



## アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-31

### 結晶塑性の研究を省みて

Looking Back on a Study of Crystal Plasticity

東田賢二 (独) 国立高等専門学校機構 理事  
佐世保工業高等専門学校 校長  
Kenji Higashida 九州大学 名誉教授



### 1 結晶塑性の研究を省みて

2016年3月まで九州大学で材料工学に関する教育・研究に携わっておりましたが、同年4月より佐世保高専に移り、大学とは異なる環境と役割の中で仕事をしております。そのようななかで、編集部より若手研究者・技術者へのメッセージ執筆依頼を頂きました。自身の狭く限られた経験のなかで取り立てて申し上げることはないのですが、タイトルのようなことで雑文を書かせて頂くこと、お許し頂ければと思います。

まず最初に「研究」という言葉に惹かれ、その道に入っていくかと思うようになった契機は、やはり大学4年生での研究室配属であったかと思えます。当時(1974年)、所属した京都大学工学部金属系学科には冶金学科と金属加工学科の2学科が有りましたが、それらはひとつの学科として運営されていました。志望した研究室は高村仁一先生が担当されていた金属加工学科の結晶塑性学講座でした。当時、高村先生(図1)を筆頭に、古川弘三助教授、中村藤伸助手、成田舒孝助手、



図1 高村仁一先生(1975年)

岸洋子技官の布陣で研究室が運営されていました。高村先生のご講義は三年生のときに「金属物理学」で初めて受けたのですが、それはまさに名講義で、この講義を通して高村先生のもとで勉強をしてみたいと強く思うようになりました。研究室に配属された当時、研究室は点欠陥のグループと塑性グループに大きく分かれ研究が行われていましたが、私は塑性グループの変形双晶の研究に携わることになりました。これが結晶塑性研究に導いて頂いた第一歩と言えるものでした。高村研では、三浦精先生そして上記の成田先生がFCC系合金結晶の変形双晶の研究を先駆的に進められていましたが<sup>1)</sup>、その流れを汲む研究でした。

そこではまずCu-8at.% Ge合金単結晶を毎日のように作り引張試験をすることが仕事でした。一般に1価のFCC金属に多価の合金元素を添加すると、{111}面の積層欠陥エネルギー $\gamma_{SF}$ は減少しますが、この合金結晶での $\gamma_{SF}$ は極端に低くなり(数 $mJ/m^2$ )、その結果、双晶の核発生が容易となるため、塑性変形の初期から薄く微細なラメラ状の双晶が多数出現します。外部負荷の増加でこの双晶は成長しますが、母相のなかで埋め込まれ安定化されていない微細な双晶領域は、除荷すると母相の方位に戻ってしまいます。このため大きな擬弾性挙動が現れることもこの合金結晶の特徴でした。双晶の研究は、後に成田研究室でもBCC系のFe-Si合金結晶を用いて行われました<sup>2)</sup>。そしてそれらの成果はFR.N.Nabarroの編んだDislocations in Solids第9巻<sup>3)</sup>に刊行されています。その後、変形双晶の研究は1年先輩の梅本利明氏(現梅本商社社長)が博士課程でのテーマとされ、自分の研究テーマはFCC結晶におけるすべり変形と加工硬化に移りました。余談ですが、私が京大に在籍した1970-80年代、大阪大学吹田キャンパスの岡田メモリアルホールで、物理冶金談話会という研究会が定期的に行われていました。結晶塑性や照射損傷など格子欠陥を基盤した研究では高村仁一、桐谷道夫、藤田英一、藤田廣志、井村徹、辛島誠一、北島貞吉らの先生方が喧々囂々の議論を展開されていたことが思い出されます。

