

## 矩形鋳型によるチタンの真空アーク溶解

© 1988 ISIJ

技術報告

山中 章裕\*・市橋 弘行\*

## Vacuum Arc Remelting of Titanium with Rectangular Mold

Akihiro YAMANAKA and Hiroyuki ICHIHASI

## Synopsis :

Vacuum arc remelting with rectangular mold was tried in order to reduce the cost of producing titanium sheet and plate. Compact electrodes and solid ones were melted with a mold designed to have the proportion of wide side length to the narrow of 1.5 and the round inner corners. The conditions of melting and the quality of ingots were investigated, and the following results were obtained.

(1) Melting aspects are the same as those with round mold, and there is no problem in melting compact electrode.

(2) There is no difference between heat fluxes at the wide side, the short side and the corners of mold, and those are the same as the heat flux at the round mold too. As the result, the thickness of solidified shell is uniformed.

(3) Distributions of [Fe] and [O] in the ingot are as homogeneous as those in round ingot.

(4) Surface quality of the ingot from a solid electrode is good enough, even in hot rolled plate from the ingot without conditioning, however only a few shallow defects within 0.3 mm depth are detected.

**Key words :** VAR ; rectangular mold ; titanium ingot ; compact electrode ; surface quality ; rolled plate.

## 1. 緒 言

我が国におけるチタン製品において純チタンが最も生産量が高く、しかも展伸材として利用されている。その製造法として、真空アーク溶解炉 (VAR) による丸形鋳塊の溶製、粗鍛造、分塊圧延、熱延といったプロセスを経るのが一般的である。従来より、溶解時の操業のコントロールが容易であることから、鋳塊形状は丸形となっている。本研究の目的は、直接矩形鋳塊を製造することにより粗鍛造または分塊圧延の工程を省略し、チタンの製造コストの低減を計ろうとするものである。

VAR による矩形鋳塊の製造については、米国の文献<sup>1)</sup>に一部記載されているのみでその詳細は不明である。またこの他に矩形鋳型による溶解の実操業の報告例は皆無であり、操業上の問題点等、全く不明である。

そこで、小型の VAR 炉を用い矩形鋳型による溶解を行つて、溶解状況、鋳塊の品質等、鋳型が矩形であることによる問題点の有無を把握した。

## 2. 鋳型の設計

実験に用いた炉は直流の 40 V-3 kA を定格とする VAR 炉で 145 mm  $\phi$  の丸型の鋳型を有するが、この鋳型のみを Fig. 1 のごとく改造した。矩形鋳型を考える時の第一の問題は鋳片の厚さに相当する短辺の長さをいくりにするかということと、長、短辺の比である偏平比をいくりにするかということである。

実生産を想定した場合、粗鍛造以下の工程を考えると鋳片の厚みはできるだけ薄く偏平比の大きな鋳塊を溶製する方が望ましい。

VAR の場合、消耗電極と鋳型の間でアーク (サイドアークと称する) が発生することを防止するため、実用炉では 50 mm 程度の間隙 (以下サイドギャップと称する) を設けている<sup>2)</sup>。小型炉では、低電力の溶解であるのでサイドアークによる鋳型溶損の危険性が少く、当研究に用いた炉の場合、サイドギャップを 22.5 mm としている。従つて電極の厚みは、小型炉の場合鋳型の厚みから 45 mm も薄くする必要がある。電極の側からの問

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 5 月 13 日受付 (Received May 13, 1987)

\* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

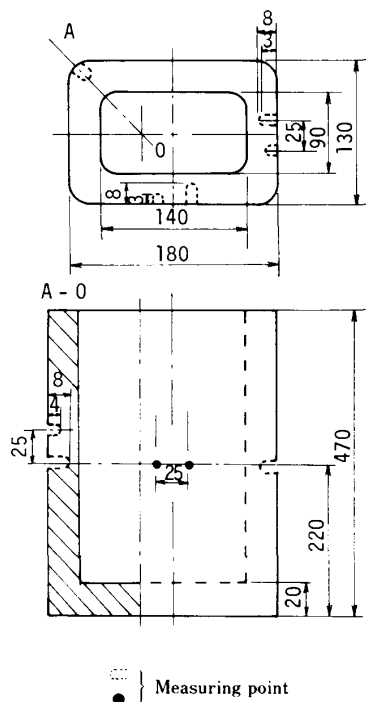


Fig. 1. Rectangular mold and temperature measurements.

