

# 導電性ゴムの低周波領域における電磁波シールド効果 —電磁波シールド材料に関する研究—

上田直行\*・中村哲男\*\*・永田正典\*\*\*・倉田雄平\*\*\*\*  
古舘英俊\*\*\*\*・江口愼一\*\*\*\*

Effect of Electromagnetic Wave Shielding with Conductive rubber in Low frequency range

-Study on material of Electromagnetic Wave Shielding-

Naoyuki UEDA\*, Tetsuo NAKAMURA\*\*, Masanori NAGATA\*\*\*, Yuhei Kurata\*\*\*\*, Hidetoshi  
FURUSHIMA\*\*\*\*, Shinichi Eguti\*\*\*\*

これまでに開発した厚さ4mmの導電性ゴムは、100MHzから1GHzまでの高周波領域に対しては40dB以上の電磁波シールド効果が得られたが、10KHzから100KHzの低周波領域に対しては0dBであった。そこで、この導電性ゴム100gに鉄系金属であるアモルファス状のコバルト67gを配合したところ、低周波での近傍磁界源に対するシールド効果が厚さ2mmの場合7dB程度あらわれた。またこのコバルトアモルファスを配合した材料は、近傍電界源に対するシールド効果についても周波数範囲が30MHzから1GHzにおいて50dBと優れていることが分かった。

## 1. はじめに

電子機器類の電磁ノイズ防止対策のひとつとして、金属が多用されている。しかし金属は、電子機器のきょう体等には適しているものの、開閉部のパッキン等にはあまり向いていない。この金属の欠点を補うために、柔軟性に富んだ電磁波シールド材として、当センターとつちやゴム(株)が共同で、電磁波シールドゴム素材を開発した<sup>1)~3)</sup>。このシールドゴムは、100MHzから1GHzの高周波領域では40dB以上のシールド効果が得られたが、それ以下の低周波領域においては効果が得られなかった。そこで、10KHzから1MHzの低周波領域でもシールド効果が得られるような材料を、同じく当センターとつちやゴム(株)が共同で開発した。すなわち、当初開発したシールドゴムのベースに磁性材料を配合することにより、約6dB以上のシールド効果が得られた。本報では、この磁性材料としてアモルファス状のコバルトが有効であることについて報告する。

## 2. 試験方法

電磁波シールドゴムのシールド(遮蔽)効果は、電波暗室に設置された近傍電磁界によるアドバンテスト法(株)アドバンテストTR17301A, R3361A等)で測定を行った。また、抵抗率は、四端子法(三菱化学(株)MCP-T600)により測定した。

\* 電子部  
\*\* 情報デザイン部  
\*\*\* 材料開発部  
\*\*\*\* つちやゴム株式会社  
問い合わせ先E-mail:nueda@kmt-iri.go.jp

## 3. 試作条件

ゴムの基本配合は、合成ゴム100gを母体に亜鉛10g、導電性カーボンブラック50g、硫黄4g及びカーボン繊維50gが主な材料であるが、その他に軟化剤(ステアリン酸)1g、加工助剤5g、加硫促進剤4g及び老化防止剤2.5g等が添加されている(以後は、このゴムを「基本配合ゴム」と呼ぶ)。この基本配合のゴムに更にコバルトアモルファス67gが配合されたゴムを試作した(以後は、このゴムを「アモルファス配合ゴム」と呼ぶ)。このゴムの寸法は、厚みが2mmで200mm×200mmとした。

## 4. 試験結果及び考察

図1及び図2は、それぞれ「基本配合ゴム」及び「アモルファス配合ゴム」の電磁波シールド効果を示している。これをみると、問題としている周波数範囲が10KHzから100KHz及び100KHzから1MHzの低周波における電磁波シールド効果(磁界源による)は、「基本配合ゴム」が0dBであるのに対して、「アモルファス配合ゴム」は約6dBが得られた。また、中域の周波数帯域である1MHzから100MHzの特性は、電界源がどちらも約50dBであるのに対し、磁界源では「基本配合ゴム」が最大で約6dBであり「アモルファス配合ゴム」が最大で約17dBであった。すなわち、10dBほど「アモルファス配合ゴム」が「基本配合ゴム」よりも高い効果が得られた。さらに、高周波領域である100MHzから1GHzの特性は、電界源において「基本配合ゴム」が約30dBから45dBであるのに対して、「アモルファス配合ゴム」は全帯域において約50dBが得られ、また磁界源において「基本配合ゴム」が最大で約30dBであるのに対して、「アモルファス配合ゴム」は最大で約50dB

