

討33 制御圧延・制御冷却型50キロ級高張力鋼の諸強度特性

三菱重工業(株)長崎研究所 矢島 浩

1. 緒言 船殻に対する省エネルギー対策の一つとして、軽量化に因んだHT化が進められている。最近の制御圧延・制御冷却型(新CR型)船体用50キロHT鋼の相次ぐ開発・実用化は、船殻のHT化にますます拍車をかけるものと考えられる。最近実用化された新CR型船体用50キロHT鋼(降伏点32 kgf/mm²級および36 kgf/mm²級)ならびに低温用鋼に対して、主な強度特性を紹介する。

2. 評価対象新CR型50キロHT鋼

Fig. 1 に示すType I~Type III の新CRプロセスによって製造された、KA 32, KD 32, KE 32, KA 36, KD 36, KE 36, KL 33の各種新CR型船体用50キロHT鋼及び低温用鋼(Table 1)を評価対象とした。いずれもCeq.やPcmが低く、Type IIIの一部を除いては全てTiが添加されている。さらに、S含有量が非常に少ないことも大きな特徴といえよう。

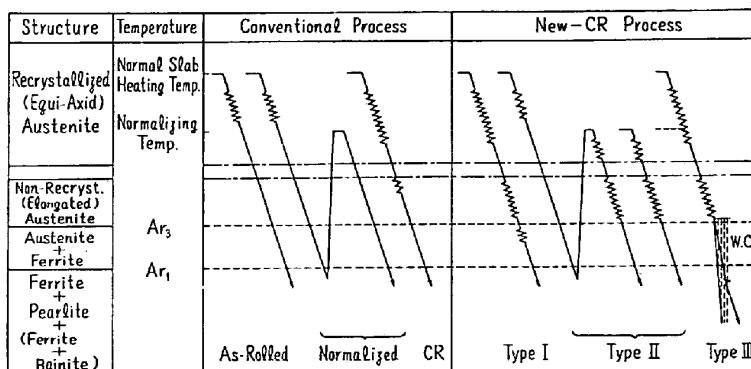


Fig.1 Schematic diagrams of conventional and new-CR processes of steel plates

3. 板厚方向強度特性 新CR型50キロHT鋼実用化に当り、板厚方向の強度特性が取り沙汰されることが多い。Fig.2 はZ方向引張試験によって得られた絞りとの関係を示したものである。Type IIIの一部を除いては、S含有量が非常に少ないためか、Z方向絞りは充分大きいことが確認される。Fig.3 はZ方向(板厚中央部)の脆性破壊発生限界温度(Tat Kc=200 kgf√mm/mm²)とS含有量との関係を示したものである。Tat Kc=200 kgf√mm/mm²とは、Z方向に対する試験片幅400 mmの中央切欠付広幅引張試験結果でKc値が200 kgf√mm/mm²を示す温度である。なお、供試鋼板の両表面にタブ板を溶接して試験片を製作しているが、その溶接をCO₂溶接で行なった場合と電子ビーム溶接で行なった場合とで若干の差が認められる。しかしながら、Kc値が200 kgf√mm/mm²を示す温度は非常に低温であり、Z方向(板厚中央部)の破壊靱性が非常に優れていることがわかる。Fig.4 はZ方向(板厚中央部)とL方向のKc値が200 kgf√mm/mm²を示す温度の比較である。Z方向の脆性破壊発生限界温度には、上述の如くタブ板溶接の影響も含まれている。したがって、それを考慮すれば、Z方向(板厚中央部)の破壊靱性は非常に優れているといえる。

