

# 新原理「スピンドル効果」による 熱電変換の可能性

石田 真彦

## 要 旨

熱電変換素子は、世界中で無駄に捨てられている膨大な量の廃熱を、再び利用価値の高い電力に変換する“打ち出の小づち”となり得る技術として期待されています。そのなかでも、スピンドル効果を利用した全く新しいメカニズムによる熱電変換技術は、技術的に成熟した熱利用分野における新しいイノベーションとなる可能性を秘めています。本稿では、廃熱の有効利用の課題に対し、このスピンドル効果素子が有する新しい可能性について解説します。



スピンドル効果／熱電変換／廃熱利用

## 1. まえがき

世界のエネルギー消費量は、新興国を中心とした経済規模の拡大などが原因で、年々増加の一途をたどっています。一方で、エネルギー消費量が無秩序に増加する状態を放置することは、資源の枯渇や気候の変動を引き起こし、結果として人々の生活に悪い影響を与えることが懸念されています。

そのため、エネルギー利用における経済性と、低環境負荷の両面を訴求することができる新技術創出に期待が集まっています。こうしたなか、世界中で無駄に捨てられている膨大な量の「廃熱」の有効利用を目指す技術の開発が近年盛んになってきています。

## 2. 热電変換による廃熱回収

社会に溢れている廃熱のほとんどは、約150°C以下の気体や温水の形で排出されていることが知られています。この温度域では、熱電変換に限らず排熱を電力に変換した場合の効率が小さくなってしまうことが、廃熱回収技術の実用化を難しくしています。

一方、比較的高い変換効率が得られる高温域においては、熱電変換の実用化の取り組みがなされています。例え

ば、近年の世界的な自動車の燃費規制の動向に関連し、燃費向上技術としてエンジン廃熱回収に取り組むプロジェクトが各国で進められています。エンジンからは比較的高温の廃熱が利用できるため、熱電変換の実用化が期待されている分野です<sup>1)</sup>。既にランキンサイクルやスターリングサイクルなどの熱機関や、ゼーベック素子を使った試作システムにおいて、10%前後の燃費向上効果が得られることが報告されています<sup>1)</sup>。

しかし、これらの技術の最も大きな課題は、採算性をクリアできていない点です。例えば自動車の燃費1%向上に支払えるコストは1万円以下であると言われていますが、現状の技術は経済的なメリットを出せるレベルには到底届いていません。

すなわち、この採算性の課題が解決できれば、自動車向けなどの高温域の廃熱回収技術として実用化を達成し、産業として確立することができます。そのうえで、より低温域の廃熱回収の普及に向けた取り組みが進んでいくと考えています。

## 3. スピンドル効果素子の特徴

スピンドル流熱電変換は、2008年に慶應大学の齊藤グループ

(現東北大学)が実証したスピニゼーベック効果を用いた新しい熱電変換メカニズムです<sup>2)</sup>。我々は、このスピニ流熱電変換の革新性に着目して、その熱電変換メカニズムに基づくスピニゼーベック素子の実用化を目指した研究開発を行っています<sup>3)</sup>。

スピニゼーベック素子の最大の特徴は、そのシンプルな構造にあります。図1に、ガラス基板上に作製した素子の写真と、素子の構造を模式的に表した図を示します。模式図にあるとおり、素子は磁性絶縁体と伝導体の二層膜だけで構成されています。写真の素子で用いている材料は、磁性絶縁体としてイットリウム鉄ガーネットにビスマスを添加したBi:YIGを、また、伝導体に白金(Pt)を使用しています。図2に示す、一般的な半導体pn接合型のゼーベック素子

