

論 文

UDC 620.178.222 : 669.15'24-41

テーパ形 DCB 試験による Ni 添加鋼板の脆性破壊
伝播停止特性について*

長谷部 茂 雄**・川 口 喜 昭***

Study on the Brittle Fracture Propagation-arrest Characteristics of
Low C-Ni Steel Plates by Tapered Double Cantilever Beam Test

Shigeo HASEBE and Yoshiaki KAWAGUCHI

Synopsis:

Brittle fracture propagation-arrest characteristics of low C-Mn steel plates containing 0~5%Ni have been investigated by newly developed Tapered Double Cantilever Beam Test, which is a small size test having good correlation to large size Double Tension Test. The results obtained are as follows:

1) Brittle fracture propagation-arrest characteristics are linearly improved with the increase of Ni content, whichever in normalized or quenched and tempered steel plates. Bainitic structure which gives deleterious effect on Charpy impact characteristics do not affect brittle fracture propagation-arrest characteristics.

2) Refinement of microstructure by heat treatment improves greatly Charpy impact characteristics, but very slightly brittle fracture propagation-arrest characteristics.

3) As a whole, brittle fracture propagation-arrest characteristics shows the behavior different from Charpy impact characteristics. The former is sensitive to the change of chemical compositions (Ni content) and insensitive to the change of microstructures (bainitic or refined structures).

1. 緒 言

鋼材の脆性破壊にたいする抵抗は、靱性という言葉で表現され、シャルピー衝撃特性によつて判定されるのが一般である。しかしこの特性は、力学的意義がきわめてあいまいであり、鋼材の靱性に関する諸データの混乱および矛盾は、この試験法そのもののあいまいさによるところが大きいと考えられる。これにたいし、わが国で広く行なわれている二重引張試験¹⁾は、鋼板の脆性破壊伝播停止特性をもとめる試験としてすでに評価の定まつたものである。この試験法は素材の靱性を限界応力拡大係数、いわゆる K_{IC} 値で表わす。 K_{IC} 値は脆性亀裂を停止せしめる素材性能としてその力学的意義が明りようであり、構造物の設計に定量的に利用できる点で優れている。周知のとおり、この試験法は、WES 規格の作成にとり入れられた²⁾。

しかしながら、二重引張試験はいわゆる大型試験であつて、最低 500 mm×700 mm の素材を必要とし、研究室の材質試験として採用することが困難である。WES 規格では二重引張試験による K_{IC} 値とシャルピー試験における破面遷移温度との実験的相関が求められているものの、本質的な意味における相関とみることは難しい。従来シャルピー試験によつていたために生じたと推定される諸矛盾を解決し、鋼材の靱性を支配する諸要因を明らかにするためには、 K_{IC} 値を直接測定することのできる小型試験の開発が必要不可欠である。

テーパ形 DCB (Double Cantilever Beam) 試験は以上のような目的のために開発された試験法である³⁾。比較的小型 (80 mm×165 mm) でありながら、大型試験である二重引張試験ときわめて良好な相関を持ち、鋼板の脆性破壊伝播停止特性を研究室的に調べることができる。

* 昭和 49 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 49 年 7 月 12 日受付 (Received July 12, 1974)

** 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Nishinagasu-hondôri, Amagasaki, 660)

*** 住友金属工業(株)中央技術研究所

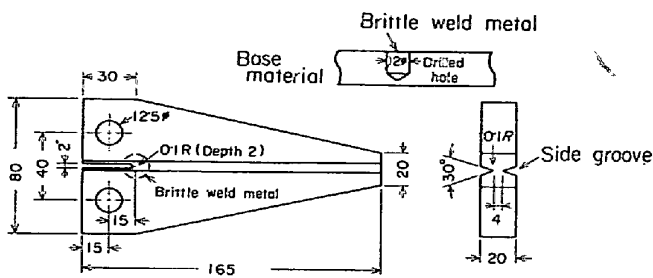


Fig. 1. Specimen of Tapered Double Cantilever Beam Test.

本報告はこのテーパ形 DCB 試験を用いて低 C-Mn 鋼に Ni を 0~5% 添加した鋼板について脆性破壊伝播停止特性を調べ、シャルピー衝撃特性と比較することによって得られた鋼材の靱性にたいする新たな知見に関するものである。

2. テーパ形 DCB 試験について

2.1 試験片形状および試験方法

Fig. 1 に試験片形状を示す。これまでに知られている DCB 試験片^{4)~6)}と異なる点は、亀裂発生部にもろい溶着鋼をおき、室温に近い高温でも脆性亀裂が発生するようにしたこと、 K_{IC} 値の測定範囲を拡げるためにテーパ形とし、梁の断面が亀裂の伝播とともに減少するようにしたことなどである。

Fig. 2 に試験状況を示す。コ型の治具にピンで固定された試験片は、治具ごと冷却槽につけられ、さらに引張試験機に装着される。冷媒で目標の温度に冷却したのち、試験機で矢印の方向に引張荷重を与えて脆性亀裂を発生させる。次に冷却槽からとり出して試験片の温度が室温まで上昇してから再び引き裂いて、脆性亀裂の停止位置を調べ、Fig. 2 にしめすようにピン穴中心から停止点までの距離を測定する。

