

技術報告

UDC 621.746.628 : 681.3.03

連続鋳造時の鋳片の温度変化のシミュレータによる解*

千々岩 健 児**・伊 藤 光 男**

Solution by Simulator of the Temperature Changes of Slab in Continuous Casting

Kenji CHIJIWA and Mitsuo ITO

Synopsis:

Using an electric simulator for the solidification of slab, the change and distribution of slab temperature concerning both conventional mould and continuous casting were obtained. Experimental results made clear the effect of the time of air-gap occurrence and the effect of the coefficient of heat transfer of the boundary between slab and mould.

In the case of continuous casting, the temperature change during solidification process was clarified; the temperature of slab surface dropped rapidly in a mould after pouring, then rose owing to air-gap occurrence, followed by dropping again as secondary cooling, subsequently the temperature rose due to air-cooling in the following step.

Accordingly, using such a simulator, the change and distribution of slab temperature can be obtained easily under different casting conditions.

(Received Nov. 20, 1973)

1. ま え が き

連続鋳造時の鋳片の凝固厚さ、温度変化を知ることは、作業管理上はなほ重要なことである。一見連続鋳造においては鋳片の引抜き方向への温度変化は単純のように思われるが、実際には複雑な変化をしていると考えられる。すなわち、鋳片の各点は鋳造時に鋳型に接触し、離れ、ついで水冷され、空冷されている。したがって冷却状態も各位置で異なり、ある位置では急激な温度降下を示し、ある位置では緩やかな状態となり、またある位置では逆に温度が上昇する現象が考えられる。このような現象を知るには鋳片各部の温度を連続的に測定する必要があるが、実際には測定が困難である。

そこで本研究においては、鋳片、鋳型などを電気素子におきかえた電気シミュレータを試作し、この装置を用いてこれらの現象を把握することにした。本シミュレータは凝固時の潜熱を考慮し、また冷却条件の変化を与えるアナログのシミュレータとした。その結果鋳造時の

鋳片の温度変化状況を明白に求めることができた。本来ならば実測値とシミュレータ値とを対応させるべきであるが、この場合の実測は困難であるので今回はシミュレータ解のみにとどめた。

1. 電氣的凝固シミュレータ

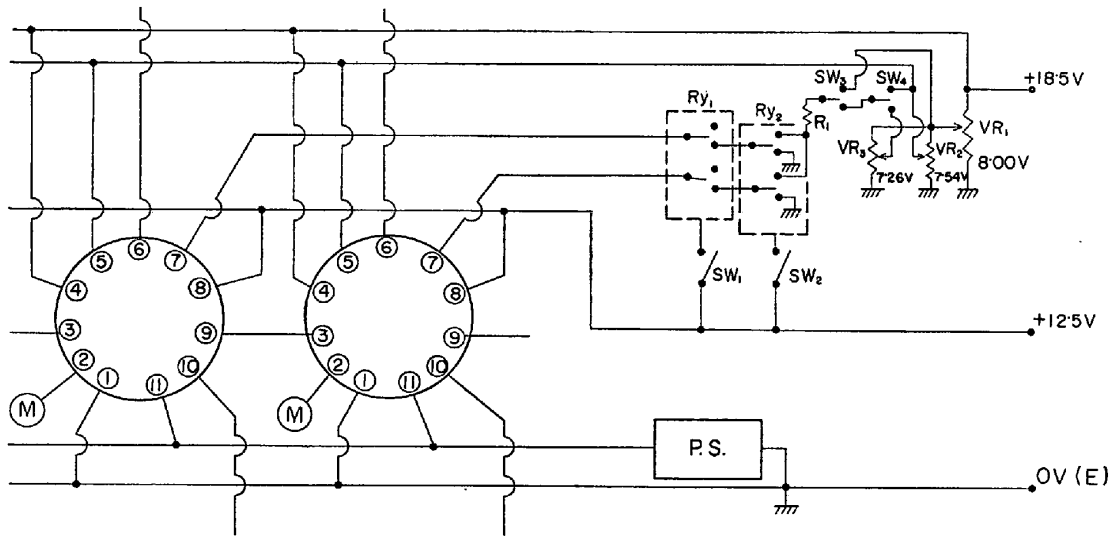
2.1 装置の概要

本測定には著者らが試作した電氣的凝固シミュレータを使用した。Fig. 1はその回路図を示す。鋳片、鋳型などの単位体積に相当する素子をソケットに挿入して電気回路を形成させる構造になっている。ソケットは板上に碁盤目状に配置しており、鋳片の横断面形状、冷却条件にあわせて対応した素子を配列することができる。素子を配列した後、鋳込み温度に相当する電圧で鋳片素子を充電し、これを鋳型素子を通じて放電させ、そのときの電圧降下状態を測定する。この電圧はあらかじめ温度に対応させてあり、電圧を測定することによりただちに温度を知ることができる。