さて「すべり変形と加工硬化」は結晶転位論誕生以来の材料科学上のテーマです。1934年に転位を提唱した一人 G.I.Taylor の論文<sup>4)</sup>では正負の刃状転位のモデルが完全な形で表現され、さらに転位間の相互作用によって加工硬化の起こるモデルが提唱されています。その後、1956年、P.B.Hirsch らが TEM で Al 薄膜中の転位を直接観察すること<sup>5)</sup>、転位論をベースとした結晶塑性の研究が加工組織の観察と共に大きく進み始めます。ただし、それ以前に、転位に関する主要な理論は確立し、さらにその材料科学への理論的応用も十分に進んでいたように思われます。2006年、Hirsch らの著した“50 Years of TEM of dislocations : Past, present and future”<sup>6)</sup>で、見逃してはならない大切な著作として A.H.Cottrell の“Dislocations and Plastic Flow in Crystals”<sup>7)</sup>と W.T.Read の“Dislocations in Crystals”<sup>8)</sup>とが挙げられています。前者の Cottrell の著述の p.151、Work-hardening のセクションを覗いてみますと、まず Introduction で非常に印象的な表現がなされています。ご一読をお勧めします。そこで Cottrell は、加工硬化の問題を解明するために何が必要か、明快に問題を整理しています。彼は加工硬化を解明するためには次の3つのステップ(問題点)があると指摘します：(1) 冷間加工された結晶中の(転位)モデルの選択、(2) その構造の中ですべりを引き起こすのに必要な応力の計算、(3) その構造を作るのに必要な塑性歪みの計算。この指摘の背景には、応力-歪み曲線の縦軸(塑性変形抵抗)と横軸(塑性歪み)の問題は独立であるという強い意識が感じられます。すなわち、横軸の塑性歪みを稼ぐ転位の多くは、結晶中を運動したのち多くは結晶の内外で消滅しているのに対して、縦軸の応力は、それとは全く逆に結晶中に残存し蓄積された転位によって担われているということを忘れてはならないということです。

1950年代、60年代を中心に単結晶の加工硬化研究が世界的に非常に活発に展開されましたが<sup>9,10)</sup>、そこに一つの大きな問題が有りました。上記(1)、つまり硬化を担う本質となる転位モデルの選択、そして(2)の想定された転位モデルのなかで新たに転位を動かすのに必要な応力の計算、については、数多くの議論がなされたのですが、(3)の転位蓄積・構造形成の問題の研究が殆どなされなかったのです。加工硬化は最も基本的な材料の強化機構であり、まずは強度増加がどのような転位間相互作用によって担われているかについて議論が集中することは自然なことのように思われます。しかし、その一方で、(1)(2)の問題に比べ、(3)の転位蓄積の問題が非常に難解であり、それをどのようにして解いたらよいのか、当時の世界の材料科学の名だたる研究者達も手を拱いたのではないかと思います。

このような状況の中で高村研でのアプローチは単一すべ

り方位の FCC 単結晶で見られる Stage I, II, III の3段階硬化(図2参照)の Stage I から II への遷移機構を明らかにしようというものでした<sup>11)</sup>。Stage I は容易すべり領域と呼ばれ、殆ど加工硬化しない領域です(加工硬化率  $10^{-3}G$  以下、 $G$ : 剛性率)。それに対して Stage II は、3つのステージのなかで最も硬化率が高く( $G/300$ 程度)、まさに加工硬化を主体的に担う硬化段階と言えます。Stage III は動的回復が起こり、その硬化率は徐々に下がって行く段階です。以上 Stage I, II, III の硬化段階の中で、加工硬化の最も激しい Stage II が開始する時、一体何が新たに起きているのか? それを見定めることが出来れば、加工硬化の本質を担う転位構造を特定出来るはずです。そしてこれは、それまで殆ど手付かずであった前述の(3)の転位組織形成の問題への実験的アプローチに対応するものでした。

ところで Stage II の急激な加工硬化において欠かすことの出来ない1つの大切な要点は2次すべり系の活動です<sup>11)</sup>。よく知られるように、単一すべり方位の単結晶も、引張変形していくと結晶回転が起こり、やがて2つのすべり系の応力因子が等しくなり、それらが同時に活動する2重すべりが起こるようになります。そうすればお互いに異なったすべり面の転位同士が切り合いを起こすため、大きな加工硬化が起こることは理解できます。しかし、ここで注意せねばならないことは、単一すべり方位の単結晶における Stage II の大きな加工硬化の開始は、そのような2重すべりが発生する遙か以前に起こっていることです<sup>9)</sup>。すなわち、2次すべり系の応力因子が主すべり系のそれに比べてまだ十分に小さいにも拘らず、2次すべり系は誘起され Stage II は始まっているのです。そこで、単一すべり方位の単結晶の Stage II の大きな加工硬化の開始の主因を解明するためには、単一の主すべり系の活動が支配的に起こっている段階で、何故、応力因子の小さい2次すべり系が誘起されねばならないのかを明らかにする必要があります。そしてその答えが、変形帯

