

## 2. 特殊鋼の未来を拓くものづくり力 「創製力と解析力、そして好奇心」

(独)物質・材料研究機構 (NIMS) つ ぎ き かね あき  
新 構 造 材 料 セ ン タ ー 津 崎 兼 彰

### ◇ 加工貿易立国日本を支える特殊鋼

日本は加工貿易で成り立っている。資源の少ない我が国は食料、資源などを世界各国から買わせて頂いている。その額は毎年約50兆円である。そしてこれとはほぼ同額を輸出によって得ている。買って頂いているのは主に自動車、機械、電子機器などの加工製品である。その製品競争力を支えているのが特殊鋼である。この枠組みは将来も変わらない。それを裏付けるように特殊鋼（合金鋼）の生産量は今世紀に入っても毎年増加し2005年には2,000万トンを超えた。

しかし日本を取り巻く世界の様相は今世紀に入って大きく変化した。要因の一つはBRICs諸国における経済成長である。これによって資源枯渇や環境悪化が顕在化した。この状況のなかで日本は加工貿易をどのように成り立たせるのか、特殊鋼はどのように寄与してゆくのか、我々の新しいチャレンジが始まったのである。

そのチャレンジの道は平坦ではないだろう。しかし恐れることはない、我々は力を持っている。図1を見て頂きたい。高強度ボルトの強度限界の

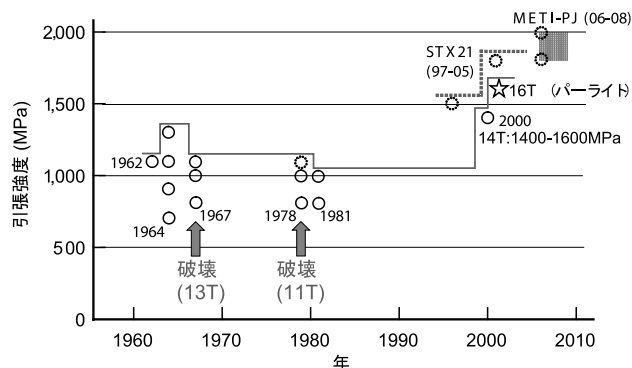


図 1 高強度ボルトの強度限界の推移

推移である。遅れ破壊による建築土木用高強度ボルトの破損事故もあって、30年近くその実用強度は1,100MPaで頭打ちであった。しかし2000年になって、1,400MPa級、1,600MPa級と革新的な高強度ボルトが実用化された。そして自動車の燃費向上と製品競争力向上に寄与した。現在は2,000MPa級のボルト創製が国家プロジェクト（経済産業省）で検討されている。このように我々はエンドユーザーの求めに応じて新しい部品製品をつくりだす地力を持っているのである。

本稿では、資源枯渇時代において特殊鋼に求められるものづくり、その創製力と解析力の方向性について研究事例を交えて紹介させていただく。さらに鉄鋼材料研究の説明責任とその産学独における活性化に必要な枠組みについての私見を述べさせていただく。

### ◇ 稀少合金元素に頼らないものづくり

特殊鋼の多くはその特性を引き出すために合金元素を利用している。しかし資源の取り合いによって原料価格が大きく変動する可能性のある将来においては、合金元素に頼らない特殊鋼づくりの技術を構築すべきである。近未来的には、特定の合金元素に頼らない技術、つまり代替技術が必要になるだろう。そして究極として求められるのは「合金化元素不要鉄」のものづくり技術である。当然のように金属組織の制御が鍵を握ることになる。そして何故その合金元素が必要なのか、何故その熱処理を行うのか、Whyの解明が不可欠になってくる。科学的根拠に基づいた金属組織の制御がますます求められる。つまり新しい創製力と解析力が必要なのである。1997年度に科学

技術庁金属材料技術研究所（現独立行政法人物質・材料研究機構：NIMS）で始まり2005年度に終了した超鉄鋼研究プロジェクト（STX-21プロジェクト）の目的が正にこれであった。そして稀少合金元素に頼らないものづくりの基礎研究は、Ti合金やMg合金などの非鉄合金も対象に加えて、現在も継続されている。

