

鑄造の力学的研究

Study on Theoretical Analysis for Castings

篠田 忠夫*
Tadao Shinoda

内 容 梗 概

鑄物のごとく作用する因子が多いものでは、これら各因子の影響を把握するのに実験ではなかなか困難である。また鑄造欠陥の対策を考える場合に、鑄造時に起る種々な現象をあらかじめ計算により求めておくことが必要である。

以上のような観点より本研究はその第一歩として、注湯時における鑄物砂内の温度分布について理論解析を行うとともに、生型砂内の水分分布と境界部の強さについて実験ならびに力学的考察を行った。その結果次のことがあきらかとなった。

- (1) 乾燥型内の温度分布は計算値と実験値とがよく一致している。したがって温度分布は計算により求められる。
- (2) 生型では、注湯時に乾燥部と未乾燥部とができるが、その境界は水分がなく温度は100°Cである。また乾燥部の厚さ ϵ と時間 t との関係は $\epsilon = \alpha\sqrt{t}$ である。
- (3) 鑄型内の最大水分 ρ_{max} は常に100°C以下の所にある。
- (4) 最初の水分状態 ρ_w と ρ_{max} との比は、 ρ_w が大きくなるにしたがって減少する傾向にあり、かつ ρ_{max} は一定で移動する。
- (5) 乾燥部と未乾燥部との境界部の強さは、搗固め回数にはたいして影響されないが、最大強さは生型砂の強さの約 $\frac{1}{5}$ に減少し、非常に弱くなる。
- (6) 堰先の上型面に発生する掬れは、注湯時に上型面内部に生ずる引張応力のためであると考えられる。

〔I〕 緒 言

鑄造時における鑄型内の温度があらかじめ推定できるならば、鑄造の熱的諸問題に対してきわめて好都合であるばかりでなく、必然的に熱の問題を考慮しなくては鑄造欠陥に対する対策ができない。ところが今日まで鑄型内の温度分布に関しては、実験的には研究および検討もなされているが、これを計算により求めることは計算の困難さのためまだ行われていないようである。たとえば掬れなる欠陥について考えると、砂の接触面から2~3 mmの層が、注湯時にどのような状態になっているかを知るのに実験のみでは正確につかむことはなかなか困難である。一方生型砂では、砂内の水分の蒸発にともなうて水分状態が変化するとともに、乾燥部分と未乾燥部分とが生じ、この両者の境界部の砂強度が非常に弱くなる。したがってこれが掬れの一原因となるのではないかと思われる。

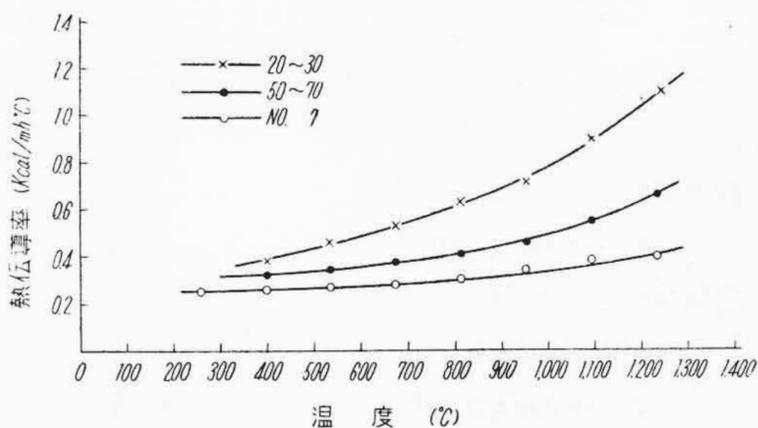
以上のような観点より筆者は注湯時における鑄物砂内の温度分布について理論解析を行うとともに、生型砂内の水分分布と境界部の強さについて実験ならびに力学的考察を行ったのでその概要を報告する。