2.2 K_{IC} 値のもとめ方

もろい溶着鋼から発生した脆性亀裂はその伝播速度がきわめて高速であるから、亀裂伝播中は荷重点の変位は一定である（定変位条件）とみなされる。したがって亀裂の伝播とともにその先端の荷重は低下して、いわば通常の二重引張試験が温度勾配型であるのにたいして応力勾配型の試験とみなされる。この場合の K_{IC} 値は、歪エネルギー開放率の計算から次式で与えられる。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{2w} \left(-\frac{dM(C)}{dC} \right)} \quad (1)$$

ここで

γ : 亀裂発生時のピン間変位,

E : 弾性係数,

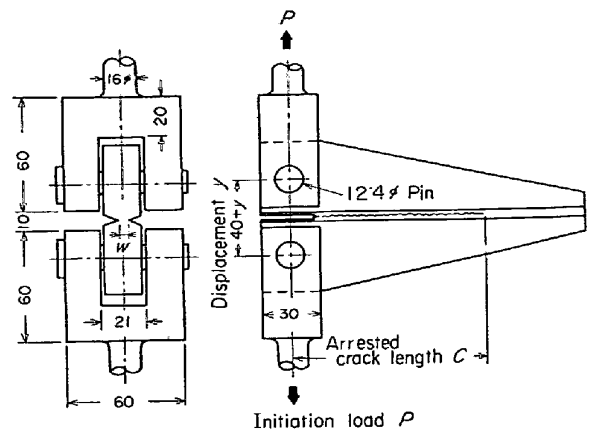


Fig. 2. Equipment for Tapered Double Cantilever Beam Test.

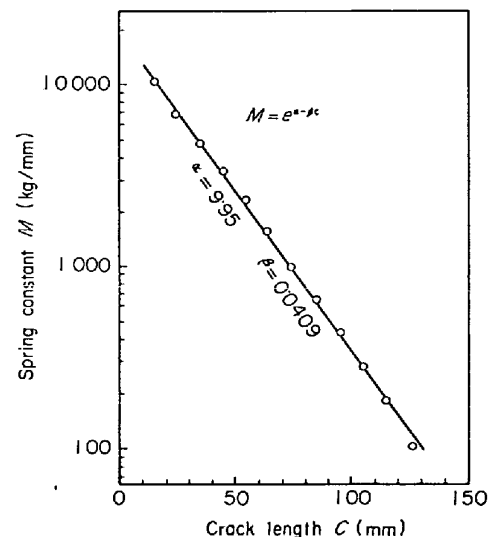


Fig. 3. Correlation between spring constant and crack length of the specimen.

w : 破面幅,

C : 停止亀裂長さ,

$M(C)$: 亀裂長さ C でのバネ定数.

バネ定数 $M(C)$ は切欠を機械加工によって延長し、亀裂長さ C とバネ定数 $M(C)$ の関係を実測し、Fig. 3 が得られた。すなわち両者の間には次の近似式が成立つことが実験的に明らかとなった。

$$M(C) = e^{\alpha - \beta C} \quad (2)$$

したがって (2) 式を (1) 式に代入することにより、次式が得られる。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E}{2w} \beta e^{\alpha - \beta C}} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha = 9.95$, $\beta = 0.0409$, $w = 4 \text{ mm}$.

(3) 式によれば、材料の K_{IC} 値は亀裂発生時の変位 γ および停止亀裂長さ C のみからもとめることができる。

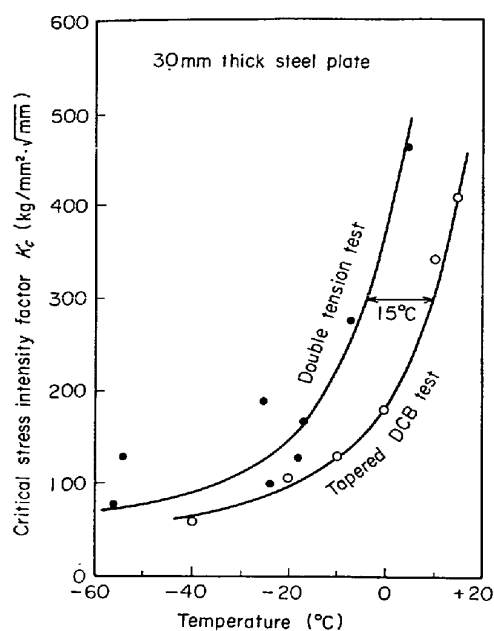


Fig. 4. Comparison of tapered DCB Test results with Double Tension Test results on a 30 mm thick steel plate.

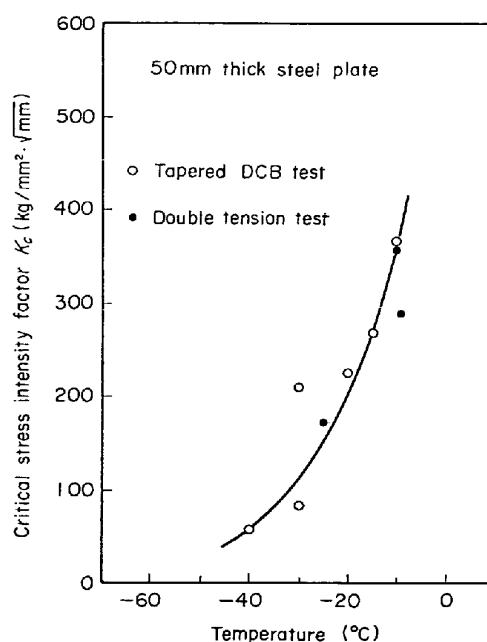


Fig. 5. Comparison of Tapered DCB Test results with Double Tension Test results on a 50 mm thick steel plate.

