

論 文

鋳片と鋳型との間に発生する空隙について*

(鋼の連続鋳造に関する研究—VI)

牛 島 清 人**

On the Air Gap between the Billet and the Mold.

(Study on continuous casting of steel—VI)

Kiyoto USHIJIMA

Synopsis:

In the previous report (Tetsu-to-Hagané, 47 (1961) No.3, p. 390), it was revealed that the cooling of a billet in the mold was largely reduced by formation of the air gap between the billet and the mold in the lower part of the mold.

In this report, the result of experiments which were held in order to search the commencement of formation of the air gap and the thickness of the air gap between the billet and the mold shall be revealed.

The air gap between the billet and the mold occurred when the contraction of the outer shell of the billet by cooling became greater than the creep of the outer shell of the billet by the ferrostatic pressure of the molten steel which was retained yet in the core of the billet.

The contraction of the outer shell of the billet could be calculated by the temperature change of the shell. On the other hand, the creep of the shell could be calculated by the thickness and the temperature change of the shell and the ferrostatic pressure of the molten steel which was retained in the core of the billet. Experiments were carried to search the thickness of the shell by means of the pour-out test and to search the temperature change of the shell by means of inserting the thermocouple into the shell of the billet.

The experimental results were as follows. The commencement of the air gap formation was at 250mm below the meniscus. The taper which occurred between the billet and the mold was found to be $1.66/1000 \sim 3.15/1000$.

These figures about the air gap between the billet and the mold should have a great meaning in analysing the reasonable cooling of the billet in the mold in the following report.

I. 緒 言

前報¹⁾において明らかにしたごとく、鋳型の下部においては鋳片の収縮と鋳型の変形とによつて鋳片と鋳型との間に空隙が生じ、鋳片の一次冷却を著しく阻害する。そこでこの鋳片と鋳型との間に生ずる空隙の発生時期ならびにその大きさを明らかにすることは、一次冷却機構をより深く解明するに当つて最も重要な点であると考え

る。この鋳片と鋳型との間に生ずる空隙の発生時期については従来も^{2, 3)}の報告がなされている。たとえばB. N. KATOMIN と V. S. RUTES²⁾は測定方法の詳細は述べていないが、ラジオ・アイソトープによる凝固速度の

測定と鋳型冷却水の温度上昇とから求めたとして、矩形断面の鋳片と鋳型との間に空隙の生ずる位置は鋳片の長辺側では湯面から 600~800mm 下部、短辺側では湯面から 150~200mm 下部であるとしている。また R. SEWELL³⁾ はソ連邦における研究結果を紹介した報告の中で、あらかじめ鋳型に挿入した真鍮板の鋳込中の温度ならびに鋳込後の硬度分布を測定して、矩形断面鋳片の短辺と鋳型との間に空隙が生ずるのは湯面から 140~150mm 下部であるとしている。この外全く測定方法を明らかにしていないが、鋳片と鋳型との間の空隙の発生時期

* 昭和 36 年 4 月本会講演大会にて発表

** 住友金属工業株式会社製鋼所, 工博

は湯面から 150~200mm であると報告しているもの⁴⁾,
あるいは鑄型の上下往復運動の一週期後程度 (湯面から
約 50mm 下部) と推定しているもの⁵⁾ などがある. す
なわち従来の文献では, 鑄片と鑄型との間に生ずる空隙
の発生時期を直接測定したものはなく, またこの空隙の
大きさについては全く明らかにされていない.

本報告は鑄型内における鑄片の凝固厚さと鑄片表面の
温度とを測定し, 鑄型の下部において鑄片と鑄型との間
に生ずる空隙の発生時期とさらにその大きさを求めた
結果について述べるものである.

本実験においては, エル一式塩基性電気炉 (公称 8 t)
で溶製したキルド鋼を, 強制往復運動鑄型式垂直型鋼連
続鑄造機に鑄込み鑄片とした.

II. 鑄片と鑄型との間に生ずる空隙

鑄型内における鑄片と鑄型との関係は Fig. 1 に示す
ごとくである.

