研 究

磁 性 合 金 と 其 理 論

本 多 光 太 郎*

Kotarô Honda :—Magnetic Alloys. In the present paper, different kinds of high permeable alloys invented both in abroad and home were described, and a theory of high permeability was put forwards. Alloys of constant permeability was also described. Lastly a description regarding alloys used as permanent magnets, such as K. S. magnet steel, M. K. magnet alloy, Kato's sintered magnetic alloy and New K. S. magnet alloy, was given together with the theory of high coercive force. As a support of this theory, an interesting fact was observed that pure iron which was specially treated, showed a high coercive force as high as 150 Oersteds.

(Received, April 16, 1937)

磁性合金とは磁氣を帯びる合金のことで多くは鐵合金である。其他ニツケル、コバルト合金も磁性を有する。現今發電機、電磁氣計、電信、電話、ラヂオ等磁性合金を使用する量は極めて多い。又自動車飛行機等には耐久磁石と稱する磁性合金が必要である。本研究は最近發見された各種の特長を有する磁性合金に就て報告する。

一般に物質を其磁性によつて分類すると常磁性體と反磁性體とになる。常磁性體とは磁場が作用する時、磁場の方向に磁化するもので、反磁性體とは磁場と反對の方向に磁化するものである。常磁性體中殊に磁化し易きものを強磁性體と名付ける。九十餘種の元素中約半は常磁性で半は反磁性である。又強磁性元素は鐵、ニツケル、コバルトの三種のみである。又強磁性元素間の合金及び強磁性元素と少量の他の元素との合金は強磁性體である。尙銅、アルミニウム、マンガンの三元素は何れも非強磁性體であるが三者約一原子量づゝ配合せる合金は強磁性體で Heusler 合金として知られてゐる。其他マンガン-アンチモン、マンガン-錫、マンガン-窒素、クロム-酸素の合金は餘り強くはないが何れも強磁性體に屬する。

強磁性體中殊に特長を有し、磁性材料として盛に使用せらるゝものを二種に大別することが出来る。其一つは極めて弱い磁場に於ても磁化し易く、磁場を取去れば殆ど

全く其磁氣を失ひ、磁氣履歴現象の極めて小なるものである。例へば純鐵及び後に述ぶる高導磁率合金の如きである。其二是強い磁場を加へざれば容易に磁化しないが一旦磁化すれば磁場を取去ると磁氣の大部分は殘存し履歴現象の著しく大なるものである。例へば焼入せる鋼の如きで之より造る磁石を耐久磁石と名づける。要するに以上二種の磁性合金は兩極端の特性を利用せるものである。以下順次之を説明する。

1. 高 導 磁 率 合 金

高導磁率材料としては昔より純鐵或は少量の硅素を含む硅素鐵が用ゐられてゐたが電氣計量器、無線通信、ラヂオ等の異常な發展に伴ひ從來の磁性材料では満足の出來ない様になり此方面の研究が盛に行はれ種々偉大なる特性を有する磁性合金が發見された。次に其二三に就て述べる。

(a) パーマロイ

今より十數年前より米國ウエスタン、エレクトリック會社のエルメンは此方面の研究をして優秀なる高導磁率合金を發見してパーマロイ(磁化し易い合金)と名づけた此合金は鐵に 78.5% のニツケルを加へたもので弱磁場に於て純鐵の約 30 倍の磁氣の強さを持つてゐる。此合金は一度約 600° より急冷して始めて大なる高導磁

* 東北帝國大學金屬材料研究所

率を有するに至る。米國に於ては此合金を薄き帶狀に作り海底電線に巻いて連續裝荷を行ひ以て通信信號の明瞭度を増し通信速度を數倍に増加することに成功した。

我金屬材料研究所に於ても逕信省電氣試驗所々員仁科存學士は高導磁率合金の研究を行ひ一層優秀なる合金を發見して之を超パーマロイ第一號と名づけた。此合金系の一例はニッケル 70~80% 鐵 15~30% コバルト 0~4%, マンガン 0~1%, 硅素 0~2% なる成分を有し、之を 580° 附近より急冷すれば高導磁率を有する特殊合金となる。

