

# 特別講演

□第159回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演  
(平成22年3月28日)

## 低環境負荷と高機能の両立設計

Trade-off Balancing of Low Environmental Load and High Performance

長井 寿

Kotobu Nagai

(独)物質・材料研究機構  
領域コーディネータ



\*脚注に略歴

### 1 設計コンセプトの三段階

#### 1.1 金属組織と力学特性 (1970年代)

「鉄が壊れる」ことに単純な好奇心があり、卒論でそれに関連する研究ができる講座、すなわち鉄鋼材料学講座を選んだのが研究の始まりである。博士論文にまで進んだこの研究テーマは、「含Niフェライト系低温用鋼に関する研究」<sup>1)</sup>だった。おりしも、核融合実験炉開発のために、極低温での降伏強さと破壊靱性値の開発目標(図1)、いわゆる“JAERI Box”(主にオーステナイト鋼)<sup>2)</sup>が提示され関係者の耳目を集めていた時代だった。強くなると脆くなると教科書で教わったので、強くかつねばい目標は不思議だったが、もっと不思議なのは最終的には目標が達成されたことだ。驚きと矛盾に満ちている。また液化ガス需要が進展し低温用鋼(Ni系マルテンサイト鋼)開発が進んだ時代であり、さらに制御圧延技術導入で高靱性高強度鋼(低合金フェライト鋼)が大きく進歩した時代でもあり、正に「厚板の破壊」が活況を呈した時代に、図らずも紛れ込んだことになる。当時の鉄鋼協会の講演

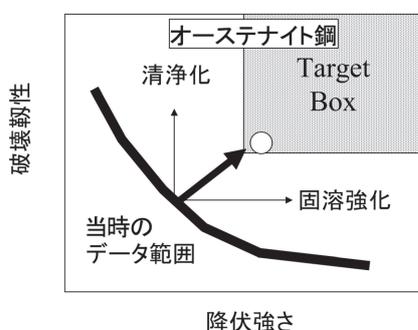


図1 降伏強さと破壊靱性値バランスのブレイクスルー

大会などでの活発な討論が今でも思い起こされる。

“合金学なのか金属組織学なのか”という戸惑いが自分を悩ませた。大事なのはAlloyなのかMicrostructureなのかと迷うわけである。上手にこの疑問を他人に説明できない。結局は、金属組織が力学特性を左右する、という実験事実を確信にして、この疑問はお蔵入りさせた。

すなわち、同じ化学組成の合金に対して、熱処理で金属組織を変化させると驚くほど力学特性が変化する。降伏強さ、靱性(当時は、シャルピー衝撃試験で議論)のバランスが金属組織によってどう変わるかを実験的に求める。さらに合金組成を変化させて、その関係がどう推移するかを調べる。いわゆる“じゅうたん爆撃”に過ぎない方法論だったが、合金元素の影響と金属組織の影響をそれぞれ説明したことになる。

特に、残留オーステナイトが靱性に効く、効かない、という議論に興味を沸き、熱心に調べた。その結果、微細に分散し、それぞれが連結しない分布状態が最も有効だという知見を得た<sup>3)</sup>。金属組織の幾何学が面白い。

大学から金属材料技術研究所に移った後は10年以上(1980年代)、極低温での力学試験に没頭した。特に破壊靱性値(J積分)を自動計測する試験装置をプログラムも含めて自分で設計し組み上げたのは、先駆けだったと自負するが、論文にまとめる興味もなく過ぎたことが反省される。ただこの時期に、引張試験、シャルピー試験、疲労試験などについて基礎に立ち返る機会を得たことは、その後、変形特性、破壊特性などの材料機能を念入りに分析する視野を形成するのに大変役立った。弁ずれば弁ずるほど学問背景の薄い、たかが出荷用性能試験だが、奥が深い。