すなわち鑄型の上部 (a) においては鑄片の凝固はそ
の外層部のごく薄い部分に止まる. しかもこの凝固層は
非常に高温の状態にある. ゆえに鑄片と鑄型とは接触を
保つたままである. その後凝固が進行して鑄型の下部
(b) にいたると凝固層は鋼の凝固時の収縮ならびに固体
になつてから引続いて行なわれる冷却による収縮によつ
て内方に収縮し鑄型との間に空隙を生ずる. この収縮の
速度は次式によつて表わされる.

$$A = \alpha \cdot \Delta T \cdot r \dots\dots\dots (1)$$

ここに α : 鋼の収縮率 ($2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)⁶⁾

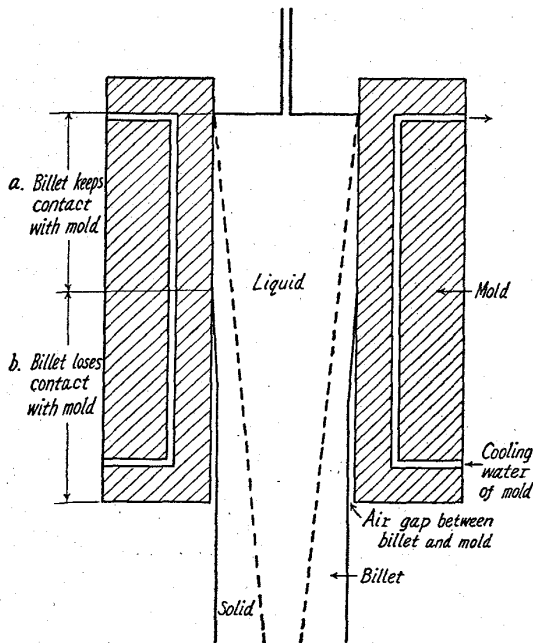


Fig. 1. Relation between the billet and the mold.

ΔT : 単位時間当りの凝固層平均温度の変化
($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)

r : 鑄片の半径 (cm)

一方凝固層は内部に充満する溶鋼の静鉄圧によつて外
方にクリープせしめられる. このクリープ速度は P.
FELTHAM⁷⁾の実験結果から円形断面の鑄片の場合, 次式
で表わされる.

$$B = 5 \cdot r \cdot T \cdot e^{-\frac{3 \cdot 10^4}{T}} \cdot \frac{e^{25q/T} + e^{-25q/T}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに B : 1s 当りのクリープ量 (cm/s)

T : 凝固層平均温度 ($^{\circ}\text{K}$)

q : 静鉄圧によつて凝固層に生ずる円周方向の
引張り応力 (kg/cm^2)

また q は次式で表わされる.

$$q = \pi \cdot r \cdot P / 2d \dots\dots\dots (3)$$

ここに P : 静鉄圧 (kg/cm^2)

d : 凝固層の厚さ (cm)

連続鑄造においては, 凝固層の任意の点における静鉄圧
は刻々と変化し次式であらわされる.

$$P = V \cdot t \cdot w \dots\dots\dots (4)$$

ここに V : 鑄込速度 (cm/s)

t : 凝固開始からの経過時間 (s)

w : 溶鋼の密度 ($7 \times 10^{-6} \text{kg}/\text{cm}^3$)⁸⁾

したがつてある鑄込速度 V における静鉄圧 P は (4)
式からただちに算出することが出来, 後述するごとく別
に測定した凝固層の厚さ d とともに (3) 式に代入して
凝固層に生ずる円周方向の引張応力 q が計算出来る. ゆ
えに凝固層の平均温度 T を測定することによつて, (2)
式から凝固層の外方へのクリープ速度 B を算出するこ
が出来.

ゆえに鑄片の凝固層の厚さならびに平均温度を測定す
ることによつて, (1)式から内方への収縮速度と(2)式
から外方へのクリープ速度とを算出することが出来るか
ら, 両者の和として鑄片表面の内方または外方への移動
を求めることが出来る.

鑄片の凝固厚さは溶鋼排出法によつて測定した.