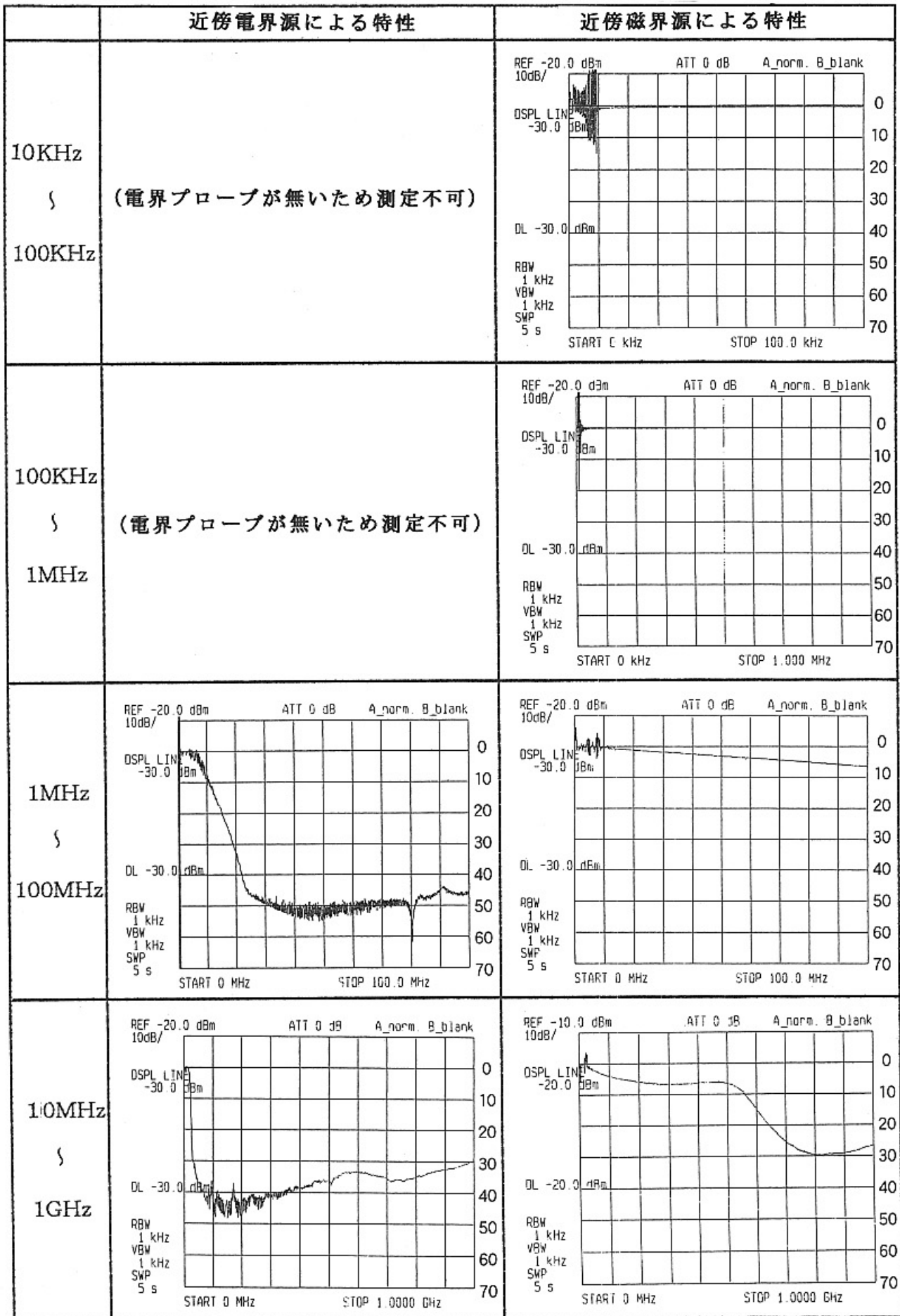


図1 「基本配合ゴム」の電磁波シールド効果

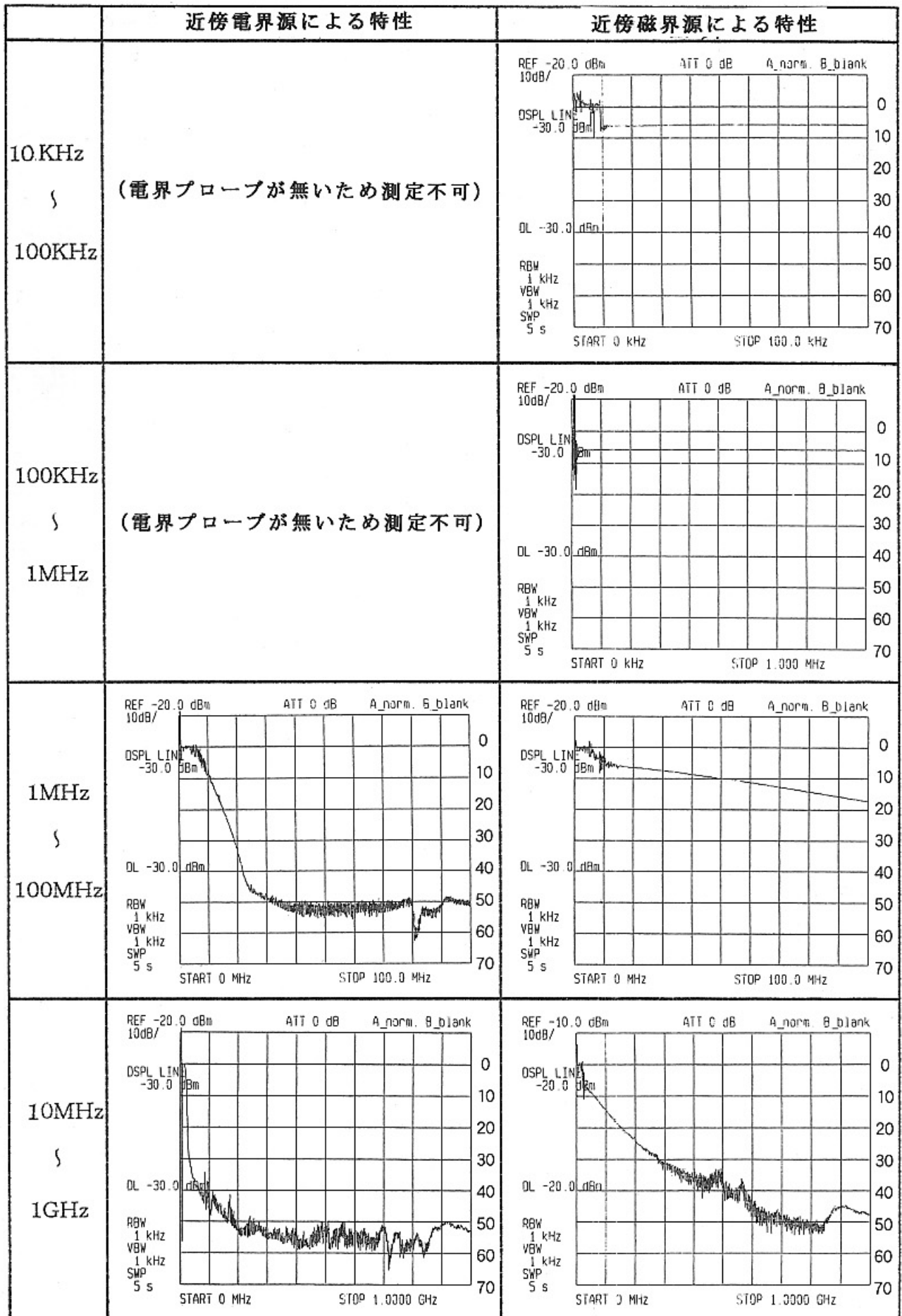


図2 コバルト「アモルファス配合ゴム」の電磁波シールド効果

が得られている。すなわち、10KHzの低周波から1GHzの全体域をみても、「アモルファス配合ゴム」のほうが「基本配合ゴム」よりもよい電磁波シールド効果が得られている。

以下では、アモルファスを配合すると、なぜこのように電磁波シールド効果がよくなったかについて考察する。そのひとつは、直流に対する抵抗率が低いことがあげられるので、その値を比較すると、例えば「基本配合ゴム」が $0.5867\Omega\cdot\text{cm}$ に対して、「アモルファス配合ゴム」が $0.6114\Omega\cdot\text{cm}$ で若干むしろ悪い特性となった。これまで多くの導電性ゴムについて試験した結果から、一桁以上の抵抗率の差があれば、シールド効果に大きい影響が表れるが、この程度の差ではほとんど影響は無いと言える。実際、「アモルファス配合ゴム」の方が「基本配合ゴム」よりもシールド効果は高く出ている。

