

磁性応用技術の動向と材料への期待



村上孝一*

The Trend of Applied Magnetic Engineering and the Expectation to Development of Magnetic Materials

Kōichi MURAKAMI

1. ま え が き

磁性材料は、導電性材料、半導体材料と並び、電気工学における主要な電気材料としての重要性をうんぬんするまでもないが、現在はこれまでの珪素鋼板を主体とする商用周波数域での変圧器、電動機、発電機等のエネルギー変換機器用磁性材料に止らず、最近の工学の急速な発展に伴い、計測、制御、情報、生体等の技術分野にもその需要を急速に拡大しつつある。特に、近年、超急冷法による低鉄損で高周波帯での使用可能なアモルファス磁性材料が開発されたこと、あるいは磁気式温度センサーに広く使用されている感温磁性材料等の開発実用化が成功したこと等に伴い、磁性材料の大量使用分野が通信工学、電子工学の領域にも拡大し、電子材料としての広い工業需要を惹起しつつあるのが現状である。

ここでは、今後新しい工業需要を開拓できる可能性のある磁性材料としては、どのような磁気特性を有するものが望ましいのか、あるいはこの望ましい磁気特性を有する磁性材料の開発がなされれば、エネルギー変換、制御、計測、生体工学等の分野で、具体的にどのような新しい用途が得られるのか等について、磁気応用技術の動向と材料への期待を勘案しつつ、電気工学において磁性材料を使用する立場から、その現状を概括してみよう。

2. エネルギー変換における応用

これは線形特性の磁性材料と非線形特性の磁性材料とに大別できる。

2.1 線形磁気特性の応用

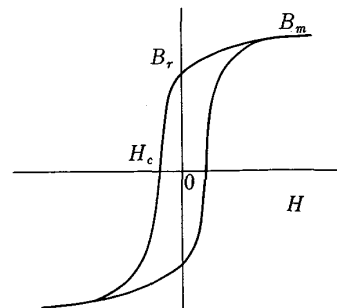
図1は、磁性材料の磁気特性を定性的に示した直流 $B-H$ 曲線である。図において、 B_m 、 B_r 、 H_c 等は材料の良さを示す値であり、 B_m は最大磁束密度、 B_r は残留磁束密度、 H_c は保磁力を示す。エネルギー変換用磁性

材料として望ましいことは、鉄損が少なく、高効率で機器が小形に製作できることである。したがってこれを磁気特性改良の基準として考えると、次の(a)~(i)項に示す事項が良好であることがよい。すなわち、

- (a) 図1に示す $B-H$ 曲線の面積、すなわちヒステリシス損失の小さいこと。
- (b) 交流励磁を行つた場合の $B-H$ 曲線の面積の増大の少ないもの、すなわち電流損失の小さいこと。
- (c) 保磁力 H_c の小さいこと。
- (d) 最大磁束密度 B_m の大きいこと。
- (e) 残留磁束密度 B_r の小さいこと。
- (f) 透磁率 μ が大きく一定領域の大きいもの。
- (g) 動作温度領域で磁気特性の変わらないいわゆる温度特性の良好なもの。
- (h) 加工の容易であること。
- (i) 磁歪の少ないもの。

このような特性を有する磁性材料を用いると、これにより製作した電力用機器は、次項の(j)~(o)項に示すような改善がなされる。すなわち、

- (j) 銅損及び鉄損が減少し、エネルギー変換効率が上昇する。

図1 磁性材料の $B-H$ 曲線

昭和62年2月2日受付 (Received Feb. 2, 1987) (依頼解説)

* 東北大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)

Key words: magnetic materials; magnetic properties; amorphous materials; sensors; control equipments; biomedical engineering; energy conversion; electric power equipment; thermal magnetic materials; application.

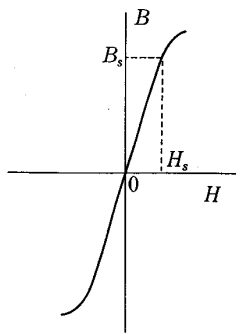


図 2 望ましい線形磁気特性の例

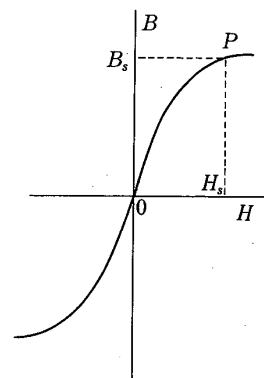


図 3 望ましい非線形磁気特性の例

- (k) 励磁電流における高調波含有率が減少する。
- (l) 機器の磁路における漏洩磁束が減少し、負荷時の特性変動が減少する。
- (m) 変圧器の場合、閉路時の突入電流が少なくなる。
- (n) 電気機器を小形に製作することができる。
- (o) 騒音が少ない。

以上の望ましい事項を $B-H$ 特性で示すと図 2 のように示すことができる。すなわち、特性にヒステリシスがなく、 H_s が小さく B_s の大きいものである。

我が国の珪素鋼板は、以上の観点の下に磁気特性の改良が進められてきたが、鉄損その他にまだ改良すべきいくつかの事項を残している。しかし、近年急速に開発の進められているアモルファス磁性材料や、急冷法による高珪素鋼薄帯の開発等は、上記の(a)~(i)項の特性改善を指向しており、電力機器用の磁性材料として、特に省エネルギー政策の見地から、特性の一層の改善と低価格化等に関しその実用化研究が進められている。

2.2 非線形磁気特性の応用

前述の(d)項で示したように、電気機器では使用磁性材料の磁束密度の大きいことが望ましいが、磁束密度を大きく設定すると磁気特性の非線形性のために動作時の高調波成分が増大して出力特性が劣化する場合が多い。このため一般の電気機器では、磁束を磁気特性の線形領域で交番動作させ、磁束密度を飽和磁束値より低下させて使用している。しかしながら磁性材料の磁束交番を過飽和領域まで拡張して使用すると、通常の電気機器では得られない優れた特徴を有する電気機器を作製することが可能である。この考えの下に、最近磁性材料の過飽和磁気特性を積極的に利用する各種装置が相次いで報告されているが、このような使用目的に適合した磁性材料の開発が必ずしも十分になされていないために、このような優れた特徴を生かした機器の実用化は完全には得られていない状態である。

