

© 1985 ISIJ

# 高強度熱延鋼板の伸びフランジ性におよぼす レーザー切断の影響

論文

白沢秀則\*・橋本俊一\*<sup>2</sup>・三村和弘\*・郡田和彦\*

## Effect of Laser Cutting on Stretch Flangeability of High Strength Hot Rolled Steel Sheets

Hidenori SHIRASAWA, Shunichi HASHIMOTO, Kazuhiro MIMURA and Kazuhiko KORIDA

### Synopsis :

Effect of laser beam cutting on stretch flangeability of high strength hot rolled steel sheets having different chemical compositions was investigated and the results were discussed from metallurgical point of view.

Hole notches with a diameter of 10 mm were pierced by either laser beam cutting or mechanical punching method for hole expansion test.

Laser beam cutting resulted in much higher stretch flangeability than mechanical punching because the former cut surface was smooth, defect-free and had thin heat-affected layer in contrast with a rugged punched surface containing a number of microvoids and thick work-hardened layer.

Change in hole expanding ratio of laser cut steel sheet was well explained by the hardness of the heat affected layer. A carbon equivalent equation which agrees well with the variation in hardness was tentatively proposed by modifying the WES  $C_{eq}$ . It indicates that the steel sheet strengthened by the chemistry leading to less quench hardenability shows higher stretch flangeability.

Increase in manganese sulfide inclusion markedly lowered stretch flangeability.

## 1. 緒 言

薄鋼板のプレス成形では、成形素板の切断部および切穴加工部が大きな伸びフランジ変形をうけ、破断する例が多い。鋼板の伸びフランジ性はポンチ打抜きあるいは機械切削した切穴を有する試片の穴広げ限界によつて一般に評価されており、これに関する実験的および理論的検討がいくつかなされている<sup>1)~6)</sup>。

近年、各種の大出力レーザーの開発にともない、複雑な形状のプレス成形素板、切穴部などのレーザー切断加工が実用化されている。レーザー切断部のプレス成形性は材料の化学成分、製造条件などに大きく影響されると考えられるが、冶金学的見地からの研究はきわめて少なく、早急にデータの蓄積が望まれる。

本研究では化学成分の異なる高強度熱延鋼板のレーザー切断部の伸びフランジ性を従来のポンチ打抜き法の場合と比較して調査し、それに影響をおよぼす材料要因について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材は引張強さ約 55~73 kgf/mm<sup>2</sup> の範囲の実験室

溶製材および工場生産材である。これらの化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。Steel C1 から Steel V1 までの鋼は実験室溶製材であり、Steel C1 を基本成分系として、C, Si, Mn, S 量を変化させた鋼板および Nb, V を添加した鋼板である。実験室で大気溶製した 40 kg 鋼塊を仕上温度 850°C として 3.2 mm 厚に熱間圧延し、約 30°C/s の冷却速度でシャワー冷却の後、450°C に巻き取った。その後常温まで冷却した鋼板の表裏面を 2.3 mm 厚に研削加工して試験に供した。Steel L50 から Steel N55 までの鋼は工場生産材であり、C-Mn 系および Nb 系の 2.9 mm 厚自動車用熱延高張力鋼板である。

### 2.2 穴広げ試験片の作製

穴広げ試験のための 10 mm φ 切穴をレーザー切断およびポンチ打抜き法により加工した。レーザー切断条件を Table 2 に示す。実験室溶製材、工場生産材とも圧延方向より 45° 位置からレーザー切断を開始した。ポンチ打抜きはクリアランス 0.45 mm として実施した。

### 2.3 穴広げ試験

レーザー切断試験片では切断裏面が、ポンチ打抜き試験片では破断領域のかえりが頂角 60° の円錐ポンチに接する条件で穴広げ試験を実施した。穴広げ率 ( $\lambda$ ) を下

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 5 月 20 日受付 (Received May 20, 1985)

\* (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., 1 Kanazawa-cho Kakogawa 675-01)

