

水冷銅マグネット用銅銀合金板材の圧延及び打ち抜き特性の改善

独立行政法人 物質・材料研究機構 強磁場研究センター

主幹研究員 浅野稔久

(平成14年度研究開発助成 AF-2002016)

キーワード：銅銀合金板材、水冷銅マグネット、ビッター盤、加工精度、積層特性

1. 研究の目的と背景

現在 30 T 以上の定常強磁場を発生するハイブリッドマグネットや水冷銅マグネットには銅銀合金の板材が使用されている。銀の組成を 16at.%程度まで高め強加工を施した銅銀合金は強度と導電率双方に優れた材料であり、本合金の特性が現在の定常強磁場の上限を決定しているといっても過言ではない。強磁場を発生するためには本合金を第1図に示したような使用条件を考慮して配置された冷却孔を有するビッター盤に打ち抜き加工し、同じ形状に打ち抜いた絶縁膜と組み合わせて通電経路を螺旋状に積層した後、積層方向に圧縮して良好な電気接触を確保し電磁力や冷却水圧によるずれや変形を起こさないようボルトで締め付ける必要がある。この様にして作製する水冷銅マグネットに強磁場を安定的に発生させる際にビッター盤に由来する以下のような問題がある。

- 1) ビッター盤素材の強加工圧延から生じる波打ち
- 2) ビッター盤全域にわたる厚さの不均一
- 3) 冷却孔の仕上がり寸法のばらつき
- 4) だれによる冷却孔と周辺形状の変形

限られた電力で水冷銅マグネットの発生磁場を向上させるためにはビッター盤には高導電率と同時に、さらなる高強度が望まれる。打ち抜き加工とマグネットに積層する観点からはビッター盤用の素材は波打の少ない厚さの均一な仕上がりが望ましい。しかし、強度の増加とともに打ち抜きは容易ではなくなり、仕上がりの精度を低下させやすく、薄くまで加工すると板材の波打ちが生じがちとなり、薄板を使用するとビッター盤の必要打ち抜き枚数は増加し、製作費もかさむためあまり薄くない方がよい。また、ロール加工の仕上がり横断面形状は中央部が厚く両端が薄くなるため、この差を小さくすることも重要である。さらに、打ち抜き後に解放されたひずみにより、ビッター盤にゆがみが生じる等の問題がある。

コイルの仕上がり高さ寸法の予想と制御はコイルの同軸組みあげ時にとって重要事項であるが、そりなどを矯正したと仮定しても、打ち抜き時に発生する歪みや、バ

リ除去加工後のビッター盤の実効平均仕上がり厚さの正確な予想は簡単ではない。広幅素材はより大型の高性能圧延機による圧延加工が望ましい。しかし、製造量が少量なこともあり現実的には使用可能なロールの性能の範囲内で作製する解決策をとらざるを得ない。我々は、水冷銅マグネットの発生磁場の向上と長寿命化のためのビッター盤作製条件を探索する目的で、現状で委託可能な圧延ロール加工をした場合に達成可能な銅銀合金板材の特性と、その素材を使用して作製したビッター盤の特性を比較検討した。

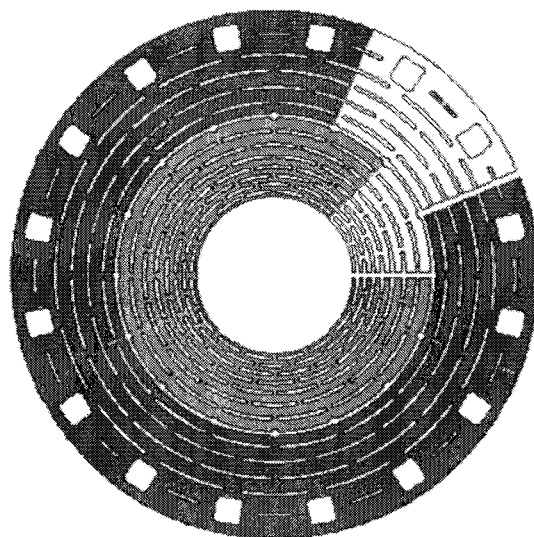


図1. ビッター盤打ち抜きパターン例 内径は38mm
白い部分には絶縁膜が重ねてある

2. 実験方法

銅銀合金板材は純度 99.99%以上の銅と銀を用いて銅16at%銀合金を真空溶解、鑄造後、鍛造、表面切削行程を経た後4段または2段ロールによる圧延と中間熱処理および整形を繰り返して作製した。素材の平滑度と平坦度をできるだけ高めるため、圧延工程では欠け落ちた小片の除去に努め、仕上げ圧延の工程は表面研削した圧延ロールに交換してから行った。その後、端部切り落としを行った後、

