

### 1-1. ランドロビン試験を始めるに至った経緯とその経過

磁気利用非破壊評価国際ネットワーク (Universal Network for Magnetic Non-destructive Evaluation 略して UNMNDE) の設立時における私の興味は、研究資金がかさむ中性子照射実験を国際協力により、自国負担が少ない方法で行うことであった。しかし、設立前に私が描いていた各研究機関の知識、技術力に買い被りがあることが次第に明らかになった。国際協力による照射実験は各国の利害が一致せず、棚上げとなった。その代わりとして塑性変形および熱時効した試料を用いたランドロビン試験を提案し、2006年から始めた。その狙いは磁性を用いた非破壊評価の基準化にある。非破壊検査の実用化には板状試料のヒステリシス・ループの計測技術が不可欠であり、本センターでもセンター設立時から研究が進められてきたが、解決には至らなかった。ランドロビン試験は Prague の会議で決定した。その時のスケジュール、参加グループは表1に示した。実際の試験は途中から参加する機関が出てきて予定より大幅に遅れ、2006年12月から2008年8月まで2年の歳月をかけて行われた。十数機関が同じ試料の磁気測定をし、その測定結果を比較し、最適な磁気物理量の検討、各研究機関の計測技術を議論した。実際に参加したグループはこの後の英文の資料に記してある。Budapest の会議、Cardiff の会議で各委員から意見が出され、白熱した議論となった。持ち合った結果が良い一致とは言えず、同じ物理量でも異なる結果が発表された。また、各研究機関が使用している物理量も非破壊評価に最適かどうかという問題がある。その国を代表する研究機関という自負もあり、会議では自分の結果が最も正しいという主張が繰り返された。これらの強い主張は長年研究成果を論文という形に表してきたことにある。もう1つ予想外の結論が2つの会議で出た。ランドロビン試験結果を公表するつもりで始めたが、会議で2, 3のグループの強い反対に会い公表できなくなった。しかし、ランドロビン試験の結果には磁性を用いた非破壊評価の基準化に繋がる貴重なデータが含まれているので、自分の考えに基づいて小林助教の助けを借り整理、評価し、1つの見解を出した。その結果を2008年11月に UNMNDE のメンバー全員に送った。ランドロビン試験の仕事は国費によって賄われたことから、日本の関係機関に報告する義務があると判断し冊子に纏め上げることにした。内容は全て英文で書かれており、関係者以外に分かり難い部分が含まれていることもあり、本論の前に日本語で解説を付け加えた。

表1 ランドロビン試験を始めた当時の参加グループ

Order	Period	UN member	Country
----- 2006 -----			
(0)	- March 19(Sun)	S. Takahashi	Japan
(1)	March 20(Mon) - April 9(Sun)	3 weeks A. Moses and D. Jiles	U.K.
(2)	April 10(Mon) - May 21(Sun)	6 weeks L. Dupre	Belgium
(3)	May 22(Mon) - June 11(Sun)	3 weeks I. Al tpeter	Germany
(4)	June 12(Mon) - July 9(Sun)	4 weeks B. Augustyniak	Poland
(5)	July 10(Mon) - July 30(Sun)	3 weeks J. Bydzovsky	Slovak
(6)	July 31(Mon) - Aug. 20(Sun)	3 weeks G. Vertesy and I. Tomas	Hungary
(7)	Aug. 21(Mon) - Sep. 10(Sun)	3 weeks F. Gillemot	Hungary
(8)	Sep. 11(Mon) - Oct. 1(Sun)	3 weeks H. Hauser	Austria
(9)	Oct. 2 (Mon) - Nov. 5(Sun)	5 weeks E. Hristoforou	Greece
(10)	Nov. 6 (Mon) - Dec. 3(Sun)	4 weeks X. Kleber	France
(11)	Dec. 4(Mon) - 2007, Jan. 7(Sun)	5 weeks M. Pumarega	Argentina
----- 2007 -----			
(12)	Jan. 8(Mon) - Feb. 11(Sun)	5 weeks F. Fiorillo	Italy
(13)	Feb. 12(Mon) - March 18(Sun)	5 weeks D. Park	Korea
(14)	March 19(Mon) - April 15(Sun)	4 weeks L. Li	China

