

討8 キルド鋼凝固時の熱対流について

富士製鉄 中央研究所 ○満尾利晴 堀籠健男 北村征義 河野六郎
 〃 広畑製鉄所 宮川一男 野村悦夫

1. 緒 言； 一般にキルド鋼は凝固進行時、凝固層前面に bulk との比重差にもとづく下降流が発生するといわれている。そして、この下降流の大きさ及び継続時間は、キルド鋼の成分偏析、非金属介在物の生成及び分布、さらに凝固組織の形成等を論ずる場合においてきわめて重要である。

本研究はラジオアイソトープを用い、キルド鋼凝固時の熱対流現象について究明すると共に、想定される一つの凝固モデルにもとづいて流体力学的解析を試みた。

2. 実験方法； 6トン電気炉で溶製した Al-Si キルド鋼 (C0.15, Si0.30, Mn1.30, solAl0.02) を6トン扁平鋳型に低温及び高温で上注ぎ注入した。注入終了後約70分まで所定時間間隔をおいて、5～7回にわたり R.I. ^{59}Fe 約30mCi を添加した。 ^{59}Fe の添加は、放射化した銑鉄粒 (直径0.6～1.0mm) 30gr を薄鋼板のカプセルに入れ、残溶鋼量に応じてカプセル1～3ケを、押湯下20cmの位置に浸漬して添加した。尚、銑鉄粒はカプセルと共に添加に先だち約800℃に予熱した。表1に造塊条件を、表2に R.I. の添加時間を示す。

表1. 造塊条件

Heat No.	実験条件	出鋼温度	注入流温度	注入速度	定盤・鋳型温度
19	低温注入	1578℃	1511℃	554mm/min	室温
20	低温注入	1583	1511	515	室温
21	高温注入	1652	1560	555	110℃

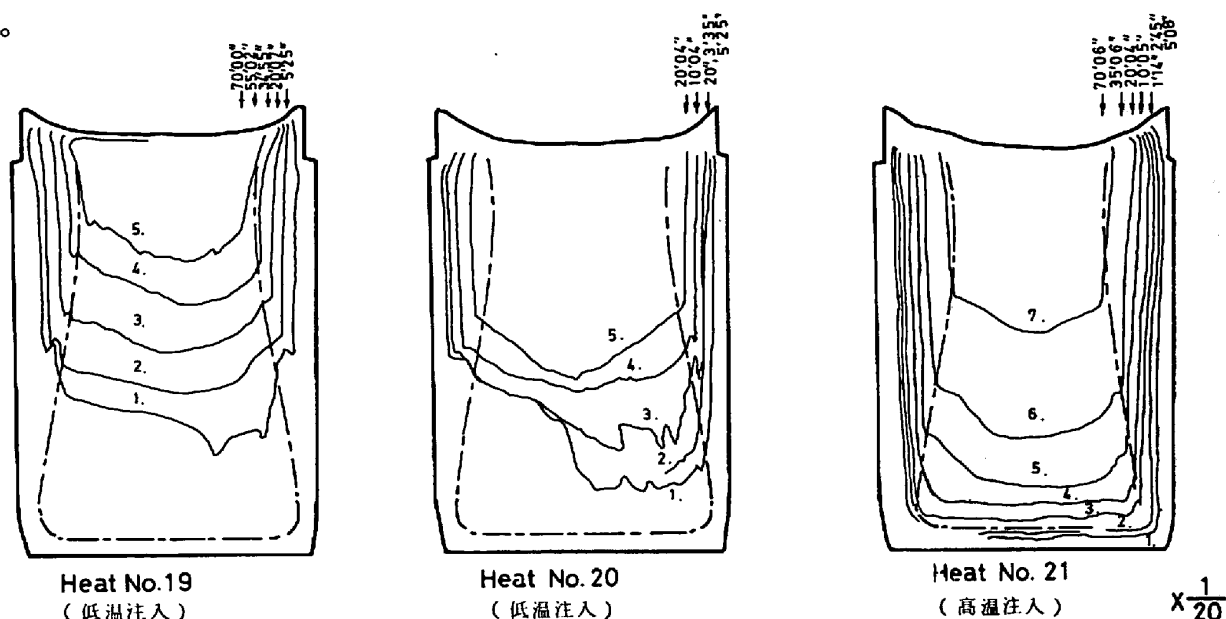
鋼塊は中心軸を含んで長辺方向及び短辺方向に縦断し、各縦断面について、X線フィルムによるオートラジオグラフを撮った。

3. 対流速度測定結果

鋼塊長辺面のオートラジオグラフのスケッチを図1に示す。これからわかるように、鋼塊側面のオートラジオグラフによる凝固線は、下部に移るにつれて凝固厚が大きくなっている。