〔II〕 理 論

(1) 鑄物砂の熱伝導率⁽¹⁾

鑄物砂の熱伝導率は砂の種類、砂粒の大きさ、粘結剤、水分、温度などの諸因子によつて異なるが、熱伝導の面

* 日立製作所笠戸工場



第1図 熱伝導率と温度との関係

第1表 試験砂の粒度分布

砂 の 種 類	米国標準篩メッシュNo.	%
20~30 (Ottawa Silica Co.)	- 16~+ 20	0
	- 20~+ 25	78
	- 25~+ 30	22
	- 30	0
50~70 (Ottawa Silica Co.)	- 40~+ 50	0
	- 50~+ 60	72
	- 60~+ 70	27
	- 70~+ 80	1
	- 80	0
No. 7 (American Gradid Sand Co.)	- 70~+ 80	5
	- 80~+100	76
	-100~+120	17
	-120~+140	2
	-140	0

より考えると、温度以外の諸因子は定数となる。

今、熱伝導率を λ 、温度を u 、 $f(u)$ を温度の函数とすると

$$\lambda = \lambda_0 \{1 + f(u)\} \dots \dots \dots (1)$$

第 2 表 λ_0 および各係数の値

砂の種類	λ_0 (k cal/ mh°C)	$f(u)$ の 係 数		
		a	b	c
20~30	0.200	0.472×10^{-3}	0.949×10^{-6}	0.368×10^{-12}
50~70	0.300	0.034×10^{-3}	0.309×10^{-6}	0.282×10^{-12}
No. 7	0.240	0.174×10^{-3}	0.058×10^{-6}	0.181×10^{-12}

とおくことができる。ここで λ_0 は $u=0$ の時の値である。

第 1 図は Lucks 氏⁽²⁾ が第 1 表の砂について実験したものであるが、これより実験式を求めてみると、大体温度の四次式で近似的に表わされ、実験式は

$$\lambda = \lambda_0(1 + au + bu^2 + cu^4) \dots\dots\dots (2)$$

となる。第 2 表は実験式における各砂の λ_0 および係数 a, b, c の値を示したものである。

(2) 乾燥型砂内の温度分布

問題を簡単化するため砂を半無限固体、湯と接触する砂の接触面温度は一定として解析を行った。

今温度を u 、時間を t 、砂の接触面からの距離を x 、比熱を C 、比重を ρ とし、(1) 式を考慮すると熱伝導の方程式は

$$C_0 \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_0 \left\{ 1 + f(u) \right\} \frac{\partial u}{\partial x} \right] \dots\dots (3)$$

ここで、 C, ρ は温度に無関係で一定と考え、その値を C_0, ρ_0 とした。

初期条件としては

$$t=0 \text{ の時 } u=0 \dots\dots\dots (4)$$

境界条件としては

$$\left. \begin{aligned} x=0 \text{ の時 } u=u_0 \text{ (砂の接触面温度)} \\ x=\infty \text{ の時 } u=0 \text{ (砂の初めの温度)} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

一般に表面温度が一定で半無限固体の場合には $Z = \frac{x}{2k\sqrt{t}}$ なる変数変換により熱伝導の方程式を常微分方程式になおすことができる。したがって $Z = \frac{x}{2k_0\sqrt{t}}$ なる変数変換を行えば、(3) 式は次のようになる。

$$\left\{ 1 + f(u) \right\} \frac{d^2 u}{dZ^2} + \left\{ 2Z + f'(u) \right\} \frac{du}{dZ} = 0 \dots (6)$$

ここで、 $k_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_0 \rho_0}$ で熱の拡散率を表わす。

条件 (4), (5) は

$$\left. \begin{aligned} Z=0 \text{ の時 } u=u_0 \\ Z=\infty \text{ の時 } u=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