Table 1 Chemical compositions of new-CR process steels

| Type | Grade | Thick. (mm) | Chemical Compositions (%) | | | | | | | Ceq. | P _{cm} | Mark |
|------|-------|-------------|---------------------------|------|------|-------|-------|---------|-------|-------|-----------------|------|
| | | | C | Si | Mn | P | S | Ti | | | | |
| I | KD 32 | 25 | 0.09 | 0.29 | 1.25 | 0.015 | 0.001 | 0.011 | 0.345 | 0.174 | ○ | |
| | KE 32 | 35 | | | | | | | | | | |
| | KA 36 | 38 | | | | | | | | | | |
| | KD 36 | 40 | | | | | | | | | | |
| II | KD 32 | 25 | 0.07 | 0.25 | 1.31 | 0.013 | 0.001 | 0.005 | 0.310 | 0.151 | □ | |
| | KE 32 | 35 | | | | | | | | | | |
| III | KA 32 | 12 | 0.11 | 0.17 | 0.57 | 0.012 | 0.002 | (0.007) | 0.254 | 0.177 | △ | |
| | KD 32 | 16 | | | | | | | | | | |
| | KE 32 | 20 | | | | | | | | | | |
| | KD 36 | 30 | | | | | | | | | | |

Note Ceq. = C + $\frac{Si}{24}$ + $\frac{Mn}{6}$ + $\frac{Ni}{40}$ + $\frac{Cr}{5}$ + $\frac{Mo}{4}$ + $\frac{V}{14}$ (WES), P_{cm} = C + $\frac{Si}{30}$ + $\frac{Mn}{20}$ + $\frac{Cu}{20}$ + $\frac{Ni}{60}$ + $\frac{Cr}{20}$ + $\frac{Mo}{15}$ + $\frac{V}{10}$ + 5B

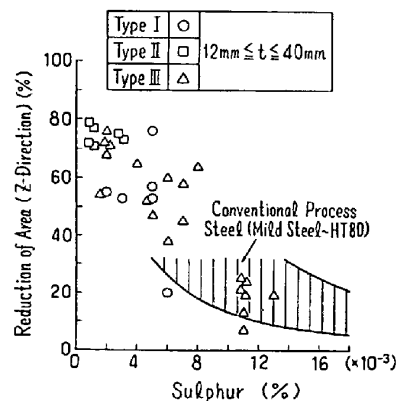


Fig.2 Relation between reduction of area for Z-direction and sulphur content

4. 破壊靱性に及ぼす溶接入熱の影響 Fig. 5 は、溶接継手ボンド

| | | | | |
|-----------------|----------|---|-----------------|------------------------|
| Type I | HT50 | ○ | 25mm ≤ t ≤ 40mm | Tab Plate Welding |
| Type II | HT50 | ● | | |
| Type II | LT(KL33) | □ | 25mm ≤ t ≤ 40mm | No Mark: EBW |
| Type II | HT50 | △ | | |
| Conven. Process | HT50 | ☆ | 25mm ≤ t ≤ 35mm | CO ₂ -Arc W |

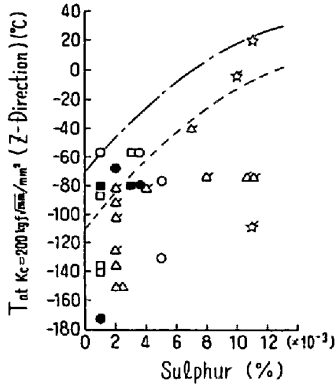


Fig. 3 Relation between critical temperature for brittle fracture initiation of Z-direction and sulphur content

| | | | | |
|-----------------|----------|---|-----------------|------------------------|
| Type I | HT50 | ○ | 25mm ≤ t ≤ 40mm | Tab Plate Welding |
| Type II | HT50 | ● | | |
| Type II | LT(KL33) | □ | 25mm ≤ t ≤ 40mm | No Mark: EBW |
| Type II | HT50 | △ | | |
| Conven. Process | HT50 | ☆ | 25mm ≤ t ≤ 35mm | CO ₂ -Arc W |