\*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. Chemical compositions and tensile strengths of steels.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Others	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )
C 1	0.08	0.05	1.37	0.012	0.001	0.036	—	57.6
C 2	0.15	0.05	1.42	0.012	0.001	0.037	—	67.8
SI 1	0.09	0.65	1.31	0.012	0.001	0.030	—	65.1
SI 2	0.09	1.44	1.36	0.012	0.001	0.036	—	73.2
M 1	0.08	0.04	1.84	0.012	0.001	0.043	—	68.0
S 1	0.09	0.04	1.30	0.013	0.007	0.034	—	56.7
S 2	0.08	0.03	1.25	0.013	0.016	0.032	—	55.3
N 1	0.08	0.05	1.28	0.012	0.001	0.039	Nb 0.036	62.9
V 1	0.09	0.06	1.31	0.012	0.001	0.043	V 0.097	68.8
L 50	0.12	0.04	1.25	0.007	0.001	0.048	—	53.0
L 55	0.15	0.08	1.32	0.009	0.001	0.047	—	58.6
L 60	0.07	0.94	1.21	0.011	0.002	0.033	Cr 0.69	62.7
N 50	0.05	0.04	1.19	0.016	0.003	0.036	Nb 0.025	52.0
N 55	0.08	0.04	1.45	0.013	0.004	0.046	Cr 0.20 Nb 0.029	57.8

Table 2. Laser cutting conditions.

Production of steel	Type of equipment (company)	Power	Beam diameter	Cutting speed	Assist gas
Laboratory	ML-1000PE (Mitsubishi electric Co.)	400 W	0.2 mm	0.5 m/min	O <sub>2</sub>
Mill	TC 180LW (TRUMPF in W. G.)	200 W	0.1 mm	0.3 m/min	O <sub>2</sub>

式で定義し、鋼板の伸びフランジ性を評価する特性値とした。

$$\lambda = \frac{d-d_0}{d_0} \times 100 (\%)$$

ここで、 $d_0$ : 初期穴の径,  $d$ : 穴広げ成形によつて生じたき裂が板厚を貫通した時点での切穴の内径。

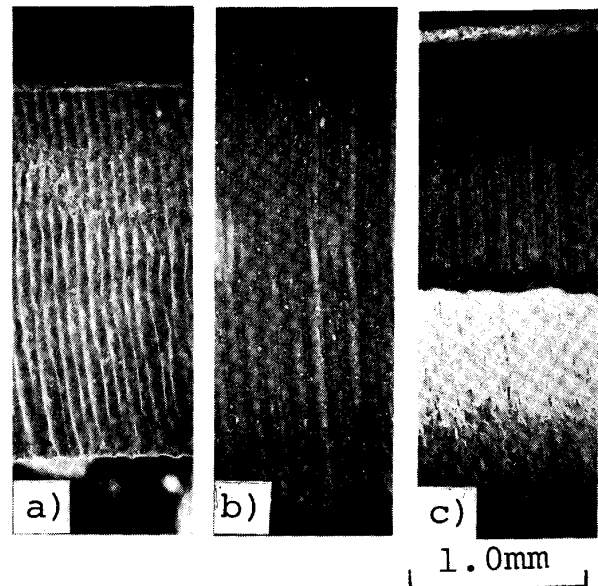
鋼種によつてはレーザー切断開始位置で破断した。レーザー切断開始部が切り欠きとして残っている試験片でこの破断が見られた。本研究では鋼の化学成分と伸びフランジ性との関係を健全なレーザー切断部を有する試験片について調査する観点から、レーザー切断開始位置で破断した試験片は調査対象から除外した。

それぞれの鋼板の穴拡げ率はくり返し数4以上の値の平均値とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 切穴断面の観察

供試材のレーザー切断およびポンチ打抜断面の一例を Photo. 1 に示す。断面の様相は切穴加工方法によつて大きく異なつている。レーザー切断面は板厚全面に弓状模様が観察され、表面は酸化物が若干付着しているが、比較的平坦である。ポンチ打抜断面はせん断領域と破断領域に区分され、破断領域に黒点状のマイクロ欠陥が認められる。実験室材(Steel C1)と工場生産材(Steel L55)とでレーザー切断面の弓状模様の粗さが異なるのは、レーザー切断条件の相違のためと考えられる。本実験供試材を直線状にレーザー切断して測定した板厚中央部の切断表面平均粗さは、実験室溶製材で  $6.0 \sim 8.3 \mu\text{m}$ 、工場

