

# 非対角熱電効果を用いた熱電トランスデューサ

Thermoelectric Transducer via Off-Diagonal Thermoelectric Effect

菅野 勉  
Tsutomu Kanno

高橋 宏平  
Kouhei Takahashi

酒井 章裕  
Akihiro Sakai

足立 秀明  
Hideaki Adachi

山田 由佳  
Yuka Yamada

## 要 旨

熱を直接電気エネルギーに変換する熱電変換技術の研究が近年広く進められている。筆者らは、ビスマス (Bi) / 銅 (Cu) からなる傾斜積層体および層状酸化物Ca<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>薄膜において観測される、非対角熱電効果と呼ばれる特異な現象について検討を行った。Bi/Cu傾斜積層体においては構成材料であるBiの1.5倍の熱電変換のパワーファクターを、Ca<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>薄膜では600 mV/Kの検出感度を実現できることを実験により確認した。非対角熱電効果を利用することにより、低温廃熱からの高出力発電や高感度の光検出が実現できる可能性がある。

## Abstract

In recent years, thermoelectricity has been extensively studied for direct energy conversion from heat to electricity. We investigated a novel phenomenon called "off-diagonal thermoelectric effect" in tilted Bi/Cu multilayer and layered-oxide Ca<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> thin film. We experimentally confirmed that the thermoelectric power factor can be enhanced in a tilted Bi/Cu multilayer by a factor of 1.5 compared with constituent Bi, and in Ca<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> thin film, high radiation sensitivity of 600 mV/K was confirmed. Off-diagonal thermoelectric effects have the potential to realize high-output generation from low-grade waste heat and highly sensitive detection of radiation.

## 1. はじめに

車・工場・家庭など至る所で排出されている未利用廃熱の大部分は200 以下のいわゆる低品位廃熱で、蒸気、排気、温水などの形態で有効に活用されないまま大量に捨てられている。このような未利用廃熱を回収する技術の一つとして、熱電変換技術が近年注目されている<sup>1)</sup>。

熱から電気エネルギーへの変換はゼーベック効果に基づいている<sup>2)</sup>。熱電材料中に温度勾配  $T$  [K/m]が存在すると、それに伴い電界

$$E = S(-\nabla T) \quad [\text{V/m}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

が生じる。この比例係数  $S$  [V/K]をゼーベック係数という。このほかに熱電変換の材料性能にかかわるのは、電気抵抗率  $\rho$  [m], 熱伝導率  $\kappa$  [W/m K]である。これらと動作温度  $T$  [K]を組み合わせ

$$ZT = \frac{S^2}{\rho\kappa} T \quad \dots\dots\dots (2)$$

は熱電材料の無次元性能指数と呼ばれ、以下の関係のように  $ZT$  が大きくなるほど熱電変換効率  $\eta$  が向上するので材料開発においては重要な指標とされている。

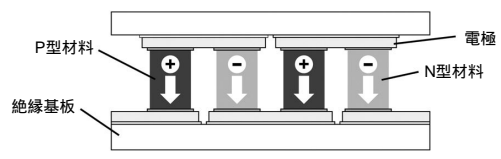
$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $T_H$  [K]は高温部の温度、 $T_C$  [K]は低温部の温度である。また

$$PF = \frac{S^2}{\rho} \quad [\text{W/m K}^2] \quad \dots\dots\dots (4)$$

は熱電材料のパワーファクターといい、単位温度差当たりの発電電力に対応している。現在、 $ZT$ および $PF$ が室温付近において最も優れているのはBi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>系の材料であり、それぞれ $ZT \sim 1$ 、 $PF \sim 40 \mu\text{W/cm K}^2$ である。

第1図に、従来から用いられている熱電デバイスの最もポピュラーな構成を示す。互いにキャリアの極性が異なるP型とN型の熱電材料を交互に並べ、電極接合を介して電氣的に直列、かつ熱的に並列になるよう構成されている。このデバイスにおいて高温側から低温側へと熱流に伴いキャリアが拡散するが、キャリアの極性が異なる材料が交互に配置されているため、負荷を接続するなど閉回路にした場合には電流が一定の方向に流れて、電力を取り出すことができる。このデバイス構成はゼーベック



