解説 Review 説

電子材料および磁石材料の進歩

東山 馨*

Recent Advances in Electronics and Magnetic Materials

Kaoru Higashiyama

Synopsis

Recent advances in electronics and magnetic materials including cold rolled sheet, bar and wire rod, and magnets have been reviewed for the

1. 展 望

この10年間、電子機器は製品形状や性能の変化が激しく、これらニーズの多様化、ユーザーからの特性向上要請に応えるため、電子材料の製造技術が進歩してきた。その背景には製鋼技術や冷間加工技術をはじめとする関連技術の進歩、パソコンや携帯電話など新機能製品の成長による新ニーズ発生などがある。最近では環境問題対応も重要なニーズとなりつつあり、そのための新しい用途の電子材料開発も進んでいる。電子機器の成長とともに、ますます新しい材料特性のユーザーニーズの発生が予想される。そこで、それらへの迅速な対応を行うためユーザーと材料メーカーの協力による新材料開発や製造技術確立が一層必要となってくる。

また、磁石材料についても電子機器の小型化、高性能化の要求とともに際立った変化がみられる。アルニコ磁石の国内生産は減少傾向にあり、フェライト磁石は安価なためいまだに磁石材料の90%以上を占めているが、海外シフトが増え、国内は高性能化へと進んでいる。希土類磁石は順調に需要を伸ばしており、特にSm-Co磁石に

変わってNd-Fe-B磁石が市場で認められるに至り、磁気特性の向上やNd-Fe-B磁石の拡大などさすが磁石大国日本という感がある。

以下に電子材料・磁石材料の最近10年間の製品技術について述べる。

2. 電子材料（冷間圧延帯）

2. 1 ICリードフレーム

最近10年間の電子機器の進歩は著しく、それを支えてきたICはメモリーの大容量化・高速化、パッケージの小型化・薄型化が進んできた。この傾向は今後も続くと予測される。パッケージの小型化をさらに進めたリードフレームを使用しないICも出現しているが、まだリードフレームを使用するICが主流である。リードフレーム材質としてCu、Cu合金、Fe-42%Ni（以下42Niと呼ぶ）などがあり、加工法はプレス法とエッチング法に別れるが、リードフレーム材としては プレス打抜き性、エッチング性が良好であり、多ピン化による薄肉化、製品価格低下に伴う低コスト化、メモリー短命化に伴う短納期化を要求されている。当社でも製造している42Niで

1998年10月23日受付

* 大同特殊鋼（株）取締役（Director, Daido Steel Co., Ltd.）

は次のような改善を行なわれてきた。すなわち、プレス性およびエッチング性改善のためにフラットネス(形状)の改善が進んだ。リードフレーム材は歪が残るとプレスおよびエッチングの際に変形が起きるため、極力歪を小さく抑える必要がある。そのためには冷延でフラットな形状を作り出さなければならない。最近では冷延時の形状を把握できる形状検出器 (Fig.1)¹⁾が開発され、形状改

善の大きな武器となっている。さらにスリット歪も小さくする必要があるので、スリッター回転刃の偏芯を少なくするために高精度スリッターが採用されている。

また、機械的性質や結晶粒のコントロールや硫黄添加

(Fig.2)²⁾によりプレス剪断性を向上させている。メッキ性についてはメッキ厚さが次第に薄くなってきており、材料の表面性状への要求がますます厳しくなるものと予測される。これらの製品ニーズにいち早く対応するため、当社では溶解からの一貫生産体制により内部品質や外観品質の改善を行ってきた。