変位 y は発生時の亀裂長さ $C=15\text{ mm}$ におけるバネ定数を用いて発生荷重 $P(\text{ kg })$ から $y=0.0922 \times 10^{-3} P$ としてもとめることができる。

2.3 二重引張試験との対応

テーパー形 DCB 試験は高速で伝播する脆性亀裂を停止させる材料特性をもとめる点で二重引張試験と本質的に同等なものである。しかし、前者は亀裂が深いサイドグループにそって伝播すること、後者は素材板厚のままで試験を行なうこと、の相違によつて両者の実験的対応には、脆性破壊伝播停止特性にたいするいわゆる板厚効果が現われる²⁾。

Fig. 4, 5, 6 はテーパー形 DCB 試験と二重引張試験の対応を示す例である。Fig. 4 は板厚 30 mm の鋼板における場合であるが、温度にたいする K_c の曲線はテーパー形 DCB 試験のほうに 15°C ほど高温側に現われる。これにたいし、Fig. 5 は板厚 50 mm の場合で、両者がほぼ同一の曲線上に一致する。Fig. 6 は同一の素材から削り出した 12, 20, 30, 40 mm の鋼板の二重引張試験の結果とテーパー形 DCB 試験の結果の比較である。二重引張試験の結果は板厚が増すにつれて DCB 試験の結果に近づく。

Fig. 7 は 12 種の鋼板についてテーパー形 DCB 試験と二重引張試験の結果の対応にたいする板厚の影響を調べたものである。テーパー形 DCB 試験の結果は一般に二重引張試験の結果よりも高温側に現われるが、板厚の増大とともに両者の温度差は小さくなり、ほぼ 50 mm で一

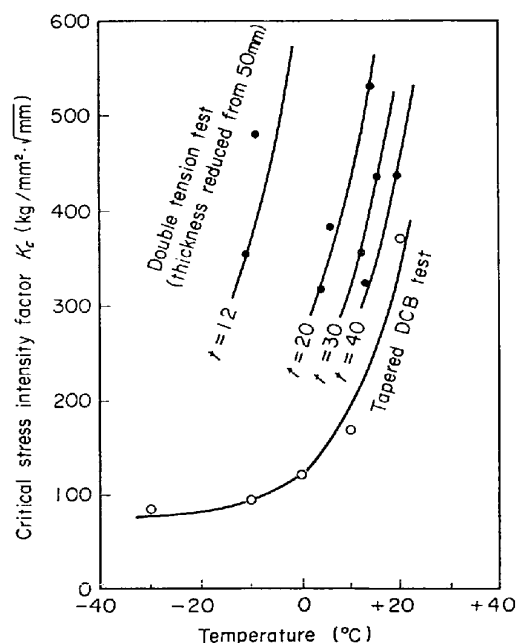


Fig. 6. Comparison of Tepered DCB Test results with Double Tension Test results showing the effect of plate thickness.

致する。このことは、テーパー形 DCB 試験における亀裂先端の応力状態が深いサイドグループの影響によつて、二重引張試験における 50 mm の板厚の中心部における応力状態と同等の厳しい三軸応力度にあることを示していると考えられる。なお、Fig. 7 を用いれば、テーパー形 DCB 試験の結果からかなり正確に二重引張試験の結果を推定できることも明らかである。

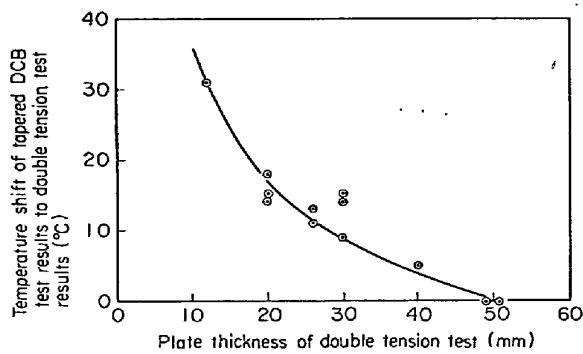


Fig. 7. Effect of plate thickness on the correlation between Tapered DCB and Double Tension Test results.

なお、以上に用いたデータの詳細については文献 3) を参照されたい。

3. 供試鋼板の性質

3.1 化学成分と熱処理

Table 1 に供試鋼板の化学成分を示す。基本成分に低 C-Mn 鋼であり、Ni 量を 0~5% の範囲で 6 段階に変化させた。製品は 24 mm 厚の鋼板である。

Table 2 に供試鋼板の熱処理を示す。熱処理は焼ならしと焼入れ・焼もどしの 2 種類であり、熱処理温度は変

Table 1. Chemical compositions of steel plates tested (%).

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Ni
0	0.10	0.25	0.55	0.009	0.007	0.03
1	0.10	0.27	0.57	0.010	0.007	1.05
2	0.10	0.31	0.61	0.009	0.008	2.26
3	0.09	0.24	0.52	0.009	0.008	3.00
4	0.09	0.26	0.54	0.008	0.008	3.85
5	0.10	0.30	0.57	0.009	0.011	5.11

態点を考慮に入れて定めた。

3.2 顕微鏡組織

Photo. 1 に焼ならし材の組織を示す。Ni 添加量の組織に与える影響が明りようである。0N~3N 間の変化はフェライトが細粒化していく段階であり、4N になると粗いベイナイトが現われ、5N ではむしろベイナイトが主体となっている。

Photo. 2 に焼入れ・焼もどし材の組織を示す。0Q はフェライト中に炭化物が析出した典型的な低 C 鋼焼もどし組織である。1Q~5Q の間の変化はフェライト中に焼もどしベイナイトが増加していく過程で、フェライトは細粒化してその量を減じ、4Q, 5Q ではベイナイトが主体となっている。

Table 2. Conditions of heat treatment for steel plates tested.