以上のパーマロイは高溫度より急冷しなければならないから使用目的によりては不便である。この不利を避くる爲め仁科學士は更に研究を進め急冷を要しないパーマロイ第二號及び第三號を發見した。第二號合金はニッケル 40~90%, 鐵 10~60%, クロム 0~5% 錫 0.1~5% 等を含有し燒鈍のみによつて高導磁率を有せしめることが出來て安定である。第三號合金はニッケル 84.5~95% 鐵 5~20%, クロム 1~6%, チタニウム 0.1~2% を有し第二號と同様燒鈍のみによつて高導磁率を有するから常溫に於て安定である。

(b) センダスト

金屬材料研究所の増本量博士はセンダストと稱する高導磁率合金を發見したが此合金はパーマロイとは全然別種の合金である。パーマロイ系の合金は多量のニッケルを含むため價格も高いがセンダストは少量の硅素 (6~11%) とアルミニウム (4~8%) を含む鐵合金であるから頗る廉價である。此合金の弱磁場に於ける磁氣の強さは超パーマロイの約 1.5 倍もあり且つ非常に脆いから微粉にすることが容易である。故に之を粉末として適當なる電氣絶緣物を混じて加熱した後壓縮して環狀心を作り電話回路用裝荷線輪として用ゐることが出来る。この合金は仙臺の研究所で發見されたものであるからセンダイ、ダスト即ちセンダストと名づけたのである。

センダストは脆いから板、線狀に引延ばすことは出来ないが鑄て種々の形に作られる。

センダストは弱磁場に於て強く磁化されるからリレーのコアとして便利である。普通軟鐵心を用ひてゐるが其代りにセンダストを棒狀に鑄て使用すれば最も有効で且つ價格も安い例へば二、三百マイルを距てたる電信に

於て受信局の局部電池を全然省略するも明かに通信する

第 1 表

	合金名稱	初導磁率	最大導磁率
1	電解鐵	200	7,000
2	硅素鐵	400	6,000
3	パーマロイ	12,000	120,000
4	超パーマロイ第 1 號	13,000	44,000
5	同上第 2 號	12,800	40,000
6	同上第 3 號	15,700	39,500
7	センダスト	38,000	120,000

ことが出来る。第 1 表は各種磁性合金の導磁率を示す。

前記パーマロイ系の合金は靱性を有し微粉にすることは困難であるが之を熔融點に近き高溫度に熱したまゝロー

ールにかけて引延せば著しく脆性を生じ容易に粉碎することの出来る状態となる。歐米では此微粉をセンダストの如く適當なる絶緣物と混じて加熱し冷却せる後壓縮して環狀心を作りて電話回路裝荷線輪として用ひてゐる。茲に注意すべきことは此種の回路裝荷用の環狀心の導磁率は合金に特有なる導磁率に比して著しく小なることである。例へば上記の如く 20,000~30,000 の初導磁率を有する合金も粉狀心に作れば僅かに 100 内外の値を有するに過ぎない。其原因は微粉は其表面が薄き絶緣膜によつて覆はるゝが故に堅く之を壓縮するも尙著しく微粉の特性を保持し均一物質と異なるからである。即ち各微粉に各個の反磁場が作用して有効磁場を著しく削減するによる。例へば微粉を個々の球と考ふれば其反磁場は $\frac{4\pi}{3}I$ で著く大なる値を有する。

(c) 高導磁率合金に關する理論的考察

終りに上記の磁性合金が高導磁率を有する原因に就て説明する。高導磁率の説明に就ては歐米の諸學者の學說も少くないが未だ私に満足と與へるが如きものはないから、次に自分の考を御紹介する。

今純鐵の細長き針金を取り之を極めて弱き一定の磁場に置き溫度を次第に上昇せしめつゝ磁化の強さを測定して導磁率を計算するものとする。其結果は第 1 圖に示す如く導磁率は初めは略一定なるも 200° 附近より段階的に少しく増加し 600° 附近よりは急激に増加し 708° にて最大値に達して後急に減少し 760° 附近にて殆ど零となる。常溫に於ける導磁率の値は 700 なるに關らず 700° に於けるその最大値は 2950 にも達する。