第1図 従来の熱電デバイスの構成  
Fig. 1 Conventional configuration of thermoelectric devices

係数がわずかに数百  $\mu\text{V/K}$  の熱電材料においても数Vオーダーの実用的な電圧を得ることができる点で優れている。一方、熱電変換の発電電力  $P$  [W] は変換効率と入熱量  $J_Q$  [W] を用いて  $P = J_Q$  と表されるが、第1図のデバイス構成では熱流が貫く全面に電極接合が配置されるため、接合熱抵抗などにより熱流  $J_Q$  が阻害され、結果として十分な電力  $P$  が得られないという問題も併せもっている。このような電極配置をとらざるを得ない理由は、用いる熱電材料のゼーベック係数が方向依存性をもたず、生じる電界の向きが常に熱流と平行になるためである。ここで熱電変換によって生じる電界の向きが熱流の方向と異なるようなことができれば、熱の流れを妨げないような構成で電極を配置し、多くの熱を流すことで大きな電力が得られると考えられる。この実現手段として後述する非対角熱電効果を検討した。

以下、第2章において非対角熱電効果の一般的な特徴を説明し、その具体例として第3章でBi/Cu傾斜積層体を用いた高出力の発電の可能性について議論し、第4章で層状酸化銅  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$  を用いた高感度の熱線検出について述べる。

## 2. 非対角熱電効果

多くの熱電デバイスで用いられる熱電材料はさまざまな方向を向いた多数の小さな結晶粒を固めてきた多結晶で、ゼーベック係数は方向依存性がなく等方的である。一方、層状の結晶構造を有する材料の単結晶などにおいては、特性に方向依存性が存在する。この場合、材料に「異方性がある」と言い、ゼーベック係数は行列で表現されるようなテンソルとなる。異方性材料では、このゼーベックテンソルを介して(1)式と同様の関係で熱流から電界への変換がなされるため、一般的にこれら熱流と電流の向きは互いに異なる。

例として層状の異方性材料を考える。互いに直交する層平行方向(//)と層垂直方向( $\perp$ )に基底ベクトルをとった場合のゼーベックテンソルは

$$S = \begin{pmatrix} S_{//} & 0 \\ 0 & S_{\perp} \end{pmatrix}, S_{//} \neq S_{\perp} \dots\dots\dots (5)$$

のように表される。この時点でゼーベックテンソルの非対角項は0である。

この材料を第2図(a)のように、層状構造となす角が  $\alpha$  となるよう、長さ  $l$ 、厚さ  $d$  の長方形に切り出したものが非対角熱電素子である。各辺の向きをそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸とし、 $y$  軸方向の厚さ  $d$  に渡って温度差  $T$  を加えたときに、素子の  $x$  軸方向における両端の間に生じる起電圧

を  $V_x$  とする。入出力の向きである  $x$  軸および  $y$  軸に沿ってゼーベックテンソルを書き直した場合、その非対角項は  $S_{xy} = 1/2 (S_{//} - S_{\perp}) \sin 2\alpha$  という有限の値をとる。ここで(1)式を用いて起電圧を求めると、

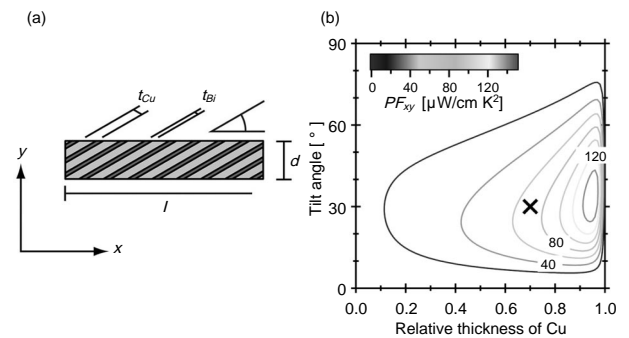
$$\Delta V_x = \int_{-l/2}^{l/2} E_x dx = -\frac{l\Delta T}{2d} (S_{//} - S_{\perp}) \sin 2\alpha \dots\dots\dots (6)$$

