

鑄造の力学的研究(続)

—堰先のすくわれについて—

Study on Theoretical Analysis for Castings (Sequel)

—Scabbing on the Gate—

篠田 忠 夫*

Tadao Shinoda

内 容 梗 概

鑄造欠陥であるすくわれの原因について、砂の性質に関する研究は盛んに行われているが、堰先のすくわれの原因は砂の性質以外に鑄込時の熔鋼の衝撃力が影響すると考えられる。

前報⁽¹⁾において、砂の表面に外力が作用した場合、内部に生ずる引張応力および砂の境界部の強さに関して述べた。したがって本研究はこの考え方を応用して、堰先のすくわれを熔鋼の衝撃力の面から力学的に解析したものである。その結果次のことが明らかとなった。

- (1) 堰先すくわれは熔鋼の堰先速度に影響される。
- (2) 堰先速度がある速度以上、すなわち危険速度になるとすくわれ発生の危険性がある。したがって堰先すくわれを防止するためには、堰先速度が危険速度にならないようにしなければならない。
- (3) 堰先速度は熔鋼のヘッドの平方根および湯口と堰との断面比に比例して大きくなる。ゆえに実際の作業範囲の熔鋼のヘッドにおいて、すくわれが発生しないように湯口と堰との断面比をきめておかねばならない。

1. 緒 言

鑄造欠陥であるすくわれ現象について、直接の原因と思われる要因について考察してみるに、内的なもの、外的なものに大別できると思われる。内的なものとは砂自体に起因するものであり、外的なものとは砂以外のもの、鑄込時の熔鋼による衝撃力、鑄型内の発生ガス圧、および製品の形状などである。

従来、鑄物砂に関して、すくわれの原因は次の四つ⁽¹⁾

- (a) 生型における変形能力が少ない。
- (b) 膨脹量が多い。
- (c) 膨脹と収縮量の差が大きい。
- (d) 強度が小さい。

があげられており、これに関する研究は盛んに行なわれているが、これらの研究はすくわれ現象を内的原因から究明せんとしたものであるが、これ以外に、外的原因についても究明し、この両者を合せ考えて、はじめてすくわれ現象が解明されるのではないかと思われる。

また、すくわれ現象においても、堰先のすくわれや上型面が照されておこるすくわれなどがあるが、この中でも堰先のすくわれは主として鑄込時における熔鋼の衝撃力によつて生ずるのではないかと考えられた。

前報⁽²⁾において、砂の表面に外力が作用した場合、砂の内部に生ずる引張応力ならびに生型砂の境界部の引張強さに関して述べたが、堰先の上型面に発生するすくわれは、ちょうどこの考え方を応用して究明できるのではないかと思われた。

したがって、前報に引続き、堰先のすくわれ現象を外

* 日立製作所笠戸工場

的原因と考えられる熔鋼の衝撃力の面から解析し、その防止対策として、湯口ならびに堰の設計に関して一つの指針を得た。

本報告は以上の結果について述べたものである。

2. 生型砂の境界部の強さ

生型砂は鑄込時に熔鋼と接触すると、接触面から乾燥しはじめて、乾燥部分と未乾燥部分とができる。この場合、砂内に含有されている水分は蒸気となつて移動していくが、未乾燥部分にきた蒸気は、未乾燥部分の温度が100°C以下であるため、凝固してふたたびもとの水分になる。したがって未乾燥部分の水分状態は、鑄込前の状態に比べて増加するが、特に乾燥部分と未乾燥部分との境界部の水分の増加は大きく、初めの水分3~4%のものでは、境界部の水分は7~8%となり、約2倍の水分増加がある。このように境界部では水分のみが急激に増加するため、強さは鑄込前の状態よりもはるかに弱くなる。

第1表の鑄鋼用純生型砂で1"×8"×8"の試験片を作り、熱源温度800~900°C、乾燥時間30秒で実験した結果を第2表、第1図に示す。実験結果から次のことがわかる。