題としては溶解中に熱応力で変形することがあるので熱応力に耐えられるように厚みを持たせることがある。

これらの条件を考慮し、電極の厚みを当炉において熱応力で変形しない最小の 45 mm としサイドギャップを従来の 22.5 mm とした。従つて矩形鋳型の短辺の長さは 90 mm となつた。一方、鋳型の長辺の長さは炉体の孔径より取り得る最大の長さである 140 mm と設定した。この鋳型を用いて 1 次溶解に相当するスポンジチタンの圧縮成形体からなるコンパクト電極と 2 次溶解に相当する中実なチタンでできたソリッド電極の溶解を行うことにした。

矩形鋳型の VAR で懸念されたことは、どんな品質の鋳塊が得られるかということである。特に鋳塊の表面品質は重要で、たとえ矩形の鋳塊が得られたとしても鋳肌などの手入れを必要とすると工程省略のコストメリットは大幅に減少する恐れがある。

矩形鋳型溶解において、コーナー部は冷却が強いことと溶湯の流れが悪いことから鋳肌が悪くなる可能性がある。そこでこの影響を緩和させるため、コーナー部を十分径の大きな 1/4 円柱面とした。一般に VAR 溶解においては、自己電流による磁場、スターラによる磁場の影響で回転流が生じている。連続の式と、垂直磁場、溶解電流より生じる電磁力を含む運動方程式を 2 次元で層

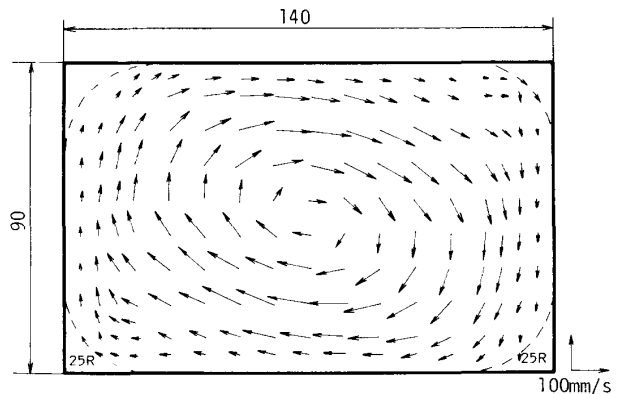


Fig. 2. Computed velocity profiles (arrows denote direction of velocity vector).

Table 1. Melting condition.

Electrode	Solid	Compact
Mold size	90 t × 140 w mm	
Electrode size	45 t × 95 w mm	45 t × 90 w mm (25R)
Current (DC)	2.2 kA ~ 3.0 kA	2.0 kA ~ 2.5 kA
Voltage	28 V	30 V
Pressure	$10^{-4} \sim 10^{-3}$ torr	$10^{-4} \sim 10^{-3}$ torr

および壁面での法線速度成分が 0 であるという境の下で解いて、回転流動を求めて Fig. 2 に速度ベクトルで表示した。この図を参考にして溶湯の滞留の程度が悪くない範囲でコーナー R を 25 mm と設定した。

### 3. 実験方法

矩形鋳型の VAR 溶解において調査すべき項目は、鋳型が丸形から矩形に変わったことでサイドアークの発生、電極の熱変形等で溶解が異常にならないかということと、どの程度の鋳肌の鋳塊が得られるかということである。

