

# 鑄型内溶鋼中の酸化介在物の浮上分離におよぼす

70575 対流の影響\*

池 田 隆 果\*\*

## Effect of Convection on the Separation of Floating Oxide Inclusions in Liquid Steel in Mold

Takami IKEDA

### Synopsis

The effects of convection on the separation of floating oxide inclusions in liquid steel in mold were discussed theoretically, and the following results were obtained.

1. The pattern of convection, characterized by the cross section and the velocity of downward flow, has an extensive influence on the separation of inclusions. The effect of convection is remarkable for inclusion whose rising velocity is comparable with the velocity of the downward flow, and it is small for inclusions whose rising velocity is considerably higher or lower than the velocity of downward flow.

2. For such a convection with a small cross section of downward flow as that in killed steel in mold, large inclusions separate more rapidly than in tranquil bath in early period, but some large inclusions can not separate even after the time which is enough for separation in tranquil bath.

3. In such a convection having a large cross section of downward flow as that in rimming steel in mold, the separation of large inclusions is hindered remarkably.

(Received Dec. 15, 1969)

### 1. 緒 言

鋼塊内部に生成する大型酸化介在物の生因を解明するためには、鑄込み時に鑄型内に持ち込まれた介在物が時間経過につれてどのように浮上分離するのかを知っておく必要がある。

鑄込み終了後の鑄型内の溶鋼が完全な静止状態にあれば、溶鋼中の介在物はその大きさに応じて時間経過につれて次第に上部に浮上し、鋼塊高さに相当する距離を移動しうる時間が経過した後では、その大きさの浮遊介在物は完全に浮上分離してしまうはずである。

ところがキルド鋼では鑄込み終了後に鑄型壁に沿って下向きの対流が発生し、一方リムド鋼ではリミングアクションと呼ばれて強い対流が存在する。

そこで従来ほとんど検討がなされていない酸化介在物の浮上分離におよぼす対流の影響について理論的解析を試みた。

### 2. 粒子の浮上におよぼす対流の影響の定量化

#### 2.1 対流時の各位置の粒子濃度

まず最も単純な対流パターンとして、Fig. 1 に示すように溶鋼の断面積が全高さにわたって一定で、下降流と

上昇流の占める断面も全高さにわたって一定であり、下降流、上昇流の各内部ではいずれの位置でも溶鋼の流速が等しい場合を考えてみる。

下降流の占める断面比を  $A$ 、上昇流の占める断面比を  $B(=1-A)$  とし、下降流速を  $v_d$ 、上昇流速を  $v_u(=A/B)v_d=[A/(1-A)]v_d$ 、粒子の浮上速度を  $v_p$  とする。

上端の水平流から下降流に移行すると、流速と粒子の浮上速度との相対差によつて粒子濃度は  $1/(1-v_p/v_d)$  に濃化され、下端の水平流から上昇流に移行すると、粒子濃度は同様の理由で  $1/(1+v_p/v_u)=1/\{1+[(1-A)/(A)](v_p/v_d)\}$  に希釈される。浮上速度が下降流速より大きな粒子は、下降流部では  $v_p-v_d$ 、上昇流部では  $v_p+v_u$  の速度で次第に浮上し、濃化、希釈は起こらない。

対流発生前の初期平均濃度を 1 とし、対流が完成するまでの期間内に浮上速度が下降流速より大きな粒子は完全に分離し、それ以下の粒子の浮上分離は起こらないと仮定して、マスバランスから水平流部、下降流部および上昇流部の粒子濃度を計算するとつぎのようになる。ただし簡略化するために水平流部の溶鋼体積は無視している。

\* 昭和44年12月15日受付

\*\* 住友金属工業(株)和歌山製鉄所

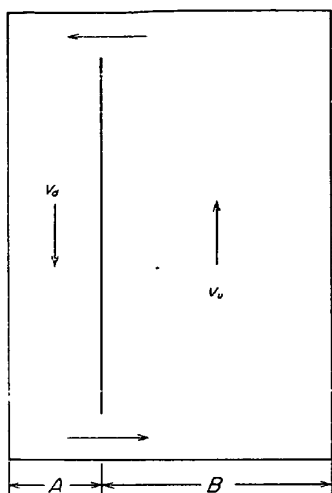


Fig. 1. A simple pattern of convection.

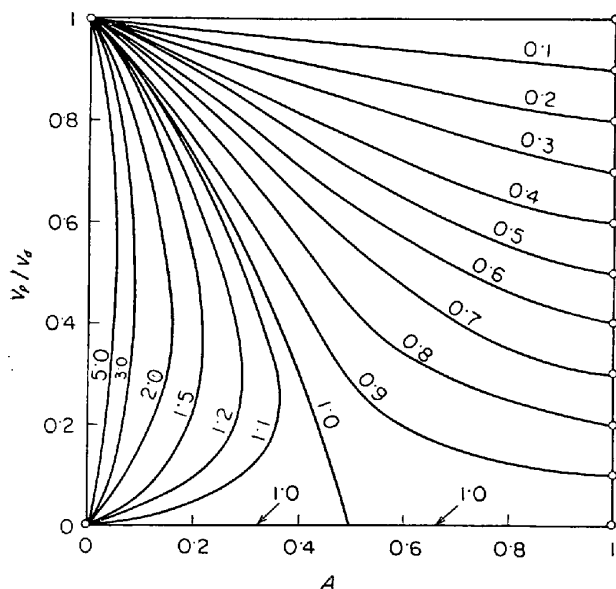


Fig. 2. Concentration of particles in horizontal flow.

