

(昭和 31 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

圧延鋼板の異方特性とその発生原因 に対する実験的考察

正員 工学博士 渡 辺 正 紀*

正員 工 学 士 出 口 義 治*

Anisotropic Properties of Rolled Steel and Experimental Analysis of Their Causes

By Masaki Watanabe, *Kogakuhakushi, Member*and Yoshiharu Ideguchi, *Kogakushi, Member*

Abstract

Tensile tests for many kinds of structural steels containing mild and high tensile steels have been performed in rolling, transverse and thickness direction. From these experimental results we knew that tensile strength exhibits little or no directional properties but ductility decreases markedly in the thickness direction. Moreover, the effect of this directionality on the fracture under combined stresses have been investigated by thin hollow cylindrical test specimens cutted from a thick pressure vessel steel.

The causes of their directionality were analyzed experimentally and we concluded that alignment and shape of microscopic inclusions may be main causes of the directionality of hot-rolled structural steels.

1. 緒 言

脆性破壊の問題における亀裂の発生の問題などに関連して鋼板のあらゆる方向の機械的特性についての吟味は是非なさるべきであり、又厚板鋼板がますます広範に使用されつつある現在、鋼板の板厚方向の機械的特性調査も目下の急務と考えられる。しかし従来行われた鋼板にかんするこの種異方性の研究は圧延面内において、圧延方向にたいする角度の相異による機械的性質の差異についてのみであつて、鋼板の厚さ方向にたいする研究資料は非常に少ない¹⁾。

本研究は構造用として実用されている圧延鋼板 26 種類についてその板厚方向の機械的性質を調査すると共に圧延方向、板巾方向の引張試験をも行つて機械的異方性の状態を研究し、同時にかかる異方性が材料の破壊にいかなる影響をおよぼすか二軸応力状態下において調査した。しかして圧延鋼板における異方性の発生要因にたいする二・三の実験的考察を加えたものである。

2. 供 試 鋼 板

試験材料としては現在構造用として実用されている軟鋼板 15 種類と高張力鋼板 12 種類でその化学成分は板厚と共に第 1 表に示してある。

Table 1 Chemical Composition and Plate Thickness of Test Steels

Steel	thickness (m.m.)	Chemical Composition (%)					
		C	Si	Mn	P	S	Cu
K-1*	27	.11	.15	.75	.072	.018	—
" 2	28	.20	.24	.68	.014	.016	.27
" 3*	27	.22	.26	.79	.027	.028	—

原稿受付. 7 月 13 日

* 大阪大学工学部

K-4*	32	.14	.17	.75	.020	.017	—
" 5	30	.24	.16	.85	.037	.019	—
" 6*	36	.12	.21	.84	.020	.020	—
" 7*	29	.18	.23	.64	.024	.019	—
" 8	30	.15	.18	.57	.016	.023	.18
" 9	28	.14	.19	.66	.028	.026	—
" 10	28	.15	.21	.71	.021	.030	—
" 11	24	.16	.22	.78	.020	.016	—
" 12	25	.13	.23	.77	.016	.024	—
" 13	98	.23	.22	.72	.034	.037	—
K-14	138	.25	.22	.68	.011	.023	—
R-1	25	.17	—	.06	.016	.034	—
H-1	20	.17	.37	1.30	.019	.008	.27
" 2	"	.15	.58	1.60	.021	.110	.31
" 3	"	.18	.514	1.55	.024	.022	.195
" 4	"	.18	.487	1.54	.022	.022	.197
" 5	"	.12	.705	1.15	.020	.020	.183
" 6	"	.19	.223	1.344	.018	.009	.164
" 7	"	.195	.229	1.377	.017	.006	.152
" 8	"	.13	.481	1.19	.021	.006	.176
" 9	"	.142	.475	1.183	.013	.007	.192
" 10	"	.19	.28	1.32	.018	.018	.15
" 11	"	.19	.61	1.30	.018	.013	.15
" 12	20	.18	.15	0.94	.015	.006	.30

* Ladle K-:Killed st. R-:Rimmed st. H-:High Tensile st.

3. 試験片および試験機

本試験に使用した試験片の形状寸法ならびに採取要領を Fig. 1 に示す。図示したように試験片は非常に小型

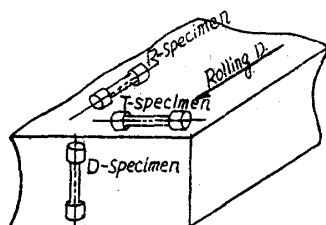
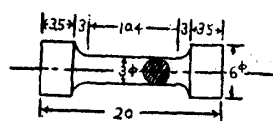


Fig. 1 Details of Directionality specimen (all dimensions are m. m.)