これらは溶解条件に強く影響されると考えられるが、矩形鋳型の VAR の情報は全くないので実際には丸形の溶解条件に近い条件で試行錯誤しながら溶解実験を行った。コンパクト電極は、スポンジチタン中に Mg 等のガス成分が多いため、溶解時にガスの発生が多くなると考えられる。そこで、ガスの発生が少ないソリッド電極の溶解から始め、問題のないことを確認してからコンパクト電極の溶解を行った。得られた溶解条件を Table 1 に示す。この溶解電圧は当炉における丸形の溶解電圧とほぼ同じであつた。なお、ここでは特にホットトップは行わなかつた。

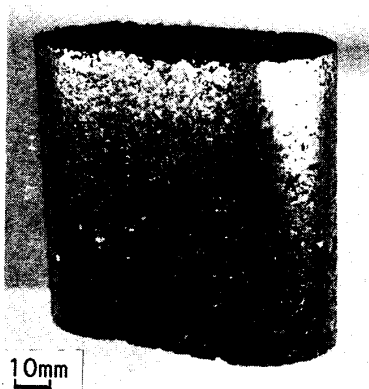


Photo. 1. Compact for 1st electrode made by pressing titanium sponge.

コンパクト電極は Photo. 1 に示す形状のコンパクトを数個溶接して作製した。これは約  $60 \text{ kgf/mm}^2$  の圧力で、粒径約  $13 \text{ mm} \sim 0.7 \text{ mm}$  のスポンジチタンを加压成形したもので、コンパクト金型の都合上、コーナー部を半径  $15 \text{ mm}$  の  $1/4$  円柱面としている。

ソリッド電極に用いたのは圧延ないし、鍛造品から切り出した材料であり、コンパクト電極を溶解して得られた鋳塊と Mg 等の脱ガス状況が異なり、これが2次鋳塊の表面性状に影響するということも考えられる。そこで、コンパクト電極から得られた、 $90 \text{ tmm} \times 140 \text{ wmm}$  の鋳塊の短辺側を  $45 \text{ mm}$  切り出して、3辺が1次鋳塊の鋳肌となる電極を作りソリッド電極の条件で溶解を行った。

得られた鋳塊については外観の観察及び、必要に応じて縦断面、横断面を切り出して、マクロ組織、表皮部の断面組織、成分の分布について調査した。

一方、鋳塊を圧延した時の表面状況を調べる目的で、鋳塊の厚みの中央で縦断し、 $45 \text{ tmm} \times 140 \text{ wmm} \times l$  の試料をつくり鋳肌を残した試片と鋳肌を  $0.4 \text{ mm}$  手入れしたものの2種類を圧延した。加熱温度は  $900^\circ\text{C}$  で圧延終了を  $750^\circ\text{C}$  とし、 $4 \text{ mm}$  まで圧下を加えた。得られた圧延板はサンドブラストをかけた後、酸洗し、ダイチェックして表面欠陥を調べた。見出された欠陥についてはミクロ観察も行った。

鋳肌の性状には、鋳型からの抜熱が大きく影響すると考えられる。そこで、すでに著者らが報告<sup>3)</sup>したと同様の方法で Fig. 1 に示すように鋳型を加工し溶解中の鋳型の温度を測定できるようにした。測定箇所は、短辺、長辺、コーナー部の3箇所であり、各場所で2点、鋳型外表面から  $8 \text{ mm}$  と  $3 \text{ mm}$  ないし  $4 \text{ mm}$  の場所に銅-コンスタンタン熱電対を埋め込んだ。ただし加工の都合上



Photo. 2. Solid electrode after melting.

