

技術論文



UHF 帯金属対応 RFID タグ用磁性シートの開発

深瀬美紀子*¹, 武本 聡*²

Development of Magnetic Sheet for UHF Band RFID On-Metal Tag

Mikiko Fukase and Satoshi Takemoto

Synopsis

UHF band IC tags can communicate from the longer-distance than other RFID systems, and, in addition, two or more tags, can be read in the batch. Therefore, the growth of the market is expected internationally. However, the RFID tag cannot be communicated when it is near the metal. In order to cancel this problem, molding tag is put resin under tag and decrease the influence of the metal by separating from metal. However, because the resin is thick, it is not flexible and becomes tag.

In this study, A powdery composition and shape were examined. In result, we achieved to Low-tan δ_μ and High $-\mu'$ thin magnetic sheet for UHF band by breaking up Fe-13Cr powder we evaluated communication distance of magnetic sheet. As a result, low-tan δ_μ of a magnetic sheet has improved the communication distance of the IC tag.

1. 緒 言

RFID (Radio Frequency Identification) は、電磁波を利用して非接触の通信により個体識別を行う技術の総称であり、利用する周波数帯と通信方式によって Table 1 に

示す三種類に大別される。

現在もっとも普及している HF 帯 (13.56 MHz, 電磁誘導方式) は、おさいふケータイや Suica などの IC カード、オフィスなどでの文書や資産管理、図書館での蔵書管理のための IC タグなどで幅広く利用されている。一

Table 1. Characteristic of RFID tag.

	HF	UHF	Micro wave
Frequency	13.56 MHz	952~954 MHz [*]	2.45 GHz
Transmission system	Electromagnetic induction	Electrical wave	Electrical wave
Communication distance	~1 m	~5 m	2~3 m
Directivity	Broad	↔	Narrow
Influence from metal	Sensitive	Sensitive	Sensitive

※It shifts to 915~928 MHz in 2012.

2011 年 6 月 9 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)高機能部材事業部 (Advanced Functional Materials Div., Daido Steel Co., Ltd.)

方、UHF帯(952～954 MHz, 電波方式)は、HF帯と比較して長距離通信や複数の対象物の一括読み取りが可能であるため、主に物流分野や商品のサプライチェーン用途、車両や人などの個体管理といった、UHF帯の長所をいかせる分野で将来的な市場拡大が期待されている。しかしこれらのICタグでは、金属に貼り付けた場合に通信がほぼ不可能になるという問題がある。

これは、金属がICタグの周辺にあると、データを送受信するリーダーライターからタグに送られた電磁波が、金属部で渦電流として損失してしまうため、ICタグからデータを再びアンテナに打ち返すためのエネルギーが効率的に得られないことが原因と推測される。この問題を解消するために、タグの下に厚い樹脂層を設けて貼り付け面からの距離を離し、金属の影響を低減させた樹脂モールドタグがあるが、樹脂部が厚くなると柔軟性がなくなるため、湾曲した部分に貼り付けするには不向きであり、さらにはタグも高価になる。

ICタグを薄型にすることで、ラベルプリンタで連続発行することが可能になるというメリットもある。ICへのデータエンコード機能を持つラベルプリンタを使用することで、エンコード作業にかかる負荷を大幅に軽減することができ、さらにタグ表面に一括して個体情報を印刷することが可能となるため、UHF帯RFIDタグの普及には、タグの薄型化、低コスト化が大きな技術課題となっている。

これらの問題を解決する手段として、磁性シートの使用が有効であることが知られている¹⁾。電波を送受信するアンテナ+ICチップ(インレイ)と金属の間に磁性シートを挟むことで、アンテナが受けた電磁波をシート内部で循環させ、ICタグに供給するエネルギーを効率的に伝送することができる。さらに、磁性シートはゴム材の中に磁性粉を均一かつ配向して分散するように練りこんだ構造であり、樹脂モールドと異なって薄くシート状に加工ができるため、ICタグの厚みをラベル適用範囲内に抑えられる可能性がある。

このような製品は、HF帯ではすでにRFIDタグ用磁性シートとして各社が商品化している。しかし、本研究で適用を検討しているUHF帯のような高周波帯域では、磁性粉の渦電流損失が急激に増加し、シート内に取り込んだ電磁波を大幅に損失するため、RFIDタグ用シートとしての使用はできなかった。

そこで本研究では、Fe系合金粉末をベースに粉末組成や形状を検討し、UHF帯において低い磁気損失($\tan \delta_\mu$)と高い透磁率実部(μ')を両立する薄型磁気シ