となる。(6)式から、起電圧  $V_x$  を大きくするために以下の条件が必要となる。

- 材料のゼーベック係数の異方性 ( $S_{//} - S_{\perp}$ ) が大きい
- 温度差  $T$  が大きい
- 素子のアスペクト比  $l/d$  が大きい
- 角度  $\alpha$  が  $45^\circ$  に近い

非対角熱電効果による無次元性能指数およびパワーファクターは(2)式および(4)式を拡張して次のように定義される。

$$Z_{xy}T = \frac{S_{xy}^2}{\rho_{xx} K_{yy}} T, PF_{xy} = \frac{S_{xy}^2}{\rho_{xx}} \dots\dots\dots (7)$$



第2図 (a) 非対角熱電素子 (Bi/Cu傾斜積層体) の外形図と (b) Bi/Cu傾斜積層体の非対角パワーファクター

Fig. 2 (a) Schematic view of off-diagonal thermoelement (Bi/Cu tilted multilayer) and (b) off-diagonal thermoelectric power factor of tilted Bi/Cu multilayer

## 3. Bi/Cu傾斜積層体における非対角熱電効果

第2章で述べたように、非対角熱電効果によって大きな起電圧を得るためには材料異方性が大きいほど好ましい。しかし、単一材料で大きな異方性をもつものは少なく、かつ巨大な単結晶を作製することは技術的に困難である。大きな異方性を有する材料を簡便に実現する1つのアプローチとして、筆者らはBiとCuという2種類の材料を用いて人工的に構成された非対角熱電素子を作製し、その非対角熱電効果の検証を行った。

3.1 Bi/Cu積層体の巨大な異方性

今回用いたBiとCuは多結晶であり、それぞれの材料自体は等方的である。しかし、第2図(a)のように積層体とし等価回路を計算すると、積層体のマクロな熱電特性(ゼーベック係数  $S$ 、電気抵抗率、熱伝導率)は以下のように層平行方向(//)と層垂直方向(⊥)に関して異方的になる。

$$S_{//} = \frac{tS_{Cu} + (1-t)S_{Bi}}{\frac{\rho_{Cu}}{t} + \frac{\rho_{Bi}}{1-t}}, S_{\perp} = \frac{tS_{Cu} + (1-t)S_{Bi}}{\frac{\kappa_{Cu}}{t} + \frac{\kappa_{Bi}}{1-t}} \dots\dots (8)$$

$$\rho_{//} = \frac{1}{\frac{t}{\rho_{Cu}} + \frac{1-t}{\rho_{Bi}}}, \rho_{\perp} = t\rho_{Cu} + (1-t)\rho_{Bi} \dots\dots\dots (9)$$

$$\kappa_{\perp} = t\kappa_{Cu} + (1-t)\kappa_{Bi}, \kappa_{//} = \frac{1}{\frac{t}{\kappa_{Cu}} + \frac{1-t}{\kappa_{Bi}}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで  $t$  はCuの厚さの割合  $t_{Cu}/(t_{Bi}+t_{Cu})$  である。今回用いたBiとCuの熱電特性は、第1表に示すように互いに大きく異なっていて、 $S_{Bi} \gg S_{Cu}$ ,  $\rho_{Bi} \gg \rho_{Cu}$ ,  $\kappa_{Bi} \ll \kappa_{Cu}$  の関係がある。これにより、積層体の熱電特性に巨大な異方性が発現することとなる。

(7)式から(10)式を用いて第2図(a)のBi/Cu傾斜積層体における非対角熱電効果によるパワーファクター  $PF_{xy}$  を推算した。積層体中のCuの厚さの割合  $t$  および傾斜角度  $\theta$  を変数として  $PF_{xy}$  を示したのが、第2図(b)である。結果より  $\theta = 33^\circ$ ,  $t = 0.95$  の時に  $PF_{xy}$  は最大となり、 $155 \mu W/cm K^2$  もの値になる。これは構成材料であるBiのパワーファクター ( $34 \mu W/cm K^2$ ) の約4.6倍である。この  $PF_{xy}$  の増大については、Cuの割合が大きくなってもゼーベック係数  $S_{xy}$  の値は比較的維持されるのに対して、熱伝導率  $\kappa_{xy}$  が増大する代わりに電気抵抗率  $\rho_{xy}$  を減少させることができるというトレードオフの関係によるところが大きいと考えられる。

