



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-17

構造材料研究の半世紀

A Study on Structural Materials during this Half Century

友田 陽

Yo Tomota

茨城大学 大学院理工学研究科
特任教授



1 はじめに

編集委員会から「若手研究者・技術者へのメッセージ」の投稿依頼があった。過去を気にせず無節操に前へ進むのみだったので適切な内容を思いつかず躊躇した。筆者自身は先輩研究者の背中を見て学び歩んできたと思う。そこで、これまでの研究生生活の一端を紹介し、若手の方々に何か元気の色を見つけてもらえれば幸いと考えて拙文を綴ることになった。

2 鉄鋼研究事始め

学生運動で大学が揺れていた工学部4年のときに、学生間の話合で研究室配属が決まった。京都大学工学部・田村今男先生の研究室で特別研究(卒研)として鋼(はがね)の実験を始めさせてもらったのが幸運の始まりであった。実験の手ほどきをして下さったのは当時助手であった牧正志先生と山岡幸男先生で、助教授の時実正治先生には進路ははじめ色々な相談に乗っていただいた。チームワークの良い研究室で好き勝手に思いつきの実験をさせてもらった。研究題目は「Fe-Cr-Ni合金におけるマルテンサイト変態誘起塑性(TRIP)」であり、試験温度を変えて引張試験を行うとMs点とMd点の間で大きな伸びが現れた。ひずみ速度を大きくすると伸びは小さくなった。TRIPによる延性増加は、変形中に生成する硬いマルテンサイトが応力を担い(相応力)、加工硬化を増大させネッキングを抑制するためであり、変態ひずみの寄与は小さい。ひずみ速度が増加すると試験片の温度が上昇し、変態の進行が鈍るため加工硬化の増加が少なく伸びが低下すると考えた。そこで、試験片に熱電対を付けて変形中の温度上昇を確認した後に、引張試験の途中から温度を下げることを試みた。ネッキングが生じて外力が低下しかかった頃から試験片を冷却すると、再び均一変形に戻り大きな伸びが得られることがわかった。図1に実験結果の例を示す。また、冷

間圧延後に焼鈍する方法で結晶粒径を約 $5\mu\text{m}$ にすると、変形初期にリュース変形が生じ、帯の内部にはマルテンサイトが生成した(結晶粒微細化によるリュース変形の発現は最近のバルクナノメタルの話題であり、普遍的な理解が望まれている)。わずか1年足らずの経験で「鋼の研究は実に面白い!」と思った。数理工学科の友人から、「学部生が新しい知見を出せるとは、何ともうらやましい分野だ。我々の分野では基礎を勉強しながら感想文を書ける程度で、新しいことに挑戦するのはずっと先になりそうだ」と言われ、「頭が悪くても研究者として何とかやれる分野かもしれない」と思った。TRIP現象の研究や利用は今でも進められており、マイクロメカニクスを用いて変形挙動が予測され、変形中その場中性子回折により変態および変形機構が解明されつつある。修士課程では鉄合金のTRIP現象に加えて延性2相合金の強度・変形に取り組んだ。今、考えると田村研究室には魅力的

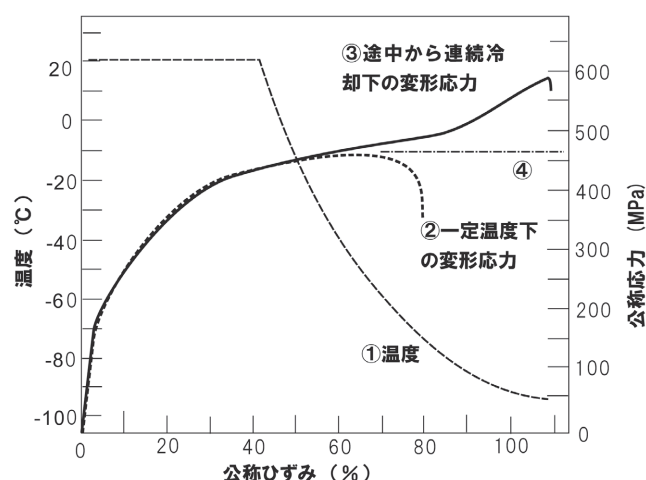


図1 18.9Cr-11.5Ni準安定オーステナイト鋼の公称応力-ひずみ曲線¹⁾: 変形途中から①のように試験片を連続冷却すると③の曲線が得られ、一定温度の場合②より伸びが大きくなった。さらに大きな伸びを得るためには、①は冷却しすぎて、変形応力が一点鎖線の④となるように冷却するのが良いと予想される。

なテーマが多く用意されていて、研究を楽しんでいる人が多かったように思う。修士課程を終え、数学等の基礎力が弱くても「ひらめき」を生かして自由に研究がやれそうな地方大学を就職先として選んだ。自分の研究は存分に楽しめたが、「学部4年生が嬉々として自主的に卒業研究に取り組む研究室にしたい」という夢の実現は残念ながら不十分のままに終わった。