ートの開発を試みた。また試作した磁性シートを市販タグに組み合わせて評価することで、実際のICタグの通信距離の改善効果も検証した。

2. 実験方法

2. 1 粉末形状の検討

前述したように、金属対応RFIDに用いる磁性シートには、ICチップが駆動する周波数において、アンテナが受信した電磁波を金属部に達する前に磁性シート内に誘導し、できるだけ損失させずにアンテナから発信させるという動作が要求される。すなわち、磁気損失 $\tan \delta_\mu$ ($=\mu''/\mu'$)をできるだけ低く抑え、かつ透磁率実部 μ' をできるだけ高く設計した磁性シートが必要となる。

磁気損失 $\tan \delta_\mu$ ($=\mu''/\mu'$)の抑制には、透磁率虚部(μ'')の制御が重要となる。磁性材料における μ'' の発現は、粉末の成分や結晶構造に起因する①磁壁共鳴による損失②自然共鳴による損失、粉末の成分や形状に起因する③渦電流損失などがあり、金属磁性材料は電気抵抗が低いため、周波数の高い領域では渦電流損失が急増し、 μ'' が著しく増加する。渦電流損失は、渦電流が磁性体表面に集中して流れるため、磁性粉末の厚みを渦電流の流れる表面からの深さ(表皮深さ)より小さくすることで、 μ'' を抑えられる可能性がある。表皮深さ δ は式(1)によって算出できる²⁾。

$$\delta = (2\rho/\omega\mu_1\mu_0)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで ω は角周波数($2\pi f$)、 μ_1 は粉末材料の真の透磁率、 μ_0 は真空の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)、 ρ は電気抵抗である。

磁性シートの透磁率実部(μ'_{comp})は、磁性粉の充填量と磁性粉末における材料固有の透磁率(μ_t)からなる理論式中に、粉末形状に起因して発生する反磁界係数の影響を考慮した項を持つOllendorffの近似式(2)によって理論的に導出できることが知られている³⁾。

$$\mu'_{\text{comp}} = [\{ P(\mu_t - 1) \} / \{ (N(1-P)(\mu_t - 1) + 1) \}] + 1 \dots \dots \dots (2)$$

ここでPは母材に対するフィラの充填率(vol%)、Nは反磁界係数である。反磁界係数Nは、粉末の形状に依存する因子として表され、例えば、粉末粒子の形状が平板状(扁平回転楕円体)の場合には、粉末の粒径(D)と粒子の厚み(t)から定義されるアスペクト比 m ($=D/t$)を用いて、以下の式(3)で表される⁴⁾。

$$N = 1/2 [\{ m^2 / (m^2 - 1)^{3/2} \} \text{Sin}^{-1} \{ (m^2 - 1)^{1/2} / m \} - \{ 1 / (m^2 - 1) \}] \dots \dots (3)$$

式(3)より、反磁界係数はアスペクト比の増加に伴って減少する。すなわち、粉末の粒径を極力大きく、かつ薄

くすることで高い μ' が得られることが分かる。

作製した供試材を、Table 2 に示す。磁性粉には、粉末形状による磁気特性への影響を分かりやすくするため、粉末形状が真球に近いカルボニル鉄粉を用いた。純Feの場合、 $\rho = 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $\mu_i = 140$ と仮定すると、950 MHzでの表皮深さ δ は式(1)より約 $1.6 \mu\text{m}$ と算出できる。表皮効果による渦電流損失の影響を確認するために、表皮深さよりも粉末粒径が小さい $D_{50} = 1.4 \mu\text{m}$ のカルボニル鉄粉 (BASF 社製) と、表皮深さよりも大きい $D_{50} = 7.2 \mu\text{m}$ (BASF 社製) カルボニル鉄粉を準備した。粉末はトルエンで溶解したゴム液に対して 50 vol% になるように混合し、磁場中でドクターブレード法にて、PET フィルム上に混合液を塗工した。混合液が乾燥した後、PET フィルムよりゴムシートを剥離し、ホットプレス後の厚さが 0.5mm になるようにシートを重ねて成形し、サンプルを作製した。

アスペクト比の μ' 特性への影響を確認するために、 $D_{50} = 1.4 \mu\text{m}$ のカルボニル鉄粉を使用し、それぞれアスペクト比が1, 4, 8になるように、湿式アトライターにて0~12 h 粉砕処理を行った。粉砕後のスラリーは真空乾燥機にて $150 \text{ }^\circ\text{C}$ -4 h 乾燥し、-300 メッシュで分級した。分級後の粉末は同様の方法でシートを作製し、磁気特性の評価に用いた。

