

---

厚鋼板研究 10 年の歩み

Recent Activities in Research of Steel Plate Products

天野 虔一(Keniti Amano) 川端 文丸(Fumimaru Kawabata) 久保 高宏(Takahiro Kubo)

---

要旨：

市場ニーズにもとづいた、厚鋼板に関する 10 年間の主要研究テーマは、高強度/高靱性化、TMCP とマイクロアロイングを組み合わせた鋼の高性能化とプロセス簡略化、溶接熱影響部 (HAZ) の靱性、溶接予熱省略を中心とする溶接と鋼材のマッチング、耐サワー/スウィート性を含めた腐食性、特殊鋼の研究、破壊/疲労/クリープなどの材料評価、および計算機メタラジーと分類できる。これらの研究から、種々の特徴ある厚鋼板製品が開発されその概要を述べた。そのなかでも、極低炭素ベイナイト組織を適用した新しい概念の熱処理および予熱フリーを可能にした、橋梁用の極厚 HT570 鋼が注目される。

---

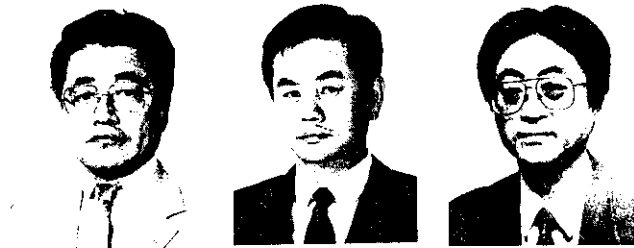
Synopsis：

Major research subjects regarding steel plates in this decade have been picked up along with the market needs. Included are the metallurgy of strengthening and toughening, advancement of TMCP and micro alloying, HAZ toughness control, welding metallurgy, corrosion science, alloying metallurgy, fatigue and fracture control, and computer metallurgy. These researches have enabled the development of many useful steel plates, such as 50 mm thick 9%Ni steel plates, high CTOD steels for offshore structures, cold cracking free HT980 steel plates for penstock, TMCP type pipe and pressure vessel steel plates for sour service, anti-corrosion steel plates for ballast tank of ships, 13Cr-5Ni martensitic stainless steel plates, 2 300 MPa maraging steel and so on. One of the highlights is the extremely low carbon bainitic steel plate, which is an as-rolled type thick 570 MPa plate being weldable without pre-heating.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

## Recent Activities in Research of Steel Plate Products



天野 虔  
Keniti Amano

技術研究所 厚板・条鋼研究部門長・工博

川端 文丸  
Fumimaru Kawabata

技術研究所 厚板・条鋼研究部門 主任研究員(課長)・工博

久保 高宏  
Takahiro Kubo

技術研究所 厚板・条鋼研究部門 主任研究員(課長)

### 要旨

市場ニーズにもとづいた、厚鋼板に関する 10 年間の主要研究テーマは、高強度/高靱性化、TMCP とマイクロアロイングを組み合わせた鋼の高性能化とプロセス簡略化、溶接熱影響部 (HAZ) の靱性、溶接予熱省略を中心とする溶接と鋼材のマッチング、耐サワー/スリート性を含めた腐食性、特殊鋼の研究、破壊/疲労/クリープなどの材料評価、および計算機メタラジーと分類できる。これらの研究から、種々の特徴ある厚鋼板製品が開発されその概要を述べた。そのなかでも、極低炭素ベイナイト組織を適用した新しい概念の熱処理および予熱フリーを可能にした、橋梁用の極厚 HT570 鋼が注目される。

### Synopsis:

Major research subjects regarding steel plates in this decade have been picked up along with the market needs. Included are the metallurgy of strengthening and toughening, advancement of TMCP and micro alloying, HAZ toughness control, welding metallurgy, corrosion science, alloying metallurgy, fatigue and fracture control, and computer metallurgy. These researches have enabled the development of many useful steel plates, such as 50 mm thick 9%Ni steel plates, high CTOD steels for offshore structures, cold cracking free HT980 steel plates for penstock, TMCP type pipe and pressure vessel steel plates for sour service, anti-corrosion steel plates for ballast tank of ships, 13Cr-5Ni martensitic stainless steel plates, 2 300 MPa maraging steel and so on. One of the highlights is the extremely low carbon bainitic steel plate, which is an as-rolled type thick 570 MPa plate being weldable without pre-heating.