## 1-2. 各研究機関の計測方法と測定結果の相違

このように一致したデータが得られない状況の中で磁気利用非破壊評価の基準化を図らなければならない。そのためには参加グループが納得する科学的見地に立った評価方法を決めなければならない。筆者が磁気利用による非破壊評価の基準化の提案をしランドロビン試験を始めたことから、基準化に対する指針を提案する必要性があった。各グループの異なる思惑を1つに纏めるための私案は以下の通りである。

- 1) 磁氣的物理量が材料劣化の要因である格子欠陥と一義的な関係があること。
- 2) 磁氣的物理量が任意の形状の試料に対して正確な計測が可能であること。
- 3) 磁氣的物理量の感度がよいこと。
- 4) ランドロビン試験の結果を公表すること。

---

以上の4つの条件が満たされて、非破壊評価に利用できる。第3の条件は必ずしも必要ではないが、感度が良いほうが望ましい。第2の条件は計測方法の問題で、現在満たされてはいないとしても、技術の改良によって将来満たすことができる。しかし、第1の条件は必ず非破壊評価には必要で、絶対的な条件である。

各研究機関が非破壊評価に用いた磁氣的物理量を大別すると2つに分類することができる。1つはヒステリシス曲線の解析によって得られる物理量であり、もう1つはバルクハウゼンノイズの解析によるものである。いずれも古くから研究されているが、格子欠陥との相互作用を理論的、実験的に調べられている量は保磁力、初磁化率、Rayleigh定数などである。Max-Planck研究所Stuttgartグループは転位とこれらの物理量の相関を30年間以上研究し続け、これらの物理量は転位密度、転位分布と単純な相関があることを見出した。しかし、保磁力以外は第2の条件である正確な計測は難しいというのが一般的な共通認識である。現在の研究の中心は保磁力より感度が良い物理量の発掘である。最近、マイナー・ヒステリシス曲線の解析から新しい物理量が発見されており、これらの物理量は保磁力より感度が良いといわれている。本センターでもマイナー・ヒステリシス曲線の解析から新しい物理量を発見した。一方、バルクハウゼンノイズの解析による物理量は計測が任意の形状の試料に対してできること、保磁力より感度が良いことから、非破壊評価に最も適しているという意見も多くある。しかし、バルクハウゼンノイズの解析による物理量に対してはMax-Planck研究所 Stuttgartグループで行われたような格子欠陥に対する系統的研究は行われておらず、今回のランドロビン試験である程度客観的評価が期待できる。

以上述べたように各研究機関は固有の磁氣的物理量を非破壊評価に最適としている。我々も最近発見したマイナー・ヒステリシス曲線の解析から求めた新しい物理量が最適と考えている。今回、ランドロビン試験では各研究機関が最も得意とする方法で行われたが、各研究機関の結果が一致せず、私の期待に反するものであった。最も意外なことは保磁力の測定結果が研究グループによって異なることであった。ランドロビン試験で用いた試料の形状はリング状のもの、額縁型のもの、シャルピー衝撃試験片、板状(60mm×40mm×10mm)の4つであるが、リング状や額縁型の形状の保磁力の値でさえ期待した一致が得られなかった。保磁力の不一致の原因を究明する中で本センターの計測技術に問題があることが判明した。改善後は本センターの測定結果も他のグループの結果と一致するようになった。非破壊検査の実用化のためには板状試験片に対する理想的ヒステリシス曲線を得ることが不可欠であるが、板状試験片の計測は困難であることが2つの会議を通して分かった。その他、バルクハウゼンノイズの解析による物理量は測定結果の不一致が顕著であり、新たな問題が出た。