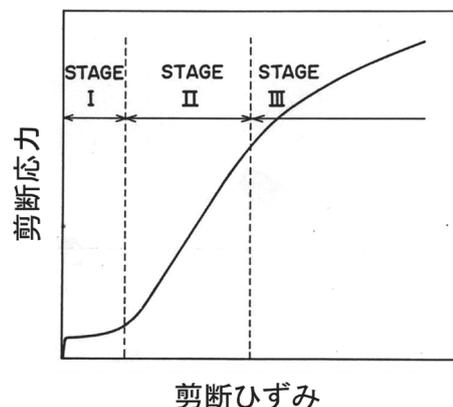


図2 FCC単結晶の応力-歪み曲線の模式図

(Deformation Bands) と呼ばれる、ある種の結晶亜粒界 (転位壁) の形成による結晶の細分化にあるというのが私共の至った結論です。すなわち、単結晶の中で転位壁形成による一種の多結晶化が起こり、転位壁により区分された結晶間の変位の連続性を保つため2次すべり系が誘起されるに至ると考えました。これらの結果は、1980年代にいくつかの論文に纏めましたが<sup>11-14)</sup>、思い出深いのは、1986年夏にDoris-Kuhlmann Wilsdorf, Heinz Wilsdorf夫妻がバージニア大学で開催したLow Energy Dislocation Structures (LEDS) という転位構造の会議で発表させて頂いたことでした<sup>12)</sup>。ここでは、F.R.N.Nabarroを始め当時の結晶塑性の研究を世界的に牽引する研究者が一堂に会していました。またこの会議に先立ち立ち寄らせて頂いたノースウエスタン大学で、丁度そのとき村外志夫先生の研究室にご滞在中であった森勉先生に初めてお会いできたことも大切な機会となりました。変形帯の研究については、その後2009年京都で開催された第2回のInternational Symposium on Steel Science (ISSS-2) で大橋鉄也先生の結晶塑性FEMの成果と合わせて発表しました<sup>15)</sup>。この会議の第1回目は津崎兼彰、古原忠の両先生が議長となり、日本の鉄鋼業界や大学、研究所の気鋭の研究者が集まって立ち上げられました。現在も産学の若手鉄鋼研究者に受け継がれ、第6回目が2020年の11月に予定されています。ISSS-2では私と共に議長を務められた辻伸泰先生のご尽力で、先に述べたLEDSにも参加し、その後、International Conference on Strength of Materials (ICSMA) を主導したH.Mughrabiが参加してくれたことは嬉しいことでした。

さて日本鉄鋼協会の研究会も自身の結晶塑性に関する研究を展開する上で重要な場となりました。1995年の鉄鋼協会・金属学会九州支部での講演大会で瀬沼武秀先生 (当時新日鉄) が変形帯に関する質問をされたのがきっかけとなり、「再結晶・集合組織とその組織制御への応用」という研究会 (主査: 酒井拓先生) に入れて頂きました。1996年にイリノイ大学のアーバナ・シャンペーン校のH.K.BirnbaumそしてI.M.Robertsonのところへ半年間滞在したため、少し間は空きましたが、1999年3月の研究会終了まで、鉄鋼材料の素人である自分にとって大切な勉強の場となりました。そこではオーステナイト系ステンレス鋼の圧延加工組織を研究する中で、微細な変形双晶主体の組織から剪断帯 (Shear Bands) と呼ばれる加工組織が形成されていく過程が大きな特徴として浮かび上がってきました<sup>16)</sup>。この過程では、まず先に述べた低積層欠陥エネルギーFCC材料特有の数10nm厚さの微細な双晶ラメラ構造が形成された後に、そのラメラ構造を完全に壊すように剪断帯が各所で交差するように発生します。その結果として微細粒構造が形成されますが、その微細粒の方位分布には元々存在した双晶ラメラの方位を受け継いで

