温非平衡加熱の研究総括

研究課題名（英文）Advisory Committee to Scientific Research on Microwave Excited High Temperature Thermally Non-equilibrium Heating

研究代表者

佐藤 元泰 (SATO MOTOYASU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60115855

研究成果の概要（和文）：本特定領域は、単色・同位相性という性質を持つギガヘルツ帯の電磁波と物質の相互作用を、基礎的学理に基づいて実験的・理論的に解明し、その成果の工学的応用を進めるものである。総括班は、基礎研究と応用研究の連携による正のスパイラルによって、さらに高度な成果が生み出されるように研究管理体制を整備し、研究の進展に柔軟に対応し、適切に課題の拡大、必要な見直し等を図ってきた。

研究成果の概要（英文）：The research promoted the fundamental researches experimentally and theoretically for the interactions between the materials and electromagnetic wave with monochromatic frequency and single phase. The advisor committee consulted research groups in this area flexibly and coordinated the creative fundamental research and innovative applications on a positive spiral.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------|------------|
| 2006年度 | 5,200,000 | 0 | 5,200,000 |
| 2007年度 | 5,200,000 | 0 | 5,200,000 |
| 2008年度 | 6,300,000 | 0 | 6,300,000 |
| 2009年度 | 6,300,000 | 0 | 6,300,000 |
| 2010年度 | 6,300,000 | 0 | 6,300,000 |
| 総計 | 29,300,000 | 0 | 29,300,000 |

研究分野：物質理工学

科研費の分科・細目：材料工学、応用物理・材料加工、表面物性

キーワード：(1) マイクロ波反応場 (2) 非平衡物性 (3) 非平衡熱力学 (4) ナノ構造 (5) アレニウスの式 (6) マイクロ波化学 (7) 金属酸化物電磁波還元 (8) マイクロ波工学応用

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波加熱は、火炎など従来の加熱法の単なる代替え手段ではなく、微視的な強い非平衡下の反応系という科学であることが明らかになってきていた。本領域は、「マイクロ波励起・非平衡反応場」という切り口で捉え、

マイクロ波の電場と磁場と物質のエネルギーパスおよび非平衡下における微視的な反応を実験的に究明し、その蓄積したデータを説明する理論の構築を目指して発足した。

2. 研究の目的

本研究領域は、ギガヘルツ帯の電磁波のエネルギーが物質内で緩和してゆく物理化学的な過程を実験的に解明し、その理論的説明を試み、さらにシミュレーション研究を目指す。学術的成果にとどまることなく、21世紀を担う新しい物材創成の手段としてマイクロ波の高度利用を推進し、産業へ展開させる。重工業では最も省エネルギー効果の大きい製鉄事業、ハイテク分野ではナノ・薄膜などの機能材料の革新的製造技術などである。

3. 研究の方法

総括班は、基礎研究と応用研究の連携による正のスパイラルによって、さらに高度な成果が生み出されるように研究管理体制を整備し、この成果に柔軟に対応して適切に課題の拡大、必要な見直し等を行う。

年2回の総括班合同会議を軸として、学会、国際会議等の開催を図る。

平成20年8月4日～8日、日・米・欧・中国のマイクロ波エネルギー利用に関する学会と国際会議、『1st Global Congress on Microwave Energy Applications「第1回マイクロ波エネルギー応用国際会議」』を開催した。参加人数：340名（大学等：40%、研究機関30%、企業30%）

研究者の交流促進、活発な議論・情報の交換が行われ、局所熱非平衡の発現との関連、不対電子スピンとの相互作用という古典物理と量子金属物理学の境界領域の開拓へと発展してゆく道筋がつけられた。以後、この国際会議を4年ごとに、日米欧亜で持ち回理解察することに決定した。マイクロ波領域の研究者が、本特定領域の目指す新分野への発展と軌を一にする活動を拡大した。

