

技術トピックス



UDC 669.14.018.295 : 621.791.01

我が国における溶接構造用高張力鋼の発展とその特徴

— 鉄鋼の歴史のトピックス (5) —

柴 田 浩 司*

History and Its Characteristics of Weldable High Tensile Structural Steels in Japan

Koji SHIBATA

1. はじめに

現在、日本の多くの技術分野で今後のあり方が議論されている。鉄鋼分野では以前からこの問題に対するとり組みがなされており、1974年、日本鉄鋼協会に鉄鋼科学・技術史委員会が設けられたのも、そのひとつのあらわれと考えられる。この委員会の4つのワーキンググループ(W.G.)のひとつ、材料 W.G. の研究目的は、将来の展望を鉄鋼材料史の中から探ろうとするものであった。この W.G. では我が国の溶接性高張力鋼の発展過程がおもに研究されたが、その成果は現在内山郁主査によりまとめられている。

本文は我が国における高張力鋼の歴史のトピックスを概観し、全体の特徴を著者なりにまとめたものである。紙面の都合で十分深められなかつた点、すぐれた開発や研究成果の多くに触れることができなかつた点についてはお許し願うことにする。最近における技術開発や研究成果については、すぐれた解説書¹⁾やレビュー²⁾があるので参照されたい。

2. 非調質高張力鋼から調質高張力鋼へ

2.1 JES D.S., H.T. の制定

日本ではじめて高張力鋼が規格化されたのは1940年のことである。D.S. とは Ducol 鋼のことで、高炭素系高張力鋼の靱性を改善するために C を Mn で置換した鋼のひとつとして英国で開発された。歩留りなどの理由で Mn が D.S. 規格内に入りにくかつたため、救済措置として H.T. が制定されたとも言われている。

2.2 戦時中の研究

諸外国では1930年頃から溶接技術が進歩し、溶接性高張力鋼が開発されるようになった。しかし事故が多発し、その対策の中から溶接性の試験方法、溶接技術が発

達した。第2次大戦が始まり我が国ではこうした情報が入りにくくなつたが、海軍を中心に従来の D.S. や H.T. と同じように大量生産ができ、強度、溶接性にすぐれた鋼をつくるという目標のもとに研究が行われた。Alで結晶粒を微細化した、Si キルド C-Mn 鋼 St52 を開発していたドイツからも意見を聴いたほうがよいということになり、溶接技師 H. SCHMIDT 博士らが潜水艦ではるばる来日し技術指導した。終戦を迎えたため St52 の生産も利用もほとんどなされなかつたが、St52 の製造技術と溶接技術はのちに日本の 50 キロ高張力鋼の製造と溶接船の建造に大きく貢献した。

2.3 非調質 50 キロ高張力鋼の製造と使用

戦後、1951年に50キロ鋼の研究がはじまつた。日本造船研究協会、日本溶接協会などが中心になつて研究を行い、1954年には戦後はじめての溶接構造物、相模大橋が完成した。その後東京タワー、鉾石運搬船白鵬丸などがつぎつぎと造られた。

2.4 非調質(焼ならし型) 60キロ高張力鋼の開発研究

1954年、防衛庁からの委託により日本造船研究協会が鉄鋼メーカーを集めて、60キロ鋼の研究を開始した。米国の Vanity 鋼をモデルにして V, Ti, Ni, Cr, Moなどを添加したが、55キロ級がせいぜいで衝撃値も低かつた。

2.5 T-1 鋼の出現

それより前、1952年米国 US スチール社によりプレッシャークエンチ法を用いた 80 キロ級調質高張力鋼 Carilloy T-1 鋼が開発された。高張力鋼に焼入焼もどしを用いるという発想は画期的なもので、B, Ni, Cr, Moなどで焼入性を上げCは極力低くおさえたので、炭素当量(Ceq)が低下し溶接性が飛躍的に改善された。

このような発想がなぜ米国で可能となつたかについては定かでないが、Bain, Grossmann 以来の焼入性に関

昭和 55 年 12 月 26 日受付 (Received Dec. 26, 1980) (依頼技術トピックス)

* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

する研究の伝統、自動車用鋼を中心とする調質処理の発展などに関係しているようにも考えられる。

2.6 2H 鋼の開発と調質 60 キロ高張力鋼の製造

1956年、日本製鋼所により 2H 鋼 (High Strength and High Toughness Steel) が製造、販売された。この鋼は Si-Mn 系鋼を圧延後直接焼入れ、焼もどしたもので焼ならし型非調質鋼より強度、靱性、溶接性、経済性にすぐれていることが明らかにされた。そのため、翌年には鉄鋼各社はプレッシャーエンチ設備を技術導入し、調質 60 キロ鋼を大量生産する土台を築いた。2H 鋼の開発は非調質 60 キロ鋼の開発で行き詰まっていた壁をなんとかうち破ろうとする努力の結晶であつたが、日本製鋼所には旧海軍のアーマープレート用焼入装置が残っていたことも幸いしたものと考えられる。調質 60 キロ鋼は我が国の高度成長政策の波に乗って、高速道路の橋梁、ガスおよび原油タンクなどに大量に使用された。