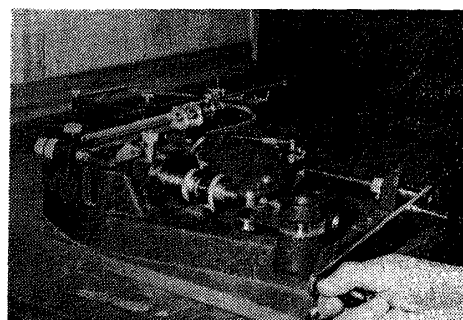


Fig. 2 "Universo Meter" especially designed for small test specimens

であるので旋盤加工による影響が試験結果に相当入るのではないかと疑念があつたがエメリー・ペーパーで仕上げたものと比較によりこの影響はほとんど無視し得る程度であることが確認された²⁾。使用した試験機は小型試験片を手軽に使用出来る 2t. 容量の Universo Meter²⁾ と称せられるものである。(Fig. 2 参照)

4. 現用圧延鋼板の異方性

各鋼材より圧延方向 (R), 板巾方向 (T), 板厚方向 (D) の三方向から試験片を採取し強さの基準として引張強さをとり延性の基準として伸率を採用した。代表的な三方向の荷重-伸び曲線を示すと Fig. 3 の如くで圧延方向ならびに板巾方向は十分な断面収縮を起して延性に富む材料が示すような荷重と伸びとの関係を示しているが、一方板厚方向では荷重増加の途中に

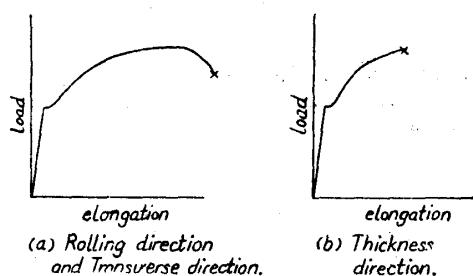


Fig. 3 Schematic Load Elongation Curves

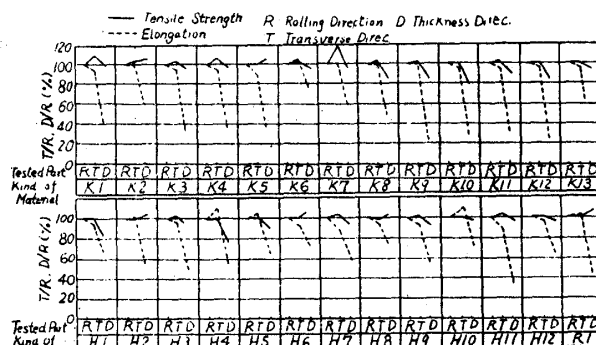


Fig. 4 Test Results

において突然破断する。すなわち非常に脆い材料が示すような曲線となる。しかも Sulphur band がたとえわずかでもあれば、その部分から破断するが Sulphur band の全く見られないもの (Fully killed Steel) でもほとんど断面収縮を起すことなく切れてしまうようである。26 種類の材料について得た結果を Fig. 4 に示すごとく整理した。図中各鋼板の異方性の比較を便利にするために圧延方向 (R) の引張強さ、伸率にたいする比として各方向の値を示した。

Fig. 4 をしさいに眺めると引張強さは圧延方向より板巾方向がむしろ高い値を示す場合が多いが伸率の方はその逆になっている。これにたいして板厚方向の特性は引張強さ、伸率共に減少していることが知れる。しかし上述のことはその差異にしてもごくわずかで大まかにいえば、強さの点では三方向とも大差ないが延性の方は板厚方向において非常に劣り断面収縮の現象を伴わないことは注目し値する。又一つの鋼板について Fig. 5 (a) に示す種々の方向の引張特性をしらべた結果の一例が Fig. 5 (b), Fig. 5 (c) に示されている。各方向とも強さの点では大差ないが延性は 4, 10, 方向から厚さ方向に近づくにつれ急激に減少する。Fig. 6 に示した破断後の試験片写真はこれらの延性の劣る方向では圧延面に平行な面に沿って断面収縮をおこすことなく脆く破断することを明瞭に示している。

5. 異方性が破壊におよぼす影響 (実験例)

圧延鋼板はその板厚方向の延性が著しく劣るために機械的に著しい異方性を示すことを知ったが、かかる異方性材料が二軸応力をうける場合にいかなる挙動を示すか Fig. 7 に示す薄肉円筒試験片を用いて調査した。試験片は K-14 鋼を用い、Fig. 8 に示すように圧延方向、板厚方向、および圧延面と 45° をなす方向の三方向より採取し夫々 MR, MD, MT₄₅ の符号を附した。この試験材料の異方性調査のために行つた一軸引張の結果は Fig. 9 に示してあるが顕著な異方性を示している。試験はアムスラー試験機と容量 1000 気圧の圧力計検査機によつて軸力と内圧をかけ、軸方向応力 (σ_a) と円周方向応力 (σ_t) との比 $n (= \sigma_t/\sigma_a)$ が 0, $1/2$, 1, 2, ∞ となる二軸応力状態下で行われた。特に $n=\infty$ すなわち円周方向のみの応力状態は試験片に内圧による軸方向応力がかからぬように Piston を用いることにした。Fig. 10 は破壊部の写真である。

等方性材料の二軸応力状態下における破壊についてはこれまで多くの報告³⁾があり巨視的な破壊の形式として引張一引張の二軸応力下では Fig. 11 に示す 2 つの型式⁴⁾のものが報告されている。すなわち $n=0 \sim 1/2$ の範囲では A 型がおこり $n=1 \sim \infty$ までは B 型がおこり、しかもこれらの破壊面は最大剪断応力の作用する面と一致するものである。しかるに筆者らの異方性材について得た結果は Fig. 12 に破壊状態を模