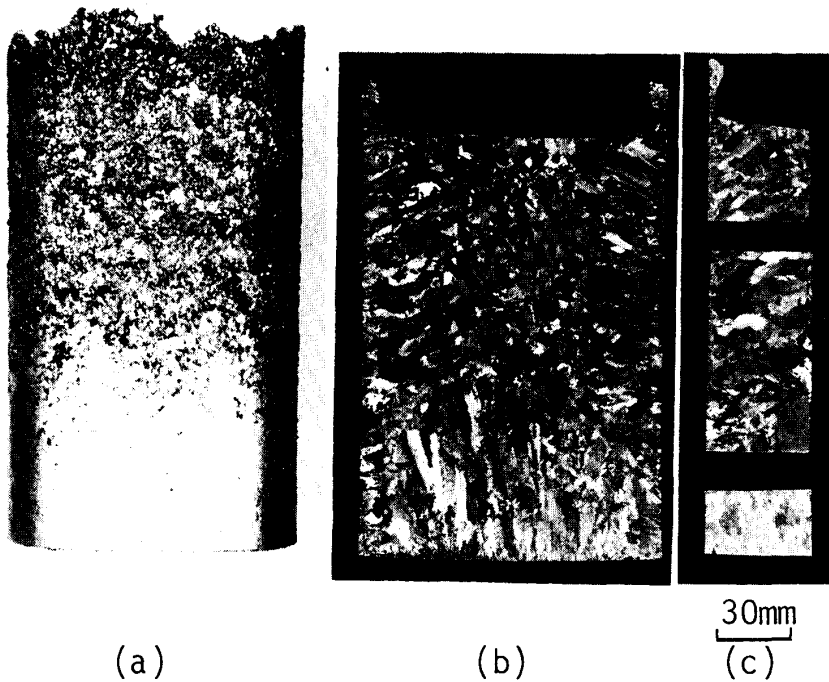
二つの測定点は長辺、短辺については水平方向に  $25 \text{ mm}$ 、コーナー部については上下方向に  $25 \text{ mm}$  離れている。長辺、短辺については、データの処理においてこの影響はないものとした。一方コーナー部については、鋳塊トップと測定点の相対距離が同じとなる温度より抜熱量を求めた。測定位置は鋳型底面より  $200 \text{ mm}$  の高さで、この位置では底部からの抜熱より壁部からの抜熱が主体となっており鋳塊トップから凝固界面に至るまでの温度分布は十分、定常状態に達しているものと考えられる。抜熱量は深さの違う2点間の温度分布を直線的と仮定し、この間の温度勾配と銅の熱伝導率より求めた。

次に、鋳塊の表皮の形成と重要な関係があると考えられる凝固シェルの厚さの測定も行った。これも既に著者らが丸形鋳塊で行ったのと同様の方法<sup>3)</sup>でWの粉末のトレーサを電極内部に事前に装入しておき、溶解中に鋳塊の約  $100 \text{ mm}$ ,  $200 \text{ mm}$ ,  $280 \text{ mm}$  の高さに相当する位置で自動的にメタルプール内にトレーサが添加されるようにした。得られた鋳塊の長辺、短辺のそれぞれ縦断と横断面を切り出し硝酸液 ( $1\% \text{ HF} - 5\% \text{ HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ) により、マクロエッチして凝固シェルの形状を求めた。

#### 4. 結 果

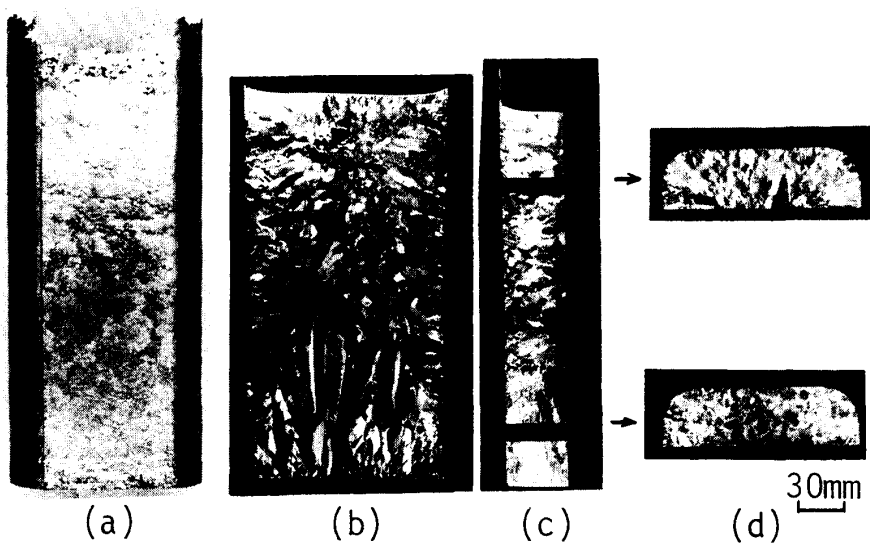
当初、心配された操業については  $22.5 \text{ mm}$  のサイドギャップであれば、Table 1 の条件でサイドアーク、電極の曲がり等の問題なく安定した溶解を行うことができた。溶解後の電極の先端の形状を Photo. 2 に示すが、通常の丸形鋳型による溶解時の電極先端形状と大差なく安定したアークの発生状況を示すものといえる。

