

[063]九州大学応用力学研究所所報表紙奥付等

<https://hdl.handle.net/2324/4791836>

出版情報：応用力学研究所所報. 63, 1987-01. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：





北 島 一 徳 博 士

略 歴

- 大正12年 3月 福岡県三潞郡木佐木村に生れる
- 昭和17年 9月 福岡高等学校（旧制）理科甲類卒業
- 17年10月 九州帝国大学工学部航空工学科入学
- 20年 9月 同卒業
- 20年10月 九州大学大学院特別研究生第一期入学
- 22年 9月 同修了
- 22年10月 第二期入学
- 25年 9月 同修了
- 25年11月 九州大学助教授（弾性工学研究所）
- 26年 4月 （応用力学研究所）（組織変更による）
- 28年 4月 九州大学大学院工学研究科（修士課程）授業担当
- 37年 3月 工学博士の学位授与（九州大学）
論文題名「鉄の塑性変形および脆性破壊に関する基礎的研究」
- 39年 7月 九州大学教授（応用力学研究所）
- 39年 9月 九州大学大学院工学研究科指導教官
- 40年10月 京都大学原子炉実験所運営委員委嘱（昭和42年10月まで）
- 44年 6月 東北大学金属材料研究所附属材料試験炉利用施設共同利用委員
委嘱（昭和47年 3月まで）
- 55年 4月 京都大学教授併任原子炉実験所（昭和57年 3月まで）
- 59年 4月 九州大学大学院総合理工学研究科指導教官
- 61年 3月 九州大学を定年退官
- 61年 4月 鹿児島大学教授
- 61年 5月 九州大学名誉教授

退官記念講演筆記

北 島 一 徳

私達理工系の者は、科学的な仕事を学問の流れや社会の流れの中に位置づけ、客観的立場からこれらを眺めるということを常としておりますが、本日の退官記念講演ではこれとは少し異なった立場すなわち一人の研究者がその置かれた社会の流れの中で辿ってきた種々の運命や人々との出会いについて、一人の人間として、内側から感じ考えたことについてお話したいと存じます。もっともこの講演会は総理工の最終講義をも兼ねているということでもあります。一般に人の経歴などというものは偶然的要素を含む統計的な過程でありますから、私のはなしはその一つの例、サンプル過程、として捉えて頂き、その中から“人間力学の法則性”とでも言うべきものを汲み取って頂ければ幸であります。

まず私の経歴や応力研における研究の経過を次の表にまとめてみました。研究について主だったものを挙げますと乱流の研究、金属材料（特に鉄）の塑性及び破壊に関する研究、原子炉における中性子照射および格子欠陥の研究、核融合炉材料に関する研究、等があります。又表には論文を提出した国際会議の名前をメモしています。研究の後半には数多くの研究論文を提出することができましたが、共同研究者の方々及び御協力を頂きました方々には心より感謝を申し上げたいと存じます。この講演ではしかしむしろ前半、すなわち若い時代の経歴や研究を中心にして、それらから現在に至るまでのいきさつについて主に述べるつもりであります。

さて、私が大学を卒業したのは終戦の年の九月、すなわち終戦直後であり、卒業証書も一年程後に受領した記憶があります。そういう時代ですから大学生活といっても授業は一年ばかりで、後は軍需工場での勤労働員等を致しておりました。ついでにその以前について申し上げますと私は福岡高等学校理科甲類に入学し、課外では専ら柔道の練習に励んでおりました。二年生になり最初の公式試合に臨みました。いまだにその記憶は鮮明に残っていますが、だだっ広い会場に敷きつめられた畳がゆれるなかを進み出て、相手と一礼し数十秒渡り合ったと思う間もなく一閃相手の払い腰に宙に浮いて一本！。この試合は勝ち抜きでありわが軍の志気を沮喪することおびたがしいと先輩にも叱られて、その悔しさが忘れられずその後は負けたくないという一心

から専ら柔道一筋に高校生活を送りました。その甲斐もあってまずまずの戦績を挙げることが出来ました。それにしてもこの様なパターンは柔道のみでなくその後の研究においても何度か繰り返した感があります。そうこうするうち、大学進学となり尊敬していた柔道の先輩に相談したところ、その一人、当時九大電気工学の学生でしたが、電気工学にはもう何も面白い研究は残っていないとの助言、いま一人の先輩がそばから航空工学では未開拓の分野が多分に残っている、という助言を得て航空へ進むことに決定しました。もっとも先の先輩は当時「多端子回路網構成の一般理論」に打ち込んでおられ他のことは全く念頭にならない時期の発言であったようで、事実数年後にはその研究を壮麗な数学的理論で完成されましたが、果してあの時の助言が当を得たものであったか否かは問題です。ともかくも私の進路がそういう過程を経て決定したことには相違ありません。

こうして九州帝国大学に入学した私は、講義にはあまり顔を出さずもっぱら竹内端三の「函数論」だの岩波数学講座といった本を独りで読む生活を送っていました。しかし工学という学部に籍を置いている以上は、抽象的理論ばかりでは駄目だ、なにか具体的な“もの”を造りあげなければ意味がないという工学者精神を聞かされているうち、私も航空機を発達させる何かを見出すことでその精神を受け継ごうと考えました。そこで目をつけたのが戦闘機など翼面荷重の大きい機体の離着陸時に重要なフラップの問題です。佐々木達次郎氏の複葉翼の等角射像の理論を発展させて二枚の平行でない平板翼の射像関数を求め、フラップに働く揚力及びモーメント等を求めてみようと考えました。種々考えた末この問題が第三種の楕円関数を用いて解決できるということを見出し、大得意になっていたある日、NACAのリポートに同様な方法による論文を見出した時の私の落胆ぶりはかなりのものでした。この経験から、当時は応用力学の全盛期であり既成の数学、特に線形理論は完成されていて、これに頼るだけでは新しい問題への取り組みはできないという教訓が残りました。しかし大得意の頃、岡部先生を相手に一席講じていたところに丁度栖原豊太郎先生が来合わせられ、そこではフンフンと相づちを打つておられる程度でしたが、二年生の工場動員という時期に「君は流研の栗原教授の戦時研究の手伝いをなさい。」という御指示をいただき、思えばこれがその後大学で研究生生活を送るきっかけになりました。

栗原先生は京都大学宇宙物理の御出身でした。先生には、研究では現象の本質を捕えることが重要であり、新しい現象を見出しその本質を解析してゆく。数理解析などはそのための一つの手段である。そういったやり方が研究者としてのあるべき態度で

ある。という教えをいただきました。その当時高速飛行とくに衝撃波の研究のお手伝いをしておりましたが、私はきちんとお手伝いを致す方ではございませんでした。先生は当時東大の高速風洞での衝撃波の実験値がどうも理論値に合わないという問題を取り上げ、それを衝撃波の不連続部分におけるガスの平均自由行程の変化から説明しようと試みておられました。

その研究の中でボルツマン分布という言葉が出てまいりまして、私は先生に「それは何んなものですか」と尋ねました所、ガスの力学、統計力学である、という答えが返って参りました。それは初めて聞く名前だと興味を覚え、早速図書館で、その関係の書籍を探しましたところ、Tolman の *Statistical Mechanics* という本を見つけました。他にもいろいろありましたが一番厚いものを読んでおけば何でも書かれているだろうと、その本を読むことに致しました。そして先生から命ぜられていた計算はそっちのけにして、その本に夢中になっていましたが、期限のせまってお仕事でしたので先生もたまりかねられ、「北島君ちょっと来て下さい」という訳で一室に缶詰で計算をお手伝いし、やっと期限に間に合ったというようなこともございました。先生ははじめ Chapman and Cowling の *Mathematical Theory of Gas Dynamics* の手法を用い、Boltzmann equation から平均自由行程の変化を見ようという発想から出発されましたが、結局は空中の水蒸気の凝結による緩和過程が非常に大きな影響を持つことを見出されました。これは大事な成果であったと思います。

そうするうちに終戦となり高速流体は禁止とのことで、流体関係で残された問題は乱流ということになりました。これは栗原先生も以前から取り組まれていた問題であり、流体の不規則な運動については解析とは違ったなんとも言えない神秘的なニュアンスを感じ、これにひかれて乱流に取り組もうと決心致しました。ここで私自身懐しく思い起しております。大学院特別研究生の前期（2年間）に初めて流体力学研究所報告に提出いたしました論文“乱流の混合距離について” [1] を紹介させていただこうとおもいます。

当時 Onsager, Kolmogorov, Weizäcker によって提出された局所的等方性乱れの理論が非常にトピックスとなっていました。これは渦動のエネルギースペクトルの短波長成分のユニバーサルなスペクトルの形を出したもので、私は等方性乱れの基本問題はこれで本質的には終わったと思いましたのでこれを剪断流の解析に応用することを考えました。そこで剪断流の局所的エネルギースペクトルの平衡を等方性渦動スペクトルのカットオフモデル（適当なカットオフ波長より長い波長部を含まない等方性渦動