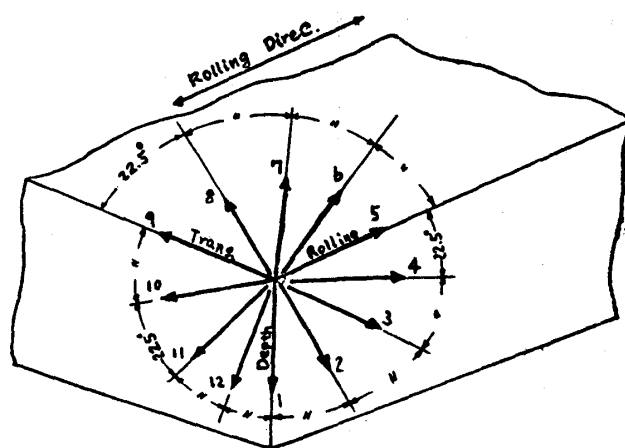


Fig. 5 (a) Tested Direction in Tension
(Depth)

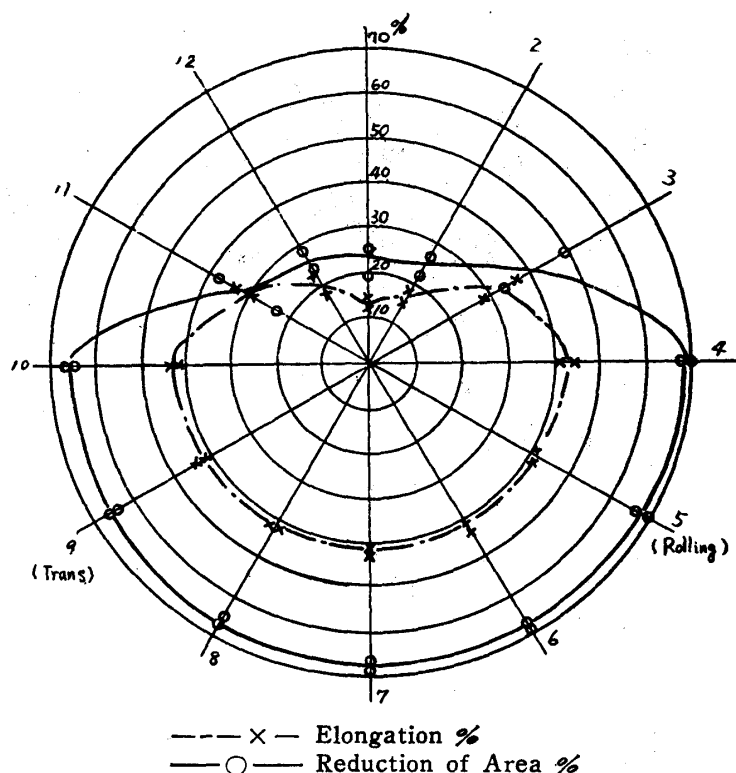


Fig. 5 (b) Ductility in Each Direction (K-13 steel)

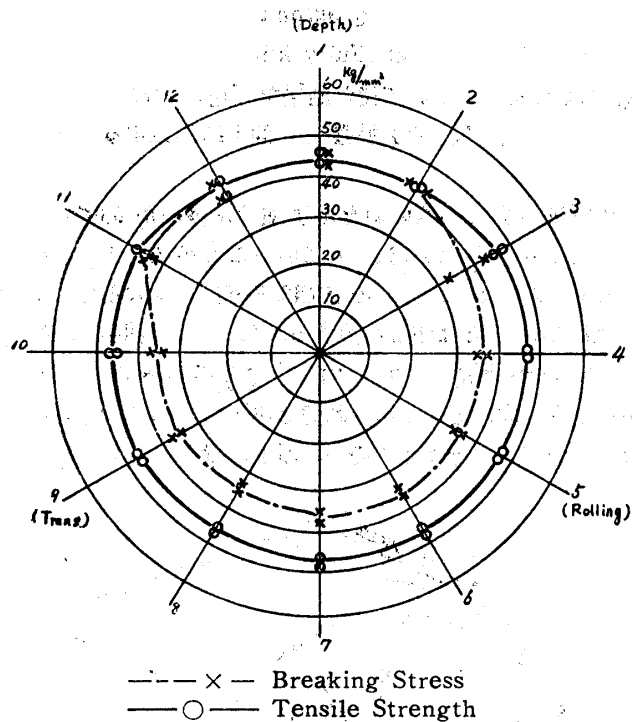


Fig. 5 (c) Tensile Strength in Each Direction (K-13 steel)

型的に示したように等方性材料にたいする上述の結果とは大いに異っている。異方性の主軸方向と主応力の相対関係によって破壊の状況は変るようで必ずしも最大剪断応力の作用する面で破壊せず二、三の場合を除いていずれの場合にも一軸状態での機械的性質の劣る板厚方向に垂直な面で破壊するようである。

6. 異方性の発生原因にかんする考察

前述せる実験結果より圧延操作を受けた鋼板はいずれも板厚方向ないしそれに近い方向では非常に延性が劣り延性の点で著しい異方性を呈することが明らかになったが、この要因として