2. 2 粉末成分の検討

作製した供試材を、Table 3 に示す。2.1 では、粉末形状による磁性シートへの影響を確認するためにカルボニル鉄粉を使用した。実際に磁性シート材として使用する場合には、長時間の環境試験を経ても、電磁気特性が劣化しない粉末を選択する必要がある。そこで、耐食性に優れたステンレス系合金 (Fe-13Cr) 粉末を選択した。ステンレス系合金は高い耐食性に加えて、軟磁性体の中でも特に電気抵抗が高いため、高周波帯域における渦電流損失を抑制することができる。またセンダストや純鉄と比較して、磁気異方性が大きいため、磁壁の共鳴による損失が高周波帯域まで起こり難く、磁気特性の低下を抑制できる可能性もある。

準備した Fe-13Cr 合金の粉末は、粉末厚みが表皮深さよりも十分に小さくなるように粉砕処理を行い、 $D_{50} = 6.0 \mu\text{m}$ 、粉末厚さ $0.2 \mu\text{m}$ の粉末を得た。粉砕処理後の粉末は 2.1 と同様の方法でシートを作製した。

また比較のために、軟磁性体の中で最も高い透磁率特性を持つ Fe-9.5Si-5.5Al (センダスト) 粉末を準備し、Fe-13Cr と同様の粉末厚み、粒径になるように粉砕を行った。センダスト粉末については、粉砕処理によって粉末にかかる歪みを解放するため、真空乾燥後に $600 \text{ }^\circ\text{C}$

Table 2. Powder characteristic of sample A~D.

Sample	Composition	$D_{50} (\mu\text{m})$	Aspect ratio	Powdery shape	Heat treatment
A	Fe	7.2	1	sphere	—
B	Fe	1.4	1	sphere	—
C	Fe	2.2	4	flake	—
D	Fe	2.6	8	flake	—

Table 3. Powder characteristic of sample E~G.

Sample	Composition	$D_{50} (\mu\text{m})$	Aspect ratio	Powdery shape	Heat treatment
E	Fe-13Cr	6.0	30	flake	—
F	Fe-9.5Si-5.5Al	6.2	31	flake	$600 \text{ }^\circ\text{C}$ -2h(Ar)
G	Fe-9.5Si-5.5Al	6.2	31	flake	—

-2 h の熱処理を行い、その後シートサンプルを作製し、磁気特性を評価した。

2. 3 シート特性の評価

作製したシートサンプルは、外径7 mm × 内径3.1 mm のリング形状に打ち抜いた後、ネットワークアナライザー 8510C (アジレントテクノロジー社製) を用いて、同軸法にて500 MHz ~ 10 GHz における磁性シートサンプルの透磁率の周波数依存性の測定を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 高周波でのシート特性におよぼす粉末形状の影響

Fig.1(a) に粉末粒径の相違による磁性シートの透磁率実部 μ' の周波数依存性を、Fig.1(b) に透磁率虚部 μ'' の周波数依存性をそれぞれ示す。粉末粒径が表皮深さより大きい供試材 A は、 μ'' が500 MHz 以下で既に極大となっており、高周波側までそのまま緩やかに減少に転じている。一方、粉末粒径が表皮深さ以下の供試材 B は、1 GHz 付近まで μ'' は低い値を保持し、GHz 帯に入ってから急激に増加する傾向が確認された。 μ'' が極大となる周波数も2 GHz と高周波側へ大きくシフトしており、 μ' の極大値の高周波化に伴い、 μ' の限界周波数も高周波側へシフトしていることを確認した。

Fig.2(a) に粉末のアスペクト比の相違による磁性シートの透磁率実部 μ' の周波数依存性を、Fig.2(b) に透磁

率虚部 μ'' の周波数依存性をそれぞれ示す。Fig.2(a) に示すように、供試材 B に対して供試材 C の1 GHz 付近における μ' は約40% 増加している。さらに供試材 D の μ' は、1 GHz 付近の μ' の絶対値こそ供試材 C と同等の値となっているものの、3.4 GHz 以上では供試材 C と大小関係が逆転している。このことから、アスペクト比の増加にともなって、低周波側における μ' の絶対値は増加するものの、その透磁率を高周波まで維持することができなくなっていることが分かる。また μ'' は、Fig.2(b) に示すように、供試材 B に対して、供試材 C および D の μ'' は全体的に高くなり、かつ低周波から高周波側へと緩やかな S 字へプロファイル自体が大きく変化している。