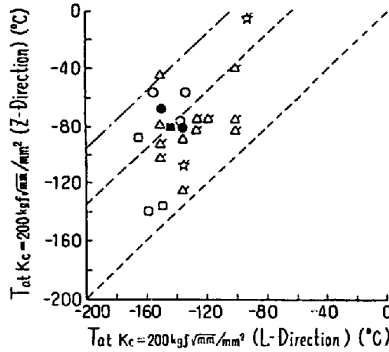


Fig. 4 Relation between critical temperature for brittle fracture initiation of Z-direction and L-direction

部のV-ノッチシャルピー-衝撃試験結果の50%脆性破面遷移温度(vTrs)と溶接入熱量との関係を示したものである。同図から400 kJ/cm~600 kJ/cm程度の大入熱溶接を適用しても、ボンド部のvTrsは20°C以下であることが明らかである。一方、Fig. 6は、溶接継手ボンド部vTrsの母材vTrsからの変化量と溶接入熱量との関係を示したものである。同図中には従来鋼に対する実績限界線²⁾も記されている。それによれば、Type IIIの新CR型50キロHT鋼は、従来型軟鋼とほぼ同等の特性を有していることが明らかである。また、Type I, Type IIも従来型50キロHT鋼と同等であることが明らかである。すなわち、破壊靱性に及ぼす溶接入熱の影響は、Type IおよびType IIに関しては従来鋼と同等、Type IIIに関しては従来鋼より優れているといえる。

5. 脆性破壊発生特性 Fig. 7は母材L方向のvTrsと、試験片幅400mmの中央切欠付広幅引張試験結果の応力場 $\frac{1}{2}\sigma_{y0}$ (σ_{y0} :公称降伏点)における許容亀裂長さ(2a)80mmに対する脆性破壊発生限界温度($\sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40}$)との関係を示したものである。同図より、新CR型50キロHT鋼は、従来型50キロHT鋼に比べ、vTrsに対する $\sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40}$ が高温側に移動していることが明らかである。すなわち、従来鋼と比較して新CR鋼は、V-ノッチシャルピー-衝撃試験結果では良い値を示しても、大形試験による破壊靱性値はV-ノッチシャルピー-衝撃試験結果ほど良い値を示さない、ということが言えるようである。一方、Fig. 8は溶接継手ボンド部に対するvTrsと $\sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40}$ との関係である。同図によれば、従来鋼と新CR鋼は同一相関関係にあるようにみなされ、新CR鋼の方がデータは低温域に多く、溶接条件を考慮しても優れた値を示している。なお、Fig. 7およびFig. 8より、下記の相関式が得られる。

母材:新CR鋼 $vTrs_{Base Metal} = 2.67 \sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40} + (293 \pm 40) \text{ (}^\circ\text{C)} \text{----- (1)}$

母材:従来鋼 $vTrs_{Base Metal} = 2.67 \sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40} + (368 \pm 40) \text{ (}^\circ\text{C)} \text{----- (2)}$

溶接継手ボンド部:新CR鋼, 従来鋼 $vTrs_{Bond} = 2.67 \sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0}[Ti]_{a=40} + (187 \pm 50) \text{ (}^\circ\text{C)} \text{----- (3)}$