## 1 緒 言

厚鋼板の主要な用途である溶接構造物においてその設計技術は、最近の安全性や環境問題あるいはコスト低減などのさまざまな要求の中でますます高度化され、厚鋼板に要求される品質と機能も一段と厳格化し、また多様化されてきた。本報告では、これらの厚鋼板に要求される品質、機能すなわちニーズにもとづいて行われた厚鋼板研究の 10 年の歩みを、主に開発商品の技術思想、特徴を紹介することで概括する。

ここ 10 年間の主要研究テーマは、(1) 高強度/高靱性化の研究、(2) TMCP とマイクロアロイングを組み合わせた鋼の高性能化とプロセス簡略化の研究、(3) 溶接熱影響部 (HAZ) の靱性に関する研究、(4) 溶接予熱省略を中心とする溶接と鋼材のマッチングの研究、(5) 耐サワー/スリート性を含めた耐腐食鋼の研究、および (6) 合金成分最適化を中心とする特殊機能鋼の研究であり、これらは市場ニーズから設定されたもので商品開発に直接結び付いている。さらに製品開発のベースとなる、(7) 破壊/疲労/クリープなどの評価の研究や、(8) 計算機メタラジーである。

Fig. 1 に厚鋼板に関する市場ニーズと対応する研究課題 (前記

(1)~(6)) およびその研究を通じて川崎製鉄で開発された高性能厚鋼板をここ 10 年間に示す。

高強度/高靱性化の研究からは、低 YR の HT590 鋼<sup>①</sup>、化学プラント高温高圧操業用の TS590 MPa 級極厚 Cr-Mo 鋼、建設機械用の非調質 HT780<sup>②</sup>、PFBC ボイラー圧力容器用の常中温用極厚 HT610 鋼板<sup>③</sup>、および LNG 貯槽タンクの大容量化に対応した 50 mm 厚の 9% Ni 鋼板<sup>④</sup>などが開発された。TMCP とマイクロアロイングを組み合わせた鋼の高性能化とプロセス簡略化の研究からは、ラインパイプ用の高強度厚肉の X80 や X100 の開発<sup>⑤,⑥</sup>があり、さらに最近、極低炭素ベイナイト組織を適用した新しい概念<sup>⑦</sup>の、熱処理および予熱フリーを可能にした橋梁用の極厚 HT570 が開発された。

溶接熱影響部 (HAZ) の靱性に関する研究では、厳しい溶接部靱性を要求される海洋構造物用鋼で高強度、高 CTOD 鋼<sup>⑧</sup>の開発や、TMCP 製の LEG タンク用 5%Ni 鋼<sup>⑨</sup>、さらに電子ビーム溶接性にすぐれた原子力用 Mn-Mo-(Ni) 鋼<sup>⑩</sup>が開発されている。

溶接予熱省略を中心とする溶接と鋼材のマッチングの研究では、建築用の HT570、橋梁用の HT780<sup>⑪</sup>、ペンストック用の HT980<sup>⑫</sup>がいずれも、予熱を省略または低減できる新鋼材として開発された。

耐腐食鋼の研究からは、ラインパイプの分野では耐サワー用の X65<sup>⑬</sup>や耐 HIC 圧力容器用鋼<sup>⑭</sup>、また耐炭酸ガス腐食用の X65<sup>⑮</sup>が開発された。さらに、亜鉛鉄塔用の耐溶融亜鉛めっきわれ鋼<sup>⑯</sup>や、

\* 平成10年12月9日原稿受付



| Steel | (mass%) |      |      |       |       |       |      |      |       |  |
|-------|---------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|--|
|       | C       | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | Cu   | Ni   | Nb    |  |
| TM1   | 0.07    | 0.11 | 1.45 | 0.010 | 0.001 | 0.035 | 0.26 | 0.73 | 0.012 |  |
| TM2   | 0.08    | 0.38 | 1.46 | 0.004 | 0.001 | 0.033 | 0.20 | 0.20 | 0.025 |  |
| NM    | 0.16    | 0.37 | 1.49 | 0.011 | 0.003 | 0.017 | —    | 0.16 | 0.027 |  |