正方形に切り出し、強度と導電率調整のための最終熱処理をしてビッター盤打ち抜き加工に用いる素材とした。最終熱処理を行うときにその修正のために平板で挟んでネジで締め板材のそりを直す。一部の試料は、通常の枚数の半分以下の枚数を挟み同程度の締め付けを行った状態で最終熱処理を行い、ビッター盤打ち抜きのための試料素材とした。それぞれの素材について、室温での、導電率、引っ張り強さ、0.2%耐力、弾性係数を評価した。一部の試料については373Kの条件でも評価した。

ビッター盤の打ち抜きの際の仕上がり精度には溝幅は20 μ m、スタッドボルト用の角穴、丸穴は15~20 μ mを目標として、1種類のビッター盤につき、冷却孔用、スタッドボルト用、外周および内周用複合、スリット用の各簡易金型を作製し、仕上がり調整した後打ち抜いた。一部のビッター盤は裏側からも抜き返した。打ち抜き加工後、かえりを削り、洗浄してビッター盤とした。

各ビッター盤につき、厚さ、各環状配列の溝の幅とスタッドボルト用の穴の寸法をデジタルノギスで測定した。ビッター盤圧着の際の加圧力に対する全電気抵抗と、積層高さの変化を観測した。さらに、各種ビッター盤につき2枚重ねたときの表面間の圧力を、富士フィルムプレスケールPRS-MSを2枚の間に挟み、両側から平板で加圧した後、同社圧力画像解析用専用スキャナFPD-9210で読みとり付属ソフトFPD-9210S Ver.1.0で接触圧の解析をした。

3. 銅銀合金板材特性とそりの低減

ビッター盤にかかる電磁力の設計限度はおおむね室温破断強度の70%前後を目安とし、許容昇温限度とともに考慮してビッター盤内の冷却孔の配置を決定する。水冷銅マグネット性能向上のためには素材の圧延や打ち抜きしやすさへの改善は少なくともこの強度と導電率特性を維持または改良しつつ行う必要がある。これまでに作られた素材のなかから典型的な高強度高導電率銅銀合金板材の応力歪み特性を第2図に示す。ビッター盤に加工され、水冷銅マグ

