

## キルド鋼板の圧延比と材質の関係について\*

大黒竹司\*\*・涌島 滋\*\*・深谷更生\*\*・佐藤益弘\*\*

## On the Relation between Reduction Ratio and Mechanical Properties of Killed Steel Plates.

Takeshi ŌKURO, Shigeru WAKUSHIMA, Nobuo FUKAYA and Masuhiro SATŌ

## Synopsis:

To investigate the relation between reduction ratio and mechanical properties of killed mild steel plates, the following tests were carried out.

(1) Six 10-t ingots from a coarse austenitic-grained heat melted with a basic open hearth furnace were hot-rolled into several plates of different thickness, which corresponded the reduction ratios (=ingot thickn./plate thickn.) of 4, 6, 7, 8, 12 and 20, respectively.

(2) For the comparison with test 1, one 10-t ingot from fine austenitic-grained heat melted with a basic open hearth furnace was hot-rolled in to a reduction ratio of 7.5.

(3) One twelve-sided 15t ingot from an acid open hearth furnace was forged into a slab previously, then rolled in to a 100 mm thick plate. The total reduction ratio combined with forging and rolling reductions was 10.1.

The results obtained were as follows:

(1) The mechanical properties of rolling-direction specimens were improved with increase of reduction ratio, rapidly up to a reduction ratio of 12 and slowly thereafter. This tendency was remarkable in elongation, reduction of area and notch-toughness but a little in yield and tensile strengths.

(2) The mechanical properties of transversal-direction specimens were improved rapidly with increase of reduction ratio up to 8, but better effects were not expected with further proceeding of rolling. This tendency was conspicuous in elongation and reduction of area.

(3) In mechanical properties in the thickness direction, tensile and yield strengths were improved remarkably with plates of reduction ratios between 7 and 8. Elongation, reduction of area and notch-toughness were increased with plates of reduction ratio up to 12, but decreased thereafter.

(4) Hence, in considering the properties in the thickness direction, it was desirable to apply the rolling reduction ratio over 8 for commercial steel plate. At the reduction ratio of 12, best properties were obtained for all directions in the plate.

(5) After normalizing, the properties except tensile strength were improved, but the behavior of reduction ratio was scarcely varied from the as-rolled condition.

(6) Application of forging in slabbing process was effective as well as rough rolling, and a property improvement corresponding to total reduction ratio was achieved.

(7) The same behavior was obtained in the case of a fine-grained steel in the relation between reduction ratio and mechanical properties.

## I. 緒 言

圧延比、あるいは鍛錬比と材質の関係については、従来多くの報告があり<sup>1)~5)</sup>、それらを総括すると、大体つぎの結論となる。

1. 長さ方向の材質は、鍛錬比4~6までは、鍛錬比とともに向上するが、のち飽和する。
2. 横方向の材質は、鍛錬比2~3にてもつとも良好となり、以後の鍛錬によつては、かえつて低下する。

3. したがつて成品の用途によつては、最適鍛錬比を考慮する必要がある。

しかし、これらの研究の多くは、小鋼塊の鍛造の場合をとりあげたものであり、さらに熱延ビレットおよび丸鋼については、先頃、調査結果が報告せられている<sup>6)</sup>が、鋼板の場合には圧延による断面形状変化が、相似形

\* 昭和 35 年 10 月本会講演大会にて発表

\*\* 尼崎製鉄株式会社

Table 1. Ladle analysis (%)

| Test No. | Heat No. | Furnace* | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | V     | Sol. Al |
|----------|----------|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|---------|
| 1        | H 637    | B.O.H.   | 0.23 | 0.60 | 0.20 | 0.009 | 0.019 | 0.18 | —    | —    | —     | 0.005   |
| 2        | H8927    | B.O.H.   | 0.16 | 0.65 | 0.26 | 0.012 | 0.023 | 0.23 | —    | —    | —     | 0.022   |
| 3        | コ1429    | A.O.H.   | 0.24 | 0.58 | 0.25 | 0.026 | 0.024 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.096 | —       |

\* B.O.H.: Basic open hearth, A.O.H.: Acid open hearth.

Table 2. Rolling and forging course of the plates.

| Test No. | Ingots   | Slabs               |         |         | Plates              |               |                 | Reduction ratio |
|----------|--|---------------------|---------|---------|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|
|          |  | Thick-ness          | Width   | Length  | Thick-ness          | Width         | Length          |                 |
| 1        | 10 t -slab Ingots<br>Thick-ness 600 mm<br>Width 1530 mm<br>Length 1600 mm        | 300 mm              | 1530 mm | 2200 mm | Thick-ness 150 mm   | Width 1700 mm | Length 3780 mm  | 4               |
|          |  |                     |         |         | 100 mm              | 1700 mm       | 5300 mm         | 6               |
|          |  |                     |         |         | 86 mm               | 1700 mm       | 6200 mm         | 7               |
|          |  |                     |         |         | 75 mm               | 1700 mm       | 7540 mm         | 8               |
|          |  |                     |         |         | 50 mm               | 1700 mm       | 11000 mm        | 12              |
|          |  |                     |         |         | 30 mm               | 1700 mm       | 11000×2 mm      | 20              |
| 2        | 600 × 1530 × 1600  | —                   | —       | —       | 80 × 1970 × 8100    | —             | 7.5             |                 |
| 3        | 15 t -12 sided ingots<br>Top-dia. 1140mm } length<br>Bottom-dia. 1032mm } 1550mm | 320 × 1575 × 2060mm | —       | —       | 100 × 1770 × 5460mm | —             | By forging 7.4* |                 |
|          |  |                     |         |         |                     |               | By rolling 2.7  |                 |
|          |  |                     |         |         |                     |               | Total           | 10.1            |