高周波で発生する μ'' について、吉田らは、粉末厚さと表皮深さの関係から、高周波での μ'' プロファイルが段階的に変化することを報告している^{5),6)}。未処理の粉末においては、渦電流による分散に起因して緩やかな μ'' の極大が発生するが、粉砕処理により粉末が厚さ(表皮深さ)と粒径に分布を持ち、さらに粉末の微細化に伴って結晶相が変化することにより、 μ'' が発生する周波数が分離し、二つの極大を持つと述べている。すなわち、狙いとする周波数で μ'' の増加を抑制するには、 μ'' の粉末の粉砕条件によって μ'' の極大が発生する周波数を制御し、二つの極大の谷間で最も μ'' が極小となるように粉砕条件を決定することで可能となる。

供試材 B では、本来の渦電流損失に伴って2 GHz 付近で μ'' の極大が見られたが、Fig.2(b) に見られるよう

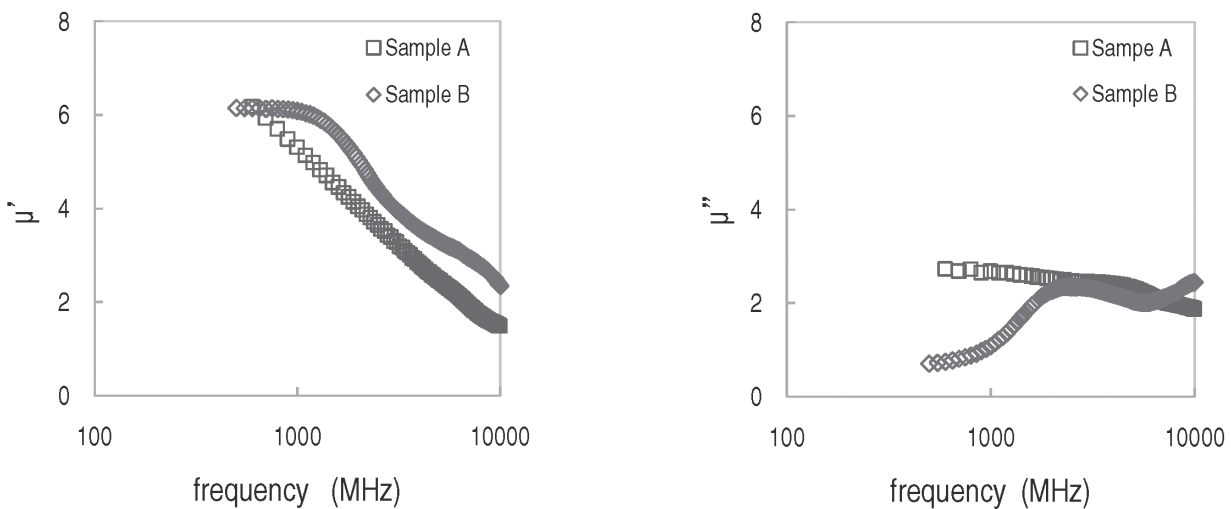


Fig.1. Frequency characteristic of the permeability for Sample A and B. (a)Profile of the real part. (b) Profile of the Imaginary part.

に、供試材 C においては、2 GHz 付近にあった μ'' の極大が、3.2 GHz 付近の高周波側へシフトしており、また 500 MHz 付近にも μ'' の緩やかな上昇が見られる。これは粉末の扁平化によって粉末厚みと粒径が広範囲に分散したこと、さらには粉碎処理で粉末に加わったせん断応力によって、結晶相が不規則になったためと推測できる。

供試材 C よりも扁平化が進んだ供試材 D では、扁平度の進行に伴って 500 MHz 付近に発生した二つめの極大 μ'' がさらに増加し、 μ'' プロファイルの明確な二極化

が確認できた。1 GHz 付近には二つの極大の谷間が見られることから、さらに扁平化を進行させることで 1 GHz 付近の μ'' を抑制できる可能性が明らかになった。

3. 2 シート特性におよぼす粉末組成の影響

Fig.3(a) に粉末組成の Fe-13Cr とセンダストの微小扁平粉を用いて作製した磁性シートの透磁率実部 μ' の周波数依存性を、Fig.3(b) に透磁率虚部 μ'' の周波数依存性をそれぞれ示す。Fig.3(a) に示すように、供試材 E と供試材 F は同じ粉末形状にも関わらず、1 GHz 付近の μ'

