



## アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ 6

# 鉄鋼材料研究の包容力

— 企業研究者として30年、大学教員として10年 —

Great Capacity of Research on Steel

— 30 years at company and 10 years at university —

国重和俊

Kazutoshi Kunishige

香川大学 工学部  
材料創造工学科 教授

## 1 はじめに

企業の研究所で約30年間勤務した後、故郷にある大学に転職して約10年が経ちました。企業や大学で、一貫して熱延プロセスメタラジーに関する研究や開発に従事してきました。主な研究内容は自動車を用途とする加工性の優れた高張力鋼板と鉄スクラップの利用を阻害するCu、Snなどに起因する鋼の熱間脆性に関するものです。私は企業での研究、更に大学で研究ができることを「運がよかった」と喜んでいました。現在、鉄好きを増やすことを目的に鉄鋼材料の教育研究を行っています。量産に基づく「鉄の大きさ」と材料科学をベースにする「鉄の律儀さ」が自分の性格に合っているように思っています。ご存知のように、鉄は金属生産量の約95%を占めています。金属といえば、鉄になります。自動車が国民的機械であれば、鉄は国民的素材です。鉄鋼関係の会社に勤める卒業生も増え始めて、大学にきた甲斐を感じています。また、研究室にて鉄鋼技術者と現場データに関する討議の中で、「鉄が面白くなってきた」といわれたときは喜びを感じました。

平成22年3月末日に停年退職する予定です。自分の経験を基にして、何か若い研究者や技術者を勇気づけられないかと思っていましたところ、編集委員会からシリーズ「若手研究者・技術者へのメッセージ」への投稿を依頼されました。丁度よい機会を戴いたと思いお引き受けしました。研究者が、他の職業人と比較して一般に高く評価される所以は正直であることです。最初に、鉄鋼材料研究への想いを述べ、次に自分の経験を踏まえて、折々に考えてきたことを正直に述べます。ここで述べることは、機械出身の設備技術者やコンピュータ技術者にも是非読んで戴きたいと思っています。

## 2 今想っていることと 若手研究者・技術者への提言

鉄鋼材料研究を始めると疑問が次々と生じて、知りたいという気持ちに駆り立てられることは事実です。研究すればするほど、分からないことが益々増えていくような気ずることがあります。—この意味で、鉄鋼技術が飽和したという感触は全くありません。—しかし、ある時、部分的にしか分かっていなかった複数のことが突然つながって、かなりの部分が急に分かってくることもあります。そんなとき、なにか自然界は人間のために種々の深遠な仕掛けを用意してくれているような気がして、自然界に感謝したい気持ちになります。しかし、疑似相関をつかまえて、いわゆるゴーストを捕まえて、我々研究者が混乱に落ちることもあります。こちらが先入観を持たず、つまり囚われる心がなければ、仕掛けが少しづつ見えてくるような気がしています。私は分からなくなれば、実験事実をしっかりと見直す作業を学生と始めます。実験した時の条件や環境を思い出しながら。また、金属組織学／状態図、熱力学、塑性加工学／転位論、その他諸々の自分が正しと思う基本的な事柄を頭の中に描きながら。私がこのような気持ちになったのは、住友金属に顧問として来られた京大名誉教授の故田村今男先生や時折お声をかけて戴く京大名誉教授牧正志先生<sup>1)</sup>からの影響も大きいと思います。鉄鋼材料には強度が重視されます。強度の上昇は一般に延性や韌性、その他の特性を劣化させます。我々鉄鋼材料研究者は相反する難課題に取り組んでいます。古く20数年前に、住友金属の大谷泰夫博士から「高強度鋼は大別すると、均一硬化鋼と不均一硬化鋼に分かれるが、どちらが本当は材料として優れているのだろうか?」と尋ねられたことがきっかけで、ずっと頭の中に残っている命題がありました。延性について、局部伸びに好ましい組織は均一硬化組織で一樣伸びに好ましい組織は不均一硬化組織といわれています。従って、一