\* 昭和52年東大工学系大学院修士課程修了後、同工学部助手を経て、56年金属材料技術研究所(平成13年より物質・材料研究機構)に配置換えとなり、その後、力学研究室長、超鉄鋼研究センター長等を経て、現職。工学博士は昭和56年東大で取得。

### 1.2 低環境負荷と高機能の両立 (1990年代)

1990年頃から、地球環境問題への関心が高まり始めたのと同時に、中国の開放政策が功を奏し始めた。この時代変化を見据え、世界的な視野での新しい材料設計概念を提起するという戦略的意図で、「エコマテリアル研究」が日本発で始まった。その流れの中で「低環境負荷と高機能を両立する」概念の提案<sup>4)</sup>に關与した。考察のひとつの帰結は、リサイクル性を高めるために「単純組成でも金属組織制御で高性能を実現する」という設計指針である。そのための金属組織像として「微細複相組織」を提示した。しかし、具体的な成果を得るのがなかなか難しく、Al-Si合金でようやくそれなりの成果、すなわち、強度も延性も同時に改善する微細複相組織の実例<sup>5)</sup>を示すことができた(図2)。

### 1.3 単純組成でも金属組織制御で高機能 (2000年代)

鉄鋼で微細複相組織の実例に挑戦する機会が、超鉄鋼プロジェクトに参画することで得られた。著者が直接参画した研究テーマは、結晶粒微細化で強度、延性脆性遷移温度(DBTT)を同時改善(図3)することになる<sup>6)</sup>。この同時改善には学問的な目新しさはないが、「1ミクロンで強度2倍」を実現する材料プロセス開発に関する基礎研究に挑戦の主眼

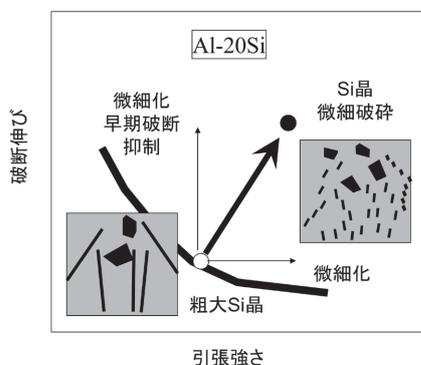


図2 引張強さと破断伸びバランスのブレイクスルー

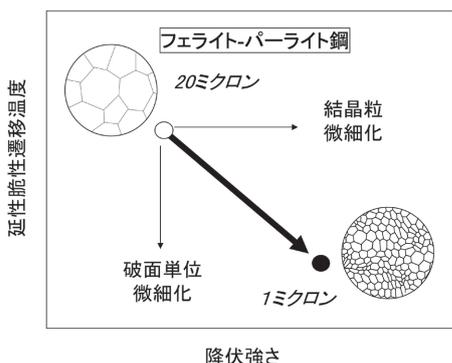


図3 降伏強さと延性脆性遷移温度バランスのブレイクスルー

があった。大量生産性を見据え、鍛造-圧延プロセスで作ricomという方針で臨んだ。延性も大事ということでここでも微細複相組織が再登場する。溶接性も加味するという縛りもあり、ますますプロセス研究的な色合いが濃いプロジェクトだったと思う。10年プロジェクト(実際には9年)として、多数の研究者が連携してとり組み、基礎研究としての目標を達成し、多くの研究成果を生み出すことができた。

現在、資源制約が重大問題となり、日本の未来を決する元素戦略の重要性が認識されている。「低環境負荷と高機能を金属組織制御で両立する」という概念が今後益々輝きを増すと確信する。超鉄鋼プロジェクトがその意味でも実例を示す先見的な役割を果たしたと思う。

## 2 悩み続ける三課題

### 2.1 「両立」の理論的表現

力学特性を理論的に表現する、もしくは数式で示すことができないと、両立の理論的表現は曖昧さを残すだけである。数式は経験式でもとりあえずは良い。

たとえば、強度が金属組織の定量的因子で表現される式で表され、延性や靱性も同じく金属組織の定量的因子で表現される式で表されていないとてはならない。最も好ましいのは、同じ定量的因子が両方に含まれ、その定量的因子と特性の相関がいずれも同方向なことだ。