- (1) 生および境界部の引張強さはともに水分3~4%で最大である。
- (2) 生の最大引張強さは抗圧力の約1/5で、抗圧力に

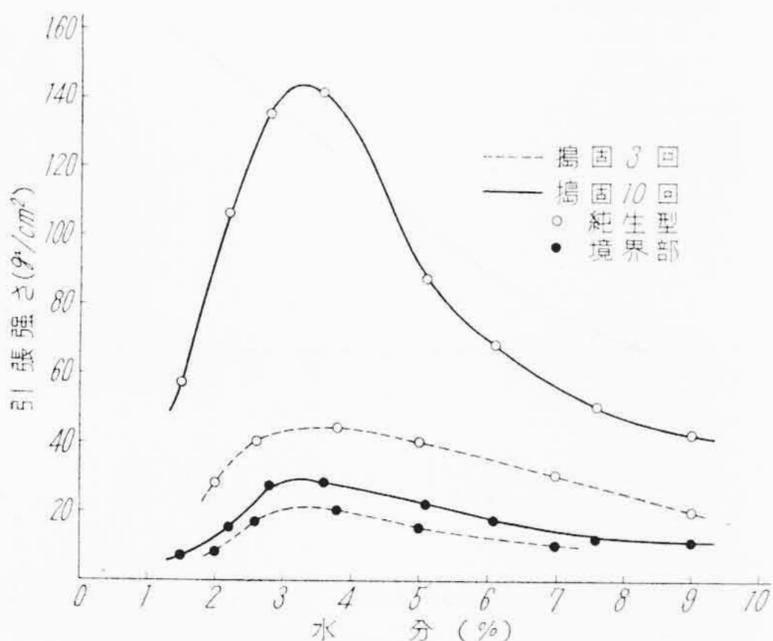
第1表 配 合 表

極 細	ベントナイト	サンサルエキス	回収砂	水分 (%)
70	5	5	30	3~4

第2表 鑄鋼純生型砂の引張強さ

搗固 3 回 の 場 合				搗固 10 回 の 場 合			
水 分 (%)	見掛比重 (g/cm ³)	生の引張強さ (g/cm ²)	境界部の引張強さ (g/cm ²)	水 分 (%)	見掛比重 (g/cm ³)	生の引張強さ (g/cm ²)	境界部の引張強さ (g/cm ²)
2.0	1.18	28	8	1.5	1.37	57	7
2.6	1.23	40	17	2.2	1.40	106	15
3.8	1.34	44	22	2.8	1.41	135	27
5.0	1.39	40	15	3.6	1.47	141	28
7.0	1.48	30	10	5.1	1.50	87	22
9.0	1.60	20	—	6.1	1.60	68	17
—	—	—	—	7.6	1.70	50	14
—	—	—	—	9.0	1.77	42	11

注：同砂の標準試験による水分 4.2% の時の抗圧力は 680 g/cm²、見掛比重は 1.50 g/cm³ である



第1図 引張強さと水分との関係

対して引張強さは非常に弱い。

(3) 境界部の最大強さは生の約1/5で、境界部は非常に弱くなっている。

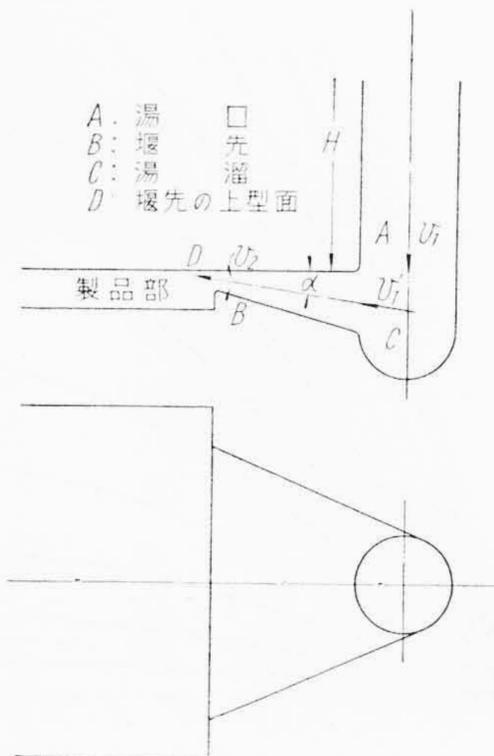
(4) 搗固回数の影響は、生では大きく表われているが、これに反して境界部においては、搗固回数はあまり影響せず、搗固回数が増すにしたがってわずか強くなっているだけである。