水平流部濃度：

$$\frac{1}{[A/(1-v_p/v_d) + B/(1+v_p/v_u)]} = (1-v_p/v_d) \{1 + [(1-A)/A]v_p/v_d\}$$

下降流部濃度：

$$\frac{1}{[A/(1-v_p/v_d) + B/(1+v_p/v_u)]} (1-v_p/v_d) = 1 + [(1-A)/A]v_p/v_d$$

上昇流部濃度：

$$\frac{1}{[A/(1-v_p/v_d) + B/(1+v_p/v_u)]} (1+v_p/v_u) = 1 - v_p/v_d$$

まず水平流部の濃度を Fig. 2 に示す。下降流断面の小さいときには濃度が一般に高くなり、逆の場合には濃度は低くなる。濃度が変化しないのは下降流速にくらべ

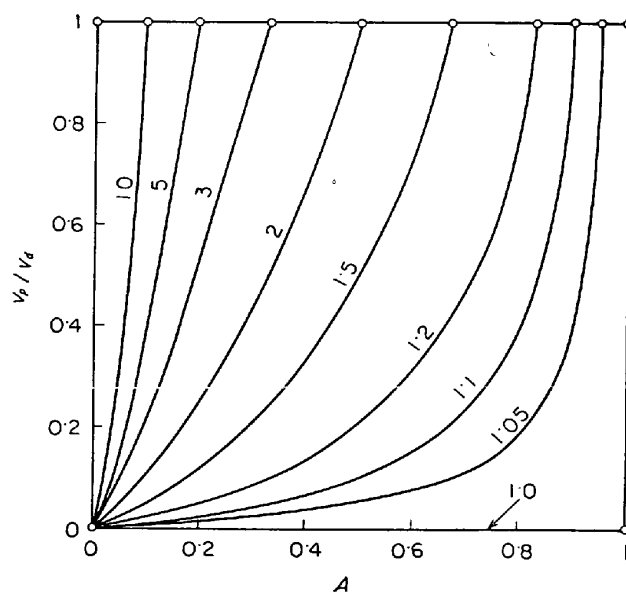


Fig. 3. Concentration of particles in downward flow.

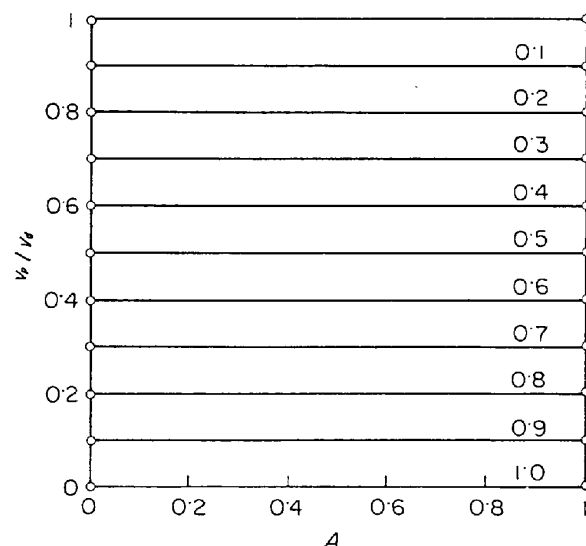


Fig. 4. Concentration of particles in upward flow.

て浮上速度が十分小さな粒子、すなわち微粒子と下降流断面比が0.5以下のときの特定の大きさの粒子のみである。

下降流部の濃度を Fig. 3 に示す。下降流断面が小さいほど濃化は著しいが、微粒子はほとんど濃化しない。

上昇流部の濃度を Fig. 4 に示す。下降流断面には無関係に希釈するが、希釈の程度が著しいのは浮上速度が下降流速に近い粒子で、微粒子ではほとんど希釈しない。

以上最も単純な対流パターンの場合の各位置の粒子濃度をもとめた結果、対流時の粒子の浮遊に下降流断面比

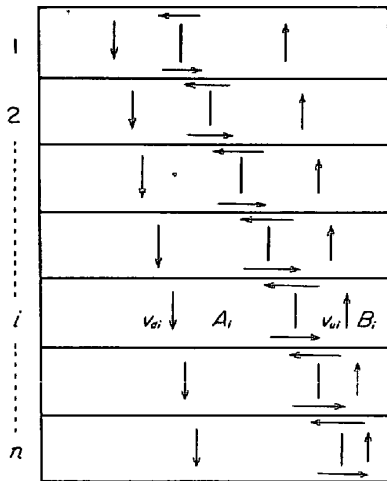


Fig. 5. The simplification of a complicated convection.

