

連続鋳造スラブ鍛造による 内質特性の優れた厚肉鋼板の製造技術*

川崎製鉄技報
30 (1998) 3, 181-185

Development of Heavy Section Steel Plates with Improved Internal Properties through Forging and Plate Rolling Process Using Continuous Casting Slabs



荒木 清己
Kiyomi Araki

水島製鉄所 管理部
厚板・鋳鍛管理室 主
査(掛長)



郡山 猛
Takeshi Kohriyama

水島製鉄所 管理部
厚板・鋳鍛管理室長



仲村 基志
Motoshi Nakamura

川鉄情報システム(株)
西日本事業所技術グル
ープ

要旨

連続鋳造スラブを用いた厚肉鋼板の製造において、厚板圧延前にセンターポロシティの圧着に有利な鍛造プロセスを適用する方法を検討した。スラブ幅方向にいったん圧下した後、スラブ厚方向への圧下を行う二方向鍛造法の適用は、スラブ厚中心部の広範囲において、より大きな圧縮方向塑性歪を与えることができ、センターポロシティの閉鎖・圧着に効果的である。本プロセスを引張強度 400 MPa 級鋼へ適用した結果、製品厚 240 mm (圧下比: 1.3) までの鋼板において内質の優れた健全な厚肉鋼板の製造が可能となる。

Synopsis:

Heavy steel plates with thickness of over 150 mm have usually been manufactured by using materials obtained through ingot casting process, in consideration of the internal properties. The possibility of applying a forging process before plate rolling was investigated to secure both homogeneous and sound internal properties by using continuous casting slabs, instead of ingot casting slabs. When a certain annihilation of center porosities is considered, a forging method with reduction in widthwise direction before reduction in thicknesswise direction of slabs was found to be very effective. As a result of the application of this process for TS: 400 MPa class steel, it is concluded that excellent internal properties can be obtained in the manufacture of heavy steel plates with thickness of up to 240 mm (reduction ratio: 1.3).

1 緒 言

連続鋳造スラブから製品厚が 100 mm を超えるような厚肉鋼板を製造する場合、圧下比(スラブ厚/製品厚)が小さくなることにともない、連続鋳造スラブの最終凝固位置に発生する微細空隙(ポロシティ)が残存しやすくなり、鋼板の健全性や機械的性質の劣化が懸念されるようになる。そのため、従来より連続鋳造材のポロシティに起因する内部欠陥を改善し、健全な厚肉鋼板を製造することを目的として多くの検討が行われてきた¹⁻³⁾。これらは大径ロールによる強圧下圧延や低速圧延、板厚方向の温度差を意図的に大きくした圧延であり、板厚中心部における板厚方向の塑性歪と圧縮応力をより効果的に与え、ポロシティを閉鎖・圧着させる加工条件である。しかし実際には厚板圧延機の設備仕様や能力に限界があり、製品厚 150 mm 以上の厚肉鋼板の製造においては、造塊材を用いた製造プロセスが適用されている。また大型扁平鋼塊を用いた極めて厚い鋼

板の内質改善には、鍛造の適用が効果的であることが知られている⁴⁻⁶⁾。

そこで著者らは、連続鋳造スラブの鍛造・厚板圧延による鋼板の製造について検討を行った結果、製品厚 240 mm までの健全な厚肉鋼板を製造する技術を確立したので、以下に紹介する。

2 弾塑性応力解析による鍛造方法の検討

ポロシティ圧着の過程は塑性歪を受けることにより、その内面が互いに接触し、拡散や接触圧力により消滅するものである³⁾。ここでは弾塑性応力解析(MARC)を用い、効果的な鍛造条件について検討した。連続鋳造スラブに内在するポロシティの圧着に関しては厚と中心部の問題であり、本解析ではスラブ厚中心位置での塑性歪状態を考慮した。解析条件を Table 1 に示す。なお鍛造途中のスラブの温度変化については、金数による表面の放熱や加工発熱等の考慮が必要であるが、鍛造開始時のスラブ内温度分布のまま一定として解析を行った。

* 平成10年6月16日原稿受付

Table 1 Condition of elastic-plastic stress calculation

Dimension of slab (mm)	310 × 2 240 × 3 000
Heating temperature (°C)	1 250
Surface temperature at the start of forging (°C)	1 000

Density: 7 700 kg/m³

Heat conductivity: 23.2 W/mK (at 1 100°C)

Yield point: 0.9 MPa (at 1 100°C)

Young's modulus: 5 676 MPa (at 1 100°C)

Poisson's ratio: 0.3

Thermal expansion factor: 0.000 018/°C (at 1 100°C)