\* Calculated after JIS G 0701

的でないので、これらの結果をそのまま当てはめるわけにも行かない。

そこで、平炉で溶製したキルド 10 t 鋼塊から板厚を 7 通りに変えて圧延した鋼板について、その材質と圧延比との関係を調査し、また 15 t 鋼塊から鍛造と圧延の併用により製作された極厚鋼板における鍛錬の効果についても考察した。

## II. 供試材ならびに試験方法

調査にもちいた各試料の化学成分ならびに、鍛造と圧延の経過を Table 1, Table 2 に示した。それぞれの試料については、そのトップおよびボトムから試験片を採取したのち、サルファ・プリント、顕微鏡組織検鏡、引張試験、Vノッチ・シャルピー衝撃試験の各調査を行なった。Table 2 に示されている 8 種類の試作鋼板のうち、テスト 1 は、粗粒鋼を対象として同一チャージから、それぞれ 6 段階に板厚を変えて圧延された鋼板について、圧延比と材質の関係を追求し、テスト 2 は、同じサイズの細粒鋼鋼塊から圧延された 80mm 厚鋼板の性状を調べ、テスト 3 は、鍛造によつてつくられたスラブを経由する極厚鋼板における鍛造による鍛錬効果を見たものである。

引張試験は JIS の 特 1 号(全厚)と特 3 号(部分)の両

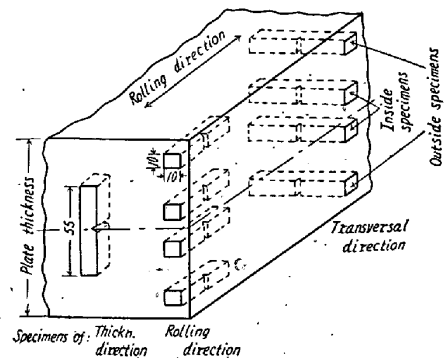


Fig. 1. Sampling details of V-notch Charpy impact test specimens.

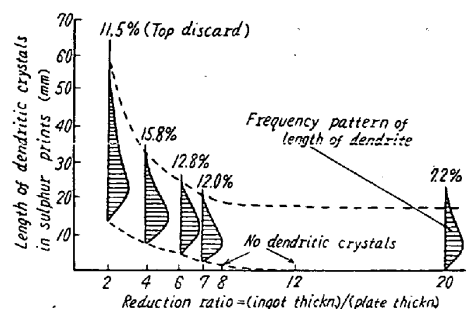


Fig. 2. Reduction ratio vs. length of dendritic crystals in sulphur prints of the ingot top.

