

再生可能エネルギーの活用を支える革新材料

Innovative Materials for Renewable Energy

工藤 真 野尻 剛 加藤 隆彦 服部 孝司
 Kudo Makoto Nojiri Takeshi Kato Takahiko Hattori Takashi
 石島 善三 早川 純 藤枝 正
 Ishijima Zenzo Hayakawa Jun Fujieda Tadashi

持続可能な社会の実現に向け、再生可能エネルギーの活用拡大が求められている。特に、太陽光や地熱・工業廃熱を活用するための太陽電池や熱電変換モジュールでは、発電効率の向上やコスト低減につながる革新材料の開発が急務である。

日立グループは、太陽電池の製造コストを低減可能な各種ペースト材をすでに製品化している。また、超高効率な太陽電池の実現のための革新技術や、低コストで環境負荷の低い熱電変換材料の開発を進めている。

1. はじめに

持続可能な社会の実現のために、資源が枯渇することのない太陽光、風力、波力・潮力、流水・潮汐（ちょうせき）、地熱、バイオマスなど、再生可能エネルギーの活用拡大が求められている。その中でも、太陽光を活用する太陽電池や地熱を活用する熱電変換モジュールでは、素子を構成する材料が発電効率やコストに直結するため、材料の革新が必要である。

再生可能エネルギーの活用で最も大きな役割を担うことが期待されているのが太陽電池である。その普及の鍵はシステム全体のコスト低減であり、特に製造コストの低減と光電変換効率の向上が重要である。前者に関しては、スクリーン印刷法の活用が主流であり、そのキー材料が各種ペースト材である。また、後者については、光の量子閉じ込め構造の採用が有望である。

一方の熱電変換モジュールは、地熱や工業廃熱の有効活用に適しており、同用途で製品化が先行しているバイナリー発電システムに比べ、静音でメンテナンスが容易という利点がある。また、モジュールの小型化が容易であり、車載やエネルギーハーベストなどへの適用も可能である。これらの特徴を最大限に生かして普及を促進するためには、熱電変換効率の向上はもとより、有害材料やレアメタルを

使わない材料構成とする必要がある。また、設置場所を選ばない薄膜型のモジュールの開発も重要となる。

ここでは、再生可能エネルギー活用を支える革新材料として、太陽電池向け各種ペースト材と超高効率化を実現するシリコンナノ構造材料、および用途や使用環境に合わせて各種材料を用いた熱電変換モジュールに関する技術について述べる。

2. 太陽電池材料

2.1 低コスト・高機能ペースト材料

太陽光を用いた発電システムは、2015年には3兆3,700億円の世界市場（2015年の発電量は64.5 GW）が見込まれている。この中でシリコン系太陽電池（以下、Si PVと記す。）は、現在、すべての太陽電池の約85%の発電量を占めており、今後も、国内外の再生可能グリーンエネルギーの一翼を担う大きな成長分野と考えられる。

日立グループは、Si PVの低コスト化に寄与できる高機能ペースト材料の開発を進めてきた。これらのペーストには、(1) 世界初のセル電極形成用Cu（銅）系ペースト¹⁾、(2) Siウェーハ用ドーピングペースト、(3) はんだ代替接続用導電ペーストなどがある。主なペースト材料技術について以下に述べる。

Si PVセル用電極には、通常、Ag（銀）ペーストが用いられている。セルの低コスト化には、Agよりも著しくコストの低い電極材料の開発が必要であるが、Agと同様の大気中高温焼成法（200℃～900℃）で作製して電極機能を発揮できる低コストの材料はこれまで見つかっていない。大気中焼成法は、金属やガラス粉末などから構成される導電性のペーストを大気中において、高温の熱処理によって焼き固めて電極塗膜とする熱処理方法であり、Si PVの製造に全面的に適用されている。一方、半導体チップやプリン

ト基板などにはCu配線が用いられているが、Cu系材料は大気中で200℃以上の高温にさらされると急速に酸化するため、これまで、安価なCu系材料を200℃以上の大気中焼成法で作製した例はない。

日立グループは、Si PVの裏面電極への適用を主目的として銅ーリン (Cu-P) 合金を開発し、ペースト化した後、塗布膜とすることにより、Agよりも著しく低いコストのCu系材料を大気中焼成法で電極化できることを明らかにした¹⁾。開発したCu-P合金粉末粒子とその大気中焼成過程を図1に示す。SEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡) 観察により、開発した合金粉末は球状であることが分かる [同図 (a) 参照]。また、粉末の断面組織は、製造時の冷却過程で初めに結晶化するCu相 (初晶) と、この初晶の間に最終的に結晶化するCu相とCu₃P化合物相から成る層状組織、いわゆる共晶組織と呼ぶ特別な組織から構成されている [同図 (b) 参照]。Cu相は、大気中焼成により、400℃まで酸化が進んで消失するが、450℃以上

