

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246120

研究課題名(和文)規則構造の格子欠陥制御に基づく環境フレンドリー熱電変換材料の高性能化

研究課題名(英文)Improvement of environment-friendly thermoelectric materials based on lattice defects control of ordered structures

研究代表者

木村 好里(KIMURA, Yoshisato)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90262295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円、(間接経費) 9,570,000円

研究成果の概要(和文)：未利用の熱を用いた温度差で発電できる熱電発電システムは温室効果ガス排出量削減と省エネルギー化に大きく貢献できる。実用化に十分な高性能、経済性、環境親和性を兼ね備えた熱電材料の創出を本研究の目的としてハーフホイスラー化合物に着目し、規則的な原子配列(規則構造)の乱れである種々の格子欠陥を積極的に制御して熱電性能を向上させる方法を考案した。その結果、電気特性と熱特性をバランスよく両立させることにより性能向上を達成できた。

研究成果の概要(英文)：Thermoelectric power generation system, that enables to generate electrical power by the temperature difference based on unused thermal power resources, can contribute greatly to the reduction of greenhouse gas emission and to the promotion of energy conservation. The objective of the present work is to fabricate thermoelectric materials that have high potential for the practical use, excellent cost performance and environment-friendly compositions. Interests of this work were focused on half-Heusler compounds to propose new and original approaches for improving thermoelectric properties by positively controlling several types of lattice defects, defects in ordered atomic arrangements (ordered structure). Consequently, the enhancement of thermoelectric performance of half-Heusler compound alloys was successfully achieved by controlling a good balance of electrical properties and thermal properties.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：熱電材料 格子欠陥制御 規則構造 相界面 相平衡 状態図 金属物性

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱電発電システムが果たせる役割

私たちの地球には再生可能エネルギーとして太陽熱や地熱など自然界の熱源、産業活動や一般生活から排出される未利用の廃熱など、様々な形態と規模の熱エネルギーが広範に分散して存在する。熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換するクリーンな「熱電発電」システムを社会に広く普及させることができれば、温室効果ガス排出量削減とエネルギー環境問題の解決に大きく貢献できる。熱量の大小に関係なく温度差に応じて発電できることが熱電発電の特徴である。熱が存在するその場所で熱源規模に合わせて発電する分散電源としてオンサイト発電に向いている。2011年の震災以降、発電方法の在り方が議論されているが、原子力や火力など大規模発電を太陽光発電や熱電発電で置き換えようとする訳ではない。熱電材料の長い歴史において実用の実績を誇るのは Voyager など宇宙探査船に用いられている電源である。メンテナンスフリーで長期間の安定発電ができる熱電の長所が活かされる好例である。熱電発電の利点を発揮できる特殊用途に加えて、低温から高温まで大小様々なアプリケーションへの適用が期待されている。

(2) ハーフホイスラー型化合物の選択

熱電発電システムを広く一般社会で実用化するためには、解決すべき課題がたくさんある。熱電材料の性能とモジュールの変換効率の飛躍的な改善が一番の鍵である。実用熱電材料の中で最も優れた性能を発揮するのは Bi-Te 系化合物である。融点が 600 以下であることから稼働温度が室温 ~ 300 程度に限られ、有毒かつ高価な元素を含む。廃熱を電気エネルギーとして回収するためには、500 ~ 800 の高温域で使用できる熱電材料の開発が待たれている。さらに経済性と安全性の観点からは、有害元素と希少元素に頼らない材料設計が要求される。本研究では、自動車など移動体への適用、集光太陽熱の利用などを想定して 500 ~ 800 の温度域で発電できる熱電材料としてハーフホイスラー型化合物を選択した。熱電材料として期待される代表的なハーフホイスラー型化合物は TiNiSn であり、元素戦略に適った材料設計が可能である。これは ZrNiSn や HfNiSn と同様に優れた n 型の熱電特性を示す。後に詳述するように、空孔サイトに着目した規則構造の格子欠陥制御を性能向上のための材料設計として行えることも選択の理由である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的