と下降流速度が著しい影響をおよぼすことが推測できた。

つぎに下降流, 上昇流の断面が次第に変化し, また流速も次第に変化するような複雑な対流パターンの場合について考えてみる。

この場合にも Fig. 5 に示すように高さ方向に  $n$  等分すれば, 各段については単純な対流パターンになるので, その総和として対流パターンを近似できる。

上, 下端水平流部の粒子濃度は, 各段の仮想水平区分線および下降流と上昇流との間の垂直境界線など垂直方向に流れのない位置の粒子濃度とすべて等しくなるので, マスバランスからつぎのようになる。

水平流部濃度:

$$n / \left[ \sum_{i=1}^n \left[ A_i / (1 - v_p / v_{di}) \right] + \sum_{i=1}^n \left[ B_i / (1 + v_p / v_{ui}) \right] \right]$$

この値は単純な対流パターンの場合の水平流部濃度の調和平均値である。すなわち区分の段数を多くとればとるほどこの値は真の値に近づくが, 2 段の粗い区分でもその調和平均値を細かい区分の場合の調和平均値に近づけることができれば, かなり精度のよい近似が可能となることを示している。

この水平流部濃度さえ求められれば, 下降流部の濃化, 上昇流部の希釈の程度は容易に求まる。

各段に流速の異なる下降流, 上昇流が 2 本以上ある場合にも同様に計算することができる。

### 2.2 対流時の粒子の浮上分離速度

鋼塊高さを  $H$  とすると, 静止浴では  $v_p t / H = 1$  になる時間  $t$  経過すれば,  $v_p$  の浮上速度を有する粒子は完全に浮上分離してしまう。

つぎに対流のある場合について考える。

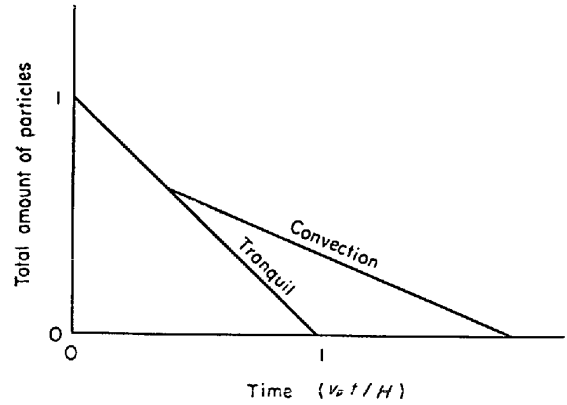


Fig. 6. The separating rate of particles whose rising velocity is larger than the velocity of downward flow.

まず浮上速度が下降流速より大きな粒子の浮上分離について考えてみる。

単純な対流パターンの場合で, 初期に粒子が均一に分布しており, 下降流, 上昇流間の粒子の移動がないとすると, 時間  $t$  における全粒子量は上昇流部の粒子が完全に浮上分離するまで  $((v_p + v_u)t / H \leq 1)$  の間は

$$1 - [A(v_p - v_d) + B(v_p + v_u)]t / H = 1 - v_p t / H$$

となつて静止時とまったく等しくなり, それ以後は

$$1 - A(v_p - v_d)t / H - B$$

となるが,  $(v_p - v_d)t / H = 1$  になる時間  $t$  経過すると完全に浮上分離しうることになる (Fig. 6)。また対流の影響をうける粒子は, その浮上速度が下降流速に比較的近いものに限られることがわかる。

つぎに浮上速度が下降流速より小さな粒子について考えてみる。対流時にも粒子の浮上分離は上部表面で起こるから, 浮上分離速度に上部水平流部の粒子濃度が影響することは容易に推測できる。

対流前の粒子の平均濃度および系内全粒子量を 1 とし, 対流直後の水平流部の濃度を  $C_0$ , 時間  $t$  における水平流部の濃度を  $C$  とすると,  $dt$  の時間で浮上分離する粒子量は  $C(v_p dt / H)$  で表わされる。また  $n$  段対流時の時間  $t$  における系内全粒子量は

$$K \equiv (1/n) \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ A_i / (1 - v_p / v_{di}) \right] + \sum_{i=1}^n \left[ B_i / (1 + v_p / v_{ui}) \right] \right\}$$

とおくと  $KC$  で表わされるから,  $dt$  の時間経過による系内全粒子の減少量は  $-KdC$  となる。マスバランスから次式が得られる

$$-KdC = C(v_p dt / H)$$

ゆえに

$$-\ln C = v_p t / HK$$

初期条件, すなわち  $t=0$  のとき  $C=C_0$ ,  $KC=KC_0=1$  を代入して整理すると,  $t$  時間後には  
 水平流部濃度比率:

$$C/C_0 = \exp[-C_0(v_{pt}/H)]$$

系内全粒子量比率:

$$KC/KC_0 = \exp[-C_0(v_{pt}/H)]$$

となり, 水平流部濃度の変化は系内全粒子量の変化とまったく同じになる. この計算結果を Fig. 7 に示す.

対流直後の水平流部濃度が 1 以上であれば, 初期の粒子の浮上分離は対流時のほうが静止時よりも迅速に進行するが, 静止時に粒子が完全に浮上分離しうる時間 ( $v_{pt}/H=1$ ) 経過した後も完全な浮上分離は起こりえず, いつまでも一部の粒子が浮遊していることがわかる.