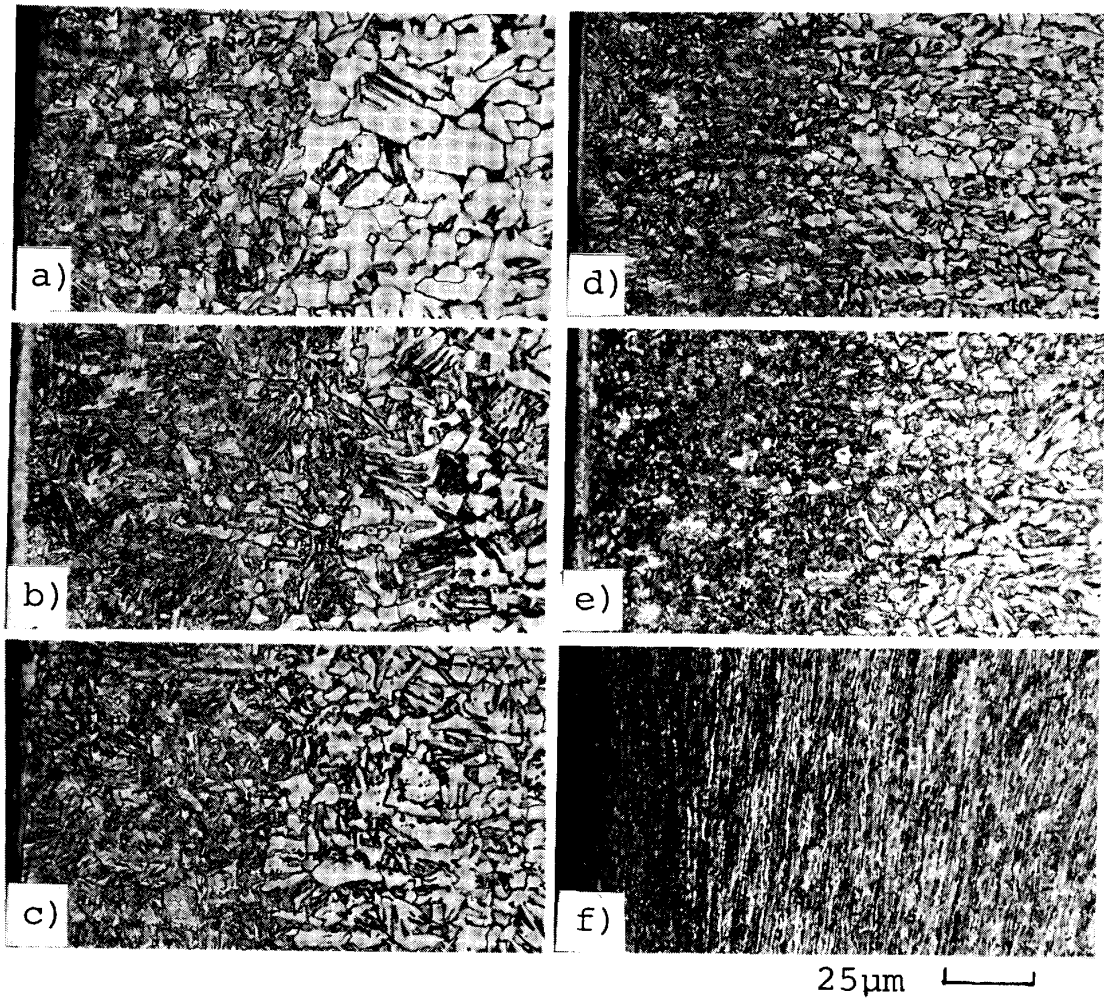


a) Steel C1 (Laser cut)  
b) Steel L55 (Laser cut)  
c) Steel L55 (Punched)

Photo. 1. Appearances of laser cut and punched surfaces.