Work hardening coefficient: 25.2 MPa (at 1 100°C)

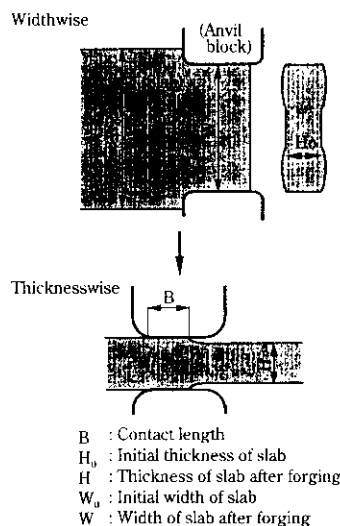


Fig. 1 Schematic diagram of forged continuous casting slab

Table 2 Calculation of forging condition

No.	B/H_0	W_0/W	H_0/H
1	0.10	No apply	1.19
2	0.74	No apply	1.19
3	1.06	No apply	1.19
4	0.74	No apply	1.13
5	0.74	1.10	1.19
6	0.74	1.19	1.11

2.1 鍛造条件

鍛造要領を Fig. 1 に示す。塑性歪量に及ぼす金敷の接触長 (B) と初期スラブ厚 (H_0) との比 (接触比: B/H_0) の効果、スラブ厚方向鍛造圧下前の幅方向圧下適用の効果の評価することにした。解析に用いた鍛造条件 (No.1~6) を Table 2 に示す。スラブ厚方向のみの鍛造圧下の場合において、スラブ厚方向圧下比 (H_0/H) を 1.19 で同一とし、最大塑性歪量に及ぼす B/H_0 (0.10, 0.74, 1.06 の 3 水準) の影響を比較した。また B/H_0 を 0.74 で一定にし、 H_0/H が 1.19 で同じ場合におけるスラブ幅方向圧下実施有無の影響、さらに幅方向圧下比 (W_0/W) を 1.19 に増大した場合の H_0/H の影響について検討した。

2.2 解析結果と考察

スラブ厚方向圧下比を揃え、 B/H_0 による厚さ方向の最大塑性歪量を比較した結果を Fig. 2 に示す。 B/H_0 が大きくなるにつれて塑

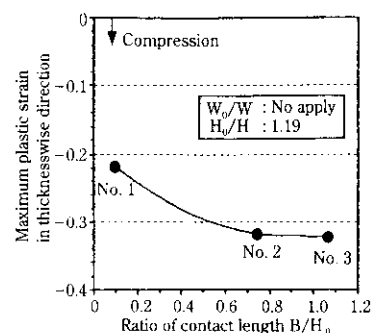
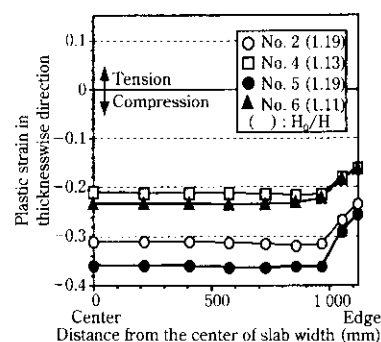


Fig. 2 Comparison of maximum plastic strain by simulation at the center of thickness

Fig. 3 Plastic strains by simulation in thicknesswise direction at the center of thickness ($B/H_0 = 0.74$)

性歪量は大きくなるが、 B/H_0 が約 0.7 以上ではその影響は小さくなる。この結果から B/H_0 をより大きくしてスラブ厚方向の鍛造を行うことが、その圧下領域の内質改善に有効であるが、実製造を考慮するとスラブ全長において均一な鍛造効果の付与が必要であることと鍛造設備仕様の制約より、 B/H_0 は 0.7 程度としてスラブ長さ方向への鍛造圧下パス数を多く確保する方が実用的と考えられる。

次にスラブ幅方向鍛造圧下適用有無の影響について、 B/H_0 を 0.74 で統一した場合でのスラブの幅中心から端部における厚、幅、長さ方向の塑性歪量を比較した結果をそれぞれ Fig. 3~5 に示す。

まず厚さ方向の塑性歪 (Fig. 3) に関して、 H_0/H が同じである No. 2 と No. 5 を比較すると、あらかじめスラブ幅方向圧下を行った No. 5 の方が大きな値となっている。この結果は、スラブ幅方向圧下の適用により連続鋳造スラブ端部をドッグボーン形状にすることによってスラブ厚が初期厚み H_0 より大きくなるため、次のスラブ厚方向圧下での実質的な圧下比が大きくなり、内質改善に有効に作用するものと考えられる。