スペクトル) で置き換えて考察致しました。この近似を用いると乱れのエネルギーと渦度の平衡方程式はつぎのように導かれます。またこれらの式を用いますと種々の剪断流の解を求めることができます。

つぎにこれらの式を用いて、翼の性能に重要な乱流境界層の発達、とくに境界層の剥離現象の解析に応用することを試みました。この剥離点付近は変動が大きく、従来 Gruschwitz らの理論では合わないことが明確になっておりました。そこでいろいろ解析してみましたところ、流れの長さ方向の一次微分のみでなく、二次微分の寄与が大きいこと、すなわちそれは流れの曲率を表し、これが大きいと乱れの状態を著しく変えていることがわかってまいりました。この条件を入れてみますと流れは初期のみならず後期の境界条件からも決まりますので、剥離の条件を表わすのに好都合であるとの結論を得ました。その後、実験もできぬまま私の研究はこれ以上には進んでおりませんが、剥離についてはどういう解明が現在なされていますか流体の方々に一度お話しを伺いたいと考えています。さてこの基礎方程式を解きますと種々の場合についての一通りの解答は出てまいりますが、何か釈然と致しません。果してこれで乱流を把握し得たのかという感が残りまして、さらに大学院の後期のコースに進むことに致しました。このことを指導教官の渡辺先生に申し出ますと“あとのことは知らないが、希望ならばはいりなさい”とのことで、まあ腰を落ち着けてゆっくりと研究を進めようなどと思いつつ、そのころはタバコを吸っておりましたので、紙と鉛筆を前にタバコをくゆらせ、煙の行方を追いつつフロービジュアリゼーション・エクスペリメントなど致しておりました。当時、G. I. Taylor が Vorticity transfer theory を提出して運動量と熱とは輸送のメカニズムが違うことを指摘しておまして、それを手がかりに輸送の問題を考えてみることを思いつきました。いま、タバコの煙の行方を流体粒子に乗ってラグランジ的に追跡して参りますと、粒子の温度は変化しませんが、これに比較して運動量の方は圧力勾配によって変化して参ります。この差異を明確にするために粒子の軌跡に沿って、これらの変化をプレイバック致しまして、諸量を一度微分したものを更に積分するという形に表わしてみました。その際こちらの平均量の変化の方は、粒子位置での平均量を考えることに致します。次に粒子の速度の時間および空間的ラグランジ流相関関数をこのように定義いたしますと、輸送項はこのように表現され、従って熱の輸送方程式は次のようになります。この結果は輸送項を書き換えただけでするので省略は何も含まれておりません。そしてある一点から発生した熱の拡散による温度の平均分布は粒子の分布密度に関する遷移確率密度に対応いたし

ますから、一般的な確率過程に適用できる訳で、これはおもしろいと一層興味をそそられました [8]. 運動量の方は圧力勾配の入った相関関数の項が入ってまいります.

丁度その頃、研究者間では種々の新しい文献等をザラ紙にガリ版刷にして配布するような事が流行っておりましたが、そういう経路で手に入った資料の中に、Kirkwood 氏の General Transport Theory of Liquids という論文がございました. これは、何か関係がありそうだというわけで早速読んでみましたところ、現在の、いわゆる非可逆過程の理論の先駆ともいべき論文でございました. 彼の理論によりますと、現在もそうでありますように、輸送項の二次モーメントを一度微分して積分したもので書き換える関係式が用いられていますが、それは一つの近似式として取り入れられています. これでは熱平衡状態に近い場合には良いとしても一般的には正しくないで、私の理論の方が厳密である. やったぞ! などと勝者の気分を味わったものでございました. しかし、そんな矢先、知り合いの数学研究者に私の理論を話してみましたところ、その概念は数学的にはおかしい、というすごい返答をもらう結果となりました. すなわち数学での確率過程では最初に定義された制限条件の下での確率過程の構造を論ずるものであって、決定論的過程との関係を一般的に表現するなどということは、式自体の是非はともかく数学的にはよくわからないと言うわけです. またまた気落ちするはめになってしまいました. 一方、物理学者の間でも当時、非可逆過程が流行っておりましたので、研究者の方々にお話を伺うのですが、私の理論にアドバイスして下さる、というよりは、ご自分の学説を述べられる事が多く、あまり得られるものがないように思われました. 異なった学問分野の間の概念の差違を乗り越えて理解を得るためには、なお私自身の勉強が足りぬことを自覚した次第でした.

こうして、かなりのんびりと私にとっては最も楽しい自由な学生生活を終えました後、弾性工学研究所に就職を致すことになりました. その、いきさつと申しますのは、乱流統計理論の創始者であった G. I. Taylor は、同時に結晶の塑性変形に関して始めて転位という概念を導入した先駆者でもありまして、ドイツの Prandtl, アメリカの Karman と共に当時の応用力学界の大御所であり、カリスマ的な存在であったわけですが、中でも Taylor は非常にアイデアに富んだ人で、個人的に私淑致しておりました. そのような影響もありまして、タービュレンスの外にディスロケーション (転位) についても研究をやってみよう. と思い立ちました. 戦後、材料の強度の学問分野が結晶の格子欠陥という立場から急速な勢いで発展して参りました. イギリス

の Mott, アメリカの Seitz 等, 固体物理のリーダー達が関係者を指揮し, 基礎的な立場から広範囲に亘る研究を促進させた時代でございました。丁度その時期に, 友人であった栖原寿郎君から, こちらの方もやってみないか, と誘いを受けまして, それは面白そうだ。弾性工学研究所も流体工学研究所と共に将来は応用力学研究所として合併されるそうなので, 流体の乱れと結晶の乱れを両方研究できるなどと安易に考えたり致しました。

しかし, そうは世の中は甘くはございませんで, さあ材料をやろう, と言ったところで全くの素人では何から始めれば良いものやら見当が付きません。乱流も前に述べたような事はわかりましたものの, それらと境界層の剝離とを統合しようとする, なお残された問題が山積しております。にっちもさっちも行かず, 当時が一番苦しい時期でございました。だからと言っていつまでもこのままでいるわけにも参りませんので, ここはひとつ, 乱流の問題については一旦目をつぶることに致しました。

当時は研究所長の渡辺恵弘先生が所員会で各所員の研究計画を一人ずつお聞きになるという慣例がございまして, 私もその折に詳細な案など申し上げておりました。すると, 「北島君は, 船の鉄鋼材料の脆性破壊について研究をやって欲しい, 現在大変問題になっているところだ。」というご指示を頂きまして, ディスロケーションとはどうも接点がないように思われましたが, 所長命令でもあるし, この問題に取り組み何とか接点を見出そうと, これを新たなスタート地点と致したのでございます。この図は鉄鋼の実用材料について破壊の様態を示したのですが, 切欠の先端部は最初は非常に延性的ですが少し進むと脆性破壊に遷移しています。これは鉄鋼材料に特有の現象でございます。そこで私は鉄本来の脆性とは, どこからくるものであるかをディスロケーションに結びつけて追求致すつもりでございましたが, そのためにまず, 純鉄単結晶を作ることに致しました。当時の純鉄と称される素材を用い, 栖原先生が以前に作っておられた移動炉を譲り受けて単結晶を作り, 当時のことですので, 液体酸素中でその結晶を引張試験致しますと, 容易に劈開破壊が生じます。光学顕微鏡(当時は研究所における最高のインストルメントでありました)で観察致しますと, 真ん中に大きな岩のような析出物があり, そこからクリーページ(劈開破壊)が拡っております[2]。破壊の研究において, 析出物からスタートするような破壊では転位論とは全く結びつきませんので, これでは駄目だということがわかりました。そこで, 次に純鉄を作るために, 東北金属工業に真空溶解を依頼しましたが, うまく圧延できない, との返答がありました。とにかく現物を送ってもらったのですが, 折り曲げる

と煎餅のようにパリパリと割れてしまいます。つまり純鉄を取り出すには酸素を完全に取り除かなければならないことが判明しまして、自身で純鉄を作ることを始めました。

話は少し前後しますが、前述の乱流については、全く放棄してしまったわけではなく、その後も他の研究の合い間を見ては、ぼつぼつ研究を続けておりまして、国際会議等に出席したりなど致しました [8, 16, 17] が、最近になって新しい発展がありましたので、その話を挿入させていただきます。

乱流におきまして、等方性の条件から離れて剪断流になりますと種々の事柄が途端に難しくなります。そこで問題を単純化するために剪断流における乱れのエネルギースペクトルについて、全エネルギーや乱れのスケールは時間的に変化しても、その形は相似に保ち乍ら減衰するという“相似減衰の仮定”（これについては実験的にも満たされており、極く自然な仮定であると思いますが）を導入し、このモデルについて推論を進めてみますと、等方性に極めて近い場合のレイノルズ応力が正確に計算可能であり、その常数が $2/15$ になるということを見出しました [8]。その場合について乱れ速度のラクランジ流相関とオイラー流相関を計算いたしましたのがこの図であります。運動量の輸送に関係する乱れ速度と圧力勾配との相関は図のように計算されます。次にこの図は種々の剪断流、後流、噴流、混合流および境界層につき、乱れに相対的な平面剪断の強さをパラメーターにしてレイノルズ応力等の輸送係数を整理したものです。これは実験値で、○印は理論値です。レイノルズ応力の実験値とかなりよい一致を示しています。熱の輸送係数は運動量のそれより大きく、理論値は、後流や噴流の実験値に比較して、およその線まで一致しております [8]。その後さらに相似減衰のモデルを発展させて自由乱流 [16, 17] および密度勾配を伴う剪断流の解析 [98, 104] をいたしました。