3. 理 論

3.1 堰先の衝撃力

第2図に示すように取鍋から鑄型内に鑄込まれた熔鋼は、まず湯口Aを通り、次に湯溜Cにおいてその方向を変え、最後に堰先Bを通つて製品部に入る。このように熔鋼が通過する過程において、製品部となる鑄型の上型面と堰の上型面とが連続した水平面をなしているような場合には、堰先の上型面Dが熔鋼の衝撃力を受けると考えられる。

今、湯口Aにおける湯の速度を v_1 、堰先Bにおける湯の速度を v_2 、湯口Aの断面積を a 、堰先Bの断面積を b 、取鍋からの湯のヘッドを H 、取鍋から毎秒流出する湯の量を Q とすると、 v および Q は次式にて表わされる。



第2図 湯口および堰の形状

$$v_1 = \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = cav_1 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 g は重力の加速度、 c は取鍋のノズルの流量係数を表わす。

次に、速度 v_1 は湯溜 c においてその方向を変えるために損失を生ずる。したがつて方向変化後の速度を v_1' 、湯溜りにおける損失係数を φ ⁽³⁾、毎秒堰に入る湯の量を Q' とすると、

$$v_1' = \frac{v_1}{\sqrt{1+\varphi}} \dots\dots\dots (3)$$

$$Q' = c'av_1' \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 c' は流量係数を表わす。