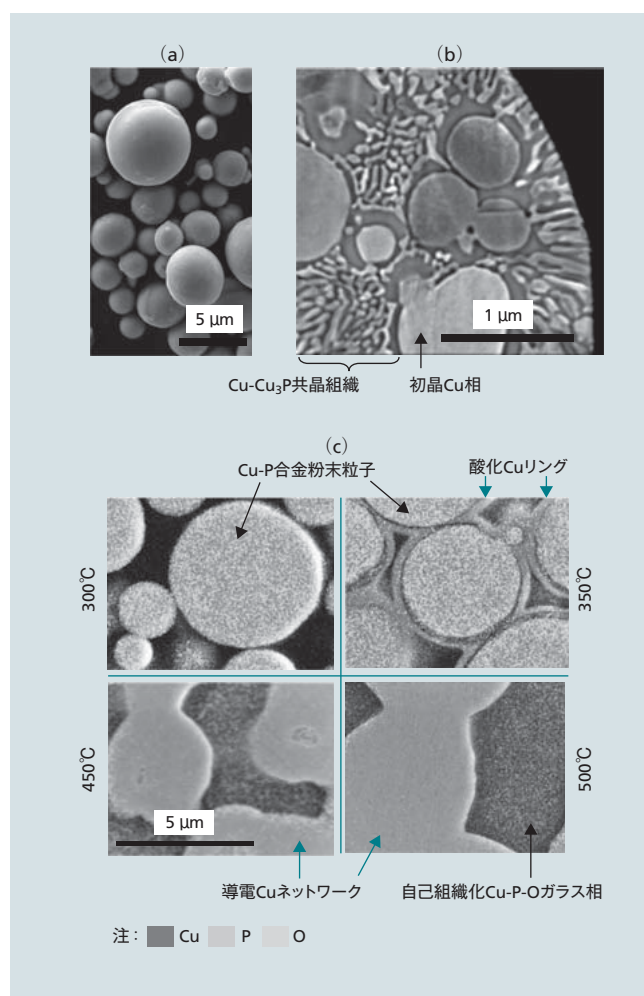


図1 | 開発したCu-P合金粉末粒子とその大気中焼成過程

開発したCu-P合金粒子のSEM (Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡) 像 (Cu-7mass%P) を (a) に、粒子断面組織を示すSEM像を (b) に、開発したCu-P粒子の大気中焼成過程を (c) にそれぞれ示す。なお、(c) は、塗布膜断面のSEM像上に、エネルギー分散型X線分析によって得られた化学組成マップを合成して作図したものである。

になると、Cu₃P化合物相が酸化されて消失すると同時に、先に酸化されたCu相 (Cu₂O相) を還元する。その結果、まったく新しい導電性のCu相を焼成塗膜内にネットワーク化し [同図 (c) 参照]、裏面電極に要求される電気抵抗スペックを満足させることができる。このほか、開発したCu系塗膜とSi基板とのバリア性能やタブ線との接続性なども担保できるペースト技術を開発済みである。

次に、Si ウェーハ用ドーピングペーストについて述べる。一般的なSi PVは、pn接合を形成して電界を発生させ、太陽光の照射によってSi内に生ずる正孔と電子が、この電界によって外部回路に流れて発電する仕組みである。従来、このpn接合は拡散炉中でBBr₃ (三臭化ホウ素) ガスやPOCl₃ (塩化ホスホリル) ガスを気相拡散する方法によって形成される。一方、近年の太陽電池高効率化の流れから、選択エミッタ構造^{*1)} やバックコンタクト型太陽電池^{*2)} を志向する太陽電池メーカーが増えており、これに対応するには選択的にn型層あるいはp型層を形成する必要がある。しかし、従来の気相拡散を利用する方法では、全面に形成されたn型層あるいはp型層を、レジストを用いて選択的にエッチング処理を行うなどの煩雑なプロセスが必要であった。Si ウェーハ用ドーピングペーストは、簡便なスクリーン印刷でのパターンニングが可能で、かつ、PあるいはB (ホウ素) を選択的に拡散させるという新しい設計コンセプトから生まれた。n型層のP拡散源にはPを、p型層のB拡散源にはBをそれぞれ含む複合酸化物が有効であることを実験的に見いだしている。これらの複合酸化物は、PあるいはB拡散時の高温領域で化学的に安定であり、高い選択拡散性を実現した。また、これまで培われたプリンタブル機能材料の知見を生かし、これらの複合酸化物と樹脂/溶剤を組み合わせ、スクリーン印刷法に対応可能なペーストを開発した。この開発ペーストで作製した選択エミッタ構造を有する太陽電池は、変換効率を従来に比べ0.3%~0.5%向上でき、このペーストの技術的な優位性を実証できた。