廃熱を電気エネルギーに直接変換する高温用の熱電材料としてハーフホイスラー型化合物を選択して、低環境負荷元素に立脚した材料設計を構築すること、規則構造の格子欠陥に基づく組織制御により熱電特性を改善することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) ハーフホイスラー型規則構造における格子欠陥制御の考え方

ハーフホイスラー型とホイスラー型の規則構造を図 1 に示す。ハーフホイスラー型 TiNiSn はホイスラー型 TiNi₂Sn の規則構造における Ni サイトの半分を空孔で置き換えた規則構造である。一般にホイスラー型は bcc 副格子で規則性を捉えるが、ハーフホイスラー型では A、B、X、空孔の 4 つの fcc 副格子で考え、A 原子と X 原子、および B 原子と空孔それぞれの組み合わせは NaCl 型副格子として見なすことができ化学的相互作用が大きい。格子点の 1/4 を占める空孔がハーフホイスラーの特徴であり、絶対零度においては、ハーフホイスラー型 ABX とホイスラー型 AB₂X は安定相として存在する。Ti-Ni-Sn 3 元系では、有限の温度であっても、空孔に Anti サイト原子として Ni はあまり固溶しない。合金系によっては、高温で B 原子と空孔がランダムに配置し、冷却により B 原子と空孔が規則化することが報告されている。

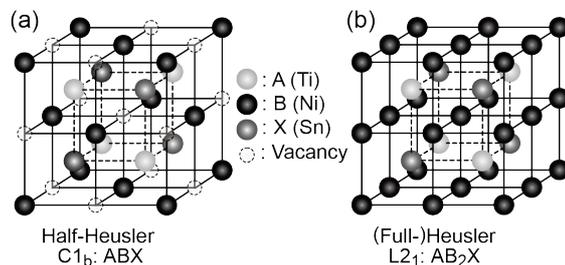


図 1 ハーフホイスラー型およびホイスラー型規則構造の単位包

熱電特性を向上させるために制御しうるハーフホイスラー型規則構造の格子欠陥として、まず空孔サイト固溶置換がある。研究代表者の事前研究において、n 型の優れた熱電特性を有する ZrNiSn の空孔サイトに Co および Ir を選択的に固溶置換することで熱電特性を p 型に変換でき、同時に格子熱伝導率が大きく低減できることを見出している。本研究では環境親和性に優れた TiNiSn に Co を添加した系に着目し、相平衡と熱電特性の関係を調べることにした。また広い意味で規則構造に関する格子欠陥を捉え、本研究では Ni と空孔サイト間の非化学量論組成に関連するクラスタリング傾向、ハーフホイスラー同士の相分離で導入される相界面に着目した。

(2) 試料作製法

ハーフホイスラー型化合物は 3 元包晶反応により生成することが多く、平衡するホイスラー型化合物等の不純物相が共存しやすいため単相合金の作製は難しい。包晶反応であっても原理的に単相・単結晶が作製できる方法として、組成トラベルを適用した光学式浮遊帯域溶融法による一方向凝固法 (OFZ-DS 法) を用いた。さらに TiNiSn 合金の作製には、TiNi 化合物固相と Sn 液相からな

る拡散対の固液界面における結晶成長を利用した。いずれの場合も、種々の組成に調整した合金をアルゴン雰囲気下におけるアーク溶解法で作製して母合金とした。

(3) 組織観察と相平衡

作製した合金にはそれぞれの目的に応じた熱処理を施して組織観察を行った。走査電子顕微鏡(SEM)の背面反射電子組成像(BEI)、透過電子顕微鏡(TEM)の明視野像(BFI)、暗視野像(DFI)、高分解能(HRTEM)格子像による観察および解析を駆使した。化学組成分析に波長分散型 X 線分光(EPMA-WDS)、結晶構造解析と格子定数測定に X 線回折(XRD)を用いて相平衡を調べた。