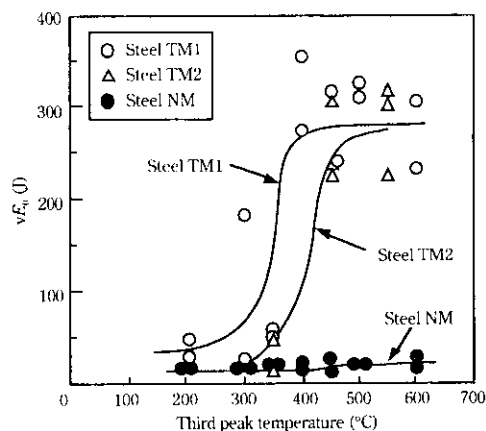


Fig. 2 Effect of the third reheating peak temperature on the toughness of the ICCGHAZ (The first and second reheating peak temperatures of simulated ICCGHAZs were 1400°C and 800°C, respectively)

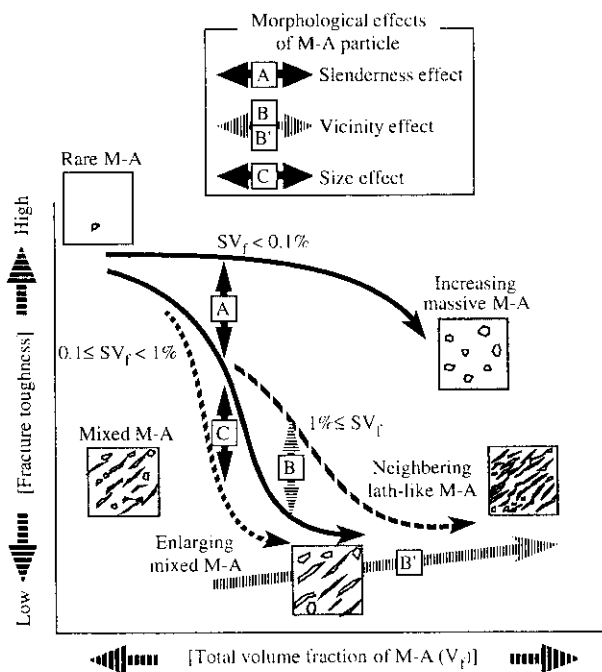


Fig. 3 Schematic explanation of morphological effect of M-A constituent on local brittle zone toughness

## 2.3 鋼材の耐環境腐食研究

### 2.3.1 耐サワー性の向上

10 年前の 1988 に世界で初めて、TMCP 製のオフショアラインパイプが建造されラインパイプ用鋼は本格的な TMCP 製の時代に突入した。鋼管素材は炭素当量の制限から大幅に解放され、さまざまな面で高級化が図られた。中でも、耐湿潤 H<sub>2</sub>S 環境（サワー）性の向上は特筆すべきである。また、この時期に鋼管強度の主流はそれまでの API5L-X60 から X65 (YS450 MPa 級) 時代に変わって

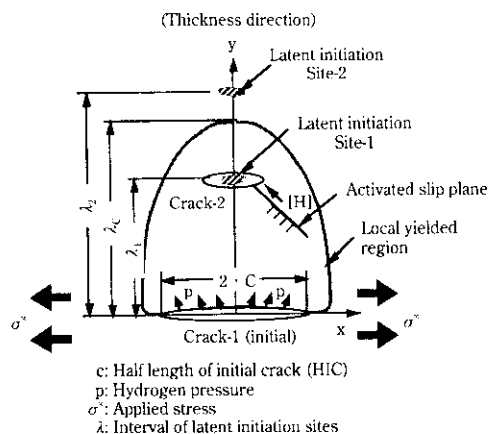


Fig. 4 Schematic explanation of the "latent initiation site model"

る。現在では X70 あるいは制限をつければ X80 級に届こうとしており、その基盤はこの過去 10 年の研究で確立された。

特に応力下で比較的低強度の鋼に発生する硫化物応力腐食割れ (sulfide stress corrosion cracking) あるいは SO (stress oriented) HIC の防止が最大の研究課題となった。研究成果は化学プラント圧力容器用鋼材の ASTM A516-70 鋼あるいは A841 鋼にも継承されている。