鑄片の凝固層の平均温度は近似的に鑄片表面の温度と
凝固層の内側の温度との和の 1/2 として表わすことが出
来る. ゆえに鑄片の表面温度を測定することによつて鑄
片表面の移動すなわち鑄型との空隙の大きさを求めるこ
が出来. また鑄片表面の温度変化を測定することによ
つて空隙の発生時期も同時に明らかにすることが出来る
ものと考え. なんとすれば空隙の発生と同時に鑄片

表面は鑄型からの直接の冷却を受けなくなるから鑄片表面の温度降下に何らかの顕著な変化が認められるものと考えられるからである。

すなわち鑄型内における空隙の発生時期ならびに空隙の大きさを求めるためには、鑄片の凝固厚さならびに表面温度の変化を測定すればよい。

次に鑄型内における鑄片の凝固層の厚さならびに表面温度を測定した結果について述べる。

III. 鑄型内における鑄片の凝固厚さの測定

1. 実験の方法および結果

Table 1. Chemical composition of steel and its casting conditions of pour-out test.

Chemical composition (%)							Casting temperature (°C)	Casting speed (mm/mn)
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr		
0.11	0.24	0.46	0.013	0.011	0.16	0.12	1550	1900

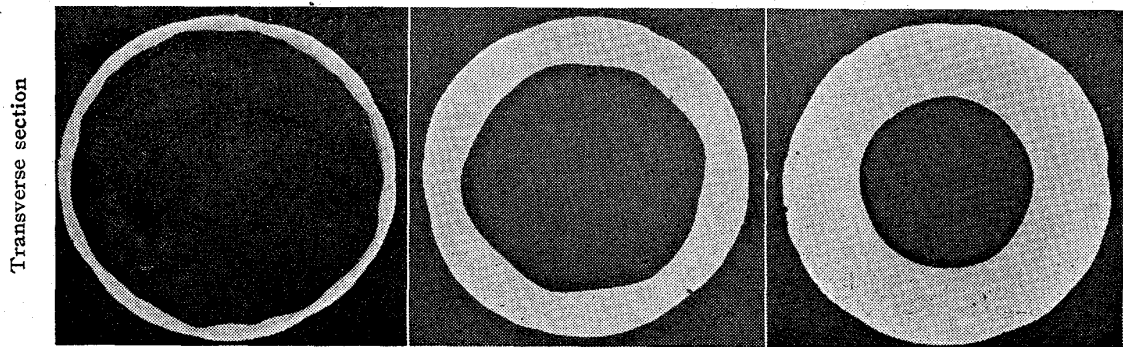
低炭素鋼を 115mm φ 鑄片に鑄込み、鑄込中、急速に鑄込速度を増大せしめそのまま約 2mn 間鑄込を続けた。その結果、凝固進行途上の鑄片内部の溶鋼部分の深さが大となり、切断時まで凝固が完了せず鑄片の下端から約 15s にして内部の溶鋼が全部排出された。すなわち溶鋼排出法によつて中空鑄片が得られた。

ここで低炭素鋼を選んだのは、液相線と固相線との間隔を小ならしめて溶鋼排出法に伴う誤差を出来るだけ小ならしめるための配慮であり、円形断面鑄片を選んだのは後の計算を簡便にするためである。鋼の化学成分および溶鋼排出時のおもな鑄込条件は Table 1 に示す通りである。

得られた中空鑄片の 10 数ヶ所を横断した。この 2, 3 の例は Photo. 1 に示す通りである。

おのおのの横断面について鑄片の凝固面積を測定し、これを鑄片の凝固厚さに換算すると Table 2 の第 8 項の通りである。

2. 溶鋼排出時間の補正



After the beginning of solidification Time(s) 3.2 25.3 66.4
Distance (mm) 100 800 2100

Photo. 1. Transverse sections of the hollow billet. ×1/2 (3/5)

Table 2. Relation between the thickness of the solidified shell and the time corrected from the solidification start.