つぎに、アモルファスの物性は、他の物質では得られない以下の特徴がある。

- ①図3は、結晶とアモルファスの違いをパチンコ玉の例で表したものである。結晶は最もちゅう密（最密充てん）構造であり、アモルファスはランダムなちゅう密（密充てん）構造を示している。量子論によれば、原子が規則的に並んでいる場合には、電子の波動性により電子は抵抗なく流れる。すなわち、原子の並びに乱れがあると、格子振動の原因となり、電子が散乱を受けることになる。従って、結晶の方がアモルファスよりも電気伝導率がよいことになる。<sup>4)7)</sup>
- ②長距離でのアモルファスでは、周期性が完全に消失している（長距離秩序）が、短距離での秩序は保っているので、例えばFe<sub>3</sub>Pでの最隣接原子間距離は、アモルファスが2.61Åに対して結晶が2.68Å等となっておりほとんど差がない<sup>8)</sup>。
- ③結晶構造は、結晶間に粒界が出来るが、アモルファス

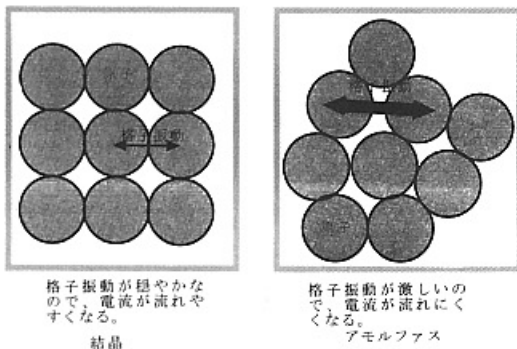


図3 原子の並び方と伝導率の関係

構造には粒界は存在しない。このことは、結晶内では電子が抵抗なく流れても、粒界で抵抗があるために、電子の流れはスムーズに流れなくなることを意味するので、アモルファス構造の方が結晶構造よりも電気伝導率がよいことになる(図4)。磁性材料の観点からは、鉄、コバルト及びニッケル等の強磁性金属元素からな

る結晶に磁界をかけると、磁区の移動や磁気モーメントの回転が、粒界によって妨げられる。しかし、鉄、コバルト及びニッケル等の強磁性金属元素にシリコン等の半金属、炭素及びリンを混合したアモルファス金属は、原子が連続でつながっているため、高透磁率の材料を作ることができる<sup>6)</sup>。

以上の3点を総合的に考えると、アモルファスは、電磁気に対して電氣的伝導性や磁氣的特性は、結晶性材料

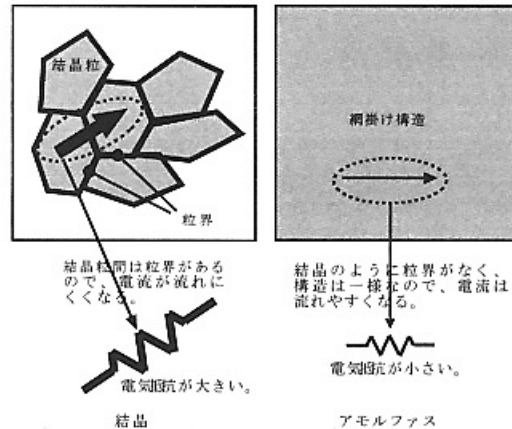


図4 結晶粒界と電気伝導率の関係を示すモデル

よりも優れているということが出来る。このような理由から、高周波特性をもつ導電性ゴムに、アモルファス状のコバルトを添加することで、低周波における電磁波に対してもシールドの相乗効果が現れたということが出来る。このことは、8属から始まる4周期目の結晶性の鉄、ニッケル及び合金としてのフェライトを配合して測定したが、低周波における効果は皆無であったことからもうかがい知ることが出来る。

次に、同じアモルファスであっても、物質の違いがあるのかどうかを確認するために、鉄アモルファスについて、コバルトと同様の配合方法で試作した。配合割合は、「基本配合ゴム」100gに対して鉄アモルファス及びコバルトアモルファス共に同じ400gとした。寸法も同じく厚み0.5mmで200mm×200mmとした。その結果、抵抗率は、鉄アモルファス配合ゴムが $0.5833\Omega\cdot\text{cm}$ であり、コバルトアモルファス配合ゴムが $0.2373\Omega\cdot\text{cm}$ であった。すなわち、コバルトアモルファス配合ゴムが鉄アモルファス配合ゴムよりも電気伝導性がよいことが分かった。また、コバルトアモルファス配合ゴムの方が鉄アモルファス配合ゴムよりも10KHzから1GHzの全ての周波数帯域において、電界源及び磁界源に対して良好な電磁波シールド効果を得た(図5,図6)。