此異常の増加は次の如く説明することが出来る。強磁性體に關する大久保博士と余との學說に従へば強磁性結晶内に於ては原子磁石は凡て空間格子に沿ふて配列せら

れ數多の微小なる磁區に分れて存在する。各磁區内に於ては原子磁石は凡て安定なる同一の方向を取つてゐるが、その方向は磁區によつて異なる。尙同一磁區内の各原子磁石は熱的振動に伴ひ平均方向の廻りに廻轉振動をなし、その振幅及び位相は略同一にして温度の上昇と共に増大するものと考へる。

第 1 圖

然し一定の温度に於て凡ての磁區が同一の振幅と位相とを以て振動するのではない。單に振幅の平均値がマックスウェルの分布法則に従つて決定せらるゝものと考へる。

此說に従へば前記の磁氣の異常増加は容易に説明することが出来る。即ち磁區の振動にして平均値より大にして臨界面以上に及ぶ小數の磁區内の各原子磁石は熱的振動の爲めに漸次磁場の方向に急速廻轉をなし、殘餘の磁區は振幅の再分布をなして同一操作を繰返して遂には磁區の大多數が磁場の方向を中心として廻轉振動をなし著しく磁氣を増すのである。従つて實測の示すが如く磁氣の強さは A_2 變態の直前の温度に於ける飽和磁氣に近い値をとる。

一般に鐵の A_2 變態は之に他の元素が加はり固溶體を作るときは一般に下降するものである。假りに A_2 點の常溫附近に下る合金があるとすれば常溫に於ける導磁率は鐵に比して著しく増大すべきである例へばパーマロイ第二號、第三號の如く多量のニッケルを含有する合金では A_2 變態は著しく低く且つ温度の下降による磁氣の減少も緩慢である。従つて第2圖に示す如く第二號合金の A_2 點は 370° に下り且つ 100° 以下の磁氣の減少は頗る小で常溫に於ける磁氣は著しく大となる。要するに第二號及び第三號の合金に於ては常溫の状態が鈍鐵の 700° 附近の状態に相當して原子磁石の廻轉振動の振幅が鐵の

700° 附近の値に近きことを示してゐる。この振幅の増加はニッケル格子の各所に鐵原子が存在して多少格子の歪を生ずる爲め相隣れる原子の熱的衝突が非對稱的となり爲めに廻轉振動の振幅を増加するによるものと考へられる。

エルメンのパーマロイ

及び第一號合金は約六百

度より急冷して始めて高導磁率の合金となるのは急冷によつて高温の状態が多少常溫に持來されるからである。凡そ純粹の金屬は急冷の効果は少ないが合金に於て著しい。パーマロイ及び超パーマロイ第一號は其の一例である。第3圖に見る如く超パーマロイ第一號の焼入温度は

第 3 圖

丁度 A_2 點を越えた所にある。この第一號合金が急冷によりて高導磁率を得る所以は急冷により格子の歪みが生ずる爲め常溫に於ても原子磁石の廻轉振動の振幅が比較的大なる爲めと考へられる。

2. 恒導磁率合金

(a) 恒導磁率合金 (パーミンバール)

恒導磁率合金とは比較的強い磁場まで一定の導磁率を持續する合金を云ふのである。

此合金もエルメンの發見せるもので磁場の廣い範圍に涉つて導磁率は一定してゐる。成分は鐵 30%, ニッケル 45%, コバルト 25% より成り導磁率の一定の範圍が鐵の約七倍である。此の特性を得るにはこの合金を充分焼鈍し

た後約 450° で 20 時間加熱するを要する。此合金を通信回路の變壓器の磁心として使用すれば磁化曲線の非直線部に起因する電流波形の變化を伴はないので通信が極めて明瞭である。此の合金の缺點は一度非直線部に相當する磁場を作用せしむる時は上記の特長を失ふことである。