---

### 1-3. Budapest の会議の1幕と基準化の困難性

問題の解決の困難さを示すために、Budapestの会議の1幕を紹介する。ある著名な研究機関の保磁力の結果が他の4つの研究機関の結果と異なることで、どちらが正しいかという議論に1時間半以上も費やしたが、結論が出なかった。多分大方の参加者には明白な事柄でも研究機関の威信に係ることもあり、自分たちのグループの非を認めることができなかつたであろう。筆者が議長である関係もあり、説き伏せ、再度測定し直す了承を得た。一見当然で、簡単なことに思われるが、実際相手を納得させるのは容易なことではない。最も計測が信頼できる保磁力でもこのような食い違いが出る。各研究機関が発見した物理量、技術に関してその評価を行うことは大変なことである。私たちのグループで発見したマイナー・ループの解析法を認めて貰う事は容易なことではない。各研究グループがこれまで築いてきた名声や誇りの壁を乗り越えて、一研究者として科学的立場から議論し、実際の測定で実証しなければならない。

### 1-4. 基準作りの第一歩

Budapest の会議後、磁性を用いた非破壊評価の基準を作ることの重要性を再認識した。原子炉圧力容器の経年劣化の非破壊検査は磁気的な方法が最も可能性が高い事を主張してきた。しかし、今のような状態では磁気利用の非破壊検査を原子力や橋梁の経年劣化の評価に導入できないことも述べた。社会からの信頼が失われかねないからである。誰が測定しても同じ結果が得られ、同じ評価でなければならない。磁気利用の非破壊評価の基準化を行うためには、私の提案を全てのメンバーに認めてもらう必要がある。私の考えをBudapestの会議で再三提案したが、受け入れてもらうことができなかつた。帰国後、ランドロビン試験結果を私の考えに沿って解析し、磁気利用の非破壊評価の基準化の指針を作り、全てのメンバーに送った。もし、私の指針に異論があるならば、その理由を文章にして示すよう申し添えた。全てのメンバーに送った手紙を「はしがき」のすぐ後に載せた。1ヶ月過ぎても異論のメールを受け取っていない。そのとき示した磁気利用の非破壊評価の基準化を行うための指針は次の通りである。

1. リング状試料などの閉じた形状の試料で測定した保磁力を基準量とする。
2. 格子欠陥に伴う磁気的物理量の変化は閉じた形状の試料で測定した保磁力の傾向と一致しなければならない。
3. 一般の形状の試料を計測する場合には、ヒステリシスループから得られる物理量は閉じた形状の試料で測定した値を基準とし、それらが一致しなければならない。

前にも述べたように保磁力と格子欠陥との関係はMax-Planck研究所Stuttgartグループによって理論的にも実験的にも長期間調べられており、保磁力と格子欠陥の間には簡単な相関があることが分かっている。私もこの相関関係を構造材料の非破壊検査に応用する研究のために、本センターを設立し

---

た。他の磁氣的物理量も格子欠陥に対し保磁力と似た関係があるはずである。これらの物理量の変化は、例外はあるが、磁壁と格子欠陥の相互作用によって起こる。従って、上記の指針2が成り立つはずである。例外というのは磁化が飽和するちょっと前の磁化率と格子欠陥との相関で、測定には大きな磁界が必要であるため非破壊検査に利用することは現実的ではない。しかし、保磁力は感度が低いということで他の物理量の可能性の研究が国際ネットワークのメンバーの間で行われている。一般にマイナー・ループから得られた物理量は保磁力より感度が高いことから、これらの研究が盛んである。

磁気利用の非破壊評価のための物理量として残留磁化（レマネンス）を取り扱った論文を見かけることがある。UNMNDEのメンバーでも残留磁化の可能性を主張する人たちがいた。しかし、Budapestの会議で残留磁化は試料の形状に依存し保磁力と線形の関係がなく、非破壊評価に用いることができないことを確認した。残留磁化と同じような物理量が他にもあると思われる。残留磁化のときと同じように議論をし、物理量の適・不適を決めなければならない。