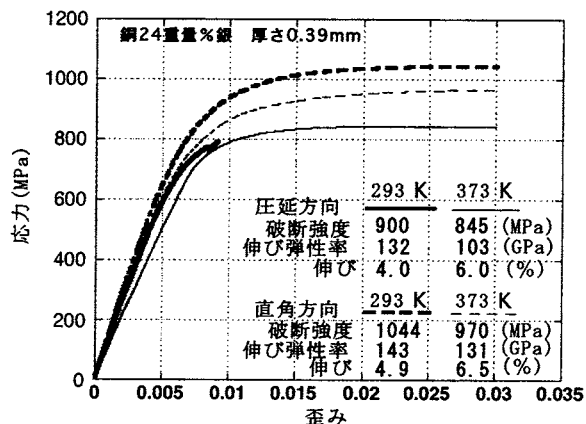


図2. 銅銀合金板材の特性例

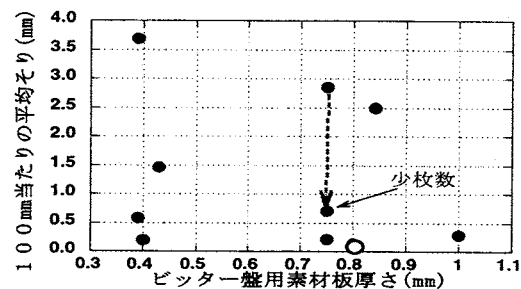
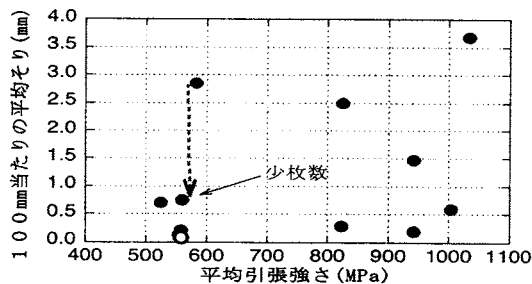


図3. ビッター盤用素材板のそりの比較

ネットとして運転するときには部分的には370K付近まで昇温した状態で使用される。素材ごとにばらつきがあったが、昇温してもなお高強度高導電率特性を示す。

ビッター盤作製のための打ち抜き加工用に正方形に切りそろえた銅銀合金板材素材のそり具合の比較結果を第3図に示す。白抜きの丸印は水冷銅マグネットの電磁力がそれほど強くない部分に使用可能な市販の銅クロム系合金板材の結果である。一連の銅銀合金板材も圧延方向に対して直角方向の板の厚さは中央が最も厚く、両端付近が薄い分布となっている。その差は0.75mm板の場合で、最大数 μ m程度であった。これまでに作製された素材は到達強度および仕上がり厚さに関わりなく、わずかなそりに収められている場合がある反面大きめのそりが現れてしまった物も多々ある。高強度を実現した場合、より強加工が求められるため波打が大きくなったり、波の密度が高まったりしがちになると考えられるが、結果は高強度板でもかなり平坦な物が得られることがある一方で、ほぼ同じ仕様の板を再度作製しても、ときには同様な結果が得られないことを示している。また、厚めの板材に仕上げ、比較的低い強度の板にしても必ずそりを小さくできるとはいえなかった。

今回の作製も含め毎回、目標とした強度と導電率はほぼ達成できた。しかし、製造の際の加工仕様、手順等には差がないはずの場合でも、そりの大小で比較すると仕上がりにはかなりばらつきがある。板材の製造元の追跡調査では溶解、鍛造、成型、圧延および熱処理の作業行程および使用装置そのものには変わりがなく、すぐに特定できる原因は見えにくかった。ただ、作業従事者が同一ではなかったため、作業上の個人差が大きな違いを発生する余地があり、その差は明白に存在するという事なので作業内容の微妙な差を明らかにして手順や作業基準に盛り込むことがすぐ

に行うべきそり低減対策といえる。しかしながら、現状では製造基準に具体的に明文化して盛り込めるほど明らかになっていないので、次善の策としてそりがでてしまったときの回復策を探索し、以下のような試みをした。

作り直しとなった最悪の場合でも、強度、導電率とも目標値を満たしていた。しかし、圧延工程進行に伴う圧延材の辺縁部欠落片の除去が不完全だったために生じたロール表面の荒れの影響を、ロール交換後の仕上げ行程での圧延によっても除去しきれなかった。そこで経費と時間がかさむので例外的ではあったが、作り直した。それでも作り直しの製品の3割程度に大きなそりがでたので調質条件の変更を試みた。最終圧延加工終了後に正方形に切り出した後の、導電率調整等のために調質熱処理のとき、整形を目的に上下から剛性の高い平板とバネとねじで板材を平行に締め付けた状態で熱処理する。整形治具の締め付け能力には上限があるため、板の枚数が多くなるほど1枚あたりの整形圧力は低下する。各板材を平らに強制変形させられないほど枚数が多くなると調質熱処理による整形効果が期待できなくなる。そこでこれまで行ったときの整形治具あたりの枚数を半減させてより強制変形をさせやすくした状態で調質熱処理を行ったところ全域にわたる平坦度が著しく改善され、その程度は減少した。第3図中の点線矢印はこれまでの枚数で締め付け調質した物と半減した枚数で調質した場合の比較である。図中の黒丸の中で少枚数の表示がある物だけが枚数を減らした処理をした物で他は通常の枚数である。