次に極く最近の発展について申し上げますと、現在剪断流中の最も長い波長成分の渦動が乱れの平衡や輸送現象にどのような役割を果たしているのかが大きな問題となっています。この問題につきまして、種子田先生が以前に行なわれた平板上の乱流境界層の発展に関する実験を引用させていただきます。上流で種々の波長の 2 次元な攪乱を与えますと写真に示されるようにその波長が Tollmien-Schlichting の波の波長より短い場合には攪乱は下流で減衰し、より長いと増幅を、等しい場合には中立成長を示します。この結果を思い起こして、最大波長渦動の平衡について次のような解釈を致しました。

一般に波長の短い渦動はより長い波長の渦動に対して内部粘性として働きます。そこで分子粘性係数の代りに乱れによる内部粘性係数を用いて長波長渦動の平衡を線形近似によって考察します。すなわち定常状態では平均流からのエネルギー遷移による長波長渦動の成長は渦動粘性によるエネルギー消散と平衡を保っていわば中立成長の条件を満たしている訳です。しかし更に考察を進めてみますと、エネルギー平衡の式において、同じく中立成長を示す種々の波長の渦動の中で、平均流との相互作用に際して平均流からのエネルギー遷移率の最も大きい波長の渦動が卓越するという条件を置いてみます。この条件は、式から解るようにエネルギーの消散率最大、すなわち見かけのレイノルズ数は最小という条件になります。これはすなわち Tollmien-Schlichting の波長条件にほかなりません。この成長率最大の条件は物理的にも自然であると考えられます。

しかし更に考えますと乱流では二次元よりも三次元的な渦動が卓越することは良く知られておりこれが乱流の特性であると言われていました。これについては以下の考察によってその説明が可能で、すなわち私共が先に導きました等方性に極めて近い剪断流におけるレイノルズ応力はまた、二次元的な長波長渦動と三次元的短波長渦動との相互作用を表わしていると言うことができますが、これに対比して等方性渦動の内部では渦動と渦動との相互作用は三次元的であり、計算結果によればこの場合の渦動粘性の係数は0.7であり、前述の二次元的渦動の場合に我々が求めた値 $2/15$ に比較して約1桁程大きいことになります。この結果を先程の長波長渦動の条件すなわちエネルギー消散率最大の条件と合わせ考えますと、三次元的な渦動がより成長率が大きく従ってより実現し易いという結論に達するわけです。

さて層流すなわち分子粘性の場合には良く知られています Squire の定理がございまして、三次元的な渦動は二次元的渦動よりも常に成長率が低いことが示されており、実験的にも実証されております。これに対比して乱流中では渦動間相互作用の上述の特性から三次元的な長波長渦動がより成長し易いことが説明される訳であります。これが最近得られた結論です。これで乱流の剪断流の基本的な問題点に対して私としては一応の説明を与え得たと考えています。最後の部分については更に詳細な説明を与えるべく今後の課題として取り組むつもりでおります。しかし基本的な考え方としては理解し易いと思われしますので、ここに応用力学研究所在籍中の仕事として御報告申し上げておきたいと存じます [日本物理学会講演会昭和61年4月]。

さて、話を純鉄の製作に戻しますが、これは後になって思い起こしますと、かなり

ひどい状況であったと思います。と申しますのも、鉄は大変ポピュラーな金属ではありますが、不純物を取り除き難く、かつ融点が高いものですから基礎研究の対象としては困難な材料であり、専門研究者間では敬遠されておりました。そんな事とはつゆ知らず、よくもがむしゃらに突進したものと存じます。その当時は福田さんが研究室のパートナーでございまして、彼と共に毎晩10時11時頃までかかってモリブデン炉等を作って種々の実験をしては失敗又失敗を繰り返しておりました。その間、福田さんには終始お付き合いをして頂き、彼の御助力がなければ以下に述べます仕事は到底不可能であったと存じます。こうして作り上げた装置を図に示します。非常に純度の高いアルミナのタンマン管に同質のボートを入れ、この中にカーボニル鉄粉を入れ高純度の水素気流中で還元致しまして（酸素の出方はラゼノバルブで点検し、反応が終った所で出す。）親指の先程の酸素を含まない純鉄のインゴットを作り、それから単結晶を作ります。この単結晶を液体酸素中で引張ってみますと今度はどのようにいたしても純度が高いために割れません。これは又困った、と思っておりました矢先 Proceeding of Royal Society of London に掲載された論文が目にとまりました。それによりますと、イギリスの National Physical Laboratory で水素還元法による純鉄の製作が行われ、これから作られた純鉄単結晶を用いて系統的な実験が行なわれ、液体窒素温度（液体酸素 90°K よりも 10°K ほど低い温度 77°K ）では劈開が生じることが示されておりました。この論文を目のあたりに致しまして、又がく然としてしまいました。私共には液体窒素が手に入らなかったハンディのためとは申しますものの、こうした研究において一歩遅れを取るということは、何もしなかったに等しいことと存じます。致し方ございません。又当初より出直す気持ちで破壊の問題に取り組むことに致しました [3, 5, 10, 13, 14].

ところで、「破壊」の問題以前にやるべき研究に「塑性変形」の問題がございます。これについては途中の経過 [5, 10] を省略いたしまして、最近の研究成果について御紹介しておきたいと思っております。私共の研究室にその後特別設備の予算で高エネルギー材料実験装置（昭38～40年）が設置された中に、高純度金属精製関係の装置として高周波内熱式および電子ビーム加熱式帯融解装置がございました。その後超高真空電子ビーム加熱式帯融解装置（昭50年）が加わり、これらの装置が設置された事によりその後の高純度金属についての研究に非常な進展が見られました。なおこれらの装置による高純度金属合金の製作はベテランの宮本さんによって支えられて来ました。その中でも塑性変形の問題については、私共の研究室で鉄の単結晶につき液体ヘリウ

μ温度までの各種の温度におけるほぼ完全な引張試験のデータを得ました。同様の方法でモリブデン及びニオブについても実験を致し、かなりの成果をあげることができました。これらについては青野さんが大学院生時代に行いました実験及び蔵元先生がコンピュータ・シミュレーションを用いて行ったBCC格子転位芯の構造についての計算が大きな貢献をいたしております。この写真がゾーンメルトで作った純鉄です。抵抗比4000以上の純鉄を用い、直径0.2mm程度の非常に細かい単結晶を使用すれば液体ヘリウム中ですべりのみによる引張り変形が可能であることを発見致しました[60, 62, 63]。例えば青野さん等はこの極細の単結晶を液体ヘリウム（クライオスタット）の中にピタリとセットいたします。これはかなり高度な技術を要します。これらが実験結果でございます。つまり従来使用されて来た純度や直径寸法の単結晶ですとこのような低温では必ず双晶、つづいて劈開破壊を起し割れてしまいますが、純度を増し、また直径を減少させて行けばこのように双晶は抑制され、すべりによる変形を示すようになります。これらはモリブデン・ニオブの高純度な試料で抵抗比は6000、ニオブの場合は300です。やはり細くすれば塑性変形がうまくゆく様になります[72, 78, 90]。こういった力学的性質、つまり降伏や変形およびすべり系等の結晶の結晶方位依存性、温度依存性、等を徹底的に調べあげまして特にモリブデン、鉄、ニオブにつき第5族、6族および第8族の代表としての共通点と相違点を明らかに致しました[82]。これらの体心立方金属は遷移金属であり高融点など大変有用な性質を持っていますが、原子的な構造が複雑であり、不純物原子との化学的結合力も強いので、これらの金属についての基礎的な研究はより単純な金属である銅やアルミニウムに比較いたしましてずっと後れて開始されました。従って全くの素人から出発し亀の歩みで参りました我々の仕事はこれらの研究の先頭に立つことが出来たわけで偶然のなせる業と申せましょうか、お陰でこれらの体心立方金属の力学的性質の研究におきましては手前みそではございますが私共のグループがよい仕事をしていると言わせていただいてさしつかえないであろうと思っております。現在青野さんは西ドイツのMax-Planck Institutに留学しておりますが、彼の研究室の方々は青野さんの論文[73]を片手にあらゆる箇所をチェックし、手あかのしみ込む程くり返し読んでいます。最近青野さんから送られた手紙にはその事について質問攻めの毎日で、うれしい悲鳴を上げている様子が多少得意気に書かれておりました。