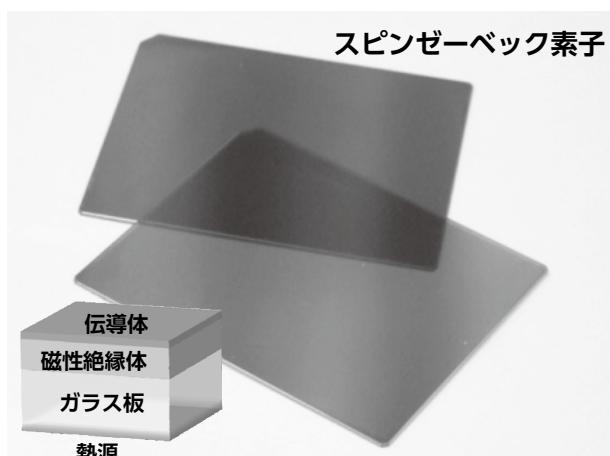


図1 スピニゼーベック素子とその構造模式図

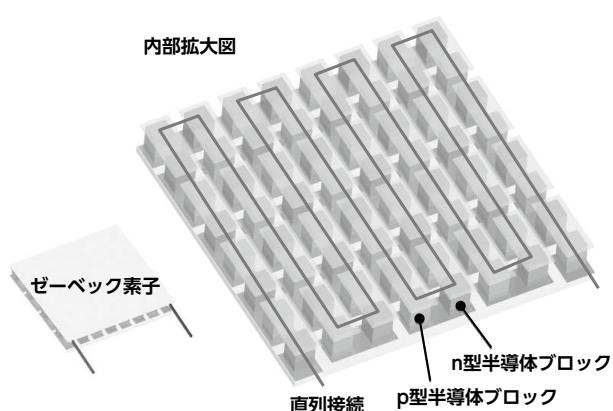


図2 ゼーベック素子モジュールの構造模式図

の模式図と比較すると、その構造の特徴は明らかです。

ゼーベック素子の場合、熱起電力を大きくするために、素子内でn型とp型半導体のブロックを複数個直列につないだ複雑な構造を作製する必要があります。

一方スピニゼーベック素子では、起電力が伝導体の面内方向に発生します。その起電力を大きくするためには、素子の電流取り出し端子間の距離を長くとるだけで構いません。そして、素子の面積を広くすると、これに比例して取り出し電力が増大していきます。このように、シンプルな構造を持ち、簡単にスケールアップできる点が、さまざまなメリットにつながります。

第1に、素子製造に、塗布などの簡便なプロセスが適用できるために、より大きな面積で、かつ低コストで製品を提供できます。

第2に、さまざまな部材の形状に合わせて素子を作製することができます。

実際に、塗布プロセスを利用して作製した素子や、フレキシブルな基板へ作製した素子においても、問題なく熱電変換能が得られることを確認しています。

#### 4. スピニゼーベック素子の可能性

スピニゼーベック素子のもう1つの大きな特徴は、従来のゼーベック素子の変換効率を超える可能性を秘めている点です。ゼーベック素子とスピニゼーベック素子のメカニズムの違いを概念的に表した図3を使って説明します。

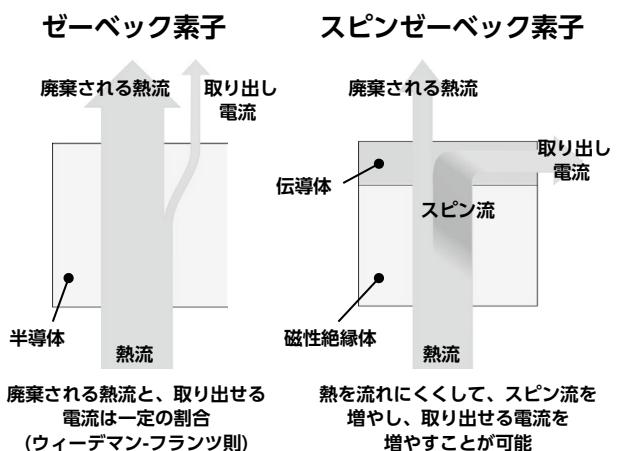


図3 半導体型熱電変換素子とスピニ流熱電変換素子のメカニズムの違い

まず、素子の両端に温度差を付けると素子内部に熱流(熱の流れ)が発生します。

ゼーベック素子の場合、素子中に熱流を発生させると、その熱流の一部が、ある一定の割合で同じ方向に流れる電流に変換されます。熱流から電流への変換効率は、素子内部に熱流が流れにくいか、または、電流が流れやすいような材料を用いることで大きくなることが分かっています。しかし、半導体中では、電子の量が熱の流れやすさも決めてしまつたため、両者を独立に変えることができません。これはウィーデマン・フランツ則と呼ばれる物理的な制限で、ゼーベック素子の性能向上を妨げる大きな壁でした。

スピニ流熱電変換の大きな魅力は、ウィーデマン・フランツ則に縛られない熱電変換メカニズムを実証したことです。スピニゼーベック素子では、素子に発生させた熱流の一部が、磁性絶縁体の中の局在スピニを介したスピニ角運動量の流れ、すなわちスピニ流を生じさせるスピニゼーベック効果が起きます。発生したスピニ流は、常磁性の伝導体の中で、逆スピニホール効果と呼ばれるスピニ流と電流を変換する現象によって、熱流の向きとスピニが配向する向きの両方に直交する方向の電流に変換され、電力として取り出すことができます。

このため、スピニゼーベック素子における熱電変換効率は、磁性絶縁体の熱の流れを悪くすることと、伝導体における電子の流れを良くすることを、それぞれ独立した部材において制御し改善することが可能です。これが、ゼーベック素子にはない特徴であり、スピニゼーベック素子に大きな性能向上の可能性が期待される理由です。

実用的なメリットとして前述した、非常に単純な二層型の素子構造を実現できたこと、更に、単純な構造を持つために、塗布などの簡易なプロセスを適用でき、大面積素子を低成本で作製できることも、このメカニズムのおかげで実現したものです。