因みに、周波数10KHzから100KHzの範囲におけるシールド効果は、鉄アモルファス配合ゴムが約3dBに対し、アモルファス配合ゴムは約8dBが得られた。

この理由は、次の2点があげられる。

そもそも、物質が磁氣的性質を帯びるのは、電子等の

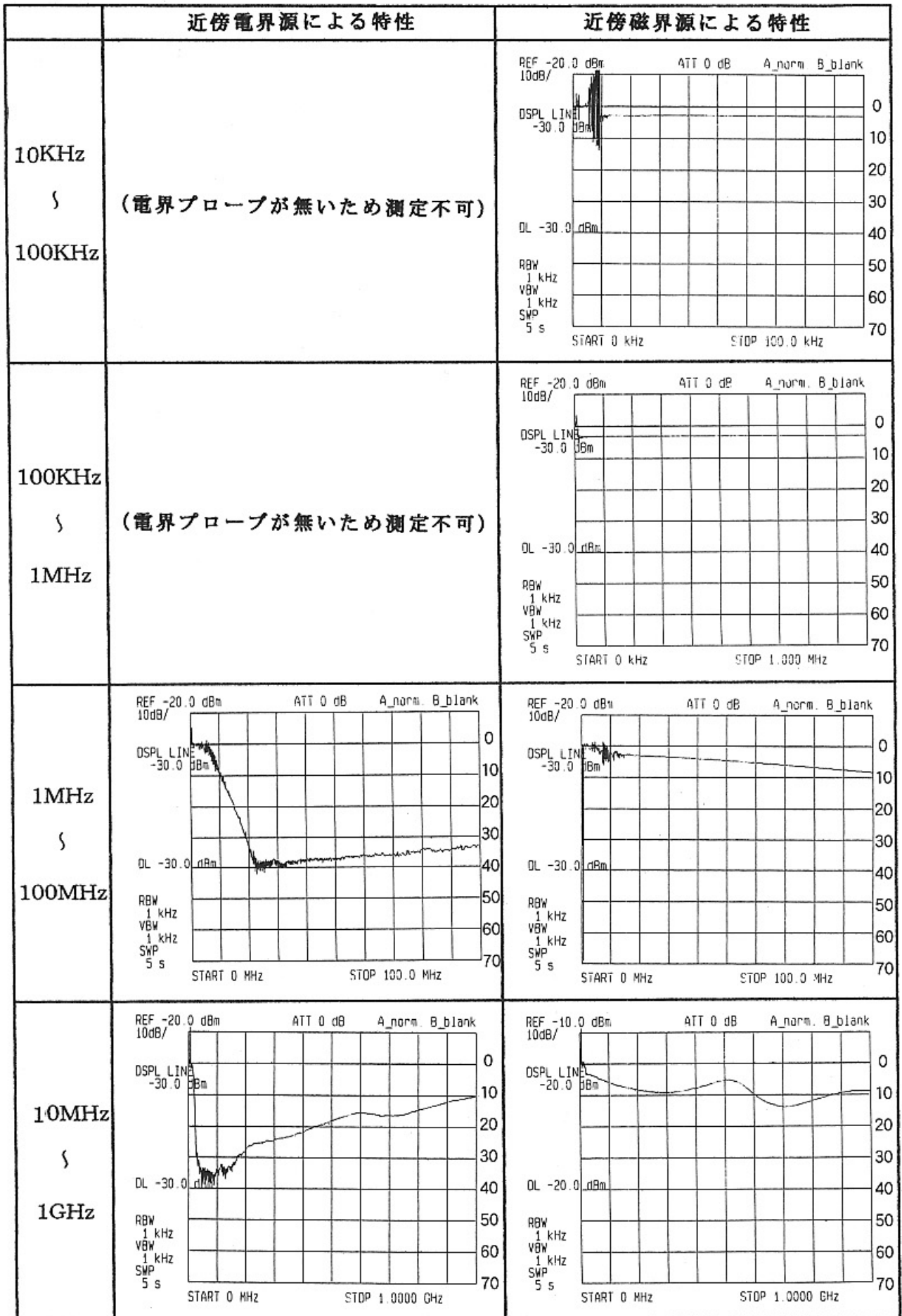


図5 鉄アモルファス配合ゴムの電磁波シールド効果

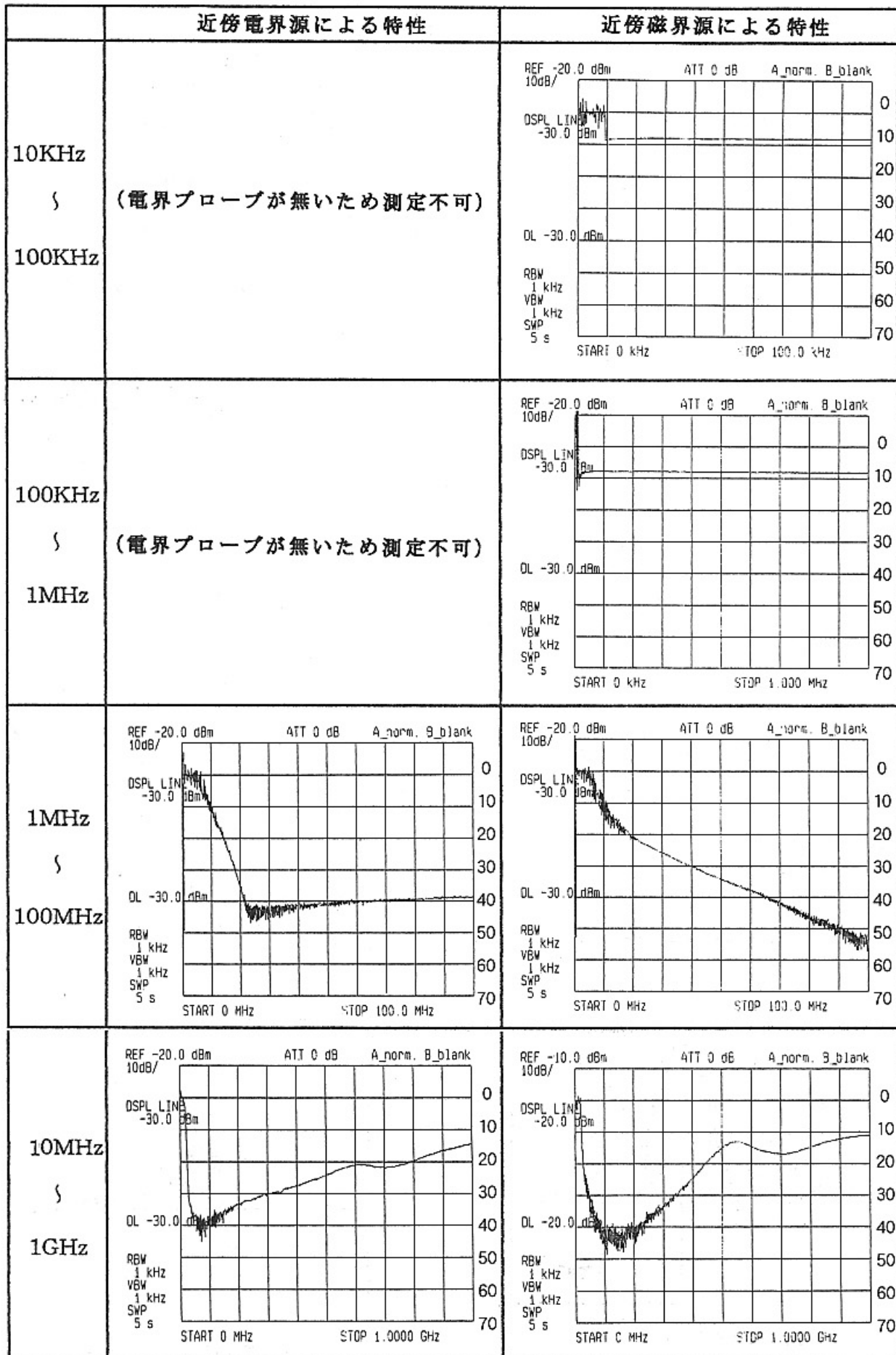


図6 コバルトアモルファス配合ゴムの電磁波シールド効果

元素	原子番号	副殻(副量子数)						
		1 s	2 s	2 p	3 s	3 p	4 s	3 d
Cu	29	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑	↑↓↑↓↑↓↑↓↑↓
Ni	28	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓↑↑
Co	27	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↑↑
Fe	26	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↑↑↑
S	16	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑↓↑↑		
Al	13	↑↓	↑↓	↑↓↑↓↑↓	↑↓	↑		
C	6	↑↓	↑↓	↑↑				