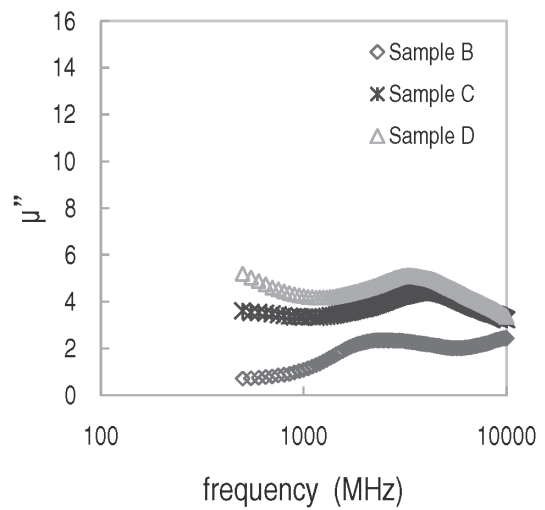
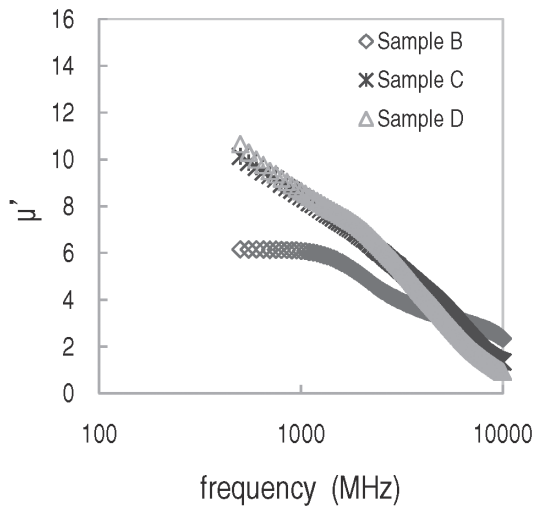


Fig.2. Frequency characteristic of the permeability for Sample B/C/D. (a) Profile of the real part. (b) Profile of the Imaginary part.

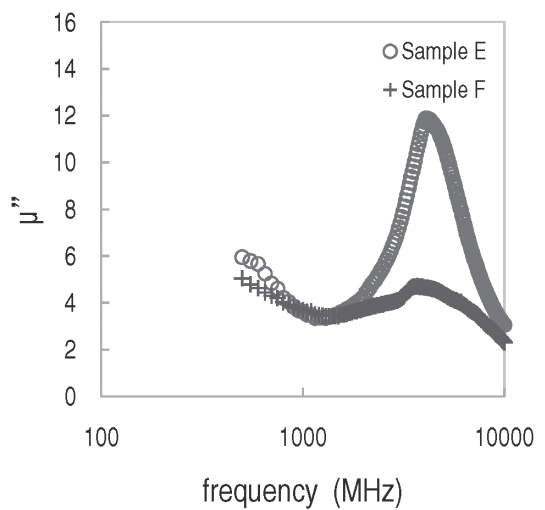
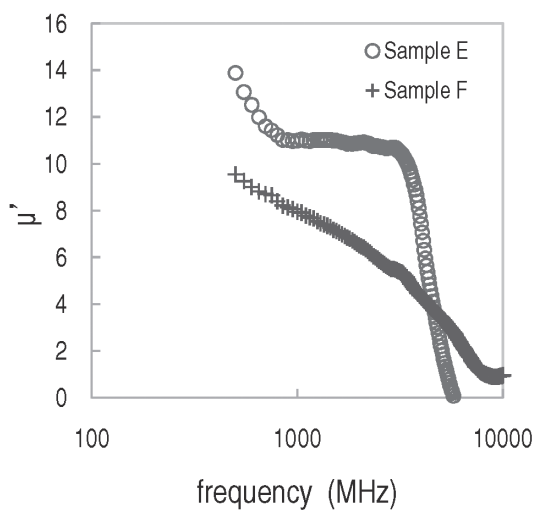


Fig.3. Frequency characteristic of the permeability for Sample E and F. (a) Profile of the real part. (b) Profile of the Imaginary part.