いる痕跡が見出されました。これらの結果は、加工中の回復・再結晶、さらには超強加工による超微細粒組織形成の問題とも関連して興味深いことです。

その後、2007年から4年間、「加工硬化特性と組織」研究会の主査をさせて頂ける機会を頂いたことも本当に有難いことでした。この研究会は高木節雄先生が主査をされた「降伏強度と組織」研究会を受けて発足したものでした。そこでは先に述べた加工硬化の基礎から固溶元素の影響、加工方法の影響、析出物の影響、複合組織鋼の硬化挙動などが主題目として取り上げられました<sup>17)</sup>。この期間は先に述べたISSS-2開催の時期とも重なっており、合わせて九大の鉄鋼リサーチセンターを通しての共同研究で鉄鋼各社の優秀な技術研究者と交流させて頂けたことは本当に幸運でした。個々のお名前を挙げることは敢えて致しませんが、お世話になった皆様方に深い感謝の念を禁じえません。

結晶塑性の研究を振り返る時、1990年代に入って機械工学を母体とする計算力学の分野の研究者が、活発に結晶塑性の研究を展開され始めたことも印象的でした。前述の大橋先生は1980年代から結晶塑性FEMと Geometrically Necessary Dislocations (GN転位) の考えをもって材料系の分野に入ってきたことは先駆的なことでした<sup>18)</sup>。渋谷陽二先生ら北川浩先生のご門下の先生方を初めとして多くの計算力学の先生方の議論の中に少しでも入れて頂いたことは幸いでした。

以上、結晶塑性について述べてきましたが、材料破壊の研究についても少し触れさせて頂きます。破壊の研究は結晶塑性のそれとは異なった分野と思われがちですが、両者の間には深い関係があります。そもそも、結晶の理想劈開強度と現実の破壊強度との間の桁違いの相違から亀裂先端の特異性が認識されたことと、理想剪断強度と現実のすべり変形抵抗との間の相違から転位という結晶中の特異性が発想されたということは、全く同一の論理展開であるからです。破壊研究の分野の最初のブレークスルーは1921年のA.A.Griffithの仕事ということになりますが<sup>19)</sup>、彼の研究は、先に述べたTaylorの転位論の仕事に大きな影響を及ぼします。そしてここでは詳細は省きますが、Griffithの研究そのものもケンブリッジ大学の物理学教室でのTaylorとの共同研究の中から生まれて来たと言って過言ではありません。

さて破壊研究の歴史の中で、破壊力学の誕生は非常に大きなことであったことは勿論ですが、1980年代に入って、破壊の物理的研究に関する新たな動きが出てきたことも重要な動きであったように思われます。その流れの中で、「転位による亀裂先端の応力遮蔽効果」というコンセプト<sup>20)</sup>を学べたことは自身にとって大切な転機となりました。これによって、「亀裂」の力学である破壊力学と転位論とを結びつけることが出来るようになったのです。この考えを主導したR. Thomson

が高村先生を訪問した際、出版前の文献<sup>20)</sup>の原稿を頂けたことや、鈴木敬愛、小泉大一両先生らと物理学会で、亀裂と転位との相互作用について議論したことは忘れられません。

さて1992年に九大工学部材料工学科の小野寺龍太先生の研究室の助教授として赴任させて頂いて以後、主に材料の加工性や強度に関わる事柄を、先に述べた転位論或いは亀裂論といった見地から教育・研究する仕事に携わりました。ここでは、上記、転位や亀裂を基盤とした実験系研究を展開するに当たり、超高压電子顕微鏡室(現:超顕微解析研究センター)の友清芳二、松村晶両先生らご関係の先生方に大変お世話になりました。電子線回折の「イロハ」も知らない素人を暖かく受け入れ、1000kV超高压電子顕微鏡というモンスターマシンを使わせて頂けたことには感謝するばかりです。また2006年伊都キャンパス移転は、教育・研究面に大きな変化をもたらしました。新たな超高压電顕の導入、そして前述の鉄鋼リサーチセンターが設立されたことは大きな意味を持ちました。これを通して、鉄鋼材料の加工組織や力学的性質に関する基礎研究を展開させて頂けた事は、研究ばかりでなく教育面でも大きな収穫でした。実際のものづくりに携わられている研究者・技術者との議論に学生諸君を参加させることで、研究の動機や面白みを学生の皆さんにも直接的に伝えることが出来たからです。このような産学連携の動きに加えて、「巨大ひずみの材料科学」や「長周期積層構造(LPSO)の材料科学」など、科学研究費の新学術領域に関わる大型研究プロジェクトに加わらせて頂く機会を得たことも幸運でした。巨大ひずみ、すなわち超強加工に伴う結晶粒微細化は、それまでの結晶塑性研究に新しい展開の機会を与えるものでした。またLPSOの力学的性質に関する研究によって、半世紀以上のときを超えてキンクと呼ばれる挙動が新奇な変形・強化機構として注目されることになりました。それらは若手研究者に新たな刺激と機会を与え、材料科学・工学分野の活性化に貢献しているように思われます。