2.2 電子材料用高合金

小型二次電池市場は、電動工具、電気カミソリなど携帯用家電が中心であったが、1990年頃からノートパソコン、携帯電話の需要が急増しており、今後の発展を考え

るとかなり魅力ある分野である。電池の生産額推移をFig.3³⁾に示すが、リチウムイオン二次電池が急伸びしてい

る。この急伸の主因はノートパソコンと携帯電話の進展であるが、リチウムイオン二次電池はエネルギー密度が大きいという利点があり、小型・軽量化が可能でバッテリー寿命も長いと各社が激しい増産競争を続けている。これら電池のリード・端子には純ニッケル帯が使用されており、二次電池の急伸に伴い純ニッケルの需要も増加している。リード・端子用純ニッケル材に要求される品質として純度、表面性状、プレス性、曲げ性などがあるが、ユーザー加工条件に合わせた硬さコントロールとメッキ性を考慮した表面性状(粗さ、酸化膜の有無など)コントロールが必要となる。また車載用高合金として磁性材(パーマロイ)や蛍光表示管に用いられる封着材の需要も増えている。それらの軽量化や機能アップ化に伴ない成分コントロールや内部品質の向上が要求される中で、当社では製品の仕様に合せた溶解方法(AF, VI, ESR, VAR)とロットの大小に対応した造り分けを行っている。

2.3 TV部品

TVおよびディスプレイはブラウン管の一部が液晶に置き換わってきた。近い将来にはPDPへの置換も進むと予想されるが、ブラウン管式TV(およびディスプレイ)の生産量も増加しており、今後10~15年程度は大きな量の落ち込みはないと考えられる。TVには多くの冷延帯材より加工された部品が使用されている。たとえば、電子線を発生させ加速する電子銃用として、カソードに近く温度が高くなる部品には熱膨張率の小さいFe-42%Niを、電磁レンズ付近の部品には非磁性ステンレス鋼を使用している。このステンレス鋼には加工後も非磁性を維持できることの他に深絞り性、打ち抜き後の低バリ、板厚精度が要求される。深絞り性と打ち抜き性は硬さと表

面性状のコントロールにて対応している。マスクスプリングはフェイスパネルとシャドウマスクを弾性的に固定する部品で、要求特性は低熱膨張、弾性、不銹であり、SUS301やSUS420J2が使用される。他にもゲッタースプリング、パネルピン、コンタクトスプリングなどに主にステンレス鋼やFe-Ni合金が使用されている。

2.4 リレー部品

電話交換機やファクシミリなどの通信機器用リレーを代表としたリレー部品には純鉄が使用される。純鉄は軟質磁性材料のなかでも透磁率が高く、保磁力が小さく、飽和磁束密度が高いという優れた磁気特性を有しており、リレー材として広く使われている。磁気特性はC, Mn, Si, N, O, S, Pなどの不純物量にも影響を受けるが、結晶粒の大きさにも大きく関係し、保磁力が結晶粒の大きさの逆数に比例することが知られている。Fig.4⁴⁾に結晶粒の大きさと保磁力の関係を示す。純鉄の冷延材は磁気焼鈍後の結晶粒が大きくなるように仕上げ冷延圧下率と仕上げ冷延前焼鈍条件のコントロールが重要となる。

Fig.4. Relation between coercive force and grain size on

3. 電子材料 (棒・線材)

3.1 電磁ステンレス

地球環境の保護、エネルギー資源の有効活用などに対応するために、自動車のエレクトロニクス化がますます進展してきている。特にガソリンエンジン車の燃焼効率を高めるため従来のキャブレター（気化器）に代り電子制御式燃料噴射装置（Fig.5）の装着率が増加した。従