### 1. 高強度ボルトを実現したナノ炭化物：遅れ破壊の克服

図1に示した1,400MPa級高強度ボルト鋼の化学成分を表1に示す。PとSが低減され、Mo、V、Nb、Tiが添加されている。これら合金元素は、水素の侵入によって引き起こされる粒界破壊（遅れ破壊）を抑えるために添加されている。その考え方は以下のとおりである。（1）PとSを低減して粒界強度を高める、つまり粒界偏析元素の低減。（2）Nb、V、Tiによって結晶粒を微細化する、つまり未固溶合金炭化物によるピン止め効果の利用。（3）Mo、V、Tiによって高温焼戻しを可能とすると共に合金炭化物を析出させる、つまり高温焼戻しによる粒界セメントタイトの球状化と合金炭化物による水素トラップの利用。ここで最後の水素トラップの利用が新しいメタラジーとして注目された。

水素は元素の中で最も小さく、室温でも鉄鋼材料に出入りできる。鉄鋼材料に水素が入ると結晶格子を膨張させるため、結晶格子中に存在できる水素はppm以下と極めて少ない（重量ppm）。このために腐食やメッキ処理などで鉄鋼材料に侵入した水素は、結晶格子中よりも安定な場所（自由空間の広い結晶粒界やポイドまたは膨張の応力場を持つ刃状転位）に偏析する。そして結晶粒界に水素が偏析すると粒界強度が低くなって粒界破壊を引き起こしてしまう。そこで結晶粒界よりも強い

結合力を持つサイトを鋼中に均一微細に分散させてやれば、水素がトラップ（補足または固定）されて結晶粒界の強度が低下せずに鋼の実用強度が向上できるというわけである。この水素トラップの役割を果たしたのがMo、V、Tiなどの合金炭化物である。焼戻し2次硬化や粒界ピン止め効果に加えた合金炭化物の新たな機能の発見、創製力のアップである。

合金炭化物は高温焼戻しによって鋼の2次硬化を引き出すために1970年代から速度論や結晶学をはじめ多くの研究がなされた。しかし、硬さピークの時効条件での炭化物の格子像観察は、近年のわれわれの研究まで行われておらず、析出物のサイズや界面構造などは未解決であった。水素が析出物のどこにトラップされているのか、析出物内部なのか、界面なのか、周囲の弾性応力場なのか？を明らかにするためには析出物の高分解能観察が必要である。磁性を持つ鋼中のナノサイズの炭化物の高分解能像観察は困難で薄膜作成の最適化と観察に適した電子線入射線方位に出会うまで何枚もの薄膜サンプルを作成するという地道な研究が必要であった。VCの観察例を図2に示す。

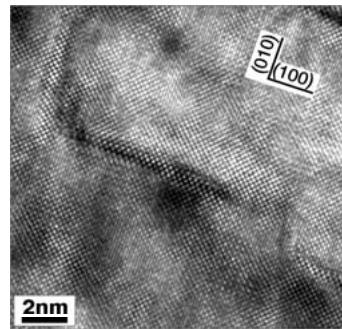


図 2 V添加鋼に析出したVC炭化物の高分解能TEM像（土田、原、津崎：鉄と鋼、88（2002）、p.771.）

表 1 1,400MPa級高強度ボルトの化学成分（並村：鉄と鋼、88(2002)、p.600.）

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	others
A	0.4	0.06	0.52	0.007	0.005	0.30	1.00	0.62	-	Ti = 0.050
B	0.42	0.06	0.53	0.007	0.004	0.54	1.00	0.97	0.007	Ti = 0.050
C	0.34	0.22	0.36	0.011	0.012	-	1.26	0.40	-	Nb = 0.019
D	0.49	0.28	0.31	0.009	0.004	-	1.02	0.68	0.32	Nb = 0.034
E	0.40	0.05	0.50	< 0.010	< 0.010	-	1.20	add.	add.	-
F	0.33	< 0.10	0.30	≤ 0.015	≤ 0.005	-	1.20	1.00	0.30	-
G	0.41	0.32	0.81	0.005	0.017	0.55	0.49	0.22	-	Ti = 0.039