また、連続の式から

$$av_1' = bv_2 \dots\dots\dots (5)$$

なる関係式が成立する。

一方、毎秒流れる湯の重さを W 、堰先の上型面 D 部が単位面積当たり受ける衝撃力を P とすると、 W および P は次式にて表わされる。

$$W = \rho Q' \dots\dots\dots (6)$$

$$P = \frac{W}{g} \cdot v_2 \frac{\sin \alpha}{b} \dots\dots\dots (7)$$

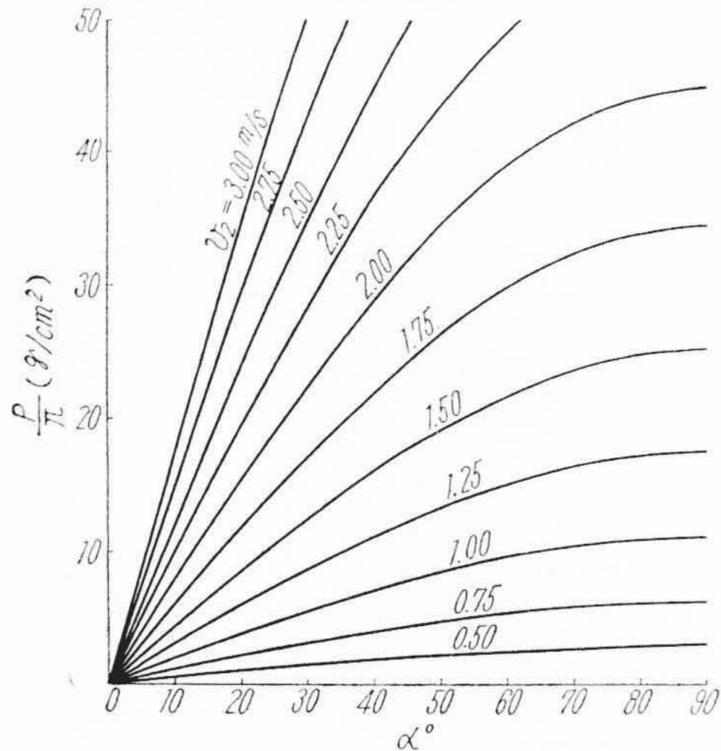
ここで、 ρ は湯の比重、 α は堰の中心線が上型面となす角を表わす。

(4)、(5)、(6) 式を (7) 式に代入すると (7) 式は

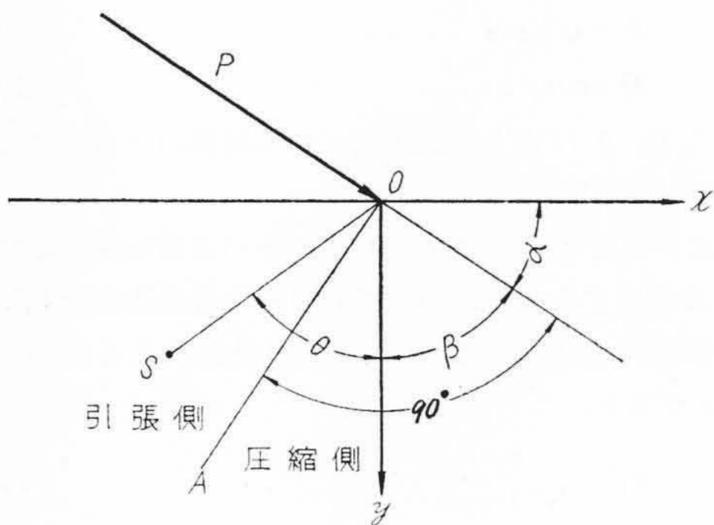
$$P = \frac{\rho}{g} c' v_2^2 \sin \alpha \dots\dots\dots (8)$$

となる。

(8) 式から明らかなように、堰先の上型面が受ける衝撃力は α が一定、すなわち堰の勾配が同じならば堰先速度の自乗に比例して大きくなることがわかる。



第 3 図 衝撃力と堰の勾配との関係



第 4 図 平面上に作用する力

第 3 図は、 $\rho=6.9 \text{ g/cm}^3$, $g=980 \text{ cm/s}^2$, $c=0.5$, 堰先速度 v_2 を媒介変数として、 P/π と α との関係を示したものである。この場合、衝撃力 P を P/π としたのは次の応力計算との関係上、 P/π とした方が都合がよいからである。

3.2 堰先の上型面内に生ずる引張応力

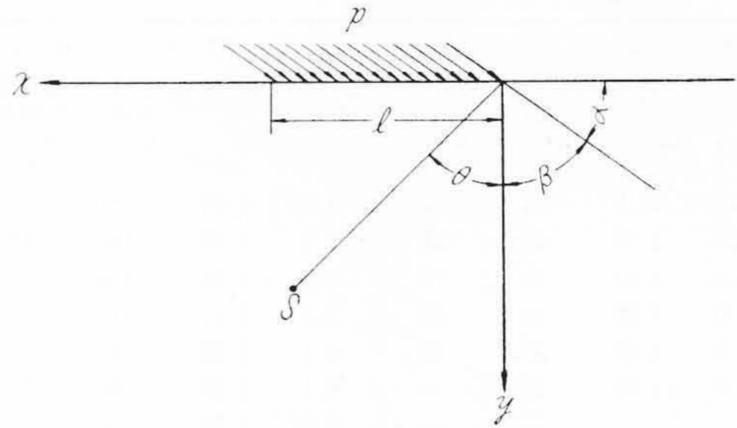
今、平面上に第 4 図に示すような力が作用した場合、内部の S 点に生ずる応力 σ_x , σ_y は次式にて表わされる⁽⁴⁾。