が供試材 E の $\mu' = 11$ に対して、供試材 F は $\mu' = 8$ と大きな差異が見られた。また、供試材 E のみ、700 MHz ~ 3 GHz の広帯域にかけて、 $\mu' = 11$ と高い値を持つフラット域が発生することが確認された。

Fig.3(b) に示すように、 μ'' も供試材 C および D と同様、3 ~ 4 GHz 付近に二つ目の極大が確認されたが、 μ' 同様、供試材 E と供試材 F では絶対値に大きな差異が見られた。またこの粉末形状について、供試材 E および F の μ'' の二つの極大の谷間を 1 GHz 前後に設定できることが確認できた。950 MHz 帯における供試材 E の $\tan \delta_{\mu} = 0.3$ となり、本実験で作製した供試材の中で、最も低い値であった。

Fig.3(a) および (b) で見られた供試材 E と供試材 F の μ' 、 μ'' の周波数依存性の相違は、粉末形状以外の因子である粉末組成や磁気異方性などに起因するものと推測される。

前述したように、Fe-13Cr は軟磁性粉の中でも、比較的高い結晶磁気異方性を持つ。さらに粉末の粉碎処理は、粉末を小径メディアと溶媒中で混合し、高速で攪拌しながら行うため、外部から強い応力が加えられ、磁気異方性が発生する。Fig.3(b) に示すように、供試材 E の μ'' における二つ目の極大は、Fe-13Cr が持つ組成由来の結晶磁気異方性に加えて、粉碎時にかかる応力で発生した磁気異方性により、磁壁の共鳴による損失が高周波側にシフトするとともに、 μ'' の分散が 4 GHz 付近で一気に緩和しているものと考えられ、これにより一つ目の極大との間に深い谷間が発生し、950 MHz 付近で低い

μ'' を得られたものと推測される。供試材 E で 700 MHz ~ 3 GHz 付近に発生した μ' のフラット域も、上記の μ'' の二つ目の極大が高周波側へのシフトしたことにより発現したものと考えられる。

一方、供試材 F (センダスト) は、特有の高い透磁率特性を発生する源となる結晶相 (DO3, B2 規則相) が外部応力の影響を受け易いため、粉碎処理で失われた規則相の再生成を熱処理によって行っており、結晶に与えられた歪みが解放されるに伴い結晶磁気異方性は低下する。確認のため、粉碎処理後の熱処理を行わなかったセンダスト粉末を用いて、シートサンプル供試材 G を作製した。供試材 G および供試材 F のシート周波数特性を Fig.4(a) および Fig.4(b) に示す。Fig.4(b) に示すように、供試材 F では 3 GHz 付近まで μ'' の増加が抑制されているのに対し、供試材 G では 2.5 GHz 付近で μ'' の分散が発生している。この μ'' の二つ目の極大の絶対値と発生する周波数の違いは、前述した磁気異方性に起因するものと推測される^{5),6)}。

さらに供試材 F の μ' 、 μ'' の周波数依存性を供試材 D と比較したところ、Fig.5(a) および Fig.5(b) に示すように、センダストと純鉄と粉末組成が異なるにも関わらず、ほぼ同じ周波数特性であることが判明した。吉田らは微細な扁平粉末においては、焼鈍することでセンダスト中の Si と Al が母相から解離して粉末表面に移行し、母合金相が Fe の単一相となることを明らかにしており^{5),6)}、本実験における供試材 F の μ' 、 μ'' プロファイルの動きもこの報告と良く一致する。