4. 打ち抜き加工特性

銅銀合金板材は高強度と高導電率を同時に満たすが、実用の観点からは高強度のより高い側の性能を要求される用途が大部分であり、この要求を満たす代替品がないのでその重要性が特に高まる。マグネット中心部の特に強い電磁力を受ける部分に使われる素材となる板材は1000Mpaに及ぶ破断強度もめずらしくはない。このような板はビッカース硬さが280程度となり、簡易金型で打ち抜いて数百枚程度にわたって正確な仕上がり寸法や良好な抜け具合を実現、維持するのは容易ではないが素材が廉価ではないので不良品の発生は単価を引き上げることになる。

これまでに、良好な仕上がりを低価格で実現する試みとして、たとえば第1図のような冷却孔やスタッドボルト用穴を化学的に腐食させて加工した。第4図に示すように、厚さが0.4mm未満であれば、金型を用いた打ち抜き加工の場合より寸法精度はかなり劣るが使用に耐えるビッター盤の作製が可能だった。同型の穴加工を絶縁薄膜のカプトンに対してやはり化学的な方法で試みたところうまく仕上がる事が確認できた。しかし銅銀合金板の厚さが少し増

すと仕上がり寸法の精度は急速に落ちること、銅銀合金板材の銀成分の分布の均一性が少しでも落ちたところは仕上がり周囲とは違う物となり使えないという仕上りの不確定さと歩留まりの悪さの点で金型による打ち抜きの方が優れていた。

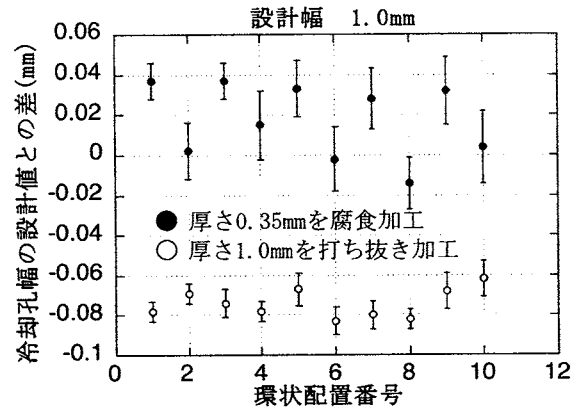


図4. 打ち抜きとエッチングの仕上がり精度比較
初期には高強度で且つ波打の出にくい銅銀合金板材は1mm程度以上の板材で得やすかった。その厚さの硬い素材に打ち抜き加工で幅1mm程度または未満の細長い穴を、また穴と穴の間の残される部分の幅も2mm程度で、残された部分のだけやバリはできるだけ小さく収めることが求められる。第5図の冷却水孔や締め付けボルト用孔の周りの広がった圧力等高線の分布から確認できるように、厚さ0.75mm以上の素材の打ち抜きではだれが比較的顕著であった。

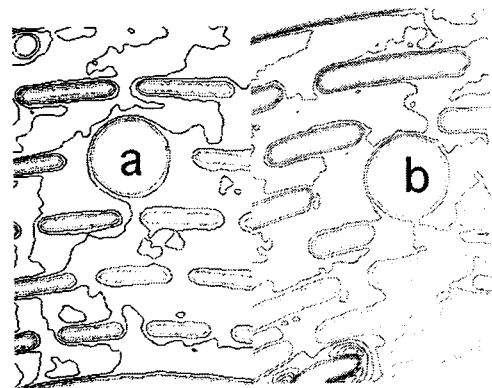


図5. 厚板ビッター盤の平坦さと打ち抜きだれ
a: 単一孔金型 b: 多孔金型による打ち抜き

さらに、これら厚めの板の打ち抜きでは押し型の破損により、板厚さの途中までしか打ち抜けていない一部の穴や、未加工、または一回抜けた切りくずが排出しきれなかった場合再び穴に戻りかみ込みを生じて除去が容易ではない部分を持つ不良ビッター盤が発生する等の不具合があった。