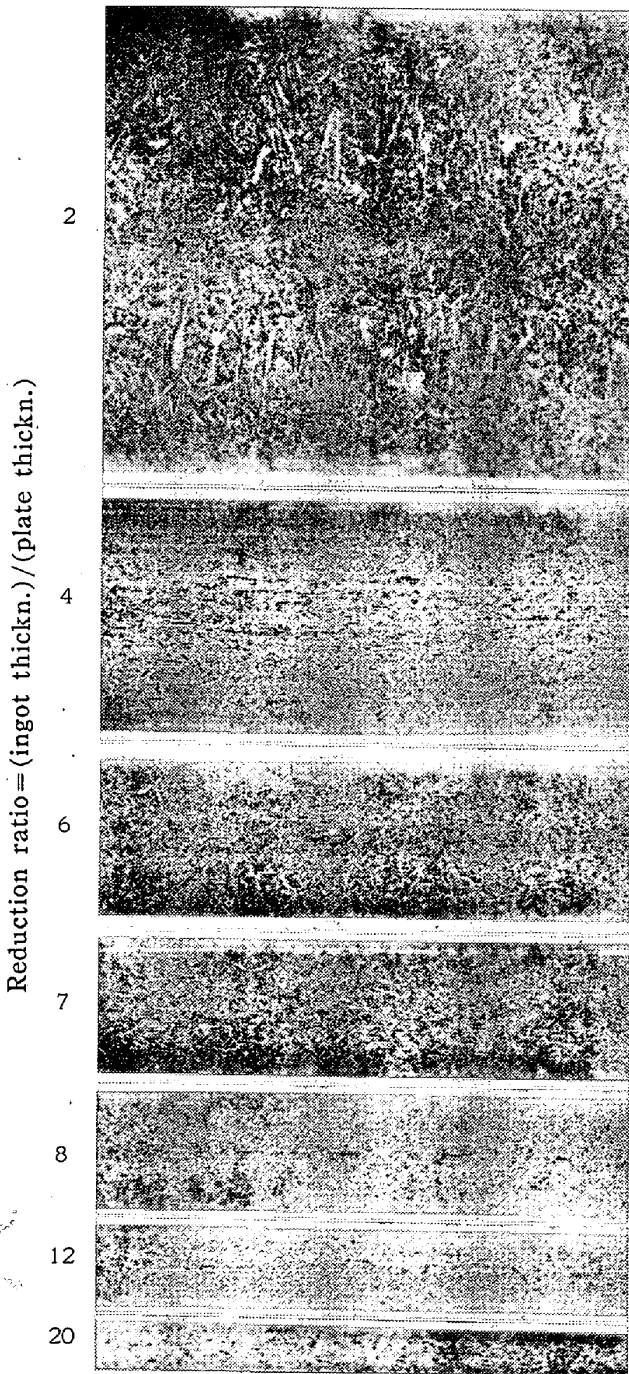


Photo. 1. Sulphur-prints of ingot-top samples.  $\times 1/4$  (2/3)

方を、またVノッチ・シャルピー衝撃試験は、JIS 4号<sup>8)</sup>(Fig. 1参照)を使用し、それぞれの試料の圧延方向、直角方向、および板厚方向について試験を行ない、さらに板厚表面部と中心部における性状の相異についても検討を加えた。

### III. 試験結果とその考察

#### 1. サルファ・プリント

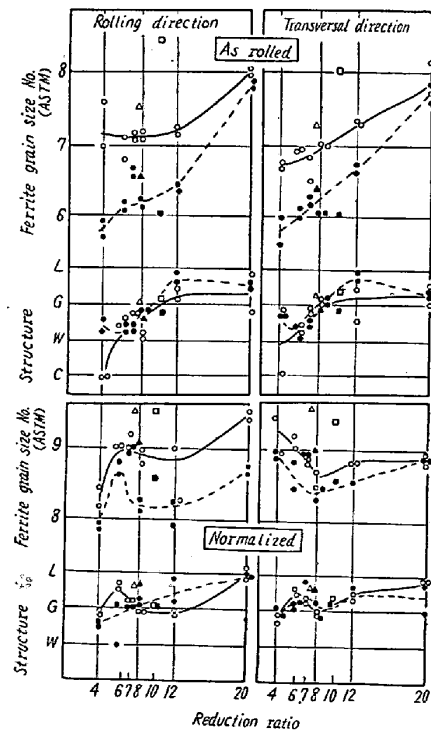
テスト1におけるトップ側直角方向面のサルファ・プリ

ントにて認められた鋼塊樹枝状晶の長さの分布と、圧延比との関係を Fig. 2 に、サルファプリント像を Photo. 1 に示す。もちろんボトムにはかかる樹枝状晶は認められなかったが、トップでは、圧延比が8程度になると、鋼塊一次組織は完全に破壊されてしまうことがわかる。この傾向は、テスト2の細粒鋼試料でも再現され、圧延比7.5で巨大な樹枝状組織はかなり細かく破壊されている。さらに、鍛造と圧延とを併用したテスト3では、圧延だけでの圧延比12に相当する1次組織の破壊がもたらされた。

#### 2. 顕微鏡組織

Fig. 3 および Photo. 2 は、テスト1におけるそれぞれの試料の、圧延のまま、および焼準後の組織と粒度を示したものであるが、これからつぎのことがわかる。

圧延のままでは、フェライト結晶粒度は圧延比とともに微細化し、かつ板厚表面部と中心部との粒度差がなくなっている。とくに中心部の粒度は、圧延比の増加とともに、ほぼ直線的に微細化し圧延比20では表面とほとんど同一粒度になつている、またトップ側試験片も、ボトムとほぼ同様の経過で微細化していた。



NB. —○— Outside } test-1  
 -●- Inside }  
 △ ▲: Fine-grained steel; test-2  
 □ ■: Forged and rolled steel; test-3  
 Structure: L: Lamellar structure  
 G: Granular structure  
 W: Widmanstätten structure  
 C: Coarse structure

Fig. 3. Reduction ratio vs. microstructure (bottom sample)

