

(解説)

大入熱溶接用厚鋼板の進歩

山内 学

鉄鋼部門・加古川製鉄所・技術研究センター

Developments in Structural Steel Plates for High-heat Input Welding

Manabu Yamauchi

New steel plates for high-heat input welding were developed by utilizing TiN dispersion technology (KST treatment) and a thermomechanical control process (KCL process). New steels make high efficiency welding in the construction of ships, buildings and bridges possible. This paper describes recent developments in steel plates for high-heat input welding including the use of microalloys and advanced steel plate manufacturing.

まえがき = 厚鋼板における重要特性である溶接性能，とりわけ溶接施工効率の観点から，大入熱溶接の適用が可能であることが構造物の建造コストの見地から最大の課題の一つである。鋼材に大入熱溶接を適用した場合に，溶接部，とくに溶接熱影響部 (HAZ) の靱性が溶接入熱の増大にともなって劣化するため，構造物の安全性の観点から靱性確保が重要な技術課題である。

造船業界における大量物流時代に呼応した大型船舶の建造需要，都市部に建設される超高層ビル，大型橋梁あるいは合理化橋梁の要求など，厚板における高強度化および高靱性化の要求にも合わせて対応しながら新しい大入熱溶接用鋼板が次々に開発され今日に至っている。

大入熱溶接対策技術は，造船業界における片面溶接の適用を契機として，合金設計の観点からは微量添加元素の活用による靱性確保の手段が 1970 年代の後半に各鉄鋼メーカーで提案された。微量のチタン (Ti) を添加し，チタンナイトライド (TiN) の析出物による溶接時のオーステナイト粗大化抑制効果やフェライト析出核の増加効果を活用する手法として，当社では KST (Kobe Super

Toughness) 処理が大入熱溶接対策技術の根幹の技術となっている¹⁾。

いっぽう，厚鋼板における新しい製造法である TMCP (Thermomechanical Control Process) 技術が 1980 年代に出現し，それまでの微量元素の活用技術に加えて圧延工程で組織を制御することにより高強度化が可能となり，結果として炭素当量 (Ceq) を低減することで一層の効果を発現させる技術が確立され飛躍的に大入熱溶接部の性能が向上し，今日に至っている。

第 1 表に造船用を中心として発展してきた大入熱溶接用鋼の開発の経緯を示すが，本稿では厚板製造にかかわる製鋼から圧延に至る一連の関連技術の向上と連携して実現した，当社の大入熱溶接用鋼の開発の経緯と現状について振り返り，あわせて今後の展望について述べる。

1. Ti 処理技術の確立 (1975 年頃まで)

1960 年代初頭に，造船所の大ブロック化を契機に外板の板継ぎ工程で従来の両面溶接から片面自動溶接が実用化され，大板の反転工程の省略が図られた。あわせて

第 1 表 大入熱溶接用鋼板の開発の経緯

Table 1 History in the development of steel plates for high-heat input welding

Year	Environment	Newly Developed Steel	Manufacturing Technology
~ 1970	One-side Submerged Arc Welding		
	Specification of High Tensile Strength Steel Plates in IACS (1971) Oil Shock	High Tensile Steel for Shipbuilding (KST50) (t 30mm, Welding Heat Input 10kJ/mm)	KST Treatment (Utilized Technology of TiN)
~ 1980	Mass Production of X70 for Linepipe	Controlled Rolled Type YP355 for Shipbuilding (t 40mm, Welding Heat Input 25kJ/mm)	Air-cooled Type TMCP Technology (KONTROLL Process)
	Growth of Korean Shipyard (High-efficient Ship Construction in Japan)		
~ 1985	Large Scale Offshore Structures for Oil and Gas Production	KCL Type YP355 for Shipbuilding (t 50mm, Welding Heat Input 50kJ/mm)	Water-cooled Type TMCP Technology (KCL Process)
	Rush in Construction of High-rise Buildings (Heavier in Thickness)	Heavy Thick Low Temperature Steel Plate for Arctic Offshore Structures	Direct Quenching Technology
~ 1990	Large Container Ships	Heavy Thick TMCP Type YP325, 355 for Building (t 100mm, Welding Heat Input 100kJ/mm)	Assurance Technology Preventing Distorsion after Frame Cutting
		Heavy Thick YP390 for Shipbuilding (t 65mm, Welding Heat Input 40kJ/mm)	Plate Rolling Control Technology with High Accuracy
~ 1995	Skyscrapers with Long-span	YP460 for Shipbuilding (t 55mm)	
	Decrease Life-cycle Cost in Construction of Bridges	HT590 for Building (SA440)	
Now and Future	High Performance in Steel Properties with Heavy Thick and Higher Strength	Coastal Weathering Steel	Residual Stress Control Technology
		Heavy Thick High Tensile Steel (over HT590) for High Heat Input Welding	New Methods Improving HAZ Toughness under Higher Amount of Alloying Addition (HT590 ~ HT780)
		New Type of TMCP Steel Plates Contributing High Accuracy in Welding Fabrication	Manufacturing Technology of TMCP Steel with Non-residual Stress

