固体の中の原子の動き—メカニカル・スペクトロスコピーと拡散—*

小 岩 昌 宏**

1. は じ め に

このたび日本金属学会賞を受賞し、皆様にお話しする機会を与えられたことを光榮に思う。40年余りの研究生活を振り返って、これまでに行った研究のうちメカニカル・スペクトロスコピー(内部摩擦)と拡散について述べる。前者については、この分野の研究が始まった時期からの研究動向・歴史的発展を概観したのち、私自身の研究に触れる。拡散に関しては私自身が関わった研究について述べることにする。

2. 内 部 摩 擦

(1) 内部摩擦研究の先駆者 C. Zener

振動している物体において、振動のエネルギーが物体内部で熱エネルギーとなって消散し、振動が次第に減衰する現象は内部摩擦と呼ばれている。固体における内部構造や原子の動きを知るために内部摩擦を利用しようという研究の基礎を築いたのは Clarence Zener である。彼は内部摩擦の研究に入った動機を次のように語っている⁽¹⁾。

「私の人生においてもっとも大きな影響を受けた2人の人物は Oppenheimer と Bridgman である。以前 Oppenheimer と丸一日を共に過ごしたことがあるが、彼ほどの才能に恵まれた人々が活躍している研究分野で競合するのは容易ならざることであると痛感した。私自身は物理の基本法則を発展させることよりも、すでに知られている物理法則によって不可解な諸現象を説明することに努力を傾注しようと思った。この目的に向けて、私は英、独、米の近刊の物理の諸雑誌を読み漁り不可解な現象を捜し求めたのである。一方、Bridgman はハーバードにおける講義を通じて熱力学がいかに魅力に満ちたものであるかを熱っぽく語ってくれた。……

ベル電話会社の研究者による論文が興味を引いた。彼らは多くの金属の内部摩擦を測定した結果を示していたが結果に関する解釈はまったく与えていなかった。振動のエネルギーが熱に変換される機構は神秘のベールに包まれていたのである。熱力学への関心が土台となってある考えがひらめき、私を暗中模索から救い出してくれた。……

戦争(第二次世界大戦)が終末に近づきつつあった頃、Cyril Smith はシカゴ大学に来て一緒に仕事をするように誘ってくれた。彼はそこで金属研究所を創設しつつあった。そこは私の計画を進めるのに絶好の場所だった。我々は多くの卓越した若いポスドクを集めることができた。MIT から来た T. S. Kê は、擬弾性効果を測る振り子装置を開発し多くの新しい現象の研究にこれを用いた。粒界の粘性挙動の研究は特筆に値しよう。中国に帰ったのち、彼はシカゴでの優れた研究をさらに大きく発展させた。」

1948年に発行された彼の著書『Elasticity and Anelasticity of Metals』⁽³⁰⁾はこの分野の研究者の必読書である。

(2) Kê 振り子と結晶粒界ピーク⁽²⁾

Ting Sui Kê(葛庭燧)は1941年に米国に渡り、カリフォルニア大学で PhD を得たのち、MIT でマンハッタン計画(原爆製造)に従事した。戦後の科学研究体制の再編成の時期に Zener にスカウトされてシカゴ大学金属研究所に移った。Zener が与えたテーマは「金属のすべり帯と粒界の力学的性質の内部摩擦測定による研究」であった。

結晶粒界の内部摩擦測定はすでに Zener が手をつけており、たとえば亜鉛についてはたわみ振動により100℃付近まで測定し、温度とともに内部摩擦が上昇することを見出していた。「測定振動数を低くすれば緩和現象は低温側に移るからピークを観測することができるはず。どうすれば振動数を下げて内部摩擦を算することができるだろうか?」と考え続け

* 2006年3月21日、早稲田大学大久保キャンパスにおける第138回本会春期大会において講演

** 京都大学名誉教授 [redacted]
Atom Movements in Solids—Mechanical Spectroscopy and Diffusion; Masahiro Koiwa*(*Emeritus Professor, Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Keywords: mechanical spectroscopy, internal friction, elasticity, anelasticity, Snoek effect, Bordoni peak, diffusion, correlation factor, intermetallic compounds, random walks