生産材で  $1.6 \sim 2.2 \mu\text{m}$  の範囲であつた。

化学成分の異なる鋼板のレーザー切断部マイクロ組織を Photo. 2 に示す。Photo. 2 には比較のためにポンチ打抜鋼板についての一例を合わせて示している。レーザー切断部はいずれの鋼板もマルテンサイトおよびベイナイトからなる焼入組織であり、切断後の冷却速度が高いことを示している。これら焼入組織の領域は C, Mn 量の増大および Nb 添加によつてやや拡大する傾向が認められるが、いずれも  $0.1 \text{ mm}$  厚以下であり、ポンチ打抜



a) Steel C1 b) Steel C2 c) Steel M1 d) Steel N1 e) Steel L55 f) Steel L55 (Punched specimen)

Photo. 2 Microstructures under laser cut surfaces.

鋼板の塑性変形領域(約 0.7 mm) に比べて変質層の厚さがいちじるしく小さい。

### 3.2 レーザー切断鋼板およびポンチ打抜鋼板の伸びフランジ性

レーザー切断およびポンチ打抜きによつて切穴加工した実験室溶製材の穴広げ試験結果を母材強度の関数として Fig. 1 に示す。図中の添字は基本成分鋼 (Steel C1) に対して変化させた化学成分を示している。S 量を変化させた鋼板を除き、穴広げ率はいずれの加工方法においても母材の引張強さと相関が認められ、引張強さの上昇につれて穴広げ率が一樣に低下している。レーザー切断鋼板はすべての鋼種においてポンチ打抜鋼板よりすぐれた穴広げ率を示しており、注目される。レーザー切断鋼板の母材引張強さと穴広げ率の関係は化学成分によつて若干異なり、V 添加および Si 量増大によつて強化した鋼板が Nb 添加および C, Mn 量増大によつて強化した鋼板に比べて引張強さの上昇にともなう穴広げ率の低

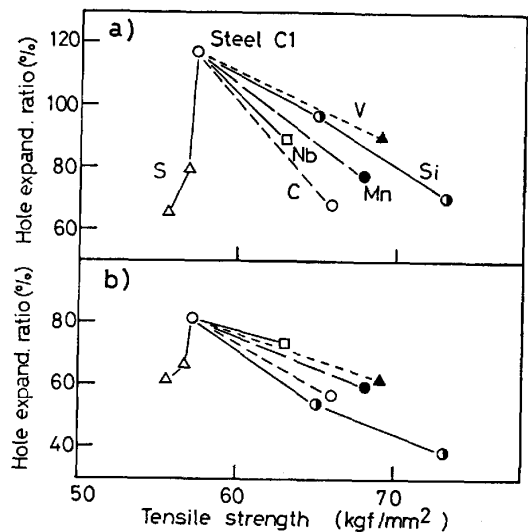


Fig. 1. Stretch flangeability of a) laser cut and b) punched steel sheets produced in the laboratory.

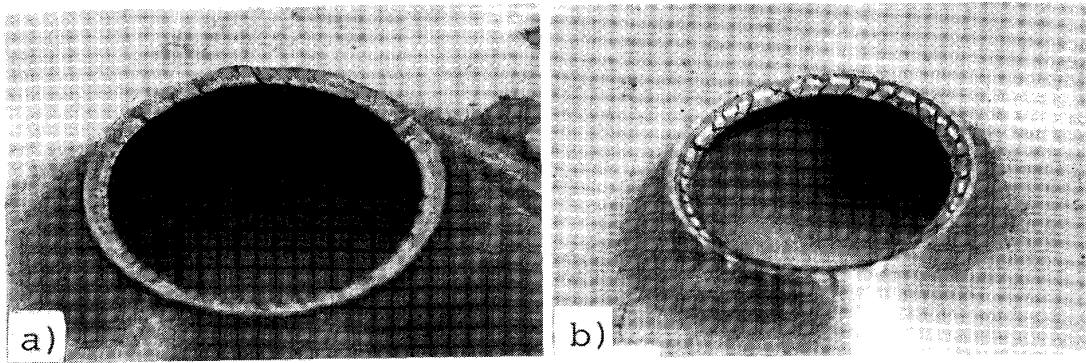


Photo. 3. Hole expanded surfaces of a) laser cut and b) punched specimens.