外板の立て向き溶接にエレクトロガスアーク溶接の適用も日本の各造船所で開始され、溶接入熱 10kJ/mm 以上の大入熱溶接の採用により建造能力の向上が図られた。

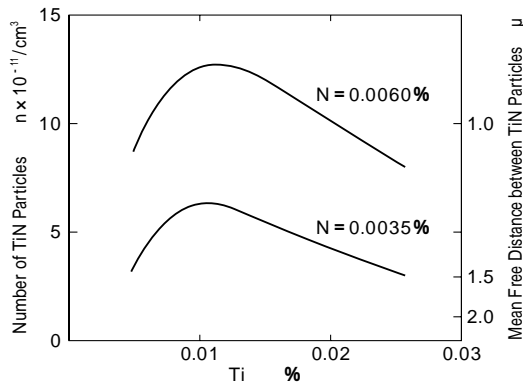
使用される鋼材は軟鋼を主体としていたのに対して、1970 年代に入ってオイルショックを契機に船舶の大型化、省エネルギー化、さらにコスト低減を目的に高張力鋼板の採用が図られた。これを受けて、1971 年に YP315N/mm² および YP355N/mm² 級の高張力鋼板が IACS (国際船級協会) で制定された。しかし、当時の鋼材は圧延ままや焼きならし熱処理で製造されていたため、高張力化を達成するための炭素当量が高く、溶接部、とくに溶接熱影響部の靱性が劣化するという問題があり、軟鋼にくらべてより低い入熱での溶接を余儀なくされていた。

鋼に 10kJ/mm 程度以上の大入熱溶接を施すと、投入される溶接熱量により鋼材が高温にさらされるとともに溶接後の冷却が緩慢になる。結果として溶接熱影響部の結晶粒が粗大化し、同時に靱性の劣悪な上部ベイナイトと呼ばれる組織が出現することになる。

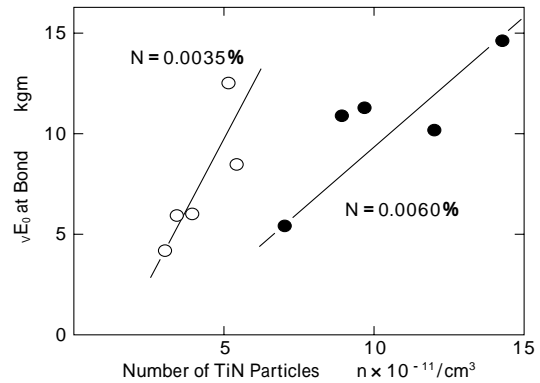
大入熱溶接を適用した場合の HAZ 靱性の劣化をいかにして防止し、脆性破壊に対する安全性を確保するかというのが最大の課題であった。

この技術課題に対して、金属組織や結晶粒の観点から各種添加元素の効果を検討し、微量の Ti 添加が有効であるという知見に基づいて技術確立されたのが KST 処理である。

鋼中に存在する窒素 (N) 量に応じて Ti を適切量添加し、TiN を微細に分散させることが重要であり (第 1



第 1 図 溶接熱サイクルにおける Ti 量と TiN 粒子数との関係²⁾
Fig. 1 Relationship between Ti content and number of TiN particles in welding thermal cycle specimen



第 2 図 TiN 粒子数と溶接ボンド部の vE0 との関係²⁾
Fig. 2 Relationship between number of TiN particles and vE0 at bond

図、第 2 図)、その適正バランスを実製造で実現させる意味で製鋼における微量成分の調整、ガス成分のコントロール技術を含めて技術確立された²⁾。

これに加えて HAZ 靱性の劣化要因の統一的な解明の研究にもあわせて取り組み、靱性劣化の原因が上部ベイナイト中に生じる島状マルテンサイト (M-A) と呼ぶ硬化組織に支配されることを解明し、その生成機構から第 2 表に示す対策が要求される靱性レベルに応じて実施されている。大入熱溶接時の HAZ 靱性改善のためには、島状マルテンサイトの低減と Ti と N 量の適正バランスが重要であるという、現在の大入熱溶接用鋼板製造の基本原理に脈々と引き継がれている。