(4) 熱電特性の測定評価

熱電材料の特性は性能指数 $Z = (S^2 \sigma / \kappa)$ 、その両辺に T を乗じて無次元化した ZT で評価され、ゼーベック係数 S と電気伝導率 σ (逆数が電気抵抗率 ρ) を増大し熱伝導率 κ を低減させて Z を向上する。独立に制御できない S 、 σ 、 κ を高次元でバランスさせることが性能向上において重要である。本研究では室温から 1073K の温度範囲で熱電特性の測定を行って性能を評価した。Seebeck 係数は定常法により R-type 熱電対プローブ間の温度差を 5、10、20K として測定し、同時に電気抵抗率を四端子法で測定した。熱拡散率と比熱をレーザーフラッシュ法で測定し、熱伝導率を算出した。より正確な比熱の値を示差走査熱分析(DSC)によって測定した。

4. 研究成果

(1) ハーフホイスラー型規則構造の空孔サイト固溶による相安定性と熱電特性

ZrNiSn の空孔サイトに Co および Ir を固溶させて熱電特性を n 型から p 型に遷移させた代表者による事前研究に基づき、TiNiSn に対する Co 添加に同様の傾向が期待できるかどうかを調べた。Zr-Ni-Sn 系と Ti-Ni-Sn 系の相平衡は類似しており、ハーフホイスラー相とホイスラー相はどちらも化学量論組成からの組成幅が狭い相として平衡して共存する。対照的に、Zr-Co-Sn 系にはハーフホイスラー相は安定相として存在せず、Ti-Co-Sn 系ではハーフホイスラー相とホイスラー相が連続固溶体相として報告されている。以上から TiNiSn の空孔サイトには Co が容易に固溶置換することが期待される。空孔サイトに Co が置換することを仮定して $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co})_{1+x}\text{Sn}$ を公称組成とする合金をアーク溶解により作製し、ハーフホイスラー相とホイスラー相の化学分析を行った。その結果を表 1 に示す。Co 添加量 x の増加に伴って Ni+Co 濃度が増大する傾向にあり、組織観察と相同定の結果と合わせると、 $x=0.5$ まではハーフホイスラーとホイスラーの二相組織、それ以上ではホイスラー単相の組織が形成されることが分かった。相同定に用いた XRD プロファイルの(220)回折ピーク付近と格子定数の Co 濃度

表 1 公称組成 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co})_{1+x}\text{Sn}$ 合金のハーフホイスラー/ホイスラー相の化学組成

Co 添加量 x (at%)	Ti	Ni	Co	Sn	Ni+Co	Ni+Co 濃度
0(0)	32.6	36.8	-	30.6	36.8	
0.1(3.2)	31.4	33.2	3.6	31.9	36.8	↓ 増大
0.25(7.7)	30.8	31.7	8.2	29.3	39.9	
0.4(11.8)	29.5	29.3	12.8	28.4	42.1	
0.5(14.3)	27.9	30.8	14.9	26.5	45.6	
0.55(15.5)	28.4	28.2	17.1	26.3	45.3	
0.7(19.0)	28.2	24.7	21.3	25.8	46.0	FH 単相
1.0 (25.0)	28.0	20.3	26.1	25.6	46.4	

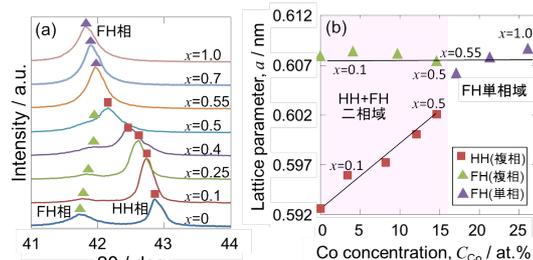


図 2 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co})_{1+x}\text{Sn}$ 合金の(a) XRD プロファイル(220)回折ピーク付近、(b) 格子定数の Co 濃度依存性と相構成。