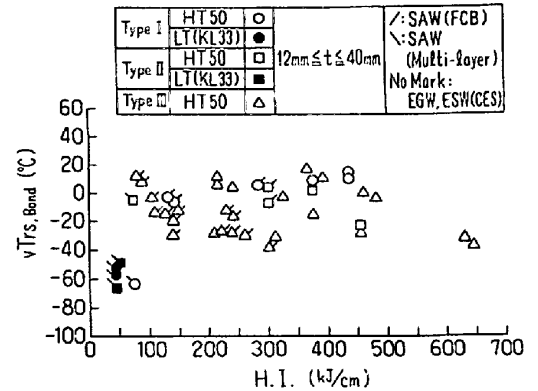


Fig. 5 Relation between vTrs,Bond and welding heat input

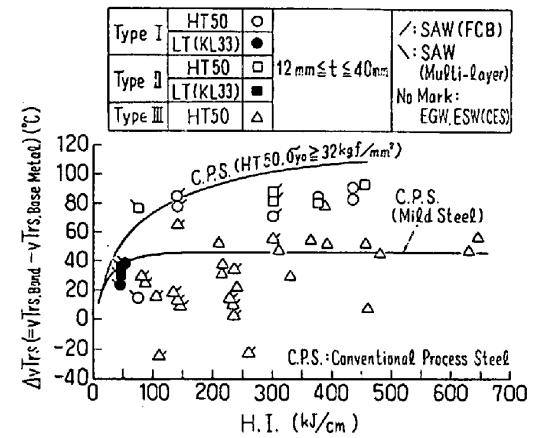


Fig. 6 Relation between ΔvTrs and welding heat input

さらに, Fig. 9 は母材 L 方向の中央切欠付広幅引張試験結果の $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}$ と, $vTrs$ から推定した $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}$ との関係を示したものである。また, Fig. 10 は溶接継手ボンド部に対する同様の関係を示したものである。これらの中には従来鋼に関する相関々係²⁾も示されている。母材に対しても溶接継手ボンド部に対しても, 従来鋼と比較して新CR鋼の方が, 大形試験結果から

求めた $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}$ が $vTrs$ から推定した $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}$ より高温であり, 新CR鋼は, V-ノッチシャルピー衝撃試験結果では良い値を示しても大形試験結果はそれほど良い値は示さないと言えるようである。なお, $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40} (^{\circ}K)$ から任意の温度 $[T_K (^{\circ}K)]$ での Kc 値を推定する式として, 下式が提案されている²⁾

$$Kc = F \cdot 5.60 \sigma_{yo} \exp \left\{ k_0 \left(\frac{1}{\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}} - \frac{1}{T_K} \right) \right\} \quad (kgf \sqrt{mm} / mm^2) \quad \text{----- (4)}$$

$$F = \frac{Kc \text{ Fatigue Cracked Notch}}{Kc \text{ Machined Notch}} = 0.68 \quad \text{----- (5)}$$

$$k_0 = 5.16 \sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40} - 170 (^{\circ}K) \quad \text{---- (6)}$$

ただし,

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_{yo} [Ti]_{a=40}, T_K : ^{\circ}K$$

6. 脆性亀裂伝播停止特性

Fig. 11 は母材 L 方向の $vTrs$ と, 試験片幅 400mm の温度勾配型 ESSO 試験結果または亀裂伝播部幅 500mm の温度勾配型二重引張試験結果で Kca 値が 525 ~ 590 $kgf \sqrt{mm} / mm^2$ を示す温度との関係を示したものである。 Kca 値が 525 ~

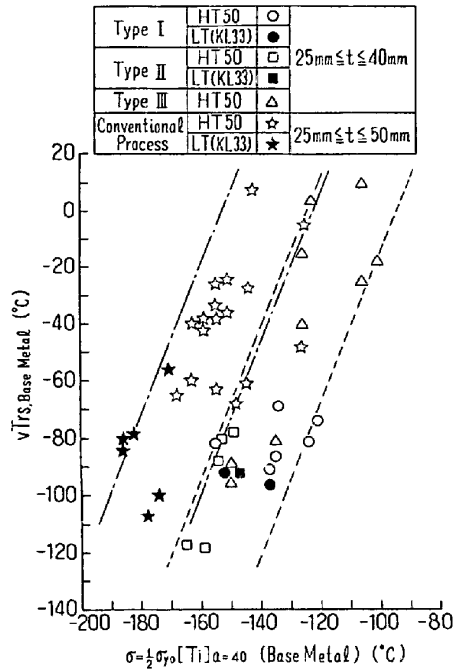


Fig. 7 Relation between $vTrs$ and critical temperature for brittle fracture initiation (base metal)