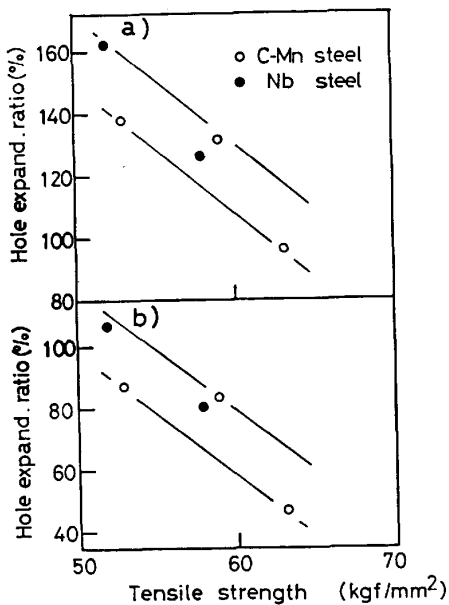


Fig. 2. Stretch flangeability of a) laser cut and b) punched steel sheets produced in the mill.

下が小さいようである。S量の増大が鋼板の伸びフランジ性を低下させることはよく知られている。レーザー切断の場合、ポンチ打抜鋼板に比べてその影響が大きい。

工場生産材についての穴広げ試験結果を Fig. 2 に示す。母材引張強さと穴広げ率との関係は実験室溶製材の場合と同様であるが、ポンチ打抜鋼板とレーザー切断鋼板との穴広げ率の相違は工場生産材でより大きい。

レーザー切断鋼板の穴広げ試験後のき裂の状態をポンチ打抜鋼板のそれと比較して Photo. 3 に示す。レーザー切断鋼板では少数のき裂がレーザー光線出側（本実験の場合、穴広げポンチに接する側）より発生し、最終破断にいたるき裂を除いてそれらが板厚方向にあまり伝播しないのに対し、ポンチ打抜鋼板では板厚方向の硬さがもつとも高いと考えられるせん断領域と破断領域の境界付近<sup>6)</sup>よりき裂が全円周部に多数発生し、それらがいずれも鋼板表裏面にむかつて大きく伝播している。切穴

加工方法によるき裂発生・伝播のこれらの相違はいずれの鋼種においても同様であつた。

### 3.3 レーザー切断鋼板とポンチ打抜鋼板の伸びフランジ性の相違について

薄鋼板の伸びフランジ性は鋼板の極限変形能と強い相関のあることが報告されている<sup>5)</sup>。本実験での切穴加工方法による切穴部材質の相違は破断面の様相および破断面直下のマイクロ組織である。Steel SI 2 のレーザー切断およびポンチ打抜部の穴広げ試験で破断したき裂の表面直下を走査型電子顕微鏡にて観察した。結果を Photo. 4 に示す。レーザー切断鋼板ではレーザー切断面直下にポイドが認められるが、その数は破面近傍としては少ない。ポンチ打抜鋼板ではより多数のポイドがポンチ打抜断面およびその直下に認められる。ポンチ打抜鋼板では切穴加工時にきわめて大きな塑性変形をうけており、写真には示さないが破断領域には多数のマイクロポイドがフェライトと第 2 相との境界にすでに生じている。それらが穴広げ成形の過程で成長し、容易に連結して破断にいたるのであろう。マイクロポイドの成長および連結は切穴全円周部で生じていることが、Photo. 3b)より推察される。これに対してレーザー切断鋼板では熱影響による硬化はあるものの、切穴加工に際して塑性変形をうけていないため、穴広げ成形では熱影響部が加工硬化し、ポイドを生じるまでの変形がポンチ打抜鋼板の場合より余分になされることになる。ただし、レーザー切断鋼板では切穴断面直下のマイクロ組織が母材のそれと異なるため、両切断方法の伸びフランジ性を比較する場合、穴広げ成形によつて生成したポイドの成長および連結過程がそれぞれのマイクロ組織でどのように異なるのかを明らかにする必要がある。