表2. R.I. 添加時間

Heat No.	実験条件	添加番号 (注入終より添加開始までの時間)						
		1	2	3	4	5	6	7
19	低温注入	5'25"	2'07"	3'45"	5'50"	7'00"	—	—
20	低温注入	2'0"	3'35"	5'25"	1'04"	2'04"	—	—
21	高温注入	1'14"	2'45"	5'08"	1'05"	2'04"	3'50"	7'06"



——— 柱状肥大晶と自由晶との境界
 図1. オートラジオグラフのスケッチ

100mm間隔で押湯下所定深さのこの厚さを測定し次式により凝固層前面の溶鋼の対流速度 V を計算した。 $V=\Delta H/(\Delta t-t_c)$

ΔH : 測定点の深さの差, Δt : 凝固に要した時間の差, t_c : 注入時の湯上り時間

尚, 凝固に要した時間は, 長辺面右側・押湯下200mmの位置でのR.I.の分布より求めた凝固式 $D=k\sqrt{t}-5$ D : 凝固厚さmm, t : 時間min, k : 高温注入の場合25, 低温注入の場合26を用い, 計算した。Heat No.19, 21鋼塊の長辺面右側の凝固線より計算した対流速度を図2に示す。ここで1.1m/min以上の値を示すものについては1.1m/minの値にプロットした。こ

れからもわかるように, 高温・低温注入とも, 時間の経過とともに対流速度は小さくなる。しかし, 深さが深くなると, 注入終了後30分でも, なお, かなり早い速度を示している。すなわち, 対流速度は深さに対して一定でなく, 深くなるほど大きくなることが特徴的である。この対流速度については, Wojcikらは30cm~6m/minと推定し, 森らは10~1000m/min, 又Romanovらは1560m/minと実測している。筆者らの測定結果で, 場合によつては溶鋼が下降するのに要した時間がマイナスになるものや, 速度が著しく大きくなるものがあつたが, 本実験の測定精度や, リムド鋼の凝固時の流動速度が5m以上といわれている点等を考慮すると, 次のように結論することが出来る。すなわち, キルド鋼凝固時の熱対流速度は, 深さ及び時間の経過と共に変化し, その値は1分当り数cm~数mを示す。

4. 対流速度の流体力学的解析; Coleらは, 純金属が凝固する際の熱対流速度について理論解析を行つている。筆者らは, 低温注入の凝固過程を测温し次の結果をえた。すなわち, 低温注入の場合注入直後より鋼塊の上, 下各位置とも温度差は殆んどなく, 液相線温度1520°Cをほぼ示す。この結果を用い, 温度降下は凝固層前面のみで起るなど若干の仮定をおき, 固液共存の凝固区間を有する合金が凝固層前面に結晶片を晶出しながら凝固する際の熱対流速度について計算した。この凝固モデルを図3に示す。なお, 計算に際し, 次の仮定をもうけた。 a) 凝固界面は半無限平面とする。 b) 図4に示すように, 温度勾配は境界層のみに存在し, バルクでは均一な温度とする。 c) 図4に示すように境界層における固相率と温度との間には平衡関係が成立し, 温度降下に応じて結晶片の晶出が起る。 d) 温度境界層の厚さと流体力学的境界層の厚さは等しい。 e) 温度分布, 速度分布, ならびに固相率分布はそれぞれ次式で与えられる。

i) 温度分布 $T=T_\delta-\Delta T(1-\frac{x^*}{\delta})^2 \quad 0 \leq x^* \leq \delta$

ii) 速度分布 $V_z=\frac{27}{4} \cdot \frac{V_m x^*}{\delta} (1-\frac{x^*}{\delta})^2 \quad 0 \leq x^* \leq \delta$

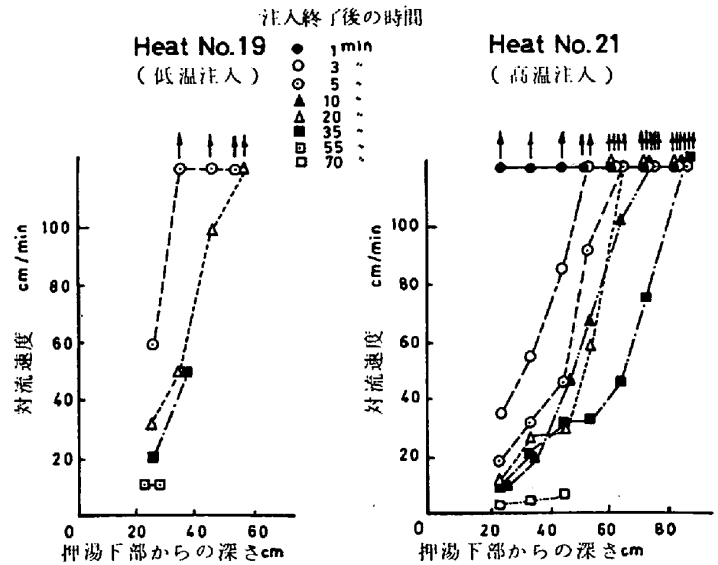


図2 凝固層前面の溶鋼の対流速度(実測値)