幅方向の塑性歪 (Fig. 4) については、スラブ厚さ方向のみの圧下を行った No. 2 と No. 4 の場合、スラブ全域で引張方向であり、特にスラブ幅の 1/4 からの端部の領域においてその値は大きくなるのに対して、スラブ幅方向圧下を適用した No. 5 と No. 6 では、幅端直近を除いて圧縮方向となっている。これはボロシティを閉鎖させる方向であり、内質改善に有効である。

スラブが延びる長さ方向の塑性歪 (Fig. 5) に関しては、スラブ幅方向圧下の適用有無の影響について、 H_0/H が同じである No. 2 と No. 5、さらに小さな条件下で H_0/H を変化した No. 4 と No. 6 を比較すると、スラブ幅方向圧下を適用した No. 5、No. 6 の塑性歪量が顕著に大きくなっている。これはスラブ幅方向の圧下によって減

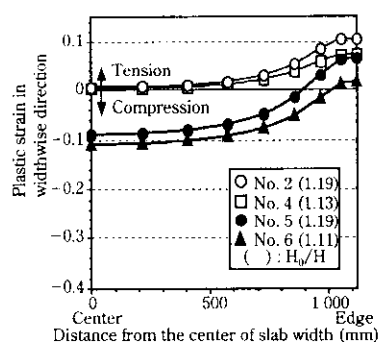


Fig. 4 Plastic strains by simulation in widthwise direction at the center of thickness ($B/H_0 = 0.74$)

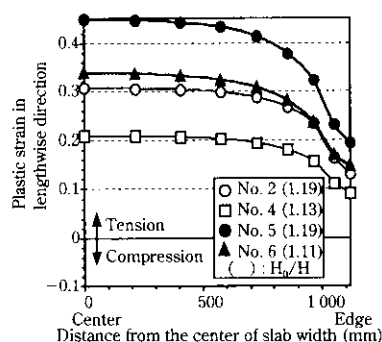


Fig. 5 Plastic strains by simulation in lengthwise direction at the center of thickness ($B/H_0 = 0.74$)

じたスラブ幅体積の分、長さ方向へのメタルフローが大きくなることによるものと考えられる。

以上のことよりスラブ幅方向への鍛造圧下適用は、ポロシティをスラブ長さ方向に大きく扁平させた状態で、かつ厚、幅方向において、より大きな圧縮方向の塑性歪が与えられることになり、連続鋳造スラブ厚中心部のポロシティ圧着に対して、有効で確実な手段であると考えられる。

3 工場試作結果

連続鋳造スラブに内在するポロシティの圧着に関する弾塑性応力解析を用いた検討結果に基づき工場試作を実施した。鋼板製造プロセスを Fig. 6、使用した各設備の仕様を Table 3 に示す。実験項目は次のとおりである。

- (1) スラブ厚方向鍛造圧下比によるポロシティ圧着効果の確認
- (2) スラブ幅方向鍛造圧下適用によるポロシティ圧着効果の改善

3.1 実験方法

Table 4 に示す化学組成の TS 400MPa 級鋼を用いて、 B/H_0 を 0.74 で一定とし、厚さ 310 mm の連続鋳造スラブから Table 5 に示す鍛造圧延条件によって製品厚 220 mm と 240 mm の鋼板を試作した。A~C 鋼板はそれぞれスラブ厚方向のみの鍛造圧下比を 1.07, 1.13, 1.19 に変化させ、製品厚 220 mm に圧延した。D 鋼板は幅方向圧下比 1.10、厚さ方向圧下比 1.19 の鍛造を実施した後、製品厚 220 mm にし、また E 鋼板は幅方向圧下比を 1.19 に増大して厚さ方向圧下比 1.11 の鍛造を行ってから製品厚 240 mm に圧延した。鍛造工程は、加熱温度 1250°C として 1 回の加熱鍛造により実施し、

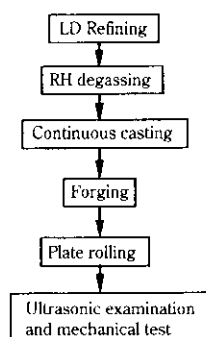


Fig. 6 Manufacturing process

Table 3 Specification of facilities

Continuous casting machine	Type: Vertical and bending Section of slab: 310 × 2 240 or 2 400 mm
Forging press	Type: Free hydraulic forging Capacity: Max. 7 200 t Anvil block: 800 × 3 800 mm Stroke: 3 000 mm
Plate rolling mill	Type: 4-Hi reversing Rolling force: Max. 8 000 t Work roll: $\phi 1\ 220 \times 5\ 490$ mm