No.	Distance below the solidification start (mm)	Time from the solidification start t_m (mn)	Height of the pouring-out steel above the cutting apparatus (mm)	Time of pouring-out t_0 (mn)	Time from the solidification start corrected by the time of pouring-out		Thickness of the solidified shell (mm)
					t (mn)	\sqrt{t}	
1	100	0.0527	6200	0.010	0.0627	0.25	4.55
2	200	0.1054	6100	0.019	0.1244	0.35	6.43
3	300	0.1581	6000	0.028	0.1861	0.43	8.43
4	400	0.2108	5900	0.039	0.2498	0.50	9.29
5	500	0.2635	5800	0.046	0.3095	0.55	10.27
6	600	0.3162	5700	0.055	0.3712	0.61	11.87
7	800	0.4216	5500	0.072	0.4936	0.70	16.67
8	1100	0.5797	5200	0.095	0.6747	0.82	18.64
9	1600	0.8432	4700	0.130	0.9732	0.99	23.09
10	2100	1.1067	4200	0.159	1.2657	1.12	27.01
11	2600	1.3762	3700	0.184	1.5542	1.25	30.00
12	3100	1.6337	3200	0.204	1.8377	1.35	36.55
13	3600	1.8972	2700	0.220	2.1172	1.45	39.37

凝固速度測定において溶鋼排出法は、排出時間中の凝固の進行を含んだ値を凝固厚さとして測定している。ゆえに凝固開始からの経過時間についてもこの排出時間を加えて補正を行なう必要がある。この排出時間の補正は次のごとくして行なつた。

すなわち排出直前の鑄片内部の溶鋼が、かりに鑄込面を底面として、切断位置を頂点とする、正円錐形であると仮定する。本実験においてはこの円錐の底面の径は115mmであり高さは6300mmである。また溶鋼の排出速度 v が次式にしたがうと仮定する。

$$v = \alpha \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (5)$$

ここに α : 定数

g : 重力の加速度

h : 排出点からの溶鋼の高さ

今排出すべき内部の溶鋼の容積を w とすると(5)式は次のごとく書換えられる。

$$-(dw/dt_0) = \alpha \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (6)$$

ここに t_0 : 排出時間

また h と w との関係は

$$1/3 \cdot (d/2)^2 \pi h = w \dots\dots\dots (7)$$

ここに d : 鑄片の径

である。また h と d との関係はこの円錐では

$$d = 115/6300 \cdot h \dots\dots\dots (8)$$

であるから(8)式を(7)式に代入して

$$(115/6300)^2 \cdot \pi / 12 \cdot h^3 = w \dots\dots\dots (9)$$

を得る。ゆえに(9)式から

$$3/12 \cdot \pi (115/6300)^2 \cdot h^2 \cdot dh = dw \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が得られる。したがつて(10)式を(6)式に代入して

$$dh/dt_0 \cdot C_1 h^2 = \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (11)$$

ここに C_1 : 定数

(11)式を書換えて

$$h^{3/2} \cdot dh = C_2 \cdot dt_0 \dots\dots\dots (12)$$

ここに C_2 : 定数

を得る。したがつて(12)式を積分して

$$h^{5/2} = C_3 t_0 + C_4 \dots\dots\dots (13)$$

ここに C_3 および C_4 : 定数

(13)式において

$$t_0 = 0 \quad \text{のとき} \quad h = 6300(\text{mm})$$

$$t_0 = 0.25(\text{mn}) \quad \text{のとき} \quad h = 0$$

であるから

$$t_0 = -1/12 \cdot 60 \times 10^{10} \cdot h^{5/2} + 0.25 \dots\dots\dots (14)$$

を得る。

(14)式によつて得られた排出時間は Table 2 の第5

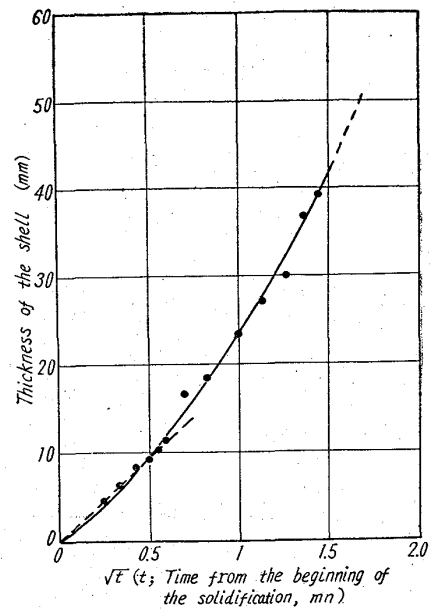


Fig. 2. Relation between the time from the beginning of the solidification and the thickness of the shell.