図7 主な元素の電子スピン

スピンによって、磁気モーメントが発生することに起因している。この電子スピンは、物質の最外殻軌道に充填されずに残留するスピンの数が多いほど、磁気モーメントが強くなる。因みに、主な物質の残留スピンの数は、Cu=1、Ni=2、Co=3、Fe=4、S=2、Al=1及びC=2等となっている。この中で、Feの非充填電子スピンの数が4個でもっとも多く、磁気モーメントを最も多く発生することになる。しかし、CuやAl等も非充填電子スピンの存在するものの、非磁性を示すので、この非充填電子の数だけでは磁性を説明できない<sup>9)</sup> (図7)。

隣接した2つの原子における電子間では、静電的な相互作用が働き、量子力学では交換力による交換相互作用(exchange interaction)とよんでいる。この相互作用によるエネルギーW(交換エネルギー(exchange energy)と

いう。)は、

$W = -2J s_1 s_2 \cos \theta$  で表される。ここに、Jは交換積分(exchange integral)といい、原子間距離a ( $\geq d$ :副殻のなかで、最も外側にある殻の直径)と、充填していない副殻の半径rとの比 $a/r$ に強く依存する。なお、 $s_1$ 、 $s_2$ は原子1、2のスピン、 $\theta$ は電子1、2が形成する角度である<sup>10)</sup> (図8)。

交換積分J対 $a/r$ との関係は、図7に示すような波形となるのがわかっている。 $a/r = 3$ で $J = 0$ となる。強磁性を示すのは、 $a/r > 3$ かつ $J > 0$ の時であり、ちなみに $a/d$ の値で、Fe=3.26、Co=3.64、Ni=3.92及びGd=6.2等となる。一方、 $a/r < 3$ かつ $J < 0$ の時は、スピンの方向がお互いに反対となり、反強磁性となる。例えば、Moは、 $a/r = 2.94$ で反強磁性であり、単体では磁性を示さない。ところが、Sb、Bi、S、Sn等の非磁性元素との間で合金を形成すると、強磁性を示すようになる。これは、合金とすることで、隣接する2つの原子間の距離が変化し、その結果交換積分Jが正の値に変化するからと考えられる<sup>10)</sup> (図9)。

このことから、コバルトアモルファスの方が鉄アモル

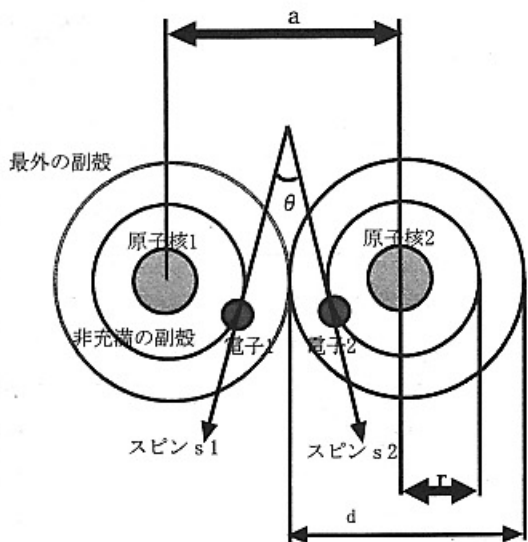


図8 隣接する2原子のスピン

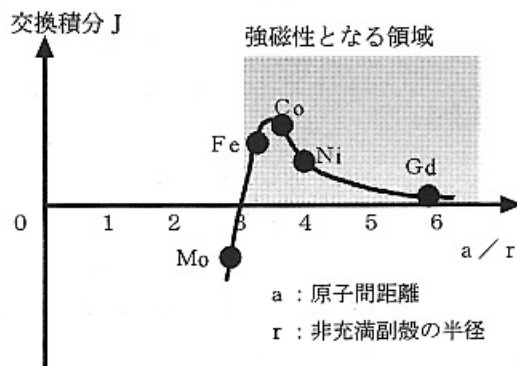


図9 原子間スピンのエネルギー

ファスよりもより強磁性の目安となる交換エネルギーの値が大きいために、より大きい磁性を示すことになる。

この交換エネルギーの説明から、その応用として、アモルファス合金は、従来のけい素鋼板と比較すると、磁気損失や渦電流損失が1桁以上小さい磁気的特性に優れた磁性材料が得られることが知られている<sup>11)</sup>。また、直流初透磁率を比較すると、一例としてコバルト系アモルファスが1000~100000 [H/m] に対し、鉄系アモルファスは2000~8000 [H/m] とコバルト系アモルファスの方が上限については1桁以上大きい値となっている<sup>12)</sup>。更に、比透磁率の周波数特性を比較すると、一例としてコバルト系アモルファスが20000 (1 KHz時) から8000 (100KHz時) に対して、PCパーマロイが30000 (1 KHz時) から2200 (100KHz時) とコバルト系アモルファスの方が広い帯域にわたり小さい減少しかしていない<sup>13)</sup>。