ピーク時効の状態、炭化物は円盤状で直径数nmと微細であるが、すでに界面転位が導入されて半整合状態になっていることがわかった。そして、ここに水素原子を格納する歪んだ場所（トラップサイト）が作られることを見いだした。さらに、各種合金炭化物と水素の結合エネルギーと水素吸蔵量を質量分析器によって定量的に解析する手法を確立した。これら解析力によって例えば原料価格の変動が大きいVを他の合金元素に代替えする指針を示すことができると考えている。これが創製力を支える解析力である。

## 2. 疲労強度を高める組織の微細均一化：内部割れの克服

鋼の強度を1,200MPa以上に高めると、疲労破壊起点が表面型から内部型へ変化して長期疲労（10<sup>7</sup>回以上の疲労）強度が頭打ちになり、これが高強度鋼の適用のネックになる。そして非金属介在物が内部割れの起点となるために、介在物の軟質化と微細化が特殊鋼の分野で従来から精力的に研究されてきた。しかし、非金属介在物を十分に微細化すると、今度は組織起因の内部割れが起こることを見いだした。焼戻しマルテンサイト中に混在する粗大なブロック組織や一部ベイナイト組織がその原因と見なされた。疲労は材料中の最弱点で起こる。さらなる疲労強度の向上のためには、非金属介在物の微細化に加えて、金属組織の微細均一化が必要ながわかった。これは高強度鋼つくりのための新しい指針の発見、つまり創製力の拡大である。

われわれは合金元素に頼らない内部組織割れの克服手段として改良オースフォームに注目した。

改良オースフォームは加工熱処理法の一つで、中間温度域で鋼を加工しオーステナイトの加工硬化状態から焼入を行うものである。改良オースフォームによって金属組織が微細均一化することが報告されており、これまでも板バネなどで実用化されている。しかし、その長期疲労内部割れへの効果は検証されていなかった。われわれは改良オースフォームを介在物制御したバネ鋼に適用することによって、引張強度2,000MPaで内部割れを克服して長期疲労強度1,000MPaが達成できることを確認した。

改良オースフォームで金属組織はどれだけ微細化したか。それを定量的に解析するのに力を発揮したのが原子間力顕微鏡である。試料表面を電解研磨する際に生じる金属の相や表面方位の違いで生まれる表面の凹凸。原子間力顕微鏡はこの凹凸をnmの精度で関知することができる。これによって焼戻しマルテンサイト組織のブロックやセメントタイトのサイズを定量的に評価できた。一例を図3に示す。SCM440に改良オースフォームを適用することによって、濃淡で識別されるブロックとともに白く識別されるセメントタイトが、ともに微細均一になっていることが分かる。これらの写真をもとにセメントタイトの分布やブロック粒の極値統計をとって金属組織を定量的に評価して、疲労特性と組織の関係を明確化することができた。

もう一つナノインデンテーション法が解析力として力を発揮した。ナノインデンテーション法は、極めて微小な領域の機械的性質を直接評価できる材料試験法の一つである。試料表面に形成される圧痕の大きさは、水平方向に数10～数100nm、

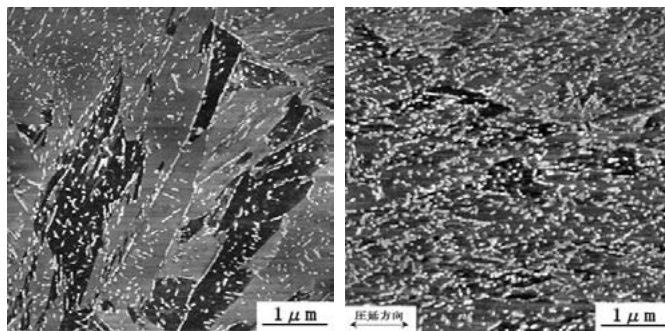


図 3 SCM440鋼の焼戻しマルテンサイト組織（原子間顕微鏡像）  
左：通常QT処理、右：改良オースフォーム処理  
（早川、寺崎、原、津崎、松岡：日本金属学会誌、66（2002）、p745）