3 材料工学と機械工学

茨城大学工学部に助手として着任した研究室が金属工学科ではなく機械工学科であったのは幸運であった。応用力学講座の黒木剛司郎教授、松島仁助教授、田名部菊次郎技官に機械工学の基礎から教わりながら材料力学演習や機械設計製図等を担当した。学びながらすぐに「学生に教える」のは冷汗と失敗の連続であったが、材料力学や機械設計に馴染むことができ、構造材料を研究する上で視野が広がった。「使われてこそ材料」と言われるが、使い方を良く知らなければ創造すべき材料をイメージできない。

研究では、複合組織鋼の変形応力に関してひずみ分配比を使って応力一定とひずみ一定モデルの中間を説明する曖昧な発表をしていたら、東工大の森勉先生が「もっときちんとやりなさい」と延性2相合金の弾塑性変形に関するマイクロメカニクスモデルによる計算法を教えて下さった²⁾。関連実験を行い、その結果を用いて教わった方法で3次元計算をすると加工硬化の考え方がすっきりしてきた。そこでの基礎となるEshelby介在物理論で学んだ「平均内部応力」は、後に中性子回折による測定を始める動機となった。必要にかられて弾性論や塑性力学の教科書を勉強し、当時黎明期にあった有限要素法弾塑性解析を試みて機械学会論文集に投稿する等、機械工学に慣れ始めた頃に金属工学科の助教授に採用していただいた。材料工学中心の研究に戻ったわけであるが、9年間の機械工学科の経験により「機械設計者は材料をもっと勉強すべきであり、材料開発者は設計を勉強すべきである」と実感したことは後々まで役立った。

4 世界で通じる研究・教育へ

地方大学は実験設備が貧弱で研究費が少なく、しかも当時は頻繁に学外に出かけると先輩教官からそれとなく注意を受ける雰囲気があった（今では、海外を含めて外部の最先端実験設備を活用すればどこにいても研究の質を高められると思う）。学生達と魅力ある研究テーマに取り組むのは容易でなかった。そんなときに、田村先生の紹介でカリフォルニア大学バークレイのMorris先生に呼んでいただいたのは

まさに再出発であった。これまで縁のなかった実験装置が使えたので大いに楽しませもらい、「実験ばかりしていないで机に座ってもっと考えろ」と注意された。英語力が弱くて当時Morrisグループ在籍の毛利哲雄さんや小川陸郎さん達には生活面でも助けてもらった。最近の若手の皆さんは語学に強く、国内の研究環境が良いので海外に魅力を感じられないかもしれないが、当時は「世界的な視野をもつ」ためにはきわめて有効であった。無理を言って出してもらった負い目もあって、帰国後しばらく海外と連携した研究を躊躇ったのは少し心残りである。教授になってからは研究室の大学院生諸君にできるだけ国際会議発表を体験してもらおうと努力した。また、留学生や外国人研究者を積極的に受け入れるようにした。

5 鉄鋼のエコマテリアル化

社会のニーズを捉えて自分の好奇心と組み合わせ研究課題を設定することが理学と異なる工学研究者の特長であろう。研究目的として「強く、ねばく、高機能に」のみでなく「環境調和・循環型持続性」を加えたのは、1991年に山本良一先生主導のエコマテリアル研究会への参加が契機であった。長井寿さんと前田正史さん達と「金属材料」グループを担当し、セラミックスやプラスチック専門の研究者達と工業材料の環境負荷、リサイクル、LCA、資源生産性等を議論した。金属資源は有限であり枯渇が懸念されるが、プラスチックは植物からも生産でき地球上の炭素循環に位置づけられると捉える考え方等、地球環境負荷評価を共通軸にしてこれまでに経験したことのない議論を交わした。異分野の研究者と共通座標で意見を交わしお互いの問題を理解し合うと大きな発展が得られることは、後述の中性子実験でも痛感したことである。特性の優れた材料が必ずしも好ましい材料ではない。当時、長井さん達と提案した単純組成鋼の組織制御による多目的利用は、今では元素戦略構造材料研究の中心課題になっていると思う。

6 中性子散乱回折の鉄鋼研究への活用

あるきっかけで中性子回折実験を始めたことが研究の幅を広げ深めるのにきわめて有効であった。1989年Risøの会議で博士課程を終えたばかりのT.Lorentzen博士が2相鋼の変形に関する発表³⁾に関心を持って、昼食時に中性子回折実験をやらないかと提案してきた。ビームタイムを確保してもらったものの、海外実験手続きの経験がなく出張費の用意等に手間取っているうちにRisø研究所の原子炉は廃炉になっ