非線形特性利用機器に望ましい磁性材料の特性としては、次のような事項があげられる。すなわち、

- (a) ヒステリシス損失の小さいもの。
- (b) うず電流損失の小さいもの。

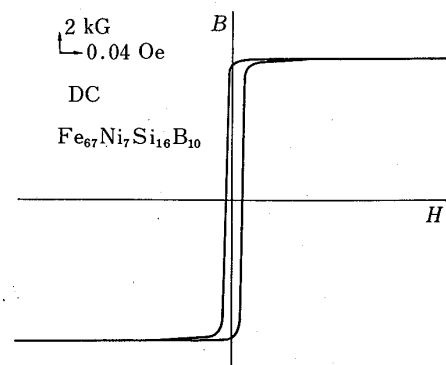


図 4 角形履歴特性の良好なアモルファス磁性材料の実測例

- (c) H_c の小さいもの。
- (d) B_m の大きいもの。
- (e) 過励振で用いるため、第 3, 第 5 高調波成分のそれぞれの基本波に対する含有率が、その使用機器の動作に適当な比率であること。
- (f) 過励振で用いるため、変圧器等の場合に比較し鉄損が数倍となるために、特に 2.1 項の(a), (b)が小さく、鉄損の少ないもの。
- (g) 加工の容易なもの。

図 3 は、以上の事項を $B-H$ 特性で示したもので、 H_s が小さく、 B_s が大きく、曲線 OP の形状が(e)項の条件に適したものである。

非線形特性の良好な磁性材料が開発された場合、工業需要を惹起できる応用機器の例としては、鉄共振型定電圧電源、パラメトリック電力変換器、パラメトリック電動機、及び周波数通倍器等があげられる。以下、代表的な例については 6 節で詳述する。

3. 制御素子への応用

磁性材料には、高度の角形性を示す磁気特性の制御素子への応用がある。図 4 は角形履歴特性の良好なアモルファス磁性材料の 1 例である。磁性材料の角形履歴特性

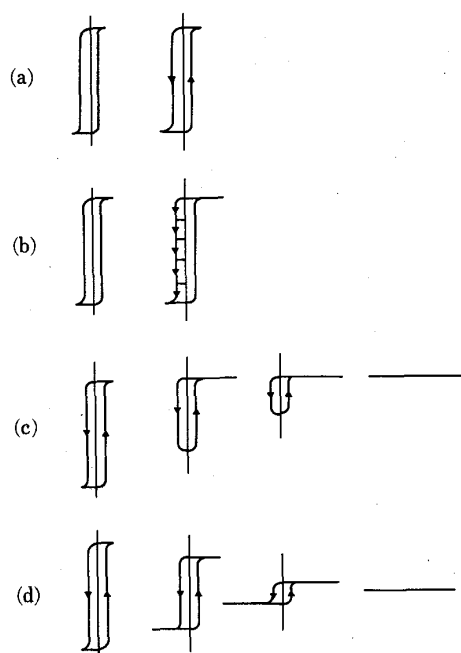


図5 角形磁気履歴特性の利用の種別

の応用には、磁気増幅器のような出力制御、磁気位相器のような位相制御など、単独あるいは他の回路方式と結合させた種々の制御素子があり、増幅、発振、周波数変換、波形整形等の広い分野で使用されている。これらの装置の長所は、主構成要素が磁心のため、温度、湿度などの周囲条件の変動に比較的強く、装置が堅固で信頼度が大きく、変調と増幅が同時にできてパルス電圧に強いことなどである。これに反し欠点としては、磁束制御の方式により制御特性に多少の差異を生じること、極めて高い周波数領域では特性が劣化するために動作周波数があまり高くとれないこと、磁心ゆらぎ雑音などのために増幅精度に限界があることなどがあげられる。

この種の磁性材料の磁気特性の利用方法は、図5に示すように、一般には正負の飽和磁束値で磁束を交番させる方式(a)、正負飽和磁束間を分割して制御する方式(b)、制御入力関数として磁心磁束をマイナーループ制御させる方式(c)、及び制御入力関数として角形履歴特性の対称性を保持したまま最大磁束値を変化させる方式(d)などがある。

このような応用に対して望まれる磁気特性としては次のようなものをあげることができる。

(a) 磁気履歴特性の角形性の極めて良好であること。高周波領域で使用するために、特に限りなく $B_r \cong B_m$ の材料がよい。

(b) H_c は特に小さいこと。

この値が励磁周波数の高い領域にわたって小さいことは増幅度の増大をもたらす。

(c) B_m の大きいもの。

(d) 応力に対し磁気特性、変動の敏感でないもの。

(e) 使用周波数領域の広いもの。

(f) キュリー温度 T_c が高く、使用温度領域で磁気特性の変化しないもの。

(g) 磁心ゆらぎ雑音の少ないもの。

(h) もどり磁束量(リセット終了後の磁束の上昇)の少ないもの。

Co を多く含むある種のアモルファス磁性材料には、保磁力 H_c がスーパーマロイと同程度かあるいはそれよりも小さく、履歴特性の角形の程度は異方性 50% パーマロイと同程度のものでかつ磁歪がほとんど零のものが得られている。これまでの金属磁性材料では、高透磁率の材料は履歴特性の角形性が悪く、反対に角形性の良好なものは高透磁率でないと思われていたが、この種のアモルファス磁性材料は双方の特性を兼ね備えており、制御素子用磁性材料としては理想的な方向に近づいたものといえる。しかしこの磁心を用いて、例えば磁気増幅器を構成すると、増幅度は大きい制御回路抵抗の大きいとき、最大制御磁束量を $\Delta\phi_m = 2\phi_m$ とすれば、磁束制御量が $\Delta\phi_m/2$ の近傍で数%程度の出力変動を示す。しかしこの現象は制御回路抵抗が小さく、あるいは正負の飽和磁束値ではほとんど消失し、また駆動周波数を増しても減少する。最近、数 100 kHz ないし MHz の領域でもアモルファス磁性材料を種々の目的に使用する例もあり、特性の改善とあいまって、この種のアモルファス磁性材料の応用がこの分野で急速に進展するものと考えられている。

4. 計測素子への応用

磁性材料を計測に用いる場合、磁性材料特有の特徴を有するため、近年種々の分野で磁気計測素子として広く実用されるようになってきている。計測に利用できる磁気量は、飽和磁束密度 B_m 、保磁力 H_c 、透磁率 μ 等である。磁性材料を用いて計測できる諸量としては次のようなものが挙げられる。すなわち、

(A-1) 力学量：長さ、位置、圧力、張力、回転数、トルク、厚み

(A-2) 電気量：電圧、電流、尖頭値、位相、周波数など

(A-3) 磁気量：磁束、磁場の強さ

(A-4) 熱：温度、熱量

(A-5) 光

(A-6) 放射線：中性子束、 γ 線など

(A-7) 気体：酸化ガス、還元ガス

(A-8) その他

磁性材料を用いた計測素子の特徴としては、次に示す各項が考えられよう。まず長所としては、

(B-1) 応力などは接触計測が必要であるが、一般に非接触計測できるものが多い。

(B-2) 変調・増幅が容易である。

(B-3) 応答感度を増すために少量の磁性材料を用いても、例えば磁束変化速度 $d\phi/dt$ を大にすることにより、出力を増すことができる。

(B-4) フェライトなどは被測定対象の周囲条件の下で安定である。

(B-5) 堅固であり、かつ一般に安価である。

短所としては、

(B-6) 磁気素子は極度の高速動作を要求されるものには適合しない。

(B-7) 入力信号の必要な領域で磁気特性を急変するものは比較的少ない。

(B-8) 入力対出力の関係が一般には非線形である。

計測に応用できる磁性材料としては、金属材料、フェライト、磁性流体、アモルファス材料及び薄膜材料などがある。これらの磁性材料を計測用磁性材料として使用する場合は望ましい磁気特性は、次のようなものである。すなわち、