見これらは相反する組織ですので、局部伸びと一様伸び共に優れる理想的な金属組織はありえないように思われます。しかし、このことは本当でしょうか？ 理想的な金属組織を、巨視的には均一硬化組織で、微視的には不均一硬化組織と考えることはできないでしょうか？ 詳細は文献2)、3)をお読みください。最近、FIM、HREMやFE-TEMなどで微視的な領域を詳細に観察できる手段が著しく発達して、微視的構造に関する多くの情報を得ることが可能になりました。今まで見えなかったものが見えて来ることは素晴らしいことです。しかし、巨視的に広く観察する前に微視的に観察する若手研究者が増えることを心配します。「木を見て森を見ず」ということにならないかという心配です。「金属材料はマルチ・スケールで考えることが重要である」と提唱している方がいますが、私は大賛成です。先ず、巨視的によく見て、仮説を立てて、次にやや微視的に見て、また仮説を立てて、更にもっと微視的に見るということが重要ではないかと思うのです。「微視的に見るとき、巨視的観察に基づいて目的を持って見るということが重要である」と思っています。図1<sup>4)</sup>に金属学におけるマルチ・スケールの構造を示します。

材料研究では世に役立つ材料を実現してこそ成果です。「世に役立つ金属の仕組みや仕掛けを見つけたい。実験事実に基づいた新しい技術思想を見出したい」と願って、学生と共に研究を続けています。

### 3 鉄鋼材料研究の包容力

日本初のノーベル受賞者湯川秀樹博士にあこがれて、大学では物理学を極めたいと意気込んで物理学に足を踏み入れました。私の学力不足もありますが、大学の物理学は難しいと

感じました。物理学は評価や解析には非常に有効です。しかし、私の誤解かもしれませんが、もの作りに直接役立つように思われませんでした。大学院生の2年間(1968～1970年)は東大紛争と重なり、大学とは何か、学問とは何かを考えるよい機会を私に与えてくれました。その折に「誰にでも簡単に分かる役立つものを作りたい」との気持ちが固まってきました。当時、鉄鋼業は日本の高度成長を牽引する最大の産業でした。是非、鉄鋼に関する仕事をしたいとの気持ちが高まり、住友金属工業の研究所に入れて戴きました。最近では、鉄鋼を研究しない大学も多いので、鉄鋼材料学を学ばないで鉄鋼会社に入社する学生も多いと聞いております。私はその先駆けの一人です。私でも鉄鋼材料の研究を長年やってこられたのですから、もし読者の中に該当者がおられたら、全く心配は不要です。大学で化学や物理の基本的なこと、本質的なことを理解しておれば、後は実務を通して知見や経験を積んでいけば、最初から鉄鋼材料学を知らなくても何とかなるものです。鉄鋼材料学の分野と物理学の分野を比較してみますと、物理学の主な目的は基礎事項の解明です。それ故に、物理学の分野では必ず抜けた能力を有する少数の者しか優れた業績を挙げられないように思われます。他方、鉄鋼材料の研究には、知識や学力も大切ですが、より豊富な経験とひらめきが要求されます。それ故、多様な分野の人々を必要とするように思われます。つまり、大学で何を学んだかよりも、実務経験に基づいた一人1人の個性的な発想を尊重する分野のように思います。多数の研究者が互恵関係で共存共栄できる分野のように思います。「是非、異分野を学ばれた方も鉄鋼材料研究へ参加して戴きたい。新しい発想で鉄鋼材料の研究に新風を吹き込んで戴きたい」と願っています。

### 4 強烈な個性ある研究指導者との出会いと先輩研究者から学んだ金属学

研究所で私が最初に出会った研究者は強烈な個性をもつ故福田実主任研究員でした。研究事始めに受けた指導者からの影響は甚大です。福田主任から学んだことは若手研究者・技術者に伝える価値がありますので、ここでご紹介します。彼も東大物理の出身でした。大学卒業後3～4年目で研究された「異方性材料の塑性論の $r$ 値表現」に関して学位を取得した天才肌の研究者でした。後年、ラインパイプ用高韌性低温用鋼の研究で住友金属に大河内記念生産特賞をもらいました。不幸にも、鳥海山で遭難、42歳で永眠されました。私は約7年間ご指導を戴きました。福田主任は「大学の先生はピントが外れている。また、回顧録のようなものを書くようになれば研究者としては終わりだ」とよくいわれていました。