### (1) 耐 HIC 性の向上

湿潤 H<sub>2</sub>S 環境下で起こる典型的な水素誘起割れ (HIC) 防止技術は、1988 年以前の多くの研究によってほぼ確立されていた。耐 HIC 性向上技術は製鋼段階での Ca 添加による MnS の球状化形態制御にほとんど依存していたのである。しかし、1990 年代に入り一段と厳しい酸性環境 (NACE) 仕様を要求されることになる。1990 年代の研究は、低 C 化による中心偏析部分の硬さ低減とそれとともなう Mn の添加制限緩和という現在の成分設計の基礎を確立した。そして、その実用の基盤には成熟した TMCP による鋼材強化技術がある。

### (2) 耐 SOHIC 性の向上

耐 HIC 性の向上研究の成果は、耐 SOHIC 性の向上へと発展した。応力方向に垂直に進展するという特徴的な SOHIC 形成機構の研究から生み出された「潜在起点モデル」(Fig. 4)によってその伝播メカニズムが理解され、それに基づく組織制御が提案された。すなわち、潜在起点としての介在物あるいは硬質の第 2 相であるパーライトコロニーの微細分散が極めて効果的であり、特に現在 TMCP は第 2 相分散に積極的に利用されている。

### 2.3.2 耐海水腐食性の向上

1992 年から 1995 年にかけては、タンカーの原油流出事故などの反省から二重底構造が義務づけられ、それとともなうメンテナンスの困難さからメンテナンスフリーの鋼材要求が高まった時代である。こうしたニーズに応えるため、海水による乾湿繰り返し環境に耐え、防錆塗料の塗り替え期間を大幅に延長できる鋼材の研究開発が進められ、バラストタンク用 490 MPa 級鋼<sup>7)</sup>が誕生した。

## 2.4 極低温靱性

世界的な環境問題から液化ガス需要への気運が高まりは、輸送・貯槽に用いられる低温用鋼材への新たな要求を創出した。その代表的なものは、液化天然ガス (LNG、沸点 -163°C) タンクに用いられる 9%Ni 鋼である。特に近年の LNG タンクの大容量化傾向を反

Table 1 Chemical compositions of extremely-low carbon bainitic steel

|       |      |      |       |       |       |       |        |               |       | (mass%) |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------|-------|---------|
| C     | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | Ti    | N      | Others        | Ceq   | Pcm     |
| 0.012 | 0.30 | 1.56 | 0.009 | 0.003 | 0.029 | 0.011 | 0.0028 | Cu, Ni, Nb, B | 0.294 | 0.137   |

$$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

映し将来的に予想される最大厚 50 mm の 9%Ni 鋼板を製品化した<sup>9)</sup>。その特徴は、0.08% までの Si 量低減と 0.010% の微量 Nb 添加にある。Si 量の低減は海洋構造物用材料の LBZ 改善技術を継承した。Nb 添加は鋼板の析出強度化と HAZ 結晶粒微細化による HAZ の高靱性化を両立させた。

開発された鋼板の特性および構造物への適用性は、顧客との共同研究により評価されている。特に低温ガスタンクに対しては、溶接部からの脆性破壊発生を阻止する特性と、万一破壊が発生した場合に溶接部および鋼板母材でその伝播を停止する特性が要求される。本鋼板についても、破壊靱性試験結果と破壊力学に基づいた評価が行なわれ、構造物に適用した場合の脆性破壊に対する高い安全性が示されている。

一方、アンモニア混載可能な LEG タンカー用に NV 船級規格に基づいた最大板厚 34 mm の 5%Ni 鋼板の開発が行なわれた。低 Mn 化と強度補償のための Nb および B 活用と直接焼入れ法が適用され、一層の高靱性化が実現している<sup>10)</sup>。