逆に対流直後の水平流部濃度が 1 以下であれば, 初期の浮上分離をふくめてあらゆる時期の浮上分離速度が静止時よりも遅くなり, 完全な浮上分離は起こりえないことがわかる.

対流直後の水平流部濃度は 2.1 節で述べたごとく下降流断面比に影響され, 下降流断面が小さい場合に限って 1 より大きくなり, 下降流断面が大きい場合には 1 より小さくなるから, 以上の結果はつぎのように要約できる. すなわち, 粒子の浮上分離は下降流断面が小さい対流パターンの場合には初期には静止時よりも迅速に進行するが, 静止時に完全に浮上分離しうる時間が経過した後も完全な浮上分離は望めない. また下降流断面が大きな対流パターンの場合には, 静止時にくらべてあらゆる時期の粒子の浮上分離が遅くなり, 完全な浮上分離は起こりえないことになる.

以上のように粒子の完全な浮上分離を目標とするならば, あらゆるパターンの対流は浮上速度が下降流速より小さな粒子の完全な浮上分離を阻害することが推測される.

### 3. キルド鋼の場合の対流の影響

キルド鋼の鋳型内の対流パターンは RI 添加によつて測定されており<sup>2)</sup>, 凝固壁にそつた下降流は頭部で狭く, 底部になるにつれて広がっているようであり, また平均の下降流速は 1m/min のオーダーである. そこで下降流断面を 0.05 あるいは 0.1 というように小さな値にとり (このパターンは初期の介在物の浮上分離には有利である), 流速を 0.5m/min あるいは 1m/min という値にとつて, 対流時の粒子の浮遊状況を求めてみ

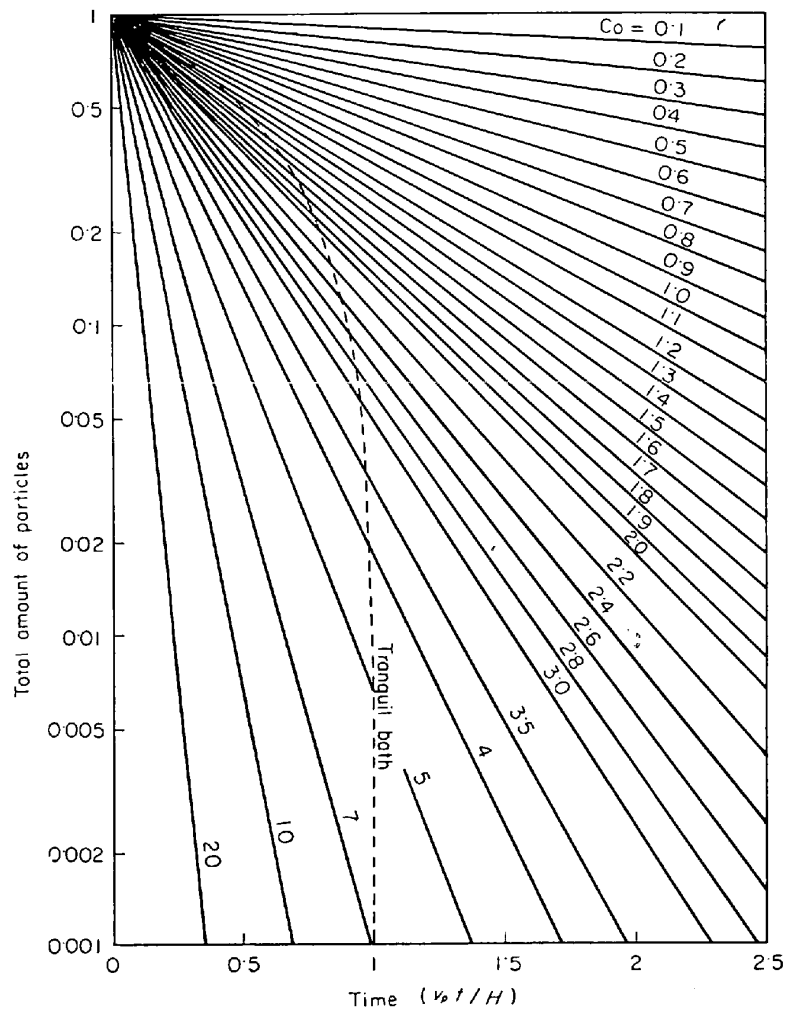


Fig. 7. The separating rate of particles.