最後に、スピニゼーベック素子の素子特性例を紹介します。図4は、スピニゼーベック素子の起電力を積算するため、伝導体膜のパターニングによって素子を直列に接続した素子の写真と出力測定の結果です。熱起電力の温度依存性のプロットから、 $0.395 \text{ mV/K}$ の熱電変換係数を得ています。このように、スピニゼーベック素子においても従来のゼーベック素子と同様の手法によって、効果的に起電力の積算が可能です。従来の半導体型ゼーベック素子と比較すると、変換係数も小さく、また素子の内部抵抗も大きいために、電

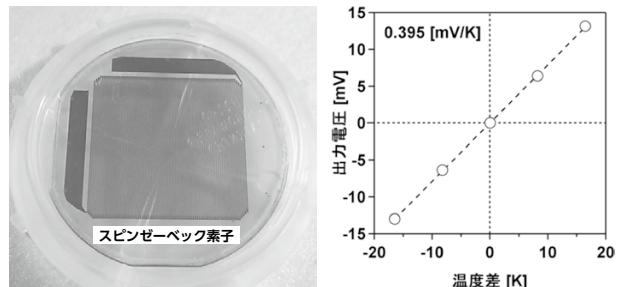


図4 スピニゼーベック素子を用いた起電力積算実験

源として実用的な性能は得られているとは言えませんが、センシングなどの電圧を必要とするアプリケーションへの応用が期待できるレベルに近づいています。

今後、出力向上が期待できる施策として、素子の厚さをmmオーダーまで大きくすることや、材料自身の特性を改善することに取り組み、従来の半導体型素子を超える性能を実証することを目指しています。

## 5. むすび

熱電変換素子は、無駄に捨てられている廃熱回収技術として、大きく期待されています。現在の取り組みは、主に半導体型ゼーベック素子の技術開発によって進められていますが、スピニゼーベック素子が、将来、ゼーベック素子を大きく超える変換効率、低成本性、耐久性を実証できれば、その市場を置き換える、更に拡大することも不可能ではありません。より多くの廃熱を有効利用できる社会の実現に向けて、スピニゼーベック素子の早期実用化に取り組んでいきます。

### 参考文献

- 1) C.B. Vining: An Inconvenient truth about thermoelectrics, *Nat. Mater.* 8, 2009, pp.83-85
- 2) K. Uchida et al.: Observation of the spin Seebeck effect, *Nature* 455, 2008, pp.778-781
- 3) A. Kirihara et al.: Spin-current-driven thermoelectric coating, *Nat. Mater.* 11, 2012, pp.686-689

### 執筆者プロフィール

石田 真彦

スマートエネルギー研究所  
主任研究員

# NEC 技報のご案内

NEC技報の論文をご覧いただきありがとうございます。  
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報(日本語)

NEC Technical Journal(英語)

## Vol.66 No.1 社会的課題解決に貢献するNECの事業活動特集

社会的課題解決に貢献する NEC の事業活動特集によせて  
「社会価値創造型」企業への変革を目指して～事業活動をとおした社会的課題解決への貢献～

### ◇ 特集論文

#### 信頼性の高い情報通信インフラの構築

新東名高速道路での導入事例にみる次世代交通管制システムの特徴  
国際通信を支える光海底ケーブルネットワークの大容量化及び高信頼化技術  
基幹系ネットワークを支える要素技術とパケット光統合トランスポート装置  
どこでも安定的な通信品質を実現するLTE フェムトセル基地局向け干渉制御技術の開発

#### 気候変動(地球温暖化)への対応と環境保全

第一期水循環変動観測衛星「しづく」の定常観測  
データセンターの省電力化へ貢献する「Express5800シリーズ」「iStorage Mシリーズ」  
新原理「スピンドルベック効果」による熱電変換の可能性

#### 安全・安心な社会づくり

CONNEXIVE 放射線測定ソリューション  
市町村同報系防災行政無線システム～災害情報伝達の多様化に向けて～  
消防救急無線通信システムのデジタル化推進  
NECのBCソリューション～企業の事業継続を支えるiStorage HS～  
水中からの脅威に対処する水中監視システム及びその関連技術  
監視用小型無人機システムとその関連技術  
クラウドを用いたプライバシー保護型データ処理技術  
信頼できるクラウドストレージの実現に向けて

#### すべての人がデジタル社会の恩恵を享受

介護施設における安全確保のための「徘徊防止ソリューション」の実証実験  
遠隔地からの聴覚障がい者向け要約筆記作業支援システム  
対話のきっかけとなる話題提供によるコミュニケーション活性化技術

### ◇ NEC Information

#### 社会貢献活動のご紹介

NECの社会貢献プログラムの基本方針と活動事例  
ICTによる復興支援への取り組み



Vol.66 No.1  
(2013年8月)

特集TOP