

磁気シールド材料と測定評価法

岡崎靖雄

Yasuo Okazaki

岐阜大学工学部 電気電子工学科 教授

Magnetic Shielding Materials and Measurement of Shielding Effectiveness

1 はじめに

磁気シールドは対象とするものを磁性体で取り囲むことにより、外部からの、または外部への磁界の影響を小さくすることである。すなわち、磁性材料の特性を利用し周りにある磁気を材料に集め、シールド空間の磁界を低減させる技術で、図1に示すように、外部の磁界をシールドし低磁界空間を得る受動型シールド(a)と磁界発生源からの磁界を外に漏らさない能動型シールド(b)がある。空間を部屋全体とするシールドルームから、身近に目にするビデオなどの磁気ヘッドやTVブラウン管内部にも磁気シールドは応用されている(注：ここでは電気工学の用語に従い磁界を用いる。物理学系分野では磁場が使われるが、英語ではどちらもfieldである)。磁気シールド用材料には強磁性材料(軟質磁性材料)が用いられる。強磁性材料の持つ高透磁率特性を利用し、シールドすべき磁束を材料に集め、空間磁界を低減させる。

我々の生活場では、電力送配電線からの交流磁界、電気機器からの交流磁界および高調波磁界、また電車、自動車からの変動磁界などが複合され、都市磁気雑音を形成する。

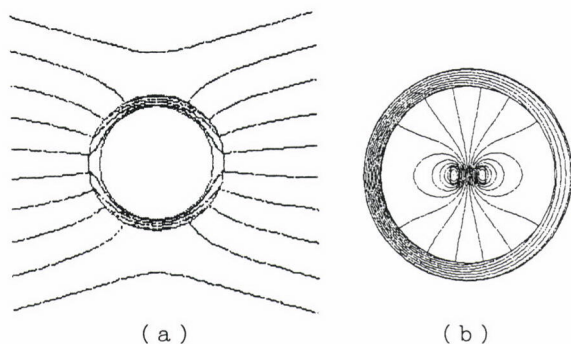


図1 磁気シールドの形態
(a)受動型シールド、(b)能動型シールド

これらの磁界はテレビの色ずれや歪みに見られるように電子機器に障害を与える。近年、超電導磁石の応用機器の普及や高圧送電などで磁気環境の悪化、多様化が進む一方、SQUID(超電導量子干渉素子)生体磁気計測器やCRT機器、電子線描画装置の普及により微弱から低磁界空間の必要性が増している。図2はMRIの設置台数推移を示すが、このうち3/4が超電導タイプである¹⁾。このように、磁気応用技術の発展にともなって磁性材料による磁気シールド技術がますます重要になってきている。

磁気シールドは直流磁界(静磁界)から10kHz未満の周波数域の磁界を対象とし、10kHz以上は電磁波シールドとして扱うのが一般的であるが、特に周波数が3kHz以下のELF帯(極低周波)のシールドが重要である。交流磁気シールドでは材料の磁気特性だけでなく、交流磁界により渦電流が生じるため電気的特性も考慮する必要がある。一方、磁気シールド材料のシールド性能の測定、評価については、規格化や標準化がなされていないのが現状である。

本稿では、磁気環境と磁気シールド材料およびその性能評価について、最近の試験結果を含めて述べる。なお、マイスナー効果を利用する超電導体による磁気シールドは一般的でないため除いた。

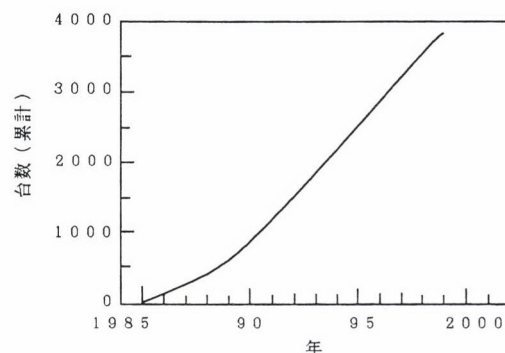


図2 MRI設置台数(累計)