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{1}{y} \cos(\beta + \theta) \cos \theta \sin^2 \theta \dots (9)$$

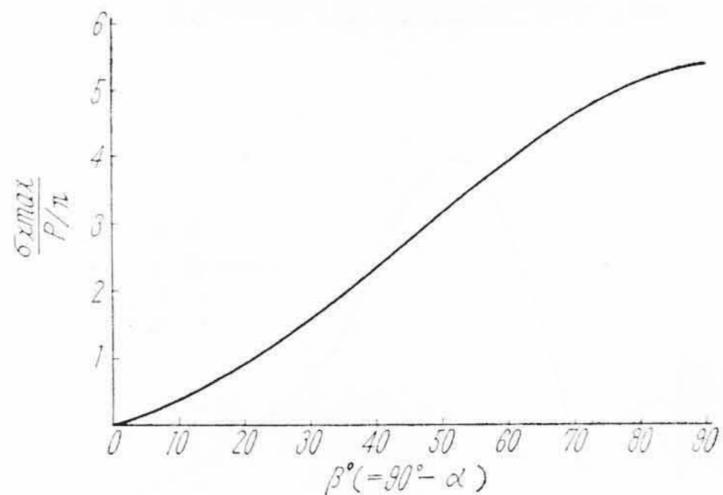
$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{1}{y} \cos(\beta + \theta) \cos^3 \theta \dots (10)$$

$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ であるから $\sin^2 \theta > 0$, $\cos \theta > 0$, したがって σ_x , σ_y が引張応力となるためには、 $\cos(\beta + \theta) < 0$ でなければならない。すなわち $\beta + \theta > \frac{\pi}{2}$, ゆえに OA を境として一方に引張応力が生ずることになる。

次に第 5 図のように、作用する力がある範囲 l にわた



第 5 図 力 P が範囲 l にわたって作用する場合



第 6 図 $\frac{\sigma_x \max}{P/\pi}$ と β との関係

って作用した場合、内部の S 点に生ずる応力 σ_x , σ_y は (9) および (10) 式を 0 から l まで積分して次式を得る。

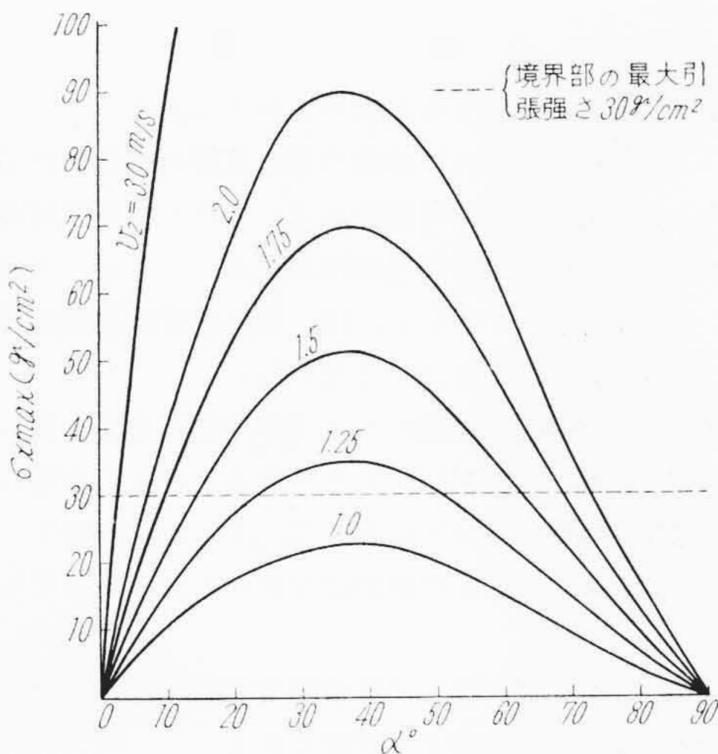
$$\sigma_x = \frac{P}{\pi} \left\{ \log \frac{x^2 + y^2}{(x-l)^2 + y^2} - \frac{x^2}{x^2 + y^2} + \frac{(x-l)^2}{(x-l)^2 + y^2} \right\} \sin \beta - \frac{P}{\pi} y \left\{ \frac{1}{y} \left(\tan^{-1} \frac{x}{y} - \tan^{-1} \frac{x-l}{y} \right) - \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{x-l}{(x-l)^2 + y^2} \right\} \times \cos \beta \dots (11)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{\pi} y^2 \left\{ \frac{1}{x^2 + y^2} - \frac{1}{(x-l)^2 + y^2} \right\} \sin \beta - \frac{P}{\pi} y \left\{ \frac{1}{y} \left(\tan^{-1} \frac{x}{y} - \tan^{-1} \frac{x-l}{y} \right) + \frac{x}{x^2 + y^2} - \frac{x-l}{(x-l)^2 + y^2} \right\} \cos \beta \dots (12)$$