(a) 前項で述べた入力の諸量に対し、必要な領域で飽和磁束密度 B_m 、保磁力 H_c 、透磁率 μ の磁氣的諸量の急変するもの。

(b) おなじく入力諸量に対し、必要な領域で飽和磁束密度 B_m 、保磁力 H_c 、透磁率 μ などの値が、線形に変化するもの。

(c) 飽和磁束密度 B_m 、透磁率 μ 、磁歪などの大きい材料の開発。

(d) 磁気センサーを構成する場合の形状の任意性を有するもの。

(e) 感応 R・C 素子との組合せによる複合磁気センサー等の開発。

(f) 各種入力に対する変化量の分離の可能なもの。磁気センサー等は大きな工業需要を背景として有しており、センサー用磁性材料の性能向上により実用の拡大できる分野と思われる。

5. その他の磁性材料への応用

近年磁性材料の新しい使用方式が提案され、あるいは使用周波数帯域も数 100 kHz から MHz 領域まで拡大されるなどの理由により、このような使用方式に適合した新しい形状及び特性を有する磁性材料の開発が望まれている。このような磁性材料を列举すると次のようなものがある。

(A-1) 多層膜磁性材料

(A-2) B_m の大きい流体磁性材料

(A-3) 線材磁性材料

(A-4) 円筒磁性材料

(A-5) 複合磁性材料

(A-6) 立体磁路用接合磁性材料

(A-7) 直接通電用磁性材料

(A-8) 網状磁性材料

(A-9) マイクロ加工による磁性材料

これらの磁性材料の期待される用途としては、

(B-1) 使用可能な周波数領域の拡大。

(B-2) 複雑な磁路間の接続の容易。

(B-3) 複合磁気特性を用いた新しい磁気素子の開発。

(B-4) 磁気素子のマイクロ化、集積化。

(B-5) 立体回路素子の開発。

などがある。現在、磁性材料の開発は電力用磁性材料や磁気記録材料等が主流を占めているが、現在まで報告されている数多くの論文の動向より考えると、上記の特殊磁性材料の開発が、近い将来必要となることを如実に示している。

6. 新しい磁性材料の期待される応用例

以上、エネルギー変換、制御、計測等に分類し、それぞれの使用に望ましい磁性材料の特性について述べたが、ここでは、現在及び近い将来にわたり、大量に実用される可能性のある磁気応用のいくつかについて述べてみよう。

6.1 過飽和磁気特性を利用した電源

最近の電源は、各種電気機器におけるデジタル回路の使用により、定電圧、過電流保護、ノイズ除去などの特性を具備することが強く要求されているが、磁性材料の過飽和特性を利用した鉄共振やパラメトリック発振利用の電源は、本質的にこれらの諸特性を保持しているために、多くの研究が報告されている。しかし現用の変圧器用磁性材料を過飽和領域で交番励磁すると、鉄損が増加し、更に励磁電流の増大に基づく銅損も増加するために、通常の変圧器に比し損失が増大し、効率が低下することはまぬがれない。したがってこのような応用に適した低鉄損でかつ良好な非線形特性の磁性材料の開発が要望されている。

このような要求に適合した磁性材料の開発は進められていないが、ある種のアモルファス磁性材料には、このような用途に適したものも認められる。

しかしパラメトリック発振を用いた定電圧電源の場合には、2個のU形の磁心を相互に空間的に90度転移接続して用いる構造のものもあり、このような構成の場合には現状のアモルファス磁性材料では磁気特性が急激に劣化し、良好な磁気特性を保持したままのU形磁心の製作が困難のようである。

以下、磁性材料の過飽和特性を利用した電源装置のいくつかについて述べてみよう。

6.1.1 鉄共振形定電圧電源

図6は鉄共振形定電圧電源と称されるもので、古くから使用されているが、前述のように低鉄損でかつ適当な非線形磁気特性を有する磁性材料が開発されれば、その

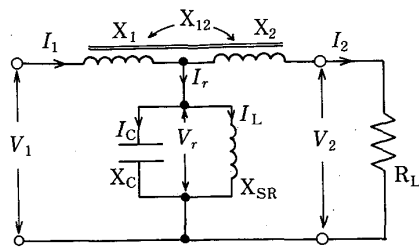
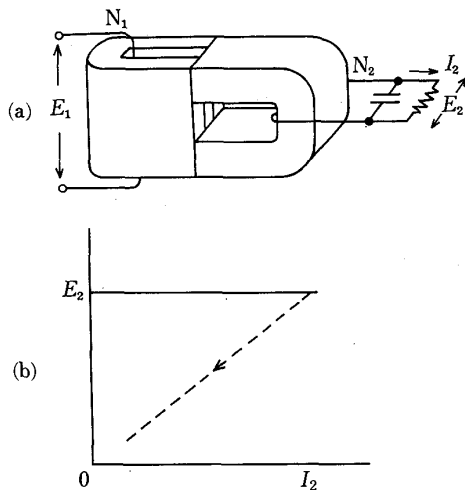


図6 鉄共振形定電圧電源の基本構成



(a) 基本構成 (b) 理想化された場合の負荷特性

図7 直交磁路形パラメトリック変圧器

用途が拡大するものである。図に示すように、空けきのない磁心に巻線を施した過飽和リアクタンス X_{SR} とコンデンサー X_C とを並列にした回路に交流電圧を印加すると、強制振動項を有する非線形振動回路となり、負荷電流 I_2 の増減と電源電圧 V_1 の広い変動範囲に対し、出力電圧 V_2 がほぼ一定値を保持するような動作を行う。図中の X_1 , X_2 はそれぞれ線形のインダクタンスであり、定電圧を助長するための動作をする補助回路素子である。この回路には種々の改良形があり、出力波形の歪みを少なくするものや、3相形あるいは高周波帯域で使用するものなど、多くの方式が案出されている。

図中、 X_{SR} を構成する磁性材料として図3に示したような低鉄損のものが得られれば、本質的な優れた特性とあいまって、本電源の使用分野及び使用量が增大するものと思われる。

6.1.2 パラメトリック変圧器

図7は、非線形磁気回路とコンデンサーを用いた非線形振動利用のパラメトリック変圧器と称する定電圧電源である。同図(a)に示されているように、その磁路は2個のカットコアを空間的に 90° 転移接続したものである。1次巻線 N_1 の端子に周波数 f の交番電圧 E_1 を印加すると、磁気回路とコンデンサー C によりパラメトリック発振が生じ、2次巻線 N_2 の両端に周波数 f でか