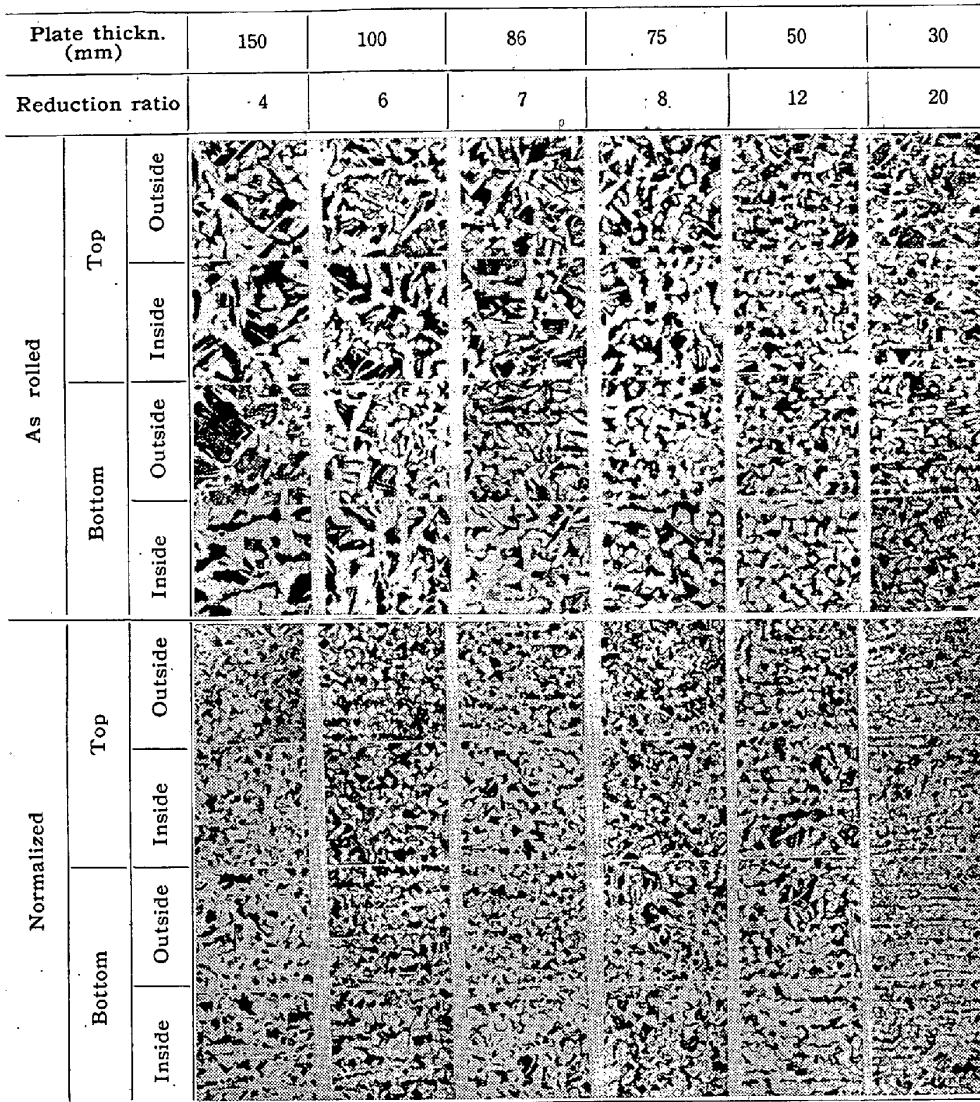


Photo. 2. Reduction ratio vs. microstructure. (Rolling direction)

一方、圧延に伴う組織の形態変化については、板厚内外の差は少ないが、圧延比 12 程度までは鍛錬効果の滲透による急激な組織改善が認められるが、圧延比 12 付近で改善効果は飽和しそれ以上 20 まではあまり変わらない。したがって、完全な粒状組織をもたらすには、圧延比を 12 以上とすることが必要であり、また少なくともウィドマンステーテン組織を示さずに粒状組織にするには、圧延比 8 以上が必要である。

また、各試料について焼準を行なった場合には、各板厚の場合とも、粒状ないしは層状組織に転じ、粒度も一様に微細化し、圧延のままの影響をとどめない。しかし板厚内外の粒度差は依然として認められる。

テスト 2, 3 の結果についても Fig. 3 中に併示したが、オーステナイト細粒鋼では、同一圧延比でも粗

粒鋼に比較してフェライト粒度は幾分微細になつてはいるが、板厚内外での組織改善の相違は粗粒鋼と同程度であることがわかる。また鍛錬と圧延とを併用した場合には、その鍛錬効果を、鍛造比と圧延比の合計で表わすと、組織改善は圧延だけの場合での相当圧延比における挙動と一致するが、粒度そのものは板厚内外の粒度差がかなり大きく、とくに外側部のフェライト粒度が微細になつてはいる。また焼準後については、テスト 2, 3 ともテスト 1 よりは微細である。これはテスト 1 が Sol. A1 の低い粗粒鋼であつたのに対し、テスト 2 は A1 による粗粒鋼(オーステナイト粒度 6・8)であり、テスト