同じ形状のビッター盤を用いた水冷銅マグネットの製造はせいぜい2個分までであること、ビッター盤の穴の形

状や配置は次々と改良のたびに変わることからも金型製造の経費は押さえたい。打ち抜き枚数が多少増えても打ち抜きが容易な、より薄い板材から良好な仕上がりのピッター盤が得やすかった。

打ち抜きの金型は大型では特に高価になるので、最初は環状に並んだ冷却工孔が、各列で同一形状であることから、各環状列ごとにそれぞれの形状の1孔のパンチとダイの組を用意してひと穴ずつ打ち抜いて、厚さ 1.0mm の銅銀合金板に幅 1.0mm の冷却孔をピッター盤の配列状にもうけた。以後の打ち抜き全体に共通して、設計仕上がり寸法よりも小さめであったが、20 μ m程度の精度に収まっていた。しかし打ち抜きの手間が煩雑なので複数の孔を同時に開ける金型にして打ち抜き回数を減らした。最終的には打ち抜き金型の種類は1ピッター盤を仕上げるのに、位置決め孔、冷却孔、スタッドボルト孔、内周外周抜き、スリット用の種類とした。水冷銅マグネットは主に超伝導マグネットが中空室温部分に発生する磁場中に組み込み、超伝導マグネットで発生できない磁場をさらに追加発生する用途に製作した。そのため、水冷銅マグネットの最大外径は直径 340mm と固定して設計して、さらに水冷銅マグネットを同軸状に分割する設計の時は最も外側の部分はいずれも同じ冷却水パターンを採用して、外層用ピッター盤を打ち抜く大型の金型製作回数を減らした。これまで3個の外層用金型を作製し、破断強度が約 550Mpa 程度の 0.75-0.81mm の銅銀合金板材、アルミナ分散銅 (AL25)、銅クロム系合金板を打ち抜いた。打ち抜いたピッター盤の冷却孔幅の仕上がり寸法と設計寸法との差を比較した一例を第6図に示す。

表示された印の形状が同じ物は同一の打ち抜き金型を使用している。製造際の精度はこれより高い指定であるが、金型の寸法そのものが小さいことの他に、抜けのかえりを除去する加工のときに孔の内側に変形して孔幅を小さくしていることが考えられる。設計寸法との差は、単一孔の結果に比べて遙かに大きかったが、この部分の冷却には余裕がある設計のためこのピッター盤を使用した水冷銅マグネットは支障なく運転できた。試し打ちによる金型調整終了直後の打ち抜き製品では大きなかえりはないので、金型消耗による仕上がりの低下が無視できない程度生じている。不良品の発生を減らすため、途中で消耗した金型の一部のパンチの交換と調整を追加した打ち抜き加工で、少数枚処理素材の打ち抜き精度は外層の平均に近いところであった。

典型的構造である、同軸3層構造の水冷銅マグネットのより内側の部分には破断強度が、940Mpa 以上の板材を用いる。これまでは 1mm から 0.8mm 程度の板材を用いたが、打ち抜きを容易にすることを考慮して次には 0.4mm

程度の銅銀板材を打ち抜き素材とした。より薄い板材用に金型を調整する様に依頼したが、バリが残ったため、反対方向から打ち直しをしてみた。バリはかなり収まったが、まだ存在し、一部では打ち抜き孔周辺の凹凸がかえって著しくなった。第7図 a のピッター盤圧着時の圧力分布には周方向に隣り合う歪んだレーストラック状の冷却孔先端と先端の間に圧力の極大を存在することを示す密な圧力等高線の島が観察される。そこで単方向のみの打ち抜きに戻し、かえりは平面切削により除去してピッター盤の平滑さを整えた(第7図 b)。周方向の境目には第7図 a のような圧力むらはなくなった。しかし、手作業で平面仕上げをすることになり、部分的な厚さのむらが生じた。専用の加工治具を用意する必要がある。