深さは数10nm程度である。さらに押し込み荷重と押し込み深さを、 $\mu\text{N}$ とnmの精度で、負荷開始から除荷終了までの全過程にわたって測定することができる。これによって荷重-押し込み曲線を精度高く測定でき、これから弾性定数も得ることができる。この方法によって、軟質化制御を施した鋼中の非金属介在物の硬さと弾性定数を直接知ることができた。さらに、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の結晶粒(ブロック)のマトリクスの硬さを直接評価できた。そして、改良オースフォームを施した材料では、ブロックのマトリクス硬さの分布幅が小さくなっていることを見いだした。つまり、最弱点となる弱いマトリクス部分が消失していることがわかった。これは改良オースフォームによって、焼戻し時のセメント析出が均一に起こったためと考えている。

結晶粒の微細均一化、析出物の微細均一分散化、つまり「最弱点を作らないものづくり指針」と「平均値から分布制御のものづくり指針」を解析力が確固たるものにした。この道の先には「合金化元素不要鉄」が待っていると期待している。

#### ◇ 鉄鋼材料研究における説明責任

「鉄鋼材料に未だ研究することがあるのですか？」鉄鋼以外を専門とする同業の材料研究者から始まってマスコミの方まで様々な分野の方から質問を受ける。この質問は少なくとも過去30年近く継続して発せられている。われわれ鉄鋼材料に関わる技術者研究者が社会に対して十分な説明をしてこなかったと反省せざるを得ない。皆さんはこの質問にどのように答えるであろうか。「はい。まだまだ多くの研究課題があります」と直球を投げ返すのだろうか。しかし、この答え方は機能しない。次に「ではどんな研究ですか？」と問われ、研究課題の詳細を説明するはめになり、その詳細は一般の方には理解されないために、結局納得して頂けないのである。抗ガン剤研究と比べると説明回答ははなはだ難しい。

現在、表題の質問に対して私は次のような回答を試みている。まず逆に、今までに「極めつくした材料」「研究し尽くした材料」「研究をやめた材料」というのはあるのですか？と問い返している。答えは明快で否である。現在使われている材料に

おいて技術開発の進歩をやめた材料はないのである。その材料を使って製品をつくるのだから、製品の競争力アップのために材料研究は営々と続けられている。

もちろん鉄鋼は過去に膨大な研究があるから、新たな技術開発研究はより高度且つ困難であるが、自動車や機械などの鉄鋼製品の競争力アップのためには材料研究課題に知恵を絞って取り組まなければならない。材料の技術開発研究をやめたら競争力を失い、関連産業が廃ることになる。「研究課題があるからやる」は受身、「研究課題を見出す」という能動的姿勢が研究者に求められている。

こんな感じの回答なのだが、相手の方々には「確かに加工貿易で成り立っている日本なのだから、工業製品の競争力アップに構成材料の技術開発は不可欠で、やめたら産業が廃れるだけです」と納得していただけたことが多いようであった。

「ではどんな研究が大切なのですか？」次にくるこの質問に対する一般回答はさらに難しい。構成基盤材料としての歴史が長いだけに研究対象が多岐にわたりしかも高度化しているので、一般の方々に理解していただける回答を見出すのが難しい。しかし、超鉄鋼研究プロジェクトで掲げた、資源枯渇時代における合金元素を使わないものづくり技術の重要性は、比較的理解を得やすい回答例であった。資源枯渇時代というような時代変化、環境変化に対応する研究ということであろうか。

その他にも「鉄鋼の研究を税金でやる必要があるのですか？」「なぜ民間企業ではなく大学や公的研究機関がやるのですか？(りっぱな鉄鋼会社があるのに)」と質問は続くのである。これらの質問に適切に応えていかないと若者を含めて多くの方々を失望させることになると思っている。どうか一緒に知恵を絞り説明責任を果たしていこうではないか。

#### ◇ 太くしたい好奇心の円鎖

材料研究であるから研究対象材料は使われないといけないし、使われて欲しい。使われるためには材料だけの特性ではなく社会情勢に関する因子が強く反映する。なにより新しい価値の発見が必要である。この場合の価値は経済的価値が第一だ