ここで、話を破壊の問題にもどしますが一般に破壊の問題では巨視的および微視的機構が混合しておりますため、実用的な研究を除けば基礎的な立場からは敬遠される

傾向がございました。しかし最近になってこの問題を見直そうとする傾向が生じて参りました。去年の11月に米国 Gatlinburg で Fundamentals of Fracture という国際シンポジウム（第2回）が開催されまして、そこでは破壊の問題を新しい立場、例えばクラックの先端部に対し、これを格子欠陥の一種とみなして量子力学および原子論的塑性の立場から攻究するのみならず、金属組織およびマクロな塑性の立場等をも含めた総合的な立場から問題を取りあげる、また金属のみならずセラミックス、半導体、イオン結晶等全ての物質の種々の「破壊」について、改めて新しい学問分野として見直そうというわけで、非常に活気にあふれた国際会議でありました。

そんな中で発表されました研究成果の話題講演のひとつにアメリカ ORNL の Ohr 氏による Crack Tip Problem がございました。これはクラック先端部における転位の発生とその配列についての報告です。写真に見られるように、種々の金属の薄膜試料を超高圧電子顕微鏡下で応力を加えると破面先端部に転位が発生し、それらはクラック先端部近傍にではなく少し離れたところに集積することを示しています (dislocation free zone の存在)。またこれらの事実を応力解析の結果と比較して説明を与えたものです。大変奇麗な結果で破壊の原子的過程が直接観察と理論の双方から初めて明らかにされたと述べられていました。しかしこれに対して私の講演の中では彼らの結果は金属の種類による劈開性の相違についての説明を与えていないことを指摘し、問題の解決のためには、クラック先端部において転位が発生する機構そのものをより詳細に検討すべきであると主張いたしました [10, 13, 14, 24, 30, 31, 116]。私共では例の鉄単結晶を用いまして次のような実験を致しました。図の 1 mm 厚、50 mm 幅の単結晶の片側に切欠を付し、その部分を液体窒素で冷却し、他の側の端を約 300°C に加熱いたします。引張応力を加えますと低温の部分に発生した劈開クラックが高速度で伝播し高温の部分で急速に停止します。破面を調べてみますと高温の部分では破面から約 3 μ m 以内の薄い層内に転位が高密度に発生している事実が写真に示されているようにエッチピットの測定から解ります [24]。一方同時に測定されたクラックの伝播速度を考慮してこれらの転位は破面の先端部で熱活性化過程によって核発生していることが推定されます [31]。このことから完全結晶中での転位の発生の難易さが結晶の脆性を支配していることが解ります。これらの結果は結晶格子自体の脆性という立場から次のように説明されます。すなわち破面の先端部において結晶が劈開面で分離するか、それとも迂り面に沿って迂るかは結晶格子自体の原子結合の性質により定まる。つまり結晶の迂り面上での臨界剪断応力と劈開面上での臨界垂直分

離応力との比 β がこれらに対応する面での外部負荷応力の剪断応力および垂直応力成分との比 α に比較して大きい小さいかによって結晶は劈開したり延性を示したりします [10, 13]. そしてこの比 β は面心立方金属, 体心立方金属, 半導体あるいはイオン結晶等の物質についてそれぞれの結晶固有の原子間力の性質から決定されるという立場でございます. この立場からクラック先端部での塑性変形の発生量を推定致しまして前述のエッチピット密度の実験とを比較しますと, 転位の核発生の活性化エネルギーが計算され鉄の場合にはこの比 β が5ないし6に近いことが判明致しました [10, 13]. すなわち鉄の脆さはこの比 β によるものであり, 鉄はアルミと同様に単純引張では延性的であるが切り欠きが存在すればアルミと異なり脆性を示すという事実を説明しえたわけでございます [30, 31]. これらにつきまして更に原子論的なモデルを用いて計算いたしました.

つぎにこれらの写真は二神さんおよび明石さんによる, LiFの劈開破面に発生した転位のX線トポグラフによる回折像でございます. イオン結晶のような脆性物質で転位が発生し得ることは上述の理論からは一見奇異に思われますが, 別の実験から転位は既存の欠陥から発生することが示され [92], この場合についても矛盾のない一貫した説明を与え得ることを示しました [116]. こうした立場からの破壊の理論の完成はなおこれからの課題であると思われます. 次に同様の方法で水素脆性の問題を単結晶を用いて測定いたしました [43, 45]. 次の写真は吉田さんが鉄を5 keV水素イオンで照射した場合に生じる欠陥を電子顕微鏡で調べた資料で, この像のコントラストから水素はそれ自身平板状に集合していることが示されます [86]. この結果から推論いたしますと, 水素による遅れ破壊機構の本質は, 破面先端の高応力部分に固溶限を越えた水素が偏析して平板状の集合体を形成することによると考えられます. このことは次のようなパイエルスモデルによる計算によって理論的に説明することができます [117]. この考えは同会議に提出されたBirnbbaumらの意見とは全く相違しており最近までは不明であった問題に対して新しい考えを提出したものであります. 以上のように私共のグループは破壊の問題についても大いに貢献していると考え次第でございます.

話は前後致しましたが応力研の発足後当初の6部門に加えて現在の海洋災害部の3部門が増設されたわけでございますが, これに対し私達若輩の者の中で, すなわち栖原先生および体部より呼応された大路先生と共に高エネルギー力学研究部というものをご構想いたしました. これは従来の経験をはるかに超える高温, 高速, 高圧などの領

域における流体や材料の力学的挙動では微視的機構と巨視的機構、作動流体と構造材料の関連は極めて密接であるなどに大きな特徴があり、これらを高エネルギー密度領域における力学的現象として総合的に体系づける新しい応用力学の立場によってはじめて将来の種々の工学的な問題が解決できるという構想でございました。このことを津屋崎の実験水槽の完成祝に招かれて来られて文部省のお役人に力説いたしましたところ「難しく何を言っておられるかさっぱり解らない。」という頼りない答が返って参りました。しかしともかくもその年にストレートに、現在の高エネルギー材料実験装置の予算が通りまして、高エネルギー力学研究部としてのスタートが切られることになったわけでございます。

しかしその後、現在に至りますまでには幾多の屈折があり辛酸の時もございまして、大路先生が転出された時期など非常に苦しい時代があったことも又事実でございました。その様な時期に於て、歴代の所長をはじめ先輩諸先生方の寛大さと御理解は、若年であった私達にとって何よりの励みになりました。文部省への説明にも自分達で当るなどほぼ同年輩であった岡部先生、栖原先生および当時海洋災害から海洋工学への発展を構想しておられた田才先生をも含めて、揃って高エネルギー力学研究部の支持と推進に当って頂きました。もちろん時には派手な意見のぶつかり合いもございましたが、ここぞという所ではがっちりスクラムを組むという姿勢が常に根底にございまして、これは特に予算の獲得などに際しましてはそうした姿勢は顕著な効果をもたらしたものでございます。若年の私共の協調と諸先輩方の御理解によるこうした人の和というものがいかに重要であり、そしてこの高エネルギー力学研究部の発展はこれらの方々の「和」の賜物以外の何物でなかったと痛切に感じております。もちろん発足当時の設備の規模はその後先程伊藤先生からお話のございました「トライアム1」からスタート致しました第二次の応研高エネルギー力学研究部の発展期と比較致しますと雲泥の開きがございますが、規模が大きくなければなる程、協調と人の和の重要性が増してゆくものであることを実感致す次第でございます。なおこの頃栖原先生を中心として行われた放電衝撃関係の研究 [18, 19, 20, 22, 33, 34, 35, 41, 47] は協力研究の記念として思い出深いものがあります。

さて前述いたしましたように、鉄の破壊の研究は当初優秀な造船用鋼材を作り出す事を目標にして出発しましたが、そのうちに国内の鉄鋼メーカー及び造船所での鋼材開発は国際水準を抜く急速な発展を遂げ、脆性は実用上あまり問題はない所まで到達致しました。従って我々の研究の興味も自然に当時新たに生じて参りました原子炉工

学に向けられるようになりました。そこでは鋼材の中性子照射による脆性が原子炉圧力容器の破裂事故に結びつく重要な課題でございます。さらにそこでは高エネルギー粒子線の照射による点欠陥の発生とその挙動が材料の基礎的な研究課題として重要になって参ります。当時はまた国内における照射研究の黎明期に当ります。日本原子力研究所および京都大学原子炉実験所における大学共同利用研究所の開始、東北大学を中心とした材料試験炉 JMTR 共同利用計画の発足などに関与いたしましたのもその時期でございます [12, 21]。一方鉄鋼の照射脆化の試験に必要な 10^{19} nvt 台の照射は国内ではまだ利用できない時代でしたので国外原子炉を利用する照射実験が学振および鉄鋼協会による鉄鋼基礎共同研究の一環として行われました。