項に示す通りであつて、排出時間を補正した後の凝固開始からの経過時間は Table 2 の第6項のごとくなる。

Table 2 の凝固開始からの経過時間と凝固厚さとの関係を図示すると Fig. 2 のごとくである。

3. 鑄型内における鑄片の凝固速度式

Fig. 2 から鑄型内のみについて見ると、鑄片の凝固は次式で表わされることが明らかである。

$$d = 19.3\sqrt{t} \dots\dots\dots (15)$$

ここに d : 鑄片の凝固厚さ (mm)

t : 凝固開始からの経過時間 (mn)

である。

IV. 鑄型内における鑄片の表面温度の測定

1. 実験方法

Si-Mn ばね鋼 (0.62% C, 1.67% Si, 0.85% Mn) を 200mm φ 鑄型に鑄込んだ。その際のおもな鑄込条件は Table 3 に示す通りである。

測定要領は Fig. 3 に示す通りである。すなわちこの鑄込の終了時に Fe-W 熱電対 (A) を鑄片外層部に挿入して凝固層に固着せしめ、そのまま引抜を継続せしめ

Table 3. Casting conditions of the billet in the experiment of measuring the surface temperature of the billet in the mold.

Casting temperature (°C)	Casting speed (mm/mn)	Primary cooling (kcal/kg of steel)
1490	870	38.2

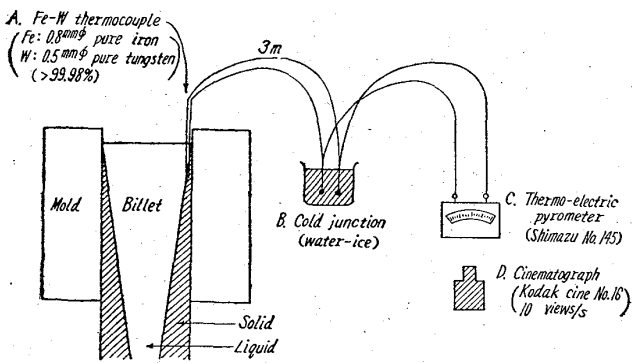
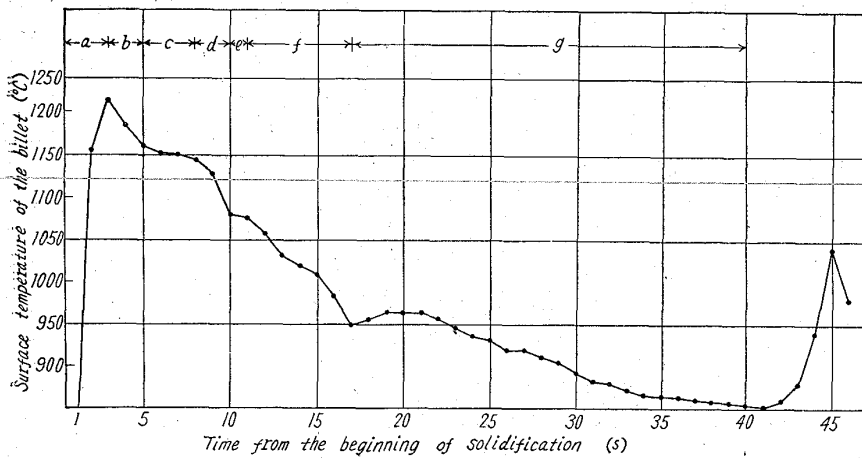


Fig. 3. Apparatus for measuring the surface temperature of the billet.



- a. Delay of indication
- b. d. f. The billet keeps contact with the mold
- c. e. The billet loses contact with the mold temporarily
- g. The billet loses contact with the mold entirely

Fig. 4. Temperature change of the surface of the billet.