2. 非水冷型 TMCP 技術の活用(1975 年頃以降)

大入熱溶接用 YP355N/mm² 級鋼板として開発された KST50 は焼きならしで製造されるため、炭素当量は約 0.40% 程度と高く、加えてニオブ (Nb) やバナジウム (V) という析出強化元素が多量に添加されていた。

大入熱 HAZ 靱性の劣化に対しては、その原因である上部ベイナイト組織の低減がきわめて有効であるということが判明していたが、圧延ままあるいは焼きならし熱処理においては、鋼材の強度は合金元素に依存していたため炭素当量の低減という有効な手段が実現できなかった。

少ない合金元素で高い強度を実現する技術として、鋼板の結晶粒を微細化するために圧延時の温度を制御し、低い温度で圧延を完了させる技術が 1950 年代にヨーロ

第 2 表 溶接熱影響部の脆化要因と靱性向上対策

Table 2 Metallurgical factors causing brittleness in HAZ and methods for enhancement in toughness

Factor	Cause	Method for Enhancement in Toughness		
		Metallurgical Method	Actual Method	
Grain Size	Enlargement of Grain by Reheating under Welding	Control Grain Growth (Dispersion of Fine Precipitations Stable at High Temperature)	<ul style="list-style-type: none"> Dispersion of Fine TiN, BN, REM-oxysulfide, Ca-oxide and Ti-oxide Fraction of Ti/N 	
Microstructure	Formation of Coarse Upper Bainite Microstructure with M-A Constituent	Formation of Fine Ferrite Pearlite Microstructure		Increase Ferrite Nucleation Sites in Grain
				Promotion of Ferrite Transformation
			Refining of Ferrite Grain Size	
		Decreasing M-A Constituent	Ultra Low C-Nb-Ti	
Matrix	Impurity Element	Decreasing Impurity Elements	Low C, Low Ceq, Low Si et al.	
	Excess of Precipitation Hardening Particles	Restrict of Adding Microalloy Elements for Precipitation Hardening	Lowering P, S, N	
		Addition of Alloying Elements Improving Toughness	Restrict Nb and V Addition	
			Addition of Ni	

ツパで考案されていた。しかし、経験的に採用されていた技術であり、積極的に結晶粒を微細化するという技術には至っておらず、強度確保の対策としては不十分であった。

オイルショック以降、代替エネルギーに対する要求が増大し、天然ガス輸送用のラインパイプの建設が活発化し、安価にかつ大量生産の可能な製造技術として非水冷型TMCPである制御圧延技術（当社ではKONTROLLプロセスと呼ぶ）の実用化が広く検討され、1978年以降ラインパイプX70の大量製造が開始された。

制御圧延技術は、 A_{r3} 変態点以上の温度における圧延においてオーステナイト結晶粒を再結晶により微細化するとともにオーステナイトの未再結晶域で変形帯（転位）を導入するという冶金現象に基づいて、高強度化ひいては炭素当量の低減を実現する技術である。

従来の圧延ままに比較して圧延機にかかる負荷の増大を克服するための設備改造、圧延中の鋼板の温度履歴を精度良く予測する技術³⁾、さらには圧延時の形状確保に必要な高精度な圧延荷重予測などの高度圧延制御技術^{4) 5)}の実現を踏まえて達成された技術である。

本技術を活用し、従来添加されていたNb, Vを0.02%以下に削減し、さらに炭素当量を0.38%程度以下にすることで、溶接入熱25kJ/mmに対応できる大入熱溶接用鋼板が実用化され国内造船メーカーで多量に使用されることになった。

3. 水冷型TMCP技術の活用(1980年頃以降)

1980年代に入って韓国造船メーカーの台頭により、国内造船メーカーとの競争が激しくなり、溶接施工時の各種規制（ショートビードの禁止、高水素系溶接材料の使用制限、入熱制限）を緩和でき、溶接施工能率の向上が可能な画期的なYP355N/mm²級鋼板が望まれるようになった。

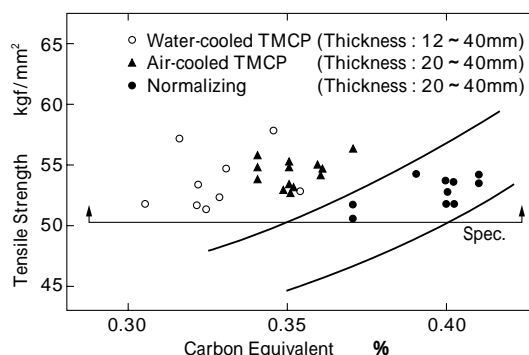
圧延直後の鋼板にオンラインで水をかけることにより強度を上げるという観点から、1980年代の初頭に鉄鋼メーカー各社がこぞって実用化し、今日の主流となっている水冷型TMCP技術を構築するに至った。この技術の実用化には鋼板の平坦度確保の課題があり、圧延段階での形状の制御、圧延後の水冷における均一冷却技術⁶⁾、さらには水冷時に発生する鋼板に内在する残留応力に起因した鋼板切断時の変形を保証する技術⁷⁾などを確立し解決するに至った。