第1表 BiとCuの熱電特性

Table 1 Thermoelectric properties of Bi and Cu

材料	S		(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
	(μV K <sup>-1</sup> )	(μ cm)	
Bi	-75 <sup>a</sup>	165 <sup>a</sup>	7.87 <sup>b</sup>
Cu	1.83 <sup>c</sup>	1.725 <sup>b</sup>	401 <sup>b</sup>

a: 筆者らによる測定値 b: 文献3) c: 文献4)

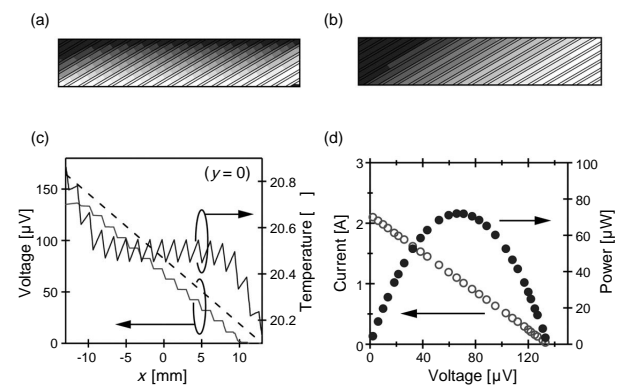
3.2 有限要素法によるBi/Cu傾斜積層体の解析

3.1節では、等価回路に基づくマクロな材料異方性から非対角パワーファクター  $PF_{xy}$  の算出を行った。しかしゼーベックテンソル  $S$  は、本来(1)式のような微分方程式に

よって定義されるもので、材料に対しては暗に均一な異方性が仮定されている。したがって、不均一なBi/Cu傾斜積層体の等価回路から求められる材料特性を用い、テンソル表示によって非対角パワーファクターを算出することの妥当性は自明ではなく、別途検証する必要がある。

ここではBi/Cu傾斜積層体が発現する非対角熱電効果のメカニズムと諸特性を明らかにするために、有限要素法解析ツールであるANSYS<sup>®</sup>(注)を用いて直接法連成解析により温度分布と電位分布の計算を同時に行った<sup>5)</sup>。解析に用いた2次元モデルは、第2図(a)において  $l = 26 \text{ mm}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $t_{Bi} = 0.24 \text{ mm}$ ,  $t_{Cu} = 0.56 \text{ mm}$ , 境界条件として上側の長辺を21, 下側の長辺を20, 右側の短辺を0V, 左側の短辺を等電位とした。xy平面の原点は解析モデルの中心にとった。第3図(a)の温度分布および第3図(b)の電位分布においては、高温および高電位になるほど濃色で示されている。これを見ると上下方向の温度勾配に対して、左右方向の電位勾配が生じる、いわゆる非対角熱電効果が発現していることがわかる。第3図(c)の  $y = 0$  における温度および電位のラインプロファイルにおいて、鋸刃状の周期的な温度分布と、それに伴う電位の単調増加が見られる。この特異的な振る舞いは、y軸方向に加えた熱流がBi/Cu傾斜積層体内部で曲げられていることを示している。

積層体の内部においては、構成材料が等方的な熱電性能を有するため、熱流と電界の向きは常に平行である。しかしながら、傾斜積層体が熱伝導率の巨大な異方性を有すると同時に、入力される熱流の向きに関して非対称な



第3図 有限要素法によって計算されたBi/Cu傾斜積層体の (a) 温度分布, (b) 電位分布, (c)  $y = 0$ でのラインプロファイル, (d) 電流 - 電圧および電力 - 電圧特性

Fig. 3 (A) Temperature and (b) voltage distributions, (c) line profiles at  $y = 0$  and current-voltage and power-voltage characteristics obtained by finite element analysis