Normalized		Quenched and tempered	
Symbol	Conditions of heat treatment	Symbol	Conditions of heat treatment
0N	900°C×1h.A.C.	0Q	900°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.
1N	880°C×1h.A.C.	1Q	880°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.
2N	860°C×1h.A.C.	2Q	860°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.
3N	840°C×1h.A.C.	3Q	840°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.
4N	820°C×1h.A.C.	4Q	820°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.
5N	800°C×1h.A.C.	5Q	800°C×1h.W.Q—600°C×1h.A.C.

* Plate thickness=24mm

Table 3. Mechanical properties of steel plates tested.

Heat treatment	Symbol of steel	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	vT_s (°C)
Normalized	0N	26.8	40.6	44.0	75.5	-27
	1N	30.8	45.5	41.7	74.3	-41
	2N	36.6	49.9	38.3	73.8	-77
	3N	40.1	52.1	39.3	73.6	-71
	4N	39.1	56.0	35.3	70.5	-69
	5N	40.1	63.8	35.0	68.2	-58
Quenched and tempered	0Q	32.0	44.5	42.7	81.2	-99
	1Q	35.9	49.5	39.7	80.6	-73
	2Q	43.1	54.8	37.3	79.3	-108
	3Q	41.1	54.9	35.0	78.2	-104
	4Q	49.9	61.3	31.7	76.6	-124
	5Q	55.3	65.1	31.3	75.0	-121

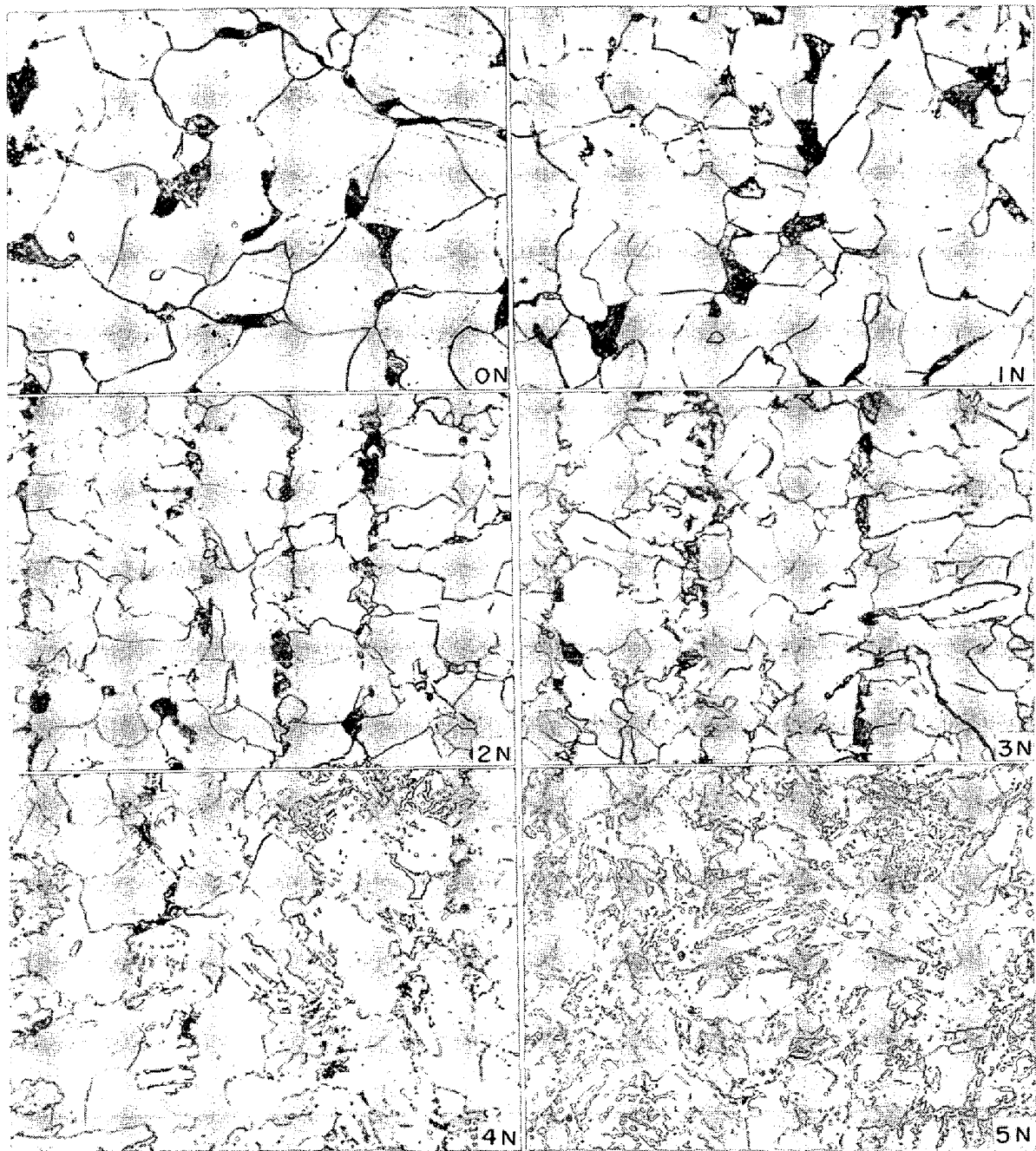


Photo. 1. Microstructures of normalized steel plates tested ($\times 500$).