もう1つの問題点は磁氣的物理量の計測技術にある。磁氣的物理量の計測は或る磁界を加えたときの磁壁の移動を調べることである。計測時には外部から磁界を加えるが材料内部の磁界の大きさを正確に知ることは非常に難しい。国際ネットワーク設立の目的の1つはこの問題解決であった。現在国際ネットワークのメンバーはいろいろな技術を持っており、それぞれ自分の技術が最も良いと信じているように思われる。閉じた形状の試料で計測した物理量はどこで測定しても同じ値が得られるはずである。一方、シャルピー試験片のような棒状の試料に対する計測技術は多少の差があるにしても原理的には正確な磁界の値を得ることができるとうい共通認識がある。しかし、板状試料に対する材料内部の磁界の正確な計測は難しい。一般の非破壊検査に利用するためには板状試料に対する計測が不可欠である。板状試料のデータを評価する上で指針3が重要となる。何人かのUNMNDEのメンバーは彼らの技術は板状試料にも適応できると主張している。この技術をチェックする時にも指針3に基づいて行う必要がある。

## 1-5. バルクハウゼンノイズ法の現状と問題解決への方向

バルクハウゼンノイズ法は試料の形状に係らず適用でき感度も保磁力に勝るとされてきた。板状試料でも測定可能であることから非破壊検査には最も適しているとされ、注目されている。しかし、各グループの計測条件が異なり、感度や精度も大きく異なる。今回のランド・ロビン試験で更にその違いが明確になった。全く同じ試料を各グループが測定して得られた結果を比較することから、物理量と計測技術を分けて評価できる。しかし、各グループの相違が大き過ぎて、対処の仕方が非常に難しいというのが会議での大方の見解であった。バルクハウゼン効果も格子欠陥と磁壁の相互作用に因ることから、得られた物理量は保磁力と同じ傾向を示すはずである。バルクハウゼンノイズ法で得られた各グループ間の相違は計測条件、計測技術に拠ると結論付けるのが自然である。従って、バルクハウゼンノイズ法でも指針2、3に基づいて基準作りを進めなければならない。

私もバルクハウゼンノイズ法についていろいろ考えている。いろいろな振動数、振幅の磁界で磁壁を揺らすため、渦電流の影響が大きくなってきて、物理量にも影響を及ぼす。格子欠陥が作る障害物を

---

磁壁が乗り越える際にも渦電流が発生するが、障害物がない状態でも発生する。渦電流の効果を磁化測定するときに取り除くことは原理的に不可能である。渦電流の効果を無視できるような条件で、格子欠陥が磁壁移動の障害として現れる効果を計測する必要がある。

## 1-6. 試料形状とその特質

ランドロビン試験に用いた試料について簡単に説明する。リング状、額縁型、シャルピー試験片、板状の4種類の形状の試料を用意した(図1参照)。リング状及び額縁型試料は理想的なヒステリシス曲線を得ることができ、他の形状の試料で得られた物理量と比較し、基準量とするためである。また、いろいろな物理量の非破壊検査に適するかどうかを評価するためである。シャルピー試験は原子炉圧力容器の健全化を評価するため一般に用いられている。シャルピー衝撃試験は破壊検査のため、シャルピー試験片の数の不足が世界的な問題である。破壊せずにシャルピー衝撃試験片の計測を行うことで問題解決ができる。シャルピー試験片に対する磁気計測ができることを示さなければならない。板上試料の計測は磁気利用非破壊検査をあらゆる分野に適用するために必要である。

金属材料の経年劣化は長年使用することによる金属疲労が原因で起こると考えられる。金属疲労を微視的に説明すると、転位が増殖することによって加工硬化し、亀裂発生、破壊とつながる。転位を人為的に導入するために冷間圧延を行った。圧延率を変えることにより転位密度を変化させることができる。

原子炉の経年劣化は長年中性子が材料に照射され、銅原子が析出して起こる。銅原子の析出物は転位の運動の障害物となるので圧力容器は加工硬化を起こす。ランドロビン試験では中性子照射の代わりに、熱時効によって銅原子を析出させた。銅原子の析出と転位の相関を調べる目的で冷間圧延と熱時効を組み合わせて試料作りを行った。