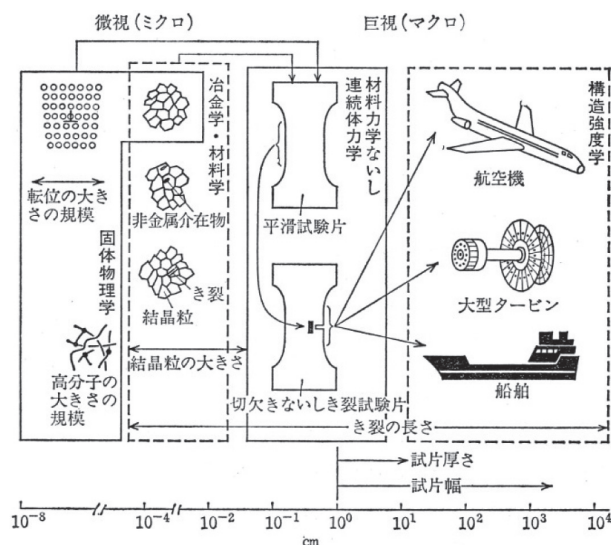


図1 マルチ・スケールにおける構造<sup>4)</sup>

しかし、今お会いするとしたら、私を激励して戴けると思っています。昔の研究者、技術者は大学、企業を問わず、本当に一人1人が大望を抱いていました。

私が大学を出て右も左も分からないときに、研究者あるいは企業の研究者とはこうだと強烈に教えられました。入社後、材料の研究開発者なら誰でもすぐに直面する悩みは、実験して得られたデータをどう読み取るかということです。当然実験上のバラツキ（これについては、後述する）も含まれていますし、特に実用材料の場合多数の因子が複雑に関与しています。さらに、鉄鋼材料の場合は過去の文献も多数あり、データの解釈に大変躊躇するものです。そんなとき、福田主任から次の様なご指導を受けました。「**自分が行った実験条件を十分考えて、得られたデータをよく吟味し、従来の概念に囚われず、論理的に一貫性のある説明を与えること、自分の実験データに基づき新しい分野を開拓せよ**」といわれました。このことは、実績をあげている経営者がよく口にする「現場主義」にも通じると思います。本当に、製造現場は研究テーマの宝庫です。実際、私の場合は製造所によく出かけて、技術者と共に徹夜で現場実験をしました。「沼地に蓮の花が咲く」ということでしょうか？ 沼地に根をしっかりと下ろしているからこそ蓮は美しい花を咲かせるのでしょうか。拡大解釈すると、名大名誉教授浅井滋生先生のメッセージ「高く心を悟りて、俗に帰るべし」<sup>5)</sup>とも相通じるものがあるのではないのでしょうか。福田主任は大変よく勉強されておられたので、あるとき学問とは何ですか？とお聞きすると、それは相手と論争になったときなぎ倒すための武器でそれ以上のものではないともいわれました。既存の学問や教科書にとらわれてはいけないとのご示唆であったように思います。後年、顧問で来られた東大名誉教授の故阿部秀夫先生にご指導を受けていた折に、学問は実務に役に立たないよといわれたことがあります。大先生がいわれたことなので大変驚きました。学問は重要です。しかし学問にとらわれる安易な私達の性癖を見抜いて、福田主任と同じ発想で指導されようとしたのではないのでしょうか？

福田主任グループでは1年先輩に橋本保氏がおられ、厚板に関する制御圧延の研究をされていました。私には熱延に関する制御圧延の研究が与えられました。最初、不可思議な抽象模様の金属組織また膨大な機械的性質のデータを前にどのように解釈すれば、世の中に役立つ仕事ができるのか悩んだ時期がありました。鉄鋼材料の研究には学問がないのではないのか？ 種々の学問の寄せ集めではないのか？ との疑問もありました。橋本氏が制御圧延で生成する金属組織を丁寧に分類し、体系化されて鉄鋼協会が高い評価を得ていました。また、後年、「低合金高張力鋼の制御圧延による強靱化に関する研究」で工学博士の学位を取得されました。鉄鋼材料研究