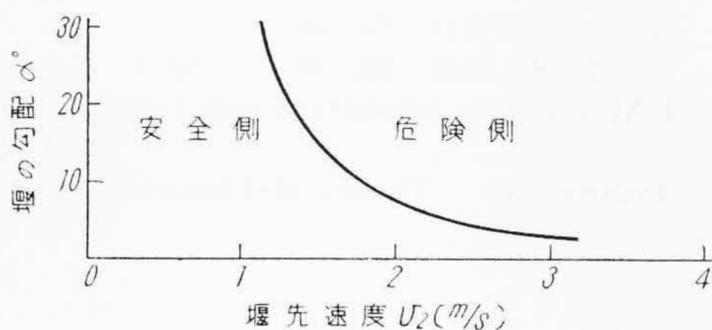
第 6 図は $l=5 \text{ cm}$, $y=0.2 \text{ cm}$ として引張応力 σ_x を計算し、おのおのの β における最大引張応力 $\sigma_x \max$ を求め、 $\frac{\sigma_x \max}{P/\pi}$ と β との関係を示したものである。

3.3 堰先の危険速度

第 3 図は堰先が熔鋼によつて受ける衝撃力 P/π , 第 6 図は平面上に外力 P が作用した場合、内部に生ずる最大引張応力 $\sigma_x \max$ と作用する外力との比 $\frac{\sigma_x \max}{P/\pi}$ を表わしたものである。したがって第 3 図と第 6 図から、堰先が熔鋼の衝撃力を受けた場合、内部に生ずる最大引張応力 $\sigma_x \max$ を求めると第 7 図に示すようになる。



第7図 堰先の上型面内に生ずる最大引張応力



第8図 堰先の危険速度と安全速度

一方、すくわれが発生するのは鑄型の表面から 2~3 mm 下の層が破壊して生ずるのであるが、鑄込時に鑄型が高温の熔鋼と接触して、2~3 mm 下の層が 100°C 以上の温度となるのにはほとんど時間を要しない。この場合生型砂であれば、2章で述べたように 100°C の部分に乾燥部と未乾燥部との境界ができる。この境界部は水分のみが急激に増加するため、砂の強度は初めの状態に比べて非常に弱くなる。第1図から明らかなように水分 3~4% で境界部の最大引張強さは約 30 g/cm² で、初めの状態の約 1/5 に減少する。ゆえに堰先が熔鋼の衝撃力を受けて、表面下 2 mm の層に境界部の最大引張強さよりも大きい引張応力が生じた場合には、当然この部分は局部破壊をおこしてすくわれが発生することになる。

今、第7図において境界部の最大引張強さを 30 g/cm² とすると、30 g/cm² 以上の部分はすくわれが発生する危険性があり、30 g/cm² 以下の部分はすくわれが発生せず安全だと考えられる。したがって 30 g/cm² 以上の部分を危険側、30 g/cm² 以下の部分を安全側として、第7図を堰先速度 v_2 と α との関係に書き直すと第8図に示すような線図が得られる。