2005年12月9日受理

ていた Kê の脳裡にひらめいたのは学生時代に物理実験でやった剛性率測定—振り振子と光学挺子の配置であった。記念すべき第一論文⁽³¹⁾は1947年に発表された。この装置を用いて、結晶粒界の緩和現象のほかタンタル中の炭素、窒素のスネーク効果に関する先駆的な測定も行った。

(3) 転位の緩和をはじめて観測した Bordoni⁽³⁾

イタリア海・空軍の技術将校として音響水雷の研究をしていた Bordoni は、戦後ローマの音響研究所において固体の弾性の研究を行っていた。当時、固体の内部摩擦は温度の低下とともに小さくなることが知られていたが、どのくらいまで小さくなるのか、それがなぜかはわかっていなかった。非常に小さな内部摩擦を測定できる装置を開発したので、是非低温まで測定を行いたいと思っていたところ、米国 MIT の低温研究室が大量の液体ヘリウムを使う機会を与えてくれた。イタリアから運んだ装置を用いて 4.2 K から 300 K の温度範囲で測定を行い緩和型のピークを観測した⁽³²⁾。Bordoni は以下のように述べている。

「Pb, Cu, Al, Ag の縦振動の減衰は、単結晶でも多結晶でもデバイ温度の約 1/3 の温度で最大値を示す。その最大値は冷間加工により増加し、焼きなましにより低下する。このことは、結晶中の構造欠陥が移動することによる新たな緩和現象の存在を意味する。」

これがボルドニ・ピークという名で知られている緩和現象に関する最初の報告である。このピークの活性化エネルギーはパイエルス・ポテンシアルの高さに関する情報を含むものである^{(33)–(35)}。1950～1960年代は結晶塑性・転位に関する研究が盛んであった時期で、Bordoni の研究は脚光を浴び、「ボルドニ・ピーク」という呼称は格子欠陥研究者の間で市民権を得た(理化学辞典、物理学辞典にも採録されている)。なお、このピークに関する比較的新しい総説としては、Benoit⁽³⁶⁾、Seeger⁽³⁷⁾によるものがある。

(4) 日本における内部摩擦研究—橋口ピーク

塑性変形した金属の内部摩擦を温度の関数として測定すると、上述のように低温にボルドニ・ピークが現れる。それより高温側にもいくつかのピークが観測され、いずれも転位が関与した緩和現象と考えられる。これらのピークは cold-work peak と呼ばれていたが、詳しい研究を行った橋口の名を冠して Hasiguti peak と呼ばれる場合もある。筆者もこの研究の一翼を担った^{(4) (5)}。液体ヘリウムの使用がままならなかった時期にボルドニ・ピークより高温側の現象に目を向けざるを得なかったという事情もある。これらのピークは転位と点欠陥の相互作用によるものとされ、その機構の詳細をめぐっていろいろなモデルが提案された。また、ローザンヌのグループが低周波応力のもとでの超音波吸収測定という手の込んだ方法で、機構の詳細を明らかにする努力を行った⁽³⁸⁾。

(5) 体心立方金属中の侵入型原子による緩和効果—Snoek ピーク⁽⁶⁾

20世紀の初めの頃、音叉(銅製)を振動させて振動持続時間の温度依存性を調べた人がいる(図1)⁽³⁹⁾。70℃近傍で減衰が急速に起こっている。多くの研究者がその原因の解明に取り組み、やがて鉄中の侵入型元素である炭素、窒素に起因することが明らかとなった。この緩和現象の機構を解明した研究者 Snoek⁽⁴⁰⁾(オランダ・フィリップス研究所)の名前を冠して、スネーク緩和(ピーク)と呼ばれている。

(6) Snoek ピークに対する置換型合金原子の効果

1950年代になって、鉄中の窒素のスネーク・ピークは置換型合金元素を添加するとその形状が変化し、新たに別のピークが観測される場合があることが見出された⁽⁴¹⁾。図2はバナジウムを添加した場合の測定例である。これらの効果は置換型(substitutional)原子と侵入型(interstitial)原子の相互作用、すなわち s-i 相互作用と呼ばれている。s-i 相互作用