3.3 機械的性質と衝撃特性

Table 3 に供試鋼板の機械的性質と衝撃特性を示す。

Fig. 8 に Ni 量と機械的性質の関係を示す。Ni 量の増加にともない、降伏点・引張強さは増大し、伸び・絞りには低下する。焼入れ・焼もどし材は、降伏点・引張強さ・絞りにおいて焼ならし材にまさり、伸びにおいて劣る。

Fig. 9 は焼ならし材のシャルピー吸収エネルギーである。0N $\rightarrow$ 1N $\rightarrow$ 2N とエネルギー遷移曲線は低温側に移行していくが、3N から逆転して Ni 量の増加がかえつ

てシャルピー特性の劣化をまねく。これは Photo. 1 から明らかなごとく、ベイニティックな組織の発達を反映していると考えられる。シェルフエネルギーは従来から知られているとおり Ni 量の増大による強度の上昇を反映して、Ni 量の増大とともに単調に低下していく。

Fig. 10 は焼入れ・焼もどし材の吸収エネルギーである。焼ならし材の場合と比べて、Ni 量とエネルギー遷移温度の関係は単調ではない。Ni がほとんど添加されていない 0Q がかなりよい性能を示し、Ni 量 1% の 1Q よりも良好な特性を示す。Ni 添加量の順序からすると

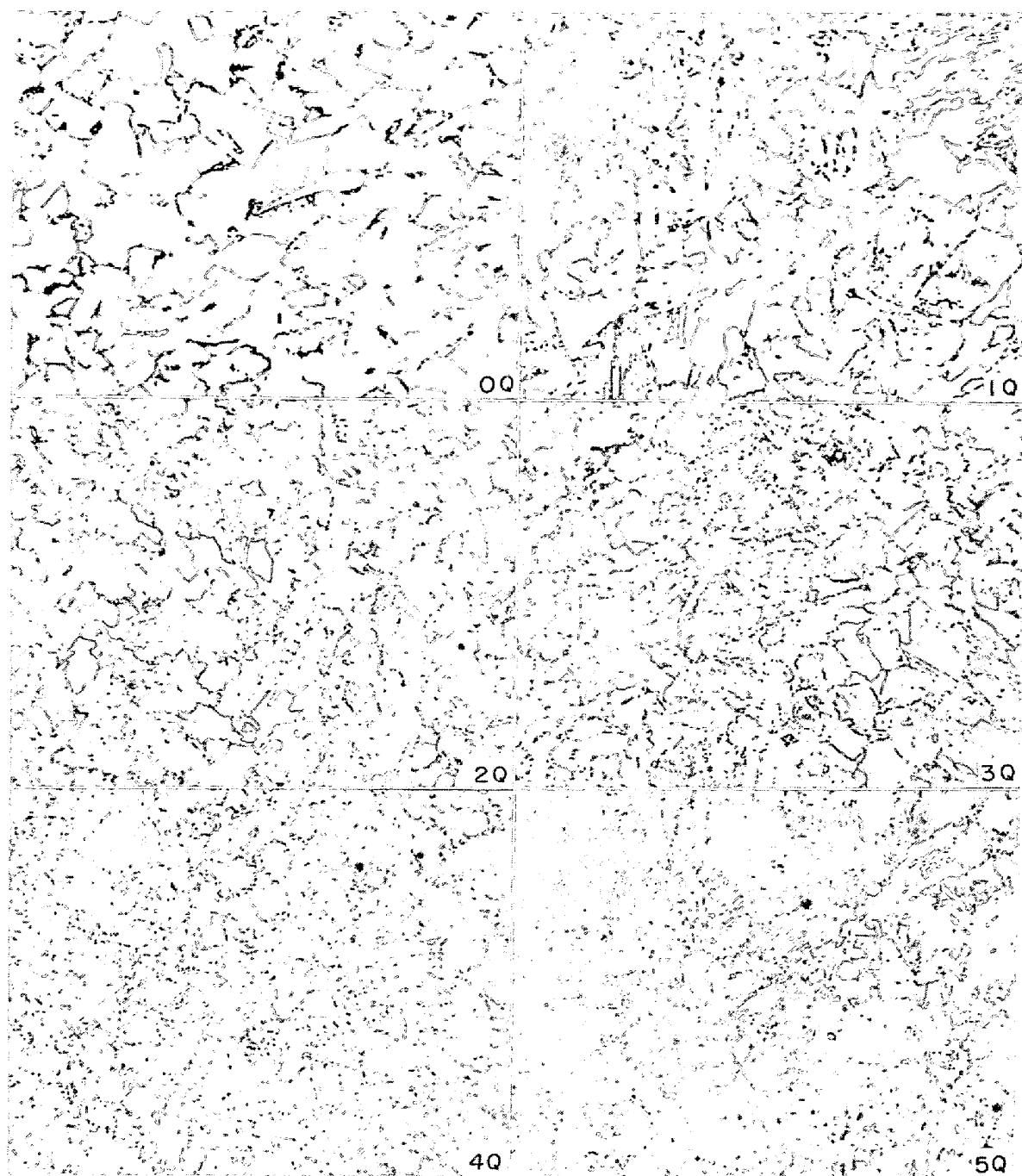


Photo. 2. Microstructures of quenched and tempered steel plates tested ($\times 500$).