コンパクト電極の溶解条件は Table 1 に示すように当炉で丸形鋳型の溶解を行った場合と同様に、電圧はソリッド電極より  $1 \sim 2 \text{ V}$  高い方が安定しており、電流は



(a) : Appearance  
(b) : Macrostructure of vertical section of wide side  
(c) : Macrostructure of vertical section of narrow side

Photo. 3. Ingot obtained from the compact electrode.



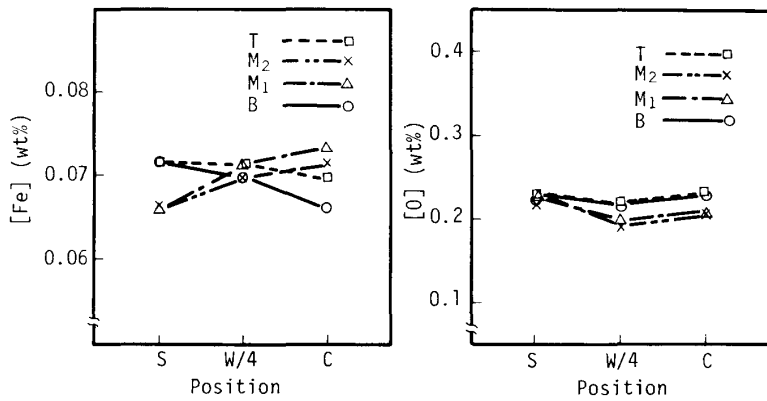
(a) : Appearance  
(b) : Macrostructure of vertical section of wide side  
(c) : Macrostructure of vertical section of narrow side  
(d) : Macrostructure of cross section

Photo. 4. Ingot obtained from the single melt ingot.

電極の密度が小さい分低めとした。溶解は多少スプラッシュがソリッド電極より多いだけで特に大きな変化はなかつた。得られた鑄塊の外観と短、長辺の縦断面を Photo. 3 に示す。コンパクト電極の場合、ソリッド電極と異なりガス発生のためスプラッシュが多くメタルの粒からなる冠<sup>†</sup>が厚くなるため再溶解できず、そのまま残存するので、このようにポーラスな鑄肌となる。しかし Photo. 3 の縦断面からわかるように、内部は、外観から懸念されるほどひどくなく、スプラッシュの残存は表皮下数 mm 以内で、丸形鑄塊に比べ多少悪い程度にすぎない。

† 鑄塊のトップに形成される冠状の凝固シェル

次にこのコンパクト電極の溶解より得られた鑄塊を切り出して2次電極として溶解を行った。得られた鑄塊の外観と短、長辺の縦断面を Photo. 4 に示す。鑄塊の表面性状は良好で丸形鑄塊と遜色のないものが得られた。懸念されたコーナー部の表面性状も良好で長辺、短辺と外観および表皮部の断面組織もほとんど差がない。また鑄塊縦断面のマクロ組織も通常の丸形鑄塊の場合と同様で、非定常部においては鑄塊底部より上方に向けて柱状晶が発達し、定常部に達した後鑄塊表皮面より鑄塊中央上方に向けて柱状晶が発達しているのがわかる。鑄塊の長辺、短辺の縦断面において領域の大小の差こそあれ、このような柱状晶の発達状況となつている。鑄塊上部に



T: Top M1, M2: Middle  
B: Bottom S: Surface  
W/4: At the quarter of width from center  
C: Center

Fig. 3. Distribution of [Fe] and [O] in the ingot.