2.2 超高効率を実現するSiナノ構造材料

現在、太陽電池の主流となっているpn接合を利用した結晶Si PVセルは、開発から60年近くが経ち、変換効率は量産で22%台、研究開発で24%~25%に達している。結晶Si PVセルの変換効率の理論限界は、約29%であるとされている。これはSiの持つバンドギャップ ($E_g=1.1$ eV) によって決まる。バンドギャップ1.1 eVは、光の波長

*1) 受光面を低濃度ドーブとし、電極部分のみ選択的に高濃度ドーブした領域を設けて低接触抵抗化した構造を有する高効率太陽電池。

*2) 太陽光の影を作る表面電極をなくし、裏面にpn接合構造を集約した高効率太陽電池。

1,100 nmに相当する。それより低エネルギーの光子、つまり波長1,100 nmより長波長の光はSiを透過してしまい、発電には寄与しない(透過損失)。それより高エネルギーの光子、つまり短波長の光は、エネルギーが過剰にあるにも関わらず、1組のキャリア(電子-正孔対)しか生成できず、過剰なエネルギーを熱として放出する(量子損失)。太陽光のエネルギーのうち、約25%が透過損失、約30%が量子損失で失われている²⁾。

この理論限界を打破する技術として、量子ドットや超格子構造と呼ばれるナノ構造を利用する以下のような超高効率太陽電池セルが研究されている³⁾。

(1) 異なるバンドギャップを有する複数のセルを直列に接合することにより、エネルギーのむだをなくす多接合型セル

(2) 量子ドットなどにより、本来のバンドギャップの間に中間のバンドを生じさせ、そこを励起の中間点として、本来のバンドギャップよりも小さいエネルギーの光の利用を可能にする中間バンド型セル

(3) 量子ドットなどにより、量子構造の閉じ込め効果を利用して、量子損失として散逸される過剰なエネルギーを、別のキャリアの生成に使う多重励起子生成型セル

これらの実現には、ナノサイズの構造や材料の接合界面を制御する技術が必須である。

上述の超高効率太陽電池セルのうち多重励起子生成型セルにおいて、多重励起子を生成させるためには、Siのバンドギャップの2倍や3倍といった高いエネルギーを持つ光子、つまり、短波長の光を有効に使うことと、キャリアが量子構造内部で生成し、閉じ込め効果が働くことの2つが必要である。そこで、ナノピラー構造と超格子構造を組み合わせたナノ構造を検討している。具体的には、半導体の微細加工技術であるリソグラフィ技術を用いて、Siを柱状に加工した直径数十ナノメートルから百ナノメートル程度のナノピラー構造による、反射防止および閉じ込めの検討を行った⁴⁾。作製した構造の上面を図2(a)に、側面からの観察結果を同図(b)にそれぞれ示す。光学シミュレーションおよび作製したナノピラーの反射率測定の結果、単一径のナノピラーでは、特定の波長の反射だけが低減されることが分かった。そこで、複数の直径のナノピラーをハイブリッド化したところ、短波長から長波長にわたって幅広く反射率が低減できた。また、多重励起子生成に不可欠な短波長側の反射を抑えて、従来技術に比べて光を効率的に取り込めることが分かった[同図(c)参照]。