この点で、結晶粒径と降伏強さ、脆性破面単位とDBTTを論じることが、最も条件が揃っている。破壊応力と変形応力の関係(図4)の考察に基づき、さらに詳細に検討すると花村らの論文<sup>7)</sup>で示すように、「破壊の表面エネルギー」が金属組織依存である可能性が高いという新しい興味ももたらす。

ところが、引張延性やシャルピー衝撃値(延性域)などについては同様の表式は得られていない。自動車車体の一層の軽量化のために車体材料の高強度高延性化が切望されているが、その理論的アプローチが構築されていないことになる。衝撃値も基本的には延性破壊に必要な仕事(エネルギー単位で

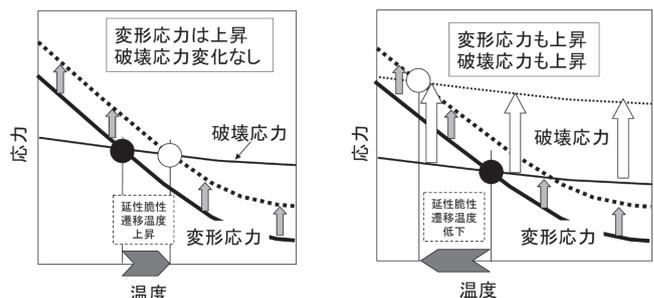


図4 延性脆性遷移温度を下げるには破壊応力を大きく上げる

表す)なので、延性限界の研究が極めて立ち遅れている。

### 2.2 「応力-ひずみ関係」をめぐって

ひずみ硬化率を設計できるかどうかが一番の基本課題であるが、ここでは触れない。

応力-ひずみ関係は、温度、ひずみ速度の影響を受ける。応力のひずみ速度の $m$ 乗則というものがある。この式を認めるとひずみ速度=0で変形すると応力=0となるので、実験的にひずみ速度=0での変形応力を求めたくなる。しかし、実験的に可能な最も小さいひずみ速度は多分クリープ試験だろう。現在、実測できる最低ひずみ速度は $10^{-9}s^{-1}$ 程度であり、そこでも応力=0にはほど遠い高い応力で変形する。実験的に実測できる最も大きいひずみ速度は $10^3s^{-1}$ に満たない<sup>8,9)</sup>。すなわち、 $m$ 乗則が意味をなすのはこの範囲でしかない。温度の影響も現在では、4K以上の固体温度域で実験的に求めることができる。温度もひずみ速度も物理的な意味が明解なので、適用範囲もこのように明快であるべきである。

応力-ひずみ関係は最も簡便には、指数ひずみ硬化式(Hollomonの式)で表せる。この表式に著者には不満というか初歩的な疑問が二つある。適用範囲が分からない。

ひとつは、適用できる寸法の範囲は無限なのか、有限なのかという疑問である。特に最も小さい寸法は何か。もし無限だとすると、この式を金属組織の定量的因子で表現し直すことができたとしても、それは理論的には無意味になる。混合則が成立するので問題ないということで進めているが、どこか落ち着かない。

もうひとつは、ひずみに限界値が与えられていないことである。この式を使うとき、一般にはひずみを正值として扱うが、決してひずみの最大値に制限はない。塑性加工の専門家に質問すると、無限で問題はない、という答えが返ってくる。そうなると、延性限界なるものはこの式を眺めている限りは永遠に現れないことになる。これは重大な問題である。伸びなどは、実は塑性変形そのものの限界ではありえないことになる。この問題は、「破壊限界」という考えを持ち込むべきことを意味しないだろうか(図5)。

### 2.3 「不均一」と「均一」をめぐって

混合則で落ち着かない問題意識が、不均一性と均一性である。均一の定義の仕方として、たとえば「どの部分を取っても同じ組織、同じ性質が得られる」が良いだろう。「違う組織は違う性質を持つ」とも言える。