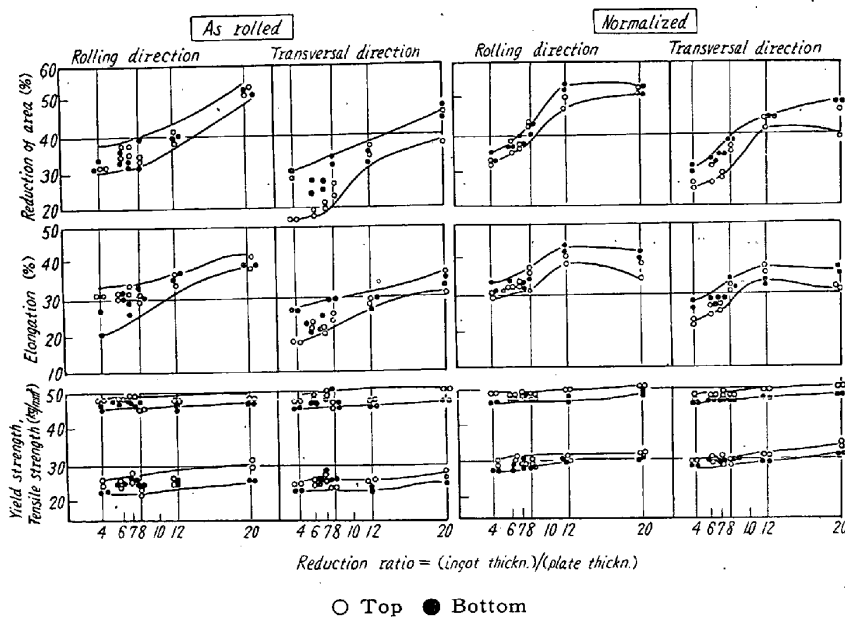


Fig. 4. Results of tensile test with full-thickness specimens.

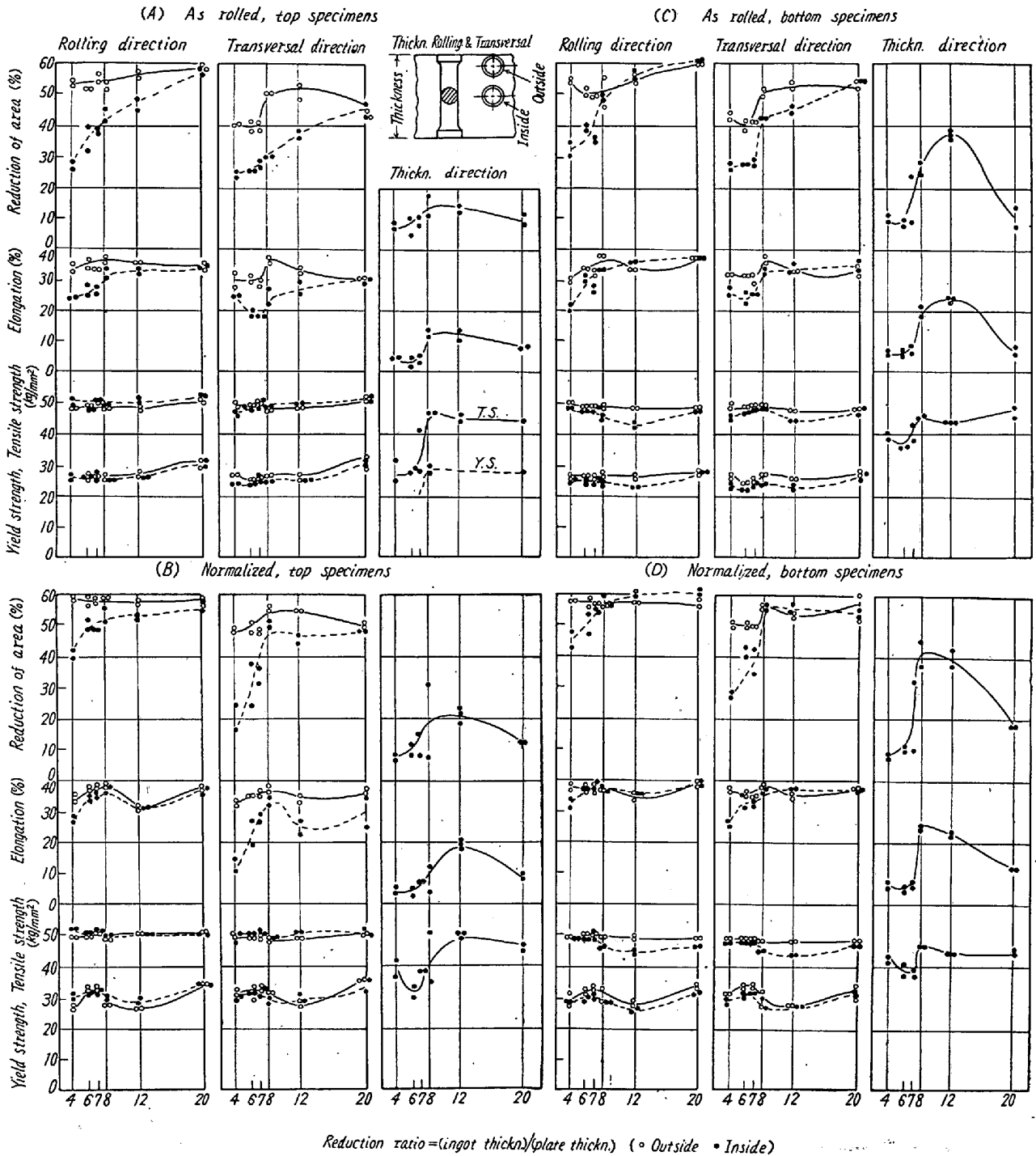


Fig. 5. Results of tensile test (with local specimens):  
Reduction ratio vs. tensile properties.