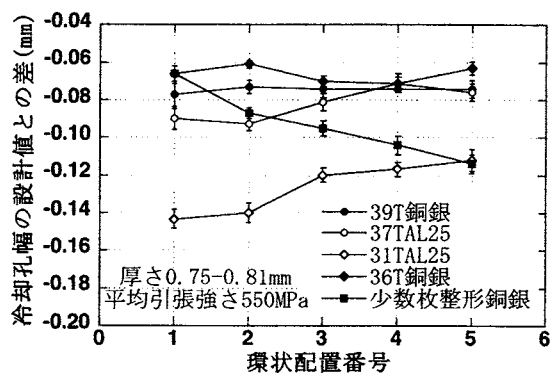


図6. 打ち抜き金型による仕上がり精度比較

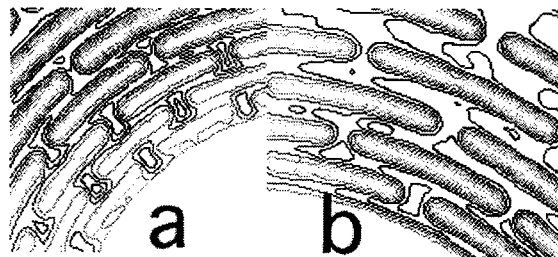


図7. a: 抜き方向を変えて2回打ち抜きのまま。
b: 打ち抜き1回でかえりを平面研磨で除去

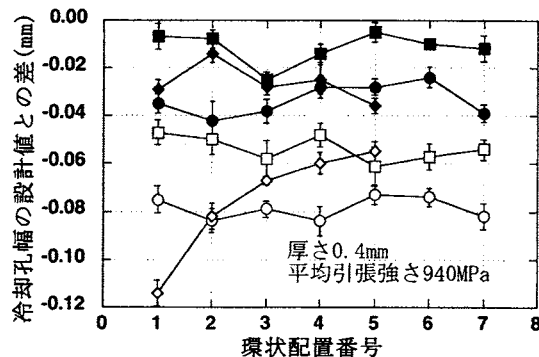


図8. 仕上がり精度の変化

薄目の素材の打ち抜きは仕上がりの向上と明らかな不良

品の減少を実現したが、金型の精度寿命の延長までは達成できなかった。第8図には700枚程度を1回として2回打ち抜きを行ったときの抜き取り検査の中で設計値との差が小さかった例と、大きかった例を3種のピッター盤について表示した。設計値との差は2回目の打ち抜き品で大きめで、ばらつきの範囲もやや広がっている。調整の限界を超えて、交換の域まで消耗が進んでいる。精度要求がより厳しい時はこの簡易金型では無理がある。

5. ピッター盤の圧着特性

正方形の素材を打ち抜いてバリ取り加工、表面洗浄が終了した状態では最も反り返っている角板の周辺部分が切り落とされることと、打ち抜き加工による塑性変形と平らな面への圧縮等により、通常はかなり平坦になる。しかし、素材の仕上がりが悪く、周期の著しく小さな波打がみられる素材からのピッター盤は打ち抜き完了後もそりがそのまま残った状態となり、重ねたピッター盤はバネがはじけた様相を示す。

良好な平坦性が得られた場合と、加工後もなお歪みが残った場合のピッター盤の積層状態の比較を第9図に示す。第9図下は波打のある素材を打ち抜いたピッター盤の場合で、圧力分布は第10図にみられるように通常の加圧より遙かに強く押された状態でも全面にわたる均一な圧着からはほど遠い。この状態では電流の局所的な集中による限度を超えた極端な温度上昇による冷却水の沸騰のため気泡が下流の冷却面の冷却効果を低下させたり、ピッター盤間に水が入りやすく電気的接触が次第に悪化するほか絶縁膜を傷めるため、水冷銅マグネットの寿命は著しく短くなる。板材表面の荒れが製造途中で現れた場合は修復が難しく出荷検査の際に不合格品にしていくしかなかった。

自然に重ねて置いただけでほとんど隙間なく重なる上の状態では均一な圧着が得られ、圧力の強さの等高線で表した時、第5図や第11図にみられるような広い間隔の等高線分布がみられた。最終調質熱処理の時に平面成型器で締め付ける枚数を減らしてそりを小さくできることを先に述べたが、この素材を用いたピッター盤の圧着時変形を比較すると、第11図および第12図にみられるように全体にわたり小さな圧力の時から比較的均一な圧着特性を示し、通常の枚数で締め付けた素材からのピッター盤と同等かそれ以上の圧着特性を示している。