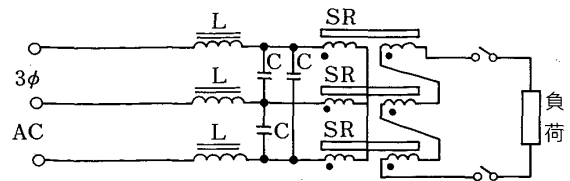


図8 磁気式3倍周波数通倍器

つ E_1 と 90° 位相の異なる正弦波電圧 E_2 を誘起する。その定性的な負荷特性の一例を同図(b)に示す。一定値以上の負荷電流が流れればパラメトリック発振が停止し、端子電圧 E_2 は零となり、負荷電流が流れないために過負荷保護機能を具備している。更にパラメトリック発振現象を利用しているために、磁気回路 E_1 あるいは E_2 の基本周波数のみを E_2 あるいは E_1 側に通し、それ以外の周波数成分は除去する性能も有している。すなわち、負荷側の高調波分を電源側に通さず、電源側の高調波分を負荷側に伝播しないいわゆるバイラテルフィルタの特性を保有しており、かつ本回路は磁性材料とコンデンサーのみで構成されているために、保守は全く不要と考えられる。

以上のように定電圧、過電流保護、フィルター特性及びメンテナンスフリーの性質を本質的に具備する優れた電源ではあるが、前述のように、磁心の過飽和励磁に基づく鉄損の増大のため、変換効率は最大でも80%程度であり、現用の変圧器に比し著しく低い値となっている。しかし現在デジタルデバイスが工業用、家電用機器に多用される傾向にあり、過負荷保護、定電圧、ノイズフィルター特性保有の高性能電源が要求されてきており、将来この種の電源が必要となる時代の到来は予測されるようになってきている。したがって、この種の磁気式非線形振動に適した磁性材料が開発されれば、その用途の拡大は期して待つものがあると考えられる。

6.1.3 磁気式周波数通倍器

図8は、磁気式3倍周波数通倍器の代表的な一例である。図において、 L は線形インダクタンスであり、 SR は過飽和リアクトルを示す。この回路には3相電源が印加され、各相ごとに L と SR が直列回路となり、かつ Y に結線されている。過飽和リアクトル SR は2次巻線を有しており、各巻線を同一極性で直列接続し、3倍高周波電圧を加えあわせて負荷に供給する方式である。図中のコンデンサー C は鉄共振現象を利用して、過飽和リアクトル SR に印加される電圧を安定化し、出力特性を改善するためのものである。本方式の過飽和リアクトル SR の磁気特性は、図3に示すようなものが望ましく、このような特性を有する磁性材料の開発が望まれる分野の一つである。

この他の磁気式周波数通倍器としては、角形磁気履歴特性を有する n 個の磁心を用い、 $0 \sim \pi$ までの印加電圧

がそれぞれの磁心に π/n ずつ印加され過飽和するように整合させ、それぞれの磁心の出力端子をひとつおきに逆極性に接続して n 倍の周波数の出力電圧を取り出す方式のものもある。この方式では、図4に示すように保磁力が小さく磁束密度の大きい高度の角形磁気履歴特性を有する磁性材料の開発が望ましい。

6.2 過飽和磁気特性を利用した電動機

前項 6.1.2 で述べたように、磁心の非線形特性を利用してパラメトリック発振を生ぜしめると、2次誘起電圧 E_2 は1次電圧 E_1 に比し、大きさがほぼ等しく位相の 90° 異なる正弦波電圧となる。この2相の電圧を利用すれば、構造簡単でほぼ円形な回転磁界を有する交流電動機を作製することができる。図9はその構成の一例を示したもので、2個の A_1 , A_2 と示すU形磁心と1個の環状磁心 B で固定子が形成されており、回転子 D として通常の誘導電動機用のかご形回転子を用いればパラメトリック誘導電動機となり、同期機用の回転子を用いればパラメトリック同期電動機となり一定速度で回転する。図10は、試作パラメトリック誘導電動機の負荷特性の一例である。 P は出力、 T はトルク、 η は効率である。パラメトリック発振は方形波で励磁しても容易に生

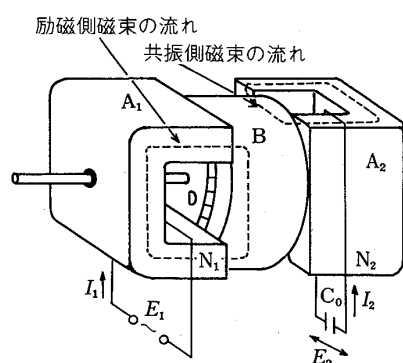


図9 パラメトリック電動機の基本構成と磁束の流れ。 A_1 , A_2 は励磁用磁路で B は共通磁路。 D は回転子。

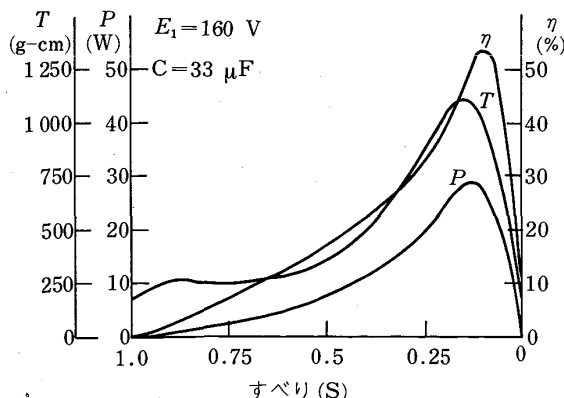


図10 パラメトリック誘導電動機の負荷特性

じるため、方形波インバータにより高周波電圧を印加励磁し、毎分8万回程度の回転数の高速電動機を容易に製作することができる。更に同一の原理の下で、パラメトリックリニアモーターも作製することが可能であり、その用途は極めて広いと思われる。

このような電動機の磁束のふるまいは、図示のようにこれまでの電動機に比較し異なつたものとなつてゐるため、従来までの磁性材料をそのまま用いると鉄損が大きくなり、かつ同一出力の従来の電動機に比較し、多少形状が大きくなるなどの欠点を有している。このような電動機に望ましい磁性材料としては、非線形特性が良好で飽和磁束密度が大きく、過飽和交番励振を行つても鉄損が少なく、かつ磁束が立体的に分布するために、磁性鉄板の面内のみならず、これと直角な厚み方向にも特性の良好なものがよい。

近年開発の進んでいる Fe を主成分とするアモルファス磁性材料は、飽和磁束密度が大きく、過飽和励振を行つても鉄損は少なく、磁気特性の非線形性も良好で、このような電動機用磁性材料として適当した材料と考えられているが、アモルファス磁性材料に特有の強い靱性のためにU形磁心を作製しにくいこと、切断面で磁気特性が劣化することなどの理由のために現状では適当なものが得られていない。これらの問題が解決されれば、この種のアモルファス磁性材料は新しい用途を拡大するものと思われる。