た。温度計(C)に表われた温度変化は撮影機(D)によつて撮影記録し、後でこのフィルムから読み取つた。熱電対の挿入位置は鑄片の辺の中央、湯面からの深さ30mm、表面からの深さ 0.5mm である。

2. 実験結果

その結果、鑄型内における鑄片表面の温度変化はFig. 4のごとくであつた。ここで鑄型内における鑄片の長さは約 585mm であるから、凝固開始後約 40 s までが鑄型内における鑄片表面温度の変化であり、それ以後は二次冷却帯における温度である。

V. 鑄片と鑄型との間の空隙の発生時期と空隙の大きさ

1. 空隙の発生時期

Fig. 4 から明らかなように鑄片表面の鑄型内における温度は時間の経過とともに降下し、鑄型を出て二次冷却帯に入ると上昇、降下を繰返しつつ降下を続ける。

さて Fig. 4 において凝固開始後 17 s までの温度変

化とこれ以後の温度変化とを比較すると、明らかに単位時間当りの降下量が異なる。すなわち 17 s までは3~5 s (b) の急激な降下、5~8 s (c) の比較的緩やかな降下、8~10 s (d) の急激な降下、10~11 s (e) の比較的緩やかな降下 11~17 s (f) の急激な降下という過程を辿り、平均 18.8°C/s の速度で温度が降下する。ところが 17 s 以後(g)は一旦わずかではあるが上昇し、その後一様に緩やかな降下を示す。この間の温度の降下速度は平均 5.8°C/s である。この2段の鑄片表面温度の降下から第1段の凝固開始後 17 s までが鑄片と鑄型との接触時期であり、第2段の 17~40 s までが鑄片と鑄型とが接

触を失つた時期であることが明らかである。勿論凝固開始後 17 s までといえども鑄片は鑄型との接触を一時的に失つたり (5~8 s (c), 10~11 s (e) などの時期) 接触を保つたり (3~5 s (b), 8~10 s (d), 11~17 s (f) などの時期) しつつ降下を続け、17 s にいたつて始めて永久に鑄型との接触を失い空隙が発生するものとする。この空隙の発生位置は湯面から 24.65cm 下部である。

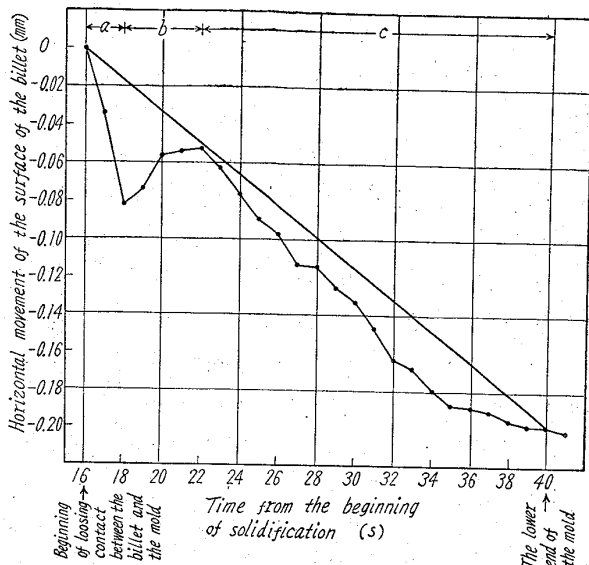
2. 空隙の大きさ

次に鑄片と鑄型との間に発生した空隙の大きさについてはまず前期の(1)~(4)式によつて、鑄片外層の凝固層の収縮による内方への移度速

度と、クリープによる外方への移度速度とを求めた。この場合計算を簡単にするために鑄片の断面はかりに半径 100mm の円形とした。計算に當つて凝固層の平均温度は、表面の温度と凝固層内側の温度すなわち Si-Mn ばね鋼の熔融温度 1442°C との平均値をとつた。ここで鑄片の表面温度には前述の 200mm φ 鑄片の場合の実測値を用いた。200mm φ と 200mm φ とでは断面は法に大差なく、従つて鑄込の諸条件はほとんど変わらないから鑄型内における鑄片の表面温度の変化についても両者の間にほとんど差がないと考えられるからである。

この温度における鋼の線膨脹係数は 2×10^{-5} とした。溶鋼の密度は $7 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ とした。また凝固層の厚さは、前述の(15)式 $d = 19.3\sqrt{t}$ を用いた。(15)式は 115mm φ の鑄片の鑄型内における凝固速度式であるが、鑄片の凝固速度は、特に凝固の初期においては、鑄片寸法による変化はほとんどないと考え、そのまま 200mm φ の場合の計算に採用した。

計算は鑄片と鑄型との間に空隙が発生したと考えられ



- Rapid contraction of the shell of the billet during the first period of losing contact between the billet and the mold.
- Creep out ward by the temporary temperature rise of the surface of the billet.
- Contraction of the shell of the billet caused by the temperature drop.