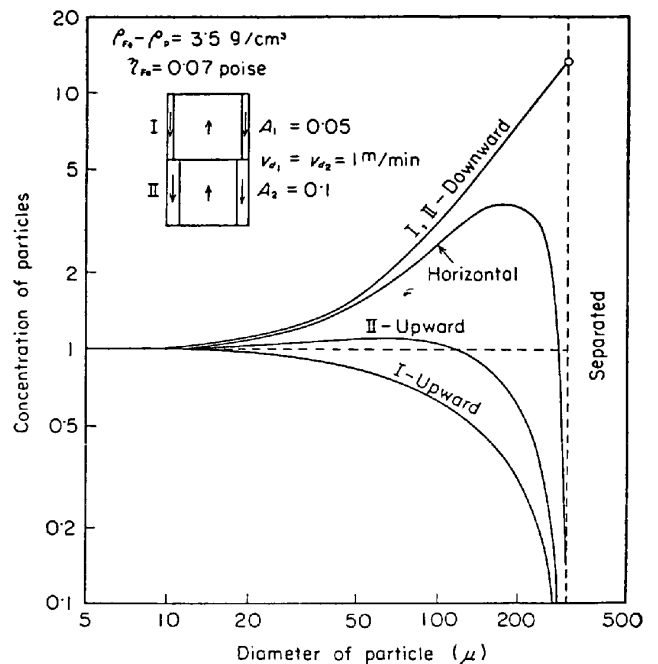


Fig. 8. Concentration of particles just after the occurrence of convection.

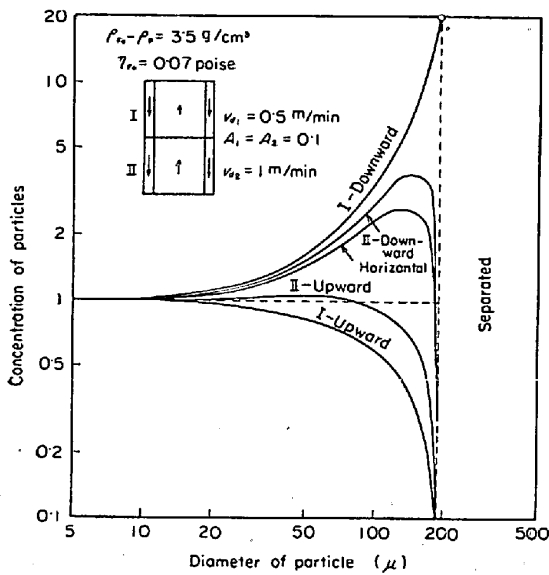


Fig. 9. Concentration of particles just after the occurrence of convection.

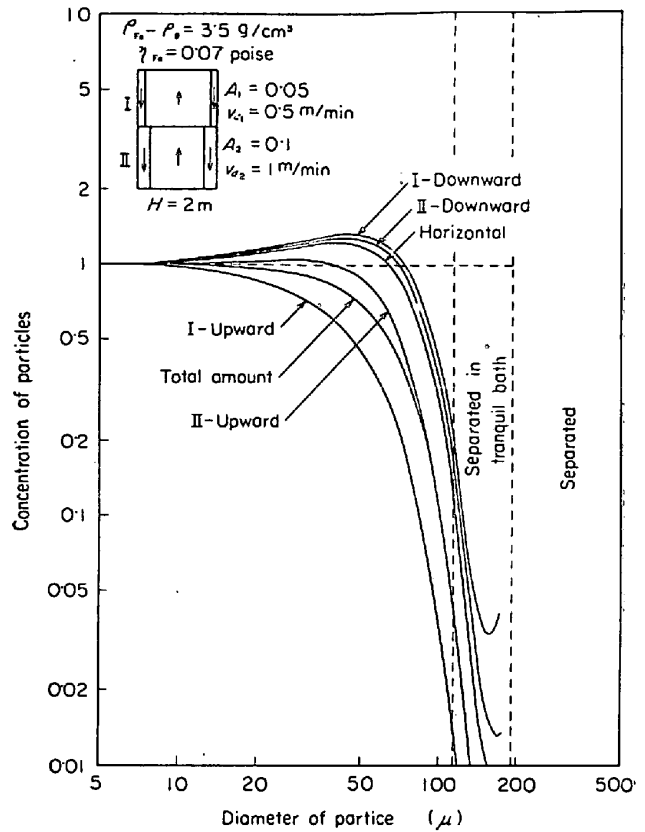


Fig. 10-2. Concentration of particles at 10 minutes after the occurrence of convection.

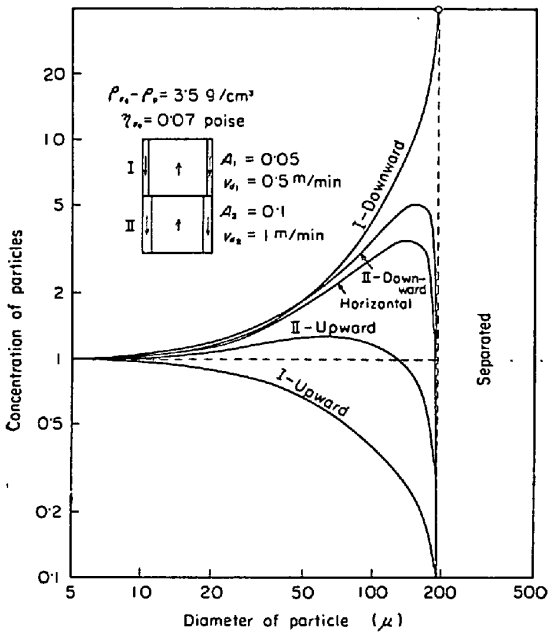


Fig. 10-1. Concentration of particles just after the occurrence of convection.