これまで自身の結晶塑性の仕事を省みます時、いずれも古典的なことであったかと思えます。しかしその一方で、時代を超えて決して変わることはない考え方や、古くなることのない「古典」を若い学生諸君に伝えていくこともまた、新たなブレイクスルーを生み出す礎となるに違い有りません。新奇なものを旺盛に取り込む好奇心や柔軟性と合わせて、「オーソドックスな古典に対する敬意と憧憬を次世代に継承していくこと」も大学人の努めではないかと思えます。

最後に、現在も研究を共にして頂いている九州大学の田中将己、森川龍哉両先生、そしてお世話になりましたすべての皆様に深く感謝し、この拙稿を閉じさせて頂きます。

## 参考文献

- 1) S.Miura, J.Takamura and N.Narita: Proc. Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys, Trans. Jpn. Ins. Met., Suppl. 9 (1968), 555.
- 2) 成田舒孝, 東田賢二, 喜多秀樹: 材料, 36 (1987) 407, 854.
- 3) N.Narita and J.Takamura: Dislocations in Solids, ed. by F.R.N.Nabarro, Elsevier Sci. Pub., 9 (1992), 135.
- 4) G.I.Taylor: Proc. Roy. Soc. A, 145 (1934), 362.
- 5) P.B.Hirsch, R.W.Horne and M.J.Whelan: Philos. Mag., 1 (1956), 677.
- 6) P.B.Hirsch, D.Cockayne, J.Spence and M.J.Whelan: Philos. Mag., 86 (2006), 4519.
- 7) A.H.Cottrell: Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Clarendon Press, Oxford, (1953)
- 8) W.T.Read: Dislocations in Crystals, McGraw-Hill, (1953)
- 9) 例えばFcc結晶の応力-ひずみ曲線の詳細なReviewとして, T.E.Mitchell: Progr. Appl. Mat. Res., 6 (1964), 191.
- 10) 加工硬化のReviewとして, The Physics of Metals 2, ed. by P.B.Hirsch, Cambridge Univ. Press, London, (1975), 189.
- 11) 高村仁一: 日本金属学会会報, 25 (1986) 5, 379.
- 12) K.Higashida, J.Takamura and N.Narita: Mater. Sci. Eng., 81 (1986), 239.
- 13) 東田賢二, 高村仁一, 成田舒孝, 船越淳, 高田充: 日本金属学会誌, 49 (1986), 1054.
- 14) 東田賢二, 高村仁一, 成田舒孝, 松平恒明, 後藤勝彦, F.M.Suzuki: 日本金属学会誌, 52 (1988), 171.
- 15) K.Higashida and T.Ohashi: Proc. 2nd Int. Symp. on Steel Science, ed. by K.Higashida and N.Tsuji, The Iron and Steel Institute of Japan, (2009), 15.
- 16) 東田賢二, 森川龍哉: 再結晶・集合組織研究会報告書 再結晶・集合組織とその組織制御への応用-再結晶研究の最前線-, 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会, (1999), 10.
- 17) 東田賢二: 加工硬化特性と組織研究会報告書 鉄鋼材料の加工硬化特性への新たな要求と基礎研究, 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 (2011), 5.
- 18) 大橋鉄也: 日本金属学会春季講演大会一般講演概要, (1986) 4, 172.
- 19) A.A.Griffith: Philos. Trans. Royal. Soc. Lond. A, 221 (1921), 163.
- 20) R.Thomson: Solid State Physics Vol39, ed. by D.Turnbull, Academic Press, (1986), 1.

(2019年4月1日受付)