2 磁気環境と磁気障害

地球上には地磁気があり、微変動があるものの日本では約 $50\mu\text{T}$ ($1\text{T}=10^4\text{G}$, $1\mu\text{T}=10\text{mG}$)の静磁界である。鉄材の残留磁界、永久磁石やMRIの電磁石の磁界も静磁界である。静磁界源が移動する場合は変動磁界になる。エレベータや車両などからの磁界は変動磁界に、送配電線や各種電気機器からの磁界は交流磁界になる。これらの磁界発生源が重なり合い、磁気環境を形成する。

一般に地磁気は除外して考え、磁気環境は磁気発生源の磁界強さと磁気発生源からの距離によって決まる。都市部での磁気環境は、地下鉄や電車、ビルの受電装置、各種電気機器からの漏れ磁界が影響し最大 $1\mu\text{T}$ 以上に達する都市磁気雑音となる。都市磁気雑音は都市の活動時間帯で大きく異なり、深夜(午前1時～4時)では非常に小さくなる(図3²⁾)。都市磁気雑音には交流磁界、変動磁界が雑多に含まれており、時間的にもランダムである。

磁界は、ビオ・サバルの法則より、微小電流 I からの距離 r に対して I/r^2 に比例して減少し、無限長の直線導体では I/r で減少する。したがって、電流源と電流値と距離が決まれば磁界強さが計算できる。電流源が複数の場合はベクトル合成するが、交流磁界では各電流の位相を考慮する必要がある。図4に、今まで測定されている各種発生源か

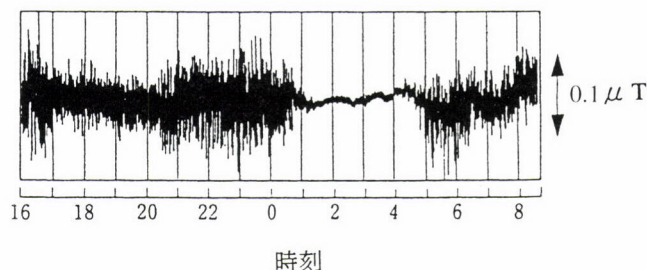


図3 都市磁気雑音の時間変化

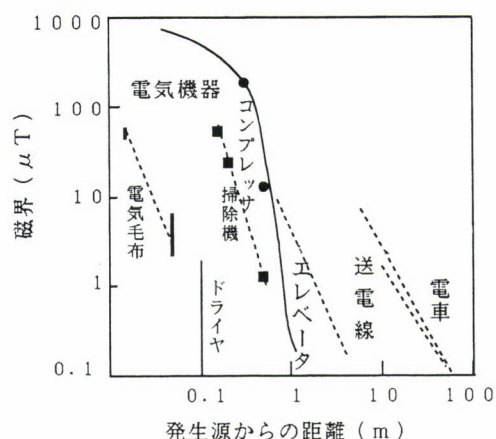


図4 磁界発生源からの磁界強さ

表1 各種精密機器の設置環境基準

機器名	磁界 (μT)
SQUID磁束計	< 0.001
電子顕微鏡 (SEM, TEM)	≤ 0.3
半導体製造装置	≤ 0.3
E B 描画装置	≤ 0.3
M R I	$\leq 0.3-2$
N M R	≤ 5
C T スキャナー	≤ 100
ペースメーカー	≤ 500

らの平均的な磁界の距離依存性をまとめて示す³⁾。磁界発生源が特定できる場合は、発生源からの距離によって磁界環境が推定できる。一方、この距離減衰特性から、磁界発生源から距離をおけば磁界の低減が見込め、磁気障害を避けられる。しかし、距離を確保できない場合は、磁気シールドを行う必要がある。

電子機器に影響を与える磁界環境条件は、表1にカタログや文献からまとめた設置基準を示すが⁴⁾、心臓ペースメーカーが $500\mu\text{T}$ (5G)、TVブラウン管で $3\mu\text{T}$ 、CRTで $1\mu\text{T}$ 程度とされ、さらにSQUIDによる磁界測定環境は変動磁界で $10^{-3}\sim 5\mu\text{T}$ 以下とされる。磁界環境をこれらの数値以下にするには、シールドを行う必要がある。