第12図には比較のため打ち抜き後も平坦な形が得られなかったピッター盤の圧力に対する厚さ変形量を示す。20枚程度の場合、盤面にかかる圧力の平均強さが、小半径

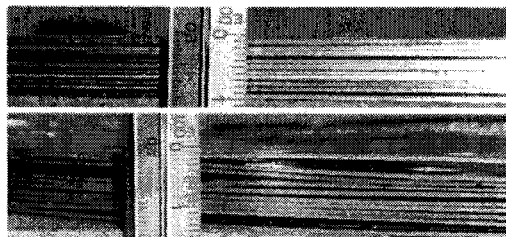


図9. 10枚のピッター盤積み重ね比較

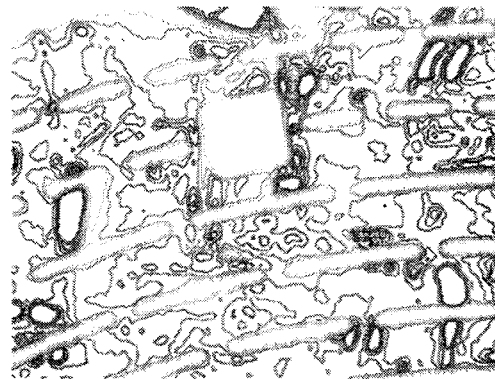


図10. 荒れた表面の積層時接触圧力の等高線図

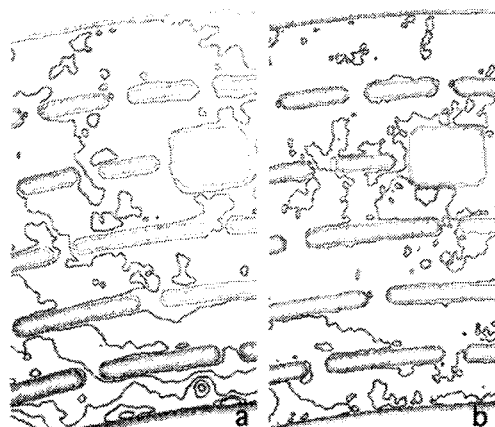


図11. a:少数枚整形。b:通常枚数での整形

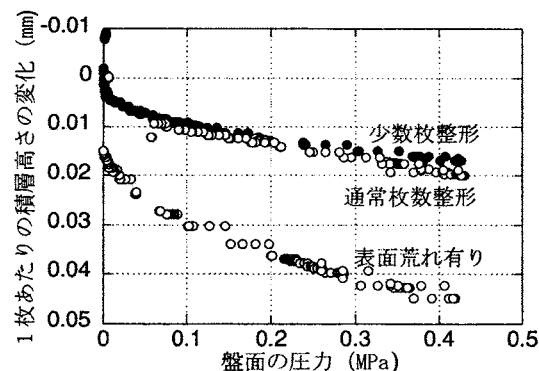


図12. 外径340mmピッター盤圧着時の変形量比較

のピッター盤で0.5MPa以上、外層用の半径と強度では0.1MPaになると重ね方向の抵抗がほとんど変わらなくなる。しかし表面が荒れていると第10図に観察されるように表面の一部はよく接触している一方でよく接触している部分よりも遙かに接触圧が低いところもなお存在す

る。周囲を密な等高線で囲まれ不規則な形で白く抜けたところは感圧限界以上の圧力になっているところである。

表面の荒れは黙視で認識しやすいが、板圧分布がまだ凸レンズ型となっている場合は認識が難しい。大部分の板材が中央と周囲の厚さが同じであっても、一部凸レンズ型の横断面分布板材が混じるとその板材の前後だけ接触面積が小さな電流経路が形成されてしまう。この場合もまた不具合を生じ、寿命の短縮を引き起こす。極端な例では、第11図の a や b の表示付近の内径から、外側に向かって1番目の環状配置冷却水孔付近までしか接触が得られず、それより外側では外径まで接触がえられなかったピッター盤が、たまたま行われた感圧紙による接触検査で確認されている。ピッター盤内では半径に反比例した電流密度分布をとるので、周辺がやや薄いピッター盤同士の接触圧が、外径付近でやや低下することが即、致命的ではないが、厳格な検査による選別は欠かせない。