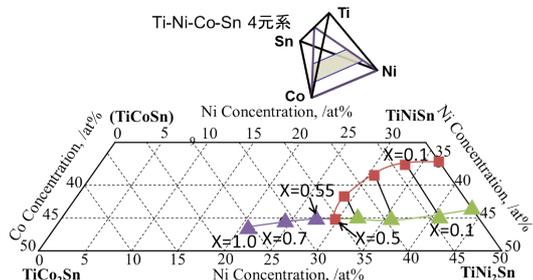


図 3 Ti-Ni-Co-Sn 4 元系の等濃度相領域図。

依存性を図 2 に示す。これらの結果に基づく相平衡を図 3 の等濃度断面に表す。

TiNiSn 空孔サイトの Co 固溶が熱電特性に及ぼす影響を理解するため $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co}_{0.25})\text{Sn}$ 合金の熱電特性を調べた。結果の例としてゼーベック係数の温度依存性を図 4(a)に示す。 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co}_{0.25})\text{Sn}$ を公称組成として OFZ-DS 法で単相合金の作製を試みた結果、初晶のホイスラー相 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co})_2\text{Sn}$ が回避できず多相組織となった。組成を 8.2 at.% Sn-rich 側にとると、ホイスラー相を回避できる代わりに Sn 相が共存する組織となる(図 4(b))。金属相であるホイスラー相はゼーベック係数を低減させる効果が大きいため、Sn と共存する組織を選択した。図 4 では過去に固液反応焼結で作製した試料と比較してある。Sn の融点である 505K 付近にゼーベック係数の不連続が観察されるが、測定した温度範囲で p 型特性を示すことを見いだした。性能向上には組織の改善が必要であるが、p 型特性に制御する可能性を示すことができた。第 9 族の Co は第 10 族の Ni に対して p 型ドーパントとして働くことから熱電特性が p 型に遷移すると考えられるが、空孔サイトを Co 原子が固溶することによるエネルギーバンド構造の変化がゼーベック係数に大きな影響を及ぼすことも熱電特性が遷移する原因であると考え

られる。狭いバンドギャップがハーフホイスラー型化合物の特徴であり、状態密度とフェルミ準位の相対的な位置関係の変化に伴い熱電特性は大きく遷移すると考えられる。

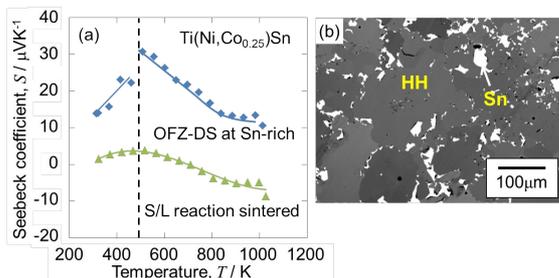


図4 Sn-rich 組成で OFZ-DS 法により作製した $\text{Ti}(\text{Ni},\text{Co}_{0.25})\text{Sn}$ 合金の(a)ゼーベック係数の温度依存性と(b)組織

(2) Ni サイト - 空孔サイト間の非化学量論組成と相安定性

OFZ-DS 法でハーフホイスラー単相合金を作製するとき、数 at.% 程度の Ni を過飽和に固溶した状態でハーフホイスラー相が成長することがある。Ni-rich 組成のハーフホイスラー相が成長した $(\text{Zr}_{0.7},\text{Ti}_{0.2},\text{Nb}_{0.1})\text{NiSn}$ 合金に対して室温 ~ 1073K の温度範囲でゼーベック係数を測定し、熱履歴に対応させて TEM による組織観察を行った。図 5(a) は 4 回 (#1~#4) 繰り返し測定を行ったゼーベック係数の温度依存性である。最初の測定 #1 は OFZ-DS as-grown 組織に対して行っており、測定のための昇温が熱処理となっている。室温から 700K 付近までは優れた n 型ゼーベック係数の値として $-250\mu\text{V/K}$ 程度を示しているが、700K から温度の上昇に伴って絶対値が小さくなる。このゼーベック係数の変化に対応する組織観察結果が図 5(b,c) である。図 5(b) の BFI では as-grown の状態で Ni 過飽和のハーフホイスラー母相からホイスラー相ナノ粒子が析出を開始した初期状態が観察できる。これは析出粒子ではなくクラスターのような状態に近い構造であると考えられる。研究代表者の過去の実験結果では、例えば HRTEM の格子像観察において ZrNiSn の化学量論組成に近い単相合金と同様のクラスタリング傾向が観察されている。図 5(c) の BFI は 873K における 3.5h の熱処理によってナノ粒子が円盤状に成長して体積率が增大する様子を観察した結果である。ホイスラー相は金属相であるため、ゼーベック係数の値は著しく低下し、同時にキャリア熱伝導率は大きくなるため、熱電性能は損なわれる。