3 磁気シールド材料と磁気特性

3.1 磁気シールド材料

磁気シールド材料には周りの磁気を集め材料の中を流れ易くする特性である透磁率 μ が必要で、高い透磁率を示す純鉄板(電磁軟鉄)、電磁銅板、パーマロイ板、アモルファス薄帯などが用いられる。透磁率は通常、比透磁率 $\mu_r (= \mu / \mu_0)$ 、 μ_0 : 磁気定数または真空の透磁率)で表され、磁界強さと周波数の関数となる。材料が磁気飽和すると磁気漏れが生じるため、飽和磁束密度 B_s の高い材料や積層したり板厚の大きな材料を使用する。シールド体を多層構造にする多重シールドはシールド性能を飛躍的に高め、極微弱磁界のSQUID使用空間を得るためによく使用される。

磁界の周波数が高くなると磁気特性だけでなく導電率 $\sigma (= 1/\rho)$ 、 ρ : 抵抗率)も考慮する必要がある。交流磁界のような磁界の変動に対抗して、変化を起こさせないように材料に渦電流が流れ、渦電流により誘起される磁界により、磁気シールド効果が出る。渦電流は周波数 f が大きくなると材料表面に集中する。この厚み、 $\delta = (1/\pi\sigma\mu f)^{1/2}$ が表皮深さ(スキンドープス)で、材料板厚以上になると渦電流による

シールド効果は得られない。周波数の高い磁界では、軟質磁性材料だけでなく σ の大きな銅やアルミニウムも使用されるが、板厚を大きくするため特殊な用途のシールドに限られる。

表2⁵⁾に、代表的な磁気シールド材料の μ 、 B_s 、 ρ (抵抗率)の特性を示し、次に各材料を概説する。

3.1.1 電磁軟鉄

純鉄系の磁性材料で、JIS規格SUYPでは、厚み0.6mmから規定されているが、電磁厚板とも呼ばれ250mm厚まで市販されている。高純度鋼を用い高温焼鈍や圧延法の改善により、高 μ の材料も開発されている。純鉄系のため B_s が高く、発生磁界の大きな超電導応用機器のシールド材としてMRIマグネットのセルフシールドやルームシールドに用いられている。

3.1.2 電磁鋼板

電磁鋼板は、トランスやモータの鉄心に広く用いられる、0.2~0.5mm板厚の0~3%Si鋼板で、磁気シールド材料としても一般に広く使用されている。電磁鋼板の磁気特性はSi量による磁気物性値と結晶組織と方位で決まる。Si量が増加すると B_s が低下し磁気異方性定数 K_1 が小さくなる。透磁率 μ は B_s^2/K_1 に比例し、高 μ が必要な磁気シールド材には3%Si鋼が用いられる。電磁鋼板は板厚、鉄損、磁束密度で分類、規格化され、方向性と無方向性の電磁鋼板に大別される。方向性電磁鋼板は磁化容易軸である<100>方位が鋼板の圧延方向に揃っており、圧延方向の磁性が優れ高透磁率を示す。したがって、方向性電磁鋼板では、鋼板の磁化容易軸とシールド磁界の方向との組み合わせによって、シールド性能は大幅に変動する⁶⁾。シールドルームのように大面積のシールドに方向性電磁鋼板を用いる場合は、磁化容易軸を互いに直交させて積層し等方性の磁気シールド材料にする⁷⁾。無方向性電磁鋼板は磁化容易軸がほぼランダムでシールド磁界の方向をあまり考慮しなくてもよ