Table 4 Chemical composition

(mass%)					
C	Si	Mn	P	S	Al
0.18	0.20	0.96	0.015	0.003	0.028

Table 5 Condition of forging and plate rolling (B/H_0 : 0.74)

No.	Forging		Thickness of plates (mm)
	W_0/W	H_0/H	
A	No apply	1.07	220
B	No apply	1.13	220
C	No apply	1.19	220
D	1.10	1.19	220
E	1.19	1.11	240

Slab dimension (mm): 310 × 2 240 × 4 000

Heating temp. at forging (°C): 1 250

Heating temp. at plate rolling (°C): 1 150

Table 6 Condition of UST

Probe	2Z30I
Sensitivity	V15-2.8: 50%
Frequency	2 MHz
Medium	Water
Surface condition	As roll

その後 1 150°C の通常の厚板圧延により各鋼板を試作した。これらの厚肉鋼板に対する内質評価法として超音波探傷試験 (UST) とミクロ組織の観察、板厚方向引張試験を実施した。

3.2 鋼板の品質特性

UST 条件は Table 6 に示す要領によって全面スライド探傷を行った。ここで探傷欠陥の判定基準は○: 25% < F_1 ≤ 50%, △:

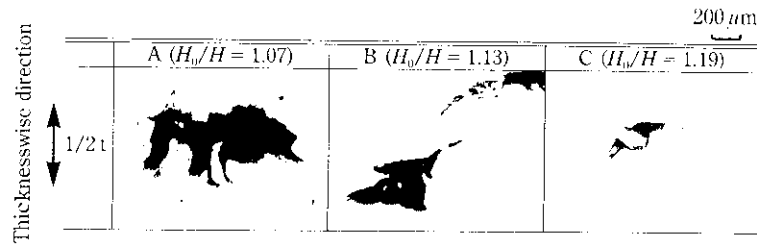


Photo 1 Micrographs of center porosities

No.	After plate rolling
A (220)	
B (220)	
C (220)	
D (220)	No indication
E (240)	No indication

(○): Thickness of plates (mm)

Fig. 7 Results of UST

50% < $F_1 \leq 100\%$, $\times$: $F_1 > 100\%$ とした。圧延後の UST 結果を Fig. 7 に示す。スラブ厚方向のみに鍛造圧下を行った A～C 鋼板は、鋼板の長さ方向に沿って両幅端から初期スラブ厚と同程度内側の領域において板厚中心部にかなりの欠陥が残存する結果となった。その欠陥レベルは、鍛造でのわずかな圧下比増大により著しく改善されている。以上の結果は、鍛造での厚さ方向圧下比を変化させて厚さ方向の塑性歪量を解析した Fig. 3 の No. 2 と No. 4 の比較で、 H_0/H を大きくした方がより大きな塑性歪量が得られる傾向と合致する。

これらに対し、スラブ幅方向鍛造圧下を実施した D 鋼板は同じ製品厚 220 mm において無欠陥であった。これは幅方向圧下実施有無による厚、幅、長さ方向の塑性歪量を比較した Fig. 3～Fig. 5 の No. 2 と No. 5 の比較で示したとおり、幅方向の塑性歪が圧縮方向に転じることで厚、長さ方向についても、より大きな塑性歪が付与される結果により内質改善が行われるものとする。また幅方向鍛造圧下比を増大して厚さ方向鍛造圧下比を小さくした E 鋼板の場合でも、無欠陥の鋼板が得られた。実機製造ではスラブ幅方向鍛造圧下時の断面座屈が懸念されたが、本条件の W_0/W が 1.19 のレベルでは問題なく製造可能であった。

UST 欠陥が検出された A～C 鋼板の欠陥部より採取した代表的なポロシティを Photo 1 に示す。ポロシティの大きさは、鍛造圧下比の増大に応じて小さくなっていることが確認できる。

Table 7 に板厚方向引張試験結果を示す。UST 結果の改善と同様、

Table 7 Results of tensile test

No.	Location	Direction	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)
A	1/2 t	Z	219	432	20	28
			217	426	19	27
			217	425	19	22
B			218	432	25	36
			216	430	20	29
			217	428	24	35
C			218	435	25	37
			215	439	21	30
			220	430	26	40
D			220	432	26	42
			217	436	27	45
			218	438	32	49
E			220	425	30	42
			217	429	26	39
			218	431	28	40