(b) イソパーム

イソパームは上記の缺點を補ふため獨人ダールの發見せる合金で、パーミンバールよりも一層導磁率一定の範圍廣く且つ磁心損失も極めて小である。成分は例へば鐵 35%、ニッケル 52%、銅 13% より成り且つ適當なる低温加工を施したものである。

(c) 超パーミンバール

此合金は我研究所の仁科學士の發見せるもので導磁率一定なる範圍は鐵の 12 倍に達しパーミンバールより一層安定である。成分は鐵 50~90%、ニッケル 1~20%、コバルト 5~40% より成り低温加工して用ゐる。

第 2 表

	名 稱	初導磁率	恒導磁率の範圍
1	電 解 鐵	200	0.4
2	パーミンバール	60	4.0
3	イソパーム	66	4.0
4	超パーミンバール	64	7.4

第 2 表は各種恒導磁

率合金の特性の一例を示す。

3. 耐久磁石用合金

耐久磁石として必要なる性質は残留磁氣の強きことと耐久性のあることである。普通の鋼を焼入したのも磁石として用ゐられるが耐久度が小さいので初めの残留磁氣は相當強いが時間の経過と共に著しく減少する。以前歐米に於て廣く用ゐられたる磁石鋼はタングステン鋼でタングステン 5~8%、炭素 0.7~0.9%、クロム 1~2% を含む特殊鋼であるがその耐久度は十分でない。

耐久磁石の耐久度を表はすには通常保磁力なる量を用ゐる。保磁力とは残留磁氣を零にするに要する逆方向の磁場の強さである。例へば炭素鋼の保磁力は 50 エルステッド、タングステン鋼の保磁力は 70 エルステッド内外である。残留磁氣の強さは磁石の寸方比によりて異なりこの比の小なる程小となる。

K.S. 磁石鋼は今より 19 年前我金屬材料研究所にて發見されたる特殊合金で數年前までは世界で最も大なる耐久度を有する磁石鋼であつた。K.S. なる名は當時多額

の研究費を寄贈された男爵佐友吉左衛門氏の好意に報ゆるために氏の頭文字 K.S. を取りて名命せるものである。この磁石鋼はタングステン 6~8%、クロム 1~3%、コバルト 20~36%、炭素 0.7~1.5、殘餘鐵より成る特殊合金である。之を 950° より焼入すれば大なる残留磁氣感應度 12,500~8,800 ガウスと保磁力 200~250 エルステッドとを有する。また寸方比數倍の圓柱狀磁石に於ては残留磁氣感應度はタングステン鋼の約二倍でその保磁力はその三倍半に達する。K.S. 磁石鋼は鍛鍊が容易で且つ振動に對して安定である。故に各種の電氣計量器、電話機、ラヂオの部分品、自動車飛行機等に盛に使用される。

然るに今より六年前獨人ケスターは鐵、コバルト、モリブテンの合金は 1300° より急冷し約 600° にて數時間焼鈍すれば優秀なる残留磁氣と保磁力を示すことを發見した。例へばコバルト 12%、モリブデン 18% を含む鐵合金は夫々残留磁氣感應度 12,000~7,300 ガウスと保磁力 100~350 エルステッドとを有する。

ケスターと同時に東京帝國大學の三島徳七博士及び東京工業大學の加藤與五郎博士は保磁力に於ては K.S. 磁石鋼或はケスター合金より遙かに大なる合金を發見した。即ち三島博士の M.K. 合金は約ニッケル 30%、アルミニウム 12%、コバルト 20% 以下殘餘鐵より成る特殊合金である。之を金型に鑄込みたる後 600°~650° に數時間焼鈍すれば残留磁氣感應度約 11,000~7,500 ガウス、保磁力 200~650 を有する合金が得られる。此合金は溫度に對しては極めて安定であるが、しかし鍛鍊は不可能である。

又加藤博士の磁性合金は磁鐵礦 (Fe_3O_4) と亞鐵酸コバルト ($\text{Co.Fe}_2\text{O}_4$) の粉末を等量に混じて型につめ壓縮して後 1000° に熱して焼結せるもので、次の如き特性を有する。即ち残留磁氣感應度は 5,000~3,000 ガウス、保磁力は 400~700 エルステッドである。