波長460 nmの短波長の光の場合のナノピラー内部でのキャリア生成率の光学シミュレーション結果を同図(d)に示す。図中の色の濃い部分は、キャリア生成率の高い部

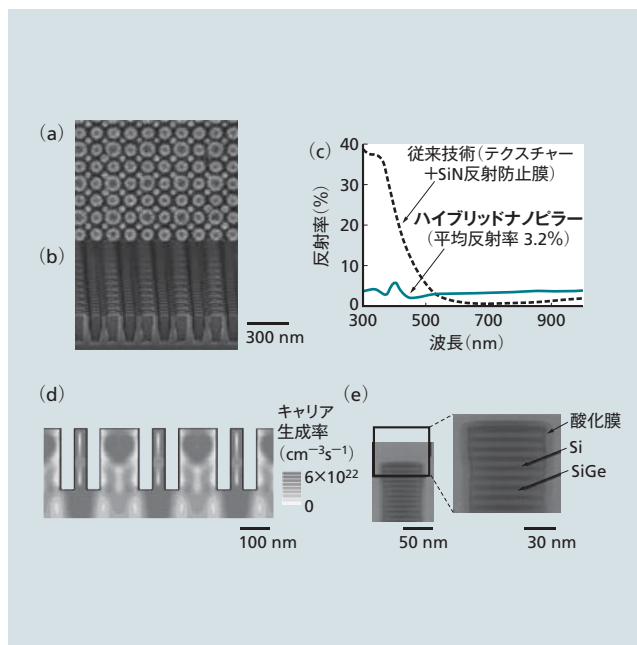


図2 | ナノピラー構造による反射防止および閉じ込めの検討

形成した直径30 nm/60 nm/80 nmのハイブリッドナノピラーのSEMによる観察結果の上面を(a)に、側面を(b)に、その反射率を(c)にそれぞれ示す。また、直径40 nmと120 nmのハイブリッドナノピラー中でのキャリア生成率のシミュレーション結果を(d)に、作製したSi/SiGe超格子の積層構造によるナノピラーの透過電子顕微鏡による観察結果を(e)にそれぞれ示す。

分を表す。波長460 nmの短波長の光の場合、直径の小さい40 nmのナノピラー中で、キャリア生成率が高くなった。ナノピラー構造では、ピラー径に応じて特定の波長の光を閉じ込める効果を有し、直径の小さいピラーによって短波長の光が閉じ込められることを見いだした。今後、この技術に加えて、ナノメートルオーダーの薄膜のSi/SiGe(シリコンゲルマニウム)超格子の積層構造を作り込んだ構造を作製し、多重励起子の現象の確認とセルへの適用を進めていく⁵⁾[同図(e)参照]。

3. 熱電変換材料

3.1 高温用熱電変換モジュール

熱電変換は、熱電半導体に温度差を与えることで生じるゼーベック効果を利用し、熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換する発電方法である。構造が単純であることや稼働部がなくメンテナンスが不要であることなどの理由から、高い信頼性が求められる惑星探査機の電源などに利用されてきた。近年では、エネルギー消費量の増加に伴う化石燃料の枯渇やCO₂による地球温暖化などの問題から、これまで未利用であった500℃付近の工場廃熱や自動車廃熱を回生するデバイスとして注目されるようになっていく⁶⁾。

熱電変換モジュールは、p型とn型の素子を電極で直列に接続する構造が一般的である。特に高温用では、接合部にかかる熱応力の緩和や部材間の拡散による劣化の防止が

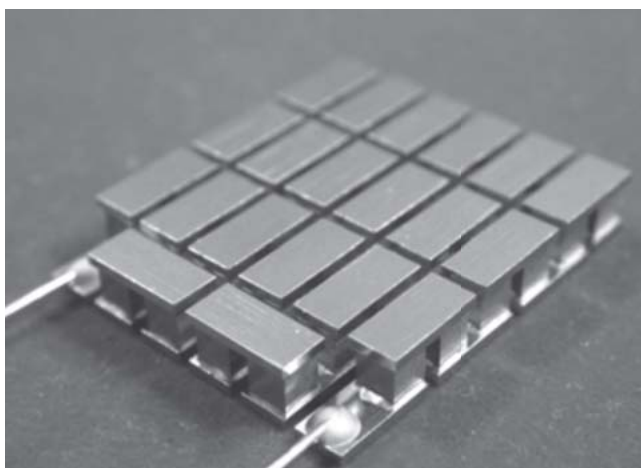


図3 | 両面スケルトン型高温用SiGeモジュール

出力は8.4 W, 温度差は630°C (高温側650°C, 低温側20°C) である。気密ケースに減圧封入して測定した。

実用化の鍵である。日立化成株式会社は、これまでにSiGe素子を使った高温用モジュールを開発している(図3参照)。これは、粉末冶金(やきん)法で製造したSiGe素子とモリブデン電極を特殊な方法で接合してモジュール化したものである。素子に対して熱膨張係数が近似するモリブデンを電極に用いることや接合方法を工夫することによって、接合部にかかる熱応力を緩和するとともに、素子電極間の拡散防止を達成している。そして、セラミック基板を設けない両面スケルトン構造を採用することで、スケールアップに対する熱応力も緩和される。