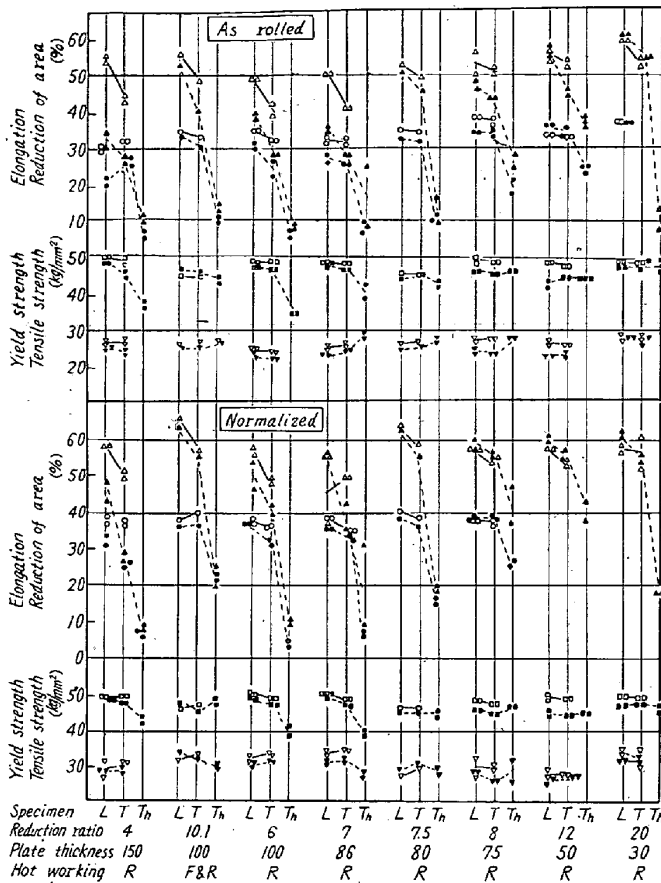
3はVによる中粒鋼(オーステナイト粒度4・3, 混粒)であることによると考えられる。

3. 引張試験

全厚試験片での結果をFig. 4に部分試験片での結果をFig. 5 (A), (B), (C), (D), Fig. 6に示す。

これからわかるように、圧延のまま材の全厚試験では引張強さ、降伏点は圧延比に対しわずかな上昇傾向はあ

るがほとんど変化がなく、一方、伸び、絞りの靱性に圧延比とともに向上している。また焼準後においては、降伏点は圧延のままよりも若干上昇しているが、圧延比に対しては、ほとんど一定の傾向をたもつ。しかし、伸び、絞りは、圧延比12に以下、とくに8~12での向上がいちじるしく、圧延比20にてはもはや焼準による靱性向上は認められない。



NB. 1. Specimen L: Rolling direction, T: Transversal direction, Th: Thickness direction  
 2. Hot working R: Rolling F: Forging  
 3. ▽▽: Yield strength, □□: Tensile strength, ○●: Elongation, △▲: Reduction of area  
 4. ○ (Open mark): Outside, ● (Closed mark): Inside  
 Fig. 6. Results of tensile test (with local specimens): Direction of specimen sampling vs. tensile properties (bottom samples).

つぎに、部分試験片による結果では、圧延のまま材における引張強さ、降伏点は全厚試験片の場合と同様、圧延方向および直角方向では、圧延比の増加によりわずかな上昇傾向が見られるだけであるが、板厚方向では、圧延比7~8を境として約1.6倍に上昇して、圧延方向や直角方向なみの材質値を示している。この板厚方向での特長は、焼準によつて改善はされるが、それでも圧延比7~8にて依然として1.2倍程度の向上が認められる。したがつて、まず強度的見地からは、圧延比は8以上が望ましいと考えられる。つぎに、板厚中心部における伸び、絞りの靱性は、圧延比の増加とともに向上が見られるが、表面部での靱性については、圧延比4にてすでに相当の靱性改善効果が賦与されておりその後の経過は圧延方向は以後ゆるやかに、直角方向は圧延比8付近でかなり急上昇してから、圧延比20にいたつて再び圧延比8未満のレベルにまで減少している。

一方、部分引張試験片による板厚内、外部の差は、引張強さ、降伏点ではほとんどなく、伸び、絞りは圧延比とともに差が小さくなり圧延比20にいたつてまったく内外均質となつている。

なお、焼準によつては、外部では圧延比7以下で、また板厚中心では圧延比8~12で、それぞれいちじるしい材質値の向上があるが、圧延比20程度になると、内外いずれも、もはや改善効果は期待できない。