2Q と 3Q, 4Q と 5Q が逆転しているが, 0Q をのぞくと Ni 量の増加にともなつてシャルピー衝撃特性が向上する傾向とみてもよいであろう. シェルフエネルギーは焼入れ・焼もどし材においても Ni 添加量の増大につれて単調に低下していく.

以上のような材料特性が脆性破壊伝播停止特性にどう反映されていくかは, きわめて興味深い. Ni 添加量の変化と熱処理の変化がどう影響するかに注目しなくてはならない.

4. テーパー形 DCB 試験の結果と考察

Fig. 11, 12 にテーパー形 DCB 試験の結果を示す. これらの図から WES 規格でいう G 種温度と A 種温度を読みとることができる. G 種および A 種温度を決定するためには次式を用いる.

$$K_C = \sigma \sqrt{\pi C} \dots\dots\dots (4)$$

σ : 公称降伏点 σ_{ny} の 1/2

C : 想定亀裂長さの半分

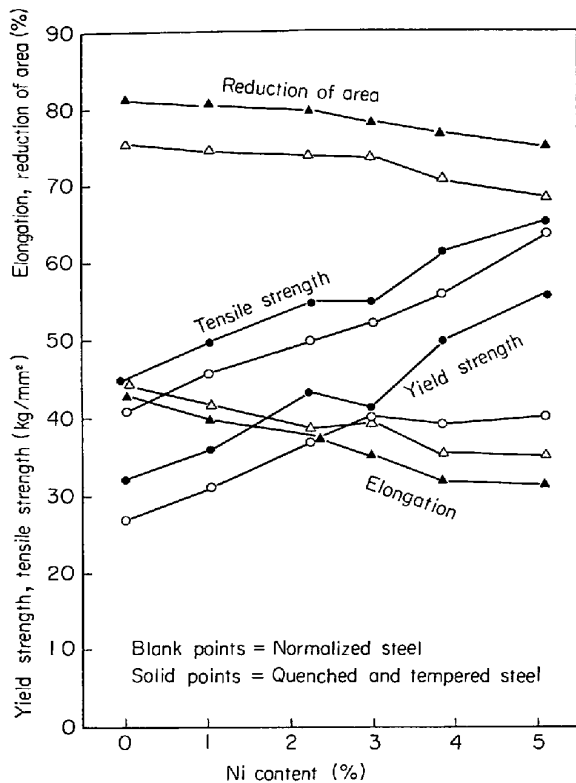


Fig. 8. Relation between mechanical properties and Ni content of steel plates tested.

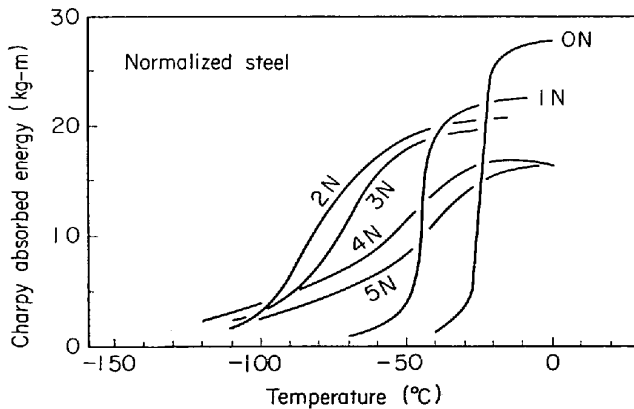


Fig. 9. Absorbed energy of Charpy Test on normalized steel plates.

G種 : $C = 10 \text{ mm}$

A種 : $C = 100 \text{ mm}$

G種およびA種温度をもとめるためには公称降伏点を設定しなければならないが、Fig. 8 の機械的性質によれば、Ni 量と熱処理によつて材料の実際の降伏点はかなり変化している。しかしながら、脆性破壊伝播停止特性を示す K_C 値は、素材の強度とは一応独立した材料特性であるから、材質比較のためにはすべてを同一の K_C 値で比較すべきであろう。そこで公称降伏点を供試鋼板のなかの最大値に近い 50 kg/mm^2 とした。すなわち、こ

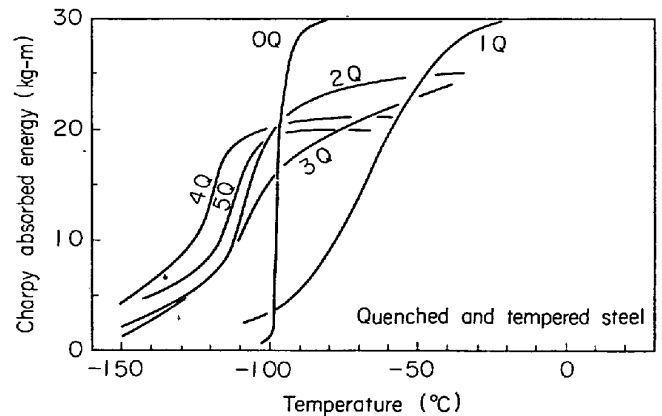


Fig. 10. Absorbed energy of Charpy Test on quenched and tempered steel plates.