#1 の測定後、同一試料で同一の温度プロファイルによるゼーベック係数の測定を昇温時に行った結果が #2 および #3 である。測定開始時点で図 5(c) のようにホイスラー相が析出した組織であるため、室温付近でのゼーベック係数は $-170\mu\text{V/K}$ 程度であり、#1 に比べて絶対値が低くなっている。温度上昇に伴い 850K 以上の温度では #2-3 は #1 の温度依存性と一致する。ここで析出したホイスラー相の

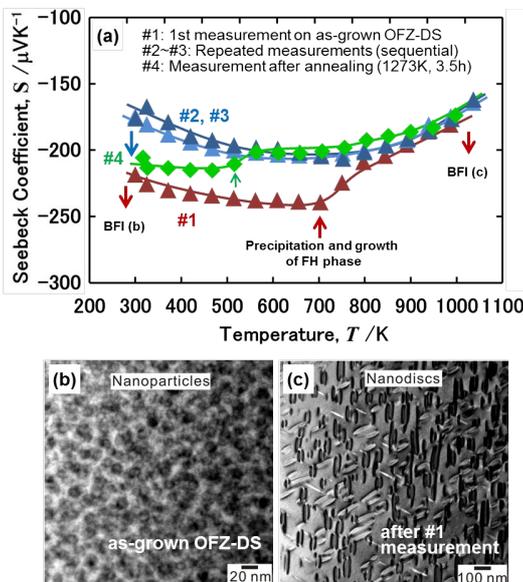


図5 $(\text{Zr}_{0.7},\text{Ti}_{0.2},\text{Nb}_{0.1})\text{NiSn}$ 合金を OFZ-DS 法で作製して繰り返し測定を行った (a) ゼーベック係数の温度依存性 および TEM-BFI; (b) as-grown 組織、(c) 873K で 3.5h の熱処理を行った組織 (#1 測定後と同等)

一部をハーフホイスラー母相に再固溶させることを狙って #3 測定後の試料に 1273K で 3.5h の熱処理を施し、#4 の測定を同一温度プロファイルで行った。測定開始時点でのゼーベック係数の値は #1 に近いことから、ホイスラー相が再固溶して体積率が減少していると考えられる。その後の温度上昇に伴って再析出が起こり、最終的には 850K 以上における温度依存性は #1 ~ #4 で一致している。ただし #1 における as-grown からの析出に比べて、#4 の再析出は低い温度 520K 付近で開始しており、再固溶からの析出は活性化エネルギーのバリアが低いことが考えられる。

OFZ-DS 法はハーフホイスラー型化合物のバルクとしての単相合金作製が可能な方法として有用であるが、その反面で Ni-rich 組成になってナノからマイクロでのホイスラー相の析出と熱電特性の低下が不可避となる欠点を併せ持つ。そこで研究代表者が以前に確立した固液反応法に基づき TiNi 化合物固相と Sn 液相の界面に TiNiSn 単結晶ファセットを生成させる手法で TiNiSn 相の作製を行い、OFZ-DS 法で作製した TiNiSn 相と比較した。表 2 に比較の結果として定量分析した化学組成と XRD プロファイルから精密化した格子定数を示す。ここでは TiNiSn の化学量論組成を公称組成とする合金を用いて OFZ-DS 法を行っているが、ハーフホイスラー TiNiSn 相はホイスラー TiNi_2Sn 相と共存しており、約 2at.% Ni-rich の組成を有する。一方、固液反応法では、ほぼ化学量論組成に近い TiNiSn 相を生成できることが分かる。格子定数の差は 0.001nm 程度と小さいが有意差として考えられると判断した。HRTEM の格子像を観察して比較すると、Ni-rich の OFZ-DS 材では TiNiSn 中に TiNi_2Sn のクラスターのようなナノ構造が観察されるが、さら