(注) 米国ANSYS社の登録商標

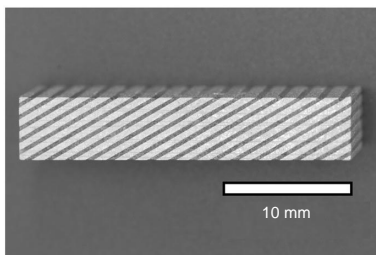
構造を有することから、内部の熱流の向きは元々の入力方向に対して曲がったものになる。この熱流の曲がりが起源となり、熱流の入力の向きに対して垂直な $x$ 方向にも有限の電位差が生じる、すなわち非対角熱電効果が発現するのだと結論づけられる。

今回解析を行ったモデルおよび以下に説明する作製した試料は、第2図(b)において「x」で示されたパラメータに相当する。等価回路での計算結果によれば非対角パワーファクターは $69.0 \mu\text{W}/\text{cm K}^2$ であるが、本モデルの解析結果では $46.2 \mu\text{W}/\text{cm K}^2$ となった。これはモデルの両端では積層構造が途切れていると同時に等電位となっており、この付近に限っては等価回路で得られた材料異方性と状況が大きく異なっているためと考えられる。したがって、実験によってBi/Cu傾斜積層体のパワーファクターを見積もり、等価回路での計算結果の妥当性を評価するためには、この両端の寄与を取り除く必要がある。

### 3.3 Bi/Cu傾斜積層体の作製と評価

非対角熱電効果を実験的に検証するためにBi/Cu傾斜積層体の作製を行った。まず周期的に開口部の空いた $0.1 \text{ mm}$ 厚の無酸素銅板を100枚重ねて拡散接合することにより、傾斜したスリットを周期的に有するCuブロックを作製した。次に、このCuブロックと粒状のBiを入れた黒鉛つぼを、電気炉中で $1 \text{ Pa}$ 程度の減圧下で $450^\circ\text{C}$ に加熱しBiを熔融させた後、Arを導入し大気圧で熔融したBiをCuブロックのスリット部に圧入した。最後に切削と研磨を行い、第4図に示すようなBi/Cu傾斜積層体を得た。 $x$ 方向の電気抵抗率 $\rho_{xx}$ は $15 \mu\Omega/\text{cm}$ であり、計算値の $14.5 \mu\Omega/\text{cm}$ と良い一致を示した。

Bi/Cu傾斜積層体の非対角熱電効果の評価のために、電熱ヒーターを試料上部に、空冷したアルミヒートシンクを試料下部に取り付けた。この際、前述した試料両端の寄与を取り除くために、熱伝導性シートを介して試料中央の幅 $15 \text{ mm}$ の範囲だけに温度差が付くようにした。このようにして測定された非対角ゼーベック

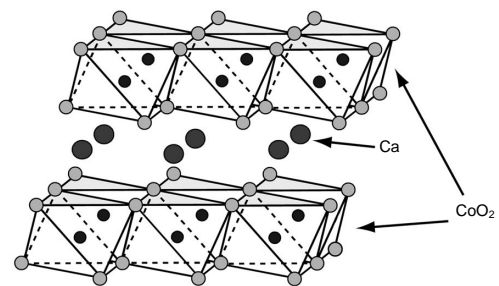


第4図 作製したBi/Cu傾斜積層体  
Fig. 4 Fabricated tilted Bi/Cu multilayer

係数は $S_{xy} = 27.4 \mu\text{V}/\text{K}$ で、(7)式より算出される非対角パワーファクターは $50.1 \mu\text{W}/\text{cm K}^2$ となり、構成材料であるBi ( $34 \mu\text{W}/\text{cm K}^2$ )の約1.5倍の値であった。すなわち、等価回路による当初の目論見通り、Bi/Cu傾斜積層体を構成することによる非対角熱電効果の発現を確認するとともに、構成材料よりも大きなパワーファクターが得られることが本実験により実証できた。