4. 研究の成果

文部科学省科学研究費特定領域研究「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」が発足し、5年が経過した。計画研究5班、公募研究7班が、緊密な連携のもとに研究を推進し、マイクロ波照射により、ミクロン結晶から数十ナノの結晶への転移、スピノーダル分解による微視的な層構造の形成、電磁波の磁場成分の選択的効果、低温で迅速に進行する焼結など、熱平衡過程では説明できない新しい現象を実験的に見だし、その説明を行う理論の構築とさらに実験によるその検証を精力的に進めてきた。22年度には、コヒーレント&コレクティブというキーワードの基に理論と実験に大きな進展が見られ、マイクロ波プロセスを総括する物理的・化学的な描像が得られた。

平成21年（2009年）秋にペンシルバニア州ピッツバーグで、米国セラミックス協会、他3学会が共催した国際会議に於いて、マイクロ波加熱のもつ、単一周波数、同位相とい

う基本的な特性に注目した講演を行った。関連する講演と併せて、マイクロ波によって、高温でも超音波が励起できる可能性が浮上した。この超音波は、まだ捉えられていないが、電磁波のコヒーレンシーという観点からのマイクロ波物理の謎の解明が一気に進んだ。即ち、マイクロ波の電磁界は物質の電子・イオン構造に、ギガヘルツ帯の集団的変位を与える。この微少な振動は、1サイクルのエネルギーは小さいが、位相と周波数が揃っているとき、積み上がってゆく。そのエネルギーが物質の変化に必要なコヒーレントなエネルギーを供給する。この仮説を証明する実験が行われた。最新の窒化ガリウム半導体増幅器を使い、周波数スペクトラムの広がり2Hz以下の、超高純度のマイクロ波によって、超高真空下で、酸化銅の還元実験を行った。還元速度は、同じ温度の赤外線加熱の5000倍に達し、その滑石エネルギーの2/3は熱ではなく、マイクロ波から直接に供給されていた。このマイクロ波に20kHz、深さ5%の振幅変調を与えると、その擾乱によってマイクロ波によって励起された粒子の単調振動は熱に変わる。その結果、活性化エネルギーの大部分は熱から供給されるようになった。マイクロ波と物質の相互作用は、物質に熱ではなく、機械的な仕事を介して、エネルギーを供給する。これは、これまでの固体の熱力学に、機械的仕事に関与するようなエネルギー経路があることを、初めて明らかにしたものである。

このような物理機構の解明に糸口がつかめたことで、産業応用が進み、火災によらない物材加工方法としての産業応用が進展した。また、その応用による出口として、炭酸ガス排出量を半減するマイクロ波製鉄法の原理実証実験を進めている。

最終の総括班分担者のコメントは以下の通りである。

[分子科学研究所 大峰巖 所長]

実験、理論ともに着実に成果が上がってきていると考えます。

理論については、マイクロ波と物質の相互作用についての基礎論から、現実系のシミュレーションまで幅広く理論的解析が着実に進んでいる。マイクロ波は原子、分子へ直接的な効果を与えるよりは、その集団的運動に影響を及ぼすものであり、分子系に存在するもとと大きな揺らぎの中で、その効果を正確に抽出することは、非常にチャレンジングな問題であろう。

実験研究においては、新しいマイクロ波ペクトル法の展開が重要課題であり、本研究領域においては、マイクロ波とNMR検出を組み合わせた方法など新測定法の開発がな

されており、これを通じて更なる新しい学問展開が期待される。マイクロ波のコヒーレントな弱い摂動は、分子の集団運動とその効果を調べるのに最も適しており、分子系の相転移、生体高分子機能の発生などにかかわる揺らぎの効果の解明に大きな力を発揮すると思われる。

このように本領域研究は、物性、分子科学、生物学などの広範な学問領域にも強いインパクトを与える可能性を示してきており、本領域の更なる発展を期待している。

[大阪大学 萩行正憲教授]