の進め方について多くのことを橋本氏から学びました。鉄鋼材料の研究は単純ではない、特に鉄鋼材料の研究で重視される力学的性質は種々の複雑な相互作用の結果であり、とても奥が深い分野だと思いました。異常な試験データについて、最近の私は次のように考えています。安易に「バラツキ」といって「その場しのぎ」をしているのではないのでしょうか？ 極端な言い方ですが、私は本質的に「バラツキはない」と思っています。それなりの理由があるはずです。もう少し具体的にいいますと、実験データは一つ1つが個性ある実験事実です。技術データを統計処理すれば必ず何らかの答えは得られます。答えが出ればこれでよしと思うかも知れませんが、それはほとんどの場合役に立たない答えです。むしろ、誤解を招く答えです。一つ1つの個性ある実験データをよく見て、深く考えて対処しないと本当に必要とする答えは得られません。また、昔、コンピュータが得意な若手研究者を指導していたとき、「プログラミングでは自分が命令した通りの結果が得られるが、金属の研究では何が出てくるかわからない。常に不安がつきまとうので耐えられない」との言葉を残して私の研究グループから去って行きました。「金属の研究は予想した結果が出てても楽しいし、また予想外の結果が出ればもっと楽しい」という大らかな気持ち研究する分野です。それではどのように進めるか？ とにかく小手先で対応できない以上、最初の仕事はできるだけ事実をよく見て現象を分類、体系化することです。また、何度実験をしても同じ結果になるのであれば、従来の常識から説明がつかないことでもその事実は正しいのでしょうか。そして、それが製造現場を通して実現でき、世に役立つのであれば、ありがたく利用させて戴くという自由な考え方をすることも重要ではないのでしょうか？ 多分、後年に説明がつき金属学の幅が広がって行くように思います。

## 5 学位取得の勧めと 熱延プロセスメタラジの研究

入社して10数年後に当時東大教授の井形直弘先生から学位論文のご指導を受けました。その際、鉄鋼材料の研究開発は、製造方法、金属組織、機械的性質と用途の4つの要素の関係を解明し、道筋を構築することであると教えられました。図2に研究開発の骨組みを示します。これまでの研究の位置付け、今後どのように研究を進めるか、どのように金属の勉強をすればよいかなどが明確になりました。後年、この図を見た機械工学出身の設備関係者から非常に感心された記憶があります。このような骨組みに従って作成された鉄鋼材料の教科書があれば、学生も目的意識を持ち、しっかりと勉強すると思います。大学では鉄鋼材料に関する最初の講義時

間にこの骨組を説明します。鉄鋼材料の研究は前述の4つの要素の関係解明を通して、用途に向けた合理的な製造方法を追究することにあります。鉄鋼材料の研究は大河ドラマのような大きな道筋があります。部分だけの研究で終わらないでください。他の研究者と手わけして取り組んでもよいと思いますが、研究開発のテーマ毎に粘りつよく4つの要素を貫く道筋をつけてください。研究により道筋が構築されれば、それは鉄鋼材料の知的財産になると思います。学位論文を書くことは本当に頭の整理になります。研究に対する心構えが変化します。井形先生から「熱延高張力鋼コイルの製造法と微視組織、強度特性に関する研究」という大きな題名を戴きました。学位論文は今でも後輩を指導する際に使用しています。研究者、技術者に学位の取得をお勧めします。できることだけを考えないで、理想状態を描いて下さい。これは住友金属の松岡孝博士からご指導戴いたお言葉です。現実はいものです。理想そのものは実現しないかもしれません。しかし、次位のもは実現する可能性が高いと思います。従って、高い理想をもてば、第2番目の高いものが実現する可能性があります。

