複合化による新機能材料の創造

北 田 正 弘*

1. はじめに

私たちは毎日の生活の中で沢山の材料を使いこなしている。自然の恵みそのままの素朴なものから、技術の粋を集めたものまで、種々雑多である。これらの中で機能材料と呼ばれる材料は、物質のもつ固有の性質(はたらき)を、高度の技術によってわれわれが利用できる段階までみがきあげたものである。これらの材料のもつ特性をうまく組み合わせることができるならば、さらに多くの有用な材料を生み出せるであろう。事実、強度材料の分野では、かなり前から複合化が進められている。しかし、機能材料†の分野で複合化が考えられ始めたのは、ごく最近のことである。本稿では、機能材料研究の最近の動きの中で注目されつつある変換材料の複合化概念について述べてみたい。

2. 変換材料について

機能材料という言葉はよく使われるが、明確な定義はないようである。広く考えれば、すべての材料は機能をもっているが故に材料と呼ばれている。たとえば、金属材料(構造材料)の多くは“物を支える”という機能を果たす。また、耐食性、耐熱性、ばね性、靱性なども機能の1つと考えることができる。しかし、通常、機能材料といった場合には、上述のような“はたらき”を機能とはいわない。機能といった場合には、材料の形状や強度などから由来する単純な“はたらき”ではなく、磁性材料のように物を引きつけるとか、パイメタルのようにスイッチングのはたらきをもっていたり、熱電対のようにある情報をもたらす材料を示している。ここでは、話を明確にするために、変換材料の範囲に限定したい。

変換材料というのは、ある性質(磁気、電気、光など)の入力を印加したとき、入力とは異なる性質の出力を示す材料の総称である。たとえば、ある材料に機械的な力を加えると、材料の両端に入力とは異なる性質の電圧が発生する(圧電効果)、といった類のものである。入力、

出力となる性質とは、電気、光、磁気、熱、力などであり、これらは互いに図1のような関係にある⁽¹⁾。たとえば、熱が電気に変わる場合を熱電効果、電気が光に変わるのを電気光効果、などと呼んでいる。これらの変換材料では、入力 X に対して異なる性質の出力 Y が発生し、式(1)のような関係をもっている。

$$Y = k_0 X \quad (1)$$

k_0 は結合係数(あるいは変換効率)と呼ばれ、 $0 < k_0 < 1$ の値を示す。変換機能がない材料では $k_0 = 0$ である。

図1 変換効果の関係⁽¹⁾。

変換材料は各種の異なった情報を入出力させるので、情報処理には不可欠の材料であり、近年、ますますその重要度が増している。

3. 複合化の基本的な考え方

図1で示した各種の性質を変換する物質はかなり多く発見され、そのいくつかは実用化されている。しかし、必要とする変換材料が存在しない(なかなか見出せない)場合、あるいは存在していても変換効率などが極めて小さく、役に立たない場合も多い。このような場合、新材料を発見するまで探索するのも1つの方法であるが、入出力のどちらかが共通するような材料を複合化して、新たな変換機能を有する材料を造り出す方法も考えられる。これから述べるのは、後者の複合化による新材料の創造である。

† 集積回路などは装置(デバイス)と呼ばれており、通常機能材料の中には含まない。

* 株式会社日立製作所中央研究所研究員
Composite Technique Creating New Functional Materials; Masahiro Kitada (Central Research Lab. Hitachi Ltd., Kokubunji)
1978年9月30日受理