機構解明については、理論面で、A03 班を中心に、加熱機構に関して着実な進歩があった。和田によるできるだけ実験の要素を分離しつつ、一歩ずつマイクロ波照射効果を解明しようとする方向は、時間がかかってもこれから続けるべきであろう。松原らのレーザードップラー計、NMR などの新しい計測技術開発も重要である。このためには、マイクロ波励起から、非線形・非平衡過程を経て、コヒーレントな振動が励起されるモデルを構築しておく必要がある。

光藤、吉川、滝澤、吉川、福島らによる新しい物質作製法については、どんどん新しい結果がでてきそうである。しかし、後 1 年なので、まとめる部分も明確にしておくほうがいいであろう。

佐野の微粒子系の繋がりや誘電率、透磁率との関係は、メタマテリアル(人工微細構造体)との関係で興味深い。マイクロ波による金属粉末の焼結と関係がありそうである(田中の理論・シミュレーションあり)。

特定研究については、計画研究間、計画班間の連携の成果を要求されるであろうから、このあたりも意識すべきであろう。

マイクロ波加熱・反応の学理については、実験的にはどんどん新しい現象が出ており、この機構を後 1 年で解決するのは無理なので、どこまで学理を構築するかをある程度意識して理論、実験を進めたほうがいいだろう。

古くから確立していたと思われていた電磁波分野は、物質との非線形・不可逆・非局所過程相互作用を利用した新奇な現象の発見により新しい局面を迎えている。特定研究はその機構解明への最初のプロジェクトであり、領域代表者の強いかつ広い見識により 4 年を経て漸く部分的ではあるが学理が確立されようとしている。応用が先行して機構解明が進んでいないケースもあるが、だからこそ、今後の息の長い研究とそれに対する資金面での

国家的なサポートが必要であると考ええる。

下記の 3 つの関連学振委員会との研究を継続すべきである。

学振第 182 委員会 「テラヘルツ波科学技術と産業開拓」

先導的開発研究委員会 「メタマテリアルの物理と応用」

先導的研究開発委員会 「電磁波励起非平衡反応場の物理化学と産業応用」

[大阪大学 三宅正司名誉教授]

本特定領域研究の平成 21 年度の成果報告に対応する会議であったが、昨年度の中間報告以後の 5 グループ (A01~A05) の計画研究班と新しい公募研究 (K01~K05) の成果が発表された。各課題でこれまで以上に豊富なデータが得られているとともに、残された課題の解明に向けた精力的な挑戦が感じられ、密度の高い発表会であり、次回がさらに期待される会議であったといえる。

計画研究においてはいずれのグループも前半の成果を基にした後半の目的達成に向けた成果の提示と活発な議論がなされた。A01 は基礎研究に対応するもので、マイクロ波加熱の機構に関してこれまで得られている成果を判りやすくまとめた発表とともに、現在米国で話題になっている「マイクロ波加熱における超音波励起」の研究がトピックスとして紹介された。後者については話の全容を消化しきれない点もあったが、今後のより詳細な検討が待たれる。

なお、A02 においても上記超音波励起の問題を A01 の研究者と共同で議論することが期待される。

A04 はマイクロ波製鉄の実用化をもくろむ応用研究が中心であるが、20 kW 装置における銑鉄製造の成功とともに、120 kW 装置の製作状況が示され、順調な研究の進展が確認できた。

A05 は金属、セラミックス、ポリマーのみならずたんぱく質などのバイオマテリアルにまでまたがる多種多様な材料にゆいてのマイクロ波加熱・処理に関する発表であるが、多くの信頼性のあるデータが得られていて、各種材料に対するマイクロ波固有の効果を明らかにする努力が十分認められた。そしてマイクロ波照射と加熱される材料の微細構造との関連が話題になりつつあることが示され、これに関する A01 と A05 のグループの共同討議が期待された。