より強い磁場を発生するより内側のコイルに使用されるピッター盤は運転時の電磁力による重ね方向のより強い圧縮や、コイル軸を中心にした回転力を受ける。緩みによる接触不良や、回転による冷却水路の途絶を防止するためにも、より強い圧力で締め付けておく必要がある。より強い圧力をかけたときの厚さ方向の変形を第13図に示す。

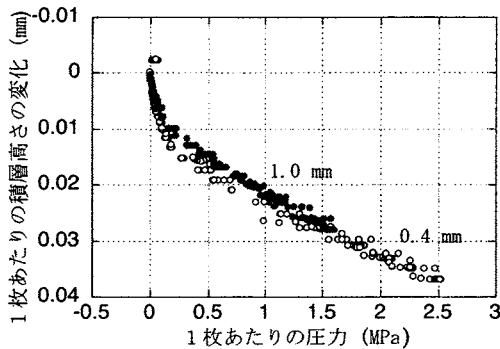


図13. 小径ピッター盤圧着時の変形量比較

2種類のピッター盤の引っ張り強度は同程度である。いずれも0.5 MPa程度までに20枚重ねた全体の抵抗変化はほぼ見えなくなった。接触面積の増加はほぼ飽和するが、変形はなお圧力とともに増加する。実際の中層コイルで数百枚積層後100トンまで加圧して締め付けたときの抵抗変化とコイル高さの変化を第14図に示す。既に30トン程度まで加圧してしばらく時間をおいた後、さらに加圧した例である。観測された変位がすべてピッター盤の変形に起因すると仮定すると、この追加加圧でピッター盤1枚あたり厚さ方向に平均20 μ m以上の圧縮変形が生じたことになる。予定通りの発生磁場の実現は勿論、同芯円的な多重構造のコイルを電氣的、機械的に結合するためには設計

通りの仕上がり高さが求められる。コイルの全抵抗と、積層コイルの高さをねらい通りにするには、その除去などと同時にピッター盤に加工した後の板の厚さの正確な仕上げがさらに求められる。

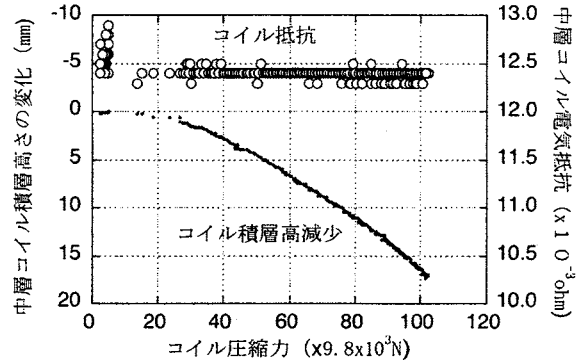


図14. 中層部実コイル圧着時の変形量と抵抗値

6. まとめと展望

最終板厚、導電率と強度を指定すると銅銀合金板材の作製の重要行程である圧延と焼鈍の条件の自由度がかなり限られてくる。高導電率高強度の銅銀板材の形状的なばらつきを解消が本研究の目標の一つであったが、行程を同じにしたはずの各製品感に波打やそのばらつきが消えず現在製造条件の模索中である。しかし、ひとたび発生してしまったある程度の波打でも調質熱処理の際の締め付け枚数を減らすことにより強度や導電率をあまり変えることなく解消できることが明らかにされ、作り直すこと無しに使用しても支障がないことがわかった。

使用した簡易金型は精度維持が容易でなかった。打ち抜き金型製作と調整は完全に外部委託したので製造詳細、隙間などの調整条件そのものは十分な情報が得られなかった。単一孔用の試作金型条件を変えて、試し打ちする宿題が残った。これらの打ち抜き試験とシミュレーションを行いその結果から、圧着特性がよく積層高さを決めやすいピッター盤を作製していくことが水冷銅マグネットの特性改善につながる。

謝辞

この研究の遂行に当たり、(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けました。財団および関係各位に深く感謝します。