ここで興味深かったのは、国内各メーカーから提出された試料の照射結果が同一規格の鋼材であるにもかかわらず、外国製材料のトレンドカーブ（平均実験曲線）に比較して格段に脆化が少なかったことでした。このことは我が国の製鋼技術の水準の高さを示すものでありましたが、一方我々の興味を脆化の実際問題よりもその基礎になる格子欠陥の挙動に向けさせる動機になりました。京大原子炉実験所では極低温照射装置の設置とその共同利用研究が発足し、実験所の吉田博行さんらと共に我々もまたこれに取り組みました [26]。1 週間の照射に交替で原子炉内に泊り込みヘリウム液化機の運転に当ります。機械のトラブルで冷却が少しでも中断すれば半年かかりで準備した試料が全部駄目になります。ある時は蛇が電源トランスに巻きつき原子炉が停まるなど熊取色豊かな事故等もあり、それでも小野の東風宜しくこりずに失敗を繰り返しておりました。共同利用の他大学の先生方との徹夜作業を通じての交流は今なお懐かしく思い出されます [26]。またこれには研究室動員で参りますので当時の二神さん安部さん藤原さんは大変であったと存じます [26, 27, 29, 37, 39]。しかし失敗すればする程ファイトは湧いて参ります。もっともこのような失敗に耐えるなどは研究所でこそできることであって学部では到底不可能だとの皆さんのご意見でした。そんな折日本原子炉研究所の奥田さん（現在筑波大学教授）から JRR 3 炉の極低温照射ループの協力研究を申し出られたのは正に救いの手でした。ここでは高村三郎さんらベテランのスタッフの方々により低温照射も順調に参り、我々の実験も進捗致しました [46, 48, 81]。その後さらに低温（液体窒素温度）電子線照射につき京大 KUR-LINAC (28 MeV) [49] および原研高崎研での実験 (2 MeV) が加わりました。格子欠陥の研究にはこれらの手段はいづれも不可欠であり、これらを利用できたことは幸運でした。もっとも照射チャンバーはいづれも手作りであり、これらの素人設計の装

置を受入れて下さった関係者の方々の御好意と御寛容は、後から考えても大変なものであったと感謝している次第です。この頃から蔵元先生ついで青野さんが研究陣に加われ鉄の照射軟化と硬化、陽電子消滅による鉄の原子空孔の研究等かねて懸案であった研究課題について続々と成果があげられました [51, 52, 53, 59, 60, 85, 87, 89].

つぎに研究所での核融合研究の開始について申し上げますと、前述高エネルギー工学の当初の構想に電離気体の力学は勿論入っておりましたが、既に名大プラズマ研究所があることだし、これとは異なる特色を出す意味でも、核融合という名は表には出さないというのが我々の間での申し合わせでした。しかし大路さんの後に来て頂いた村岡克紀氏は従来のいきさつにこだわりなく学問的興味から自然と核融合プラズマの研究に傾き小型のトカマク型放電装置の製作と実験を開始致しました。結局は我々もこれに引きずられたわけですが、若さの力をこの時ほど、感じさせられたことは他にはありません。一方材料の方でも変化がありました。1968年から開始され、当初は原子炉压力容器用鋼材に重点が置かれていた材料照射の日米シンポジウムの第二回目京都会議 (1972) の際に、増殖炉用材料のボイドスエリングに端を発した高温重照射の研究が、核融合炉材料の開発に向って急速に変貌を遂げた事情が、加速器による照射シュミレーションの進展を含めて米国側から一斉に紹介され、我々も目を見張る思いでした。

ついで1975年、米国 Gatlinburg で Fundamental Aspects of Radiation Damage of Metals and Alloys および Radiation Damage of Fusion Reactor Materials and Tritium Technology の国際会議が引き続き開催され前者では点欠陥を中心にした照射損傷の基礎的研究、後者では核融合炉材料の開発に向っての照射損傷の研究についていづれも画期的な発表が相次ぎ、これらの分野の新しい発展への幕が切って落とされました。これらの情勢の下で研究所の高エネルギー力学研究部でも核融合への応用を正面から取り上げ、プラズマと材料の両面から協力研究体制で当ることによって他所にはない特色を出して行こう、という大きな方針の変換を行った次第でした。往時航空機、船舶等の新技術が学問としての応用力学と相伴って大きな発展を遂げたように、核融合の研究は新しい流体や材料の力学が有効に生かされ得る対象であると共に、日本の科学技術が後進性から脱却して独創的な国際的貢献をなし得る好機でもあり、また長い視野での日本に特殊な社会的要請に答える適当な分野でもあると考えた訳です。

これ以後のことについては事情をよく御存知の方も多いことで、詳細は省略させていただきますが、高エネルギー流体力学部門（昭46年）、ついで高エネルギープラズマ力学部門（昭54年）が新設され、矢島先生および伊藤先生が理論および実験のスタッフとして着任され、プラズマ関係の研究陣容は格段に整備されて参りました。一方、私が主として関係致しました材料照射関係の動向について申し上げますと、国内では日本原子力委員会核融合会議からの諮問に対して日本での炉材料研究のあり方と必要な施策に関し材料分科会第一次答申（昭54）および第二次答申（昭58）が橋口隆吉委員長の下でまとめられました。前者では主として国内で整備されるべき照射設備について、後者ではさらに核融合炉条件をシュミレーションし得る照射設備の建設につき今後10年間にとり上げるべき具体的な問題点を国際協力をも含めて討議致しました。

また昭55年から文部省科学研究費、エネルギー特別研究（核融合）が10年計画の下で発足し、炉第一壁材料の重照射関係では、まず金属合金の重照射効果についてフェライト系ステンレス鋼の重照射効果が、それぞれ3カ年計画の計画研究のテーマとして取り上げられました。一方、国際的には1st (1979, Miami) [55, 61], 2nd (1981, Seattle) [75, 76, 77] および 3rd (1983, Albuquerque) [105, 106] Topical Meeting of Fusion Reactor Materials が米国で、ついで第一回核融合炉材料国際会議 [111, 112, 113, 114, 115] が1984年東京で、第2回が米国 (1986, Chicago) [119, 120] で開催されました。考えてみますと、まだかなり抽象的な域を出ない未来技術の問題についてこれだけの人々のエネルギーが注入されるという現象は極めて特徴的な現代的な出来事であると存じます。つまりそれだけ“将来”の問題がより現実的な問題として取り上げられ、そこでは“基礎的な学問・研究”が将来を予測し指針を得るために要請され、特に日本では先行きの問題を取り上げる“大学での研究”の役割が、より重要性を増して来たことを感じざるを得ません。

ここに面白い話がございます。前述の国際会議の名前ですが、Topical Meeting と言うのは建前は米国の国内会議ですが実質的には国際会議となっております。それで橋口教授がこの会議を日本に誘致したいという申し入れをされた所、アメリカ側からは、この会議はアメリカの国内研究に対する（米国エネルギー省の）評価の会議をも兼ねているので外に出す訳にはいかない、日本で別途に国際会議を開いて下さい、という答が返って参りました。それではという訳で昭和59年12月核融合炉材料の第一回国際会議を日本で開催する運びとなりました。ところが第2回の国際会議についてアメリカ側から、第4回目に予定されていた Topical Meeting を取り止め、第2回の国

際会議に合流させて欲しいという申し入れがございました。これも日本の研究者パワーとでも申しませうか、その質はともかくとして、その数の勢いが評価されたことの現れであったと存じます。少し前の 2nd Topical Meeting の際でしたが、日本からの参加者がどっと増えましたものですから、どこそこの科学新聞に核融合炉は日本が輸出するらしいなどという記事が出されたという話がございます。しかし現実問題と致しましては核融合炉材料の開発に必要な照射試料の体積と照射量は図のような領域になるわけですが、これに近い核融合炉環境に特有なヘリウム効果を模擬できる照射装置として米国は高束熱中性炉 (HFIR) を所有し、日本にはございません。また米国では核融合中性子発生装置 RTNS II を所持しており、さらにより重照射を目指す FMIT を計画しておりますが、日本では極めて薄い試料を電子線で照射する HVEM、及び薄い試料を重イオン照射によりシュミレートする加速器に頼っている程度でございます。とは申しませても RTNS-II を使用する日米協力実験に参加致しました応力研の吉田、蔵元各先生は技量においては米国側にヒケを取らない良い成果をあげておられます [115]。また九大におきましても理学部のタンデム [108, 112, 113, 120]、及び HVEM [55, 64, 65, 84, 121, 123] を使用して特色ある成果を発表しております。即ち装置はなくても実験技量を生かした基礎研究で勝負しようという訳であります。私の方は実験技量では若い吉田、蔵元、室賀さん方に到底、太刀打ちできませんので、せめて理論の方でもと努力して参った次第です。