トップキャビティが存在するが、この大きさ、発生位置も丸形鋳塊と大差ないことがわかった。

次に鋳塊内の成分分布を調べた結果を Fig. 3 に示す。成分元素は純チタンの強度に影響すると考えられる Fe と O を対象とした。Fe は平均濃度 700 ppm に対し ±50 ppm, O は平均濃度 2150 ppm に対し ±150 ppm のばらつきの範囲内に入っており、場所による差は小さく極めて均質な分布となっている。

以上のように、表面品質、内質、成分分布のいずれもマクロ的に見る限り、大きな欠陥は見当たらない。

次に鋳塊性状の内、特に重要と考えられる表面部の状態をさらに詳細に検討する意味で、ミクロ観察を行った。その結果を Photo. 5 に示す。Photo. 4 に示したように鋳塊表面の外観は平滑で欠陥が存在しないように見えるが、ミクロ的には Photo. 5 のようなポロシティが表皮下に存在しているのがわかった。ポロシティの存在深さを調べるため表皮から 0.1 mm ずつ機械切削、ダイチェックをくり返した。その結果、0.4 mm 以上切削すれば欠陥はなくなることが確認された。このポロシティはスブラッシュにより形成された冠が溶湯により完全に溶解されずに一部残存したため生じたと思われる。

次に、これらの鋳塊の表面性状を考慮に入れて圧延テストを行った。圧延テストに用いた鋳塊は圧延ないし鍛造品から切り出した材料より作製したソリッド電極を溶解して得たものであるが、この鋳塊の表面性状、内部品質とも先に示したコンパクト電極から得られた 2 次鋳塊と大差ないことを事前に確認している。

0.4 mm 表面を切削手入れしたものと手入れを行わない黒皮のままのもの 2 種類の圧延を行った。得られた圧延板のダイチェック結果を Photo. 6 に示す。手入れしたものはほとんど欠陥がないが、黒皮のまま圧延したものはダイチェックにより欠陥が検出されている。さらにこの疵を詳細に調べるために疵部を切り出し、ミクロ

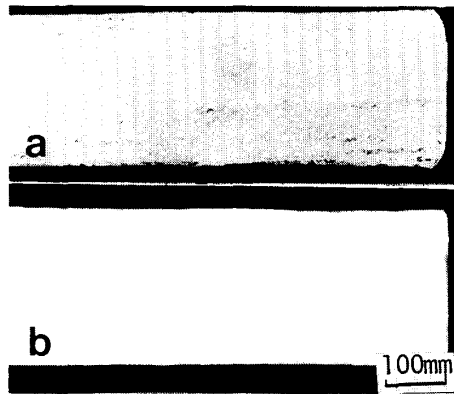


Photo. 5. Microstructure of ingot surface.

観察した。圧延方向に圧延板の縦断面を見たのが Photo. 7 である。いずれも疵はかぶれ状（かさぶた状の 2 重肌）となっており、その深さは、0.3 mm 以内で容易に除去できる軽微な疵である。従つて矩形鋳塊の黒皮圧延の可能性も存在すると考えられる。

次に、鋳肌生成に大きく影響する凝固シェルの形状と鋳型からの抜熱状況について示す。Photo. 8 に W 粉末を添加した鋳塊の横断面、縦断面のマクロ組織を示す。縦断面は長辺側と短辺側の双方を調べた。約 100 mm の鋳塊高さの時のメタルプール形状が、1 番下のものであるが、プール底辺は鋳型底部からの冷却を受け平坦に近い形となっている。鋳塊高さ約 200 mm の位置における 2 番目のメタルプール形状は 1 番上のものとはほぼ同じ形状となっており、この時点で、ほぼ定常状態に達しているものと考えられる。定常状態におけるプールの深さは約 100 mm で、これは著者らが既に報告<sup>3)</sup>している 145