なお鋳片の有する凝固潜熱については潜熱相当の電圧をその回路の補助コンデンサに与えるようにしてあり、鋳片が凝固開始点になるとこの回路が働いて潜熱を放出

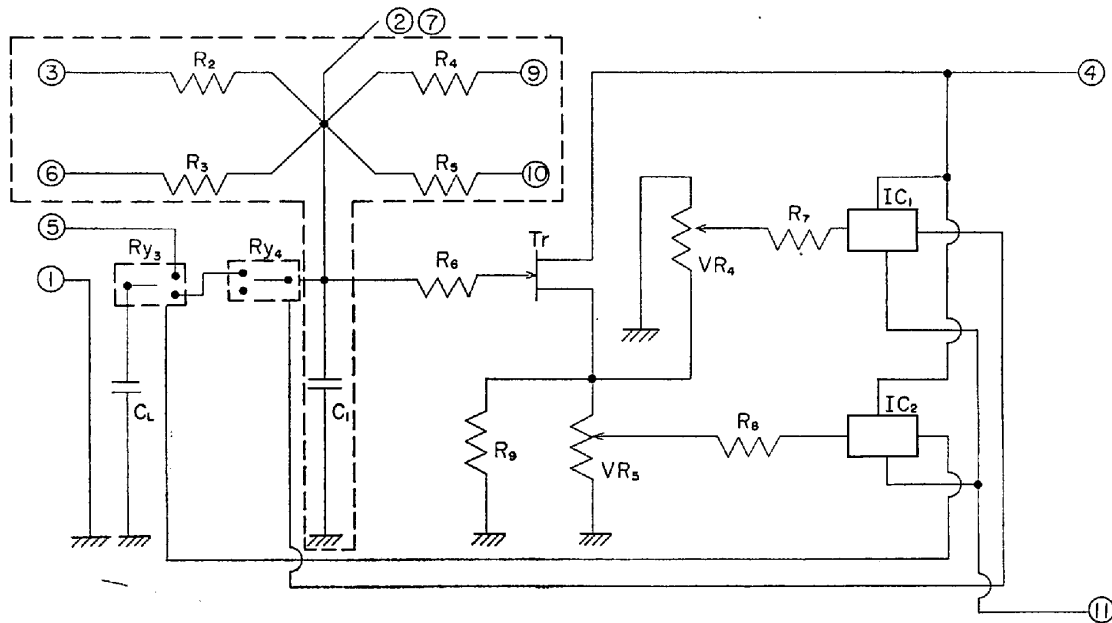
* 昭和46年10月本会講演大会にて発表
昭和48年11月20日受付

** 東京大学工学部 工博



VR₁, VR₂, VR₃: Potentiometers, R₁: 500Ω, SW₁, SW₂: Switches for relays, P.S: Constant-voltage power source, Ry₁, Ry₂: Relays, SW₃, SW₄: Charge and calibration switch, M: Measuring terminal

Fig. 1. Circuit diagram of the electrical simulator used in this research.



R₂~R₅: 245KΩ, R₆: 10MΩ, R₇, R₈: 10KΩ, R₉: 43KΩ, VR₄, VR₅: 1MΩ, C₁: 15μF, C_L: 150μF, Ry₃, Ry₄: Relays, IC₁, IC₂: I.C, Tr: 2SK12

Fig. 2. Circuit diagram of the elements equivalent to slab and mould. The part enclosed by the dotted line shows sensible heat circuit.