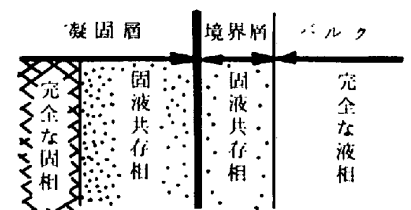


図3 凝固モデル(模式図)

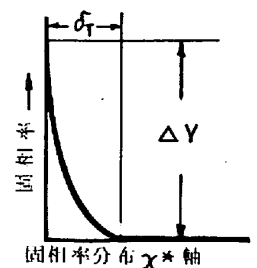
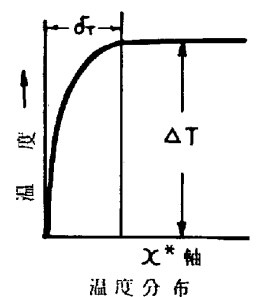


図4 凝固層前面の温度及び固相率の分布

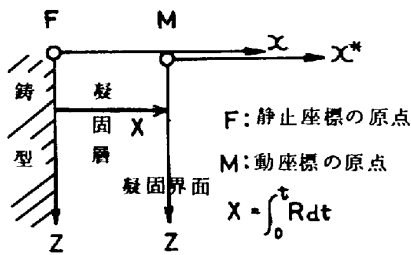


図 5. 座標系の相互関係

$$\text{iii) 固相率分布 } Y = \Delta Y \left(1 - \frac{x^*}{\delta}\right)^2 \quad 0 \leq x^* \leq \delta$$

ここで解析に用いた座標系を図 5 に示す。Z 軸は深さを、 x 軸は鋳型と鋼塊の境界面からの水平距離を、そして x^* 軸は移動する凝固界面からの水平距離を示す。これら二つの座標系の間には次の関係が成立する。 $x = X + x^*$ ここで $X = \int_0^t R dt$

なお、計算に用いた記号を一括して表 3 に示した。

表 3. 記 号

V_z 境界層内の Z 方向速度成分	ρ 密度
V_m 境界層内の Z 方向最大速度	C_p 比 熱
V_{mean} 境界層内の Z 方向平均速度	L 凝固潜熱
V_x x 方向速度成分	R 凝固速度
Y 単位重量当りの晶出片の重量 (固相率)	K 熱伝導度
ΔY バルクと凝固界面との固相率の差	g 重力加速度
$\dot{m}$ 単位体積、単位時間当り晶出する晶出片の重量	α 溶鉄の熱膨張係数
T 温 度	β 相変化にもとづく膨張係数
ΔT バルクと凝固界面との温度差	μ 粘性係数
T_0 バルクの温度	ν 動粘性係数
t 時 間	D 熱拡散率
δ 境界層の厚さ	G_L^0 凝固界面における温度勾配
H 鋼塊本体頭部よりの深さ	G_s^0 凝固界面における固相率勾配

質 量 の 保 存

$$\text{晶出片について} \quad \frac{\partial (\rho Y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V_x \rho Y) + \frac{\partial}{\partial Z} (V_z \rho Y) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\text{液体について} \quad \frac{\partial \rho (1-Y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} V_x \rho (1-Y) + \frac{\partial}{\partial Z} V_z \rho (1-Y) = -\dot{m} \quad (2)$$

$$\text{全体ではこれらを加えて} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} V_x \rho + \frac{\partial}{\partial Z} V_z \rho = 0 \quad (3)$$

動座標系では現象が定常であるとする、(1)、(3) 式は、

$$-R \frac{\partial}{\partial x^*} (\rho Y) + \frac{\partial}{\partial x^*} (V_x \rho Y) + \frac{\partial}{\partial Z} (V_z \rho Y) = \dot{m} \quad (1')$$

$$-R \frac{\partial}{\partial x^*} (\rho) + \frac{\partial}{\partial x^*} (V_x \rho) + \frac{\partial}{\partial Z} (V_z \rho) = 0 \quad (3')$$