しかし、不均一-均一は極めて相対的な尺度である。フェライト(F)-パーライト(P)組織を例に考えてみよう(図6)。斑模様を均一と見るか不均一と見るかはどちらも可能だ。白と黒の二色なので不均一と見ることも可能だが、一定の模様

が繰り返されているという意味で上記の定義に基づいて、均一と見ることも可能である。最もマクロに見て、後者の見方をまず採用し、金属組織を(FP)と表現し、均一とする。

少し拡大して観察すると、今度は明らかにフェライト相とパーライト相の違う組織の二相となるので、(F+P)と表現し、不均一とする。FとPは違う性質を持つ(たとえ同じでもここでの議論には影響はない)。

パーライト相は周知のように、よりミクロにはフェライト(F)とセメントイト(Cementite)の層状組織なので、Pは(F//Cementite)となる。

フェライト相も内部に微細な合金炭化物(Carbide)を持っていたり、もっとミクロスケールでは固溶元素が分布している場合が多い。(F+Carbide)と表現できることになるか。

このようなマルチスケールでの不均一-均一の入れ子状態を、単純に混合則で説明しきれぬのか?混合則は相比だけを論じるが、界面、界面密度などの影響を考慮しなくて良いのか、複相間の応力もしくはひずみ分配はどのスケールまで考慮すべきなのかなど、議論の整理が遅れているように思える。

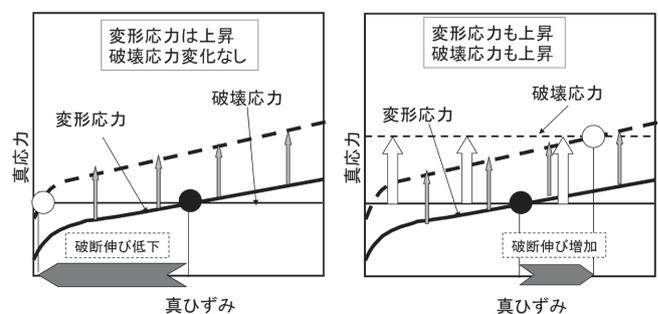


図5 破断伸びを上げるには破壊応力を大きく上げる

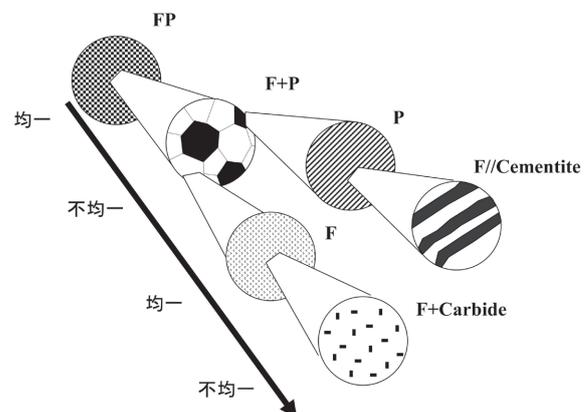


図6 均一、不均一は同じ金属組織でマルチスケールに展開する

### 3 面白かった三大話題

#### 3.1 疲労き裂の微視組織割れ発生

金属組織と力学特性の極めて密接な関係をしっかりと認識したのは、この研究によるところが大きい。教科書的には、疲労き裂の起点は、試験片表面か、表面直下の介在物なり空隙と分類されていたのに対して、チタン合金の極低温高サイクル疲労では、そのいずれにも該当しない例が観察された(図7)<sup>10,11)</sup>。ある特定の微視組織のファセット割れと同定し、学会で報告したが、最初の頃は疲労試験の軸がずれていて曲げ変形したからではないかと、同じ合金でも低温で顕著になることから極低温特有の現象が関与しているのではないかと、なかなか認知してもらえなかった。いわゆる静的引張試験では巨視的には繰り返し「弾性変形」域での現象であることを示し、さらに観察データ数を増やしていく中で少しずつ認知度が増していった。本協会の依論文賞<sup>10)</sup>をいただいた辺りから、漸く現象に冷静な関心を払っていただけるようになった。現在、室温でもギガサイクル疲労、すなわちより低応力では、高応力側での表面発生から微視組織割れ発生に変わることが一般的に認知されるようになった。今、思い返せば、同じ合金でも低温では変形応力が上昇し、巨視的な「弾性変形」域が拡大するので、同じ繰り返し応力では微視組織割れが発生しやすい、という「意図しない」幸運があったとも言える。