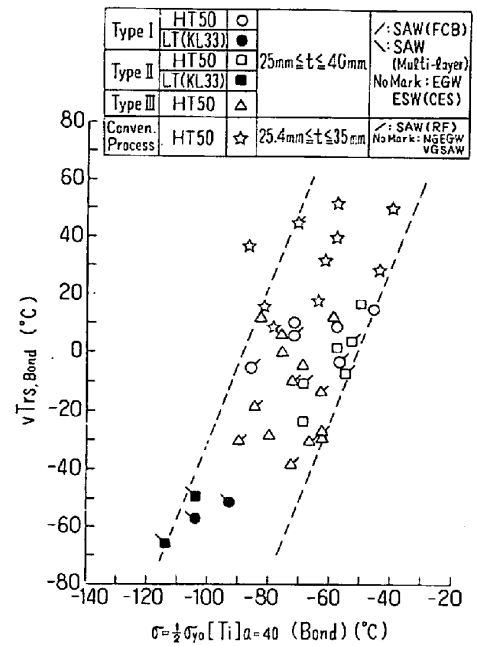


Fig. 8 Relation between $vTrs$ and critical temperature for brittle fracture initiation (welded joint bond)

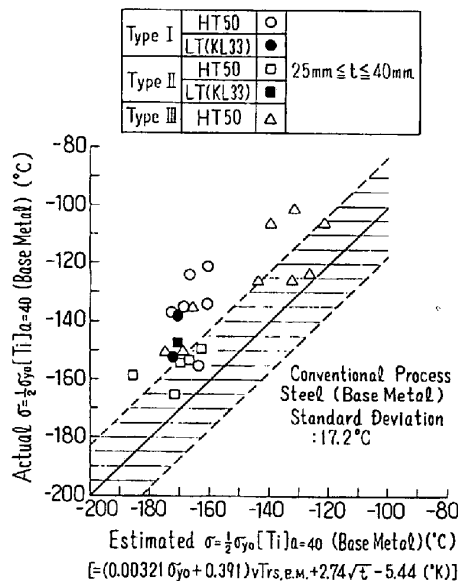


Fig. 9 Relation between measured values and estimated values of critical temperature for brittle fracture initiation (base metal)

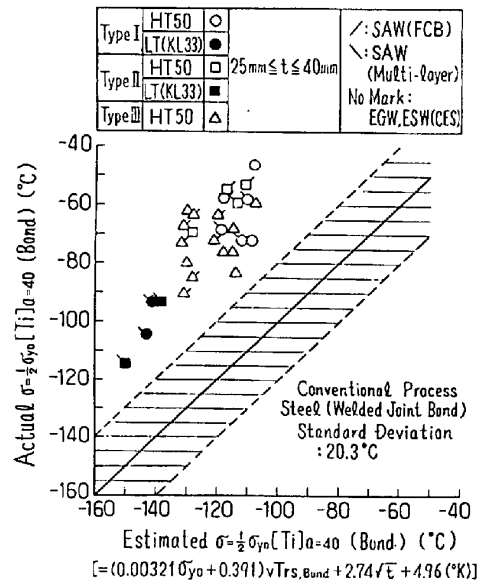


Fig. 10 Relation between measured values and estimated values of critical temperature for brittle fracture initiation (welded joint bond)

590 kgf√mm/mm² を示す温度とは、応力場 $\frac{1}{2}\sigma_{y0}$ において、全長 (2a) 3000mm の脆性亀裂を停止させるのに必要とみなされる靱性を有する限界温度であり、有効亀裂長さの考え方³⁾を適用して求めたものである。Fig.11 から明らかなごとく、従来鋼と新CR鋼とは同一相関々係を満足するようであるが、従来鋼と比較して新CR鋼の脆性亀裂伝播停止特性は非常に優れていることがわかる。新CR型船体用50キロHT鋼には、QT処理された従来型KL33鋼と同等もしくはそれ以上の脆性亀裂伝播停止性能を有しているものもある。なお、vTrs と Kca 値が 525 ~ 590 kgf√mm/mm² を示す温度 [T_{at} Kca = $\frac{1}{2}\sigma_{y0}\sqrt{\pi(0.1a+190)}$] との相関式として、下式が得られる。

$$vTrs, Base Metal = 1.41 [T_{at} Kca = \frac{1}{2}\sigma_{y0}\sqrt{\pi(0.1a+190)}] - (41 \mp 27.5) \text{ (}^\circ\text{C)} \text{----- (7)}$$