図1 音叉の振動継続時間の温度依存性。Woodruff⁽³⁹⁾による。

図2 置換型元素添加によるスネーク・ピークの変化。バナジウムを添加すると窒素ピーク(～300 K)の高さは減少し、370 K 付近に新しいピークが現れる(西澤吉彦, 京都大学修士学位论文, 2000年)。

は、鉄をはじめ各種の金属について広範な研究が行われた。置換型原子の近傍における侵入型原子の緩和現象を正しく取り扱う方法を示したのは Meijering⁽⁴²⁾である。

筆者は Meijering の考え方を発展させて s-i 相互作用のもとでのスネーク効果を扱う方法を定式化し、5編の論文を発表した⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。1990年代になって、実験機器の進歩により高精度の内部摩擦データが得られるようになったこと、高純度素材を用いて素性のはっきりした試料調整が可能になったことから、再びこの問題を取り上げた。提示した処方箋を実験データの解析に適用し、二三の合金系について置換型原子と侵入型原子の相互作用エネルギーの値を示すことができた⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。

(7) メカニカル・スペクトロスコピー

近年、内部摩擦(internal friction)という用語の代わりに、メカニカル・スペクトロスコピー(力学的分光法, mechanical spectroscopy)という用語が好んで用いられる傾向がある。「さまざまな振動数で固体を振動させたときの応答(スペクトル)を解析して、固体の内部構造に関する知見を得る」という含意である。図3は前述の Zener の著書⁽³⁰⁾の口絵である。振動数を横軸に各種の緩和現象によるエネルギー損失を示しており、Zener 自身は「メカニカル・スペクトロスコピー」という用語自体は用いなかったものの彼の意識にはすでにその概念があったといえよう。

(8) 直方体共振法による弾性率測定

単結晶弾性率は基本的な物性定数であり、当該物質の諸性質を理解する上でその正確な値を知ることが望まれる。通常は超音波の伝播速度の測定により決定される。この場合には10 mm 角程度の単結晶が必要とされるが、物質の種類によっては小さな単結晶しか得られないことも稀ではない。直方体共振法は実験的に得られた共振スペクトルの振動数から、全ての弾性定数(立方対称の結晶については3個)を一挙に決定する方法で、Demarest⁽⁴³⁾、Ohno⁽⁴⁴⁾により理論的基礎が与えられた。比較的小さい試料でも適用可能なこの方法を用いて、種々の金属間化合物単結晶について広範な温度域で

図3 緩和スペクトル。Zener の著書 *Elasticity and Anelasticity of Metals*⁽³⁰⁾ の口絵。

の弾性定数を決定することができた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

3. 拡散の諸問題—確率過程論の応用

私が学生時代を過ごした1960年前後は、転位と並んで点欠陥が金属物理の研究対象として注目を集めていた。

(1) オックスフォード大学図書館で出会った一冊の本

1969年9月から2年間、オックスフォード大学で研究する機会を得た。この大学の自然科学系図書館(The Radcliffe Science Library)には膨大な蔵書があり、文献調査によく利用した。その際、たまたま書架で“*Stochastic Approach to Chemical Kinetics*”⁽⁴⁵⁾という表題の小冊子(68ページ)を見かけた。化学反応速度過程を確率過程として捉えようとするアプローチは、私にとって新鮮で強くひきつけられた。なかでも Montroll による「単分子分解反応のランダムウォーク・モデル」は示唆に富むもので、確率過程論における mean first passage time(平均初回通過時間)という量(さまざまな素過程を経て起こる現象を総合的に捉えたとき、その平均速度の逆数)の計算方法が述べてあった。1970年代の初期に書いた以下の3つの論文は、この方法を適用して行った研究の報文である。

