

ドラム式ストリップキャストの開発

Development of Twin-Drum Strip Caster

技術本部 柳 謙一*¹ 山本 恵一*²

広島製作所 佐々木 邦政*³

新日本製鐵株式会社 竹内 英麿*⁴ 中島 啓之*⁵

次世代の連続鋳造法として注目されているストリップキャストプロセスの開発が世界的に活発になっている。三菱重工業(株)は新日本製鐵(株)と共同で1985年よりオーステナイト系ステンレス鋼を対象とした双ドラム式ストリップキャストの開発を進めてきたが、1993年に成功裏に開発を完了した。800 mm及び1 330 mm幅のストリップキャストを用いた10 t規模の実証試験により、安定鋳造技術を確立するとともに、良好な品質を有する鋳片の鋳造が可能となった。また、ストリップキャストで鋳造した鋳片を直接冷延した製品の機械的性質及び耐食性は、従来プロセス製品と同等もしくはより良好であることを確認した。

The strip casting process has attracted much attention as a new continuous casting method. Since 1985 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. and Nippon Steel Corporation have jointly developed a twin-drum strip caster for austenitic stainless steel and successfully completed it in 1993. Ten tons casting tests of the 800 mm and 1 330 mm wide prototype twin-drum strip caster have been conducted and have made it possible to establish stable casting technology and to confirm the high quality of cast strips. Moreover it was confirmed that the mechanical properties and the corrosion resistance of twin-drum cast products are equivalent or superior to conventional products.

1. ま え が き

今日の鉄鋼業界は、省エネルギー、省力化を狙った設備改善に努力を払うとともに、さらに省プロセスを達成することにより、一層の製造コストの低減を図ろうとしている。このニーズを満足するものとして、ニアネットシェイプの素材を鋳造し、熱延工程を省略できるストリップキャストプロセスの開発が世界的に活発になってきている^{(1)~(4)}。また、このストリップキャストでは急冷凝固による材料特性の向上も期待される。

三菱重工業(株) (以下、当社と呼ぶ) は新日本製鐵(株)と共同でオーステナイト系ステンレス鋼を対象とした双ドラム式ストリップキャスト (以下、ストリップキャストと呼ぶ) の開発を行ってきたが、本報では、10 t規模の800 mm及び1 330 mm幅のストリップキャストを用いた実証試験により確立した自動制御システム等の安定鋳造技術、得られた鋳片の特性、及び冷延製品の特性について述べる。

2. 開発の経緯

ストリップキャストにおいては、回転する一対のドラム間に溶鋼が注入され、ドラム表面からの抜熱により凝固シェルが形成される。二枚の凝固シェルはドラムの間隔が最も小さい点で圧着され一枚の鋳片になる。当社では、小型試験機を用いた要素試験の後、1985年にドラムサイズ $\phi 600 \times W 600$ mmの試験機による鋳造試験を開始した。その結果、600 mm幅鋳片の安定鋳造性を確認し、熱変形の少ないドラムを開発するとともに、ドラム端面押当て方式のサイド堰(せき)を開発した。この試験機による鋳造状況を図1に示す。その後、新日本製鐵(株)と共同でオーステナイト系ステンレス鋼を対象としたストリップキャストの開発を行ってきた。これまでの開発経緯は以下のとおりである。

STEP I : $\phi 1 200 \times W 800$ mm, 1 t 規模…パイロット試験機 (1985~1988)

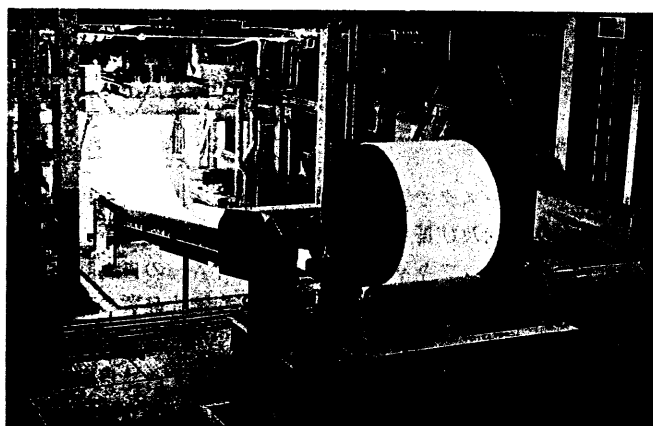


図1 600 mm幅ストリップキャスト試験機鋳造状況 ストリップキャスト試験機によるステンレス鋼の鋳造状況。
Casting condition of 600 mm wide strip caster