ろう。環境・資源・安全問題も飲み込んだ経済的価値である。この価値を生み出す材料研究の道は平坦ではない。その道は険しく、苦しい作業が必要である。しかし、苦しいばかりでは技術者研究者は生きていけないし、活力がでない。出来ることなら日々の営みは楽しくありたい。そのためには新しい可能性の発見が継続的に必要だと考えている。そしてそれを実現するのが「好奇心の円鎖」だと思っている。

図4はArt(技能)、Science(科学)、Engineering(工学)、Technology(工業)での好奇心のあり方とそれらのつながりの重要性を訴えている。関西弁を使って恐縮だが、Artの好奇心は「これおもしろいやん」であり個性化、Scienceは「どないなってんにやろ」で普遍化、Engineeringは「どないかしたろ」で一般化、そしてTechnologyは「もうけたろかい」で差別化、として特徴づけたい。Engineeringの一般化「どないかしたろ」は少々説明を要するかと思う。Scienceで特定因子のもとで普遍化された現象も、それが一般的な作業環境(多因子環境)で使えなくては意味がない、特別な稀少合金やプロセスだけで発現する現象では使えない。Engineeringの好奇心は、一般的に使えるための「どないかしたろ」である。そして、経済活動と直結するTechnologyでは、他と同じことはできない、従って差別化である。

集団としての作業であるEngineeringとTechnologyが新しい価値の発見を生み出し、ど

ちらかといえば個人的作業であるArtとScienceが新しい可能性の発見を生み出すと考える。それらが相補的に関連して(円鎖を作って)スパイラルアップするのである。特性ばらつきのない部品をつくるTechnology分野で、その中の異常値に敏感に反応し「これおもしろいやん」と可能性の泉を深くするArtist(技能者)がいる。おもしろい現象があるからこそ「どないなってんにやろ」とScientist(科学者)が新しいパラダイムづくりに取り組む。このArtとScienceをしっかりとつなぐことが新しい可能性の発見につながる。新しい可能性の発見がなければ、新しい価値は生み出せないと言いつくりたい。4分野での個々人の営みがそれぞれの好奇心にしっかりと支えられてそして円鎖を作るときに持続的社会日本、加工貿易立国日本が実現できると考えている。多くのノウハウで支えられている特殊鋼だからこそ、ArtとScienceの好奇心で満ちている環境作りが大切だと思っている。

## むすび

われわれは太陽系というある意味で資源に限りのある閉じた世界で営みを続けてきた。数え切れない人々が生まれ生活をしてきた。歴史が証明している。可能性と価値そして好奇心には限界がないことを。壁があるとか可能性が見えないとしたら、それは我々の感度が鈍っているか未熟なだけである。本稿で示したように高強度鋼のボトルネックである破壊問題を克服する新たな金属組織制御の可能性が次々と提案されている。好奇心の円鎖をもって創製力と解析力を高めるならば可能性の泉はつiskることはない。「資源は有限、しかし創造は無限」である。「志を高く目線を上げて」進みたいものである。

新年号の記事ということで夢を語りたかった。このために少々大風呂敷の記事になったかと危惧している。お叱りご鞭撻いただければ望外のよこびである。

なお本稿で紹介した研究内容は、単行本「超鉄鋼：強度2倍×寿命2倍の実力と可能性」(長井寿編著、日刊工業新聞社、2006年11月)に詳しく記述されている。あわせて参照して頂きたい。

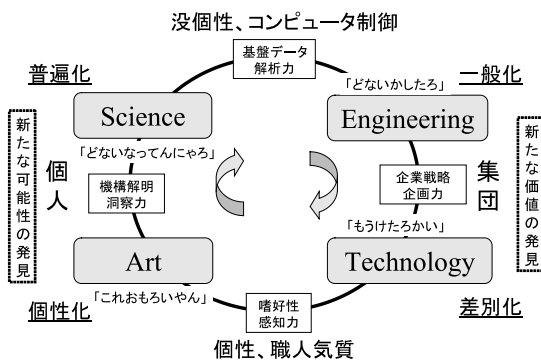


図4 新たな可能性と価値を生み出すための好奇心の円鎖