し、凝固終了点になると回路が切れる構造になっている。また鑄片と鑄型素子との間には境界素子を入れ、初めは両者間を切りはなしてある。さらにエアギャップが任意の時刻に発生した場合の影響を知るためタイマー付きのエアギャップ素子を入れる構造にしてある。

2.2 素子

Fig. 2 は鑄片、鑄型の単位体積に相当する素子である。鑄片、鑄型の熱容量を相当のコンデンサに、熱抵抗

(熱伝導率の逆数) を相当の電気抵抗におきかえてある。鑄片の素子は、けん熱に相当する回路と潜熱に相当する回路とからなり、Fig. 2 の点線部分はけん熱回路を示す。これら各素子の抵抗およびコンデンサは熱系と電気系の相似関係より、鑄片、鑄型などの物性値を変換して求めた[注1]。

ここで用いた物性値を Table 1 に、図中に用いた記号を Table 2 に示す。

Table 1. Physical properties.

Material	Specific heat Cal/g°C	Specific gravity g/cm ³	Heat conductivity Cal/cm·sec·°C	Latent heat of solidification Cal/g	Solidification temp. °C
Slab	0.12	7.8	0.111	51	1480±28
Mould (Copper)	0.092	8.96	0.94		

Table 2. Symbols.

R ₁	: Protective resistor for charging
R ₂ -R ₅	: Resistors equivalent to the reciprocal of heat conductivity
R ₆ -R ₈	: Matching resistors of the circuit
R ₉	: Bias resistor of transistor
VR ₄ , VR ₅	: Variable resistors for setting the operating point of integrated-circuit
C ₁	: Condenser equivalent to the heat capacity of a slab
C _L	: Condenser equivalent to the latent heat of a slab
IC	: Integrated-circuit
Tr	: transistor

2.3 回路

Fig. 1 に示したとおり、本シミュレータはソケットに素子を挿し込み回路を形成する構造になっている。

ソケットは ①～⑩ ピンからなり、それぞれ次の目的に使用される。

- ① アースライン (E) 電圧 0V
- ② 測定点
- ③⑥⑨⑩ それぞれ $-x, y, x, -y$ 方向に手を伸ばして各素子を連結する。
- ④ 電源ライン: シュミットトリガおよびオン、オフリレー駆動用 18.5V
- ⑤ 潜熱ライン: 潜熱用コンデンサを充電する。7.54V
- ⑦ 初期値ライン: 鋳片素子にのみ接続される。初期電圧 8.00V を与える。
- ⑧ 境界ライン: 境界を動作させるライン。測定開始とともに 12.5V を供給する。タイマーの始動にも使用する。
- ⑩ E' ライン: シュミットトリガの設定電圧が低いのでアースラインから 6.45V を上げて必要な設定電圧を供給している。

2.4 測定

鋳片の凝固、冷却状況測定に当たっては次の手順でシミュレータを作動した。

- (1) ソケットに各素子を鋳片、鋳型などの形状にあわせて配列する。
- (2) ソケット ② にハイインピーダンス入力増幅器 (入力抵抗 10¹¹Ω) を接続し、その電圧を X-Y プロッタ

ーに記録できるようにする。

(3) ポテンショメータを用いて凝固開始 7.54V、凝固終了 7.26V、鋳込み温度 8.00V (1600°C を 8.00V に変換) に設定した後、鋳片の素子を充電する。

(4) 給電を断ち切り、③⑥⑨⑩ 番ピンを通して放電させる。この際の電圧をソケット②に接続した入力増幅器を通し X-Y プロッターに記録させる。

(5) 測定時にエアギャップを発生させる場合はタイマー付の素子により抵抗を任意の時間で切りかえる。この操作は自動的に行なわせる。

(6) 記録は電圧 (温度に相当する) — 時間曲線でありこの曲線から冷却状況を知る。

3. 普通鋳型鋳造の場合の冷却曲線

長方形断面の鋳片の温度変化を取扱った。鋳片の鋳込み温度は 1600°C 一定とし、鋳型との熱伝達率の異なる場合の冷却状況の違い、エアギャップの発生時刻による冷却状況の変化などを求めた。

3.1 鋳片と鋳型との熱伝達率の影響

厚さ 10 cm で、熱の移動方向が厚さ方向のみの場合を考えた。最初全体が 1600°C で鋳込まれ、型内に固定して冷却する際の中心から 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 cm の各点の温度を測定した。Fig. 3 はその一例である。