- (1) 圧延繊維組織 (Rolling texture)
- (2) サルファープリント試験の結果認められるサルファープバンド
- (3) 低倍率の検鏡結果に見られるフェライト粒子とパーライト粒子からなる縞模様一層状組織 (Banded Structure)
- (4) 微小な介在物の形状とその分布状態、などの要素が考えられよう。

一般に高温圧延をうける構造用鋼板では圧延繊維組織はそれ程明瞭にはあらわれない⁶⁾から筆者らが問題にしている異方性の要因としては考えられないものであろう。サルファープバンドはもし存在すればすべてその部分から破断することが予備試験の結果判明したので鋼板の異方性の一原因と考えられるが本研究ではサルファープバンドの存在しない鋼材を対称としており、以下(3)と(4)との要素と異方性、すなわち板厚方向の延性不足との関係を調査した。

(1) 異方性と層状組織の顕著さの度合との関係

圧延鋼板の圧延面に垂直な面を検鏡するとフェライト粒子とパーライト粒子とが層をなして圧延方向に並んで

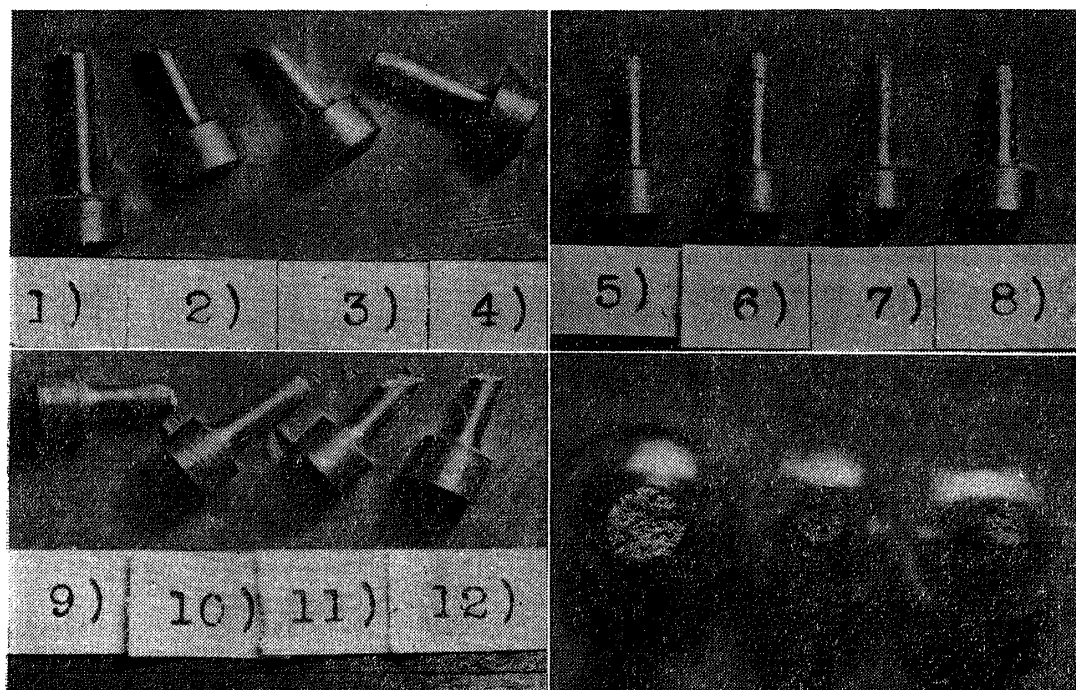


Fig. 6 Fracture Appearance number 1, 2, ..., 12 in photograph correspond to the number in Fig. 5 (a)

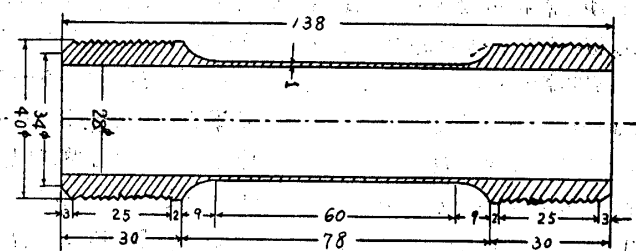


Fig. 7 Thin-walled tubular specimen (all dimensions are m.m.)

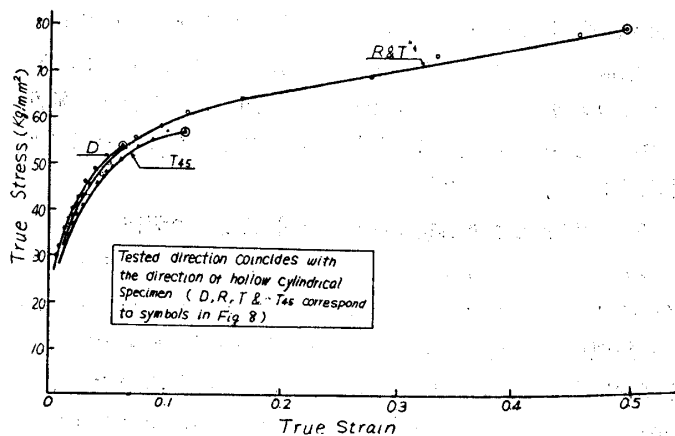


Fig. 9 Tensile test results (K-14 Steel)