次の写真は RTNS-II で照射した銅の電顕写真です [115] が、核融合中性子と固体中の原子の衝突によって写真のような欠陥の固りができて参ります。高温であればさらに写真のようなボイド (空隙) に発達いたしますので、これの10万倍程照射しますと、穴だらけになってしまう訳で、これを防止し得る材料の開発が課題となって参ります。通常の原子炉では核分裂中性子と原子との衝突エネルギーは図のような大きさになり原子を次々とはね飛ばして格子欠陥を発生します (カスケード) が、核融合炉中性子ではこれに比較して約10倍の衝突エネルギーを生じ、これによる重照射によって空隙の発生など材料の内部組織の変化がどのようになるのかを予測するのが理論の役割になります [111, 114, 120, 122]。この問題では原子間の衝突エネルギーは熱エネルギーに比較して極めて大きいので、いわゆる熱平衡の概念に基づく従来の理論は適用できず極めて大きな非平衡系の問題になります。従って私はこの問題をより一般的な立場すなわち確率過程の問題として取り上げた訳です [75]。

そこでは面白い巡り合わせですが私が乱流の研究に際して以前に出した式が省略の

ない厳密な式としてこの場合に当てはめることが可能です。最終的には種々の近似を用いて Fokker-Planck の式に持ってゆくわけですが、問題はこれらの一次および二次モーメントをどうやって計算するかに帰せられます。そこでは厳密な元の式なしにやみくもに行いましては先き行きが危ぶまれますが、その意味で私共は近似の意味を把握して、どしどし話を先に進めることができます。こうして種々のエネルギースペクトルを持つ中性子の照射に対して、材料の内部組織がどのように変化してゆくのか、を理論的に計算するわけでございます。小さな欠陥の集合体により小さくなるか、またはより大きくなるかの分岐点を一般的に集合体の核発生の条件と申しますが、我々は照射下における原子空孔の集合体としての空隙(ポイド)の核発生率を一貫した理論を用いて計算することができました [91, 105, 111]。特に核融合炉ではポイドの中にヘリウム原子が入ることによる、いわゆるヘリウムの効果が非常に大きいのでこの問題を取り上げました。これは図のようにポイドに含まれるヘリウムと原子空孔の数を変数とする二次元空間における Fokker-Planck の式の解を求める問題となります。この図はこのようにしてポイドの核発生率を計算した結果を示します [112]。

この問題につきましてはポイドに及ぼすヘリウムの効果のみでなくさらに照射によって誘起される析出物等の問題にもアプライする必要があるとございます。析出物の内部の状態を表す変数とまわりの状態を表す変数を確率変数と致しましてカスケードの効果を理論的に取り扱うというわけです [119]。このようにして我々は与えられた条件下での材料の照射挙動を予測する理論的手段“照射相関則によるモデリング”を持つこととなります。さて私共核融合炉重照射効果に関する特別研究のグループで現在取り上げております課題は、フェライト系ステンレス鋼の重照射効果でございます。フェライト系の鉄ではポイド・スエリングが非常に少ないことが実験によって明らかになって参りました。さらにクリープも少なく、耐疲労性は大きく、その上、放射化も少ないなど多くの長所を持っていますが、ただ一つ、脆性破壊という本質的な欠点が残されております。従って照射効果の問題を追求して照射脆化の少ない鋼材の条件を見出し得れば非常に有力な候補材料となり得ますので、私共はこの問題に特に力を注いで参った次第であります。これについても脆性破壊は私の往時のテーマであり、思わぬ巡り合わせでした。もっとも、有効な照射手段なしでこの問題を解決することは不可能でございますが、我々は HVEM や加速器などによるシュミレーション照射の実験を行い、また理論解析を併用して析出物の挙動などの組織変化を予測して、フェライト系ステンレスが将来の核融合炉第一壁候補材料として有望であるか否かの

答を出すべく尽力致しました。この問題につきましては3月までに最終報告を提出しなければなりません。“私共の予測としては有望である”という意見を表明しようと考えている次第でございます。

思い起こしますと種々の困難な時期におきまして、多くの方々の御助力を頂き、又偶然というものの巡り合わせで不運と幸運とが交差をいたしました中で私共の研究グループは現在、非常に活発に研究を行い成果を上げている、と申し上げて良いと存じます。なお将来への見通しの中にはまだ色々な問題が山積しておりますこともまた事実でございます。私もこれからさき、どれ程の間仕事を継続できますかは解りませんが、皆様と共に残された問題の解決につき、できる限りの努力を致して行きたいと考えております。

話の締めくくりとして申し上げたい事がございます。その一つは、研究というものは立派な装置や設備の有無のみでその成果が左右されるものではないと考えます。むしろ、そういったものが万全でない所に始めて研究の本質というものを見出すことができると存じます。また今一つは、研究組織というものは大きくなればなるほど、その運営も困難になって参ります。内部における団結と協調という人間の問題が運営を円滑にして成果を上げ得るか否かの鍵を与えるものであると考えております。こうした事が今後益々発展を遂げようとする応力研における最重要課題である、と申し上げても過言ではないと考える次第でございます。

戦後の何もない時代から出発し大きな変革の波にもまれて参りました卑小な私事を申し上げ、はなはだ僭越でございましたが以上をもちまして結びとさせていただきます。

あとがき

本文は1月17日退官記念講演の際の録音を小山田さんに聞き書きして頂いたものに多少手を加え整理したものです。なお講演の際には多くのスライドを使用しましたが、本文ではその代わりに対応する論文番号を記入いたしました。参考にして頂ければ幸いです。なお最初に述べましたように若い頃の思い出を中心にしましたため、とくに最近の研究については全般についての説明よりは以前の研究に関連の深い事項に話題を絞ったため、省略された部分が多くなりました。これらについては多数の方々との交流や思い出など記したいことも多く残念ですが別の機会に譲らせて頂きます。なお重照射関係については、特別研究の報告集“重照射研究の進歩”を参照して頂ければ幸甚です。

北島一徳論文リスト

論文題目	発表機関誌等名	発行年
1) 乱流の混合距離に就いて	流体工学研究所報告 Vol. IV NO. 3	1948
2) 鉄単結晶の劈開型破断	応用力学研究所所報 第 9 号	1956
3) Cleavage Fracture of Ferrite	Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. V, No. 19	1957
4) 鉄単結晶の塑性と劈開	金属の材料の強度と疲労 第33回総合シンポジウム	1958
5) 体心立方格子金属における加工硬化	応用力学研究所所報 第 15 号	1960
6) On Mechanisms in the Brittle Fracture of Low Carbon steels	Proc. 4th Jpn. Congr. Test. Mater.	1960
7) On the Solution of Peierls' Equation (Note)	Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. X, No. 39	1961
8) Theory of Diffusion in Turbulence	Proc. 10th Intern. Congr. Appl. Mech; Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. XI, No. 39	1962
9) 金属材料の加工硬化, クリープおよび破壊	金属材料の強度と疲労 第7回総合シンポジウム	1962
10) 鉄の塑性変形および脆性破壊に関する基礎的研究 I-V	応用力学研究所所報 第 19 号	1962
11) Yielding of Crystalline Polymers	Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Vol. XI, No. 42	1963
12) 純鉄単結晶の中性子線照射損傷	日本原子力研究所 共同利用研究報告集	1964
13) On the Mechanism of Cleavage Fracture of Crystals	Proc. 1st Intern. conf. Fracture, Sendai	1966
14) Cleavage Fracture of Iron Single Crystals	Proc. 1st Intern. Conf. Fracture, Sendai	1966
15) 純鉄単結晶の劈開破壊及び微量炭素の影響	日本学術振興会 第129委 研究報告集	1966
16) On the Theory of Shear Flows	Proc. Intern. Symp. Boundary Layer Turbulence	1967

- 17) 剪断流の理論について 応用力学研究所所報
第 26 号 1967
- 18) 金属導線の放電による衝撃波の発生機構
共著者 栖原寿郎, 福田重久 Vol. 8, No. 74 1967
- 19) On the Shock Wave Produced by Underwater
Explosion of Wire Rep. Res. Inst. Appl.
共著者 T. Suhara, S Fukuda Mech., Vol. XV, No. 50 1967
- 20) 種々の媒体中における放電導線爆発に関する
実験的研究 塑性と加工
共著者 栖原寿郎, 福田重久 Vol. 8, No. 77 1967
- 21) Neutron Irradiation Effects on the Plastic
Properties of Pure Iron Proc. Intern. Conf.
Strength of metals &
Alloys; Suppl. Trans.
Jpn. Inst. Metals, Vol. 9; 1967
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech., Vol. XVI, No. 54
- 22) 導線爆発と水中衝撃波 塑性と加工
共著者 栖原寿郎, 福田重久 Vol. 8, No. 88 1967
- 23) Mechanical Properties of Neutron Irradiated
Single Crystals of Iron U.S.-Japan Symp. on
Radiation Damage in
Iron and Steel, 1968
San Francisco
- 24) Fractographic Studies on the Cleavage
Fracture of Single Crystals of Iron Electron Microfractography
共著者 K. Futagami American Soc.
Test. Materials STP,
No. 453 1969
- 25) 鉄単結晶における劈開破壊の発生と伝播 材料の強度と破壊
第14回総合シンポジウム 1969
- 26) Radiation Damage Studies Using the Low
Temperature Irradiation Facility; 1. Instruments,
2. Measurement of Internal Friction
of Fe-B Alloys KUR Ann. Rep., No. 3 1970
- 27) 鉄ボロン合金の低温照射 応用力学研究所所報
共著者 安部博信 第 34 号 1970
- 28) 鉄鋼の脆性破壊の機構 日本鉄鋼協会の強度と靱
性シンポジウム論文集 1970
- 29) Radiation Effects in Iron Single Crystals U.S.-Japan Seminar on
Radiation Effects in
Metals and Structural
Materials 1971
- 30) Low Temperature Brittleness of Iron and
Steels Toward Improved
Ductility & Toughness
Intern. Symp. 1971
- 31) Propagation of Cleavage Crack in Iron Proc. Intern. Conf.
Mechanical Behavior of
Materials 1972