「拡散粒子の消滅に対するトラッピングの効果」⁽¹⁷⁾

「点欠陥挙動の化学反応論的取り扱いの有効性」⁽¹⁸⁾

「体心立方格子における侵入型不純物原子の拡散におけるトラッピング効果」⁽¹⁹⁾

(2) 拡散の相関係数の計算

Montroll は解析的方法によって各種格子のランダム・ウォーク特性を論じていた。その手法を適用して、まだ解析がなされていなかったダイヤモンド格子、最密六方格子はか二三の格子について計算を行った。空孔機構における拡散の相関因子(correlation factor)の算出にはこの計算方法が有効であり、石岡との共著でいくつか論文を書いた。Montroll が主宰者の一人として企画した「生物学と物理学におけるランダム・ウォーク理論」のシンポジウム(1983年、アメリカ NIH で開催)に招かれた。このときの発表論文⁽²⁰⁾および1985年にカナダで開催されたセミナー「溶質と欠陥の相互作用理論と実験」の会議録に収録された論文⁽²¹⁾は、私のこの方面の研究のレビューである。

希薄固溶体の溶質原子の拡散においては相関係数の評価が理論的課題のひとつであり、筆者らはいわゆる“five jump-frequency model”における厳密解を与えた⁽²²⁾。また、溶質原子添加による自己拡散の促進効果(solute-enhanced self-diffusion)についても、Howard と Manning による取り扱い⁽⁴⁶⁾における近似の有効性を検討し、より厳密な評価を行った⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

(3) 金属間化合物における拡散

規則合金・金属間化合物においても、自己拡散は原子空孔

の移動により起こる。しかし、空孔は原子配列の規則性を維持しつつ移動しているはずである。そのような空孔の動き方として、“6-jump vacancy cycle” と呼ばれる機構が提案された⁽⁴⁷⁾。上述の「平均初回通過時間」の概念を適用して、この機構による拡散係数の解析的表式を導いた⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。Acta Metallurgica に投稿した論文⁽²⁶⁾は、適当な査読者がなかなか見つからないとのことで印刷されるまでにかなりの時間を要した。最終的に査読を引き受けてくれた人からのコメントは暖かく心に残るものであった。その冒頭部分をここに記しておく。

This manuscript provides a clear step forward in the analysis of diffusion in ordered alloys. It is clearly written, as is almost all of the work associated with Professor Koiwa, and is very worthy of publication. Since there is increasing interest in intermetallic compounds, this paper has application to significant practical materials also.

金属間化合物の拡散機構を考察するためには、2 種類の(2 元化合物の場合)構成元素の拡散係数の正確な測定結果が不可欠である。工業的にも重要な Ni_3Al のような L1_2 型構造の金属間化合物については、そのようなデータは皆無であった。Ni および Ge には拡散測定に好都合な放射性元素があることに着目して Ni_3Ge について測定を行った⁽²⁷⁾。また、 Ni_3Al における自己拡散、相互拡散データも含めて考察し、 L1_2 型化合物の拡散機構を提案した⁽²⁸⁾。

4. 心に残る言葉、格言など

最後に研究者として歩む過程で受けた激励の言葉、印象に残る格言のいくつかを記して稿を終わることにする。

(1) 拡散の国際会議 DIMETA-88(1988年9月、ハンガリーのパラトン湖畔)では、“Diffusion Kinetics and Isotope Effect in Ordered Alloys” という題で招待講演を行った⁽²⁹⁾。講演終了後に座席に戻ると、近くに座っておられた高村仁一先生がそとと紙切れを渡してくださった。

「すばらしい講演でした。内容の歯切れも、OHP も迫力十分でした。本日の白眉です。高村」

とあった。大学院学生の頃から、講演発表や論文査読の機会などに頂いた数々の激励、京都大学への転出を忍耐強く勧誘して下さったことなどとともに、忘れられない思い出である。

(2) 「おばあちゃんにうまく説明できないようなら、君はまだ十分理解しているとはいえないね。」(You do not really understand something unless you can explain it to your grandmother.-Albert Einstein)

昔 “Grandmam’s language” という表現でこのことを読んだか聞いたことがある。出所はアインシュタインであることを知ったのは最近のことである。でも彼は相対性理論をおばあちゃんにわかるように説明できたであろうか？ それはともかく、専門家は素人にも自分の研究の目的と意義を理解してもらえるよう努力をするべきである。

(3) 「科学研究における論争においては、敗者こそが真の

勝者である。なぜなら、彼こそが多くを学んだからである。」(In the discussions arising while cooperating in scientific research (= *philologo suzethesei*) the winner is the one who lost because of what he has learnt.)