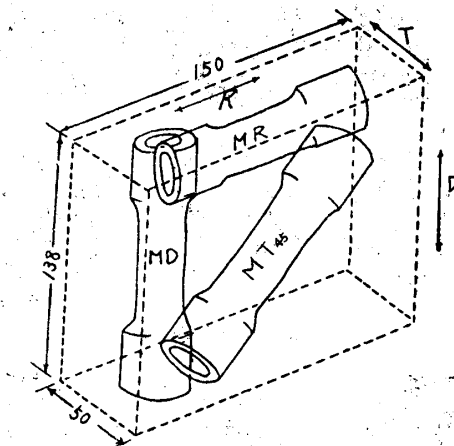


Fig. 8 Details of Cutting of Specimens

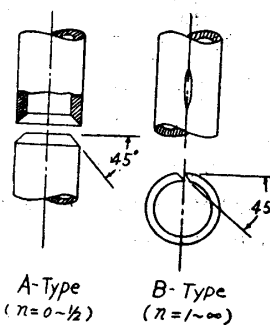


Fig. 11 Two types of Fracture Plane; Appeared in Isotropic Cylindrical Test Specimen

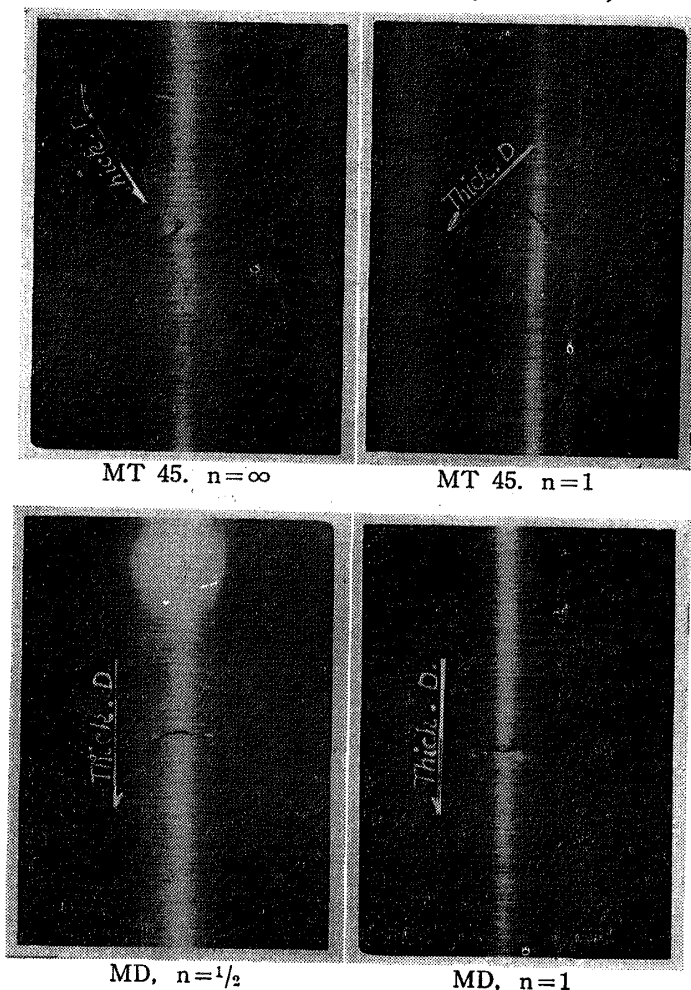
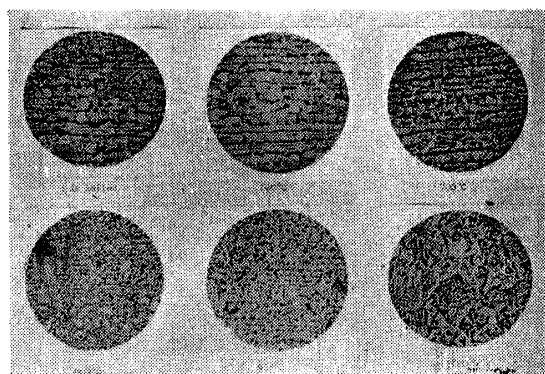


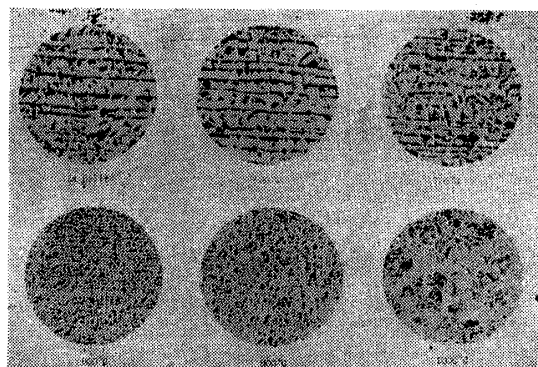
Fig. 10 Detail of Fractured Part

$n = \frac{\phi}{\lambda}$ direction	0	$\frac{1}{2}$	1	2	∞
MR					
MT ₄₅					
MD					

Fig. 12 Schematic Appearance of Fracture



(a) K-12 Steel



(b) H-7 Steel

Fig. 13 Banded Structure of Steels Heat-treated at Various Temperatures ($\times 100$)