mm φ の 3 kA の VAR 結果とほぼ同じ深さとなっている。これは、重量当たりの表面積は矩形の方が大きくて冷却が速くなるにもかかわらず、湯面上昇速度は丸形のものの方が 2 mm/min であるのに対し、矩形の場合 2.4 mm/min と約 20% も大きくなっていてることによるものと考えられる。従つて、丸形と凝固シェルの形状がほぼ同じとなり、铸肌形成部の熱的状态もあまり丸形と差がないものと考えられる。次に横断面から凝固シェルを観察するとシェルが薄いところでは長辺、短辺、コーナー部



a : Without conditioning  
b : With conditioning  
Photo. 6. Hot rolled sheet.

Rolling direction

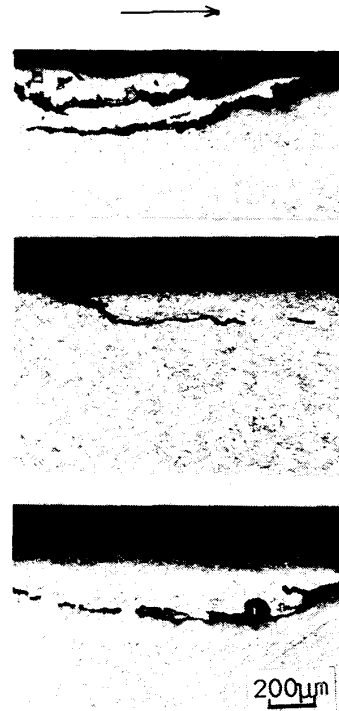
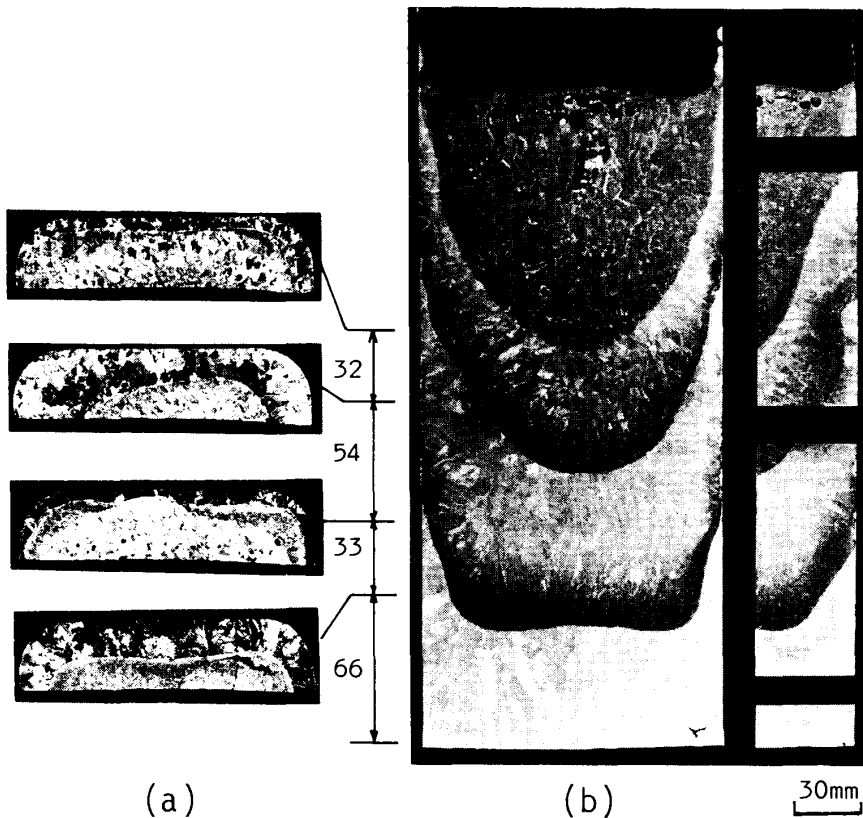


Photo. 7. Microstructure of the surface crack in the cross section.