- 32) 鉄単結晶の低温中性子線射効果
応用力学研究所所報
第 40 号 1973
- 33) Properties of Coating by Wire Explosion
共著者 T. Suhara, S. Fukuda
Paper of the 7th London
Inter. Metal Spra. Conf. 1973
- 34) The Structure and Adhesion of Coatings
Deposited by Wire Explosion Spraying
共著者 T. Suhara, S. Fukuda
J. Vac. Technol.
Vol. 11, No. 4 1974
- 35) The Structure and Adhesion of Coatings
Deposited by Wire Explosion Spraying
共著者 T. Suhara, S. Fukuda
Paper of the San
Francisco Conference
on Structure-Property
Relationship in
Thin Film and
Bulk Coatings 1974
- 36) The Structure and Adhesion of Coatings
Deposited by Wire Explosion Spraying
共著者 T. Suhara, S. Fukuda
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech., Vol. XXII, No. 70 1975
- 37) Internal Friction of Fe-B Alloys Neutron
Irradiated at Low Temperature
共著者 H. Abe
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech.,
Vol. XXII, No. 70 1975
- 38) Nucleation of Voids by High Dose Irradiation
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech.,
Vol. XXII, No. 70 1975
- 39) Low Temperature Neutron Irradiation Effects
on Tensile Characteristics of Iron Single Crystals
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech.,
Vol. XXII, No. 70 1975
- 41) 線爆溶射法によるタングステン皮膜の軟網基
材への付着機構
共著者 栖原寿郎, 福田重久, 伊藤 晋
日本金属学会誌
第 39 卷 9 号 1975
- 42) 鉄合金の固容および分散強化に伴う靱性の機
構に関する研究
強度と靱性部会報告書
鉄鋼基礎共同研究会 1975
- 43) 鉄単結晶の遅れ破壊の伝播機構に関する研究
日本鉄鋼協会, 日本金属
学会, 日本学術振興会,
鉄鋼基礎共同研究
遅れ破壊部会報告書 1975
- 44) Low Temperature Irradiation Studies on Iron
US-Japan Seminar
Radiation Produced
Defects and Defects
Clusters and Their
Effects in Metals 1975
- 45) 鉄単結晶における遅れ破壊の伝播機構
共著者 佃 昇
応用力学研究所所報
第 45 号 1976
- 46) Effect of Low Temperature Neutron Irradia-
tion on the Mechanical Properties of Iron Sing-
le Crystals
共著者 H. Abe, S. Takamura
and, S. Okuda
Proc. Intern. Conf.
Fundamental Aspects
of Radiation Damage in
Metals (Gatlinburg) 1976

- 47) 線爆溶射
共著者 栖原寿郎, 福田重久
溶接学会誌
第45巻第8号
1976
- 48) Temperature and Orientation Dependence of
Irradiation Softening in Iron Single Crystals
共著者 S. Takamura, H. Abe and S. Okuda
Scripta Met.
Vol. 11, No. 7
1977
- 49) Application of KUR LINAC to the Study of
Radiation Damage in Metals
共著者 E. Kuramoto, et al
Ann. Rep. Res. Reactor
Inst. Kyoto Univ. Vol. 10
1977
- 50) Formation of Voids in Iron Irradiated by Elec-
tron in HVEM
共著者 E. Kuramoto, K. Futagami
Proc. of 5th Int. Conf.
High Voltage Electron
Microscope, Kyoto,
Japan
1977
- 51) X-Ray Diffraction Studies of High-Purity Iron;
Topography and Double-Crystal Diffraction
共著者 N. Tsukuda
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech. Kyushu Univ.,
Vol. XXVI, No. 81
1978
- 52) Positron Lifetime Measurements of Electron-
Irradiated Iron and Iron-Carbon
共著者 E. Kuramoto
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech. Kyushu Univ.,
Vol. XXVI
1978
- 53) Positron Annihilation Angular Correlation
Measurements in Neutron-Irradiated Niobium
and Niobium-3 wt% Zirconium
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa
Rep. Res. Inst. Appl.
Mech. Kyushu Univ.,
Vol. XXVI, No. 81
1978
- 54) Positron Annihilation in Niobium Containing
Microvoids
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa
Radiation Effects
Vol. 37, No. 3/4
1978
- 55) Nucleation of Voids in BCC Metals
共著者 K. Futagami, E. Kuramoto
J. Nucl. Mat.
Vol. 85 & 86 Pt. B
1979
- 56) ボイドの核発生機構
核融合研究
第42巻
1979
- 57) Thermally Activated Slip Deformation between
0.7 and 77 K in High-Purity Iron Single Crystals
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono,
K. Maeda, S. Takeuchi
Phil. Mag., A
Vol. 39, No. 6
1979
- 58) Studies of Vacancies and Microvoids in
Niobium by Positron Annihilation Technique
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa
Proc. of 5th Int. Conf.
Positron Annihilation,
Lake Yamanaka, Japan
1979
- 59) Studies of Vacancies in α -Iron by Position
Annihilation Technique
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa,
S. Koike
Proc. of 5th Int. Conf.
Positron Annihilation,
Lake Yamanaka, Japan
1979
- 60) Solid Solution Hardening and Softening in
Iron Alloy Single Crystals between 4.2 K and
300 K
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono, H. Abe
Proc. of 5th Int. Conf.
Strength of Metals and
Alloys, Aachen,
Germany
1979

- 61) 核融合炉材料国際会議報告 応用物理第48巻第10号 1979
- 62) Size Effect on Ability of Slip Deformation in Iron Single Crystals at Very Low Temperatures
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono, H. Abe Scripta Met. Vol. 13, No. 11 1979
- 63) Thermally Activated Slip Deformation of High purity Iron Single Crystals between 4.2K and 300K
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono Scripta Met. Vol. 13, No. 11 1979
- 64) 鉄中ボイドの形成 (HVEM)
共著者 蔵元英一, 二神光次 核融合研究 Vol. 43 / 別冊その4 1980
- 65) モリブデン金属におけるボイドの形成 (HVEM)
共著者 二神光次, 明石義人, 蔵元英一 核融合研究 Vol. 43 / 別冊その4 1980
- 66) Plastic Deformation of Fe-N Single Crystals in the Temperature Range between 4.2K and 300K
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono Scripta Met. Vol. 14, No. 3 1980
- 67) ブリスター発生の初期過程 核融合研究 Vol. 44 1980
- 68) Simulation Irradiation Studies on BCC Metals
共著者 E. Kuramoto, N. Yoshida, N. Tsukuda, N. H. Packan, L. K. Mansur Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., Vol. XXVIII, No. 90 1981
- 69) Thermally Activated Slip Deformation of Fe-Ni Alloy Single Crystals in the Temperature Range of 4.2K and 300K
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono Scripta Met. Vol. 15 No. 3 1981
- 70) シミュレーション照射相互の関係について
共著者 蔵元英一, 吉田直亮, 佃昇 核融合研究 Vol. 45 / 別冊その2 1981
- 71) W, Mo におけるブリスタリングの発生機構
共著者 蔵元英一, 吉田直亮 核融合研究 Vol. 45 / 別冊その2 1981
- 72) Slip Systems and Orientation Dependence of Yield Stress in High-Purity Molybdenum Single Crystals at 4.2K and 77K
共著者 Y. Aono, E. Kuramoto Scripta Met. Vol. 15, No. 8 1981
- 73) Plastic Deformation of High-Purity Iron Single Crystals
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., Vol. XXVIII, No. 92 1981
- 74) A New Positron State in Niobium Containing Voids
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa Phy. Letters Vol. 86A, No. 5 1981
- 75) Effects of Cascade on the Evolution of Irradiated Structure in Metals
共著者 E. Kuramoto, N. Yoshida J. Nucl. Mat. Vol. 103 & 104 1981