学位を取得した後、研究に拍車がかかり始めました。熱延ミルは周知のとおり、高生産性と高精度を備えた圧延ミルで、粗鋼の約半分以上の量を圧延する鉄鋼業における基幹設備です。厚板や冷延の材料研究と比較すると、生産量や製品や半製品の種類は多いが加工熱履歴はほぼ固定されており、熱延材料の研究は地味な研究と思っていました。しかし、学位論文を書き上げ、研究開発の骨組みが分かると、熱延材料への研究心が急に高揚し始めました。以下の様な色々なことを想念して熱延プロセスメタラジの研究に本格的に取り組みました。①熱延ミルは高速連続圧延とホットランテーブル上での急冷、巻取り後の徐冷に特徴がある。この熱延ミル固有の加工熱処理的效果を最大限有効に活用して新製品を開発したい。②鉄鋼材料は安価であるが故に大量に使用されて

いる。合金元素を使用する製造法では、常に合金コストが掛かる。③高価な合金元素を使用しない代わりに加工熱履歴を変更する製造法にすれば、つまり、製造設備の強化をとまなう新製造方法が実現できれば技術的にしばらくは優位に立てる。④結局、安価な炭素の有効利用と水を積極的に利用した高張力鋼板の製造方法、すなわち、極低温巻取法が当面の理想的な製造法であろう。その他、⑤水を制する企業が鉄鋼業を制する。ある意味で、鉄鋼業は水商売である。⑥鉄鋼材料研究の基本は鉄—炭素状態図にある。溶接性などから許される範囲内で、炭素を積極的に利用すべきである。⑦化学熱力学を基礎に、相変態などを利用して、金属組織制御を行う熱延ミルは、ある意味で巨大な化学反応装置である。などで

## 6 幾つかの面白い経験と若手への期待

第2章で述べたような考えに至った経験を少し述べさせて戴きます。最初に出会ったのが、熱延鋼板のシャルピー特性に及ぼすPの影響<sup>6)</sup>です。入社して間もない頃、ラインパイプ用熱延高張力鋼コイルの製造法の研究開発に従事していました。某社の文献に記載された熱延コイルの機械的性質と比較すると試作した熱延コイルは、0℃でのシャルピー吸収エネルギーが低い以外はほとんど似たものでした。0℃で100%の延性破面率を示し、かつ所定の吸収エネルギーを満足するので実用上問題はありません。しかし、この差異がどのような理由で生じたのかが個人的に大変気になっていました。某社が有する熱延設備もほぼ同じはずですし、記載されているPの成分以外はほぼ同じだったように思います。当時、圧延ままで得られる厚板では機械的性質に及ぼすPの影響もほとんどないとの結論になっていました。成算はないかもしれませんが、Pしか原因がないとの理由で熱延コイルにおけるPの影響を調べることにしました。詳細な内容は文献6)を見て下さい。熱延コイルではシャルピー破面上に多発するセパレーションにより0℃の吸収エネルギーが減少していたことまた、この原因が巻取り後の徐冷中(約600℃の温度域)にて生じるPの焼戻し脆性(粒界脆化)に基づくことを解明しました。この研究が成功した理由を次のように考えています。シャルピー試験はたいてい室温以下で行います。しかし、私はシャルピー試験の立合いを行い、セパレーションが発生しなくなる100℃での高い温度でシャルピー試験を行いました。これにより厚板と熱延に及ぼすPの影響の違いを明確にできたと考えています。そこに潜む金属学上の本質を浮かび上がらせるためには、用途を考えた工業的な目的からは無意味と思われることを含めて、幅広く探索してみることが鉄鋼材料

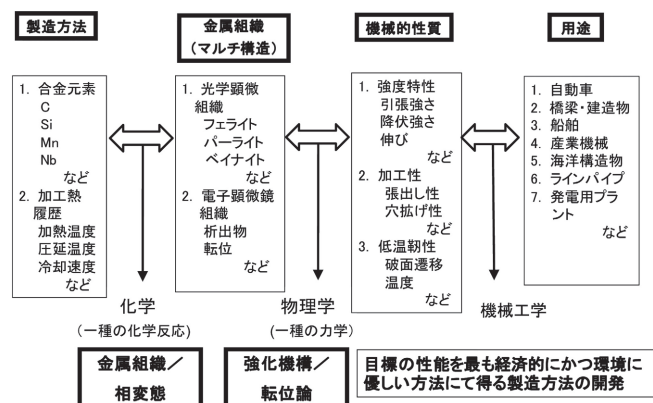


図2 研究開発の骨組み

の研究には必要です。実験データは点ではなく、線に、面に、立体へと拡げて、その上で考察することが重要と思っています。前述したことです。鉄鋼材料の研究は単純ではなく、複雑な相互作用があり、とても奥が深い分野です。多面的な実験事実に基づいて考察する必要があります。