1997年9月、イタリアのアンコーナで “The Challenge of Magnesium Alloys” と題する日本-イタリア セミナーが開催された。このとき、イタリア側の企画責任者 G. Caglioti (ミラノ工科大学)の挨拶にあった言葉で、ギリシャの格言だそうである。学会講演の際の質疑が感情的な言い争いになることもある。「論争は真理を明らかにするためである」ことの確認を迫る格言である。

(4) ニュートンは、万有引力の発見という自身の偉業について意見を求められたときに、謙遜(けんそん)と先人へ心からの感謝の意を込めて答えたという。「もし私が他の人よりも遠くを見ているとしたら、それは巨人の肩の上に立っているからだ。」(If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants.)

5. お わ り に

1937年の創立以来、日本の金属学の歴史を刻んできた学会から賞を受けることは身に余る荣誉である。大学院学生としてまた研究者として研究の場を与えていただいた東京大学工学部冶金学科、東北大学金属材料研究所、京都大学工学部金属加工学科(現 工学研究科材料工学専攻)、これらの場での活動に際してご指導ご鞭撻をいただいた多くの先輩・友人、研究の喜びと苦しみをともした学生諸君に深く感謝する。とくに研究者への道へ導いて下さった橋口隆吉先生(東京大学名誉教授、故人)、東北大金研で研究する機会を与えていただいた平林 真先生(東北大学名誉教授)に改めてお礼を申し上げたい。

著 者 文 献

- (1) 小岩昌宏: “Zener の回想-熱力学を基礎として”, 日本金属学会会報, **24**(1985), 1015-1021.
- (2) 小岩昌宏: “中国科学院固体物理研究所を訪ねて 聞き書き-内部摩擦研究事始め”, 日本金属学会会報, **23**(1984), 291-296.
- (3) 小岩昌宏: “イタリア音響研究所を訪ねて-Bordoni 教授に聞く”, 日本金属学会会報, **25**(1985), 211-215.
- (4) M. Koiwa and R.R. Hasiguti: Acta Metall., **11**(1963), 1215-1222.
- (5) M. Koiwa and R.R. Hasiguti: Acta Metall., **13**(1965), 1219-1230.
- (6) 小岩昌宏: “スネークの業績-金属の内部摩擦とフェライト材料開発と”, 金属学プロムナード-セレンディビティを追って(アグネ技術センター, 2004), 1-7.
- (7) M. Koiwa: Phil. Mag., **24**(1971), 81-106.
- (8) M. Koiwa: Phil. Mag., **24**(1971), 107-122.
- (9) M. Koiwa: Phil. Mag., **24**(1971), 539-554.
- (10) M. Koiwa: Phil. Mag., **24**(1971), 799-814.
- (11) M. Koiwa: Phil. Mag., **25**(1972), 701-714.
- (12) H. Numakura, M. Miura, H. Matsumoto and M. Koiwa: ISIJ International, **36**(1996), 290-299.
- (13) H. Numakura and M. Koiwa: J. Phys. (Paris) IV, **6**, Colloque, **C8**(1996), 97-106.