いわゆる層状組織と呼ばれる縞模様が見られるが筆者らは圧延鋼板の異方性すなわち板厚方向の延性不足はこれらの変形能の異なる粒子が相互に影響し合うことに原因されているのではなかろうかと考え、この縞模様の顕著さの度合を種々の熱処理によつて変え機械的性質との関係をしらべた。熱処理条件としては 600, 700, 800, 900, 1000°C のそれぞれの温度において1時間保持後空冷することにした。熱処理による層状組織の変化は Fig. 13 に一例を示してある。縞模様の顕著なものからやや不明瞭なもの、又完全にこの層状組織が消滅したと思われるものが得られた。これらの試験材について行つた引張試験結果を図示したものが Fig. 14 (a), (b) である。これよりわかるように各鋼材とも熱処理によつて強度、延性において多少の変化は認められるが依然として板厚方向の延性は著しく悪いようである。

(2) 異方性と介在物の形状、分布状態との関係

鋼板の板厚面を羽布研磨したまま検鏡して見ると圧延面に平行に並んだ介在物が見られる。この介在物の分布状態は前述の熱処理では変らなかつた。板厚方向の引張試験ではこの介在物にたいし垂直方向に引張られることになるので、これが鋭いノッチのような効果を呈して延性の不足をきたすのではないだろうかと考え、この介在物の形状、分布状態の影響を見るために3種類の鍛造を行つて介在物の形状、分布状態を変え異方性との関係を調査することにした。鍛造前の介在物の分布状態は Fig. 15 に示してある。鍛造の要領としては

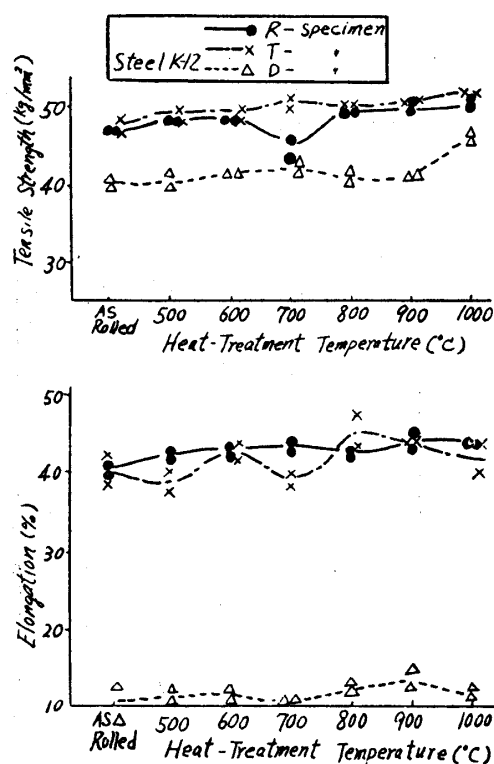


Fig. 14 (a) Tensile Strength and Elongation of Steel Heat-Treated at Various Temperature

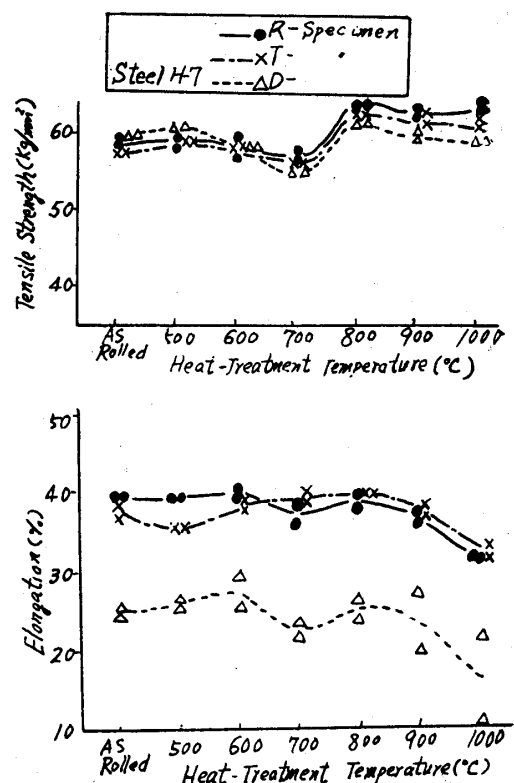


Fig. 14 (b) Tensile Strength and Elongation of Steel Heat-Treated at Various Temperature

Fig. 16 に示すように板厚方向、圧延方向、板巾方向の三種類の鍛造方向の異なるものを行って介在物の分布状態を変え更に各方向の鍛造において介在物の形状を変えるために鍛造の程度を三段階に変えた。鍛造程度を表わす量として鍛造方向の自然歪 (ϵ) を採用した。Fig. 17 は各鍛造後の介在物の分布状態と形状を示したものである。これらの材料にたいする三方向の引張試験結果は夫々 Fig. 18 (a), (b), (c) に示す通りである。

これらの結果より、先ず鍛造方向に直角方向について言えば、引張強さ、延性共にどの鍛造度においても鍛造前と大差ないようである。一方鍛造方向においては、引張強さは板厚方向鍛造の場合を除いて変化はないが延性は鍛造度が増すにつれ減少するようである。