(a) : Cross section  
(b) : Vertical section  
Photo. 8. Macrostructure of ingot (2.5 kA).

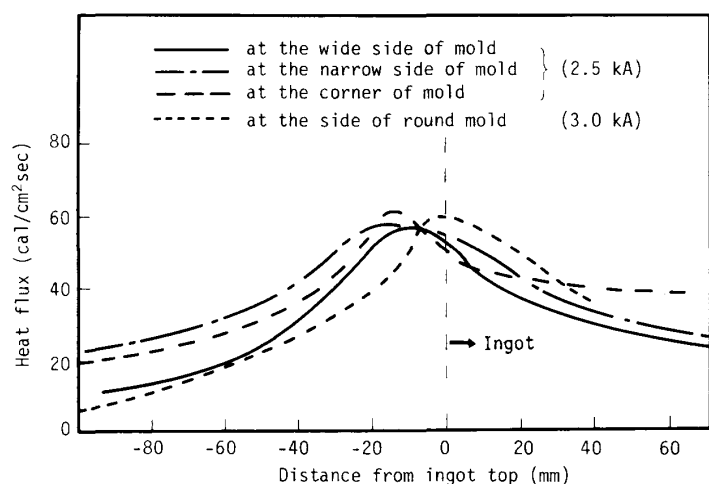


Fig. 4. Estimation of heat flux at mold.

ともにシェルの厚みに大きな差はなく、鋳型からの冷却及び溶湯からの熱伝達に関して場所による差が生じていないことがわかる。しかしシェルの厚い部分においては、その厚みが不均一となっているが、これは鋳肌の形成され、表面より凝固シェルが十分に発達してから鋳塊の収縮等で鋳型との熱伝達が不均一になったことによるものと考えられる。

次に Fig. 4 の鋳型の測温結果より求めた抜熱量を示す。横軸は熱電対を埋め込んだ位置から湯面までの距離で、プラス側は湯面が熱電対より下の時で、マイナス側は湯面が熱電対より上にきたことを示す。矩形鋳型のもは長辺、短辺、コーナー部ともに、ほとんど同じプロフィールを示し抜熱量に差がないことを示している。また破線は既に著者らが報告<sup>3)</sup>している 145 mm  $\phi$  の 3 kA の VAR で求めた抜熱量の測定結果であるが、多少ピークがずれているだけで絶対値はほとんど変わらない。

以上のように凝固シェルの形態、鋳型の抜熱状況からみても矩形鋳型溶解において、丸形鋳塊と遜色のない表面品質で、特にコーナー部、長辺、短辺部とも差のないものが得られることがわかる。

## 5. 結 言

純チタンの展伸材の製造工程を省略することを目的として、長辺と短辺の長さの比が 1.5 でコーナー部を 1/4 円柱面とする矩形鋳型を用いて、コンパクト電極、ソリッド電極の VAR 溶解を行い、抜熱状況や鋳塊の品質の調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 溶解状況は通常の丸形鋳型の VAR と全く変わらず、コンパクト電極の溶解も何ら問題がない。

(2) 鋳型の長辺、短辺、コーナー部の抜熱量に差がなく、その値は丸形のもの、ほぼ同じで、均一な凝固シェルが得られている。

(3) 鋳塊内の Fe, O の分布も通常の丸形鋳塊並みに均一である。

(4) ソリッド電極から得られた鋳肌も健全で、黒皮のまま圧延しても、圧延板で容易に除去可能な 0.3 mm 以内の深さの軽微なかぶれが存在するだけである。

## 文 献

- 1) H. GRUBER: *Vacuum Metallurgy*, ed. by R. F. BUNSHAH (1958), p. 79 [Reinhold Publishing Corporation]
- 2) 鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩 (日本鉄鋼協会編) (1969), p. 47
- 3) 市橋弘行, 山中章裕, 馬場良治, 池田隆果: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 579