レーザー切断およびポンチ打抜断面直下のマイクロビッカース硬さ変化の一例を Fig. 3 に示す。レーザー切断鋼板の硬さは焼入組織部で最高値を示し、切断面より

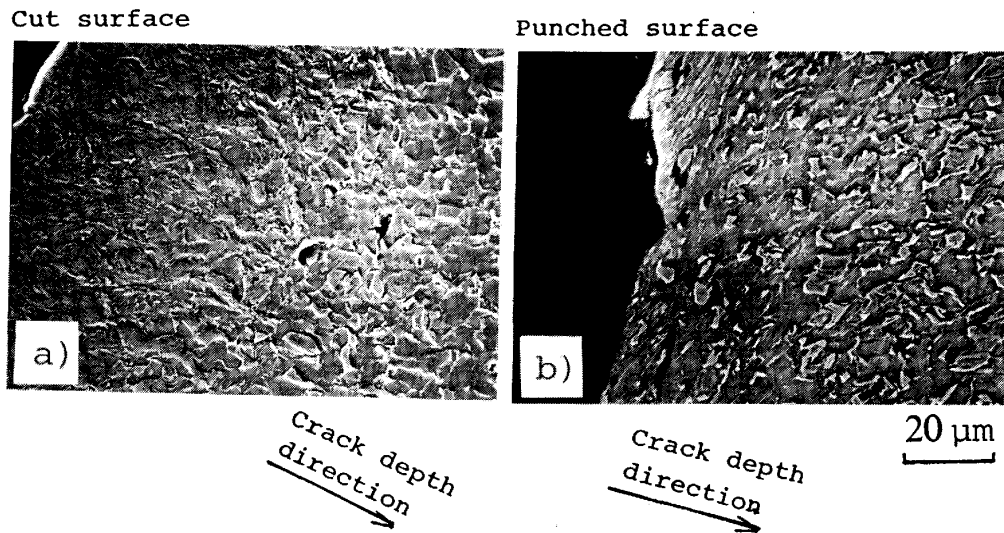


Photo. 4. SEM analysis under cracked faces of a) laser cut and b) punched specimens.

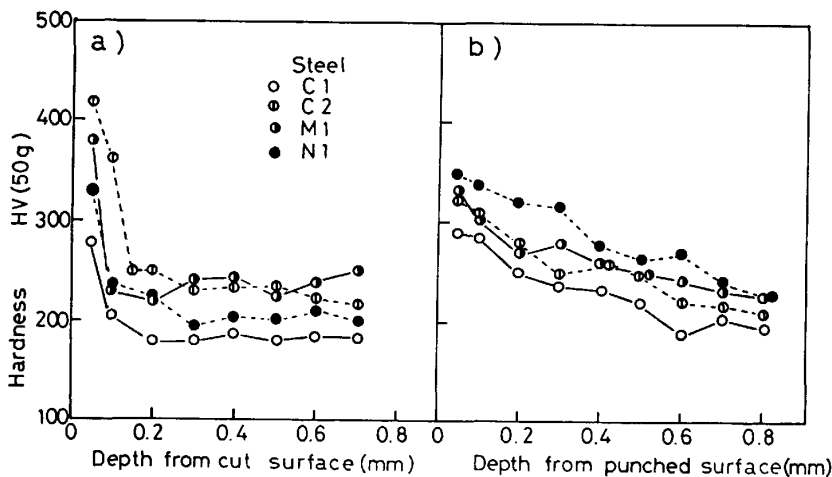


Fig. 3. Hardness changes under a) laser cut and b) punched surfaces.

約 0.1 mm 深さで急激に低下して母材の硬さとほぼ同等になる。ポンチ打抜鋼板では、硬さはレーザー切断鋼板と同様に切断面直下で最高値を示すが、加工硬化層が厚い。その加工硬化層の厚さは鋼種によつて若干異なるが、いずれも 0.6 mm 以上であつた。レーザー切断とポンチ打抜きでの最高硬さの大小関係は鋼種によつて異なり、一義的關係が認められなかつた。

両切断方法での切穴部硬化層厚さの相違は穴広げ成形でのポイドの成長および連結過程に影響をおよぼしていると考えられる。すなわち、Photo. 3 に示すようにレーザー切断の場合、レーザー光線出側より発生したき裂は切断表面の焼入組織部のみを板厚方向に伝播するのではなく母材方向への伝播をともなつているのに対し、ポンチ打抜きの場合このような挙動は観察されない。このことから、両切断方法での切穴部最高硬さに若干の相違があつても、レーザー切断鋼板では切穴部硬化層が薄いこ