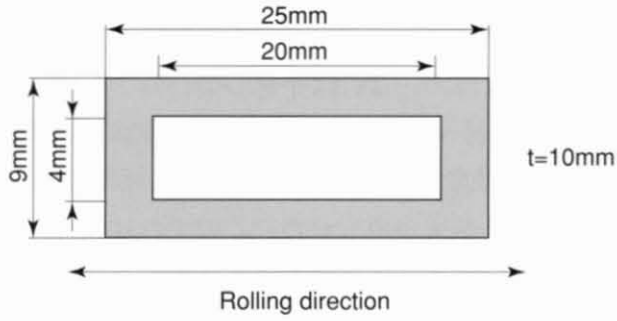
磁気測定の前に硬度測定、シャルピー衝撃試験、転位の電子顕微鏡観察を行った。本冊子は学術論文ではないこと、磁気利用による非破壊評価の基準化作りの現状を示すためのものであることから、硬度測定、シャルピー衝撃試験、転位の電子顕微鏡観察の結果は割愛する。

## 1-7. ランドロビン試験結果の評価

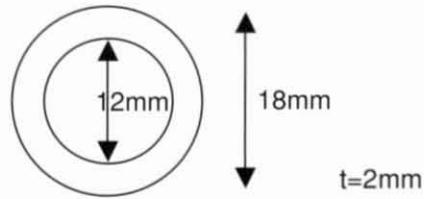
この指針に沿ってランドロビン試験の結果を解析した。具体的には横軸にリング状試料から求めた保磁力を、縦軸にその他の物理量を取り、この関係が線形であるか、または単純な関係であるかを調べた。この解析結果は国際ネットワークの全てのメンバーに私のコメントを付けて送った。この際に計測ミスが明確に認められるデータは私の一存で除いた。この解析結果および私のコメントは本論(英文)に載せた。

図1 ランドロビン試験に用いた試料の形状

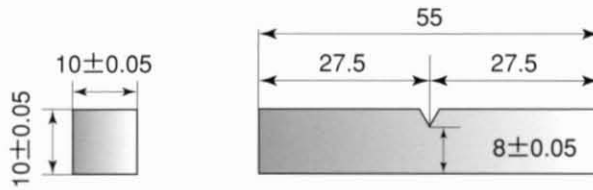
額縁型試料



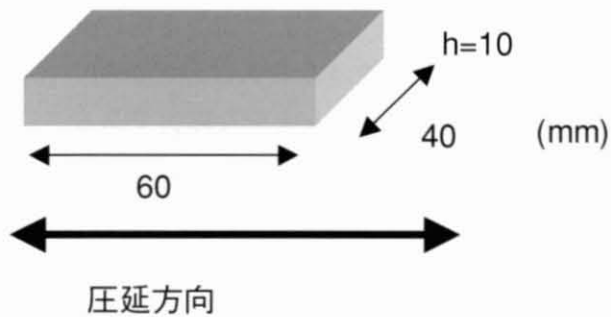
リング状試料



シャルピー試験片



板状試料



---

私たちが発見したマイナー・ループ解析法で得られる結果を中心に簡単に解説する。マイナー・ループは振幅によってその形が変わるので、それから得られた物理量は磁界、振幅に依存する。しかし、私たちが発見したマイナー・ループ解析法では、得られた物理量は磁界および振幅には依存しない。このことはメジャー・ループから得られた物理量と同等に取り扱うことができ、板状試料に対する装置開発においても重要である。マイナー・ループ解析法から得られた物理量は保磁力と線形の関係があることが全てのリング状試料で示された。これは予想していたことではあったが、改めて私たちの方法が卓越していることを再認識した。私たちはランドロビン試験とは別に鉄やニッケルで10Kから600Kの温度範囲でこの物理量が保磁力と1対1に対応することを示した。しかし、板状試料やシャルピー試験片に対しては線形からずれる結果が得られた。このずれは開いた試料に対する本センターの計測技術に問題があることを示している。チェコアカデミーのTomas博士やゲント大学のDupre教授の測定ではリング状試料とシャルピー試験片で保磁力は同じ結果が得られている。本センターでは保磁力でもリング状試料と開いた試料で異なる測定結果が得られた。Tomas博士やDupre教授のグループは試料内部の磁界の測定技術が優れていることを物語っている。ぜひ本センターでも彼らの技術を取り入れることを願う。私たちのマイナー・ループ解析法は他の方法と比べ、信頼性、感度、再現性、計測の容易性などの点で卓越していると結論できる。