Fig. 4 は鋳片と鋳型間の熱伝達率を 3900 および 390 kcal/m²h°C とした場合の温度分布を示す。これによれば熱伝達率が大きいと外周部の冷却が著しく大きくなることがわかる。

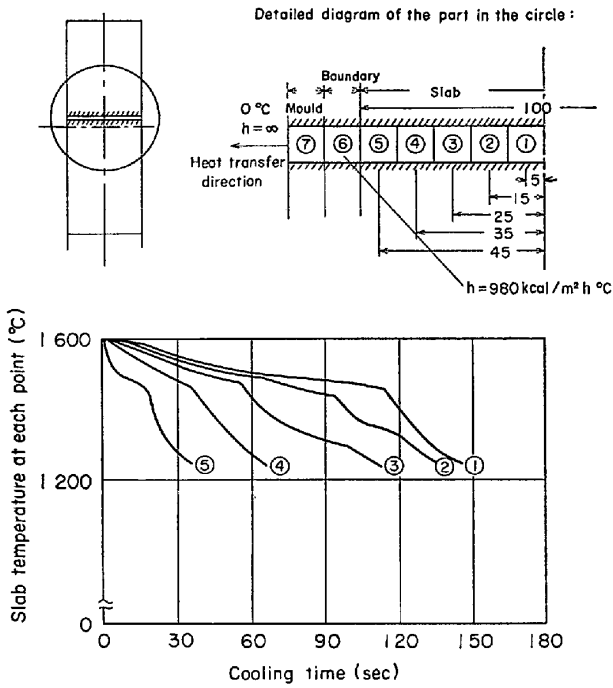


Fig. 3. Cooling curves of each point on the cross section of a slab of 10cm in thickness. (We assume that heat transfers in the only direction of thickness and doesn't in the wide and the longitudinal direction.)

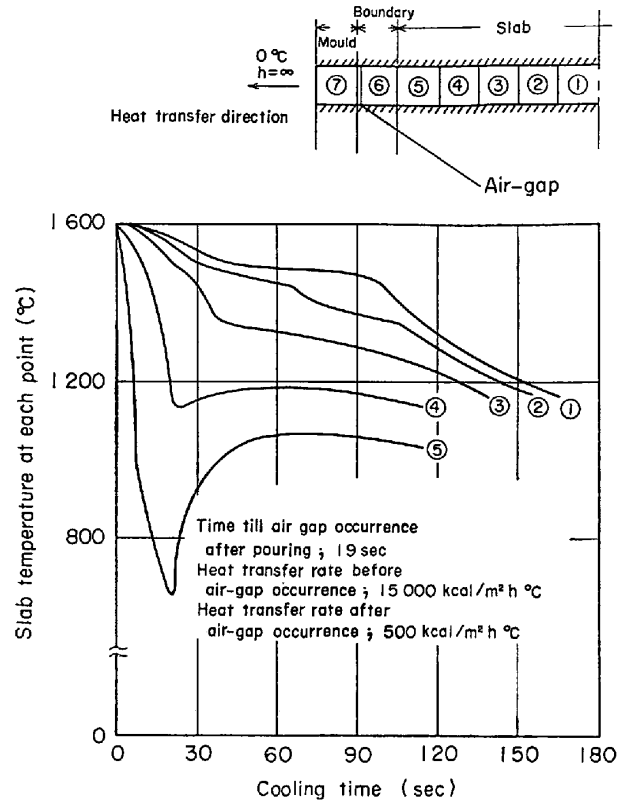


Fig. 5. Cooling curves of each point on the cross section of a slab, due to air-gap occurrence during cooling.