Fig. 5. Schematic presentation of the cross-section of

来これらの部品には純鉄、珪素鉄、電磁ステンレス (MER1F)、PBパーマロイが使用されてきており、またその加工法は切削加工とロウ付けによる組立て加工が主体であった。しかし、燃料噴射装置の高性能化（燃料の燃焼をより精密に制御すること）と低廉化の要求が強まってきた。高性能化には電磁バルブの開閉が電気信号に遅れることなく高速で動くこと、このためには磁気回路を構成する磁性材料部品の磁束の立上がり、立下がり急速に行えなければならない。すなわち磁性材料の高周波透磁率が高いことが必要であり、高直流透磁率と共に渦電流をできるだけ小さく抑制することが重要となる。それには、部品形状の最適化の他、磁性合金の高電気抵抗率化が有効である。一方、低廉化の要求からは例えば高能率加工が可能である冷間鍛造などがある。さらには、軽量化も兼ねて板素材からのプレス加工も一部で適用されている。加工方案の最適化と共に素材としてはできるだけ変形抵抗の小さいことが要求される。結局、電子制御式燃料噴射インジェクターを構成する磁性材料としては、高電気抵抗でありながら、低変形抵抗であることの両特性を具備していることが必要となる。一般に合金添加により電気抵抗は上昇し変形抵抗は増加することが多い。Fig.6にFe-Cr電磁ステンレスの電気抵抗率と引張り強さに及ぼす合金元素の影響を示した。添加合金としてはAlが最適であることがわかる。以上の知見を基に各種のFe-13wt%Cr(0.6~2.5wt%)Al系電磁ステンレスが開発され、量産規模で生産・実用化されている⁵⁾。従来Fe-Cr電磁ステンレス合金は軟質磁性材料としてさほど認知されていなかったが、新しい用途の拡大に伴い工業的に重要な位置を占めるに至った。(またFe-Cr系電磁ステンレスは粉末焼結品として自動車用ABSセンサリングとしても実用化されている。)

3.2 トルクセンサ材

Fig. 6. Effect of alloying elements on the electrical

自動車を始め工作機械，建設機械，ロボット，モータなど広い産業分野で回転軸のトルクの直接計測が切望されている．軸トルクセンサに望まれる特性として 軸に非接触， 瞬時トルク計測可能， 高感度， ダイナミックレンジが広い， 温度安定性良好， 小型・堅牢，

出力が軸回転の影響を受けない などが挙げられている．Fig.7に磁歪式トルクセンサの構成例を示す．軸そ

のものがトルクを伝達する構造体であると同時にセンサとしての機能を併せ持っている．逆磁歪効果の大きいアモルファス薄帯を貼り付ける場合と比較して，出力は小さいが懸念される接着はがれなどはないメリットをもっている．今後さらにセンサーの発展が望まれている^{6),7)}．

3.3 高強度インバー，融雪線

芯金に従来の硬鋼線に替えて高強度インバー合金を用いた電力ケーブルACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced)の実用化が進んだ．ケーブルの弛みを増加させることなく2倍の電流容量の送電を可能とするもので電力需要の拡大に対応できるとされている⁸⁾．高強度インバー線は極めて信頼性の高い材料であり，その溶解から加工に至るまで高度な制御がなされており，捻回値特性の大幅な向上が達成されている．

最近Fe-Ni-Co組成におけるマルテンサイト変態を利用し高強度かつ高捻回値の高強度インバーも開発されている．マルテンサイト相は必ずしも低熱膨張ではないため，製造上その体積分率の制御などが課題となっている⁹⁾．また析出効果を加味した複合強化機構により高強度を達成した例もある¹⁰⁾．

また，冬季に電力ケーブルに着雪することを防止する種々のアイデアが提案されているが，磁性体の鉄損による発熱を利用した場合も報告されている¹¹⁾．実際の実用化には幾多の課題が残されているが今後さらに改善・改良が望まれている．以上，従来の単なる精密機能材料から機械構造部材と機能性を併せ持つ合金の開発と実用化が進展してきている．

4 . 磁石材料

4 . 1 アルニコ磁石

アルニコ磁石はフェライト磁石に置き換えられて久しいが、メーターを中心に熱安定性の良い特長を生かした分野では使用されている (Fig.8) . 今では研究報告もほと

Fig. 8. Production trend of permanent magnets (in 10⁸ yen). (Statistics by Japan electronic materials manufactures association, estimation after 1998)

んど見られないが、最近のトピックスとして、パソコン用ディスプレイや高品位テレビのブラウン管では高鮮明度が要求されることから、CRTディスプレイ用電子ビーム調整装置に従来のフェライトボンド磁石に代り、温度特性の良好なアルニコボンド磁石が採用されている。原料となるアルニコ粉末には機械的粉碎に代り水アトマイズ粉を採用し、熱処理技術を開発することにより低コスト化を図ったアルニコボンド磁石が実用化されている¹²⁾。