この外に、最近 Si を4~6.5%含有する高珪素鋼板が作製されるようになり、低鉄損で高周波帯でも使用可能でかつU形磁心の作製も容易な新しい磁性材料の開発が進んでいる。このような磁性材料は、特にパラメトリック電動機の磁路構成材料として適当なものとなろう。

更に最近では、パラメトリック電動機構成にみられるごとく、磁気回路の一部を転移して接続する使用例も多くなつてゐる。このような使用に対しては変圧器用鉄板を用いた積鉄心や巻鉄心構造では、接合面での漏洩磁束や鉄損の増大をもたらす欠点がある。これに対しフェライトは任意形状のものが作製しやすいが、フェライトを用いると飽和磁束密度が低く接合時の機械的圧力に弱いなどの短所がある。このような使用目的に対しては、もし圧粉鉄心のごとく任意形状に加圧成形することができ、飽和磁束密度もある程度大きく、うず電流損失も少ない磁性材料が得られれば、接合部の磁性材料として大きな用途が考えられる。

6.3 過飽和磁気特性の磁心を用いた DC-AC 系統連系装置

近年、太陽電池あるいは燃料電池等による直流電力を商用周波数の交流に変換し、これを配電線に連系して並列運転を行う試みが電力会社、メーカー等で研究されている。現在、太陽電池や燃料電池による発電原価が、現用の水力、火力、原子力発電による発電原価より高価で

あるために実用には供されていないが、しかし近年のこれらの発電技術のめざましい進展により、比較的大容量のプロトタイプ発電システムの研究が各電力会社等で行われるに至っている。一般に2系統の電源を並列に接続するためには波形、振幅、位相、周波数を同一にすることが必要であり、加うるにそのシステムは安全で保守がほとんど不要であることが望ましい。

図11は、このような考えの下に、筆者の研究室と東北電力株式会社総合研究所とが共同で開発したDC-AC連系方式の一つである。本方式は、直流電力をインバータで商用電源と同一周波数の方形波交番電圧に変換した後、X印で示した他励パラメトリック発振動作の特殊電力変換器で正弦波交流に整形変換し、配電線と安定に連

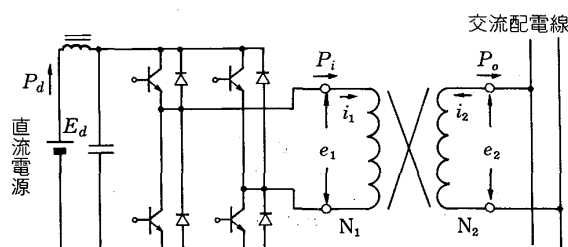


図11 新しいDC-AC連系回路の基本構成

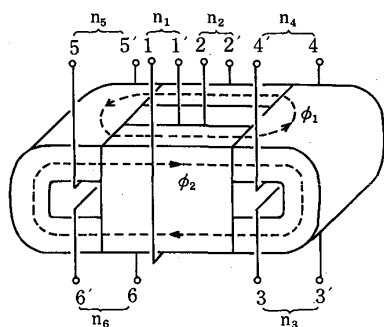


図12 DC-AC連系用変換器の磁心構成

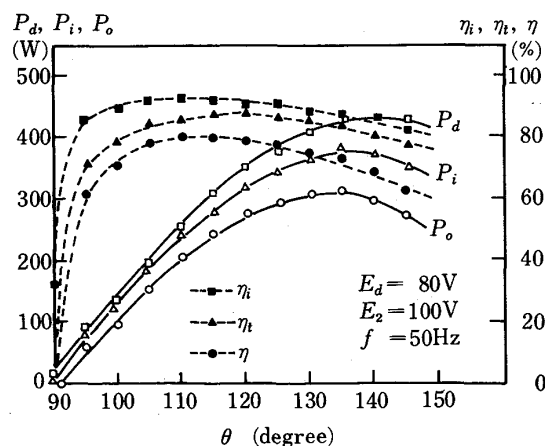


図13 DC-AC電力変換特性測定の一例

系させる方式である。

図12は、上記の電力変換器の磁心構成と巻線を示したものであり、端子1, 1'と2, 2'を並列に接続して1次巻線 N_1 とし、端子3, 3'と4, 4'及び5, 5'と6, 6'をそれぞれ並列に接続した後、更にその両者を並列接続して2次巻線 N_2 としている。

図13は、本方式による試作DC-AC電力変換器の特性例であり、図11で示した方形波インバータの点弧位相角 θ に対する直流電力 P_d 、方形波交番電力 P_i 及び正弦波交流電力 P_o 及びそれぞれの効率 η_i 、 η_t 及び総合変換効率 η を測定したものである。これを見ると、総合の変換効率は80%より多少良い程度である。その低効率の主原因の一つは、電力変換器を構成する磁心が過飽和と交番励磁で使用され、鉄損が変圧器の数倍に増大するためであり、もし図3で示したような非線形振動に適した磁気特性を有する磁性材料の開発が得られれば、変換効率の90%程度までの上昇は当然達成できるものと思われる。近年、太陽電池の変換効率の上昇と生産量増大が著しく進んでおり、石油系の火石燃料の価格が上昇すれば、本方式によるDC-AC変換システムは、家庭に入りこむ時代もそれほど遠くないものと考えている。その意味でも本方式に適した磁性材料の開発が期待されよう。

6.4 特殊磁性材料の応用例

特殊特性の磁性材料あるいは特殊形状の磁性材料は、近年新しい需要を想定できるまでになりつつある。ここでは代表的ないくつかの例について述べてみよう。

6.4.1 感温磁性材料の応用

図14は温度の上昇、下降によつてその磁気特性を急変するキュリー温度 65°C の感温フェライトの実測例を示したものであり、この種の磁性材料はサーモライトの商品名で広く実用されている。このような感温特性を有する磁性材料には、金属磁性材料、アモルファス磁性材料、磁性流体等種々のものが存在するが、感温特性が十