2.7 ローラーエンチ設備の導入と調質 70, 80 キロ高張力鋼の製造

1967年、鉄鋼各社は新鋭厚板ミルの建設に合わせて、プレッシャーエンチに換えローラーエンチ設備を導入した。この設備を用いれば高圧高水量で焼入れできるので C_{eq} が大幅に低下した。1969年には調質 70 キロ鋼、翌年には 80 キロ鋼を高落差大容量の揚水式発電所のペンストックに大量使用するための合同委員会が組織され成果をあげた。1971~2年には、我が国の調質高張力鋼の製造技術水準の高さを世界に示した長大橋、大阪南港の連絡橋が建設された。建設に先立ち公団、地方公共団体、大学、設計コンサルタントの参加のもとに委員会が結成され、鉄鋼 6 社、施工会社 8 社と常時接触を保ちながら設計施工指針が討議、決定された。この委員会では使用鋼材に関してコンクール形式を採用したため、とくに真剣な研究が行われた。得られた成果は、本四連絡橋使用鋼材決定の基礎ともなつた。

3. CR (Controlled Rolling) の発展

1960年代の後半からアラスカ、カナダ、ソ連などで、石油あるいは天然ガスをラインパイプで輸送しようとする大規模なプロジェクトがつぎつぎに計画された。これらのラインパイプに要求されるのは、強度、靱性、溶接性に対する格段に厳しい仕様に加え、施工の都合から短期間に大量納入できることである。こうした要求に応えることは、Nb あるいは V 添加鋼の CR をもつてしてはじめて可能であつた。

3.1 Nb 鋼の出現

低合金鋼への Nb の使用は、結晶粒の微細化効果とともに外国で 1930 年代後半より報告されているが、溶接構造用鋼に用いられるようになったのは、戦後大きな鉱床が発見されてからのことである。圧延ままの Nb 処理鋼は靱性が低いとされていたが、低温圧延を中心とする

CR の採用はその対策のひとつであつた。

3.2 CR の出現と Nb(V) 鋼の CR

CR は 40 キロ級造船用材である C-Mn 鋼の靱性を向上させる対策の中から欧州で生まれた。最も早くから CR の研究を開始したのはスウェーデンで、1958年当時すでに低温域での圧下率の規制、変態域圧延も行われていた。Nb 鋼の CR 材は、1958 年頃から米国、オーストラリア、カナダで製造されている。

我が国ではこうした欧米の動向にヒントを得て、1963年、八幡製鉄が YES36, 40 (それぞれ $\sigma_y \geq 36, 40 \text{ kgf/mm}^2$) を製造した。他社もこれに続いたが日本鋼管の NKY 36N, 40N は IN 処理をも併用したものであつた。IN 処理は 1963 年石川島播磨重工により開発されたもので、AIN の析出をうまく利用し、同時に加熱温度と最終圧延温度を低くして、圧延まま材を製造する方法である。しかし我が国では前述したように、この時期の高強度・高靱性化への対応は調質鋼を中心にして行われた。

3.3 PRS (Rearlite Reduced Steel) の出現

1965年、英国の BISRA から PRS の開発が報告された。この鋼は C 量を思いきつて少なくして溶接性、延性、靱性を改善し、パーライトの減少による強度低下は Nb または V の析出と、低温大圧下、冷却速度制御によるフェライトの微細化により補うというもので、画期的な圧延まま材の開発であつた。PICKERING, このような開発は広範囲にしかも系統的に行われた物理冶金学的研究の成果であると述べている³⁾。また、BISRA では少なくとも 1963 年までに強度、遷移温度を結晶粒径、C 量、Mn 量、パーライト量の関係として表す回帰式を得ており、PRS の着想はこれらから容易に導かれるものである。したがって PRS の開発は、研究が構造材料を産んだ数少ない例のひとつと言えるかも知れない。BISRA ではその後も CR の研究が精力的に行われ、その水準は 1967 年の BISRA と英国鉄鋼協会の合同シンポジウム報告集⁴⁾にみられるように、きわめて高いものであつた。