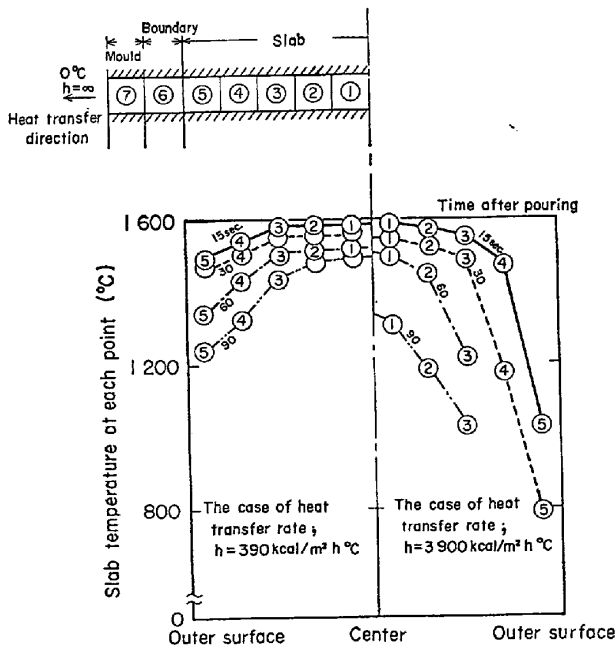


Fig. 4. Difference of temperature distribution on the cross section of a slab, caused by different heat transfer rate.

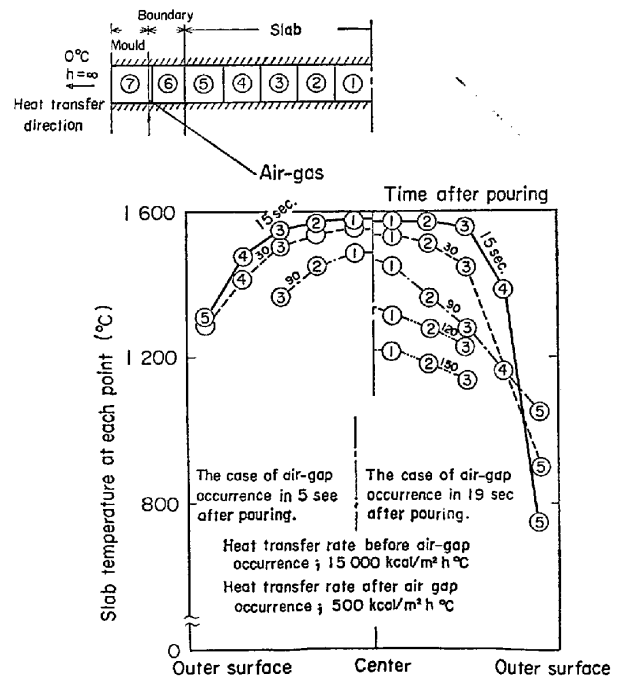


Fig. 6. Temperature distribution caused by air-gap occurrence in 5 and 19 sec after pouring.

3.2 エアギャップ発生による冷却状態の変化

前と同じ板状鋳片において冷却途中壁面との間にエアギャップが発生した場合について求めた。熱伝達率は発

生前 15 000 kcal/m²h °C, 発生後 500 kcal/m²h °C とした。またエアギャップ発生時刻は鋳込み後 5, 9.5, 15, 19 sec