また、さらなる高性能化を目的に、SiGeと Mg_2Si (マグネシウムシリサイド)を組み合わせたモジュールの開発にも着手している⁷⁾。 Mg_2Si は高性能であり、また、Pb(鉛)、Te(テルル)、Sb(アンチモン)、Bi(ビスマス)などの有害な物質を含まないことから次世代の熱電変換材料として期待されているが、高性能な材料はn型しか見いだされていない。そのため、n型素子だけを使ったユニレグ構造や他材料のp型素子と組み合わせたモジュールが考えられている。そこで、SiGeモジュールの開発で培った製造技術をベースとして、SiGe素子と組み合わせた $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{SiGe}$ 型モジュールの開発を行っている。 Mg_2Si 素子とSiGe素子をそれぞれ2個ずつ使用した2対モジュールにおいて、温度差620°Cで最大1,000 mW/cm²の出力を得ている(図4参照)。この値は、従来型SiGeモジュールの1.7倍である(図5参照)。

今後は低コストかつ高性能なp型素子の探索、ならびに大型化に向けたモジュール製造技術の開発を進め、実用化をめざす。

3.2 低環境負荷熱電変換材料ホイスラー合金

産業地域・地中に大量に分散する200°C未満の低温熱を

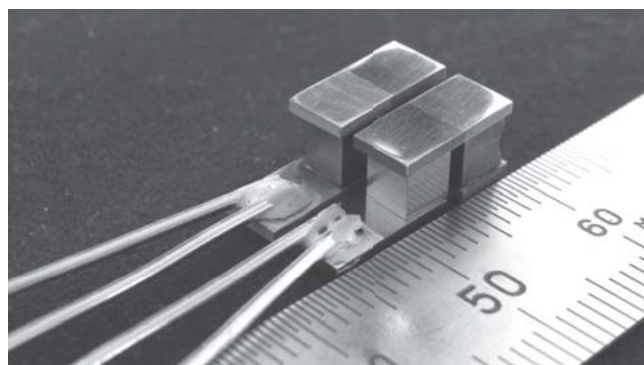


図4 | $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{SiGe}$ ハイブリッド型モジュール

出力は1,000 mW/cm², 温度差は620°C (高温側650°C, 低温側30°C) である。

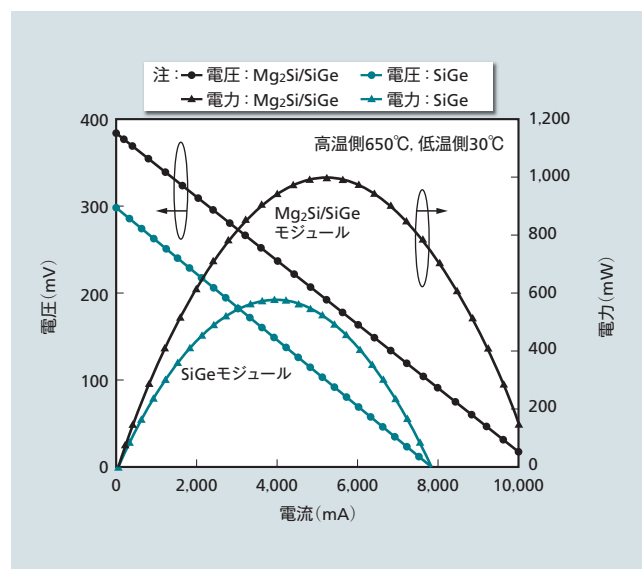


図5 | 2対モジュールの電流電圧特性

n型 Mg_2Si 素子とp型SiGe素子とを組み合わせたハイブリッド型モジュールと、従来型SiGeモジュールの電流電圧特性を測定した結果、ハイブリッド型は、従来型SiGeモジュールに比べて1.7倍の電力が得られた。

活用できる熱電変換モジュールへの関心が高まっている。低温領域では、実用化に必要とされる材料性能指数 $ZT=1$ ($Z=S^2/\rho\kappa$, S :ゼーベック係数, ρ :比抵抗, κ :熱伝導率, T :温度)を示す物質はBiTe(テルル化ビスマス)などの有毒・レアメタル元素で構成されるものが多く、高コストなため普及の障害要因の1つになっている。一方、まだ ZT は小さいが、無毒でレアメタルを使用しない鉄系フルホイスラー合金がある⁸⁾。ここでは、革新的熱電変換材料として着目しているフルホイスラー合金の性能向上の検討について述べる。

鉄系フルホイスラー合金は Fe_2XY (Fe:鉄)で表記され、体心立方格子を基本に各元素が規則化したL2₁構造をとることによって熱電性能を発揮する[図6(a)参照]。 ZT 向上の課題は、 κ の低減と S の増大である。 κ の低減には、結晶粒の微細化など、系の低次元化によるフォノン散乱の増大が有効であると言われている。日立グループは、バルク材料で報告のあるp型 Fe_2VAl を薄膜化によって低次元化し、 κ の低減を試みた。薄膜は、10⁻⁷Paの超高真空雰囲気