### 3 極低炭素ベイナイト鋼の研究

#### 3.1 コンセプト

鋼材の改良は常に溶接性と表裏一体で進められてきたが、高強度化が進むにつれその両立は困難となる。特に TS590 級では製造プロセスとして調質と非調質が混在した強度領域であり、溶接性の飛躍的な改良と同時に非調質化が熱望されていた領域であった。こうした社会的なニーズを念頭に、組織一定制御という新しいコンセプトを持つ鋼の研究を行い実用化した。このコンセプトは、鋼の含有炭素量をフェライトへの最大固溶限（約 0.02 mass%）以下とした上で組織を比較的高強度のベイナイト単相に制御（Fig. 5）するものである。こうすることで、10 数 mm から 100 mm に近い板厚まで 590 MPa 級の強度を非調質で安定して維持することが可能となった。この鋼の特徴を利用することにより、完全予熱フリーが可能となった。さらに、母材のみならず溶接部靱性も入熱への依存度を低下することが可能となった。極低 C ベイナイト鋼の特徴はつぎの通りである。

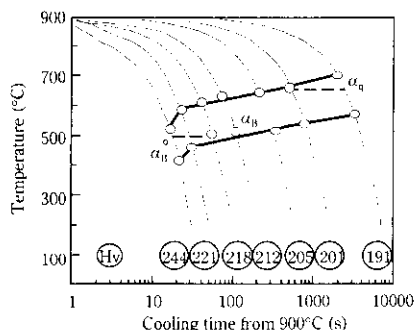


Fig. 5 CCT diagram of extremely-low carbon bainitic steel

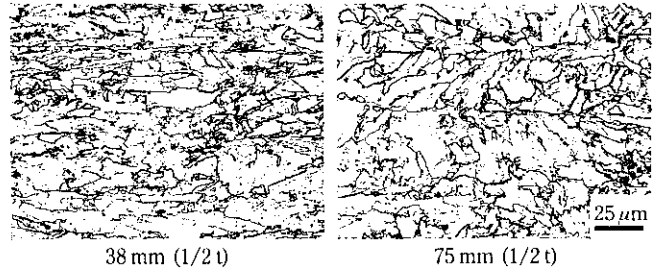


Photo 1 Examples of microstructure of 570 MPa grade extremely-low carbon bainitic steel plates

- (1) 冷却速度依存性が極小化され板厚によらず、圧延後空冷ままでの高強度化が可能である。
- (2) 限界に近い高冷却速度で変態した場合においてもマルテンサイトを生成しないため<sup>9)</sup>、良好な溶接性が得られる。
- (3) M-A constituents の生成がなく溶接入熱増大時でもこの HAZ 組織が維持されるため、大人熱溶接（～20 kJ/mm）が可能である。

#### 3.2 570 MPa 級極低炭素ベイナイト型厚鋼板製品の特性

極低炭素ベイナイト鋼の特徴を利用した板厚 75 mm までの 570 MPa 級厚肉高張力鋼板新製品の代表化学組成を Table 1 に示す。開発鋼の Ceq および Pcm は従来の 570 MPa 級鋼に較べて極めて低い。Photo 1 に熱間圧延後、空冷ままで製造された 38 mm および 75 mm 厚鋼板のミクロ組織を示す。いずれも、グラニュラ・ベイニティック・フェライトと呼ばれる極低炭素ベイナイト組織で板厚依存性がほとんど見られない。また、溶接方法および入熱条件によらず高い衝撃吸収エネルギーが得られている。75 mm 厚材の JIS Z 3158 による y 形溶接割れ試験結果では、完全予熱フリーの溶接性を確認しており、実橋への適用が始まった。

### 4 超高強度化の研究

過去 10 年には 1000～2300 MPa 級の超高強度化の研究も大きく進展し実を結んでいる。将来的な海上輸送手段の革新を目指した夢の超高速船を可能とした 13Cr-5Ni 鋼と、国内宇宙開発技術を支える国産ロケット材のマルエージ鋼である。

#### 4.1 960 N/mm<sup>2</sup> 級 13%Cr-5%Ni マルテンサイト系ステンレス鋼

本鋼は旅客用超高速水中翼船に用いられており、高速運航中の船体浮上時の船体重量を安全に支持するための超高強度溶接用鋼ニーズから生まれた。それは、優れた耐海水腐食疲労強度や溶接性を兼ね備えて高い安全性を提供する新しい 13%Cr-5%Ni のマルテンサイト系ステンレス鋼である<sup>18)</sup>。少量の Nb 添加と適切な熱処理の研究がその基盤にあり、これに Mo 添加による海水中疲労強度の向上を付与し、耐力 890 N/mm<sup>2</sup> 以上、引張強さ 980 N/mm<sup>2</sup> 以上、0°C に