る。なお下降流速より大きな浮上速度を有する粒子については考慮しないこととする。

まず対流が完成するまでの時間の中に浮上速度が下降流速より小さな粒子の浮上分離は起こらないと仮定して、2段区分法で対流直後の各位置の粒子濃度を求めた結果を Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10-1 に示す。Fig. 8 は下降流速は全高さにわたって一定で、下降流断面が底部ほど大きな場合である。Fig. 9 は下降流断面は全高さにわたって一定で、下降流速が底部ほど大きな場合である。Fig. 10-1 は下降流断面、下降流速とも底部ほど大きな

場合である。これら3つの図を比較してみると、全体として介在物の分布傾向はほとんど同じであることがわかる。すなわち上昇流部では大型介在物は希釈され、水平流部、下降流部では大型介在物は濃化している。また10μ径以下の介在物はほとんど影響をうけない。

つぎにこのような対流が完成した後、時間経過につれて各位置の介在物濃度がどのように変化するか計算してみる。対流パターンとしては Fig. 10-1 の場合をとり、鋼塊高さは2mとする。また時間が経過しても対流パターンはまったく変わらず、凝固の進行もないと仮定する。10 min, 30 min, 60 min 後の介在物濃度を Fig. 10-2, Fig. 10-3, Fig. 10-4 におのおの示す。いずれの時期にも静止時には完全に浮上分離してしまう大きさの介在物がかなりの量残留しており、60 min 経過した後でも70μ径程度の大きさの介在物が最初の量の1%程度は残ることがわかる。

以上の考察によつて、キルド鋼の鑄型内の対流は初期の介在物の浮上分離には有利であるが、静止時には完全に浮上分離できるような時間が経過した後でも少量の大型介在物が浮上しきれずに残留することが推測できた。ただしキルド鋼の対流のように流速が小さいと対流が完成するまでにかなりの時間を要するから、厳密にはこの

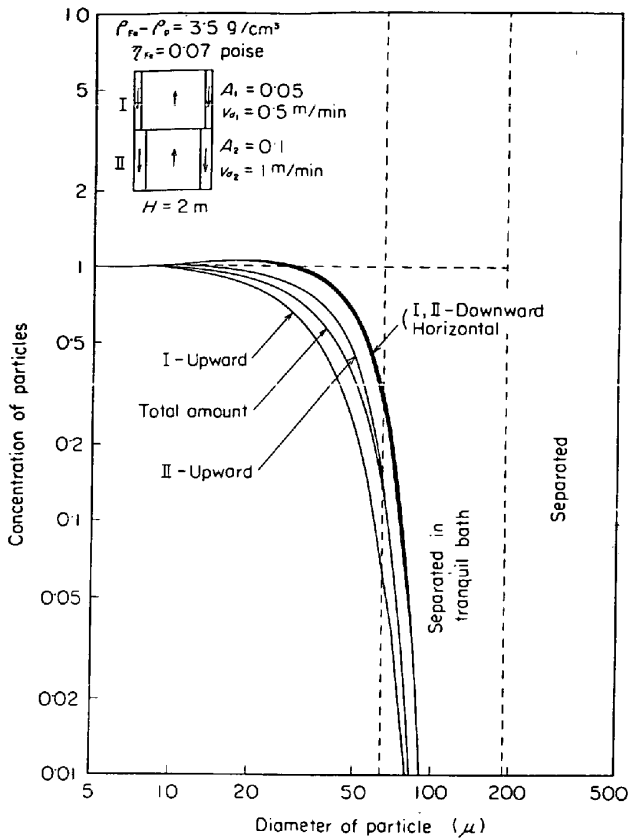


Fig. 10-3. Concentration of particles at 30 min after the occurrence of convection.

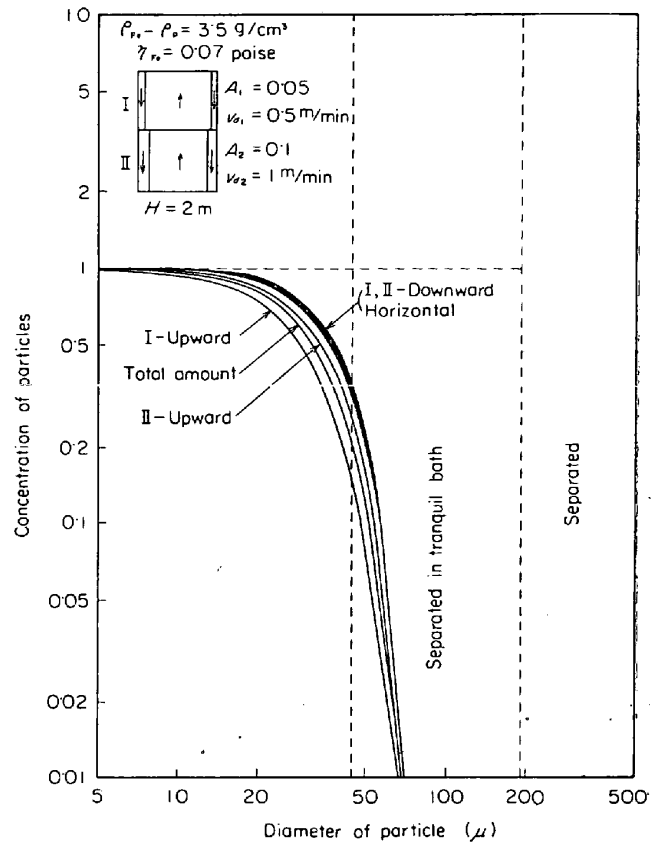


Fig. 10-4. Concentration of particles at 60 min after the occurrence of convection.