に細かいランダムな欠陥のような存在が固液反応材では確認できる。化学量論組成であっても有限温度では、ゆらぎや熱振動の効果によって TiNiSn の空孔に Ni 原子が、逆に Ni サイトの欠損として空孔が点欠陥としてある程度の平衡濃度で含まれると研究代表者は考えている。

表 2 作製手法の違いによるハーフホイスラー TiNiSn 相の比較

作製法	化学組成 (at.%)			格子定数 (nm)
	Ti	Ni	Sn	
固液反応法	33.5	33.1	33.4	0.5928
OFZ-DS法	32.7	35.3	32.0	0.5939

(3) ハーフホイスラー型化合物の相分離による相界面制御と熱電特性

一般に金属間化合物の合金設計において、添加元素による固溶置換を利用する場合、優先置換サイトを理解することが重要となる。同じ結晶構造の化合物相が存在する合金系では有限温度範囲で互いに連続固溶体を形成することが多い。しかし格子定数の差に起因する弾性エネルギーに関するサイズ効果が顕著である場合、両化合物の組成位置の間に別の化合物が安定に存在する場合など、同じ結晶構造であっても連続固溶体を形成しないケースも多く観察される。ハーフホイスラー MNiSn (M=Ti,Zr,Hf) 系では、ZrNiSn (格子定数 0.611nm) と HfNiSn (0.607nm) は連続固溶体を形成する一方で、格子定数が小さい TiNiSn (0.592nm) とは連続固溶体を形成しないことを研究代表者は過去の研究で明らかにしている。さらに、図 6 の三角組成図の模式的な相領域図に示すように、1273K 以上には溶解度ギャップが存在することを明らかにしており、M サイトが 3 つの同族元素 (Ti,Zr,Hf) でランダムに固溶された状態から TiNiSn と (Zr,Hf)NiSn に相分離する過程を利用した熱電特性の向上を狙う組織制御を考案している。本研究では TiNiSn - ZrNiSn 系に関して実験を行った。

公称組成 $(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{NiSn}$ の合金をアーク溶解法で作製して相平衡を調べ、 $(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{Ni}$ 固相と Sn 液相からなる拡散対から得られる情報と併せて相平衡の確認を行った。その結果を図 7 に示す。これに基づき熱電特性の測定評価を行う組成として $(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{NiSn}$ を選択し、OFZ-DS 法でハーフホイスラー合金を作製した。OFZ-DS as-grown 試料、これを溶解度ギャップ上のハーフホイスラー (HH) 単相域、続けて HH 二相域で熱処理を施した試料に対して行った SEM-BEI による組織観察と WDS による X 線組成 Map 測定の結果を図 8 に示す。OFZ-DS 法により初晶として ZrNiSn に Ti が固溶した Zr-rich のハーフホイスラーが dendritic 状に成長し、最終凝固部分に TiNiSn に Zr が固溶した Ti-rich のハーフホイスラーが形成することが分かる。HH 単相域の熱処理によって、dendritic 間に濃縮し