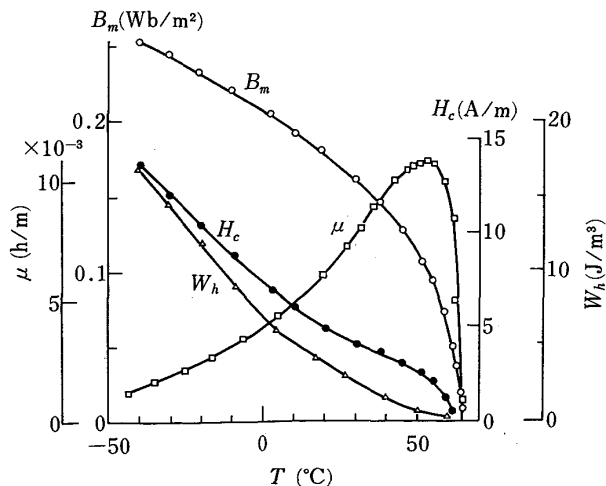


図14 磁気特性の温度依存性

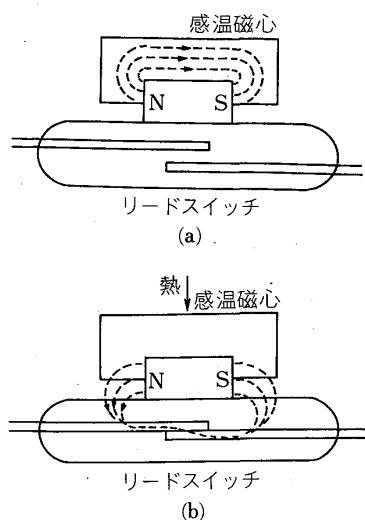
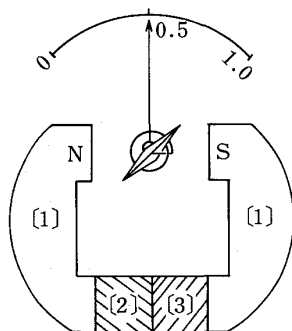


図 15 サーマルリードスイッチの動作説明図



[1] は継鉄, [2] は永久磁石, [3] は感温磁心

図 16 可動鉄片形温度計

分に満足するものが得られていないために、磁気特性の温度による変動を補正するための整磁鋼や、上記のサーマルフェライトなどの外は広い工業需要を有するに到っていない。

感温磁性材料の応用拡大のために改良して欲しいことは、キュリー点の設定が正確であること、キュリー点での急峻な磁気特性変化が得られること、良好な加工性を有すること、金属感温磁性材料に認められるキュリー点近傍における H_c の不規則変化の除去、及び良好な耐食性を有するものであることなどである。

これと反対の考えの下に、磁性材料の温度がキュリー温度以下では鉄損が非常に大きく、キュリー温度で激減するような感温磁性材料も望ましい特性の一つである。このような磁性材料は非接触の定温加熱に極めて有用となる。

図 15 は、サーマルリードスイッチの名称の下に実用されている感温磁性材料の応用であり、筆者等の研究成果が実用されたものである。同図は原理図であるが、感温磁心と、永久磁石、磁性材料で作られたリードスイッ

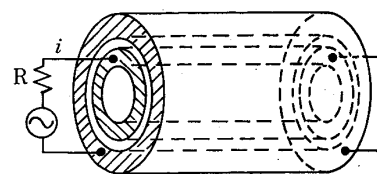


図 17 二重磁性管路の基本構成

チとを組み合わせ、キュリー温度を温度基準値として、温度の昇降により回路の開閉を行うものである。

サーマルリードスイッチの特徴は、構造が極めて簡単で他の電気器具のごとき巻線や電源がないことであり、更に温度基準値にキュリー温度を用いているため動作は極めて正確であり、かつ湿分その他の周囲条件に強く、低価格であることである。このようなものは、異なる磁気特性の磁性材料を 3 個組み合わせただけで正確な開閉動作を行う優れた磁気素子といえよう。

図 16 も前と同一の考えに基づく感温磁性材料の応用例である。図示のように、継鉄、永久磁石、感温磁心よりなる直列磁路に指針を有する可動鉄片を配し、温度センサー部の [3] が温度の関数としてその磁気特性を変動するに従い、温度に比例して指針が回転指示するようにしてある。電源が不要であり、指針に接点を付加して警報回路を閉じるようにすれば、種々の温度上昇監視に役立つものと思われる。このような類似の磁気素子は、感温磁心の特性向上により化学工場その他で多くの需要を得ることが期待されよう。

6.4.2 管状磁性材料の応用

図 17 に示すように、鋼管などの強磁性体で構成した二重管路に往復電流が通じると、強磁性体中における電流と磁界の相互作用により、表皮効果と近接効果が顕著に発生する。その状態は通電電流の値と磁気特性に依存しており、かつ通電電流の周波数が高いほど電流は偏倚する。このために外管外表面の電流が著しく小さくなること、内外管に流れる電流の振幅や位相に差が生じること及び外管の端子電圧が変化するなどの種々の興味ある現象を示す。

この特徴を高粘性流体輸送用パイプラインの加熱システムへ応用した例がある。すなわち、原油などの高粘性流体輸送のための海底パイプラインが二重管路構造を有するのをそのまま利用し、内外管を絶縁して往復電流路とし、電流偏倚現象を利用して管路を加熱し、パイプラインの保温を保つことができたという応用例が報告されている。

この他に地絡電流検知器へ応用した例もある。すなわち、二重管路を主回路に挿入し、地絡事故が発生すると内外管の電流振幅に差を生じるため、外管端子電圧が上昇する。この現象を利用し、この電圧値があらかじめ設定された値以上に大きくなると、トリップ回路を動作させ系統を遮断する方式のもので、実験では良好な結果を

得ている。

このように二重管路構造は回路素子として極めて簡単であり、これまでの磁性材料単独では得られない興味ある特性を示すものであり、管路用磁性材料の特性の開発や二重管路構造の寸法精度の向上が得られれば、商用周波数はもちろん、数 100 kHz 領域の電子回路素子としての新しい需要を開拓できる分野があると考えられる。

6.4.3 線状及び布状磁性材料の応用

超急冷法による磁性材料の作製方法の発達により、単に薄帯のみではなく、数 10 μm 径の細線状の磁性材料の製作が可能になり、これを用いた磁気素子が電子デバイスとして工学の分野に新しい需要を開拓しつつある。

写真 1 はその応用の一例である。図 18 は、約 30 μm の高透磁率のアモルファス磁性線と同一の径を有する絶縁銅線とを平織にする場合の構造を示しており、これを適当に切断してインダクタンス素子をつくると、現用のチップインダクターに並ぶ優れたインダクタンス値を有し、布状のため容積の小さいインダクタンス素子が作製でき、これをクロスインダクターと称することが報告されている。