STEP II : $\phi 1 200 \times W 800$ mm, 10 t 規模
(1989~1991)

STEP III : $\phi 1 200 \times W 1 330$ mm, 10 t 規模
(1991~1993)

…実証試験機

この結果、10 t規模での安定鋳造技術を確立し、1993年に成功裏に開発を完了した。

3. 実証試験機概要

10 t規模の実証試験機は新日本製鐵(株)光製鐵所に設置され鋳造試験を行った。図2に設備の概略図を示す。設備は取鍋(とりべ)、タンディッシュ、ドラム、サイド堰、ピンチロール、テンショナ、及びコイラにより構成されている。

ストリップキャストの主要部分であるドラムは溶鋼との接触による加熱に伴う熱変形が少ないこと、加熱・冷却の繰返しで疲労破壊しないこと、溶鋼を凝固させるための熱的条件が安定していることが要求される。こうした条件を満足させるために、ドラム

*1 広島研究所長 工博

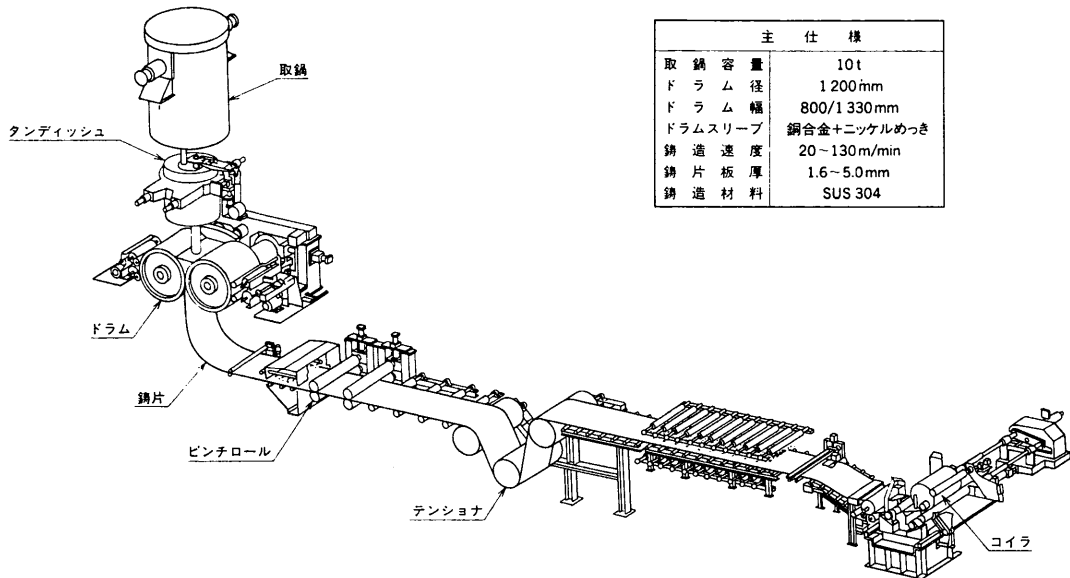
*2 広島研究所物質工学研究室主務

*3 製鉄機械設計部次長

*4 プロセス技術研究所製鋼プロセス研究部

主幹研究員 工博

*5 光製鐵所副所長



| 主 仕 様 | |
|---------------|-------------|
| 取 鍋 容 量 | 10t |
| ド ラ ム 径 | 1 200mm |
| ド ラ ム 幅 | 800/1 330mm |
| ド ラ ム ス リ ー プ | 銅合金+ニッケルめっき |
| 鑄 造 速 度 | 20~130m/min |
| 鑄 片 板 厚 | 1.6~5.0mm |
| 鑄 造 材 料 | SUS 304 |

図2 10t規模実証試験機概略図 新日本製鐵光製鐵所に設置された10t規模実証試験機の概略図。
Schematic view of ten tons scale twin-drum strip caster