4 . 2 フェライト磁石

既に成熟したフェライト磁石は磁気特性がほぼ理論値に近づいているとはいえ、ユーザーの少しでも高い磁気特性の要求に対し、地道な研究が進められており、成分、粒度分布の改善などにより(BH)maxで35.8 ~ 41.4kJ/m³も報告されている。高特性化に対しては現行のM型フェライト(BaO/6Fe₂O₃)とは別の理論飽和磁束密度の高いW型フェライト(SrO・2MO・8Fe₂O₃)の開発も行なわれている¹³⁾。(BH)maxで42.2kJ/m³の報告もあり、保磁力が低いとその向上如何では実用化も夢ではない。

4 . 3 Sm-Co磁石

希土類磁石の先駆的役割を果たしたSm-Co磁石もNd-Fe-B磁石の出現でその役割を終えたようにも見えるが、熱的安定性や耐食性の良い利点を生かし、一部Sm₂Co₁₇

系で使用されている。またSm₂Co₁₇系合金はボンド磁石用の素材としても使用され、圧縮成形ボンド磁石で(BH)maxで119 ~ 143Kj/m³で実用化されている。実験室レベルでは160kJ/m³も報告されている。

4 . 4 焼結Nd-Fe-B磁石

1983年に佐川らにより開発された焼結法によるNd-Fe-B磁石は市場で認知されてからほぼ10年になる。その間、磁気特性の向上、用途開発が盛んに行なわれてきた。磁気特性は磁気を発現するNd₂Fe₁₇B相の増大、磁界による配向度の向上、各工程での雰囲気内処理による酸化防止による非磁性相の低減、高密度化などにより高性能化が図られ、(BH)maxで400kJ/m³以上の磁石も実用化されつつある。実験室的に報告されている438kJ/m³の値は、理論値の85%にも達している。その用途としてはHDDに使われるボイスコイルモータが約50%、その他MRI (磁気共鳴画像診断装置) 用、各種モータ用などに向けられている。

4 . 5 熱間加工性Nd-Fe-B磁石

米国GM社のCroat氏が開発した磁石でMQ3の名で呼ばれている。超急冷されたNd-Fe-Bの薄帯を原料とし、成形時に磁界を用いずに熱間でアップセットまたは押出し加工による塑性変形を施すことにより、異方性化を図った磁石である。押出し成形ではリング形状のラジアル異方性が付与されるのが特長である。磁界中成形を必要とする焼結Nd-Fe-B磁石では困難な長尺品成形、大径、小径の幅広い形状にも対応可能である。磁気特性もラジアル異方性リング磁石では最大級の(BH)maxで358kJ/m³も開発されている¹⁴⁾。高特性ラジアル異方性の特長を活かし、サーボモータなどに使用され大幅な小型化に貢献している。

4 . 6 Nd-Fe-Bボンド磁石

Nd-Fe-Bボンド磁石は1983年に熱間加工性磁石と同様Croatにより開発され、超急冷薄帯を原料とし、樹脂と混合、成形した等方性のボンド磁石である。一般にはMQ1と呼ばれている。樹脂の種類により圧縮成形法、射出成形法などがあり、前者はエポキシ樹脂、後者はポリアミド樹脂が一般に用いられている。寸法精度が良く、複雑形状、薄肉形状品が製造可能である。また等方性のため着磁方向の自由度があり、希土類磁石の中では比較的安価であることなどにより、この10年間で急速に需要を伸ばしてきた (Fig.9) . ハードディスクドライブ

Fig. 9. Production trend of rare earth bonded magnets (in tonnage). (Statistics by Japan electronic materials manufactures association, estimation after 1998)