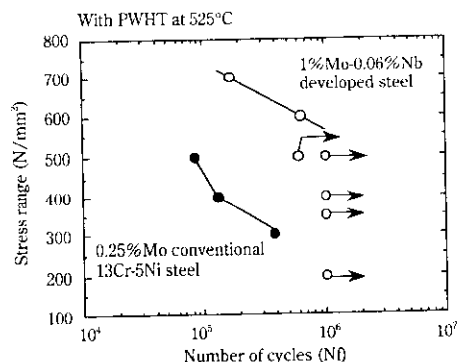


Fig. 6 Fatigue test results in 3.5%NaCl solution of 13%Cr-5%Ni steel

おけるシャルピー吸収エネルギー 100J 以上という高強度・強靭性を板厚 5.5~205 mm まで同一成分系で達成させた (Fig. 6)。同鋼は 75°C の予熱温度を可能とし、現在は超高速水中翼船の支柱および水中翼材料へ採用されている。

#### 4.2 2300 N/mm² 級 18%Ni 系マルエージング鋼

マルエージング鋼は金属間化合物の析出強化機構を高強度化に利用するもので、炭素鋼の変態材質制御と大きく異なっている。高強度化にともない、溶接部も含めた破壊靭性と耐遅れ破壊特性の重要性が高まり、B 添加による末再結晶領域の拡大、せん断型逆変態の利用による組織微細化技術や高靭化のための熱処理過程での金属間化合物の析出挙動の制御研究が行われた<sup>19)</sup>。こうした研究成果により、最適な成分・製造プロセスが導出され、引張強さ 2300 N/mm² 級の 18%Ni-10.5%Co-5%Mo-0.6%Ti-B 系超高強度鋼板の製造技術が確立された。製品は宇宙科学研究所のロケットモーターケースへ採用されている。

### 5 疲労強度

高強度鋼の開発が進む中で、その構造物への適用を阻害する要因のひとつに、溶接継手の疲労強度が軟鋼のそれと同等であるという問題がある。その主な原因は、溶接止端近傍に存在する鋼板の降伏応力に匹敵する大きな引張残留応力にある。そこで、溶接部に圧縮残留応力を導入して疲労強度を向上させるための技術開発が、科学技術庁金属材料技術研究所との共同研究として行なわれた<sup>20)</sup>。

圧縮残留応力を発生させる手段としては、溶接終了後の冷却過程における溶接金属のマartenサイト変態膨張を利用した。通常の溶接材料では、300°C 以上の高温で変態が終了するため、その後の温度低下にともなう収縮歪により引張残留応力が発生する。これに対し、変態開始温度 (Ms 点) が低く室温で変態が終了する溶接材料であれば、室温で溶接金属が膨張した状態にあるため、圧縮残留応

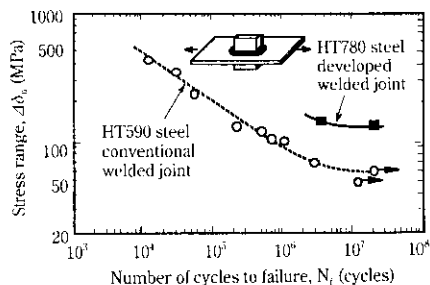


Fig. 7 S-N curves of non-load-carrying fillet welded joints

力を導入できることになる。この条件を満たす溶接材料として、10%Cr-10%Ni-Fe 系材料を開発した。それを用いた角回し溶接継手の疲労強度を Fig. 7 に示すが、疲労強度の飛躍的向上を達成できた。現在、高強度鋼の適用拡大、構造物の疲労に対する安全性向上のため、本技術の実用化に向けた検討を継続している。