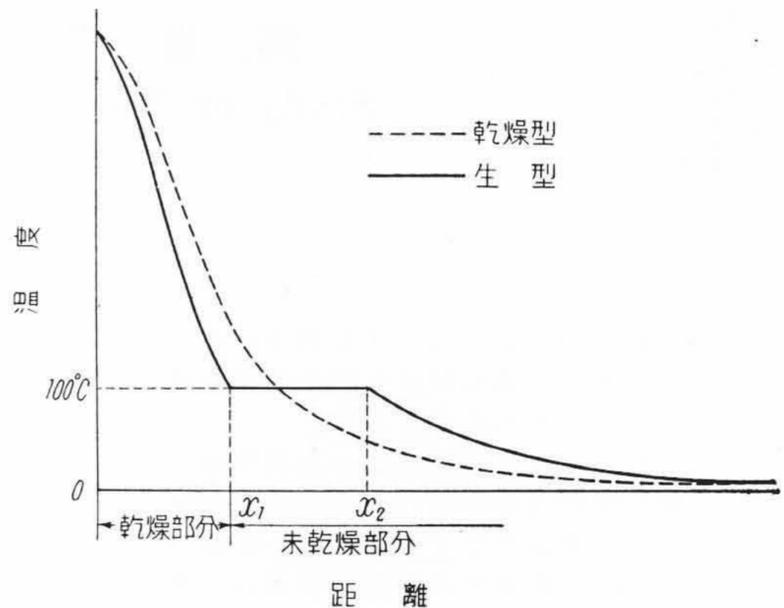
(6) 式において、 u は Z のみの函数であるから、条件 (7) を考慮して $\phi(0)=0, \phi(\infty)=1$ となるような適当な連続函数 $\phi(Z)$ を考えると、(6) 式の解は

$$u = A + B\phi(Z) \dots\dots\dots (8)$$

と表わすことができる。

A, B は常数で条件 (7) より $A = u_0, B = -u_0$ となるから

$$u = u_0 \{ 1 - \phi(Z) \} \dots\dots\dots (9)$$



第 2 図 生型砂内の温度分布の概略図

$\phi(Z)$ の求め方を簡単に説明すると⁽³⁾、 $\phi(Z)$ はディメンションのない量であるから、(6) 式において u をディメンションのない量とするため、 $u = u_0 U$ とおくと (6) 式は

$$\left\{ 1 + f(u_0 U) \right\} \frac{d^2 U}{dZ^2} + \left\{ 2Z + f'(u_0 U) \right\} \frac{dU}{dZ} = 0 \dots\dots\dots (6')$$

条件 (7) は

$$\left. \begin{aligned} Z=0 \text{ の時 } U=1 \\ Z=\infty \text{ の時 } U=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7')$$

ここで、 $\frac{dU}{dZ} = W$ とおくと、 $\frac{d^2 U}{dZ^2} = \frac{dW}{dZ}$ となるから

ら (6') 式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU}{dZ} = W \\ \frac{dW}{dZ} = \frac{2Z + f'(u_0 U)W}{1 + f(u_0 U)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

の連立微分方程式となる。したがって条件 (7') を満足するように (10) 式を解き、解 U を求めればよい。

(3) 生型砂内の温度分布

生型では乾燥型とは異なり、砂内に含有されている水分が注湯時に蒸発して蒸気となるから、生型の温度分布は水分の影響を受けて複雑化してくる。

まず注湯時に、生型砂内に生ずる現象を説明すると、

- (i) 砂内の水分は温度 100°C で蒸発して蒸気になる。
- (ii) 水分が完全に蒸発した部分は乾燥して乾燥部分となり、未乾燥部分との間に境界ができる。
- (iii) 境界部附近はある範囲にわたって温度 100°C で一定である。

以上のような現象が水分が存在するために生じ、温度分布は第 2 図に示すごとく乾燥型とは異なってくる。したがって乾燥部分では乾燥型同様、熱移動は熱伝導のみによつて行われるが、未乾燥部分では、熱伝導および蒸気の移動の両者によつて行われる。なお、蒸気は移動過

程において凝固，蒸発の現象を繰返しながら移動して行き， $x_1 < x < x_2$ の間では凝固，蒸発による熱平衡が保たれているため，温度は 100°C で一定であると考えられる。