もう1つTomas博士のマイナー・ループ解析法がある。この方法は「磁気最適検査法」(Magnetic Adapting Test, 略してMAT)と呼ばれ、私の方法より10年近く前に発見された。この解析によって得られた物理量は他の物理量より感度が数十倍良いことから、注目されてきた。しかし、MATから得られた物理量は磁界、マイナー・ループの振幅に依存するので、保磁力や私が発見した物理量とは根本的に異なる。材料内の磁界やマイナー・ループの振幅を正確に計測することは不可能である。そのため彼らが測定したランドロビン試験の結果は保磁力と対応せず、物理量の感度が試験片の形状によって大きく異なる。また、物理的な意味がはっきりしておらず、精度の点でも問題がある。この欠点を会議の席で再三述べているが当事者は認めようとはしなかった。歴史の流れの中での解決を待つしかないと思っている。

## 1-8. 最後に残された実用化への課題

Dupre教授に会議の席で板状試料の測定方法を尋ねてみた。Dupre教授のグループの計測技術が最も優れていると感じたからである。現在、彼らの技術でも板状試料の内部磁界を計測する方法はないということであった。板状試料で計測ができなければ原子炉圧力容器や橋梁の直接測定ができない。この問題は磁気利用非破壊評価の実用化にとり大きな障害である。この問題解決が私に科せられた今最大の仕事であろう。私はこの分野を専門としていないが、数年前から板状試料の内部磁界を計測する方法を考えてきた。2008年12月、同志社大学の藤原耕二教授を訪問し、私の考えを示したところ、“コロンブスの卵”と評価してくれた。早速共同で装置開発の研究に取り組むことになった。詳細は装置開発が成功したときに説明する。

今回のランドロビン試験を通じ、幾つかの問題点が明確になった。また、この報告書を見て、磁気利用の非破壊評価方法の道のりがまだ遠いと感じる技術者がいると思う。これらの問題点は世界最高



---

水準の研究機関が現在直面する課題であり、この研究分野に挑戦する場合の研究テーマでもある。現在の状況を正確に知ることが次のステップに進む上で大切なことであると同時に、磁気利用非破壊評価に対し、過大評価あるいは過小評価する研究者、技術者を真の方向に導くことになる。また、UNMNDEのメンバー間でこれらの問題点を共通のものとして捉えることが重要である。個々のNMNDEのメンバーが自分の問題として取り組むことで、問題解決に一段と近づくであろう。

試験結果の公表はNMNDEの全てのメンバーの賛成を得なければならない。反対するメンバーの立場は分かるが、それを乗り越えて初めて科学技術の進歩・発展が得られる。公表することにより、NMNDEのメンバー以外の研究者、技術者の磁気利用非破壊評価方法に対する信頼を得ることも可能となる。

以上国際ネットワークにおけるランドロビン試験に至るまでの経緯、磁気利用非破壊評価方法の標準化作り、その問題点と解決方法を述べた。2009年1月、今回示した指針に沿って第2回ランドロビン試験が始まった。参加予定は23団体となり2年間の歳月が必要である。ランドロビン試験がここで述べた指針に基づいて行われ、結果の公表ができることを切に期待している。多くの方々にこのランドロビン試験の意義を理解してもらい、磁気利用非破壊評価方法が社会に定着することを願っている。

## 謝辞

Max-Planck研究所のH.Kronmüller教授の適切な助言に心から感謝する。小林悟助教の各グループから送られてきたデータの整理に対し心から感謝する。