この研究はその後かなり系統的に進め、梅澤ら<sup>11)</sup>は、特定の結晶組織内での集中すべりがファセット割れを生じさせる一般性があること、このファセット割れは発生点であり、そのまま主き裂となることはなく、ある大きさになるまで成長してから主き裂を形成していく、という過程などを明確にしていった。

#### 3.2 粒界フェライト粒の「微細化」

相変化の起点を均一に分散できると微細な組織形成に良い

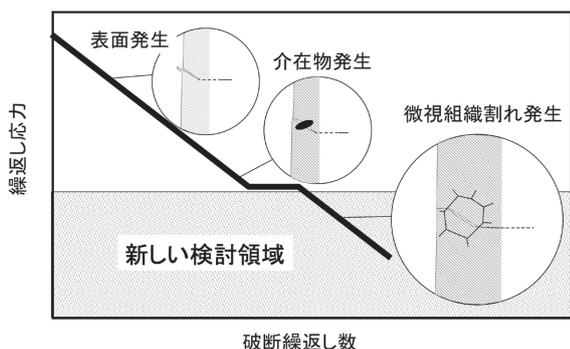


図7 微視組織割れ発生の発見が新しい研究領域に発展

というイメージを、従来の相変態論は示している。そこで、試料表面という制約があるが共焦点レーザー顕微鏡を用いて、オーステナイト粒組織からのフェライト形成を直接観察してみた<sup>12)</sup>。ここでは意図的には相変化起点を導入していない。組織の不連続点としては、オーステナイト粒界と介在物境界のみである。得られた実験データは単純だが意外だった。最優先起点はオーステナイト粒界であり、そこに塊状フェライト粒が生成し、成長し、直ぐに成長が止まる。次に、介在物境界から塊状フェライト粒が生成し、少し成長し、成長が止まる。最後には、板状フェライトが生成し、大きく成長する。すなわち、最も高温でオーステナイト粒界から生成する塊状フェライト(粒界フェライトとする)が最も小さい(図8)。これが本当だとすると大量生産プロセスには極めて有利になる。

変態温度域でのフェライト成長速度は毎秒1ミクロン程度である。1ミクロン以下にしたいなら、成長時間を1秒以下にしないとイケない。すなわち、急冷するしかない。これは工程的には好ましくない。従来の制御圧延で達成できたフェライト粒径が5ミクロン程度だったことが良く理解できる。

さて、どう考えたのか。鳥塚ら<sup>13)</sup>は、オーステナイト粒界の間隔を細かくするというアイデアを検討した。まず、フェライト変態は $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の前面で、炭素をオーステナイト相中に濃化させながらフェライト粒が成長するので、同じ温度で保持した場合でも、オーステナイトの安定化のため変態が止まることになる。これが大体5ミクロン程度の成長に相当する。そうすると、オーステナイト粒の間隔を狭めていくとどうなるか。たとえば、5ミクロン以下の間隔になると、フェライトは5ミクロンに成長する前に止まることになる。

オーステナイト粒径を何段階かに変えて、圧縮変形後、変態域を一定速度で冷却した。実験の結果は、間隔が20ミクロンまでは粒界フェライトの厚みは一定、20ミクロン以下では間隔が狭くなるほど粒界フェライト厚みが比例して減少することを見いだした。粒界フェライトの厚みは、この条件で