間の介在物の浮上分離を考慮に入れる必要がある。

#### 4. リムド鋼の場合の対流の影響

リムド鋼の対流は気泡の浮上によって起こっているがこの気泡の存在が浮遊介在物におよぼす影響は無視して考察することにする。

リムド鋼の凝固壁にそつた上昇流の断面は小さいので0.1という上昇流断面比をとり（この対流パターンは介在物の浮上分離にきわめて不利である）、2段区分法を用いて上段の上昇流速が45m/min、下段の上昇流速がその半分の22.5m/minの場合と、上段の上昇流速が27m/min、下段の上昇流速がその半分の13.5m/minの場合との2つの場合について、浮上速度が下降流速より小さな粒子の浮遊状況を求めてみる。上段の上昇流速45m/min および 27m/min は湯面の盛り上がりが3cm および 1cm におおの相当する流速で、リミングアクションの強い場合と弱い場合の例である。

まず対流直後の各位置の介在物濃度を Fig. 11 および Fig. 12-1 に示す。大型介在物は下降流部に濃化し、水平流部および上昇流部では希釈される。2つの図で上昇流速の影響は下降流速の影響として浮上分離しうる介在物径に現われているだけで、介在物の濃度分布傾向は

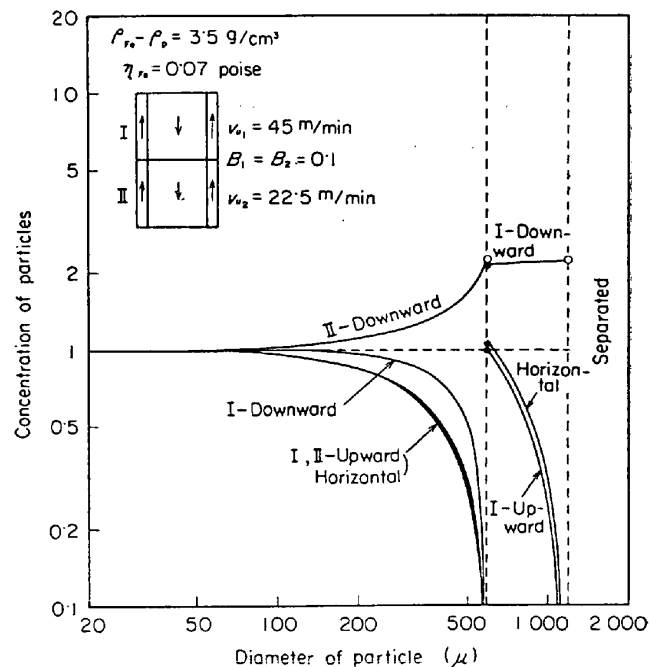


Fig. 11. Concentration of particles just after the occurrence of convection.

まったく同じである。

つぎに鋼塊高さを2mとしてリミングアクションの弱い場合 (Fig. 12-1) について 10 min および 30 min 後

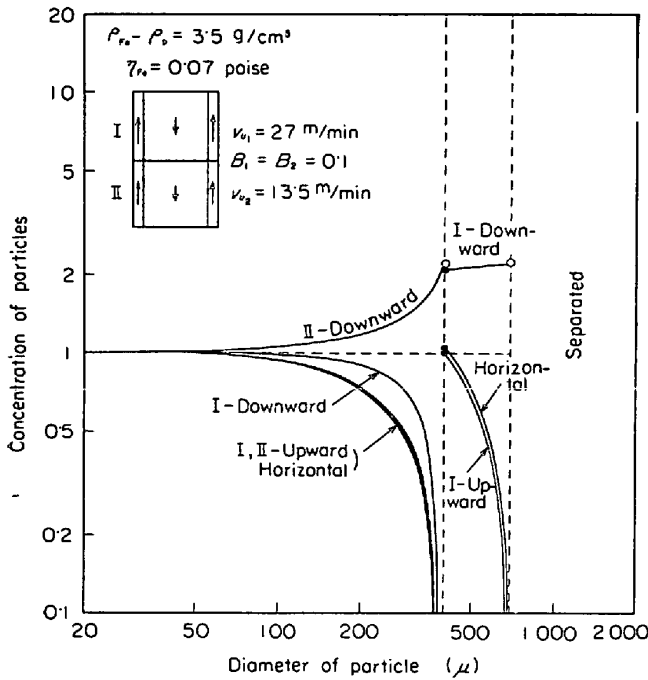


Fig. 12-1. Concentration of particles just after the occurrence of convection.