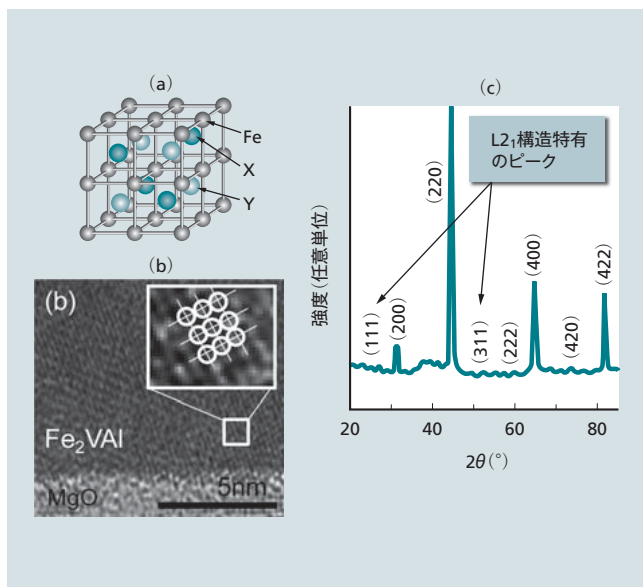


図6 鉄系フルホイスラー合金の性能向上の検討

フルホイスラー合金構造を(a)に、 Fe_2VAl 薄膜の断面電子顕微鏡写真を(b)に、X線回折パターンを(c)にそれぞれ示す。フルホイスラー合金は、各元素が規則化した結晶構造を持つ。スパッタリング法とポストアニールを適用し、 L_{21} 規則構造を持つ Fe_2VAl 薄膜を実現した。

を有するスパッタリング装置を用いて SiO_2 基板上に作製した。また、 L_{21} 構造を実現するために MgO （酸化マグネシウム）シード層を適用し、製膜後 800°C の熱処理を行った。 200 nm 厚の Fe_2VAl 薄膜の断面電子顕微鏡写真とX線回折パターンを同図(b), (c)に示す。この結果は、 Fe_2VAl 薄膜が L_{21} 構造を有することを示している。一方、 300 K において $S=60\text{ }\mu\text{V/K}$ 、 $\rho=3.1\text{ }\mu\Omega\text{ m}$ 、 $\kappa=4.4\text{ W/Km}$ を示し、 $ZT=0.08$ となった。この κ は、バルクの報告値 26 W/Km の $\frac{1}{3}$ であることが分かり、系の低次元化が κ 低減に有効であることを見いだした⁹⁾。

次に、第一原理計算を使ってゼーベック係数の大きなフ

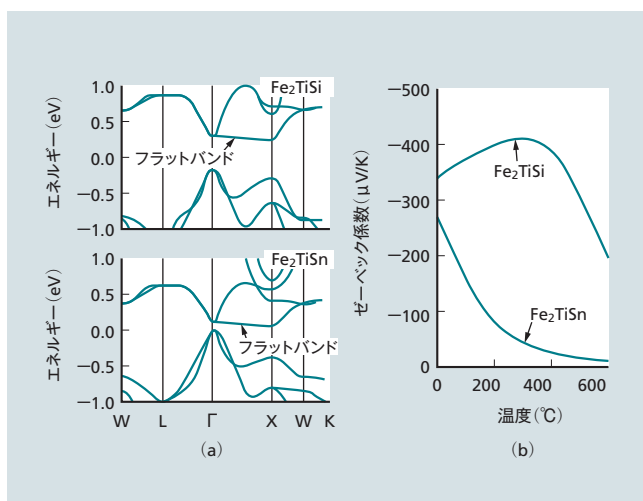


図7 フルホイスラー合金におけるゼーベック係数向上

Fe_2TiSi と Fe_2TiSn の電子状態を(a)に、ゼーベック係数の計算結果を(b)にそれぞれ示す。第一原理計算とボルツマン方程式を用いて、ゼーベック係数を飛躍的に増加できる可能性のあるフルホイスラー合金 Fe_2TiSi と Fe_2TiSn を提案した。

ルホイスラー合金の探索を行った。ゼーベック係数向上を期待できるn型の Fe_2TiSi および Fe_2TiSn の電子状態と S の温度依存の計算結果を図7に示す。両材料ともに Γ -Xラインに S を増大できる特徴的なフラットバンドを持ち、特に Fe_2TiSi ではフルホイスラー合金群で実験的に得られている最大 $S=-160\text{ }\mu\text{V/K}$ を大きく上回る $-400\text{ }\mu\text{V/K}$ のゼーベック係数を得る可能性があることが分かった。これは $ZT=1$ のポテンシャルを示し、 BiTe を代替可能な革新的材料の1つとして期待される¹⁰⁾。