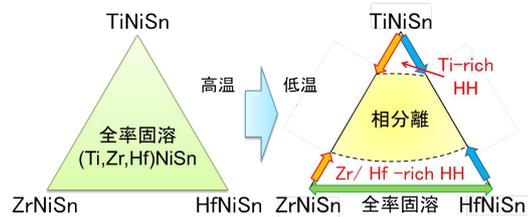


図 6 MNiSn (M=Ti,Zr,Hf) 系における相平衡を示す模式的な相領域図

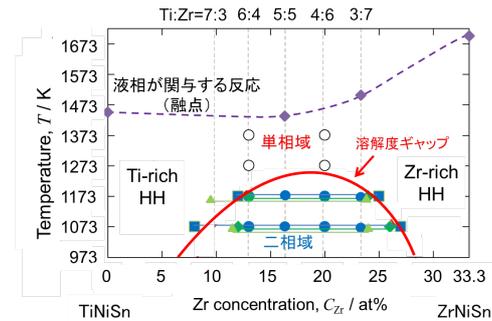


図 7 TiNiSn - ZrNiSn 系における相平衡の温度依存性と溶解度ギャップ。

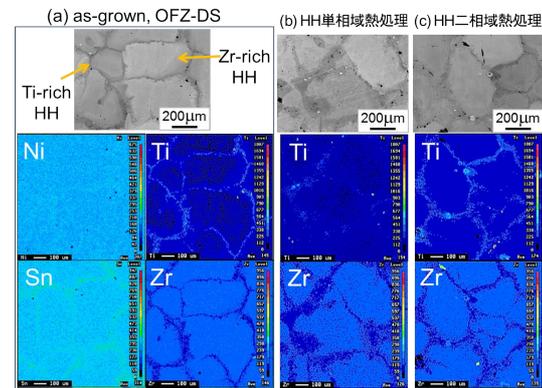


図 8 OFZ-DS 法で作製した $(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{NiSn}$ 合金の BEI 組織観察結果と X 線組成 Map。

ている Ti の分布は均質になって偏析が解消されるが、デンドライト内部で高い Zr 濃度は Ti の均質化により相対的に低くなる程度である。Ti に比べて Zr の拡散が遅いこと、最終凝固の偏析部分にわざわざ Zr は拡散しないことが理由として考えられる。HH 二相域の熱処理では Zr-rich と Ti-rich のハーフホイスラーの相分離が進行し、X 線 Map では Zr と Ti の分布は元の状態に近く見える。実際にはデンドライト内でも相分離組織が形成すると考えられ、TEM による組織観察を行ったが、いわゆるスピノーダル分解の変調構造のような明瞭な相界面は観察されず、界面を横切って Zr と Ti の濃度が顕著に入れ替わる箇所が局所的に観察された。ハーフホイスラー同士の相分離の界面形態を理解するためには今後の追加実験が必要である。

これら合金に対して熱電特性を測定した。図 9 にゼーベック効果と電気伝導率、熱伝導率 ZT の温度依存性を掲載する。ゼーベック係数と電気抵抗率は熱処理による組織の違いによらず概して同じ傾向を示し、単相域の試料が最も優れた電氣的な特性を示す。同じハーフホイスラー同士の相界面は電氣的特

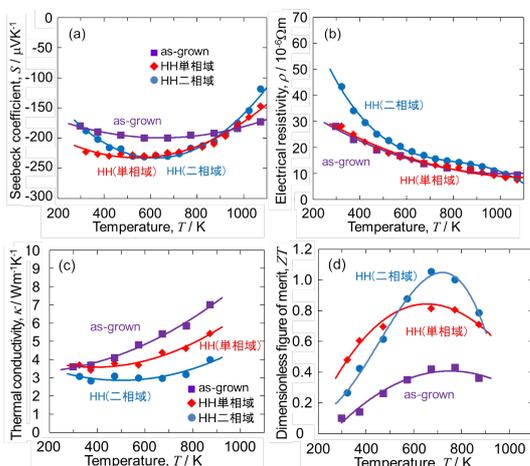


図9 OFZ-DS法で作製した $(\text{Ti}_{0.5}, \text{Zr}_{0.5})\text{NiSn}$ 合金の(a)ゼーベック係数、(b)電気抵抗率、(c)熱伝導率、(d)ZTの温度依存性