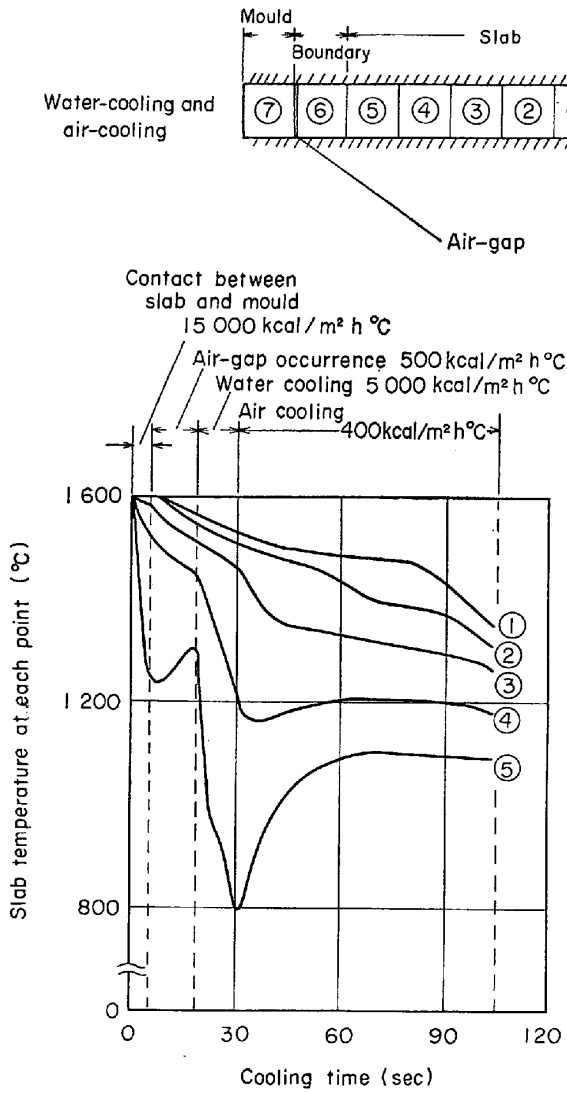


Fig. 7. Temperature change of a slab in the continuous casting, caused by the case when air-gap occurs in 5 sec after pouring and continues for 13 sec and then the slab is air-cooled after water-cooling for 12 sec.

とした。

Fig. 5 は 19 sec 後にエアギャップを発生させた場合の例である。エアギャップの発生がなければ Fig. 3 に示したように各部の温度は単純に降下していくが、エアギャップの発生により、外周温度は逆に上昇することを示している。その結果鋳片内の温度分布は Fig. 6 に示すようにエアギャップが遅く発生した場合（図では注湯後 19 sec で発生）よりも早く発生した場合（図では注湯後 5 sec で発生）の方が鋳片の中心と表面との温度差が少なく、温度が均一化されていることがわかる。

4. 連続鋳造の場合の冷却曲線

エアギャップ、水冷、空冷を考慮して冷却曲線を求め

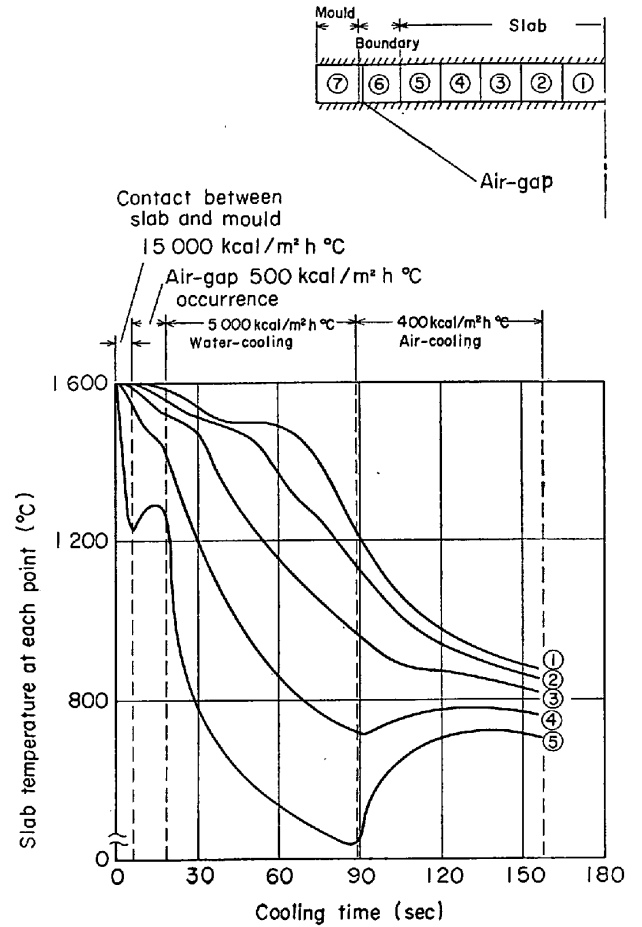


Fig. 8. Temperature change of a slab in the continuous casting, caused by the case when air-gap occurs in 5 sec after pouring and continues for 13 sec and then the slab is air-cooled after water-cooling for 70 sec.

た。

4.1 長方形断面鋳片の場合

鋳片の断面形状寸法が前述の普通鋳型の場合と同じものについて求めた。

Fig. 7 は鋳片が鋳型に一定時間接触し、(熱伝達率、 $15\,000\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)、ついでエアギャップが発生し(熱伝達率、 $500\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)、型から引抜かれて水冷(熱伝達率、 $5\,000\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)され、さらに下方で空冷(熱伝達率、 $400\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)される場合の鋳片の温度変化を求めた例である。エアギャップ発生の時刻、水冷の時間などによつてこの曲線の形は多少変わる。Fig. 7 はエアギャップが鋳造後 5 sec でおこり、13 sec 続き、その後水冷時間が 12 sec の場合を示し、Fig. 8 は同条件で水冷時間が 70 sec の場合を示してある。鋳片表面は冷却途上冷却だけでなく逆に上昇することがわかる。