7. まとめ 最近実用化された新CR型船体用50キロHT鋼

ならびに低温用鋼に対して、主な強度特性を紹介した。すなわち、

- (1) 評価対象鋼のうち Type III の一部を除いては S 含有量が非常に少ないためか、Z 方向の強度特性、特に板厚中央部の破壊靱性は非常に優れている。
- (2) 評価対象鋼のうち Type III の C_{eq} が特に低い一部を除いては全て T_i が添加されているためか、大入熱溶接継手ボンド部の破壊靱性は非常に優れている。
- (3) 脆性破壊発生特性も優れているが、従来鋼と比較して新CR鋼では、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果が良い値を示すほどには大形試験による破壊靱性値は良い値を示さない。
- (4) 脆性亀裂伝播停止特性も非常に優れている。新CR型船体用50キロHT鋼には、QT処理されたKL33鋼と同等もしくはそれ以上優れたものもある。

などである。船体用鋼材としての評価には、以上紹介した強度特性の他に、溶接性、加工性などの把握・検討も重要である。先にも述べた通り新CR鋼は C_{eq} や P_{cm} が低いことから、著者が把握している限りでは、溶接性、加工性とも従来鋼より優れているようである。製鋼・圧延技術の日進月歩の急速な発展状況から、今後ますます“強靱で加工し易く安価な鋼材”が開発されることを期待する。

参考文献

- 1) 日本海事協会, 他 : 最近の船体用HT材の動向と研究課題について, SR193 第一分科会資料, SR193-I-2 (1982.6.9)
- 2) 矢島 浩, 多田益男 : じん性を考慮した船設材の選定, 三菱重工技報 Vol.17, No.5 (1980.9)
- 3) 木原, 金沢, 池田, 前中, 木下, 永元, 矢島 : クラックアレスタの有効性について (第2報) 日本造船学会論文集 第124号 (昭.43.12)
H. Yajima, M. Nakajima, T. Okabe, R. Nagamoto : Study on Welded-Type Crack Arrestor (First Report), Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review Vol.8, No.2 (1971.6)

| | | | |
|-----------------|----------|---|-----------------|
| Type I | HT50 | ○ | 25mm ≤ t ≤ 40mm |
| | LT(KL33) | ● | |
| Type II | HT50 | □ | 25mm ≤ t ≤ 40mm |
| | LT(KL33) | ■ | |
| Type III | HT50 | △ | 25mm ≤ t ≤ 50mm |
| Conven. Process | HT50 | ☆ | |
| | LT(KL33) | ★ | |

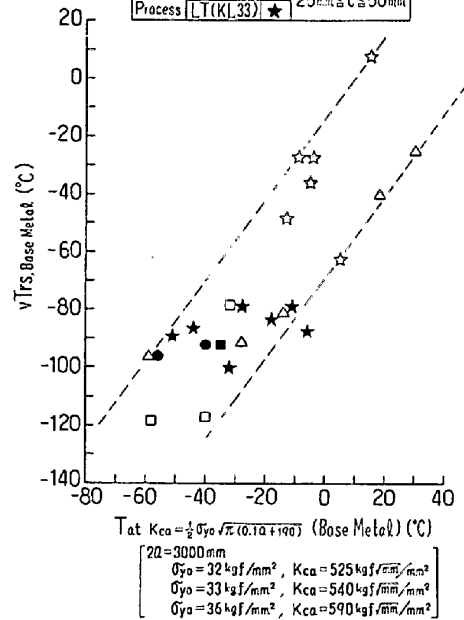


Fig.11 Relation between vTrs and critical temperature for brittle crack propagation-arrest (base metal)