以上のごとく生型では蒸気の移動をとまなうので問題は相当複雑化し，これを理論的に解析することはなかなか困難である。しかし実際には乾燥部分の厚さが必要と考えられ，また未乾燥部分の温度は常に 100°C あるいはそれ以下であるから，温度よりも水分分布の方が重要である。したがって乾燥部分の厚さならびに温度について解析を行った。

乾燥型同様，砂の接触面温度を一定，砂を半無限固体と考え乾燥部分の厚さを ε ，乾燥部分に対しては1なる脚符，未乾燥部分に対しては2なる脚符を付け，熱伝導のみを考えた場合の方程式は

(i) 乾燥部分に対しては ($0 < x < \varepsilon$)

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

(ii) 未乾燥部分に対しては ($\varepsilon < x < \infty$)

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$x = \varepsilon$ の境界において水分が蒸発するため， dt 時間に $d\varepsilon$ だけ乾燥すれば単位面積に対し

$$Q = L \rho_w d\varepsilon \dots\dots\dots (13)$$

だけの熱が必要である。ここで， L は水の蒸発熱， ρ_w は単位体積中の水分の重さを表わす。

この熱のうち dt 間に単位面積を通して乾燥部分より伝わるものは

$$Q_1 = -\lambda_1' \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} dt \dots\dots\dots (14)$$

未乾燥部分より伝わるものは

$$Q_2 = +\lambda_2' \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} dt \dots\dots\dots (15)$$

ここで， λ_1' ， λ_2' はともに温度 100°C の時の値を表わす。

$Q = Q_1 + Q_2$ であるから (13)，(14)，(15) 式から

$$\left\{ \lambda_2' \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} \right) - \lambda_1' \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right) \right\}_{x=\varepsilon} = L \rho_w \frac{d\varepsilon}{dt} \dots (16)$$

これが一つの境界条件である。ほかの境界条件として

$$\left. \begin{aligned} x=0 \text{ の時 } u_1 &= \theta_1 \text{ (砂の接触面温度)} \\ x=\infty \text{ の時 } u_2 &= \theta_2 \text{ (砂の初めの温度)} \end{aligned} \right\} \dots (17)$$

また， $x = \varepsilon$ においては常に 100°C であるから

$$(u_1)_{x=\varepsilon} = (u_2)_{x=\varepsilon} = 100^\circ\text{C} \dots\dots\dots (18)$$

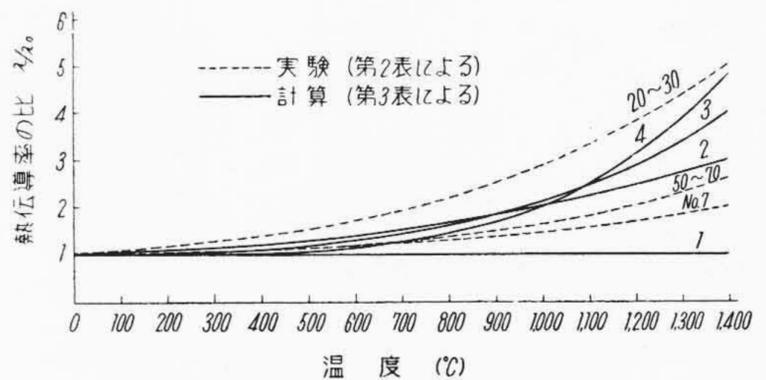
前節(2)で述べたごとく $Z = \frac{x}{2k_0\sqrt{t}}$ なる変数変換を行い， C_1 ， ρ_1 ， C_2 ， ρ_2 を定数と考え， $\phi(0) = 0$ ， $\phi(\infty) = 1$ となるような適当な連続函数 $\phi(Z)$ を考えると，(11)，(12)式の解は