3.3 塗布型ガラス熱電変換材料

環境中に広く分散した熱源から電気エネルギーを効率よく回収するためには、熱電変換モジュールの大面積化や実装形状の自由度向上が有効である。それには、従来のバルク型モジュールに代わり、低コストプロセスで大面積化が可能な印刷プロセスによる塗布型の熱電変換モジュールが有望と考えられる。近年、印刷プロセスの適用が可能な熱電変換材料として、室温から 150°C までの温度域において最も優れた熱電変換性能を有するビスマス-テルル(Bi-Te)系金属間化合物と樹脂の複合材料が開発されている。しかし、熱電変換モジュールには、高温環境下で長期間継続して動作することが求められるが、有機材料では、材料の変質や熱電変換モジュールの形状変化に伴う特性劣化が懸念される。

そこで、有機材料に比べて耐環境性に優れ、低温焼成が可能であるとともに、熱電変換性能を有するバナジウム系ガラスを母材とする無機系熱電変換材料の開発を進めている。バナジウム系ガラスは、酸化バナジウムを主成分として、 P 、 Fe などの酸化物から構成され、軟化点が 400°C 以下の低融点ガラスである。電子のホッピング伝導が生じる半導体であり、ガラス自体から熱起電力が発生し、ガラス単体では Bi-Te 系熱電変換材料と同程度の熱起電力が得られることを実証している¹¹⁾。

今回、印刷プロセスの適用が可能な塗布型熱電変換材料として、バナジウム系ガラスと Bi-Te 系金属間化合物の複合材料を開発した¹²⁾。n型のバナジウム系ガラスと Bi_2Te_3 (n型)の複合体、および、p型のバナジウム系ガラスと $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ (p型)の複合体の無次元性能指数(ZT)は、室温から 300°C までの温度領域で共に約 0.2 であり、上述の有機系複合材料と同等以上の比較的高い値が得られた。さらに、印刷プロセスにより、これらの複合体から構成される膜厚 $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度の熱電変換モジュールを形成し、 100°C 以下の低温で出力電圧が得られることを実証している。しかし、今回適用した Bi-Te 系金属間化合物には希少な毒性の元素が用いられており、経済性や環境負荷の観点

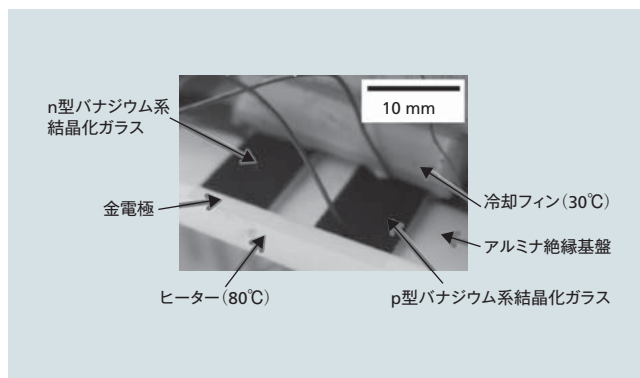


図8 | 作製した熱電変換モジュールとその熱電変換特性の評価系

バナジウム系ガラスから構成される塗布型熱電変換モジュールにおいて、温度差50℃（高温側：80℃）で約6 mVの出力電圧が得られた。

から、このような材料の使用を極力控えることが好ましい。

そこで次のステップとして、すべてバナジウム系ガラスから構成され、希少元素や毒性元素を一切使用しない低コストかつ低環境負荷な塗布型熱電変換材料の実現をめざし、バナジウム系ガラスの電気抵抗率の大幅低減と半導体極性制御を可能にする結晶化制御技術を開発している¹³⁾。印刷プロセスによってアルミナ絶縁基板上に膜厚40 μmのp型およびn型のバナジウム系結晶化ガラス膜を形成し、これらを金電極で電気的に接続して作製した熱電変換モジュールとその熱電変換特性の評価系を図8に示す。熱電変換モジュールの両端間の温度差を50℃（高温側：80℃）とした場合、約6 mVの出力電圧が得られ、他の研究機関に先駆けて、低コストかつ低環境負荷で、耐環境性に優れた塗布型熱電変換モジュールの動作確認に成功した。現在、エネルギーハーベスティングへの適用をめざし、さらなる熱電変換効率の向上に取り組んでいる。