絞り値の顕著な向上が認められる。

以上の結果から、スラブ幅方向鍛造圧下の適用は、ポロシティの圧着にとって非常に効果的であることが確認できた。

4 連続鋳造スラブ鍛造プロセスによる厚肉鋼板の工程化

製品厚 220～240 mm の鋼板製造では、スラブ幅方向にいったん圧下した後、スラブ厚方向への圧下を行う二方向鍛造法の適用により健全な厚肉鋼板を製造できることが確認された。川崎製鉄ではこれらの結果に基づいて工程生産を実施している。Fig. 8 に連続鋳造スラブ鍛造-圧延プロセスによる鋼板製造の適用範囲を示す。製品厚 240 mm までの健全な厚肉鋼板の製造が可能である。

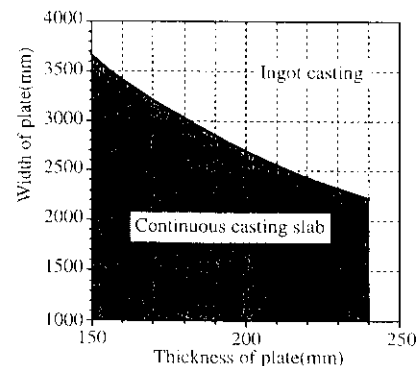


Fig. 8 Available plate size by application of alternative forging and plate rolling process or conventional process

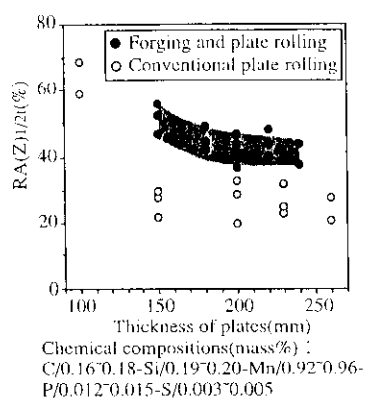


Fig. 9 Relation between thickness of plates and $RA(Z)_{1/2l}$

4.1 厚肉鋼板の健全性

Table 6 に示した V15-2.8 : 50% の探傷条件による本プロセス適用鋼板の UST では、探傷欠陥なしの結果が得られている。また板厚中心部における板厚方向引張試験片の絞り値 $RA(Z)_{1/2l}$ について連続鋳造-圧延プロセスと比較した結果を Fig. 9 に示す。通常プロセ

スでの $RA(Z)_{1/2l}$ は、製品厚 150 mm 以上で急に低下する傾向があるが、本製造プロセス適用鋼板では高位であることが分かる。

5 結 言

連続鋳造スラブのポロシティを圧着して内質を改善するため、弾塑性応力解析を用いた効果的な鍛造方法を検討し、工場試作を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 鍛造金敷の接触長とスラブ厚との比 B/H_0 を 0.7 程度確保して、スラブ厚方向の圧下を行うことが内質改善に効果的である。
- (2) スラブ幅方向の鍛造圧下適用は、幅方向の塑性歪が圧縮方向となること、スラブ端部をドッグボーン形状にすることによる実質的なスラブ厚方向圧下比増大によって内質改善に有利となる。
- (3) スラブ幅方向圧下比が大きいくほど、内質改善に有利であるが、本報で適用した幅方向圧下比 1.19 では、スラブ座屈の問題もなく、十分に効果がある。
- (4) 本プロセスを適用した場合、310 mm 厚の連続鋳造スラブから内質の極めて優れた製品厚 240 mm の厚肉鋼板が製造可能になった。

参 考 文 献

- 1) 田川寿俊、田中淳一、平沢猛志、角南英八郎：「大型鋼塊のザクきずの圧着におよぼす圧延プロセスの影響」、鉄と鋼、**62**(1976)13, 1720
- 2) 奥村直樹、久保田猛、丸山忠克、南雲道彦：「連铸スラブ中のポロシティの消滅におよぼす圧延条件の影響」、鉄と鋼、**66**(1980)2, 201
- 3) 山口喜弘、津田 統、大砂 寛、朝永満男、斎藤俊二：「極厚鋼板のザクきず圧着圧延に関する研究」、神戸製鋼技報、**33**(1983), 32-35
- 4) 米沢純一：「大型鍛鋼品の鍛練技術」、鉄と鋼、**355**(1982), 8
- 5) 渡辺司郎、田村 至、中田和広、中島浩衛、渡辺和夫：「大型熱間自由鍛造時の内部空隙の変形条件および閉鎖、圧着特性」、鉄と鋼、**356**(1982), 20
- 6) 磯辺邦夫：「大型鋼材の自由鍛造に関する研究」、東京工業大学学位論文、(1992)