はステンレス鋼-銅合金-ニッケルめっきの3層構造とし、内部に冷却水路を設けている。

サイド堰は鑄造中の湯漏れ、湯差し等が問題となる。そこで、熱変形解析を行うとともに押しつけ方法の改善を行うことにより問題解決を図った。

鑄造速度は20~130m/min、それに対応する鑄片板厚は5.0~1.6mmである。また、鋼種はSUS 304である。

4. 安定鑄造技術

ストリップキャストで鑄造された鑄片は、次工程で直接冷延されるため、幅方向及び長さ方向の板厚精度が良好であることが要求される。ストリップキャストにおいては、各種の自動制御システムの組み込みにより、鑄片形状を含む良好な鑄片品質の確保が可能となるとともに安定鑄造技術を確立した。

図3に制御システムの構成を示す。制御システムは自動スタートロジック、ノズル浸漬深さ制御、湯面レベル制御、鑄片板厚制御及びライン速度制御から構成されている。鑄造は自動スタートロジックによって開始し、ドラムに注湯される溶鋼は所定の湯面レベルに維持される。鑄造中はドラムギャップ及び押力制御を行いながら板厚を一定に保つ。さらに、鑄片に異常な張力がかからないようにドラム及びコイラの速度制御を行っている。

一対のドラムの一方は固定され、他方は油圧シリンダ、サーボバルブ及び位置センサから構成される油圧サーボ装置により高応答で駆動され、ドラムギャップの調整が可能となっている。また、鑄片に作用する押力は、固定ドラム側に設置したロードセルによって検出される。このドラムギャップ及び押力の信号により鑄片板厚が制御される。ストリップキャストでは得られる鑄片板厚は次の式(1)で表される。

$$d = 2 K t^n = 2 K \left(\frac{\pi R \theta}{180 v} \right)^n \tag{1}$$

ここで、

- d : 鑄片板厚 (mm)
- K : 凝固係数 (mm/min⁻ⁿ)
- R : ドラム半径 (mm)
- v : ドラム速度 (m/min)
- t : 接触時間 (min)
- θ : 接触弧角 (°)
- n : 定数

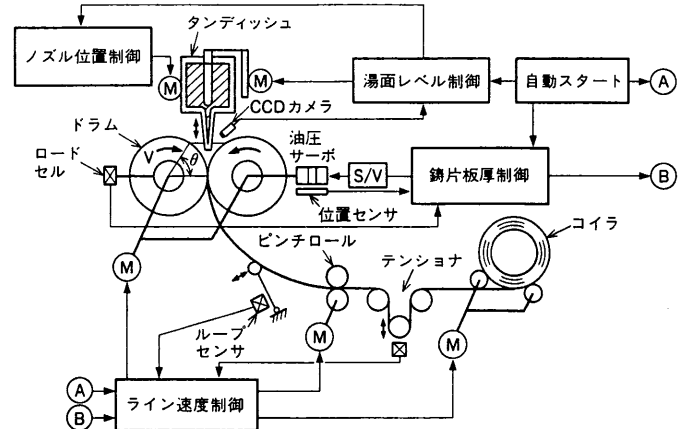


図3 制御システム構成図 ストリップキャストに組込まれている制御システムの構成図。
Construction of control system

実験で得られた鑄片板厚は $n=0.6$, $K=29.7$ として、式(1)の関係で表すことができた。式(1)より所定の板厚を得るためには接触弧角 θ (図3参照)とドラム速度 v の比を決めれば良い。したがって接触弧角及びドラム速度を上下限の範囲内で最適値に設定する。

湯面レベル制御は CCD カメラによって接触弧角を検出し、タンディッシュストップで溶鋼流量を調整することによって行われる。この湯面レベル制御の精度は接触弧角で $\pm 0.2^\circ$ (湯面レベル: ± 1.6 mm) であり、安定鑄造並びに鑄片表面品質に対し十分な精度である⁽¹⁰⁾。

鑄片の板厚自動制御システムには押力一定板厚制御とギャップ一定板厚制御がある⁽¹²⁾。押力一定板厚制御は押力制御を油圧サーボにより高応答で行い、その結果生じた板厚偏差をドラム速度の操作により、緩やかに修正する方法であり、ギャップ一定板厚制御はギャップ制御を油圧サーボにより高応答で行い、その結果生じたドラム押力偏差を、ドラム速度の操作により緩やかに修正する方法である。また、ドラムギャップはフレームたわみ量、フレーム熱膨張量及びドラム熱膨張量により補正され、板厚制御の精度向上を図っている。