## 4. 層状酸化物 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ 傾斜エピタキシャル薄膜における非対角熱電効果

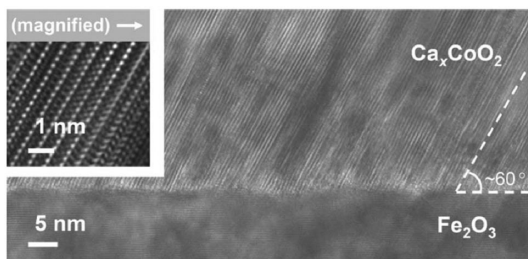
本章では層状酸化物 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ の薄膜において発現する非対角熱電効果について述べる。 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ は、第5図のように電子が移動しやすい良伝導性の $\text{CoO}_2$ 層と電子が移動できない絶縁性のCa層とが交互に積層された結晶構造を有しており、結晶内の方向によって熱電特性が大きく異なる。先の検討と同様に非対角熱電効果を実現するためには、さらにこの層状構造が基板に対して一様に傾斜した構造を作り出さなければならない。



第5図  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ の結晶構造  
Fig. 5 Crystal structure of  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$

### 4.1 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ 傾斜エピタキシャル薄膜の作製

$\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ の傾斜エピタキシャル(単結晶)薄膜はRF (Radio Frequency) マグネトロンスパッタ法によって単結晶サファイア( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )基板上に作製した<sup>6)</sup>。基板の面方位は $n$ 面(1123)、 $s$ 面(1011)、 $r$ 面(1012)の3種を選択した。さらに、各面方位のサファイア基板上に中間層として $\text{Fe}_2\text{O}_3$ エピタキシャル薄膜を堆積したものと、中間層を設けないものとで計6種類の基板を用意した。この上に組成比Ca:Co=1:1の酸化物ターゲットを $5 \text{ Pa}$ (Ar:O<sub>2</sub>=96:4)、基板温度 $450^\circ\text{C}$ の作製条件下でスパッタし膜厚 $150 \text{ nm}$ の $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ を成長させたところ、 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ( $r$ 面)以外の試料では、第6図に示した $\text{Ca}_x\text{CoO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ( $r$ 面)断面の透過電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)像のように、基板面に対して層状構造が一様に約 $58^\circ \sim 72^\circ$ 傾斜した薄膜を作製することができた。



第6図  $r$ 面 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基板上に作製された $\text{Ca}_x\text{CoO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 薄膜の断面と、 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ の層状構造を拡大した透過電子顕微鏡 (TEM) 像

Fig. 6 Cross-sectional TEM image of  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  thin film and magnified view of layered structure of  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$

#### 4.2 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ 薄膜の非対角熱電効果

作製した $\text{Ca}_x\text{CoO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $r$ 面) 薄膜において、層状構造の傾斜方向 ( $x$ ) と傾斜方向に対して垂直方向 ( $y$ ) にそれぞれ発生する熱起電圧  $V_x$  および  $V_y$  を測定するために、第7図 (a) に示すように電極間距離  $l = 6$  mm の2対の金電極を蒸着によって作製した。この試料の中央部に波長800 nm ~ 2000 nm, 出力480 mW の近赤外線ランプを 8 mm に集光して照射し、薄膜の膜厚方向に温度勾配を生じさせた。

第7図 (b) は、近赤外線ランプを一定時間照射したときの熱起電圧  $V_x$ ,  $V_y$  の変化を示したものである。ランプ照射後、速やかに傾斜方向の起電圧  $V_x$  が約110  $\mu\text{V}$  まで立ち上がり、ランプ消灯後直ちに0 V に戻るのに対して、傾斜に対して垂直方向の起電圧  $V_y$  はランプ照射に対して応答を示さなかった。また、第7図 (c) に示すように、傾斜角度 について起電圧  $V_x$  が  $\sin^2$  に比例する傾向が見られるが、これは (6) 式で表される非対角熱電効果の特性に従うものとなっていた。以上2点の特徴により、観測された電圧は非対角熱電効果に基づくものと結論づけられる。