Fig. 17 に見られるように鍛造操作によつて、介在物の分布状態は変化して鍛造方向に垂直になり、そして形状は鍛造度が増すにつれますます扁平化するようであるが、これらの介在物の分布状態と引張方向との関係において鍛造方向の引張試験は圧延鋼板の板厚方向引張と同じ状態と見做せる。したがつて鋼の板厚方向の延性不足は丁度鍛造方向の延性が介在物の分布状態並びに形状によつてだんだん悪くなるのと同様に介在物の切欠効果に起因するものであろう。

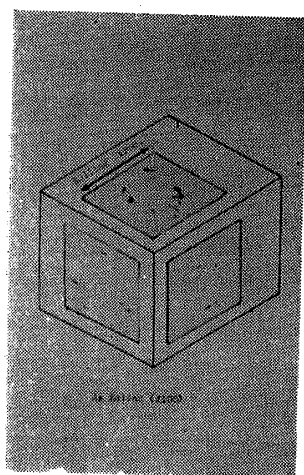


Fig. 15 Alignment and Shapes of Inclusions Before Forging (K-13 Steel)

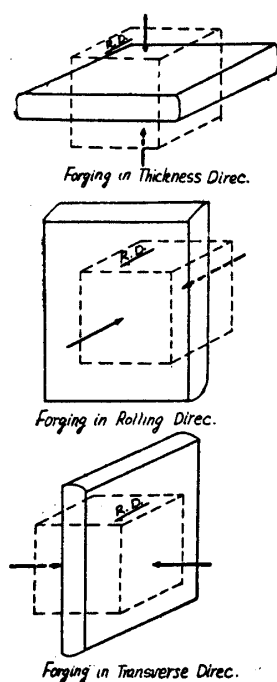
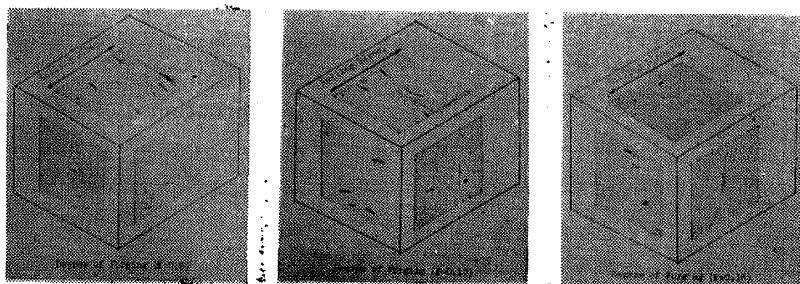


Fig. 16 Direction of Forging to Rolled Steel

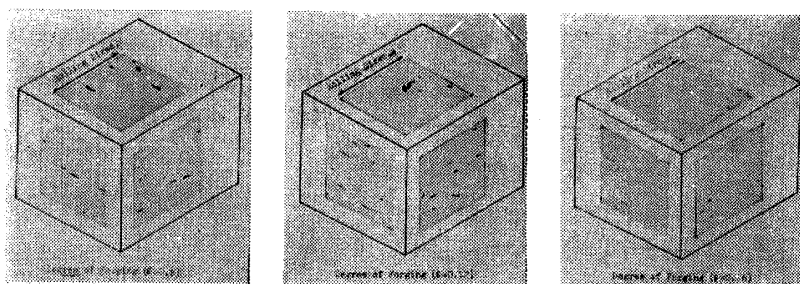
7. 結 論

以上の結果を要約すると次のようになる。

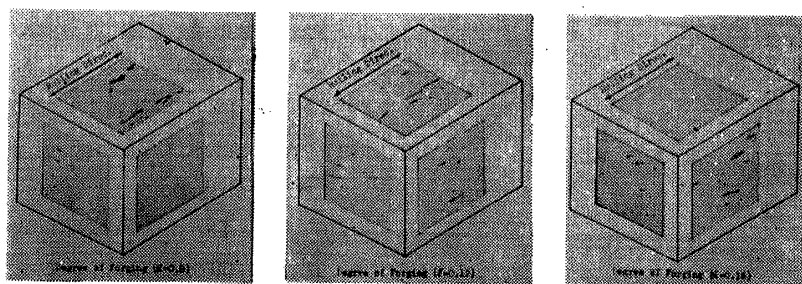
- (1) いかなる化学組成の構造用圧延鋼板も、板厚方向の延性は圧延方向、板厚方向に比し著しく劣り、機械的な異方性を示す。
- (2) 一般に圧延鋼板は板厚方向を含み $\pm 45^\circ$ の範囲では延性が劣るといい得る。
- (3) これらの延性の劣る方向では、試験片は断面収縮の現象を伴わずに圧



(a) Forging in Thickness Direction ($\times 100$)



(b) Forging in Transverse Direction ($\times 100$)



(c) Forging in Rolling Direction ($\times 100$)

Fig. 17 Alignment and Shapes of Inclusions in three Rates of Forging (K-13 Steel)