鑄片の表面性状は表面割れの発生によって著しく害される。表面割れは不均一凝固に起因するものであり、この不均一凝固の要因としては、メニスカス部での溶鋼の波立ち、酸化膜の巻き込み等が考えられる。これらに対し、ノズルからの溶鋼の注湯法の改善及び溶鋼表面の雰囲気制御により、割れない鑄片を鑄造することが可能となった。

以上の安定鑄造技術の確立により10t規模の鑄造が達成された。図4に1330mm幅の10tコイルを示す。

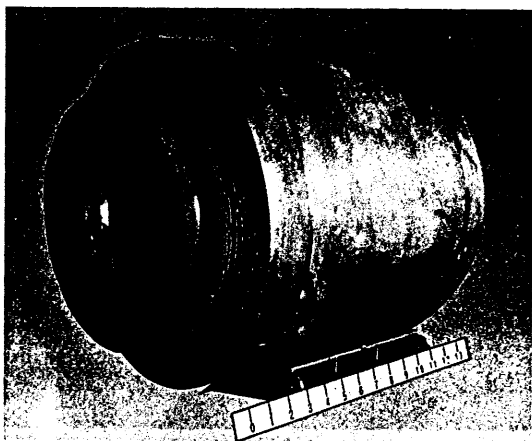


図4 1330mm幅10tコイルの外観 ストリップキャストで鑄造した10tコイルの外観写真。
Ten tons coil of 1330 mm wide cast strip

5. 鑄片の特性

5.1 凝固組織

図5(a)に鑄片幅方向の断面凝固組織を示す。柱状晶が鑄片表面から成長し、中心部は等軸晶となっている。この柱状晶厚みの

標準偏差と平均厚みの比の測定結果は4%程度であり、凝固シェルは均一に成長していることが分かる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

さらに、ストリップキャストでは急冷凝固であるため、図5(b)に示したようにマイクロ偏析の量も従来材に比べ小さい⁽¹⁵⁾。また、図5(c)に示したように鑄片中の1 μm 以上の非金属介在物の数は従来材に比べ約1/5となっている⁽¹⁶⁾。

5.2 鑄片形状

5.2.1 鑄片クラウン

鑄片クラウンの精度に対してはドラムの形状が問題となる。ドラムは溶鋼との接触により温度が上昇し、熱変形する。このドラムの熱変形量を推定するためのモデルを構築し、熱解析によってドラムのイニシャルプロフィールを決定するとともに、上述の熱的に安定なドラム構造とすることによって鑄片クラウンを制御した。