4.2 円形断面鋳片の温度分布

円形断面の鋳片の素子としては円を円周方向に 20 等

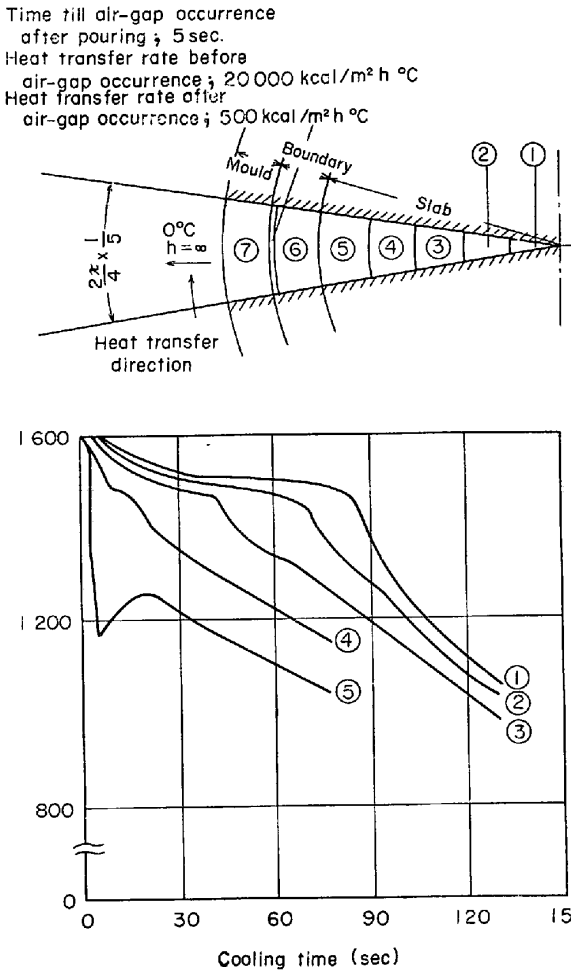


Fig. 9. Cooling curves of each point on the cross section of a columnar casting, due to air-gap occurrence in 5 sec after pouring.

分し、さらに半径方向に 5 等分した各ブロックをとつた。各素子の熱容量、熱抵抗についてはおのおのなり合う分割の midpoint の間について計算し、コンデンサ・抵抗の値を定めた[注 2]。

Fig. 9 はエアギャップが 5 sec 後に発生した場合の冷却曲線である。長方形断面の場合と同様に表面温度が冷却途中で上昇する現象を示している。

5. ま と め

本報告においては、電気的凝固シミュレータを用いて鑄片の温度変化、分布などを求めた。とくに境界条件の影響（熱伝達率、エアギャップ発生時刻、時間など）を求めた。

実際の場合の正確な熱伝達率、エアギャップ発生条件などを知り、これをシミュレートすればさらに実際に近い値を得ることができるものと思われたが、本研究では推定によつた。しかしこのようなシミュレートにより鑄片表面および各部の温度変化、凝固曲線などを知りうるので、連続鑄造の理論的な解析に参考になるものと考え、ここに報告する次第である。

註 1 鑄物協会誌, 42 (1970), pp. 523~534(千々岩, 伊藤, 加藤: 鑄物の電気的な凝固シミュレータの研究) 参照のこと。

註 2 甲藤好郎著 伝熱概論 (養賢堂) 18 章熱伝導問題の数値, アナログ解法参照のこと。

文 献

- 1) 千々岩健児, ほか 2 名: 鑄物, 42 (1970), p. 523
- 2) V. PASCHKISS: Trans. ASME, 64 (1942), p. 105
- 3) D. I. LAWSON: Inst. Mech. Eng. [A], 167 (1953), p. 275
- 4) J. C. WILLIAMS: Brit. J. Appl. Phys., 3 (1952), p. 197
- 5) J. G. HENZEL: J. Metals, 17 (1965), p. 561
- 6) J. G. HENZEL: Trans. Amer. Found. Soc., 74 (1966), p. 661
- 7) 吉田秋登: 鉄と鋼, 11 (1964), p. 1699