てしまった。Lorentzen 博士の紹介で京大炉の小野正義先生が茨城大学に来られ、共同実験に誘われ中性子にまったくの素人が京大炉のある大阪府熊取町まで出かけて中性子回折プロジェクト研究を始めた（この時、京大・落合庄治郎先生、東工大・若島健司先生と茨城大の3チームが参加）。 α - γ 2 相ステンレス鋼やAl合金複合材料の残留相応力は表面層と内部で異なるので、X線回折では評価するのが困難であったが、透過能に優れた中性子ビームを用いるとバルク平均が測定でき、マイクロメカニクスによる計算の実証にうってつけであった。そのとき京大炉に滞在中であったチェコ核物理研究所のP.Lukas博士とP.Mikura博士と懇意になった。彼らは我々の研究に興味を示され、チェコの原子炉なら京大炉より中性子ビーム強度が強いので加熱冷却中あるいは引張変形中のその場測定ができ、プロファイル解析により転位密度の推定等もできるので実験に来ないかと誘ってくれた。次々にインパクトのある成果を発表できたので、同じ茨城県内にある原子力機構（原子炉中性子源）の皆川宣明博士、森井幸生博士と高エネ機構（加速器中性子源）の神山崇先生が興味を持たれ「何も遠くに出かけなくても、県内で十分実験できる」と支援して下さるようになり研究が発展した。さらに鉄鋼企業研究者の方々が関心を持たれ、我々の提案が最初の産発プロジェクト展開鉄鋼研究に採択された。大沼正人博士（NIMS／現・北大）、鈴木淳市博士（原子力機構／現・CROSS）と鉄鋼各社解析部門の優秀な研究者達が参画され、回折のみでなく、小角散乱、反射率、イメージング等、種々な中性子実験法の鉄鋼研究への活用を鋭意検討した。このすばらしい研究チームは、プロジェクト終了後は本協会C型研究会（大沼博士主査）、続いてI型研究会（大竹淑恵博士（理研）主査）に引き継がれ、鉄鋼研究の経験が無かった研究者達も合流している。

学部4年で出会ったTRIP現象は、今では強度・延性バランスに優れた複合組織を有する低合金鋼として実用化されている。超微細フェライト・オーステナイト鋼では、変形初期のリューダース変形中にマルテンサイト変態が誘起され、フェライト、オーステナイト、マルテンサイトの各構成相が負担する応力（弾性ひずみ）分配の変化をその場追跡できるようになった^{4,5)}。先日、I型研究会で久しぶりに京大原子炉のチェレンコフ光を眺めさせてもらい、この20年間で中性子ビーム実験が大きな進歩を遂げたことを実感した。以前に京大炉で丸1日かけて測定した回折プロファイルは、現在では大強度陽子加速器施設・物質生命研究施設（J-PARC/MLF）において1秒以下で得ることができる。さらに工学回折装置「匠」では低温～高温引張・圧縮変形、熱膨張やアコースティックエミッション測定が可能であり、疲労試験機や加工熱処理シミュレータ等の導入も進められている。時代の要

求に応えるために最先端の実験・計算手法を活用すれば、鋼の研究課題はいつまでも挑戦しがいがある。一方、大型実験施設のビームタイムは利用が限られ、長時間の占有実験や萌芽の実験は進めにくい。最近、理研で小型加速器による中性子イメージング実験が始まり、北大の加速器や京大炉では独創的な測定方法の研究開発が進められている。ラボX線装置と放射光実験施設の関係のように各地で小型中性子源が使えるようになれば裾野が広がり、さらに多くの人により有効に大型実験施設を利用するようになると思われる。中性子科学の専門家の間で以前は「今さら鉄鋼の研究をする必要があるのか？」という雰囲気があったが、一緒に実験し、お互いの課題を議論していると「鉄鋼はおもしろい。中性子実験との相性が抜群に良い」と認識を変える人が多いようである。中性子のみでなく種々な量子ビーム実験法は今後大きな発展が見込まれ、その最先端の手法が若手研究者によって鉄鋼研究に活用されることを期待する。

2 おわりに

筆者は2013年3月に退職した。最近、昔の懐かしい試料を取り出して学生に指導してもらいながらEBSD測定を自分の手でやってみた。以前には存在しなかった実験法や解析手法を使えば、当時の研究課題は今も新鮮に思われ、頓挫した真相解明が進むかもしれないと思っている。学部時代から44年経過したところであるが、まだ数年は前進できそうに思い標題を「半世紀」とさせてもらった。

本稿を書き終えてやっぱり断るべきだったかと思わざるを得ず、最後までお読み下さった方には感謝します。

参考文献

- 1) 友田陽：特別研究報告書，京都大学，(1970)
- 2) Y.Tomota, K.Kurok, T.Mori and I.Tamura：Mater. Sci. Eng. A., 24 (1976), 85.
- 3) I.Tamura, Y.Tomota, K.Kuroda and J.Horie：Proc. of Risø Int. Sympo. on Metallurgy and Materials Science, Roskilde, Denmark, (1989), 571；Y.Tomota, K.Kuroda and I.Tamura：ibid, 577.
- 4) K.Asoo, Y.Tomota, S.Harjo and Y.Okitsu：ISIJ Int., 51 (2011), 145.
- 5) 友田陽，ステファヌス・ハルヨ：塑性と加工 (2013), 10月号掲載予定 (解説)

(2013年8月7日受付)