(HDD)やCD-ROMのスピンルモータなどOA機器関係の小型モータに多用されている。HDD分野では近年記憶消去の問題から磁性材料に対する磁性粉や種々のイオン、ガスのコンタミネーションが、またモータの騒音、振動の問題から磁石の寸法精度がより厳しく制限され、要求品質が高度化している。さらに磁気特性上も超急冷薄帯の特性向上、成形技術向上などにより圧縮成形品では(BH)maxが96kJ/m³の磁石が量産されている。射出成形品では(BH)maxが64kJ/m³にも達する。自動車関係の用途にも少しずつ使われ出している。そのためにFig.10に示すように、180℃の温度でも不可逆的な減磁率が少ない耐熱性の優れた磁石も開発され¹⁵⁾、アクチュエーターやセンサーに使用されている。

Fig. 10. Aging of the Irreversible Flux Loss at High Temperature

4.7 新磁石

Nd-Fe-B磁石が発明されてから約15年になるが、Nd₂FeB化合物を超える新しい化合物は出てきていない。残念ながらポストNd磁石は市場にでるのは当分先になりそうであるが、新磁石としては色々開発が進められている。HDDR(Hydrogenation-Decomposition-Desorption-

Recombination)法による異方性Nd-Fe-Bボンド磁石がある¹⁶⁾。これはNd-Fe-BにGa, Co, Zrなどを添加した合金を溶体化処理後粉砕し、水素雰囲気中でNdH₂, FeB₂, -Feの3相に分解させ、さらに真空中で水素を放出させることにより、Nd₂Fe₁₄B化合物に再結晶させる方法で、この再結晶の工程で異方性が付与された粉末ができる。この粉末に樹脂を添加し、磁界中成形した異方性ボンド磁石が開発されている。(BH)maxで144kJ/m³が報告されている。

一方、1990年にアイルランドのCoey¹⁷⁾、日本の入山ら¹⁸⁾によりSm₂Fe₁₇合金を窒素雰囲気中で熱処理し、固相-気相反応によりN原子を合金化させたSm₂Fe₁₇N₃磁石が発表された。高い飽和磁化、大きな軸磁気異方性、高いキュリー温度を有していることから注目されている。高温に加熱すると分解してしまうので、通常の焼結法は適用できずボンド磁石として開発が進められている。(BH)maxが160kJ/m³以上も報告されている。

(文 献)

- 1) 山田龍三, 森山 稔, 内藤幸宏, 山本徹男: 第38回自動制御連合講演会(1995), 409
- 2) 山田廣志, 大石卓生, 神馬 敬: 電気製鋼, **66**(1995), 178
- 3) 逢坂哲弥: エレクトロニクス, (1998, Apr.), No.528, 18
- 4) T. Nagashima: Berichte Arbeitsgem Ferromag., (1959), 148
- 5) 斎藤章彦, 矢萩慎一郎: 電気製鋼, **61**(1990), 183
- 6) 谷崎勝二, 青木博幸, 矢萩慎一郎, 斎藤貴伸: 日本磁気学会誌, **14**(1990), 383
- 7) 斎藤貴伸, 矢萩慎一郎: 電気製鋼, **61**(1990), 169
- 8) 横田 稔, 小笠伸夫, 近藤 孝, 佐藤謙一: 日本金属学会会報, **21**(1982), 260
- 9) 佐藤光司, 大野丈博, 升形芳樹, 島田典幸, 志賀博一: 日立金属技報, **12**(1996), 49
- 10) 渡部健司, 矢萩慎一郎, 西川太一郎, 宮崎健史: 材料とプロセス, **11**(1998), 1274
- 11) 斎藤貴伸, 矢萩慎一郎, 西川太一郎, 菊田高敏, 松浦孝之, 宮崎健史: 電気製鋼, **67**(1996), 261
- 12) 草加, 河野, 古谷: 粉体および粉末冶金, **44**(1997), 495
- 13) 豊田: 粉体および粉末冶金, **44**(1997), 17
- 14) 西尾: Gorham Intertech Consulting, (1997)
- 15) T. Furuya: JEE, (Oct., 1997), 37
- 16) 武下, 中山: 日本応用磁気学会誌, **17**(1993), 25
- 17) J. M. D. Coey et al.: J. Magn. Mat., **87**(1990), 251
- 18) 入山, 今井: 特許公報 特許第2703281号