以上の考察を総合すると、コバルトアモルファスの方が鉄アモルファスよりも、よい電磁波シールド効果が得られることになる。なお、低周波における電磁波シールド効果がこれまで得られなかったのは、導電性ゴム素材だけであったためであり、今回このゴム素材に高透磁率のコバルトを積極的に配合することにより、低周波における電磁波シールド効果が得られるようになったと考えられる。

## 5. おわりに

電磁波シールド用基本配合の導電性ゴムにコバルトアモルファスを配合したゴムは、10KHzから1MHzの低周波における電磁波シールド効果を高めるのに効果的であることが分かった。これは、結晶性の物質よりもアモルファス構造の方が電気伝導率が高いこと、また、コバルトが鉄等に比べ、磁気モーメントが大きいことに起因していると考えられる。現在、先に開発した電磁波シールドゴム(「基本配合ゴム」)は、デジタルカメラの電磁波を遮へいする目的で、(株)ソニー等で実用化されている。本論文で述べた「アモルファス配合ゴム」についても、今後は低周波用電磁波シールドゴムとしての製品化に向けて、総合的なEMC(電磁的適合性)対策が可能な個別ユーザーへの適合化技術を検討する。その一例として、今後普及が確実な電気自動車のEMI(電磁障害)及びEMS(電磁耐性)対策は、低周波から高周波の広い帯域にわたっており、いわゆるカーエレクトロニクス<sup>14)15)</sup>に求められる薄膜化、高シールド性能及び低廉化への対応技術を検討する予定である。

## 文 献

- 1) 上田直行, 中村哲男, 園田増雄, 永田正典, 倉田雄平, 古嶋英俊, 長野厚久, 松川知宏, 導電性ゴムの電磁波シールド効果について, 熊本県工業技術センター研究報告, No. 36, p81-87, 1998
- 2) 上田直行, 中村哲男, 園田増雄, 永田正典, 倉田雄平, 古嶋英俊, 長野厚久, 松川知宏, 導電性ゴムの電磁波吸収特性について, 熊本県工業技術センター研究報告, No. 36, p88-93, 1998
- 3) 上田直行, 中村哲男, 園田増雄, 長澤長八郎, 寺田武, 電磁波シールドルームの試作, 熊本県工業技術センター研究報告, No. 37, p15-22, 1999
- 4) 落合庄治郎, 北條正樹, 藤田静雄, 伊藤靖彦, 3.2基礎的な電磁気的性質, 岩波講座現代工学の基礎 材料系I 材料特性と材料選択, 東京, 岩波書店, p53-54, 2000
- 5) 青木昌治, 電子物性工学, 東京, コロナ社, p415, 1968
- 6) 米沢富美子, NEW SCIENCE AGE 35 アモルファスな話, 東京, 岩波書店, p144, 1988
- 7) 青柳全, アモルファス金属他, 先端素材事典, 東京, (株)新技術開発センター, p16-38, 1986
- 8) 金森順次郎, 米沢富美子, 川村清, 寺倉清之, 8結晶でない物質の構造と物性, 岩波講座 現代の物理学 7 個体-構造と物性, 東京, 岩波書店, p225-287, 1994
- 9) Ernest R. Toon, George L. Ellis, Foundations of Chemistry, New York, Holt, Rinehart and Winston, Inc., p193-230, 1973
- 10) 山田 一, 宮澤永次郎, 別所一夫, 基礎磁気工学, 東京, 学献社, p252, 1989
- 11) 富士明良, 工業材料入門, 東京, 山海堂, pp239-240, 1998
- 12) <http://www.tamura-ss.co.jp/jp/lineup/magnetic/main.html>
- 13) [http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/p02\\_03.html](http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/p02_03.html)
- 14) 特集.; カーエレクトロニクスの環境対策, 電子技術 1月号, p1-46, 2002
- 15) [http://www.toyota.co.jp/eco/thsgijutsu\\_c/trans\\_c3/inverter\\_c3.html](http://www.toyota.co.jp/eco/thsgijutsu_c/trans_c3/inverter_c3.html)
- 16) <http://www.furukawaap.co.jp/seihin/seihin.html>