前述のように、変換材料では、ある大きさの入力をしたとき、どの程度の出力が得られるか、が重要な因子となる。入力と出力の比が変換効率であり、変換効率が小さいと実用材料にならない。複合効果を表わすには、式(1)をそのまま用いてもよいが、入力と出力の変化分(厳密には偏微分)の比をとると便利である。入力変化分を ΔX 、出力変化分を ΔY とすれば、変換係数 k は式(2)で与えられる。

$$\Delta Y / \Delta X = k \quad (2)$$

いま、上述の出力 Y が入力となり、これにより Z なる出力が生ずる変換材料があると仮定すれば、 Y と Z の関係は式(2)と同様に式(3)で示される。

$$\Delta Z / \Delta Y = k' \quad (3)$$

式(2)および(3)で示される変換材料が別個の材料である場合、これらの材料を複合化したならば、どんな変換材料ができるであろうか。複合化されたとき、もし Y が出力と入力の役目を受けもってくれるならば、 Y の橋渡し作用によって、 X の入力により Z の出力が生ずる。この関係は式(4)のように表わすことができる⁽²⁾。

$$(\Delta Y / \Delta X) \cdot (\Delta Z / \Delta Y) = \Delta Z / \Delta X = f k k' \quad (4)$$

ここで、 f は複合化された材料の寸法因子などを含む係数である。 f, k, k' の値が十分大きければ、この複合材料を実用化することができる。式(2)、(3)で示される効果を単一変換効果(X - Y 効果あるいは Y - Z 効果)、式(4)で示される効果を複合変換効果(X - Y - Z 効果)と呼ぶことにする。

理論的には、 X - Y 、 Y - Z 、 Z - A などと2種以上の変換材料を組み合わせることも可能である。このような方法で、単一の材料では実現できない機能を複合化によって造り出すことができる。

以上述べた複合化による変換効果を図を用いて易しく述べよう。図2は X - Y 、 Y - Z という2つの異なる変換材料を何らかの方法で複合化した状態で、両者は交互に並んでいるものと仮定する。この複合材料に先ず X なる性質を入力する。すると、 X - Y 効果を示す材料では、入力 X が Y に変換される。 X - Y 効果によって生じた出力 Y は、 Y - Z 効果に対する入力となり、 Y - Z 効果材料によって Y が Z に変換される。したがって、この複

図2 複合変換材料の原理。Y が両変換材料の橋渡し役となって、 $X \rightarrow Z$ 変換が成立する。

合材料に X を入力すると、 Z に変換された出力が生ずる。もちろん、出力 Y も利用することができる。

4. どんな機能を複合化することができるか

表1に結合係数などを考慮して、比較的实现度の高いと思われる複合変換効果の例をいくつか示した。これらは、式(4)に従って可能性を考えただけであり、材料の作製法(複合化の方法)については全く考慮していない。

ここでは、その一例として著者も若干検討を行なった磁歪材料と圧電材料の複合化について述べる。磁歪効果は磁場(入力)を印加することにより材料自体が変形(ひずむ)する現象で、変形あるいはこれによって生ずる圧力などが出力となる。一方、圧電効果は圧力(入力)を印加すると材料の両端に電圧が生ずる現象で、電圧あるいは材料の両端に蓄積された電荷が出力となる。

表1 考えられる複合効果の例。

X-Y 効果	Y-Z 効果	複合(X-Y-Z)効果
ピエゾ磁気 ビエゾ電気 磁気歪 磁気歪 光導電	磁気抵抗 ルミネッセンス ピエゾ抵抗 ピエゾ電気 ルミネッセンス	ピエゾ抵抗 ビエゾルミネッセンス 磁気抵抗 磁気歪 波長変換

磁歪効果をもつ材料と圧電効果をもつ材料が図3(a)のように複合化されていると仮定する。この材料に外部磁場を印加すると、先ず磁歪材料がひずんで、たとえば図3(b)のように圧電材料を押すような力(圧力)がはたらく。この圧力によって、圧電材料中で分極が生じ、圧電材料の両端に電圧が発生する。結果として、磁場を入力することにより、電圧を出力として得ることができる。

磁歪材料の X - Y 効果は H を磁場、 l を試料寸法とすれば $(\Delta l / \Delta H)_m$ で、圧電材料の Y - Z 効果は電圧を E とすれば $(\Delta E / \Delta l)_p$ で示される。ここで、 Δl は試料の変形量で、圧力と同じに考えてよい。両者の複合によって生ずる X - Y - Z 効果は、式(4)により

$$(\Delta l / \Delta H)_m \cdot (\Delta E / \Delta l)_p = (\Delta E / \Delta H)_c = f' \cdot k'' \quad (5)$$