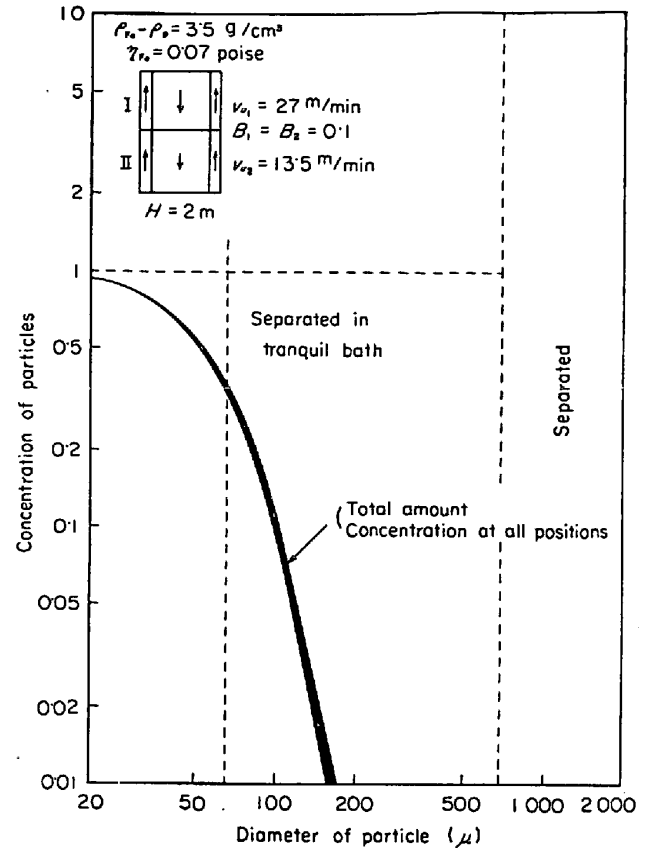


Fig. 12-3. Concentration of particles at 30 min after the occurrence of convection.

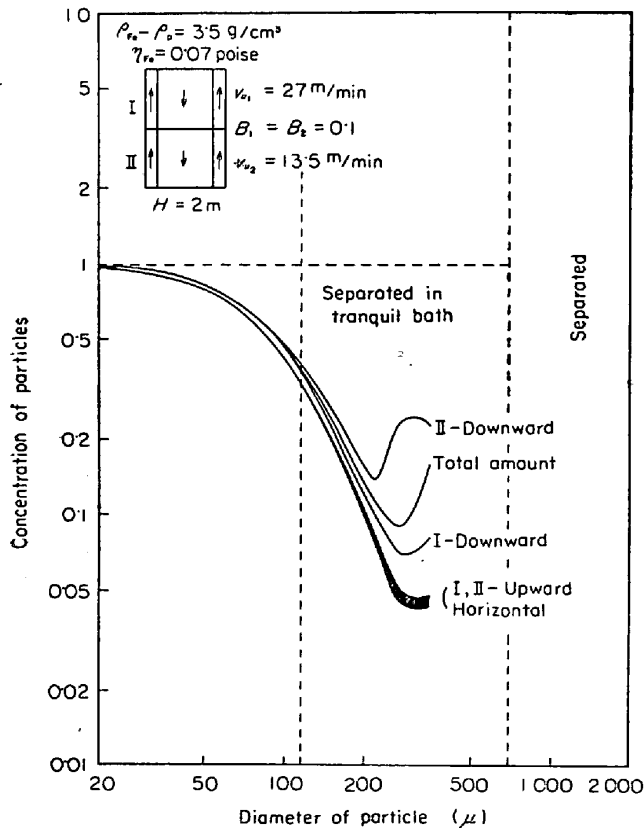


Fig. 12-2. Concentration of particles at 10 min after the occurrence of convection.

の介在物濃度を求めてみる。その結果を Fig. 12-2, Fig. 12-3 におおの示す。10 min 後では 300 μ 径程度の大型介在物がまだ多数残留している。30 min 後でも 100 μ 径以上の介在物の残留量が多い。リミングアクション

の強い場合 (Fig. 11) には、同じ時間経過した時点で大型介在物の残留が相対的に増加することになる。

以上の考察によつて、リムド鋼のリミングアクションは大型介在物の浮上分離を著しく阻害していることが推測できた。

### 5. 結 言

鑄型内の溶鋼の対流が酸化介在物の浮上分離におよぼす影響によつて理論的に考察した結果、つぎのことが推測できた。

1. 介在物の浮上分離には、下降流の断面比と下降流速で代表される対流のパターンが大きな影響をおよぼす。対流の影響は浮上速度が下降流速に比較的近い介在物において顕著であり、浮上速度が下降流速にくらべて著しく大きな介在物および著しく小さな介在物のうける影響は小さい。

2. キルド鋼の鑄型内の対流のように下降流断面が小さな対流では、初期の大型介在物の浮上分離は静止時よりも迅速に進行するが、静止時には完全に浮上分離する時間が経過した後でも一部の大型介在物は浮上しきれずに残留する。

3. リムド鋼のリミングアクションのように下降流断面が大きな対流では、大型介在物の浮上分離は著しく阻害される。

### 文 献

- 1) 森, 松尾, 谷沢, 山手: 鉄と鋼, 52(1966), p. 419
- 2) 満尾, 堀籠, 北村, 宮川, 野村: 鉄と鋼, 55(1969), S 139