当社における水冷型TMCP鋼板の製造状況を写真1に示すが、KCL (Kobe Steel's Controlled Rolling and Accelerated Cooling) プロセスと呼んでいる本技術を活用することで、第3図に示すように大幅な炭素当量の低減とともにNb, Vなどの元素を添加することなくYP355N/mm²級鋼板の製造が可能となり^{8), 9)}、溶接入熱50kJ/mmまで対応できる大入熱溶接用鋼板が製造されるようになった。

本製造法による鋼板は、すでに200万トン以上の製造実績を有するにいたっている。なお、鋼材の大入熱溶接化に呼応して溶接材料の開発も順次おこなわれ、各種フ



写真1 オンライン水冷設備の概観⁹⁾
Photo 1 Outlook of online accelerated cooling equipment



第3図 炭素当量と鋼板の強度の関係⁹⁾
Fig. 3 Relationship between carbon equivalent and tensile strength of steel plate

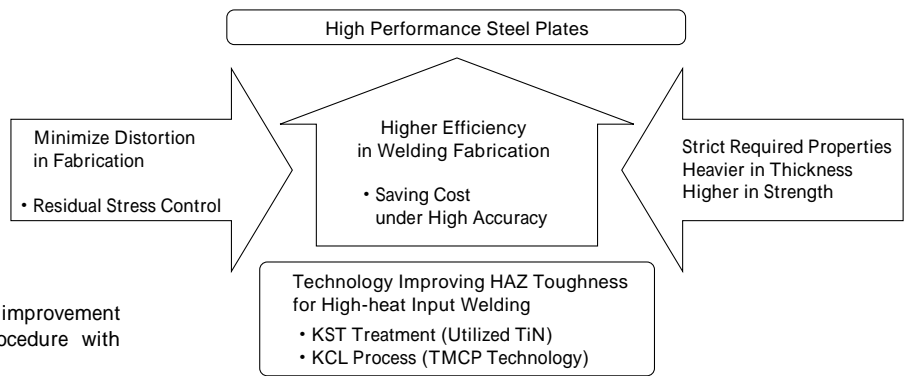
ラックスの改良、多電極化などの高速、高溶着化技術も同時に実用化され¹⁰⁾、国内造船メーカーにおける大入熱溶接技術の確立は国際競争力の確保に大いに貢献できたといえる。

4. 高強度、厚肉化対応技術(1985年頃以降)

造船用途として発展してきたKCL型大入熱溶接用鋼板は、内需拡大の時期とあいまって社会資本としての建築および橋梁の分野にも広く適用されはじめた。とくに、建築の超高層化、大スパン化に対応して厚肉のYP355N/mm²級鋼板が要望され、1987年にKCL-A325, A355として板厚が40mmを超え、100mmに達する鋼材が開発された¹¹⁾。

厚肉化の要求に対応するため、1985年には圧延後のより早い冷却速度を実現するための冷却設備の増強、さらには冷却にともない鋼材中に含有する水素(H)に起因する内部欠陥の発生を防止するための製鋼における不純物(P, S)低減技術が順次確立された¹²⁾。

さらに、1990年代中頃には国際的な貨物輸送を大型のコンテナ船でおこなう動きが活発化し、開口部が大きいという船形の特徴から船側上部には厚肉(65mm程度)で高強度(YP390N/mm²級)、かつ超大入熱(50kJ/mm)溶接が可能な鋼板が要求された。低い炭素当量で高強度化を達成する観点から、より強い冷却が可能な技術の活用と微量のNbとボロン(B)を添加することによる変態強化作用を活用する¹³⁾という、これまでの大入熱溶接対策技術を駆使して厚肉のYP390N/mm²級鋼板を実現



第4図 溶接施工効率向上と高機能化に対応する新しい鋼材

Fig. 4 New type of steel plates for improvement the efficiency in welding procedure with high performance