$$u_1 = A_1 + B_1 \phi(Z_1) \dots\dots\dots (19)$$

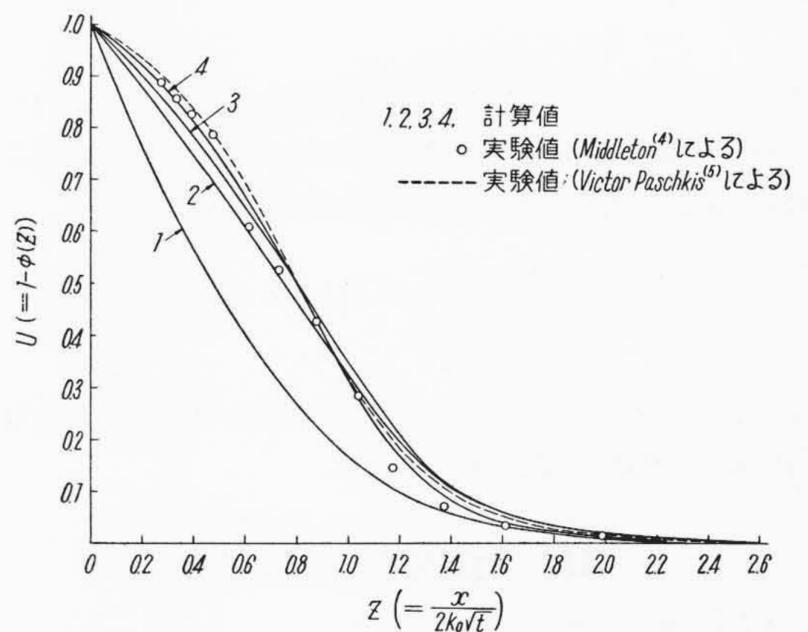
第3表 数値計算に用いた $f(u)$ の形

番号	$f(u)$ の形	$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + f(u_0 U)$	$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + f(u)$
1	0次式	1	1
2	2 "	$1 + 2U^2$	$1 + 1.02041 \times 10^{-6} u^2$
3	3 "	$1 + 3U^3$	$1 + 1.09329 \times 10^{-9} u^3$
4	4 "	$1 + 3.8U^4$	$1 + 0.98917 \times 10^{-12} u^4$

注：鑄鋼を対象として砂の接触面温度 $u_0 = 1,400^\circ\text{C}$ とす。



第3図 数値計算に用いた $f(u)$



第4図 U と Z との関係

$$u_2 = A_2 + B_2 \phi(Z_2) \dots\dots\dots (20)$$

ここで， $Z_1 = \frac{x}{2k_{01}\sqrt{t}}$ ， $k_{01} = \sqrt{\frac{\lambda_{01}}{C_1 \rho_1}}$

$$Z_2 = \frac{x}{2k_{02}\sqrt{t}}$$
， $k_{02} = \sqrt{\frac{\lambda_{02}}{C_2 \rho_2}}$

で λ_{01} ， λ_{02} はともに温度 0°C の時の値を表わす。

(18)式によれば $x = \varepsilon$ の所の温度は常に 100°C でなくてはならぬから， $\phi\left(\frac{\varepsilon}{2k_{01}\sqrt{t}}\right)$ および $\phi\left(\frac{\varepsilon}{2k_{02}\sqrt{t}}\right)$ は t に無関係でなくてはならぬ。それには ε を \sqrt{t} に比例するとおけばよい。ゆえに

$$\varepsilon = \alpha \sqrt{t} \dots\dots\dots (21)$$

$\phi(0) = 0$ ， $\phi(\infty) = 1$ であるから条件(17)，(18)および(21)式を用いて定数 A_1 ， A_2 ， B_1 ， B_2 を求めると

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \theta_1 & ; & \quad B_1 = \frac{100 - \theta_1}{\phi\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right)} \\ A_2 &= \frac{100 - \theta_2 \phi\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right)}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right)} & ; & \quad B_2 = \frac{\theta_2 - 100}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right)} \end{aligned} \right\} (22)$$

また (16) 式は

$$\frac{\lambda_1'}{k_{01}} \cdot \frac{\theta_1 - 100}{\phi\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right)} \phi'\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right) - \frac{\lambda_2'}{k_{02}} \cdot \frac{100 - \theta_2}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right)} \phi'\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right) = L \rho_w \alpha \dots (23)$$