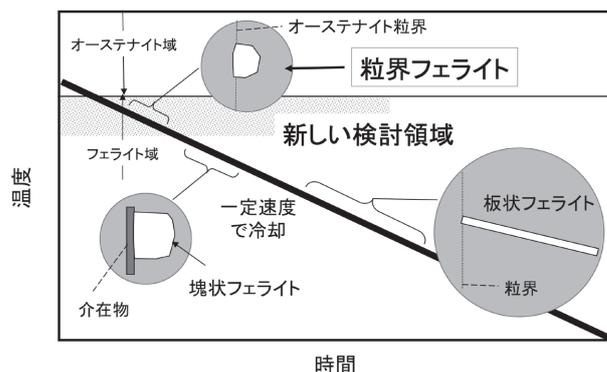


図8 粒界フェライトへの着目が新しい研究領域に発展

はオーステナイト粒間隔の40%程度という結果が出た。すなわち、間隔5ミクロンで粒界フェライト厚さは2ミクロンとなる。たとえば、オーステナイト粒が20ミクロンとすると75%の圧縮で、2ミクロンのフェライト粒組織を得られる可能性が見えることになる。実現不可能なプロセスではない。もし、動的再結晶で5ミクロンオーステナイト粒組織を作ってから変態させると、ほぼ均一な2ミクロンフェライト粒組織が作れるかもしれない。

このように幾何学的設計ができる面白さを味わうことができた。「X%のひずみで、相変化起点を均一に分散させ、粒径Dの均一変態組織を得る」という論理展開は、どこかイメージの具体性が曖昧である。得られた組織が均一であるからと言って、起点が均一に分散していたとは必ずしも意味しないし、その論理の確証を得るのは実験的に大変なことだ。オーステナイト粒界は現実的な存在なので、正に「絵に描いた」ように設計ができて面白かった。これらを合わせ技にすると、変態で作る等軸微細フェライト粒組織ができあがる。

さて、変形量の少ないオーステナイト粒界からは方位の揃った粒界フェライトが生成するが、ある程度以上の変形を受けたオーステナイト粒界からは方位ランダムな粒界フェライトが生成することを示した論文<sup>14)</sup>に依論文賞をいただいた。

### 3.3 Cu<sub>2</sub>Sの微細析出

硫化物は、延性、韌性を気にしていた者にとって、天敵のような存在だ。イオウ(S)も固溶状態で存在すると、これはまたオーステナイト粒界に高温で偏析し、見事に粒界割れを起こすことを体験していた<sup>15)</sup>ので、固溶SをMnで固定し、かつMnSの粗大化が起こらないようにするというのが、合金準備での細かい配慮だ。

日本の老廃スクラップの平均不純物組成(Cu-S-P)を急冷凝固して、ひとつの基準データとしようと決めて、そのようなサンプルを作って、基礎データを収集してもらった。ところがなんだか変である。急冷凝固サンプルとそれを焼鈍したサンプルの強度差がSEM組織の差からは説明しきれない。そこで、劉らはTEM観察した<sup>16)</sup>。炭化物の存在状態が違うかもしれないと思ったからだ。確かに急冷凝固サンプルで微細な析出物がある。だがなぜ急冷凝固材だけ微細な炭化物があるのだ？ 慎重な同定の結果がわが耳を疑うCu<sub>2</sub>Sの微細析出だった。硫化物でも析出強化する。確かに析出強化論は硫化物は効かないとは言わない。転位密度なども調べて、析出強化が両者の強度差を一番よく説明するという結論<sup>16)</sup>になった。