この外に電子部品として直流分をカットする高周波ト

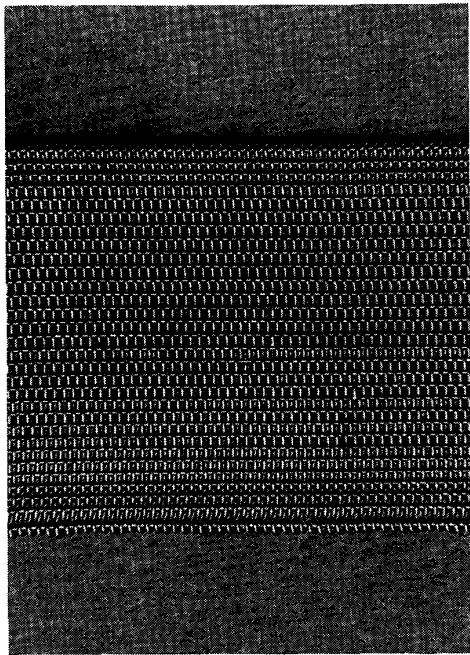


写真 1 アモルファスワイヤーと銅線との織物

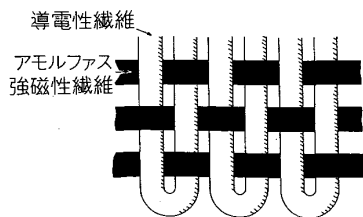


図 18 クロスインダクターの拡大モデル図

ランスや、スイッチングレギュレーター用のクロストランス等も簡単に製作でき、電子回路の小形化に役立つ各種素子を簡単に実現できる利点を有している。

この外に布状磁性線で構成したデジタイザーも実用されている。アモルファス磁性線が製作工程上、Wiegant wire と類似の磁気特性を有することを利用し、各種の磁気センサーへの応用した例など、これからの新分野を開拓できる応用が相次いで報告され注目をあびている。

本線材はインダクターの一層の小型化に寄与できること、大量生産が可能で安価であること、高周波領域で性能が良好であることなどに大きな特徴がある。このように、アモルファス磁性材料を線状化したのみでも多くの需要を期待することができることは、これからの磁性材料の応用は平板のみでないことの大きな証明といえる。

6.4.4 その他の応用

その他においてもそれぞれの磁性材料の開発、性能向上の達成により、新しくあるいはより多量の需要を惹起すると思われる分野も数多く報告されている。

その中に低キュリー温度の磁性材料を用いた生体の低定温加熱法がある。図 19 はその応用の一例であり、脳腫瘍手術時に患部にキュリー温度 42~43°C 程度の、高透磁率フェライト磁心に腐食のない金あるいは白金の小さな短絡環を施したものを埋め込み、外部より高周波磁場を印加することにより、鉄損と短絡環による銅損とを発生させて加熱し、キュリー温度以上になるとフェライトは磁性を失い発熱が停止するという動作により、近傍の温度を非接触でキュリー温度で定まる低定温に正確に保持し、腫瘍の再発を防ぐようにする方法である。本方式の有用性は動物実験により実証されており、口腔腫瘍その他の部所の癌治療への応用や、付加価値の高い植物の早期育成等への応用も考えられている。現在、このような使用に適した磁性材料の開発が望まれている。

次に、粉末磁性材料を任意形状の磁心に整形加工して用いる方法も将来の興味ある応用の一つである。一般にこれまでの磁気回路は、長手方向に磁気特性の良好な板状あるいは薄帯の材料で作製されていたが、近年非線形特性利用の機器では立体的な磁路接続が必要となる場合も多く、このように転移された双方の磁路を接続する任意形状の磁性材料の必要な場合も多くなっている。この

感温磁性材料と金属環よりなる加熱片

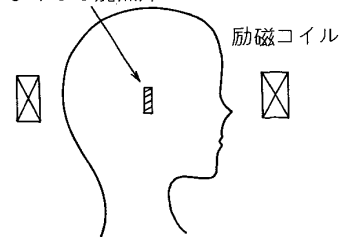
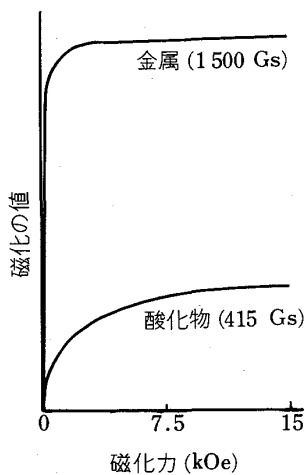


図 19 生体に対する低定温加熱の応用



	磁化の値 (Gs)	比 重	粘性 (mPa)
酸化物	415	1.30	22
金属-1	1500	1.70	18
金属-2	1500	1.60	—

図 20 金属磁性流体の特性

ような場合に、もし粉末磁性材料を整形して双方の磁路のアダプターとして用いることができれば便利である。現在、アモルファス磁性粉末と接着材との混合物を加圧整形して、希望する形状の磁心として用いる方法が実験的に試みられているが、現在形状の任意性には改良の余地があり、また整形後の磁気特性も母材の特性に多少劣ることや、加圧に大きな力を必要とするなどの欠点も有している。このような欠点の改良により広い需要を獲得できるものと考えられる。

この外に、磁束密度 B_m の大きい磁性流体もまた大きな需要の見込みを有している。図 20 は最近報告されたもので、エステル系界面活性剤を適当な濃度に調整した媒体中で、有機金属化合物を熱分解することにより合成した金属磁性流体の磁気特性の例である。比較のために示したこれまでの金属酸化物磁性流体に比し 3 倍以上の大きな B_m の値を示しており、かつ粘性が低いという特徴をも有している。磁性流体はアクチュエーターとしての使用にも大きな需要を蔵しており、磁束密度 B_m の値が向上することによりその応用は拡大すると考えている。

磁性流体のうち、温度によりその磁気特性を変える感温磁性流体も興味ある応用の一分野である。図 21 はその応用の一例であり、被測定管路 T の表面 No. 1 部に一定量の感温磁性流体を塗布し、これを励磁巻線 N_1 で表面より励磁し、測定用巻線 N_2 でその温度に比例した誘起電圧を測定し、表示器で温度を表示するようになっている。図中 No. 1' と記し点線で囲った部分は、巻線のみ誘起電圧による測定温度を補償する部分である。複

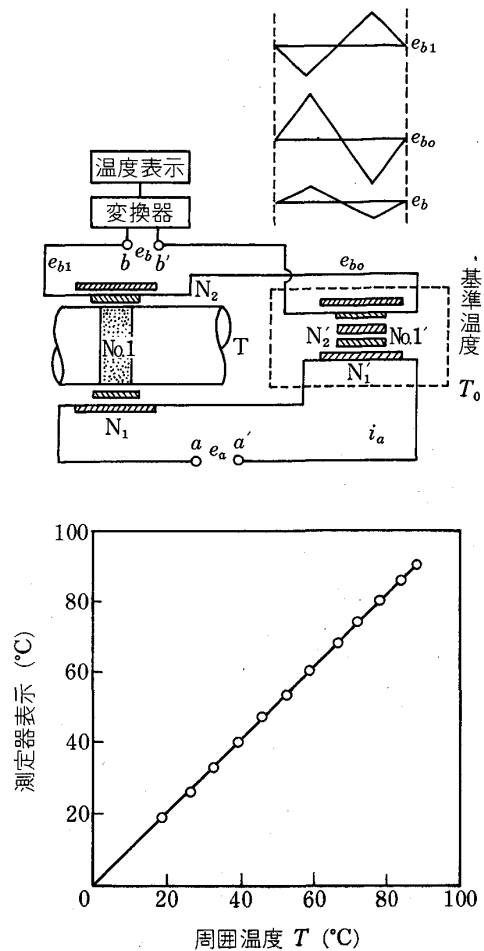


図 21 感温磁性流体を用いた温度計測の基本構成と温度計測器の特性例

雑な物体表面等の温度測定に利用でき、感温磁性流体は使い棄てとなる。

この外にも、比較的磁束密度 B_m の大きい感温磁性材料が得られれば、この磁性流体と永久磁石を組み合わせる機器の運転時の廃熱を除去する冷却系にも応用できよう。更に電子機器の小型化、高性能化に伴い、高周波領域で使用する磁性素子のマイクロ化及び集積化も今日の磁性材料開発の導標の一つとなつている。このためには、それぞれの素子が極力マイクロ化なされること、それぞれが正確な L の指定値を有し、かつ量産化により安値に供給され得ること等の問題があり、現在多くの努力が傾注されている。