となる。 f' は磁歪材料の体積分率、 k'' は磁場-電圧に関する変換効率、添字 c は複合材料、 m は磁歪材料、 p は圧電材料を示す。

圧電材料としてチタン酸バリウム(BaTiO_3)、磁歪材料としてコバルトフェライト(CoFe_2O_4)の使用を考え⁽³⁾、 CoFe_2O_4 の $(\Delta l / \Delta H)_m$ を $5 \times 10^{-3} \text{ T}^{-1}$ 、 BaTiO_3 の $(\Delta E / \Delta l)_p$ を $2 \times 10^9 \text{ V m}^{-1} (2 \times 10^7 \text{ V cm}^{-1})$ 、 $k'' = 0.5$ 、 $f = 0.5$ と仮定すれば、 $(\Delta E / \Delta H)_c$ として $2.5 \times 10^2 \text{ V m}^{-1} \text{ T}^{-1} (2.5 \text{ V cm}^{-1} \text{ T}^{-1})$ が得られる。ただし、この計算値は $k'' = 0.5$ とかなり理想的な場合である。 CoFe_2O_4 と BaTiO_3 系には図4に示すような共晶点⁽⁴⁾が存在するので、共晶

図3 磁歪-圧電複合材料の磁電変換機構(模式的に示す)。
(a) 磁歪材料(MS)と圧電材料(PE)
(b) 磁場の印加による磁歪材料の変形, 黒矢印は変形による圧力を示す
(c) 磁歪材料からの圧力で生じた電位

図4 $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 系の平衡状態図⁽⁴⁾. B_h は六方晶の BaTiO_3 , B_c は立方晶の BaTiO_3 , F_c は CoFe_2O_4 を示す.

組成の材料を作製すれば, 複合変換材料となる. 写真1は $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-BaTiO}_3$ 共晶凝固組織の一例⁽⁴⁾である. 現在, 実験によって得られている $(\Delta E/\Delta H)_c$ は $13 \text{ Vm}^{-1} \text{ T}^{-1}$ ($0.13 \text{ Vcm}^{-1} \text{ T}^{-1}$) で, 上述の理想的な値の $1/20$ 程度の大きさであるが, ホール素子などに比較して $1\sim 2$ 桁

大きな出力を示すので, 実用化が期待されている. 磁電変換材料としては, 上記の $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-BaTiO}_3$ 系のほかに, $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-BaTiO}_3$, $\text{LiFe}_2\text{O}_4\text{-LiTaO}_3$ 系などが検討⁽⁵⁾されている.

写真1 $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ 共晶組織⁽⁴⁾.
地が BaTiO_3 である. ($\times 5000 \times 1/2$)

複合化の方法は材料によって異なり, ゴム状物質の中に分散させる方法, 多孔質さんごの中にペースト状の材料を埋めこみ, さんごを溶かしてその後の空間に他の材料を充填する方法, など多くのアイデアが出されている.

5. あとがき

複合化による新機能材料創造の検討は, まだその緒についたばかりである. 創造というのは少々大きな表現で, 果たしてどれほどの成果が得られるかは断言できない. しかし, 単一の材料の示す機能にも限界が見え始めており, 複合化による新材料の探索は今後の重要な課題の1つとなろう. 本稿が新材料探索に興味をもつ方々のご参考になれば幸いである.

文 献

- (1) 高尾利治, 藤井寛一: 効果の事典, 電機大出版局, (1972).
- (2) J.V.Suchtelen: Philips Res.Repts., **27** (1972), 28.
- (3) J.V.Boomgaard: Ferroelectrics, **10** (1976), 295.
- (4) 北田正弘: 日本学術振興会第136小委員会資料, (1971.11), p.12.
- (5) W.E.Kramer and R.H.Hopkins: J.Mater. Sci., **12** (1977), 409.