い。

3.1.3 パーマロイ合金

パーマロイは35~80%Ni-Fe系合金の高透磁率材料で、さらにMo、Cu、Crなどの元素を合金化して特性を改善している。シールド用材料には、78%Ni系のPC、45%Ni系のPBが使用される。PCパーマロイは低 B_s で、 $K_1=0$ 、飽和磁歪 $\lambda_s=0$ に制御され高 μ を示し、微弱磁界シールド用に使用される。しかし、磁性焼鈍条件は厳しく、水素中1100℃以上の高温焼鈍や冷却速度制御が不可欠である。従って、寸法、形状が限られ、大面積を必要とする磁気シールドの場合は接着を行いパネル化している。歪により透磁率は大幅に低下するため、加工後は焼鈍が必要になる。

3.1.4 アモルファス合金

アモルファス材料は非晶質で結晶磁気異方性がなく、磁気シールド材料としては、急冷凝固法による20~40 μ m厚のアモルファス薄帯や箔片が使用される。成分を自由に選べることから、 K_1 、 λ_s を小さくしたCo系の高 μ 材と、 B_s が1.6Tと大きいFe系があり、それぞれの特徴を生かして使用されている。アモルファス材料は焼鈍により高 μ 化とともに脆化するため、シールド用には通常焼鈍をせず用いられる。また、アモルファス薄帯は薄帯幅が10cm前後と小さく、幅広の磁気シールドに使用される場合は、接合、積層する必要がある。

3.2 シールド材料の透磁率特性

磁気シールド材料の透磁率特性の例を図5⁸⁾に示す。純鉄系の電磁軟鉄板(Fe)、3%Si鉄の方向性電磁鋼板(GO)、高透磁率方向性電磁鋼板(HIB)、3%Si無方向性電磁鋼板(NOH)、0.3%Si無方向性電磁鋼板(NOL)、78%Niのパー

表2 磁気シールド材料の特性例

材 料		$\mu_{\max}$ (10^3)	B_s (T)	ρ ($\mu\Omega\text{cm}$)	備考
電磁軟鉄	厚板	0.1-15	2.1	15	
電磁鋼板	方向性	60-90	2	46-50	圧延方向
	無方向性	3.5-13	2-2.15	14-60	
パーマロイ	PC	40-250	0.6-0.8	55-60	78Ni焼鈍後
	PB	30-70	1.4	45	45Ni焼鈍後
アモルファス	Co系	20-50	0.5-0.8	115-135	as cast
	Fe系	10-40	1.3-1.6	130-140	as cast

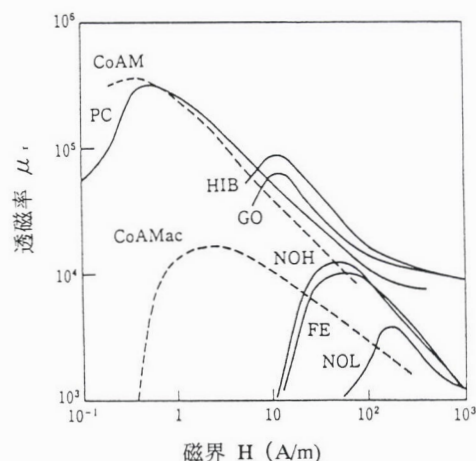


図5 各種磁性材料の透磁率曲線

マロイ板(PC)、Co基アモルファス薄帯(CoAM、CoAMac)の透磁率特性(μ -H特性)で、PC、CoAMは磁性焼鈍を行った後の特性、CoAMacは急冷凝固したアモルファス薄帯を鑄造状態のままで測定した結果で μ は磁性焼鈍後の1/10以下になる。この原因は急冷凝固による残留歪みによるもので、歪みにより μ は急激に低下する。歪取焼鈍することにより μ は向上するが、アモルファスは脆化するため、磁気シールド材料として使用する場合は鑄造ままの状態で使用される。図からわかるように μ は最大透磁率 μ_m をもつので、シールドする磁界に応じて μ が最大となる材料を選択するのが基準となり、はずれる場合は多重シールドを用いる。また、曲げや穴あけなどの機械加工歪みも透磁率を急激に低下させ、パーマロイのように μ の高い材料ほど劣化は大きい。