性を低減しない利点を持つと考えられる。対照的に熱伝導率では as-grown、二相域、单相域の順番で低減効果が顕著に観察されており、相分離界面が有効であることが示唆される。单相域の熱処理であっても Ti と Zr が互いに固溶置換する固溶体効果が有効に働くことで低い熱伝導率が実現できる。ZT による総合的な評価では、優れた電気特性と低い熱伝導率がバランスよく両立できる二相域熱処理の試料において、 $ZT > 1$ という実用の目安を越える高性能を達成することができた。本研究で予想したように、ハーフホイスラー相同士の相分離界面を利用した組織制御は熱電性能の向上に効果があることを示唆でき、今後の熱電材料設計指針として活かすことができる。ハーフホイスラー化合物合金で $ZT > 1$ を達成した報告例は過去に国内外でいくつか散見されるが、規則構造の空孔サイト固溶、ハーフホイスラー同士の相分離界面に着目した例はなく、本研究オリジナルのインパクトが大きい成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)
(投稿準備中)

〔学会発表〕(計 10 件)

森亮太, 木村好里, 溶解凝固法および固液反応による Half-Heusler 型 TiNiSn の組織形成, 日本金属学会・グリーンエネルギー材料のマルチスケール創製研究会, ホテル松竜園海星, 上天草, 2014 年 1 月 8 日.

森亮太, 木村好里, 固相液相反応を利用した TiNiSn 単結晶の作製, 日本金属学会春期講演大会, 金沢大学, 金沢, 2013 年 9 月 19 日.

板垣貴彦, 木村好里, Half-Heusler 型 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Co})\text{Sn}$ 系の結晶構造と相安定性, 日本金属学会春期講演大会, 金沢大学, 金沢, 2013

年 9 月 17 日.

内田幸宏, 木村好里, Chai Yaw-Wang, Half-Heusler 型熱電材料 $(\text{Zr}, \text{Ti})\text{NiSn}$ の相平衡, 日本金属学会春期講演大会, 金沢大学, 金沢, 2013 年 9 月 17 日.

内田幸宏, 木村好里, Chai Yaw-Wang, Half-Heusler 型 $(\text{Zr}, \text{Ti})\text{NiSn}$ の相平衡と熱電材料設計, 日本熱電学会学術講演会(TSJ2013), 名古屋大学, 名古屋, 2013 年 9 月 8 日 - 9 日 (Poster).

Yoshisato Kimura, Thermoelectric Material Design of Half-Heusler $(\text{Zr}, \text{Ti})\text{NiSn}$ -based Alloys Focusing on Reduction of Thermal Conductivity, PRICM 8, Waikoloa HI, USA, August 6, 2013.

鬼木俊範, 木村好里, Chai Yaw-Wang, Half-Heusler 型 $(\text{Zr}, \text{Ti})\text{NiSn}$ 単相合金の熱電特性制御, 日本金属学会春期講演大会, 東京理科大学神楽坂キャンパス, 東京, 2013 年 3 月 29 日.

木村好里, 基調講演, マルチスケール構造制御による熱電材料設計と作製プロセス, 日本金属学会春期講演大会, 東京理科大学神楽坂キャンパス, 東京, 2013 年 3 月 27 日.

木村好里, 田所准, Chai Yaw-Wang, Half-Heusler の相分離過程による組織制御と熱電材料設計, 日本金属学会秋期講演大会, 愛媛大学, 松山, 2012 年 9 月 17 日.

Chai Yaw-Wang, 木村好里, 三島良直, Ni-rich nano particles lattice defects in Half-Heusler TiNiSn compounds, 日本金属学会秋期講演大会, 沖縄コンベンションセンター・カルチャーリゾートフェストーン, 沖縄, 2011 年 11 月 7 日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 好里 (KIMURA, Yoshisato)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・
准教授
研究者番号: 9 0 2 6 2 2 9 5

(2) 研究分担者

チャイ ヤウワン (CHAI, Yaw-Wang)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・
特任助教
研究者番号: 8 0 4 5 5 9 2 2