新 K.S. 磁石鋼は 3,4 年前我研究所にて發見された特殊合金であり其成分はニッケル 10~20%、チタン 8~25%、コバルト 20~36% 殘餘鐵である。此合金を熔融して金型に注入し更に 650° に二三時間焼鈍すれば残留磁氣感應度 7,600~6,500 ガウス、保磁力 780~920 エルステッドなる優秀なる特性を有する磁石となる。

第 4 圖は此合金とタングステン鋼とに於ける外部磁場 1500 エルステッドに對する残留磁氣感應度と寸方比の

關係を表はす曲線である。此曲線の形より見れば新 K. S. 鋼に於ては寸方比の減少による残留磁氣の減少が如何に緩慢であるか明かである。又此合金は温度に對して極めて安定で 600° まで熱するも磁氣の減少は極めて僅かである。然し三島加藤兩博士の合金と同じく鍛錬は不可能である。新 K.S. 磁石鋼は耐久力に於ては現在世界最良の磁氣特性を持つてゐる。

尙耐久磁石の特性を有する合金中で外部磁場に對して残留磁氣の變化の大なるものは磁氣録音用合金として用ゐられる。例へば鐵 20~50%, ニッケル 15~55%, 銅 15~55%, 及び其他少量の元素より成る合金は第 5 圖に

第 5 圖

示す如く、永久磁石用合金に比して、飽和残留磁氣感應度の値は比較的小であるが磁場に對する變化大なるため録音感度は極めて大である。此合金は最近我研究所にて發見せるもので、センアロイと稱する。終りに上記の耐久磁石合金が何故にかく大なる残留磁氣と保磁力を有するかを説明する。

先づ焼入せる K.S. 磁石鋼を顯微鏡を以て觀察すれば極めて微細なる小結晶即ち麻留田の微結晶の集合體より成つてゐる、又ケスター及び三島兩博士の磁石も同様固溶體より分離せる微結晶の集合體即ち所謂分散系より成つてをる。又加藤博士の磁石も微粉末を壓縮し焼結したものであるから微粉子の集合體である、即ち以上四種

の合金は何れも分散系より成つてをる。

單結晶の内部では原子磁石は空間格子に沿ふて規則正しく配列されておるから磁化も容易である。又逆に磁場を取去れば各原子磁石は殆ど元の方向に復し残留磁氣は極めて小である。之に反して多結晶體の結晶粒の境界では原子の分布は内部よりも稍密で且つ不規則であるから磁化が困難である。結晶粒の大きさが小なれば小なる程境界の全體積は増加し結晶内部の全體積は減少する、故に微細なる小結晶の集合より成る物質の磁化は頗る困難であるが然し一旦強く磁化すれば磁場を取り去りたる後も磁氣の大部分が残存する。即ち壓縮された分散系は大なる残留磁氣と保磁力とを有する所以が諒解される。一般に強磁性體の單結晶の残留磁氣と保磁力は極めて小さいが同一物質が多結晶より成れば是等の量が著しく増大することは上記の考を裏書するものである。

以上の説明の正しきを示す他の一例は鐵粉の保磁力である。純鐵棒の残留磁氣と保磁力の小なることは已に前に述べた通りであるが還元鐵の如き微細なる鐵粉を強く壓縮して棒状となせるものゝ残留磁氣と保磁力とは均等

第 6 圖

質の場合より著しく大である(第 6 圖(a)). 又舊第一鐵(FeC_2O_4)を熱して得たる鐵の粉末は極めて微細で空氣中にて自然に乾燥する位である。この微粉末を水素氣流中にて約 2% のパラフィンと混じて強く壓縮して棒状にしたものは第 6 圖(b)に示す如く残留磁氣感應度 4500 ガウス、保磁力 170 エルステッドに達した。但し此壓縮鐵粉の密度は 3.0 であつたから残留磁氣感應度をして比較に便ならしめる爲め鈍鐵の比重 7.9 と 3.0 との比を乗じたるものを用ゐた。鈍鐵の保磁力 170 エルステッドは意外の數値であつて、前記余の學說の正しきを裏書してゐる。