

## 日本鉱物科学会応用鉱物科学賞

平成26年度日本鉱物科学会応用鉱物科学賞第8回受賞者

豊田 丈紫 会員 (石川県工業試験場 電子情報部)

受賞題目:「地球に優しい酸化物熱電変換素子および廃熱発電システムの応用鉱物学的開発」



ゼーベック効果を利用する熱電発電はわずかな温度差を電気に変換できるため、廃熱エネルギーの回収技術(環境発電)として注目されている。無人惑星探査機「ボイジャー」にも使用されていた熱電変換材料は、太陽光や地熱などの自然エネルギー発電とともに、地球環境問題の解決に大いに役立つと期待されている。

既存の熱電材料は、毒性重金属を含むものが多くて実用化が難しく、環境に配慮した元素組成の材料が望まれている。硫化鉛テトラヘドライトが中温度領域での熱電材料として有望との報告があるが、より高温領域では耐熱性が高く安全な酸化物が注目されている。人口宝石としても知られるタウソン石(チタン酸ストロンチウム)なども有力候補であり、新熱電材料の開発には、酸化物を得意とする鉱物科学が貢献できる部分も大きい。

熱電発電は、低温領域では発電効率が10%を超える素子の開発が進んでいるが、焼却炉などの高温で低密度な廃熱エネルギーの利用は、ようやく端緒に就いたところである。高温で利用できる酸化物熱電材料は、大気環境下で安定であり、素子化プロセスに多様性があることから、今後の発展が大いに注目されている。豊田丈紫氏は、熱に強いセラミックス基板に酸化物熱電材料をインプリントした高集積熱電変換モジュールを作成することを提案し、地域新生コンソーシアムや地域イノベーション創出研究開発事業などの産学官連携プロジェクトで、材料や素子の開発を重点的に推進してきた。そして、インプリント技術を用いることで、低コストで高密度の膜構造熱電変換素子の製作に成功した。更に、発電素子を組み込んだ発電システムを廃棄物焼却炉に設置することで、小規模なプラントで発生する廃熱を電氣的に回収することにも成功した。これに關係して、資料に示すように多くの特許が取得されている。このように、豊田氏を中心とした熱電発電システムの開発で大きなブレークスルーが得られており、廃棄物焼却炉への実用化も着実に進めていることを高く評価したい。

豊田氏は、そのほかにも磁気ゼーベック効果に着目し、挑戦的な材料開発の基礎研究をも積極的に推進している。その目的材料に辿り着くために、フォノン系の熱伝導率と電子系の電気伝導率との拮抗を既存鉱物の結晶構造ユニット(層状構造と複合結晶)で考えるなど、鉱物科学的知見を有効に利用している。実際、混合原子価状態のMnイオンを含む層状構造の強相関電子系Mn酸化物に注目し、局材スピンの伝導電子とをカップリングさせて熱電特性を向上させた。特に、酸化物系発電素子材料の中で特性が比較的低いとされるn型材料を扱い、Ruddlesden-Popperホモロガス相の高性能Mn酸化物をクエン酸錯体法により単一組成で合成することに成功した。更に結晶構造解析を通じ、結晶子サイズやスピン・軌道磁気モーメントなどを制御することで、高い磁気ゼーベック効果が得られることを明らかにしている。

地球温暖化や化石燃料の枯渇化に関し、熱電発電はスケール効果を無視でき、その用途も広範囲に存在し、低密度廃熱のエネルギー変換技術として世界的に注目を浴びている。以上の研究は、新規材料開発と熱電素子のパッケージ化で廃熱発電の実用化を目指しており、すでに実装された焼却炉も存在する。豊田氏は解決が困難な重要課題に果敢に挑戦し、鉱物科学の応用研究分野で顕著な研究業績をあげており、日本鉱物科学会応用鉱物科学賞に相応しいと判断する。よって、その候補者として推薦する。

豊田 丈紫 会員の略歴

1994年 3月 茨城大学工学部金属工学科卒業

1996年 3月 東京工業大学大学院総合理工学研究科材料科学専攻

博士前期課程修了

1999年 3月 同上博士後期課程修了 博士(理学)

1999年 5月 東京工業大学大学院応用セラミックス研究所博士研究員

2000年 4月 石川県工業試験場 化学食品部 技師

2007年 4月 同上 化学食品部 研究員

2009年 4月 同上 化学食品部 専門研究員

2012年 4月 同上 再生可能エネルギー技術開発室専門研究員

2015年 9月 現在に至る

豊田 丈紫 会員の主な業績

主要論文

1. M. Okube, A. Kinoshita, J. Yoshizaki, T. Toyoda, S. Sasaki (2013) Spin orientation in (Ti-Mn) Ba ferrite estimated from resonant X-ray magnetic scattering. *J. Phys.*, 425, 102005, 1-4.
2. T. Toyoda, N. Sasaki, K. Shimada, M. Okube and S. Sasaki (2011) High-temperature thermoelectric property of layered  $\text{La}_{2-2x}\text{Ca}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$  manganites ( $0.75 \leq x \leq 1.0$ ). *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50, 041101, 1-6.
3. 豊田丈紫(2011)セラミックスの熱膨張特性 熱電変換素子における熱応力の影響とモジュール設計. *セラミックス*, 46, (11), 933-937.
4. T. Toyoda, K. Kitagawa, K. Yamawaki, T. Hanashima, S. Sasaki and P.D. Siddons (2004) Site preference study of Ti-Mn and Ti-Co substitution for  $\text{Fe}^{3+}$  in Ba hexagonal ferrites by means of X-ray diffraction and absorption measurement. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 112, (1), S1455-S1458.
5. T. Toyoda, S. Sasaki and M. Tanaka (1999) Evidence of charge ordering of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  in magnetite observed by synchrotron X-ray anomalous scattering. *Am. Mineral.*, 84, 294-298.
6. T. Toyoda, S. Sasaki and M. Tanaka (1997) X-ray diffuse scattering study of magnetite by the valence-difference contrast method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36, 2247-2252.

主要出願特許

1. 出願番号: 2007-109210, 「熱電変換素子及び熱電変換モジュール並びに熱電変換モジュールの製造方法」, 2007年4月, 日本
2. 出願番号: 200810212574.X, 2008年9月, 中国  
出願番号: 08 166 385.8, 「THERMO ELECTRIC CONVERSION ELEMENTS, THERMOELECTRIC CONVERSION MODULES AND A PRODUCTION METHOD OF THE THERMOELECTRIC CONVERSION MODULES」2008年10月, 欧州  
出願番号: 12/253,607, 2008年10月, 米国
3. 出願番号: 2009-55971, 「n型熱電変換材料, n型熱電変換素子, 及び熱電変換モジュール」, 2009年3月, 日本
4. 出願番号: 2009-69099, 「熱電発電システム」, 2009年3月, 日本
5. 出願番号: 2009-69374, 「熱電変換モジュール」, 2009年3月, 日本
6. 登録番号: 5250762, 「熱電変換素子, 熱電変換モジュール, 及び製造方法」, 2013年4月, 日本
7. 登録番号: 5206510, 「n型熱電変換材料, n型熱電変換素子, 及び熱電変換モジュール」, 2013年3月, 日本
8. 登録番号: 4668233, 「熱電変換素子及び熱電変換モジュール並びに熱電変換モジュールの製造方法」, 2011年1月, 日本