ここで、(6) 式に既知のゼーベック係数、傾斜角度、電

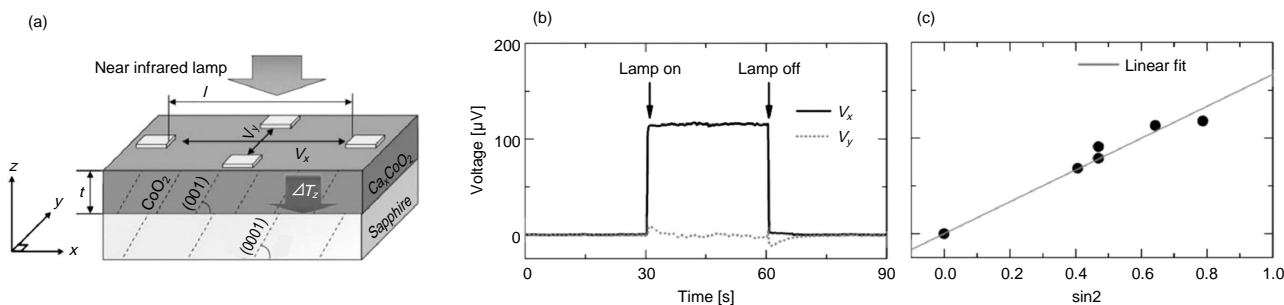
極間距離、膜厚を代入して膜厚方向の温度差を算出すると0.0002 K という微小なものであった。これは単位温度差当たりの検出感度としては600 mV/K に相当し、通常の熱電材料では高々数百  $\mu\text{V}/\text{K}$  であることから、この傾斜積層薄膜を用いて高感度の光検出デバイスを実現できる可能性がある。

## 5. まとめ

筆者らは、Bi/Cu からなる傾斜積層体および層状酸化物  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$  薄膜において観測される、非対角熱電効果と呼ばれる特異な現象について検討を行った。Bi/Cu 傾斜積層体においては、構成材料であるBiと比較して1.5倍の熱電変換のパワーファクターを、 $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$  薄膜では600 mV/K の検出感度を実現できることを見いだした。非対角熱電効果を利用することにより、低温廃熱からの高出力発電や高感度の光検出、あるいは温度分布測定が実現できる可能性がある。

## 参考文献

- 1) 野澤哲夫：廃熱や振動からの発電技術が実用期へ 日経エレクトロニクス 2008/12/15号 p.97 (2008).
- 2) (社) 日本セラミックス協会・日本熱電学会 [編]：熱電変換材料 (日刊工業新聞社) (2005).
- 3) D. R. Lide [編]：CRC Handbook of Chemistry and Physics, 88th ed. (CRC, Boca Raton, FL) (2007).
- 4) A. T. Burkov et al. [編]：CRC Handbook of Thermoelectrics (CRC, Boca Raton, FL) (1995).
- 5) T. Kanno et al. : Enhancement of transverse thermoelectric power factor in tilted Bi/Cu multilayer. Appl. Phys. Lett. 94, 061917 (2009).
- 6) K. Takahashi et al. : Tailoring of inclined crystal orientation in layered cobaltite thin films for the development of off-diagonal thermoelectric effect. Appl. Phys. Lett. 95, 051913 (2009).



第7図 作製した $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$ 傾斜積層薄膜の (a) 構成図と、(b) 近赤外線ランプを照射したときの層傾斜方向 ( $V_x$ ) と層傾斜方向に対して垂直方向 ( $V_y$ ) の熱起電圧、(c)  $V_x$  の傾斜角度依存性

Fig. 7 (a) Schematic view, (b) voltage change along tilting direction ( $V_x$ ) and perpendicular direction ( $V_y$ ) and (c) tilt-angle dependence of  $V_x$  of tilted  $\text{Ca}_x\text{CoO}_2$  thin films

## 著者紹介



菅野 勉 Tsutomu Kanno  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.



高橋宏平 Kouhei Takahashi  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.  
博士（工学）



酒井章裕 Akihiro Sakai  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.  
博士（理学）



足立秀明 Hideaki Adachi  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.  
工学博士



山田由佳 Yuka Yamada  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.  
博士（工学）