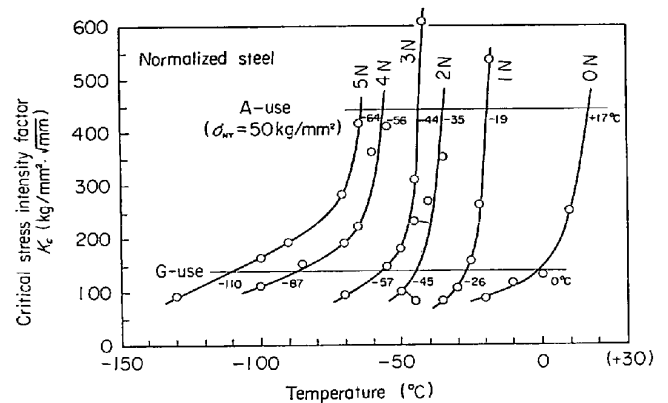


Fig. 11. Results of Tapered Double Cantilever Beam Test on normalized low C-Ni steel plates.

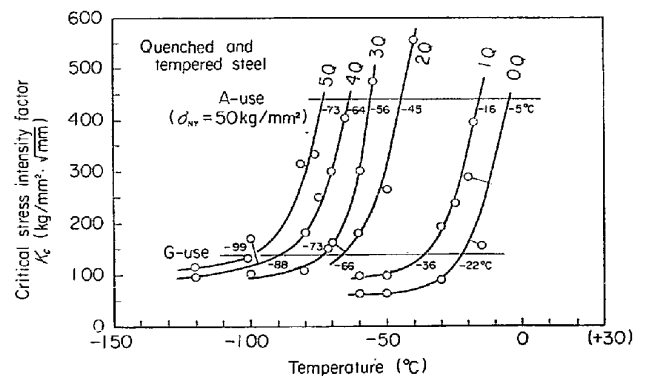


Fig. 12. Results of Tapered Double Cantilever Beam Test on quenched and tempered low C-Ni steel plates.

こでいう G種温度は $K_C = 140 \text{ kg/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ 、A種温度は $K_C = 443 \text{ kg/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ となる温度のことである。なお、この温度は二重引張試験では板厚 50 mm の場合の性能に一致するものであつて、実際の板厚 24 mm の場合は Fig. 7 によつて 13°C ほど低温に移行させねばならない。

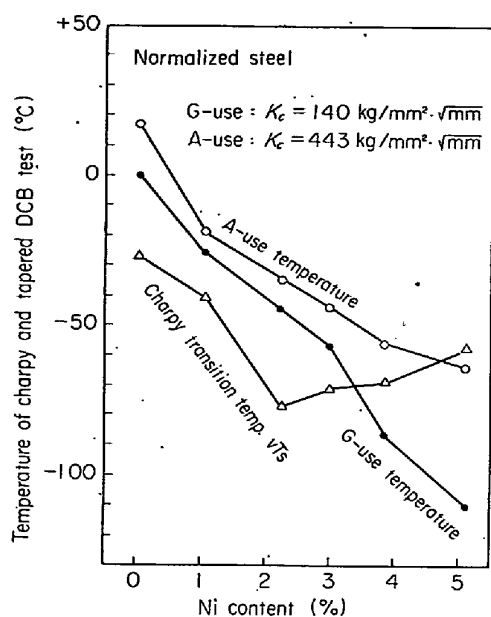


Fig. 13. Effect of Ni content on Charpy impact and brittle fracture propagation-arrest characteristics in normalized steel plates.

Fig. 11 および 12 のテーパ形 DCB 試験による K_{IC} 曲線群と Fig. 9 および 10 のシャルピー吸収エネルギー曲線群を比較すると、ただちに著しい特色に気づく。脆性破壊伝播停止特性を示す K_{IC} 曲線は、焼ならし材においても焼入れ・焼もどし材においても、Ni 量の増大につれてきわめて秩序正しく低温側に移行している点である。

Fig. 13 は焼ならし材における Ni 量と脆性破壊伝播停止特性 G 種・A 種温度およびシャルピー衝撃特性 vT_s の関係を示す。シャルピー衝撃特性 vT_s は Ni 量が 2% で最良の特性を示し、それ以上の Ni 量は vT_s をかえって徐々に劣化させる。しかるに伝播特性 G 種および A 種温度は、Ni 量の増大とともに直線的に低下していく。Photo. 1 によれば、Ni 量が 3% を越えるとベイニティックな組織が発達していき、 vT_s の劣化はこれに対応するものと考えられる。しかるに伝播停止特性にはこれが反映されず、ただフェライト地の Ni による靱性の向上のみが反映されているとみられる。いいかえれば、脆性破壊伝播停止特性は Ni 量にたいしては敏感であるが、粗いベイナイトの生成にたいしては鈍感であると結論される。

Fig. 14 は焼入れ・焼もどし材における Ni 量の影響を示す。 vT_s は Ni 量が 0% の場合をのぞけば、2% と 3%、4% と 5% の間にわずかな逆転がみられるものの、1~5% の間では Ni 量の増大に応じて向上がみられるとみなすことができる。これは Photo. 2 において

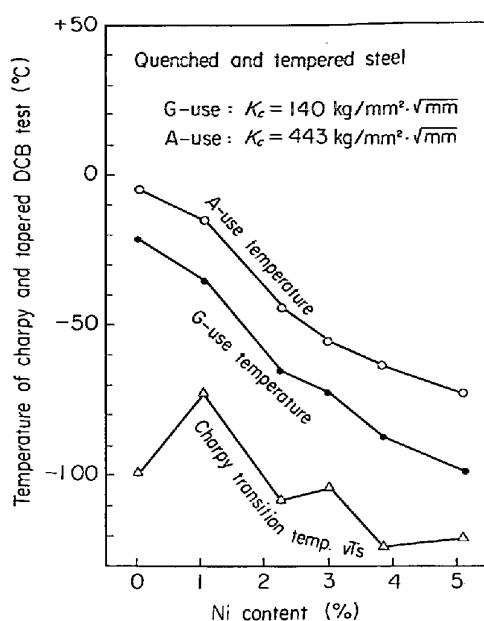


Fig. 14. Effect of Ni content on Charpy impact and brittle fracture propagation-arrest characteristics in quenched and tempered steel plates.