### 6 コンピュータメタラジー

コンピュータメタラジーは、金属学的諸現象を熱力学に基づく冶金素過程の金属物理学理論による定式化と熱間加工再現装置を用いた実験による諸元および諸現象の定量化により、計算によって圧延後の組織と機械的性質を予測することを可能とする技術である。具体的には炭素化物析出現象予測によるオーステナイト ( $\gamma$ ) → フェライト ( $\alpha$ ) 変態のシミュレーションや制御圧延・加速冷却工程における  $\gamma \rightarrow \alpha$  変態に及ぼす制御圧延後の冷却条件の影響のシミュレーションとそれに基づく  $\gamma$  および  $\alpha$  粒径変化のモデル化などの組織予測技術から構成される<sup>21)</sup>。まだ改良すべき点は多いものの、過去 10 年の技術研究でその基盤が完成されたといつてよい。この分野では比較的熱間圧延工程を対象として広く研究されたのに対して、当社は厚鋼板圧延工程への適用に積極的に取り組んだ点が特徴として挙げられる。

### 7 結 言

厚鋼板製品に対するニーズはますます、多様化するとともに、鋼材メーカーから最終需要家までのトータルのプロセスのなかで、コストが最少となる観点での商品開発が要求される。顧客と連携を密にした新製品開発の重要性がますます増大し、したがってそれに適した研究テーマの設定が今にも増して重要になるであろう。また最近、溶接構造物に対しローカルアプローチを用いた、より合理的な破壊靭性要求方法の提案<sup>22)</sup>もなされ始めており、今後そのような視点に立った上での新たな厚鋼板開発および溶接施工法開発のための研究の必要性が生じると思われる。

### 参 考 文 献

- 1) T. Koseki, K. Uchida, and K. Amano: The 8th Int. Congress on Heat Treatment of Materials, ISIJ, (1992), 45
- 2) 天野慶一, 谷川 治, 志賀干晃, 奥村健人: 川崎製鉄技報, **21** (1989)1, 19
- 3) 飯倉教次, 弟子丸慎一, 中川 一郎: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 162
- 4) 久保高宏, 大森章夫, 谷川 治: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 167
- 5) F. Kawabata, K. Amano, O. Tanigawa, T. Hatomura, T. Yamaura, and Y. Sujita: 1992 Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Sym., ASME, (1992), 597
- 6) F. Kawabata, M. Okatsu, K. Amano, and Y. Nakano: Proc. of the 2nd Int. Pipeline Technology Conf., Ostend, Belgium, Sept. (1995) II, 263-271
- 7) 岡津光浩, 林 透, 天野慶一: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 131

- 8) 久田光夫, 三宅孝則, 川端文丸: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 142
- 9) 森影 康, 川端文丸, 天野慶一: 材料とプロセス, **8**(1995), 1352
- 10) 西森正徳, 内田 清, 松崎明博, 天野慶一: 材料とプロセス, **8**(1995), 666
- 11) 大井健次, 板倉教次, 川端文丸, 天野慶一: 溶接学会フォーラム, 溶接学会全国大会講演概要, 58(1996), 11-14
- 12) 板倉教次, 安田功一, 青木雅弘: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 174
- 13) F. Kawabata, K. Amano, T. Hatomura, J. Kudo, and T. Kawauchi: 9th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Sym., ASME, (1990)
- 14) 川端文丸, 谷川 治, 中川一郎: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 154
- 15) 村上宗義, 谷川 治, 木村光男, 波戸村太根生, 山浦晃央: 川崎製鉄技報, **24**(1992)4, 307-313
- 16) 小関智也, 天野慶一: 川崎製鉄技報, **25**(1993)1, 20
- 17) 塩谷和彦, 池田倫正, 山根康義, 川端文丸, 天野慶一: 材料とプロセス, **11**(1998), 456
- 18) 木村達巳, 岡 裕, 三代裕嗣: 川崎製鉄技報, **30**(1998)3, 148
- 19) 木村達巳, 松崎明博, 天野慶一, 谷川 治, 名山理介, 西田稔夫: 材料とプロセス, **7**(1994), 1848
- 20) 小関智也, 天野慶一, 谷川 治, 石井裕昭: 材料とプロセス, **6**(1993), 1839
- 21) 太田昭彦, 渡辺 修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島 敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏: 溶接学会全国大会講演概要, 61(1997), 520
- 22) 斎藤良行, 志賀千晃: 川崎製鉄技報, **21**(1989)3, 195-201
- 23) 南 二三吉, 大畑 充, 豊田政男, 有持和茂: 日本造船学会論文集, **182**(1997), 647