次に、ラインパイプ用熱延高張力鋼コイルの研究後、つまり学位取得後に行った研究例を説明します。極低温巻取法により伸びフランジ性(穴抜け性)の優れた自動車用経済型新ハイト<sup>7)</sup>の研究開発を行いました。自動車用高張力鋼板では加工性が重視され、他方ラインパイプ用高張力鋼板で低温靱性が重視されます。加工性と低温靱性を発現する金属組織や製造法は異質なものと思われています。しかし、意外な所で密接に結びついていました。最初、当時の製造現場で可能な、約650℃～500℃の巻取温度で詳細な研究していました。従来と異なる強度特性を得るには、従来とは大幅に異なる金属組織にする必要があります。そこで、巻取温度を室温まで広範囲に変化させた研究を開始しました。すると約400℃の周辺で、高強度であるにも拘わらず、著しく優れた穴抜け性の向上が確認されました。これは、巻取温度の低下で、前述したPの粒界脆化が抑制されたことが関与しています。つまり、熱延コイルではシャルピー破面上のセパレーションが抑制され、穴抜け性もよくなるということが解明されました。ある時、全く別のことと思っていたことが突然つながって、本質的に同じ原理に基づくということが分かったときには「金属学は素晴らしい」と感銘したものです。図3<sup>8)</sup>に極低温巻取法の金属学的概念説明図を示します。

最近の研究例は、鉄スクラップから混入するCu、Snによる鋼の表面赤熱脆性(液体脆性)です。研究会を主査された東大名誉教授柴田浩司先生に誘って戴いたことが研究の始まりです。Cu鋼の脆性の抑制にはNi添加が有名です。教科書ではCuとNiが全率固溶体をつくり、Cu鋼の融点を上昇させるためであると説明しています。しかし、スケール/地鉄の界面を観察した結果、NiによるCu脆性抑制効果はスケール/地鉄の界面を凹凸化して濃化Cu合金をスケール内へ残

すことに基づくようです<sup>9)</sup>。まず、光学顕微鏡でスケール/地鉄界面をよく観察することが重要です。そこからヒントを得て、ショットピーニングによるCu鋼の脆性抑制効果について検討しています。ショットにより鋼表層部にマクロ的に均一、ミクロ的に不均一なひずみが導入され、このために微細に分散した酸化状態を生じることで濃化Cu合金をスケール内に残存させて、Cu鋼の脆性が抑制される<sup>10)</sup>と考えています。第2章で述べたマクロ均一、ミクロ不均一が好ましいという話に似ています。

金属組織の形成機構を理解するには、いうまでもなく化学熱力学が有力な手段です。鉄鋼材料に関する熱力学がよく分からず、日本金属学会会報に発表された現東北大学名誉教授西澤泰二先生の連載講義「鉄合金の熱力学」(1973)を勉強させて戴きました。また、住友金属の顧問になられたときに、西澤先生から $G = H - TS$ の冥利について丁寧に教えて戴き感銘しました。ご存知の方が多いと思いますが、3、4年前に日本金属学会から西澤先生の「ミクロ組織の熱力学」が出版されています。是非、勉強して下さい。最近気になっていることは次のことです。この熱力学は統計処理をベースにしています。つまり、エントロピーという概念が極めて重要です。それでは、熱力学は何個ぐらいの粒子までの集団が熱力学の対象として扱うことができるのでしょうか？ つまり、どの程度のサイズまでが熱力学的考察の対象になるのでしょうか？ 非常に微細な領域の金属組織まで熱力学により理解できるのでしょうか？ または、新しい概念の熱力学が必要なのでしょうか？ 一般にエントロピーの計算にはスターリングの近似式を用いていますが、この式における高次の項まで計算すれば済むのでしょうか？ このことは既に解明されていることかも知れませんが、私としては関心があるところです。益々微細な領域まで観察される手段が開発されつつある現在、今一度考えてみては如何でしょうか？