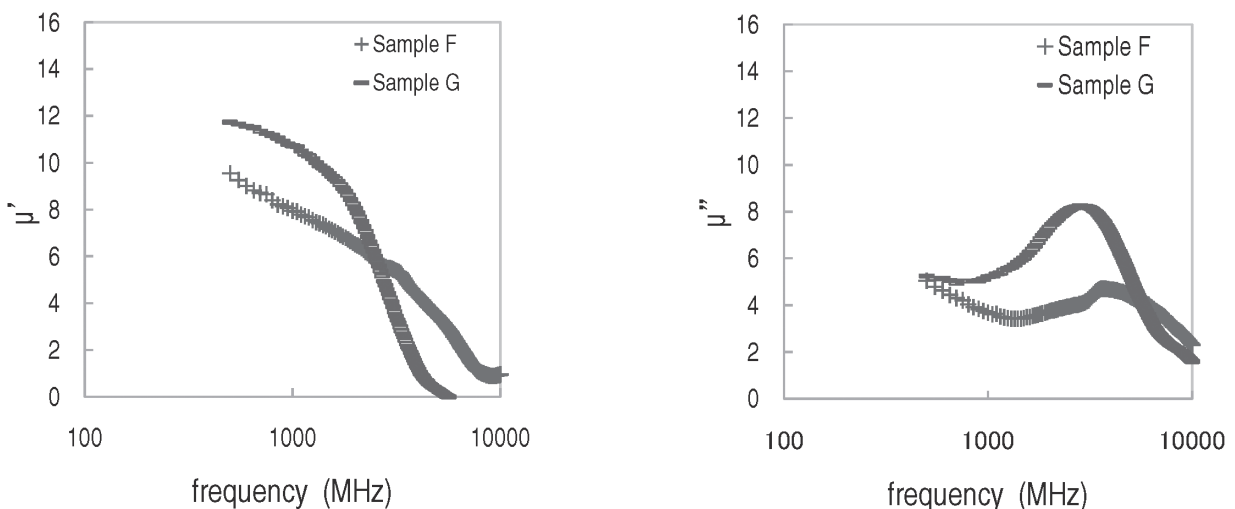


Fig.4. Frequency characteristic of the permeability for Sample F and G. (a) Profile of the real part. (b) Profile of the Imaginary part.

以上の結果から、1 GHz 付近で μ'' を抑制するためには、①軟磁性材料の中でも、特に結晶磁気異方性の大きい材料組成を選択する。②粉碎時に粉末結晶に加わった歪みを解放せずに、なるべく多く結晶中に残留させることが有効であることが明確になった。本研究で確認された 700 MHz ~ 3 GHz 付近における明確なフラット域の発現は、Fe-Cr 系合金のみに見られる非常に特異な現象であり、粉碎時に粉末にかかる外部応力が磁気異方性あるいは磁気損失に与える影響については、今後、詳細な検討が必要である。

3. 3 ICタグの通信特性の改善効果

開発した磁性シートを、市販の UHF 帯用 IC タグに貼り付けて通信特性の評価を行った。各機器の配置を Fig.6 に、タグ構造を Fig.7 に示す。通信距離の測定は電波暗室内で行い、リーダライタは NEC トーキョー製

ICT-5055 を使用した。UHF 帯周波数における出力は 30 dBm である。床面から 1500 mm の高さにリーダライタのアンテナ (NEC トーキョー製: ICT-5050) を設置、アンテナと同じ高さに 200 mm × 400 mm のステンレス板を対向するように設置した。ステンレス板の中央に、開発材と市販インレイからなるテストタグを設置し、リーダライタとタグを通信させた状態で、テストタグを徐々にアンテナから遠ざけながら、安定した通信レートが確保できる距離を測定した。

Table 4 に、通信特性の測定に使用したシートの、950 MHz における磁気特性を示す。開発材には、本実験でもっとも低い磁気損失特性を示した供試材 E (Fe-13Cr, $D_{50}=6\mu\text{m}$, アスペクト比 30) の粉末を使用して磁性シートを新たに作製し、評価に使用した。比較のために、当社既製品で UHF 帯で最も低い $\tan \delta_\mu$ である DPR-H タイプと、一般的な発泡材をスパーサーとして用いて同様の

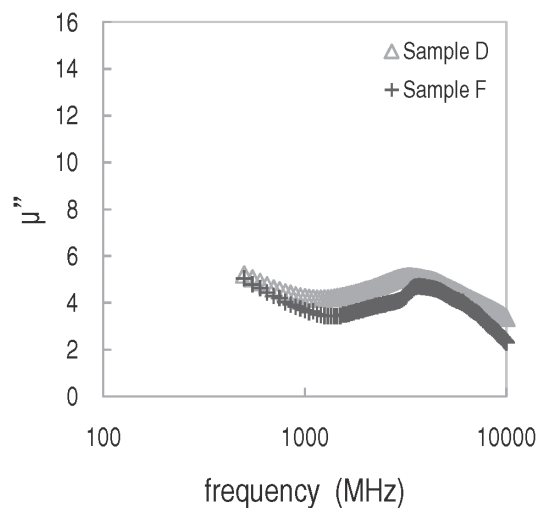
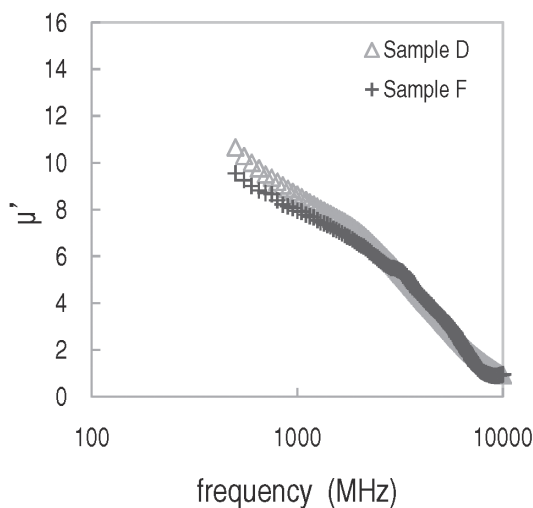


Fig.5. Frequency characteristic of the permeability for Sample D and F. (a) Profile of the real part. (b) Profile of the Imaginary part.