- (14) H. Numakura and M. Koiwa: *M3D III Mechanics and Mechanism of Material Damping*, (ASTM Standard Technical Publication 1304) ed. by A. Wolfenden and V. K. Kinra, (American Society for Testing and Materials, 1998), 383–393.
- (15) H. Yasuda, T. Takasugi and M. Koiwa: *Acta Metall. Mater.*, **40**(1992), 381–387.
- (16) K. Tanaka and M. Koiwa: *Intermetallics*, **4**(1996), S29–S39.
- (17) M. Koiwa: *Phil. Mag.*, **26**(1972), 173–192.
- (18) M. Koiwa: *Crystal Lattice Defects*, **4**(1973), 65–74.
- (19) M. Koiwa: *Acta Metall.*, **22**(1974), 1259–1268.
- (20) M. Koiwa and S. Ishioka: *J. Statistical Phys.*, **30**(1983), 477–485.
- (21) M. Koiwa and S. Ishioka: *Solute–Defect Interaction—Theory and Experiment*, ed. by S. Saimoto, G. R. Purdy and G. V. Kidson, (Pergamon Press, 1986), 232–240.
- (22) M. Koiwa and S. Ishioka: *Phil. Mag.*, **47**(1983), 927–938.
- (23) S. Ishioka, M. Koiwa and H. Nakajima: *Phil. Mag.*, **48**(1983), 341–358.
- (24) S. Ishioka and M. Koiwa: *Phil. Mag.*, **50**(1984), 505–530.
- (25) M. Arita, M. Koiwa and S. Ishioka: *Trans. JIM*, **29**(1988), 439–447.
- (26) M. Arita, M. Koiwa and S. Ishioka: *Acta Metall.*, **37**(1989), 1363–1374.
- (27) H. Yasuda, H. Nakajima and M. Koiwa: *Defect and Diffusion Forum*, **95–98**(1993), 823–830.
- (28) H. Numakura, T. Ikeda, M. Koiwa and A. Almazouzi: *Phil. Mag.*, **A77**(1998), 887–909.
- (29) M. Koiwa, M. Arita and S. Ishioka: *Defect and Diffusion Forum*, **66–69**(1989), 65–84.

文 献

- (30) C. Zener: *Elasticity and Anelasticity of Metals*, (The University of Chicago Press, Chicago, 1948).
- (31) T. S. Kê: *Phys. Rev.*, **71**(1947), 533–546.
- (32) P. G. Bordoni: *J. Acoust. Soc. Amer.*, **26**(1954), 495–502.
- (33) W. P. Mason: *J. Acoust. Soc. Amer.*, **27**(1955), 643–653.
- (34) A. Seeger: *Phil. Mag.*, **1**(1956), 651–662.
- (35) A. Seeger, H. Donth and F. Pfaff: *Discuss. Faraday Soc.*, **23**(1957), 19–30.
- (36) W. Benoit: *Mechanical Spectroscopy Q^{-1} 2001 with Applications to Materials Science*, (R. Schaller, G. Fantozzi and G. Gremaud, eds) *Trans. Tech. Publications, Zurich*, 2001, 158–177.
- (37) A. Seeger: *Materials Science and Engineering*, **A370**(2004), 50–66.
- (38) G. Gremaud: *Mechanical Spectroscopy Q^{-1} 2001 with Applications to Materials Science*, (R. Schaller, G. Fantozzi and G. Gremaud, eds) *Trans. Tech. Publications, Zurich*, 2001, 178–246.
- (39) E. C. Woodruff: *Phys. Rev.*, **16**(1903), 325–355.
- (40) J. Snoek: *Physica*, **8**(1941), 711–733.
- (41) L. J. Dijkstra and R. J. Sladek: *Trans. Metall. Soc. A.I.M.E.*, **197**(1953), 69–72.
- (42) J. L. Meijering: *Mét. Corros. Ind.*, **37**(1961), 107–111.
- (43) H. H. Demarest Jr: *J. Acoust. Soc. Am.*, **49**(1971), 768–775.
- (44) I. Ohno: *J. Phys. Earth*, **24**(1976), 355–379.
- (45) D. A. McQuarrie: *Stochastic Approach to Chemical Kinetics*, Methuen's Review Series in Applied Probability, Volume 8, 1967.
- (46) R. E. Howard and J. R. Manning: *Phys. Rev.*, **154**(1967), 561–568.
- (47) E. W. Elcock and C. W. McCombie: *Phys. Rev.*, **109**(1958), 605–606.