みられる、Ni 量の増大にともなう組織の微細化に対応するものである。一方 G 種および A 種温度は、焼もどし材の場合と全く同様に、Ni 量 0% から Ni 量の増大にともなう順次向上していく。したがって Fig. 14 の場合に問題となるのは、Ni 量が 0% の場合のシャルピー衝撃特性と脆性破壊伝播停止性の差である。ひるがえって Photo. 2 において 0Q と 1Q とを比較してみる。0Q に比べて 1Q はフェライト粒が細かくなっているものの、ベイニティックな組織が発達して組織が不規則になつており、Ni 量の増加がかえってシャルピー衝撃特性を劣化させることはうなづくことができる。しかるに脆性破壊伝播停止特性は 1Q のほうが優れている。これはこの特性がベイニティックな組織の発達にたいして鈍感であるために、フェライト地の Ni による靱性の向上のみが反映されるとみられ、焼ならし材について得られた結論を支持するものと考えられる。

Fig. 15 は焼ならし材から焼入れ・焼もどし材へ、という熱処理の変化によつてシャルピー衝撃特性と脆性破壊伝播停止特性がどの程度向上するかを Ni 量との関係において示すものである。シャルピー衝撃特性 vT_s は、Photo. 1 と Photo. 2 の比較から明らかなごとく、熱処理の変化による組織の微細化を反映して大幅な向上がみられ、Ni 量 1~3% の範囲でほぼ 30°C、0 および 4~5% では最大 70°C 以上の向上を示す。しかるに脆性伝播停止特性 G 種・A 種温度は最大 20°C、おしなべてほ

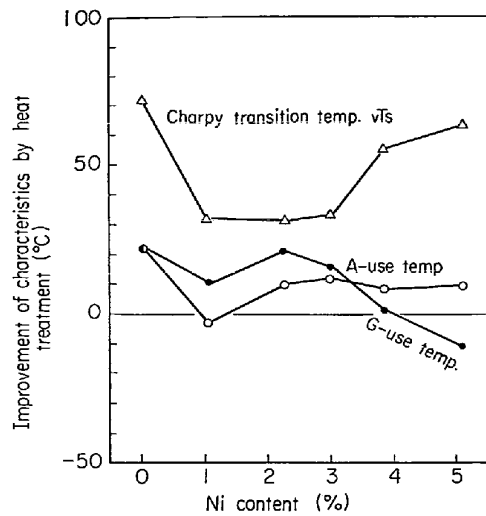


Fig. 15. Improvement of Charpy impact and brittle fracture propagation-arrest characteristics by the change of heat treatment (normalized→quenched and tempered).

ば 10°C 程度の向上しか示さず、 vT_s とは傾向的にも一致しない。したがって脆性破壊伝播停止特性は、熱処理の変化による組織の微細化にたいしても鈍感であると結論される。

5. 結 言

0~5% の Ni を添加した低 C-Mn 鋼の焼ならし材および焼入れ・焼もどし材について、テーパ形 DCB (Double Cantilever Beam) 試験により脆性破壊伝播停止特性を調べ次の結論を得た。

1) 脆性破壊伝播停止特性は、焼ならし材においても焼入れ・焼もどし材においても Ni 添加量の増大につれて直線的に向上する。シャルピー衝撃特性を劣化させるベイニティックな組織は伝播停止特性に影響をおよぼさない。

2) 熱処理の変化による組織の微細化は、シャルピー

衝撃特性を大幅に向上させるが、脆性破壊伝播停止特性の向上はわずかであるにすぎない。

3) 総じて、脆性破壊伝播停止特性はシャルピー衝撃特性とかなり異なつた挙動を示す。前者は化学成分 (Ni 量) の変化にたいしては敏感であるが、組織の変化 (ベイニティックな組織の混在、熱処理による組織の微細化) にたいしては鈍感である。

以上の Ni 添加鋼板についての結論はまだどこまで一般化できるかは明らかではない。しかし、脆性破壊伝播停止特性は冶金的な観点からはシャルピー衝撃特性と必ずしも一致するものではないことを本報告は明らかに示している。このことは鋼材の靱性を支配する諸要因を追求するうえで、重要なことと考えられる。それは鋼材の靱性を脆性破壊伝播停止特性という力学的意義の明りような特性で評価するならば、従来とは異なつた新しい知見を得ることができることを示唆するものだからである。二重引張試験と良好な対応を示すテーパ形 DCB 試験は研究室的材質試験として十分採用できる小型試験であり、この試験法を用いてこの面における研究を進めていきたいと考える。

文 献

- 1) 吉識, 金沢: 造船協会論文集, 102(1957), p. 39
- 2) 日本溶接協会: 低温構造用鋼板判定基準, WES-136-1972
- 3) 川口: 住友金属, 25(1973)2, p. 162
- 4) R. G. HOAGLAND: J. Basic Engineering, Trans. ASME, 89(1967)3, p. 525
- 5) S. MOSTOVOY, P. B. CROSLY and E. J. RIPLING: J. Mat., 2(1967)3, p. 661
- 6) C. E. TURNER and J. C. RADON: Fracture 1969, ed. by P. L. PRATT, (1969), p. 165 [CHAPMAN and HALL]