図6(a)に実測した鑄片クラウン分布を示す。鑄片クラウンは90 μm 以下であり、目標値を満足している。

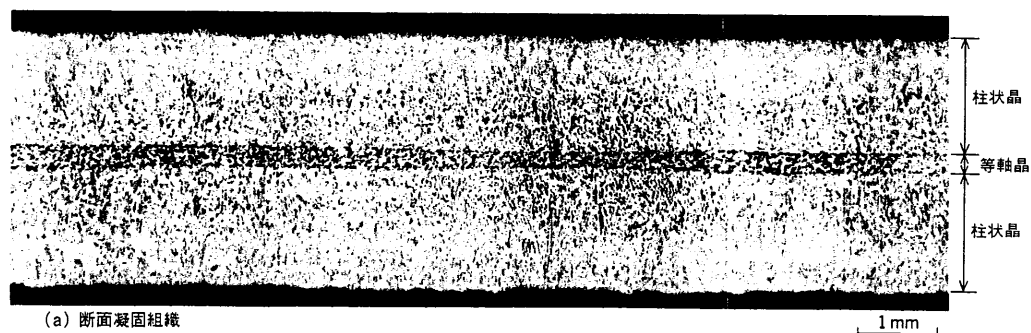
5.2.2 鑄片ウェッジ

鑄片ウェッジの制御はドラムのドライブサイドとワークサイドのギャップ制御により行っている。

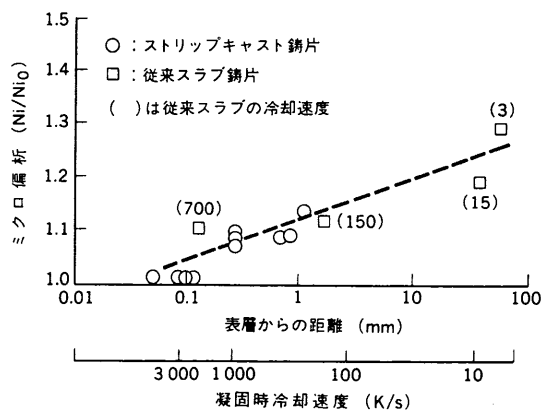
実測した鑄片ウェッジ分布を図6(b)に示す。鑄片ウェッジは60 μm 以下であり目標値を満足している。

5.2.3 鑄片板厚の長手方向の変動

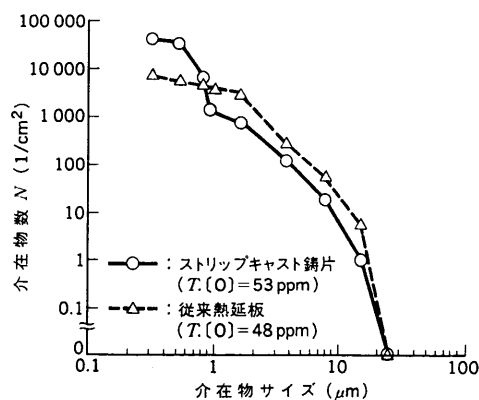
鑄片板厚の長手方向の精度は前述の板厚制御システムによって達成された。図6(c)に板厚自動制御システムを用いた場合の鑄造で得られた鑄片板厚の変動を示す。鑄片板厚の変動は、いずれの板厚制御の場合でも目標精度の10%より小さく、押力一定板厚制御では8.8% (平均5.3%)、ギャップ一定板厚制御では3.0% (平均2.6%) 以下である。



(a) 断面凝固組織



(b) Niのマイクロ偏析



(c) 非金属介在物の大きさ分布

図5 ストリップキャスト鑄片特性 ストリップキャスト鑄片の (a) 断面凝固組織、(b) Niのマイクロ偏析及び (c) 非金属介在物の大きさ分布を示す図。
Characteristics of cast strips

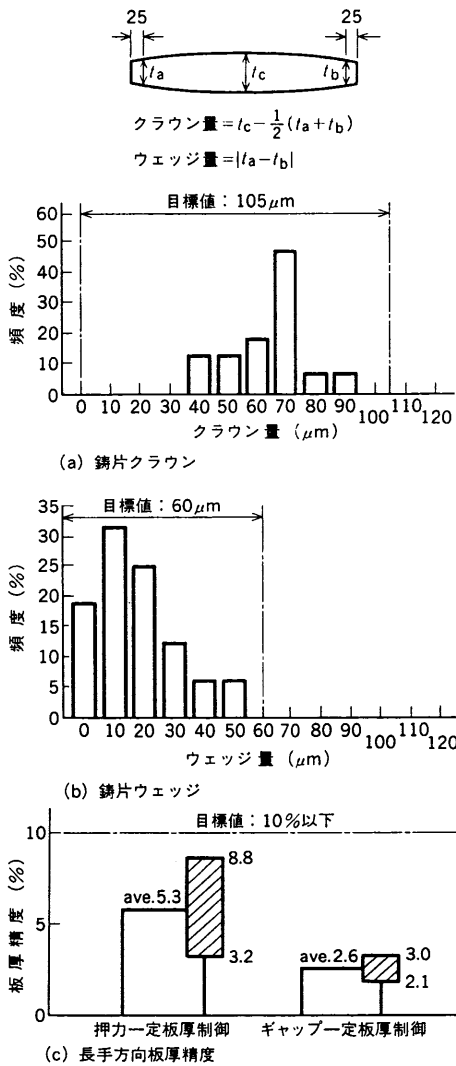


図6 ストリップキャスト鑄片の形状 ストリップキャスト鑄片の (a) クラウン量, (b) ウェッジ量及び (c) 長手方向板厚精度を示す図. Cast strip profile