附記 (以下は、2006年3月21日に行った講演後に執筆したものである。)

第2次大戦後にシカゴ大学に設置された“The Institute

for the Study of Metals”において、C. ZenerはT. S. Kê, C. Wert, A. S. Nowickらとともに内部摩擦研究の基礎を築いた。この研究所の創立時から15年間の状況を記した報告^[1]がある。この研究所の創設およびその7年後の学術誌“Acta Metallurgica”の創刊は、ともに「新たな金属科学」の育成をめざしてCyril Smithが主要な貢献をなした事業であり、“コインの両面をなすもの”と表現されている^[2]。Acta Metallurgicaの創刊とその後の50年間の発展・変遷についてはCahnによる論評が同誌に掲載されている^[3]。その内容紹介をかねて日本の研究者の同誌とのかかわりを含めて筆者が記した一文がある^[4]。

結晶粒界ピークに関しては多数のreviewがあるが、比較的新しいものとしてPovoloとMolinas^[5], Kê^[6]の二つをあげておく。なお、邦文では岩崎による解説^{[7][8]}がある。

Bordoniピークに関する最初の文献として(32)をあげたが、これに先立ってイタリア語で発表された論文^[9]を引用するケースが多い。イタリア語の論文は理論的考察を主とした内容で、実験データは(32)の方が多く掲載されている。Bordoniピークに関しては、高純度アルミニウムを用いた小杉ら^{[10][11]}, 体心立方金属に関する水林^[12]など日本研究者の貢献も大きい。点欠陥と転位の相互作用に関するローザンヌ・グループの仕事に関して文献⁽³⁸⁾をあげたが、さらに[13]–[17]を追加しておく。

岩波書店発行の月刊誌「科学」がその創刊以来50巻を記念して刊行した『論文にみる日本の科学50年』は、1931年からの半世紀に発表された基礎科学分野の論文300篇を選び、その各々について論文の生まれたときの研究の状況、論文が明らかにした内容、研究の及ぼした影響をそれぞれ専門の研究者が執筆している。その一つとして橋口ピークに関する論文^[18]が選ばれ、筆者が執筆を担当した。日本における格子欠陥研究が国際的レベルにあることの証左といえてよいであろう。なお、橋口自身がその研究に関して自ら語ったものとして、東京理科大学におけるセミナー記録^[19]があることを付け加えておく。

置換型合金元素を含む場合のスネーク効果の解析に関する論文として[20]を追加しておく。“メカニカル・スペクトロスコピー”という名前にふさわしく、強制駆動法により振動数の関数として測定したデータの解析結果が述べられている。

1950年10月にアメリカ金属学会が開催した拡散に関するセミナーの記録が“Atom Movements”という表題のモノグラフ^[21]として刊行されている。研究者としての駆け出しの時期、それに掲載されている論文を夢中で読んだことを回想しつつ、本稿のタイトルをこの書名の邦訳ともいえるべき「固体の中の原子の動き」とした。

なお、予稿提出後にリハーサルをしてみると「第3節 拡散の諸問題—確率過程論の応用」の部分は予定の時間内に収めることが難しいことが判明した。この部分は第43回本多記念講演(1998年)^[22]の内容と重複する部分も少なくないので、今回の講演では割愛したことをお断りしておきたい(2006年3月24日)。

文献

- 9364.
- [16] Ø. Bremnes, B. Carreño-Morelli and G. Gremaud: J. Alloys and Compounds, **310**(2000), 62–67.
- [17] G. Gremaud: Materials Sci. and Eng., **A370**(2004), 191–198.
- [18] S. Okuda and R. R. Hasiguti: Acta Metall., **11**(1963), 257–265.
- [19] 橋口隆吉：科学と私，東京理科大学特別教室第2回セミナー実行委員会，(1979)，9–25.
- [20] X. S. Guan, Y. Nishizawa, K. Okamura, H. Numakura and M. Koiwa: Mat. Sci. and Eng., **A370**(2004), 73–77.
- [21] *Atom Movements*, Chicago October 21–27, 1950, Seminar during 32nd National Metal Congress & Exposition American Society for Metals, 1951.
- [22] 小岩昌宏：まてりあ，**37**(1998)，347–355.