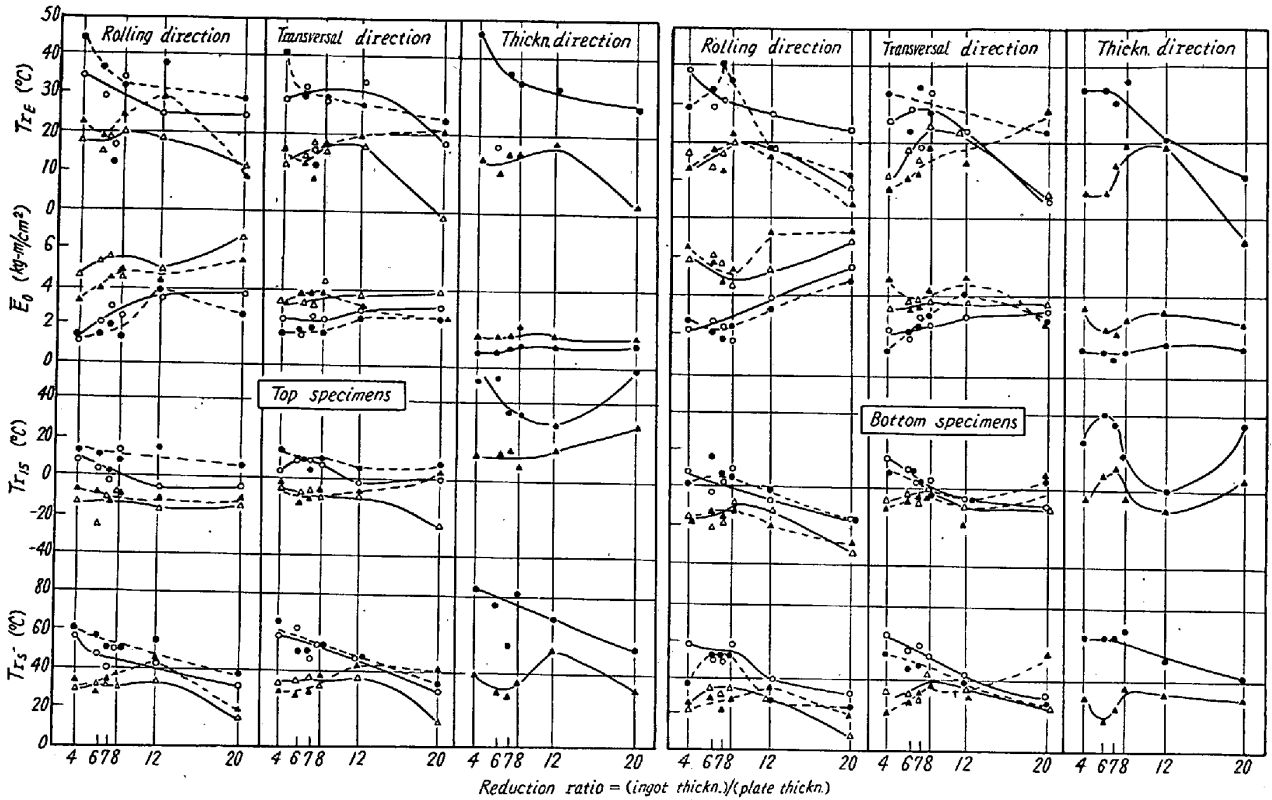
また、圧延のまま材の板厚方向の靱性は、圧延比7~8にて急激に上昇し、さらに圧延比12で最大となりその後は圧延比20にいたつてやや下降する山型の変化が見られるが、焼準によつては、圧延比8~12での靱性向上がいちじるしく、圧延比7以下および20では、焼準効果が少ないので、圧延のまま材での山型変化が強調せられている。

以上の傾向を、全厚試験片と対比してみると、板厚中心部での挙動がよく対応していることがわかる。

つぎに、試験片の採取方向——圧延方向、直角方向、板厚方向——による方向性について検討を加えてみると Fig. 6にも示されているごとく、テスト1の圧延のまま材では、引張強さ、降伏点は圧延比8で3方向の等方性が賦与せられるが、伸び、絞りは圧延比12で板厚方向も含めて最も均質な材質となり、さらに圧延が進んで圧延比20程度にいたると、却つて板厚方向の靱性が低下し、等方性がそこなわれている。テスト2の細粒鋼でも、圧延による材質向上はテスト1の粗粒鋼と変わらない。また鍛造と圧延とを併用したテスト3の結果では、加えられた鍛造と圧延の効果を、鍛造比と圧延比の合計鍛錬比で示せば、圧延だけでの同じ鍛錬比に相当する等方性(板厚方向同含めて)が得られる。換言すれば同じ鋼塊から出発しても、スエ込み的な鍛錬を粗加工過程に加えることにより、極厚鋼板としての等方性を増すことができるであろう。

以上の引張性質から、つぎの結論が得られる。すなわち、板厚方向の強度と靱性、および直角方向の靱性の見地からは、圧延比8以上が必要であり、また板厚方向において最もすぐれた靱性を要する場合には、圧延比は12が適当である。一方、焼準による材質向上も、圧延比12にて最大となり、また等方性の見地からも圧延比12が最もすぐれている。したがつて極厚鋼板のごとく、使用条件として3軸応力下での等方性が要求せられる場合には、最適圧延比ないしはスエ込み鍛錬を考慮する必要がある。

4. Vノッチ・シャルピー衝撃試験



NB. 1. ○, ●: As rolled △, ▲: Normalized  
 2. ○, △ (open mark): Outside, ●, ▲ (closed mark): Inside  
 3. TrE: Transition temp. based on absorbed energy.  
 E<sub>0</sub>: Charpy impact value at 0°C.  
 Tr<sub>15</sub>: Transition temp. based on 15ft-lb.  
 Tr<sub>s</sub>: Transition temp. based on 50% shear fracture.