7. あとがき

以上、磁気応用の最近の研究動向を勘案しつつ、どのような磁気特性を有する磁性材料が早急な開発を望まれているのか、あるいは開発の進められているアモルファス磁性材料はどのような分野に適合すると考えられるのか等について、情報素子を除いた、エネルギー変換、制御、計測の分野について代表的ないくつかの例をあげて

説明した。以上の外にも、磁性材料の形状と特性、磁気素子の集積化、磁性流体の特性改善と新しい応用の可能性など、磁気応用の進展を促す多くの問題が現在発展途上にあることについて概要を述べた。

ここに述べられた磁気特性の改善への需要者側からみた要望が少しでも実現されれば、その工業需要への波及効果はかなり大きいものがあると考えられ、また磁性材料を使用する立場にある筆者等も、これらの要望が少しでも早く実現してくれることを希望しているものである。

文 献

- 1) 吉田和芳, 小川隆司, 松浦邦之: 高岳レビュー, **29** (1982), p. 10
- 2) 山口正洋, 菊地新喜, 村上孝一: 電気学会論文誌, **102-B**, (1982), p. 505
- 3) M. YAMAGUCHI, K. MIZUNO and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-18 (1982), p. 1403
- 4) 大村俊次, 池田英男, 大田美裕, 林 哲: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-83-63 (1983年5月)
- 5) Allied Corporation: METGLAS Magnetics Properties
- 6) 村上孝一, 渡辺忠昭: 電気学会磁気応用研究会資料 AM-79-57 (1979年11月)
- 7) K. MURAKAMI, S. KIKUCHI and T. WATANABE: IEEE Trans. Magn., MAG-16 (1980), p. 931
- 8) K. MURAKAMI, S. KIKUCHI, T. WATANABE and H. MIYAZAKI: IEEE Trans. Magn., MAG-18 (1982), p. 1743
- 9) K. MURAKAMI, S. KIKUCHI, K. MURAKAMI and T. WATANABE: IEEE Trans. Magn., MAG-19 (1983), p. 2085
- 10) S. KIKUCHI, Y. SAKAMOTO and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-20 (1984), p. 1792
- 11) 坂本禎智, 村上孝一, 菊地新喜: 電子通信学会技術研究報告 CAS 84-149, 84, 229, 65 (1984年12月)
- 12) 坂本禎智, 村上孝一, 菊地新喜: 電学論B, **105** (1985年4月) p. 339
- 13) Y. SAKAMOTO, K. MURAKAMI and S. KIKUCHI: IEEE Trans. Magn., MAG-21 (1985), p. 1744
- 14) 坂本禎智, 村上孝一, 菊地新喜: 電学論B, **106** (1986年6月) p. 487
- 15) 村上孝一: 新しいアプローチによるローカルエネルギー利用システム, OHM (1984), p. 45
- 16) 一ノ倉理, 菊地新喜, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **7** (1983), p. 135
- 17) O. ICHINOKURA, S. KIKUCHI and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-19 (1983), p. 2103
- 18) 一ノ倉理, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **9** (1985), p. 247
- 19) O. ICHINOKURA and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-21 (1985), p. 1750
- 20) 一ノ倉理, 前田 満, 高橋宏郎, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **10** (1986), p. 351
- 21) O. ICHINOKURA, M. MAEDA, H. TAKAHASHI and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-22 (1986), p. 538
- 22) 村上孝一: 電通誌, **64** (1981), p. 472
- 23) 村上孝一: 磁気応用工学 (1984) [朝倉書店]
- 24) K. SEKI, J. SHIDA and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-14 (1978), p. 969
- 25) K. SEKI, J. SHIDA and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-16 (1980), p. 707
- 26) K. SEKI, J. SHIDA, H. MATSUKI and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-18 (1982), p. 1478
- 27) 沼沢 茂, 村上孝一, 北條博行: マグネティックス研究会資料, MAG-84-146 (1984)
- 28) 堀崎一弘, 山口正洋, 村上孝一, 北條博行: 第10回日本応用磁気学会学術講演概要集, 7aC-5 (1986年11月)
- 29) 村上孝一, 松本英敏: マイクロインダクタンス素子の実現に関する基礎的検討 (電気関係学会東北支部連大編), 1C4 (1983年8月)
- 30) H. MATSUKI and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-21 (1985), p. 1738
- 31) 松本英敏, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **9** (1985), p. 255
- 32) H. MATSUKI, K. MURAKAMI and T. YAMAMOTO: IEEE Trans. Magn., MAG-22 (1986), p. 415
- 33) 松本英敏, 村上孝一, 山本孝幸: 日本応用磁気学会誌, **10** (1986), p. 343
- 34) H. MATSUKI, K. MURAKAMI and H. NIIZUMA: IEEE Trans. Magn., MAG-18 (1982), p. 1788
- 35) 松本英敏, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **8** (1984), p. 225
- 36) 村上孝一, 松本英敏: ソフトヒーティングの生体治療への応用, 電学誌, **104** (1984), p. 99
- 37) H. MATSUKI and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-21 (1985), p. 1927
- 38) H. MATSUKI, K. YAMASAWA and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-13 (1977), p. 1143
- 39) H. MATSUKI, T. WATANABE and K. MURAKAMI: IEEE Trans. Magn., MAG-15 (1979), p. 1812
- 40) 岡沼信一, 一ノ倉理, 村上孝一: マグネティックス研究会, MAG-86-106 (1986年10月)
- 41) 若山勝彦, 小田川良基, 成宮義和, 奥谷克伸: 第10回日本応用磁気学会学術講演概要集, 4p D-12 (1986年11月)
- 42) 早坂明夫, 村上孝一, 北條博行: 第10回日本応用磁気学会学術講演概要集, 7aC-6 (1986年11月)
- 43) M. KOYANAGI, H. HOJO, A. NAGAMUNE and J. OGATA: Trans. of the Asme Journal of Energy Resource's Technology, **105** (1983), p. 469