- 76) Simulation Irradiation Studies on Iron
共著者 E. Kuramoto, N. Yoshida,
N. Tsukuda, M. B. Lewis,
N. H. Packan, L. K. Mansur
J. Nucl. Mat.
Vol. 103 & 104
1981
- 77) Mechanism of Initial Processes of Blistering in
BCC Metals
共著者 N. Yoshida, E. Kuramoto
J. Nucl. Mat.
Vol. 103 & 104
1981
- 78) Mechanical Properties of BCC Metal Single
Crystals
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono, H. Abe
Jpn.-US Symposium
(Hawaii) AIME
1982
- 79) A Hump on τ_y -T Curve of Iron-Nickel Alloy
Single Crystals
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono
Jpn.-US Symposium
(Hawaii) AIME
1982
- 80) Correlation among Damage Structures Irradiated
with Cascades of Various PKA Energy
Spectra
共著者 E. Kuramoto, N. Yoshida
J. Nucl. Mat.
Vol. 108 & 109
1982
- 81) Effects of Low Temperature Neutron Irradiation
on the Mechanical Properties of BCC
Metals
共著者 E. Kuramoto, H. Abe, Y. Aono
J. Nucl. Mat.
Vol. 108 & 109
1982
- 82) Fundamental Plastic Behaviors in High-purity
BCC Metals (Nb, Mo and Fe)
共著者 Y. Aono, E. Kuramoto
Proc. 6th Int. Conf.
Strength of Metals and
Alloys, Melbourne
1982
- 83) A New Positronium-like State in Voids in
Neutron Irradiated Niobium and Vanadium
共著者 M. Hasegawa, E. Kuramoto,
M. Hirabayashi, Y. Ito,
T. takeyama, H. Takahashi,
S. Ohnuki
Proc. 6th Int. Positron
Annihilation, Arlington
1982
- 84) Mechanism of Void Formation of Iron and
Iron-Alloys Irradiated by Electrons
共著者 E. Kuramoto, N. Yoshida
Proc. Yamada Conf. V
Point Def. Def. Int.
in Metals, Kyoto
1982
- 85) X-Ray Diffraction Studies on the Interstitials
in High-Purity Iron
共著者 N. Tsukuda
Proc. Yamada Conf. V
Point Def. Def. Int.
in Metals, Kyoto
1982
- 86) A Role of Helium and Hydrogen Atoms in the
Formation of Interstitial Loops
共著者 N. Yoshida, E. Kuramoto
Proc. Yamada Conf. V
Point Def. Def. Int.
in Metals, Kyoto
1982
- 87) Softening and Hardening Induced by Defects
and Defect Clusters in BCC Metals
共著者 H. Abe, Y. Aono, E. Kuramoto
Proc. Yamada Conf. V
Point Def. Def. Int.
in Metals, Kyoto
1982
- 88) A Positron Annihilation Study of Neutron
Irradiated Titanium
共著者 E. Kuramoto, M. Hasegawa,
S. Koike, M. Hirabayashi,
Y. Higashiguchi
Proc. Yamada Conf. V
Point Def. Def. Int.
in Metals, Kyoto
1982

- 89) Positron Annihilation in Molybdenum Single Crystals Irradiated with Electrons, Neutrons and α -Particles
共著者 M. Hasegawa, Y. Ohya, K. Abe, S. Morozumi
Proc. Yamada Conf. V Point Def. Def. Int. in Metals, Kyoto 1982
- 90) 体心立方金属 (Nb, Mo, Fe) の低温塑性に関する基礎的研究
共著者 青野泰久, 蔵元英一
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 91) Statistical Theory of the Evolution of Damage Structure under Irradiation with Cascades
Proc. Yamada Conf. V Point Def. Def. Int. in Metals, Kyoto 1982
- 92) LiF 単結晶における転位の発生
共著者 明石義人
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 93) 高純度鉄における点欠陥の X 線的研究
共著者 佃 昇
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 94) 力学過程と確率過程
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 95) 金属の照射損傷 (ボイド) と陽電子消滅計測
共著者 蔵元英一, 竹中 稔, 長谷川雅幸
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 96) ヘリウムイオン照射による照射欠陥の蓄積集合過程
共著者 吉田直亮, 蔵元英一
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 97) 照射損傷の統計的理論
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 98) 乱流における輸送現象の理論
九州大学応用力学研究所報 第57号 1982
- 99) 合金の照射シミュレーションの理論
核融合研究 Vol. 49 / 別冊その 1 1983
- 100) ボイドの発生の種々の側面—陽電子消滅法を含む
共著者 蔵元英一, 吉田直亮, 長谷川雅幸
核融合研究 Vol. 49 / 別冊その 1 1983
- 101) He^+ および H^+ 照射によるガス原子と照射欠陥の蓄積過程
共著者 吉田直亮, 蔵元英一
核融合研究 Vol. 49 / 別冊その 1 1983
- 102) Positron Lifetime Measurement of Plastically Deformed Iron Single Crystals
共著者 E. Kuramoto, Y. Aono, M. Takenaka
J. Phy. Soc. Jpn. Vol. 52, No. 4 1983
- 103) シミュレーション照射の基礎過程 (JPCA を含む)
共著者 蔵元英一, 明石義人
核融合研究 Vol. 49 / 別冊その 5 1983
- 104) 密度勾配を伴う剪断流の理論
乱流シンポジウム報告集 1984
- 105) Nucleation of Voids and Precipitates under Cascade Damage
J. Nucl. Mater., Vol. 122-126 1984

- 106) Evolution of Damage Structures under 14 NeV neutron, 4MeV Ni Ion and 1.25MeV Electron Irradiation
共著者 N. Yoshida, E. Kuramoto
J. Nucl. Mater., Vol. 122-123 1984
- 107) Vacancy Migration and Swelling in Stainless Steels
共著者 E. Kuramoto, N. Tsukuda, Y. Aono, M. Takenaka and H. Yoshida
Ann. Rep. Kyoto Univ. Res. React., Vol. 17 1984
- 108) タンデム加速器による金属および合金の高エネルギー重イオン照射
共著者 佃 昇, 蔵元英一, 吉田直亮, 青野泰久, 明石義人, 竹中 稔, 御手洗志郎, 磯矢 彰
九州大学応用力学研究所所報 第60号 1984
- 109) 低温照射したオーステナイト系ステンレス鋼の電気抵抗の回復
共著者 安部博信, 高村三郎, 吉田直亮
九州大学応用力学研究所所報 第60号 1984
- 110) Orientation Dependence of Slip in Niobium Single Crystals At 4.2 and 77 K
共著者 Y. Aono, E. Kuramoto
Scripta Met. 1984
- 111) Statistical Theory of Microstructural Evolution under Cascade Damage
J. Nucl. Mater., Vol. 133-134 1985
- 112) The Effects of Helium on the Evolution of Voids under Cascade Damage
共著者 Y. Akashi, E. Kuramoto
J. Nucl. Mater., Vol. 133-134 1985
- 113) Application of High Energy Tandem Accelerator to the Study of Radiation Damage Effects on the Stainless Steels
共著者 N. Tsukuda, E. Kuramoto, Y. Aono, N. Yoshida, H. Abe, Y. Akashi, M. Takenaka, S. Mitarai, A. Isoya
J. Nucl. Mater., Vol. 133-134 1985
- 114) The Effect of Recoil Energy Spectrum on Cascade Structures and Defect Production Efficiencies
共著者 T. Muroga, S. Ishino
J. Nucl. Mater., Vol. 133-134 1985
- 115) Effect of Cascade Damage by 14MeV Neutrons on Microstructure Evolution
共著者 N. Yoshida, Y. Akashi, M. Kiritani
J. Nucl. Mater., Vol. 133-134 1985
- 116) Propagation of Cleavage Crack in Iron and LiF Single Crystals
Intern. Conf. Fundamentals of Fracture 1985
- 117) Propagation of Hydrogen Induced Fracture in Iron Single Crystals
Intern. Conf. Fundamentals of Fracture 1985

- | | | | |
|------|--|--|--------------|
| 118) | Interaction between Radiation-Induced Defects and Screw Dislocations Moving in BCC Lattice Dislocation in Solids
共著者 Y. Aono, E. Kuramoto, H. Abe | Proc. Yamada Conf.
Dislocations in Solids | 1985 |
| 119) | Modeling of Precipitation under Cascade Damage | J. Nucl. Mater. | 1986
(予定) |
| 120) | Damage Correlation of High Energy Ion and D-T Neutron Irradiations in Copper
共著者 T. Muroga, M. Eguchi,
N. Tsukuda, N. Yoshida | J. Nucl. Mater. | 1986
(予定) |
| 121) | EDS Investigation of Solute-precipitate Interactions in Ferritic Steels under Irradiation
共著者 T. Muroga and N. Yoshida | Ultramicroscopy | 1986
(予定) |
| 122) | Computer Simulation of Precipitate Recoil Resolution by Energetic Collision Cascades
共著者 T. Muroga, S. Ishino | Proc. 13th Int. Symp.
'Effects of radiation on
Materials' (Seattle, 1986)
ASTM STP. 955 | 1986
(予定) |
| 123) | Precipitate Resolution and Surface Segregation in Electron Irradiated Ni-Si Alloys
共著者 H. Watanabe, T. Muroga,
N. Yoshida | XIth Int.
Cong. Electron
Microscopy
(Kyoto, 1986) | 1986 |