3.4 我が国における CR の確立-TAPS (Trans Alaska Pipeline System) 用ラインパイプの製造

我が国の高度成長期における設備投資は、調質高張力鋼の発展をもたらしたが、同時に CR による非調質鋼の分野においても欧米を超越す基盤を準備した。すなわちこの時期日本の鉄鋼各社が新設した圧延ミルは、CR における低温域圧延をより容易なものとした。また米国などでは従来ラインパイプの外径は 42in 以下とされ、ミルもすべて 42in 以下用であつた。そのため 48in へと大径化した TAPS プロジェクトなどに応ずることができなかつた。1961年頃から一般造船用鋼にも使用されるようになった LD 転炉の普及も、高張力鋼の大量生産と

コストダウンに寄与した。また脱ガス、脱硫技術の発展、設備の拡充も、我が国の高張力鋼の性質向上に大きく貢献している。脱ガスに関しては、1959年よりDH式、RH式設備などが導入されているが、脱硫に関しては、1966年神戸製鋼により自社開発のシェーキングレール法による溶銑脱硫を用いた圧延まま60キロ鋼DMS60が製造されている。TAPS用ラインパイプの低温靱性に関する厳しい仕様が出されると、各社は競って N_2 吹き込み式、機械攪拌式などの脱硫設備を開発した。

かくしてTAPS用ラインパイプ材API規格X65($\sigma_y \geq 65$ ksi)高張力鋼は、すでにX60級ラインパイプの製造実績を有する諸外国をおさえて、全量約50万tを日本の鉄鋼3社が共同受注することに決定し、1969~71年に出荷された。

TAPSにつづくCAGSL(Canadian Arctic Gas Study Ltd.)プロジェクトのラインパイプには、さらに厳しい性質が要求された。強度はX70級となり大径化、厚肉化、天然ガス輸送特有の不安定延性破壊などへの対策も考えねばならなかつた。

これらのプロジェクトに対応する中で、日本のCR技術は確かな地位を築いたのである。

3.5 我が国におけるCRの発展

CRの導入期から今日に到るまで、我が国では鉄鋼メーカーを中心にCRに関する広範な研究が行われた。1972年までの成果の一部は、鉄と鋼の特集号⁵⁾にまとめられているが、そのような研究によりそれまで不明であった多くの点が明らかにされ、我が国は研究水準の高さにおいても世界をリードするまでになった。

たとえば、CRを再結晶域圧延と未再結晶域圧延とに区別して考えることにより、Nb, Vの効果を含めてCRによるフェライト粒の微細化の機構がより一層理解しやすいものとなり、未再結晶域圧延の利用が発展した。またベイナイト組織の詳細な研究が行われ、破面単位と組織との関係、フェライトあるいはベイナイト変態におよぼす高温変形の影響、冷却速度あるいは混合組織を含めた各種組織と機械的性質との関係などが明らかにされた。その結果、場合によつては変態域圧延(Intercritical Rolling)をも利用して、各種圧延ままあるいは焼もどし非調質60~80キロ熱延鋼板が開発されている。こうした研究の中で、熱延のまま用いられるDP(Dual Phase)鋼も開発されつつある。

ラメラータに関する研究も多くなされ、清浄度、介在物の形態、集合組織などの面から生因、機械的性質におよぼす影響が明らかにされた。サワーガスによる割れも研究され、すぐれた耐ラメラータ非調質鋼、耐水素誘起割れ非調質鋼が開発されている。

溶接性に関してもすぐれた研究がなされ、たとえば溶接割れ感受性を推定する指標として、溶接割れ感受性指数 P_c 、感受性組成 P_{cm} などが考察されている。また大

入熱溶接にともなうボンド部の脆化対策から、Ti,あるいは希土類元素とBの添加によりボンド部の粗粒化をおさえた大入熱用非調質鋼も開発されている。こうした着想はX70級の新しいアシキュラフェライト鋼の開発の中に生かされたり、連铸スラブからの非調質鋼の製造を可能なものになっている。

このようにCRは、従来調質鋼の分野と考えられていた高強度側の鋼種にも採用されるようになり、合金元素、エネルギーの節約、溶接性の改善などに効果を上げているが、低強度側の鋼種においても適用範囲を拡めている。とくにこの方面で注目されるのは、CR、焼ならし両方の利点を生かし変態域圧延の長所をもとり入れたSHT(Sumitomo High Toughness)プロセスの開発である。これは従来の加熱・圧延ラインを大胆に変更したもので、今後の成果が期待されている。

4. おわりに

以上、我が国の溶接構造用高張力鋼の発展の流れを概観してきたが、その特徴のいくつかを挙げると次のようになる。

- 1) 我が国の高張力鋼あるいはその製造技術には残念ながら外国から学んだものが多い。
- 2) しかし、外国の材料よりすぐれたものが短期間で製造されている。
- 3) とくに最近では、日本独自で開発された高張力鋼、製造技術もかなり見られるようになっていく。
- 4) 2), 3)を可能とした要因として