4 磁気シールド性能評価

4.1 解析式

磁気シールド性能 S はシールドすべき磁界強さを H_e 、シールドされた磁界強さを H_i とすると、 $S = H_e/H_i$ で表され、dB単位では、 $S = 20\log H_e/H_i$ で表される。静磁界シールドでは、シールド材料の板厚 t 、比透磁率 μ 、とすると、 $S_{dc} = 1 + A\mu t/D$ (A : 定数)で表され、電磁理論から径が D の球と無限円筒では、 A はそれぞれ $4/3$ と 1 になり、一辺 D の立方体では $A = 0.96$ になる。 μ は磁界強さに依存することに注意すれば、 S_{dc} の実験値は $\mu t/D$ でよく説明できる。交流磁界シールド性能 S_{ac} は、静磁界シールドにスキンドープ δ の表皮効果を考慮し、電磁理論から低周波域では、 $S_{ac} = S_{dc} \cdot \delta/2t (\cosh 2t/\delta - \cos 2t/\delta)^{1/2}$ となる⁹⁾。

4.2 測定評価法

現在、材料の磁気シールド性能測定評価法は標準化されていない。シールド磁界の周波数は低く波長が長いので、有効な小試料の試験が困難であること、材料の透磁率が磁界と周波数依存性を持ち焼鈍や加工により一定しないこと、接合部での磁束漏れが不可避である、などが原因である。そこで、磁気シールド材料で円筒や立方体のシールド体を作製し、均一磁界中に置きシールド性能を評価する方法が一般的で、ヘルムホルツコイルの均一磁界にシールド体を設置するASTM¹⁰⁾法もこの方法である。しかし、シールド材料は加工を受けると μ が劣化し、シールド体の μ は素材特性に比べて低下し数分の1から数十分の1になる場合もある。この劣化は μ が高い材料程大きくなり、素材シールド性能を測定出来ない。

無限平面を仮定して磁界の廻り込みを抑え、シールド板の両側に微小発信、受信装置を設置し測定する方法もある

表3 3次元FEM磁界解析結果

	厚さ (mm)	H_e (μT)	S (dB)	備考
3D-FEM	0.70	2.5 10.0	21.6 21.6	
実験 1	0.7	2.5 10.0	13 15	稜部接合 目地無し
実験 2	0.7	2.5 10.0	19 21.5	稜部接合 目地処理

が、印加磁界 H_e は均一でなく $S = H_e/H_i$ の評価があいまいになる。

4.3 数値計算

磁気シールド性能を数値計算で求めることは、有限要素法(FEM)などにより広く行われているが、要はマックスウェルの電磁気方程式をいかに精度よく短時間に解くかにある。一般に静磁界シールドでは解析式が良く適用でき、FEM磁界解析による三次元シミュレーションの結果は実験結果と良く一致する。交流磁界のシールド評価は特殊な場合を除き余りされておらず、精度、費用効果も含めこれからの課題である。FEMによるシールド計算では、シールド材料の板厚が1mm以下に対して空間は1m以上のサイズとなり、計算処理が難しくなり、材料と空間サイズの計算法が種々工夫されている。しかし、板厚方向の磁気特性などの材料特性入力データの精度、ギャップを含め接合部の影響、等の課題が残されている。交流磁気シールド性能 S を3次元FEM解析で求めた例¹¹⁾を表3に示す。シールド材料は方向性電磁銅板(35G)を2枚交互積層し、次節4.4と同じ条件の45cm立方シールド体を構成し接続部のギャップは考慮せず、節点数5065でA- ϕ 法で50Hz磁界印加の場合で計算している。解析空間は1mとし、板厚要素は数10 μm 厚に分割、 $\langle 110 \rangle$ 方位の特性を使用している。結果は目地処理を行った実験2(図6-a)をよく説明している。

4.4 シールド材料の測定評価試験

各種磁気シールド材料のシールド性能の基礎特性を得るため、性能評価試験を(社)日本建築学会の電磁環境小委員会で行っている¹²⁾。素材シールド特性を比較測定するため、出来るだけ加工の影響を避けるように大面積の平板シールド材を用い、シールド体は密閉型六面体とし稜部はPCパーマロイアングルで目地処理した。磁界検出はオフライン磁界積算計を用い孔加工を避けている¹³⁾。対象材料は、電磁銅板3種、PCパーマロイ、アモルファス箔および薄帯3種、ナノ結晶薄帯および比較材の銅板、アルミニウム板で、シー