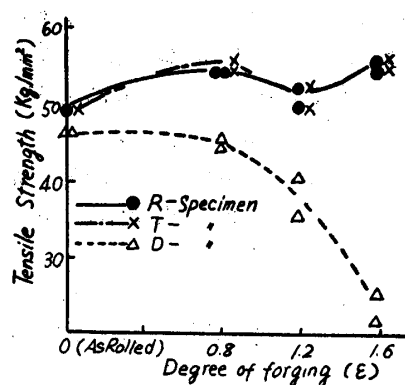


Fig. 18 (a) Test Results of the Material Forged in Thickness Direction

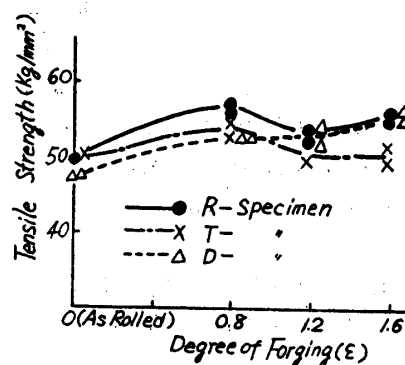
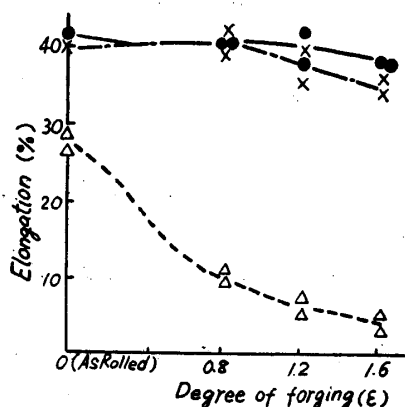


Fig. 18 (b) Test Results of the Material Forged in Transverse Direction

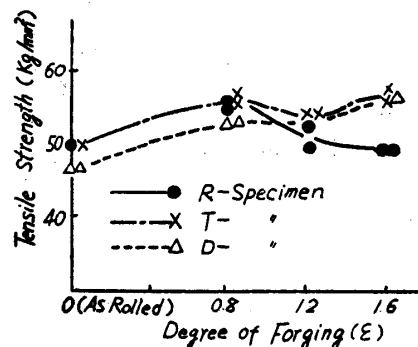
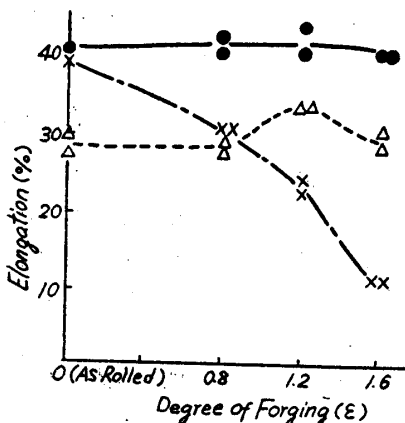
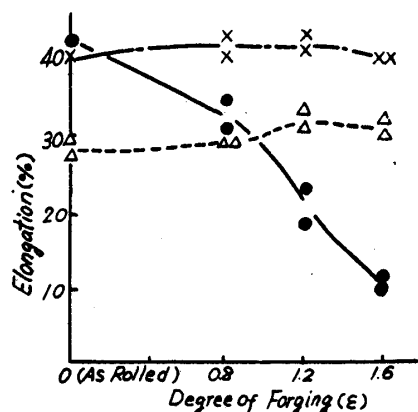


Fig. 18 (c) Test Results of the Material Forged in Rolling Direction



延面に平行な面に沿つて破断する。

(4) 二軸応力状態下における異方性材料の破壊面は異方性主軸と主応力との相対関係によつて異なるようである。

(5) 圧延鋼板の異方性すなわち板厚方向の延性が劣るということは鋼板の板厚面に見られる層状組織には関係がない。

(6) 介在物の分布状態並びに形状が異方性の主要因と考えられるようである。

最後に本研究に御援助を賜つた新三菱造船所、播磨造船所、大和製鋼所の各位に厚く御礼申し上げる。また実験実施に当つては本学蒲池一義氏、当時大学院学生であつた三谷政太郎氏の御協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 渡辺, 出口, 臼杵 “小型試験機による二, 三の実験” 材料試験 第4巻 第19号 (昭和29年春期大会にて講演)

仲 威雄 “圧延鋼板の異方性と溶接構造設計上の注意” (昭和29年秋期溶接学会にて講演) 溶接学会誌, 第24巻第7号並びに第24巻第11号

渡辺, 出口, 井上 “圧延鋼板および溶接部の機械的異方性について” (昭和30年春期溶接学会にて講演) 溶接学会誌 第25巻第2号

M. Ros, R. Montandon Electric Arc Welding of Thick Sections. of High Tensile Structural Steel—Application of Arc Welding; Elektriska Svetsningsaktiebolaget, Göteborg Sweden 1950

- 2) 文献 1) 中の著書らの論文
- 3) A. Nádai, “Theory of Flow and Fracture of Solids”, McGraw-Hill Book Co., Inc., (1950) p. 252—274
- 4) J. E. Dorn, “Fracturing of Metals” Am. Soc. Met. 1952 p. 32—50
- 5) M. Gensamer and P. A. Vukmanic, Metal Tech. 3 (1936) No. 749