とがポンチ打抜鋼板に比べてき裂の伝播抵抗を高める原因になつていることがわかる。

以上のことから、ポンチ打抜鋼板に比べてレーザー切断鋼板がすぐれた伸びフランジ性を有するのは、切穴断面直下のマイクロポイドおよび厚い硬化層が無いことなどにより、レーザー切断部の極限変形能がより高くなることに起因していると考えられる。

### 3.4 レーザー切断鋼板の伸びフランジ性に影響する材料要因

母材の引張強さとの間に相関が認められたレーザー切断鋼板の穴広げ率は、本来切穴加工部の物性により強く支配されると考えられる。実験室溶製材および工場生産材のレーザー切断面直下 0.05 mm 位置のマイクロビッカース硬さと穴広げ率との関係を調査した。結果をFig. 4 に示す。S量を変化させた鋼種を除き、レーザー切断鋼板の穴広げ率は切穴断面直下の硬さとよく対応してい

る<sup>8)</sup>。工場生産材が実験室溶製材に比べて同一硬さで高い穴広げ率を示すのは、Ca 処理の有無および板厚の相違のほか、切欠断面の粗さが工場生産材でより細かいことなどに起因していると考えられる<sup>4)</sup>。Fig. 1 に示したように、鋼の S 量増大によつてレーザー切断部の穴広げ率が大きく低下するのは、平坦で、しかも欠陥を含まないレーザー切断部硬化層に内在する MnS などの非金属介在物が、多数のマイクロポイドを内在しているボンチ打抜鋼板に比べてより大きな切欠効果を示すためと考えられる。レーザー切断部の伸びフランジ性におよぼす非金属介在物の量および形態の影響については、焼入れ感受性の異なる鋼について今後さらに調査していく必要がある。

Fig. 4 にはボンチ打抜鋼板についての硬さと穴広げ率との関係を合わせて示しているが、レーザー切断鋼板で認められるほど明確な対応はない。

レーザー切断面直下の硬さは溶接熱影響部の最高硬さと強い関係があると思われる。厚鋼板の溶接熱影響部最高硬さとよく対応するといわれる溶接協会提唱の炭素当量式にもとづいて、鋼の化学成分とレーザー切断面直下の硬さとの関係を、S 量変化材を除く鋼板について調査してみた。

$$C_{eq.}(wt\%) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5}$$

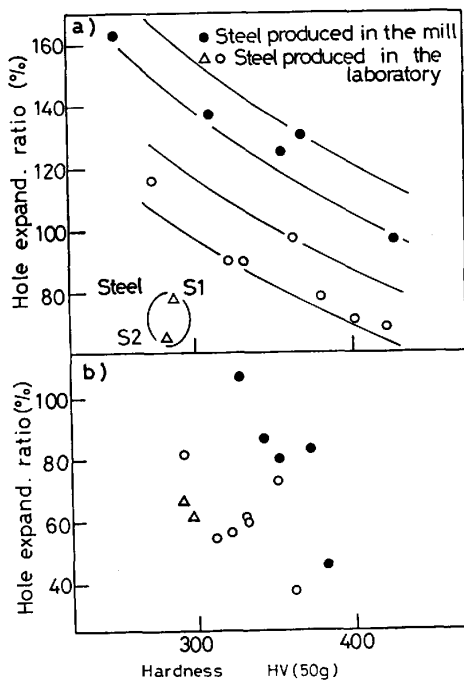


Fig. 4. Relationships between hardnesses of a) laser cut, b) punched surfaces and stretch flangeability.

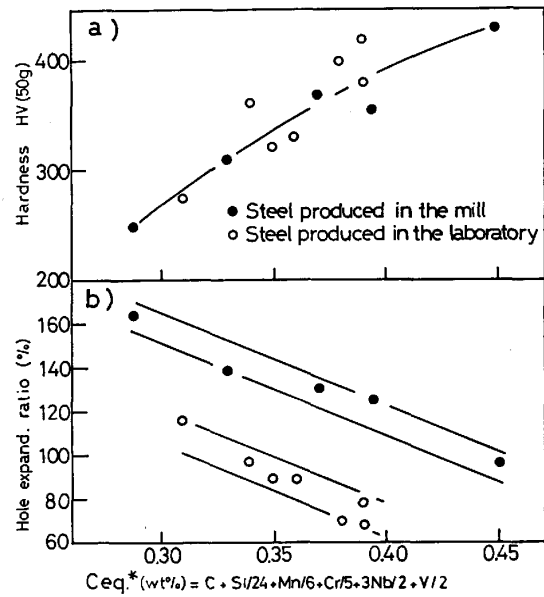


Fig. 5. Relationships between  $C_{eq.}^*$  and a) hardness of laser cut surface, b) stretch flangeability.