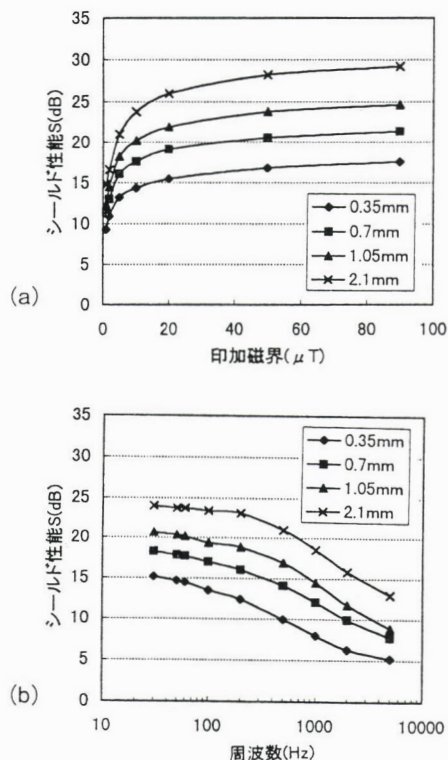


図6 方向性電磁鋼板の積層板厚とシールド性能
(a)印加磁界依存性(磁界周波数50Hz)
(b)周波数依存性(印加磁界10μT)

シールド材料厚みが同一になるよう積層している。材料の磁気異方性を考慮し、積層する場合は90°廻し積みを行い異方性の影響を避けた。アモルファスおよび微結晶磁性薄帯は、積層表面をフィルムやアクリル板でラミネートしている。これらのシールド体を同様磁界中に配置し、表4の試験条件でシールド性能を評価している。結果をまとめ中であるが一部を紹介する。方向性電磁鋼板の積層板厚効果の例を、図6-aに磁界強さ依存性を、図6-bに周波数依存性を示す。また、図7に外部磁界依存性を、方向性電磁鋼板(GO)、無方向性電磁鋼板(NO-H、M)とパーマロイ(PC)および比較材(Cu、Al)で示す。これらの結果は同一サイズのシールド

表4 磁気シールド性能測定条件

シールド磁界	磁界強さ 1~100 μT (10mG~1G) 周波数 50~5000 Hz
励磁方法	1.82m矩形2ベアコイル 印加磁界 ±3% (1m立方)
シールド体	六面体 450mm立方体 稜部PCパーマロイアングル目地処理
磁界計測	シールド体中央磁界 3軸計測 $B = (B_x + B_y + B_z)^{1/2}$ 計測器: 3軸オフライン磁界積算計

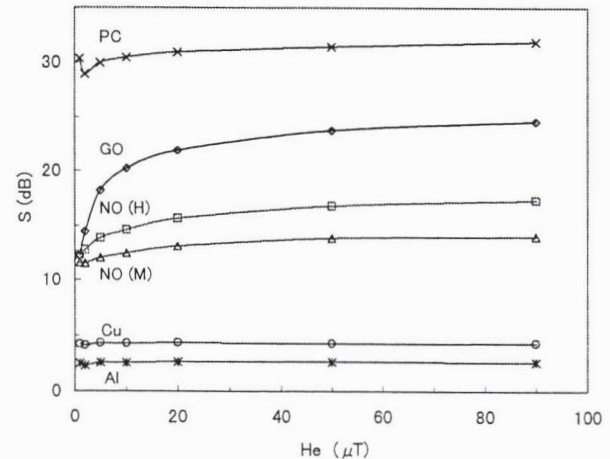


図7 各種磁性材料の磁気シールド性能
(板厚1mm、磁界周波数50Hz)

体の性能比較であり、現在、素材の磁気特性で定量化を図るため平板シールド材での磁気特性を測定予定である。素材のシールド性能と磁気特性が対応できるデータ蓄積を図って行く予定である。建築環境分野だけでなく、電力や電機などの分野にも利用できるものになろう。