Fig. 7. Results of V-notch Charpy impact test.

Fig. 7 Top に示すごとく, top および bottom それぞれ, 結果にはバラツキが多いがおおむね, つぎのことが指摘されよう.

圧延のまま材では, 脆性破壊の亀裂発生に関する特性値: Tr<sub>15</sub> (15 ft-lb 遷移温度) は, 圧延方向, 直角方向, およびトップとボトム, あるいは板厚内・外部とも, 圧延比の増大につれて低下して行くがその傾向は圧延比 8 までは急であり, 8 以上はゆるやかである. ところが, 板厚方向では, 圧延比 12 にて極小を有する谷型の変化がみられ, 引張試験における伸び, 絞りの靱性ととも切欠靱性においてもまた最適圧延比が存在し, それ以下の圧延比はもちろん, それ以上, 圧延が進行しても靱性が低下する. この傾向はトップ, ボトムの両試料とも共通して認められている.

また E<sub>0</sub> (シャルピー 0°C 平均値) は, Tr<sub>15</sub> と大体対応した変化を示し, 圧延方向と直角方向では圧延比 4~12 まで向上した後飽和する. 板厚方向でも Tr<sub>15</sub> と対応した変化を呈している.

一方, 亀裂の伝播に関連する特性値: Tr<sub>s</sub> (破面遷移温度) および TrE (エネルギー遷移温度) については,

Tr<sub>15</sub> とは対応せず, 圧延, 直角, 板厚の 3 方向を通じて圧延比の増大とともに低下する. すなわち, 圧延比が大になるほど, 亀裂の伝播を抑制する効果を与えられるものと考えられる.

なお, 焼準材については, 各遷移温度は全般に低下しており, 0°C での吸収エネルギー値 (0°C 値) は上昇して切欠靱性が向上するが, とくに板厚方向の遷移温度の低下がいちじるしい. また焼準による切欠靱性の改善は圧延比の低い範囲 (4~8) にて効果的に現われるので, 圧延比との傾向をもつ関係は薄らぐが, 引張試験値のように圧延比 20 にて焼準効果がなくなるということはなく, 向上が示される.

以上のごとく, 圧延のまま材の切欠靱性の見地からは, 亀裂伝播の抑制特性は圧延比とともに向上し, 亀裂発生の抑制作用からは, 圧延比 8 までの改善が効果的であるので, 両者を包括して, 圧延比 8 以上が望ましい. しかし, 板厚方向をも考慮すれば, 圧延比 12 付近が最適である. ただし, ここに言う板厚方向とは Fig. 2 に示す試験片の採取方向を意味する.

なお, テスト 2, 3 の結果については, 供試材の化学

成分、粒度が異なるので、テスト1と同一に論じることができないと考え省略した。

#### IV. 総 括

熱間圧延ならびに一部鍛造を併用したキルド鋼板の圧延比と材質との関係について調査した結果、つぎのことが明らかとなった。

1. 圧延方向の材質は、圧延比12まで急速に、以後はゆるやかに、圧延比とともに向上する。この傾向は、伸び、絞りの靱性および切欠靱性にはよく現われるが、降伏点、引張強さのような強度には、あまり現われない。

2. 直角方向の材質は、圧延比8を境として急激に向上し、以後は飽和ないし下降を示す。この傾向は伸び、絞りの靱性によく現われている。

3. 板厚方向の材質は、圧延比8を境として強度がいちじるしく向上し、伸び、絞りおよび切欠靱性は、圧延比8ないし12までは向上するが、のち圧延比20までは、かえって圧延の進行により下降する傾向がある。

4. したがって板厚方向まで含めて考えれば、圧延比8以上が成品に対する必要条件で、圧延比12付近が最

良条件といえる。

5. 焼準によつては、圧延比12で最大の材質改善が得られたが、圧延比20では、伸び、絞りの向上はほとんど認められず、切欠靱性の向上のみが見られた。焼準材についても、圧延比との関係は、一般に圧延のまま材での挙動をそのまま残した。

6. 鍛造を粗圧延にかえてもちいることにより、圧延鋼板の材質等方性は、鍛造比と圧延比との総合鍛錬比に応じただけ増進された。

7. オーステナイト細粒鋼での圧延比と諸材質との関連については、顕微鏡組織以外には粗粒鋼とあまり相異は見出せなかつた。 (昭和36年4月寄稿)

#### 文 献

- 1) W. COUPETTE: Stahl u. Eisen, 61 (1941) s. 1013, 1036
- 2) 伊丹: 鉄と鋼, 22 (1936), No. 8 付録 p. 7
- 3) G. CHARPY: Engineering, (1918), Sept. 20
- 4) 斎藤: 鉄と鋼, 10 (1942), p. 542
- 5) 小平: 八幡製鉄研究報告, Vol. XVI, No. 1
- 6) 村山, 木村: 製鉄研究, No. 224 (1958) p. 118
- 7) JIS G 3103
- 8) JIS Z 2202