Fig. 5. Air gap between the billet and the mold.

る。凝固開始後 17 s の点の 1 s 前を起点として行なつた。この結果から図式に積分を行なつた結果、鑄片表面の移動は Fig. 5 に示すごとくである。

Fig. 5 から明らかなように鑄片と鑄型との接触は鑄片の凝固開始後 17 s 前後から失われ、鑄型下端すなわち鑄片の凝固開始後 40 s においては、鑄片の内方への移動距離は 0.2 mm に達する。いい換えれば 0.57/1000 の上括りのテーパを生ずることになる。また鑄型自身は前報⁷⁾の一次冷却に関与する諸因子の影響に関する研究で明らかにしたように、新鑄型で 2.01/1000、1 回削正後の鑄型で 0.52/1000 の下括りのテーパを生ずる。ゆえにこの鑄片表面の内方への移動と鑄型内面の外方への移動との和として、鑄片と鑄型との間には
新鑄型で $(0.57 \times 2 + 2.01)/1000 = 3.15/1000$
一回削正後の鑄型で $(0.57 \times 2 + 0.52)/1000 = 1.66/1000$
の下括りテーパ（両側面合計）に相当する空隙を生ずることになる。

VI. 結 言

鋼の連続鑄造の鑄型下部において鑄片と鑄型との間に

生ずる空隙に関して研究を行ない、その発生時期と大きさを明らかにした。

鑄型下部において発生する鑄片と鑄型との間の空隙は鑄型自身の下括りの変形と鑄片外層部のクリープに打勝つ収縮による上括りの変形との和として現われる。この空隙の発生時期は 200 mm φ の鑄片において、湯面から約 25 cm 下部であり、その大きさは新鑄型の場合は 3.15/1000 のテーパに相当し、1 回削正後の鑄型の場合は 1.66/1000 のテーパに相当する。このテーパはいずれも両側面合計の値である。

すなわち鋼の連続鑄造の一次冷却において、最も重要な役割を果たす鑄型下部の鑄片と鑄型との間の空隙を定量的に明らかにした。この結果は後報に述べるごとくさらに合理的な一次冷却法の研究に際して重要な数値を考えるものである。

終りに本研究に御懇切な御指導を賜つた東京大学教授工学博士椋山正孝先生に深甚の感謝を捧げます。

また本研究を指示され結果の発表を御許可下さいました小出秋彦常務取締役ならびに工学博士里井孝三郎常務取締役に深甚なる敬意を表します。また研究の遂行に当り絶えず御鞭達戴いた吉井重雄現小倉製鉄所長に深謝の意を表するとともに直接御指導戴いた理学博士大中都四郎企画部長に深く感謝する次第であります。

(昭和36年12月寄稿)

文 献

- 1) 牛島清人: 鉄と鋼, 47 (1961) No. 3, p. 390
- 2) B. N. KATOMIN & V. S. RUTES: Nauk. OTN, (1957) Jan. p. 123
- 3) R. SEWELL: Iron & Coal Trades Rev., (1957) Feb. 15, p. 391
- 4) M. S. BOJTJENKO, V. S. RUTES & H. A. NIKOLAJEFF: STAL, 16 (1956) No. 6, p. 505
- 5) I. M. D. HALLIDAY: Iron & Steel, 31 (1958) No. 9, p. 417
- 6) N. P. L. REPORT: The Iron & Steel Institute (U.K.), Alloy Steels Research Committee (1946) No. 23, p. 15
- 7) P. FELTHAM: Nature, 165 (1950) No. 4195, p. 489
- 8) R. W. RUDDLE: The Solidification of Castings, (1950)