エ ネ ル ギ - 方 程 式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (V_x \rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial Z} (V_z \rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \dot{m} \quad \left[\text{但し } \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \ll \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]$$

より同様にして動座標系では、(以下すべて * をはぶく)

$$\frac{\partial}{\partial x} (V_x - R) (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial Z} (V_z \rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \dot{m} \quad (4)$$

(1), (3), (4) 式より (5) 式が導かれる。

$$\frac{9}{80} \cdot \frac{d}{dz} (V_m \delta^2) + \frac{R \delta}{2} = \frac{D}{1 - \frac{L G_s^0}{C_p G_L^0}} \quad (5)$$

運動方程式： 動座標系において運動方程式は、次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (V_x - R) \rho V_z + \frac{\partial}{\partial z} \rho V_z^2 = (\rho - \rho_{x=0}) g + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \quad (6) \text{ 但し, } \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \ll \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)$$

(6) 式より (7) 式が導かれる

$$729 \delta \frac{d}{dz} (V_m^2 \delta) + 11340 \nu V_m = 280 g \delta^3 (\alpha G_L^0 - \beta G_s^0) \quad (7)$$

ここで, $-G_s^0 = 0.037 G_L^0$

(5)(7) の連立微分方程式の解を数値計算によつて求めた。表 4 に深さ 50 cm, 100 cm における δ と $V_{mean} (=V_m \times 9/16)$ の値を, R , ν , G_L^0 をパラメーターとして示す。ここで, 諸物性値として, $D=0.046 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $L=65 \text{ cal/gr}$, $C_p=0.188 \text{ cal/C} \cdot \text{gr}$, $\alpha=1.21 \times 10^{-4} / \text{C}$, $\beta=3.85 \times 10^{-2}$, $g=980 \text{ cm/sec}^2$ を用いた。

表 4. 対流速度及び境界層の厚さ

H cm	R cm/sec		0.001			0.005			0.010		
	$\nu \text{ cm}^2/\text{sec}$		0.00786	0.0786	0.157	0.00786	0.0786	0.157	0.00786	0.0786	0.157
	$G_L^0 \text{ C/cm}$										
50	10	$\delta \text{ cm}$	0.52	0.78	0.89	0.48	0.70	0.79	0.43	0.59	0.63
		cm/sec V_{mean}	2.92	1.25	0.90	2.50	0.91	0.66	1.92	0.53	0.33
	30	$\delta \text{ cm}$	0.42	0.63	0.72	0.40	0.58	0.66	0.36	0.51	0.56
		cm/sec V_{mean}	4.50	1.92	1.50	4.00	1.58	1.16	3.33	1.08	0.70
100	10	$\delta \text{ cm}$	0.59	0.89	1.00	0.54	0.79	0.88	0.48	0.63	0.65
		cm/sec V_{mean}	4.33	1.83	1.42	3.66	1.33	0.91	2.66	0.65	0.38
	30	$\delta \text{ cm}$	0.48	0.72	0.82	0.45	0.66	0.74	0.41	0.56	0.60
		cm/sec V_{mean}	6.75	2.91	2.17	5.91	2.25	1.58	4.75	1.42	0.92

5. 考 察； 以上, 実測値と理論計算値とを比較してみると一応オーダー的にかなりよい一致を示した。ところで, 理論計算を行う場合, 結晶片の晶出をともなっている凝固界面の粘性値として如何なる値を用いるかという問題が生じる。筆者らは凝固区間を有する Azobenzene と Camphor 溶液の粘性を測定し, 固相率が 20~30% の場合の粘性として, 液相線温度に近い温度の溶液の 10~20 倍をえた。この結果により, 動粘性係数の値として, 液相線温度に近い溶鉄の値 $0.00786 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 及び 10 倍, 20 倍の場合について計算した。表 4 からわかるように粘性が大になると速度は小さくなるが, 最大速度 V_m について考えれば, 粘性が 20 倍の場合でも数 10 cm/min 以上のかかなり早い速度がえられる。又, 対流速度は, 深さが深くなるほど大きくなり傾向的には実測結果と一致している。一方, 凝固速度 R が大になれば, 対流速度は小さくなり, 時間が経過すれば対流速度は小さくなるという実測結果と逆の傾向を示している。これは計算に際し, 凝固速度を凝固層前面の温度勾配と無関係に変化させている結果で, 実際は凝固初期の凝固速度が大きい段階では, 温度勾配は当然大きく, 時間の経過と共に温度勾配は小さく, そして凝固速度も小さくなると考えなければならない。このため, $R=f(G_L^0(t))$ なる関係を保ちながら凝固する場合, すなわち, 非定常解について検討を試みている。