5 おわりに

磁気シールドとシールド材料の性能評価について概説した。今まで述べてきたように、磁気シールド材料の性能評価は難しい上に、シールド性能が達成できれば素材は何か問わなくてもよいのではないかと議論もある。この議論は現実のビジネスに関連し難いところであるが、技術である以上合理的な磁気シールド技術設計が求められ、素材選択の標準化が問われる。そのためには、軟磁性材料の磁気シールド材料としての諸特性の定量化が必要となる。数μT磁界下での透磁率の周波数特性や応力による劣化の定量化などの基礎データを、切出し試験片だけでなくシールド材料形状で測定評価し、蓄積していくことが必要であろう。

最後に、環境電磁界としての低周波磁界は小児白血病や脳腫瘍の発生要因として問題視されている¹⁴⁾。この問題について、現在WHO(世界保健機構)がEMF(Electromagnetic Field: 電磁界)プロジェクトを組み40数カ国で疫学調査を含め調査中で、2001年には報告が出る予定である¹⁵⁾。日本でも電気学会はじめ活発に情報の公開が図られており、科学的に対応することが望まれる。

参考文献

- 1) 新医療, 118, 6 (1999)
- 2) 石川 登: 電気学会誌, 116, 4 (1996), 204.
- 3) 石川 登: 日本建築学会環境工学委員会電磁環境小委

- 員会，第3回シンポジウム予稿集，(1997)，43.
- 4) 稲本金也：環境磁場の計測技術，日本建築学会，(1998)，19.
- 5) 奥野功一，岡崎靖雄：空気調和・衛生工学，74，1 (2000)，15.
- 6) 岡崎靖雄，鷹見重幸，佐々木浩志，柳瀬俊次：日本応用磁気学会誌，23 (1999)，1365.
- 7) Y. kazaki, M. Fujikura：Non-linear Electromagnetic Systems, ISO Press, Amsterdam, (1996)，644.
- 8) 岡崎靖雄：電気学会誌，116，4 (1996)，208.
- 9) A. Mager：J. Magn. Magn. Mat.，2 (1976)，245.
- 10) ASTM，A698/A698M-92 (1992)
- 11) Y. Okazaki：Non-linear Electromagnetic Systems, ISO Press, Amsterdam, (1998)，807.
- 12) 岡崎靖雄，佐竹弘之，山崎健一：第11回電磁力関連のダイナミックス，日本AEM学会，講演論文集，(1999)，320.
- 13) 山崎健一，矢崎秀明，佐竹弘之，岡崎靖雄：電気学会電磁環境研究会資料，EMC-99-2 (1999)，9.
- 14) 関根泰次：電気学会誌，119，5 (1999)，288.
- 15) 大久保千代次：私信，WHO International EMF Proj., 第3回研究調整委員会，(1999)
- (2000年2月29日受付)

ブックレビュー

図解・金属材料技術用語辞典 (第2版)

金属材料技術研究所編

2000年1月 日刊工業新聞社発行 (Tel.03-3222-7131)

●A5判 570頁 本体価格7,500円 (税別)

本辞典は、1988年初版が発行されて以来、1998年までの10年間にわたり9刷が発行され、好評のもと広く利用されてきております。しかし、この間の金属材料およびそのプロセス技術の進歩はめざましく、多方面から改訂の強い要望がありこの度、新しい用語を追加するなどし第2版が出版されました。

内容は5000語に及ぶ科学技術用語が五十音順に並べられ、その用語の英語と平均200字程度の解説が付されています。特に用語の解説は専門家でなくとも理解できるように留意し執筆されております。更に、文章では難解な場合は図や表を使用することにより、理解しやすくなっております。

上記のように、当辞典には大きな特徴があり、今後の金属材料技術の理解と発展に貢献が期待されます。

金属材料の技術者・研究者のみならず広く座右の書として利用される事をお勧めします。

(日本鉄鋼協会 下川成海)