第8図から明らかなように、曲線の右側(上側)の速度は堰先にすくわれを発生さす危険性があるとみなされ

るため、曲線の右側(上側)の部分の速度を堰先の危険速度とする。そうすると堰先にすくわれが発生しないようにするためには、堰先速度 v_2 が危険速度とならないように、湯口ならびに堰の設計を考えればよい。

4. 考察ならびに検討

第8図から明らかなとおり、堰先の危険速度は堰の勾配の函数である。勾配が大きくなるにしたがい、安全側の堰先速度は小さくなる。大体 1 m/s 以下の速度であれば、堰の勾配が大きくても熔鋼の衝撃力によるすくわれは発生しないことになる。また堰に勾配がない場合には、堰先速度が大きくても安全であることになるが、実際は、堰における湯流れが層流でないため $\alpha=0$ ではないと考えられる。それから板状の製品を作るような場合には、湯口と堰との間に湯溜りを設ける関係上、ある程度の勾配が必要である。しかし堰の形状が定まれば σ は一定となるから危険速度の範囲が求められる。たとえば $\alpha=10^\circ$ とすると堰先の危険速度は 1.75 m/s 以上になる。

次に堰先速度は (1), (3), (5) 式から

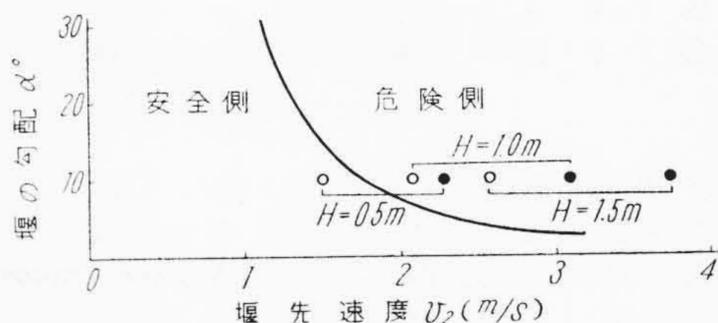
$$v_2 = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{2gH}{1+\phi}} \dots\dots\dots (13)$$

となり、湯口と堰との断面比 a/b ならびに熔鋼のヘッドの平方根に比例することがわかる。したがって a/b あるいは H を変化させることにより v_2 を調節することができる。

すなわち v_2 が大きく危険側にある場合には、 a/b あるいは H を小さくして安全側に入るようにすればよい。

しかし実際の作業上、熔鋼のヘッドは大抵 0.5~1.5 m の範囲に限定されるので、 H を小さくすることはなかなか困難である。ゆえに湯口、堰の設計を行う場合には、最大ヘッドにおいても堰先速度が安全側に入るよう、湯口と堰との断面比をきめておく必要がある。

以上述べた理論に基づいて、製品の堰先すくわれ発生率



	断面比 a/b	すくわれ率
●	1/0.95	56%
○	1/1.40	11%

$\alpha=10^\circ, \phi=1.27$ とする⁽³⁾

第9図 すくわれの検討図

を対象として検討を行った。

第 9 図はある製品のすくわれ不良率に基いて、 $H=0.5\text{ m}$, 1.0 m , 1.5 m とした場合の堰先速度を求めたものである。計算においては $\alpha=10^\circ$, $\varphi=1.27^{(3)}$ とし、湯口と堰との断面比 a/b が $1/0.95$ および $1/1.40$ の二種類を示した。

第 9 図から明らかなように、同じヘッドに対して断面比が大きいほど堰先速度は小さくなっている。また同じ断面比においてもヘッドが小さいほど堰先速度は小さくなる。このことは式の上から見てもわかることである。