(23) 式より大体の α の値を求めるには

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{\lambda_1'}{k_{01}} \cdot \frac{\theta_1 - 100}{\phi\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right)} \phi'\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right) \\ &- \frac{\lambda_2'}{k_{02}} \cdot \frac{100 - \theta_2}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right)} \phi'\left(\frac{\alpha}{2k_{02}}\right) \\ y &= L \rho_w \alpha \end{aligned} \right\} (24)$$

なる曲線を描き、その交点の横座標を求めればよい。

比例定数 α が決定されたならば乾燥部分の厚さは (21) 式より求められる。また乾燥部分の温度は

$$u_1 = \theta_1 - \frac{\theta_1 - 100}{\phi\left(\frac{\alpha}{2k_{01}}\right)} \phi(Z_1) \dots \dots \dots (25)$$

より求められる。なお u_2 の温度は蒸気の移動をとともなうため解 (20) とは異なってくる。

〔III〕 計算結果とその考察

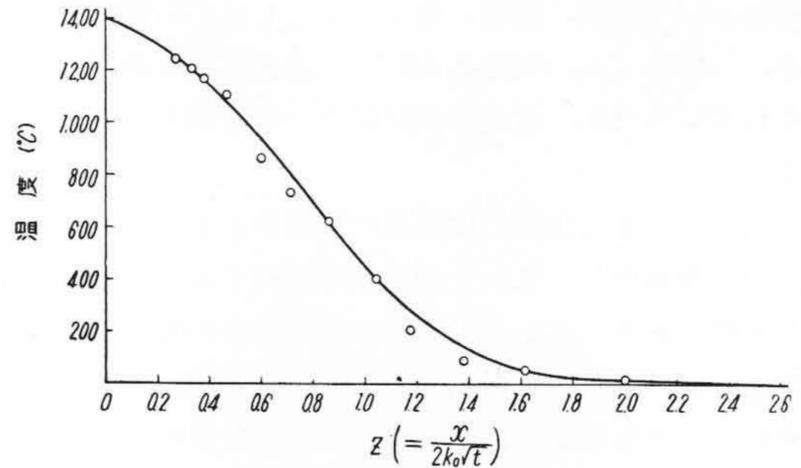
(1) 乾 燥 型

〔II〕の(1)で述べたごとく函数 $f(u)$ の実験式は u の四次式で大体近似されたが、計算を行う場合、第 2 表のように複雑な形では非常に手数がかかるので、第 3 表、第 3 図に示す基本的なものにつき鑄鋼を対象として計算を行つた。

鑄鋼では注湯時における砂の接触面温度は大体 1,400 ~ 1,450°C であるから、 $u_0 = 1,400^\circ\text{C}$ として計算した結果を第 4 図に示す。

第 4 図の実験値は Middleton 氏⁽⁴⁾が求めたものを $\lambda_0 = 0.65 \text{kcal/mh}^\circ\text{C}$, $C_0 = 0.23 \text{kcal/kg}^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 1,600 \text{kg/m}^3$ したがつて $k_0 = 0.07 \text{cm}/\sqrt{\text{s}}$ として、 $Z = \frac{x}{2k_0\sqrt{t}}$ の変数変換により打点したものであるが、 $f(u)$ が u^4 の場合計算値と実験値とがよく一致しているから、 $u_0 = 1,400^\circ\text{C}$ として書きなおしたものが第 5 図である。