$$+ \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、(1)式の C, Si, Mn および Cr の係数を固定し、Nb, V の係数を追加修正することによつて、レーザー切断面直下の硬さとよく対応する  $C_{eq.}^*$  式を試験的に求めた。えられた  $C_{eq.}^*$  式を(2)式に示し、それと硬さおよび穴広げ率との関係を Fig. 5 に示す。

$$C_{eq.}^*(wt\%) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{3}{2} Nb + \frac{V}{2} \dots\dots\dots (2)$$

レーザー切断部の硬さは実験室溶製材、工場生産材とも  $C_{eq.}^*$  値とよく対応しており、穴広げ率の変化も  $C_{eq.}^*$  値の変化でよく説明される。これによれば、レーザー切断部の伸びフランジ性は  $C_{eq.}^*$  値を低く保つて強化した鋼板がよりすぐれていることになる。すなわち、C, Mn, Nb など強化した鋼板より Si, V など焼入れ性の低い元素で強化した鋼板がすぐれた伸びフランジ性を示すことになり、Fig. 1 で認められた結果と一致する。

以上のことから、レーザー切断鋼板の伸びフランジ性は切断熱影響部の硬さと相関があり、その硬さの低い材料ほど伸びフランジ性が向上すること、および鋼の化学成分によるその硬さの変化は、厚鋼板の溶接熱影響部最高硬さを予測する式にもとづいて求めた  $C_{eq.}^*$  値の変化とよく対応することが判明した。

なお、 $C_{eq.}^*$  値の妥当性については種々の鋼板について今後さらに検討していく必要がある。

#### 4. 結 言

化学成分の異なる高強度熱延鋼板のレーザー切断部の伸びフランジ性をポンチ打抜き法の場合と比較して調査し、以下に示す結果をえた。

(1) レーザー切断鋼板はポンチ打抜き鋼板に比べて高い穴広げ率を示す。これは、レーザー切断面がポンチ打抜き断面に比べて平坦であり、しかも切断面直下にマイクロボイドなどの欠陥を含まないこと、レーザー切断の熱影響による硬化層がポンチ打抜きによる加工硬化層に比べていちじるしく薄いことなどがおもな原因と考えられる。

(2) レーザー切断鋼板の穴広げ率は切断面直下の材料硬さとよく対応しており、添加元素の増大による硬さの上昇につれて穴広げ率が一様に低下する。ただし、S量の増大はレーザー切断鋼板の穴広げ率を大きく低下させる。

(3) 厚鋼板の溶接熱影響部最高硬さを予測する  $C_{eq}$  式を修正して求めた  $C_{eq}^*$  式とレーザー切断面直下の

材料硬さとは、本実験範囲内において強い相関が認められた。それによると、レーザー切断鋼板の伸びフランジ性は焼入性の低い元素で強化した鋼板でよりすぐれることが示唆される。

本実験でのレーザー切断では一部トルンプジャパン(株)の協力をえた。記して感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) 吉田清太: 科学研究所報告, 33 (1957), p. 260
- 2) 山田嘉昭: 塑性と加工, 4 (1963), p. 885
- 3) 小嶋正康, 吉井康一, 吉田清太: 理化学研究所報告, 44 (1968), p. 67
- 4) 中川威雄, 吉田清太: 理化学研究所報告, 44 (1968), p. 150
- 5) 細野和典, 中川威雄, 吉田清太: 塑性と加工, 9 (1968), p. 637
- 6) 和田光仕, 沼沢吉昭: 日新製鋼技報 (1970) 23, p. 48
- 7) 松野 弘: 溶接技術 (1981) 9, p. 27
- 8) 手銭克己, 雨池龍男: 薄鋼板成形技術研究会資料 No. 59-10