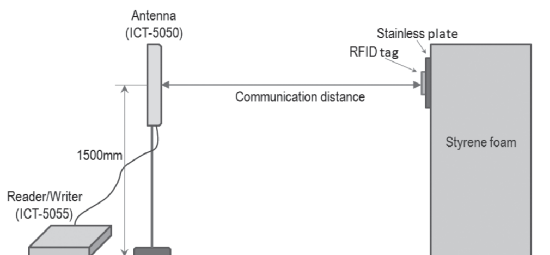


Fig.6. Measurement system of communication distance.

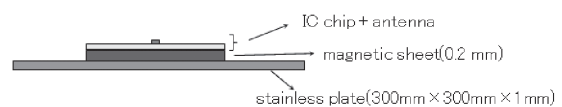


Fig.7. Structure of RFID tag.

Table 4. Characteristic of sheet samples used to evaluate communication distance.

(frequency : 950 MHz)

	μ'	μ''	$\tan \delta_\mu$	Thickness
Sample E	9.2	3.0	0.33	0.2 mm
Ref. DPR-H	11.9	7.3	0.61	0.2 mm
Spacer(Teflon sheet)	—	—	—	0.2 mm

測定を行った。磁性シート，スペーサーともにすべて厚さは0.2 mmである。

Fig.8 に実際に測定した IC タグの通信特性を示す。インレイのみをステンレス板上に貼り付けた場合，タグとリーダライタアンテナは全く通信できない状態（通信距離ゼロ）であることを確認した。発泡材を貼り付けた場合も同様に，通信不可となった。一方，インレイのみをステンレス板に貼り付けた場合と比較して，開発材を貼り付けた場合は安定して通信できることを確認した。また，DPR-H タイプを貼り付けた場合の通信距離は，磁性シートが無い場合と比べて40%程度に留まった。その結果，UHF帯専用に材料設計した本研究の磁性シートでは，磁性シート不使用の場合，または磁気損失が大きい場合と比べて，はるかに長い通信距離を得ることができ，磁気損失の低減がICタグにおける通信特性の改善に大きく寄与することが確認できた。

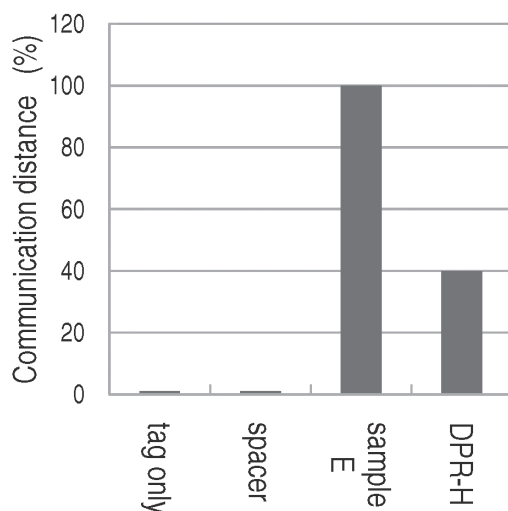


Fig.8. Effect that development material improves communication distance.

4. 結 論

金属体に近接して使用する UHF 帯 RFID タグについて，通信特性改善のための磁性シートを検討した。Fe-13Cr を始めとするステンレス合金は，耐食性に優れ，価格も安価であることから，量産性に優れた粉末である。Fe-13Cr 合金を微細化することで，UHF 帯を含む高周波帯域において，高い安定した実数透磁率，かつ従来材には無い低い磁気損失特性を実現する磁性シートを開発した。磁気損失の低減は RFID タグの通信距離を大きく改善し，UHF 帯において柔軟性を持った金属対応 RFID 薄型タグを実現する可能性を示唆している。

(文 献)

- 1) 及川 義則，亀井 浩二：NEC技報，59(2006)，2，97.
- 2) 太田恵造：磁気工学の基礎Ⅱ，共立全書，1973，310.
- 3) Ollendorff：Magnetostatik der Massekerne，archiv für Elektrotechnik. XXV Band，1931.
- 4) 太田恵造：磁気工学の基礎Ⅰ，共立全書，1973，35.
- 5) 吉田栄吉：まぐね，3(2008)，134.
- 6) S. Yoshida, S. Ando, Y. Shimada, M. Yamaguchi, K. Suzuki, Y. Nomura and M. Fukamichi：J. madn.soc. Jpn., 26(2002)，850.