4. おわりに

ここでは、再生可能エネルギー活用を支える革新材料として、太陽電池向け各種ペースト材と超高効率化を実現するシリコンナノ構造材料、および用途や使用環境に合わせて各種材料を用いた熱電変換モジュールに関する技術について述べた。

日立グループは、これらの材料をコアに、持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) T. Kato, et al. : A Crystalline Metallic Copper Network Application Film Produced by High-Temperature Atmospheric Sintering; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 2, No. 4, pp. 499-505 (2012.10)
- 2) 菅原：新エネルギー技術－太陽電池・燃料電池・二次電池・スーパーキャパシタ・風力発電－，第1章，日本理工出版会（2009.5）
- 3) 岡田：量子ドット太陽電池－「変換効率50%以上」を目指す，革新的太陽電池技術，工業調査会（2010.7）
- 4) K. Watanabe, et al. : Hybrid Nanopillar Array Structure for Broadband Antireflection, Proceedings of the 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Fukuoka, November 2011, 5C-50-07 (2011.11)

- 5) K. Watanabe, et al. : Si/Si1-xGex Nanopillar Superlattice Solar Cell: A Novel Nanostructured Solar Cell for Overcoming the Shockley-Queisser Limit, presented at the IEDM Tech. Dig., December 2011, p. 860 (2011.12)
- 6) 神戸，外：気密ケース入り熱電変換モジュールの開発および廃熱利用への適用，粉体および粉末冶金，58，6，367～373（2011.6）
- 7) 石井：自動車における環境・省エネ技術動向と粉末冶金技術の対応，日立化成テクニカルレポート，No.55，51～54（2013.1）
- 8) Y. Nishino, et al. : Effect of off-stoichiometry on the transport properties of the Heusler-type Fe₂VAl compound, Physical Review B, Vol. 63, No. 23, pp. 233303-1-233303-4 (2001.5)
- 9) 西出，外：フルホイスラーFe₂VAl薄膜の熱電変換特性，日本金属学会誌，第76巻，第9号，p.541～545（2012.9）
- 10) S. Yabuuchi, et al. : Large Seebeck Coefficients of Fe₂TiSn and Fe₂TiSi : First-Principles Study, Applied Physics Express, Vol. 6, No. 2, 025504 (2013.2)
- 11) T. Fujieda, et al. : Selective precipitation of high electrical conductivity crystals from vanadate glasses by microwave heating, AIP Advances, Vol. 2, Issue 2, 022164 (2012)
- 12) H. Takano, et al. : The 29th sensor symposium on sensors, micromachines and applied systems, SP2-10 (2012.10)
- 13) A. Matsuda, et al. : Mater. Res. Soc. Symp. (Z) (2013) (in press)

執筆者紹介



工藤 真

1990年日立製作所入社，中央研究所 エレクトロニクス研究センター 先端ストレージ研究部 所属
現在，情報ならびにエネルギーに関連する先端コンポーネントの開発に従事
博士（工学）
応用物理学会会員，電子情報通信学会会員



野尻 剛

1990年日立化成株式会社入社，新事業本部 筑波総合研究所 電池技術開発センター 所属
現在，電子材料およびエネルギー関連材料，特に太陽電池に関連する材料技術の開発に従事



加藤 隆彦

1982年日立製作所入社，日立研究所 材料研究センター 有機材料研究部 所属
現在，電子情報機器およびグリーンエネルギー機器を中心とした材料技術の開発に従事
博士（工学）
IEEE会員，IEEE CPMT会員，IEEE EDS会員，エレクトロニクス実装学会会員，日本金属学会会員



服部 孝司

1989年日立製作所入社，中央研究所 エレクトロニクス研究センター エネルギーエレクトロニクス研究部 所属
現在，電子デバイスの材料，プロセス開発に従事
博士（工学）
高分子学会会員



石島 善三

1987年日立粉末冶金株式会社入社，日立化成株式会社 自動車部品事業本部 粉末冶金事業部 粉末冶金開発部 所属
現在，熱電変換ならびに粉末冶金法に関する新材料・新製法の開発に従事
粉体粉末冶金協会会員，表面技術協会会員，軽金属学会会員



早川 純

1999年日立製作所入社，中央研究所 エレクトロニクス研究センター 先端ストレージ研究部 所属
現在，熱電変換材料・モジュールの研究開発に従事
博士（工学）
日本磁気学会会員，応用物理学会会員，日本熱電学会会員



藤枝 正

1995年日立製作所入社，日立研究所 材料研究センター 環境材料プロセス研究部 所属
現在，エネルギー変換デバイスの研究開発に従事
博士（工学）
応用物理学会会員