熱延プロセスメタラジーを長年研究している者として、以下のことを期待しています。巻取り後の自然徐冷中の熱延コイルの冷却速度がコイルの位置で同じではありません。外気に触れる部分は内部より冷却速度が速くなっています。そのために長手方向や幅方向における特性変動に悩み、開発を断念した経験があります。強度特性の向上以外に、昨今のユーザの自動化を考えて、強度特性の均一化技術の開発を提案したいと思います。材料技術者として、冷却速度に敏感でない製造法を研究することは大きな課題ではありますが、材料技術者と設備技術者が一体となって取り組んで戴ければより合理的な製造法が早く確立すると思います。また、今後も熱延固有の加工熱処理的效果を最大限に発揮するために、社会ニーズにあった新しいプロセスメタラジーを設備技術者と共に追究して欲しいと願っています。

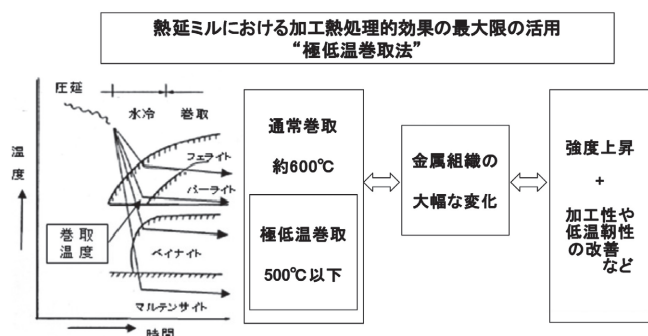


図3 極低温巻取法の金属学的概念説明図<sup>8)</sup>

## 7 おわりに

1970年に民間企業の研究所に東大紛争のお蔭で入り、その後、本当に多くの方々からご指導を戴きました。ここで言及しなかった多数の研究者や技術者からの影響も甚大です。私の経験を基にまた、諸先輩から戴いた叱咤激励の折に考えたことまた、今考えていることを述べました。凡人ですので、予想できないことは多々あります。本当に失敗も沢山しました。本文中に書きましたが、鉄鋼材料の研究は単純ではありません。実用上要求される機械的性質は多数の因子が複雑に作用した結果です。その場しのぎで同じ失敗を繰り返しているのが現状ではないでしょうか？ 同じ失敗を繰り返すことを避けるために、小手先で対処しないことが重要です。永く地道に一日1日を大切に、少しずつ技術の芽を蓄積して行けば、必ずあるとき「直感」が冴えてきて、今まで見えていなかったことが見えてきて、よい結果に出会えると思います。材料の研究は地味です。しかし、社会的波及効果は大変大きなものです。工業技術が飽和すれば、材料の見直しが始まります。新鉄鋼材料技術は10年に一つ出ればよいのではないのでしょうか？ 1人が10年に一つ出せば十分と思います。いや、20年に一つでも十分かもしれません。偉くな

ろうではなく、よい仕事をしましょう。できることだけを考えないで、時には理想状態を描いてみて下さい。

### 参考文献

- 1) 牧正志：ふえらむ，13 (2008)，544.
- 2) 国重和俊：まてりあ，35 (1996)，32.
- 3) 国重和俊，上路林太郎，富田俊郎：ふえらむ，11 (2006)，784.
- 4) 横堀武夫：材料強度学第2版，岩波全書，(1994)，2.
- 5) 浅井滋生：ふえらむ，14 (2008)，110.
- 6) 福田実，国重和俊，杉沢精一：鉄と鋼，64 (1978)，740.
- 7) 国重和俊，長尾典昭，林豊，高隆夫，浜松茂樹：住友金属，36 (1984)，149.
- 8) K.Kunishige：Proc. of THERMEC-88，ISIJ，Tokyo，(1988)，480.
- 9) 秦野正治，国重和俊：鉄と鋼，89 (2003)，1134.
- 10) 竹村明洋，国重和俊，岡口秀治，藤原知哉：鉄と鋼，95 (2009)，369.

(2009年4月6日受付)