6. 冷延材の特性

ストリップキャストで製造した SUS 304 鋼鑄片を冷間圧延, 焼鈍しその特性を調査した。また, 従来の連鑄機で鑄造されたスラブを熱間圧延, 焼鈍, 冷間圧延, 焼鈍したものを比較材とした。冷間圧延材の最終仕上げは酸洗仕上げ及び光輝焼鈍仕上げを行った。表 1 に機械的性質と耐食性を示す⁽¹⁷⁾。ストリップキャスト材の伸びと引張強度は従来材とほぼ同等であり, 異方性はより小さい。耐食性を示す孔食電位は従来材に比べて高い。図 7 にストリップキャスト材より製造した最終製品例を示す。

7. 結 言

800 mm 及び 1 330 mm 幅のストリップキャストを用いた 10 t 規模の実証試験により以下の成果を得た。

- (1) 安定鑄造技術として, 湯面レベル制御, 板厚制御等の自動制御システムを確立した。
- (2) 得られた鑄片の形状 (鑄片クラウン, 鑄片ウェッジ, 長手方向板厚精度) は目標値を満足する。
- (3) 得られた鑄片は表面割れはなく, 凝固組織は均一である。
- (4) ストリップキャストで鑄造した鑄片を直接冷延した

表 1 冷間圧延材の特性
 Properties of cold-rolled products

| 材 料 | 特 性 | 機械的性質 | | | 耐食性 孔食電位* (V vs SCE) (V) |
|------------|-----|---------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| | | 伸び (長手方向) (%) | 引張強度 (N/mm ²) | 面内異方性 (Δr) | |
| ストリップキャスト材 | | 50.4 | 702 | -0.24 | 0.38 |
| 従 来 材 | | 50.8 | 702 | -0.54 | 0.26 |

* (JIS 0577 に準拠)



図7 ストリップキャスト材最終製品 ストリップキャスト材の最終製品例, シンク.
 Final product of cast strip (sink)

SUS 304 製品の機械的性質及び耐食性は従来製品と同等もしくははより良好である。

参 考 文 献

- (1) IISI Technology Meeting in Vienna May 3 and 4 (1993)
- (2) 2nd European Continuous Casting Conference Proceedings (1994)
- (3) 塙ほか, 双ロール法によるステンレス鋼帯鑄造技術の開発, CAMP-ISIJ Vol.3 (1990) p.1 160
- (4) 松木ほか, 異径双ロール式薄板鑄造法の開発, CAMP-ISIJ Vol.4 (1991) p.52
- (5) 吉村ほか, 10 トン規模ツインドラムキャストの鑄造技術, CAMP-ISIJ Vol.4 (1991) p.993
- (6) 山根ほか, 双ロール法による鑄造欠陥低減, CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) p.1 017
- (7) 井上ほか, 双ロール鑄片の不均一凝固に及ぼす鑄造要因の影響, CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) p.1 018
- (8) 新出ほか, 双ロール鑄造時の溶鋼静圧の制御による鑄片形状の改善, CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) p.1 019
- (9) 山田ほか, 1 050 mm 幅双ロール機による薄板鑄造技術, CAMP-ISIJ Vol.5 (1992) p.1 021
- (10) 新井ほか, 10 トン規模 1 330 mm 幅ツインドラムストリップキャストの鑄造技術, CAMP-ISIJ Vol.6 (1993) p. 254
- (11) 佐々木ほか, 600 mm 幅ストリップキャストによる 10 トン規模鑄造技術, CAMP-ISIJ Vol.6 (1993) p.1 139
- (12) 山本ほか, 10 トン規模ツインドラムキャストの板厚自動制御, CAMP-ISIJ Vol.4 (1991) p.994
- (13) 福田ほか, 10 トン規模ツインドラムキャストの凝固特性, CAMP-ISIJ Vol.4 (1991) p.995
- (14) 福田ほか, 10 トン規模ツインドラムストリップキャストで鑄造した鑄片の性状, CAMP-ISIJ Vol.6 (1993) p.225
- (15) 福田ほか, ストリップ鑄片のマイクロ偏析 CAMP-ISIJ Vol. 5 (1992) p.1 023
- (16) 福元ほか, ツインドラム鑄片の介在物, CAMP-ISIJ Vol. 5 (1992) p.1 024
- (17) 末広ほか, SUS 304 ツインドラム鑄造鑄片の冷延薄板材質特性, CAMP-ISIJ Vol.3 (1990) p.214