劉らは、さらに詳細に系統的な検討を進め、同じ組成でも冷却速度が遅いとやはりMnS系になり、急冷域でのみCu<sub>2</sub>S

系の微細析出が生成することを示すマップ(図9)を作った。生成自由エネルギーの比較、速度論的検討も含め、急冷の場合にCu<sub>2</sub>Sの微細析出が生じる理屈をほぼ明らかにした<sup>17)</sup>。しかも、P添加がCu<sub>2</sub>Sの微細析出を促進する効果があるというおまけもついて、幕の裏表で功罪が全くコントラストになるという減多に得られない体験ではなかったかと思う。これも低環境負荷と高機能の両立設計をめぐる研究<sup>18)</sup>の成果である。劉らは澤村論文賞の榮譽に浴すことができた。

数えてみると原著論文225編、査読付プロシーディング論文493編などに著者として名前を連ねさせていただいている。これほど多数の共同研究者に恵まれた。ただひたすら感謝する。「常識」を超えると直ちに「非常識」(全く新しい世界という意味で)ということは減多になさそうだ。だが、「非常識」に挑戦すると新しいテーマを見つけやすい。この稿をまとめた実感である。

### 参考文献

- 1) 長井寿：博士論文，東京大学，(1981)
- 2) 長井寿，石川圭介：熱処理，30 (1989) 1, 21.
- 3) 長井寿，高橋博喜，柴田浩司，藤田利夫：鉄と鋼，68 (1982) 7, 799.
- 4) 長井寿：金属，63 (1993) 10, 65.
- 5) O.Umezawa and K.Nagai：Metal.Trans.A, 30A (1999) , 2221.
- 6) 長井寿：ふえらむ，4 (1999) 11, 741.
- 7) T.Hanamura, F.Yin and K.Nagai：ISIJ Int., 44 (2004) 3, 610.
- 8) 守谷英明，長井寿，河部義邦，岡田雅年：鉄と鋼，83 (1997) 9, 599.
- 9) 土田紀之，友田陽，長井寿：鉄と鋼，89 (2003) 11, 1170.
- 10) 梅澤修，長井寿，石川圭介：鉄と鋼，75 (1989) 1, 159.
- 11) 梅澤修，長井寿，石川圭介：鉄と鋼，76 (1990) 6, 924.

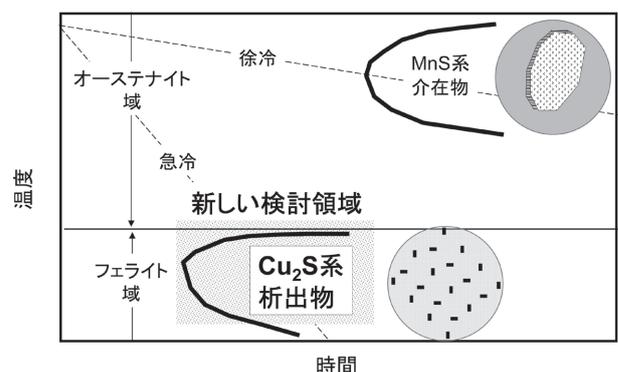


図9 Cu<sub>2</sub>S系析出物の発見が新しい研究領域に発展

- 12) T.Hanamura, H.Shibata, Y.Waseda, H.Nakajima, S.Torizuka, T.Takahashi and K.Nagai : ISIJ Int., 39 (1999) 11, 1188.
- 13) 鳥塚史郎, 長井寿 : 鉄と鋼, 88 (2002) 3, 148.
- 14) 鳥塚史郎, 梅澤修, 津崎兼彰, 長井寿 : 鉄と鋼, 86, (2000) 12, 807.
- 15) 長井寿, 柴田浩司, 藤田利夫 : 鉄と鋼, 67 (1981) 14, 2162.
- 16) Z.Liu, Y.Kobayashi and K.Nagai : Materials Transactions, 45 (2004) 2, 479.
- 17) Z.Liu, Y.Kobayashi, J.Yang, K.Nagai and M.Kuwabara. : ISIJ Int., 46 (2006) 5, 744.
- 18) 小林能直, 長井寿 : 鋼中不純物と急冷凝固組織, まてりあ, 43 (2004) 9, 730-736.

(2010年4月28日受付)