公募研究については計画研究との関連で認められた個々の研究課題について、目的に応じた成果が得られていることを確認できた。

5. 雑誌・論文 (計 174 件)

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- ① M.Hotta, M.Hayashi & K.Nagata, Complex permittivity and permeability of α -Fe₂O₃ and Fe_{1-x}O powders in the microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz, 査読有, ISIJ, International, vol.50, 2010, 1514-1516
- ② M.Tanaka, H.Kono, and K.Maruyama, Selective heating mechanism of magnetic metal oxides by a microwave magnetic field, Phys.Rev. B., 79, 104420 (2009). 査読有
- ③ M.Ignatenko, M.Tanaka, and M.Sato, Absorption of microwave energy by spherical nonmagnetic metal particle, Jpn.J.Appl.Phys., 48, 067001 (2009). 査読有

[学会発表] (計 186 件)

- ① M.Sato, Energy Transfer Analysis to Clear Microwave Effects in Materials: An Over View (Invited), International Conference on Materials for Advanced Technology, (ICMAT2011), Singapore, (2011)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 15 件)

- ① 名称: 豎型マイクロ波製錬炉
発明者: 永田和宏、佐藤元泰
権利者: 大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構
種類: 特許
番号: PCT/JP2010/051299
出願年月日: 2010年1月31日
国内外の別: 国外
- ② 名称: 豎型マイクロ波製錬炉
発明者: 永田和宏、佐藤元泰
権利者: 大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2009-021040
出願年月日: 2009年1月31日
国内外の別: 国内
- ③ 名称: マイクロ波製鉄炉
発明者: 永田和宏、佐藤元泰
権利者: 大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類: 特許

番号: EPC: 08 013 746.6、
韓国: 10-2008-0074985、米国: 12/219, 942、
中国: 200810144798.1

出願年月日: 2008年7月31日

国内外の別: 国外

- ④ 名称: マイクロ波製鉄炉
発明者: 永田和宏、佐藤元泰
権利者: 大学法人東京工業大学
種類: 特許
番号: 特願 2007-201388
出願年月日: 2007年8月1日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: マイクロ波製鉄炉
発明者: 永田和宏、佐藤元泰
権利者: 大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構
種類: 特許
番号: US 7,744,810 B2
取得年月日: 2010年7月29日
国内外の別: 国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 元泰 (SATO MOTOYASU)

核融合科学研究所・教授

研究者番号: 60115855

(2) 研究分担者

西 信之 (NISHI NOBUYUKI)

分子科学研究所・教授

研究者番号: 60013538

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)

大阪大学・レーザーエネルギー研究センター・教授

研究者番号: 10144429

三宅 正司 (MIYAKE SHOUJI)

大阪大学接合科学研究所・名誉教授

研究者番号: 40029286

大峰 巖 (OOMINE IWAO)

分子科学研究所・所長

研究者番号: 6146719

辻 正治 (TSUJI MASA HARU)

九州大学・先端物質科学研究所・教授

研究者番号: 30038608

田中 基彦 (TANAKA MOTOHIKO)
中部大学・全学共通教室・教授
研究者番号：80167501

永田 和宏 (NAGATA KAZUHIRO)
東京藝術大学・教授
研究者番号：70114882

ルズキン ドミトリ (LOUIZKIN DOMITRI)
東北大学・WP I・教授
研究者番号：60302212

吉川 昇 (YOSHIKAWA MOBORU)
東北大学・環境科学科・准教授
研究者番号：70166924

本島 修 (MOTOJIMA OSAMU)
核融合科学研究所・所長
研究者番号：60109056
(平成 18 年度～20 年度)

行本 正雄 (YUKIMOTO MASAO)
中部大学・工学部・教授
研究者番号：30434567
(平成 21 年度～)

長山 好夫 (NAGAYAMA YOSHIO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：10126138
(平成 22 年度)

(3) 連携研究者 なし