第1に、鉄鋼関係の技術者、研究者の努力と資質が挙げられる。また、材料をつくるだけでなく諸性質を律している物理冶金学的原理も追求する姿勢が、いわゆる中央研究所を中心としてあつたことも要因として考えられる。

第2に、多少の浮沈はあつたが我が国では、高張力鋼が常に造船、建築、土木などからの需要に支えられており、これらのニーズが技術開発の駆動力となつたと考えられる。

第3に、設備投資のタイミングが高張力鋼の設計原理の発展段階およびニーズとうまくマッチしたことも幸いしている。

その他、製銑、製鋼、計測、制御、管理技術の発展があつたこと、鉄鋼各社の競い合いが刺激となつたこと、造船、建築、土木などのユーザー、鉄鋼各社、公立研究機関などとの間で有効な共同研究がもてたことなども寄与しているものと考えられる。

技術開発や基礎研究のあり方について議論する場合、具体的事実にもとづいた議論を行うことが大切である。「故きを温めて新しきを知る」ことが常に有効であるとは考えられないが、将来を展望する最も基本的な方法であることには間違いのないであろう。

最後に、本文を記すにあたり前記材料W.G.の研究の一部を参考にさせていただきました。御協力下さった方々に感謝致します。

文 献

- 1) 制御圧延技術の基礎とその展開 (鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会シンポジウムテキスト), (1980)

- 2) I. TAMURA: Proc. of Inter. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, (1980), p. 59
- 3) F. B. PICKERING: Physical Metallurgy and the Design of Steels, (1978) [Appl. Sci. Publ. Ltd.]
- 4) Strong Tough Structural Steel (ISI Publication 104), (1967) [ISI]
- 5) 鉄と鋼, 58 (1972) 13

統 計

1980年の内外鉄鋼業 (その1—世界)

日本鉄鋼連盟によれば、1980年の世界粗鋼生産 (一部推定) は、中国、ブラジル、韓国など一部の中堅製鉄国は好調であったが、欧米主要製鉄国の極端な不振およびソ連、日本の停滞を反映して前年比4.3%減の7億1770万tであった。とりわけアメリカが急減した結果、日本が史上初めてソ連に次いで粗鋼生産第2位の地位につくことになった。

国別に見ると、世界第1位のソ連の粗鋼生産は前年並みと推定され、2年連続して不調に終わった。アメリカは一般の経済情勢が悪化する中で主要な需要先である自動車産業が極度の不振に陥るなどにより、石油

危機後の75年の落ち込みにも相当する前年比18.4%減となった。ヨーロッパ共同体9カ国の生産もイタリアを除いていずれも減少したが、とくにイギリスは年初の鉄鋼ストライキの影響で前年に比べて半減した。

一方、1980年の世界鋼材輸出量合計は、1億3900万t程度と推定され、79年度実績1億4000万tをわずかに下回った。ECの域内取引を除く世界合計は1億700万tで前年の3%減、またECの域外向け輸出は2850万t (前年比10%減)、日本は2940万t (4%減)、世界流通に占めるシェアはそれぞれ20.5%、21.2%であった。しかし、韓国は420万t (33%増)、アメリカ400万t (50%増)、カナダ320万t (21%増) など、大幅な増加が目立っている。とくに韓国は東南アジア、日本、中近東、西欧向けに大幅に増加し、仕向先の多様化が進んでいる。

(鉄鋼界報, No. 1226, 昭 56.2.11)

1980年世界の粗鋼生産 (単位: 1000 t, %)

順位	国名	数量	増減率
1	ソ連	149,100	0.0
2	日本	111,406	△ 0.3
3	アメリカ	100,900 (103,000)	△ 18.4 △ 18.3
	EC (9) 計	127,760	△ 8.9
4	西ドイツ	43,839	△ 4.8
5	中国	37,040	7.4
6	イタリア	26,542	9.5
7	フランス	23,162	△ 0.8
8	ポーランド	18,000	△ 6.3
9	カナダ	15,890	△ 1.2
10	ブラジル	15,311	11.1
11	チェコスロバキア	14,800	△ 0.1
12	ルーマニア	13,000	0.7
13	スペイン	12,530	3.4
14	ベルギー	12,318	△ 8.4
15	イギリス	11,216	△ 47.8
16	インド	9,431	△ 6.9
17	南アフリカ (共)	8,974	1.1
18	韓国	8,600	13.0
19	オーストラリア	7,594	△ 6.5
20	東ドイツ	7,250	4.1
33カ国合計 (200万t以上)		702,580	△ 4.5
その他諸国		15,100	6.3
世界合計		717,700	△ 4.3

(注) アメリカの()内の数字は鋳鋼専門家の生産を含む数量で、33カ国合計および世界合計はこの数値に基づいて計算されている

出所: 各国公表統計による。1938年は速報値または推計値