することができた。

本鋼板は、造船での大入熱溶接適用における現在の最大の課題に対応可能な鋼板であり、従来の炭酸ガス溶接での多層盛溶接にくらべて10倍の高効率を可能とするもので、これまでに約1万トンの実績を誇るにいたっている。さらに高強度なYP460N/mm²級の厚肉鋼板(板厚:55mm)の開発も完了しており、今後の実用化が期待される。

5. 今後の展望

大入熱溶接用鋼は、微量のマイクロアロイ元素の活用と高度な圧延工程での作り込み技術の総合技術として確立され、造船、建築、および橋梁の用途に幅広く使用されるに至った。とくに、造船分野ではYP390N/mm²級の板厚65mmを1パスで溶接できる鋼材の実用化までに至っている。

今後の発展を考えるにあたっては、従来の高効率溶接という尺度にとどまらず、溶接施工全体の効率化まで視野にいれた新しい概念の鋼材として生まれかわることが必要であると考えている。具体的には、溶接に先立つ切断時に生じる変形、溶接中の溶接欠陥の発生を防止する鋼材、さらには構造物の工作精度の向上に寄与する鋼材が必要とされている。

その意味において、TMCP技術を中核とする大入熱溶接用鋼板においては鋼材製造過程で不可避免的に残留応力を包含することになり、その低減が重要な技術課題であり製造技術の一層の高度化が要求されている。

さらに、鋼材の高機能化、たとえば建築における低降伏比化(低YR化)、橋梁における高耐候性能、加えて高強度化として建築の大スパン化を可能とする厚肉のYP440N/mm²(建築用SA440)などの要求も増大している。

C-Mn鋼に微量のマイクロアロイ元素を含有する成分系を前提に開発されてきた大入熱溶接用鋼板に対して、これまで以上に多量の合金元素を必要とする高強度かつ厚肉の鋼材に対する大入熱溶接対策技術が今後の課題である。鋼材の製造に加えて、溶接金属そのものに対する要求品質も同時に高度化しており、アーク溶接における新しい溶接技術の開発も今後の大入熱溶接用鋼板の実用化における重要な技術課題である。

これらの新しい時代に対応する鋼板の実現には、TMCP技術を発展させたプロセスメタラジとしての合金元素の固溶、析出、変態強化作用の定量化技術を通じ

た材質造り込み技術によって、従来の概念と異なるプロセス設計、成分設計の確立が望まれる。実用化にさいしては、既存の焼き入れ焼戻しを対象とした高強度鋼材の規格体系変更も視野にいれた活動が必要となろう。

より高強度、厚肉化さらには高機能化を具備した大入熱溶接用鋼板は、新たに開発に取り組まれている各種溶接法との組み合わせにより、安価で安全かつ長寿命な社会資本としての各種溶接構造物に適用されていくであろう。その意味で第4図に示すように、単に溶接時の効率化にとどまらず溶接のすべての工程(事前準備、欠陥の手直し、工作精度の手直し)の効率化に寄与する鋼材として、まさにハイパフォーマンス鋼としてとらえる時代になっている。

むすび=経済性と安全性の限りない追求の歴史の流れのなかで、とくに日本の造船業界の発展とともに歩んできた大入熱溶接用鋼板は、現在では各種溶接構造物に適用されている。高効率溶接を可能とするのみならず溶接施工の全工程における効率化に寄与する鋼材として、従来の大入熱溶接性能に加えて、溶接作業時の手直し軽減、工作精度向上に対応しうる鋼材を提供していくことが21世紀の厚板製造の責務である。

参考文献

- 1) M. Tomita et al.: Seminar on the Use of Steel in Shipbuilding, Katowice (Poland) 15-19 (September 1980).
- 2) 笠松 裕ほか: 鉄と鋼, Vol.65, No.18 (1979) p.1222.
- 3) 熊野征晴ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.36, No.3 (1986) p.47.
- 4) 大江憲一ほか: 鉄と鋼, Vol.79, No.3 (1993) p.86.
- 5) 森本禎夫ほか: CAMP-ISIJ, Vol.11 (1998) p.350.
- 6) 高橋出雲男ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.35, No.4 (1985) p.87.
- 7) 大江憲一ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.4 (1991) p.52.
- 8) 高嶋修嗣: 新しい製造法による鋼材(TMCP)の溶接構造物への適用に関するシンポジウム, 日本造船学会(1983), p.93.
- 9) 梶 晴男ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.33, No.4 (1983) p.4.
- 10) 長谷 薫: 第159/160回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1996) p.165.
- 11) 岩井 清ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.3 (1992) p.2.
- 12) 大西稔泰ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.36, No.1 (1986) p.3.
- 13) 山内 学ほか: 鉄と鋼, Vol.70, No.15 (1984) p.S627.