さて、すくわれ不良率は断面比 a/b が $1/0.95$ の場合、すくわれ率 56% であつたものが、断面比 a/b を $1/1.40$ にすることによつてすくわれ率 11% に減少している。この事実は理論とよく一致している。境界域に多少のばらつきがあるのは、これは同図を求める場合に、各係数を仮定して計算したこと、および理論においてほかの原因を考慮せず、熔鋼の衝撃力のみによつてすくわれが発生したと考へた結果であると思われる。実際にはほかの因子の影響もあるだろうし、また安全側と危険側との境界も、図に示したような明確な境界ではなく、ある範囲を有するものと思われる。しかし湯口と堰との断面比を決定する場合、第 8 図は一応の目安になるものと考えらる。

5. 結 言

以上の結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 堰先すくわれは熔鋼の堰先速度に影響される。
- (2) 堰先速度がある速度以上、すなわち危険速度になるとすくわれ発生の危険性がある。したがつて堰先すくわれを防止するためには、堰先速度が危険速度にならないようにしなければならない。
- (3) 堰先速度は熔鋼のヘッドの平方根および湯口と堰との断面比に比例して大きくなる。ゆゑに実際の作業範囲の熔鋼のヘッドにおいて、すくわれが発生しないように湯口と堰との断面比をきめておかねばならない。

終りに、本研究に対して終始御指導賜つた九州大学石橋教授に対し深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 長島： 鋳鋼資料 (昭 28)
- (2) 篠田： 日立評論 39, 401 (昭 32-3)
- (3) E.M.H. Lips: Foundry Trade Journal 60 (1939)
- (4) Timoshenko: Theory of Elasticity (1951)

日 立 製 作 所 社 員 社 外 講 演 一 覧

(その 3)

(第 103 頁より続く)

昭和 32 年 12 月受付分

講演月日	主 催	演 題	所 属	講 演 者
33. 4	日 本 機 械 学 会	近似非線形最適制御方式およびサンプル値計算制御との関係	中央研究所	三 卷 達 夫
33. 4	日 本 機 械 学 会	歯車歯面のピッチングについて	中央研究所	橋 本 達 也
33. 4	日 本 機 械 学 会	トランジスタを使用した応力発信器	中央研究所	後 藤 保 之 明
5. 上旬	電 気 通 信 学 会	電気接点の研究 (第 1 報火花特性の測定法)	中央研究所	武 谷 良 明
2. 7~9	日 本 学 術 会 議	チェレンコフ計数管による燃料破損の検出について	中央研究所	太 組 健 児 治 丸 今 井 宗 丸
2. 7~9	日 本 学 術 会 議	中性子束の絶対測定	中央研究所	今 井 宗 丸
2. 7~9	日 本 学 術 会 議	燃料取り換え方式と燃料の Burnup, 中性子束分布について	中央研究所	横 見 迪 郎 和 登 一 法 寺 昌 法 橋 登 一
2. 7~9	日 本 学 術 会 議	輻射とプラズマ	中央研究所	法 橋 登 一
5. 上旬	電 気 四 学 会	非可逆素子を利用する送信コンバータ	中央研究所	宇 佐 美 襄
5. 上旬	電 気 四 学 会	Wagner Thomson 特性の一例について	中央研究所	芳 根 寛 樹
5. 上旬	電 気 四 学 会	高周波増幅器の素子定数偏差	中央研究所	関 口 存 哉
5. 上旬	電 気 四 学 会	二重速度変調管 (Dnplextron) について	中央研究所	沢 田 良 嘉 久
5. 上旬	電 気 四 学 会	6,000 MC 用進行波管の雑音指数	中央研究所	鈴 木 喜 久
5. 上旬	電 気 四 学 会	同位体電磁分離装置の建設	中央研究所	植 本 尚
5. 上旬	電 気 四 学 会	サーボ掛算器の研究 (第 2 報)	中央研究所	沼 倉 俊 郎 武 雄 阿 部 善 右 門

(第 113 頁へつづく)