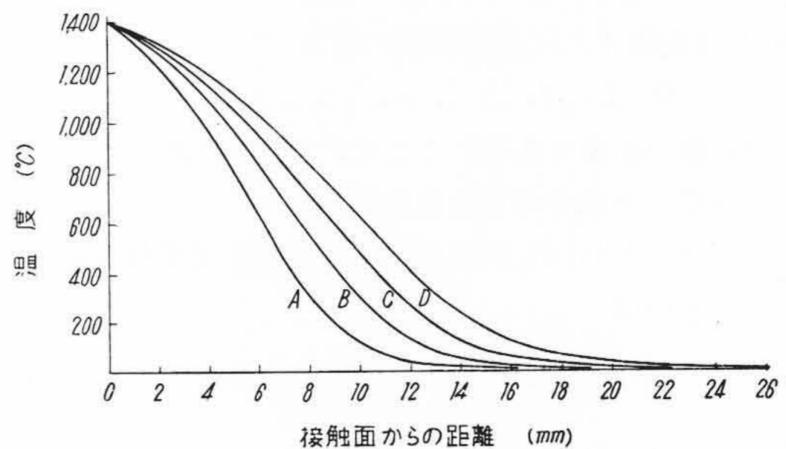
第 5 図からあきらかなごとく計算値と実験値とがよく一致していることがわかる。また第 4 図から $\phi(Z)$ は熱



第 5 図 実験値と計算値との比較

第 4 表 第 6 図における各変数の値

No.	1. $\lambda_0 = 0.65 \text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ と仮定した場合			2. $C_0 u_0 = 386 \text{kcal/m}^3^\circ\text{C}$ と仮定した場合			3. $k_0 = 0.07 \text{cm}/\sqrt{\text{s}}$ と仮定した場合		
	k_0 (cm/ $\sqrt{\text{s}}$)	$C_0 u_0$ (kcal/ m^3°C)	t (s)	k_0 (cm/ $\sqrt{\text{s}}$)	λ_0 (kcal/ mh°C)	t (s)	C_0 (kcal/ kg°C)	u_0 (kg/ m^3)	t (s)
A	0.05	282	55	0.05	0.331	55	0.23	1,600	28.1
B	0.06	368	55	0.06	0.477	55	0.23	1,600	40.5
C	0.07	502	55	0.07	0.650	55	0.23	1,600	55.0
D	0.08	722	55	0.08	0.848	55	0.23	1,600	71.8



第 6 図 距離と温度との関係

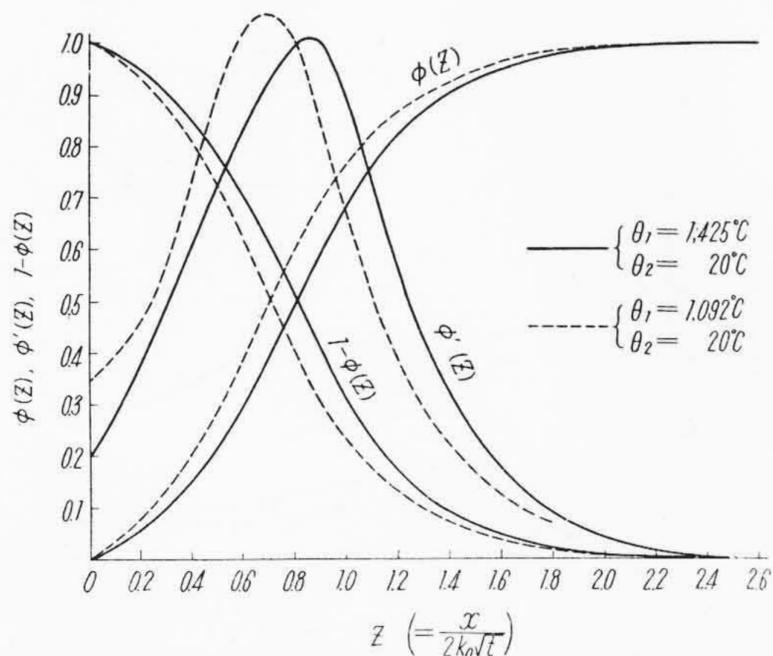
伝導率の形が異なつても鑄物砂であれば大して差がないことがわかる。

したがつて第 5 図を使用することにより、鑄鋼用乾燥型における型内の温度は、使用砂の k_0 さえわかれば計算により求めても差支えないと思われる。しかし鑄鋼以外の場合には、砂の接触面温度が 1,400°C 以外の温度になるので、一応 (10) 式により解を求めておく必要がある。

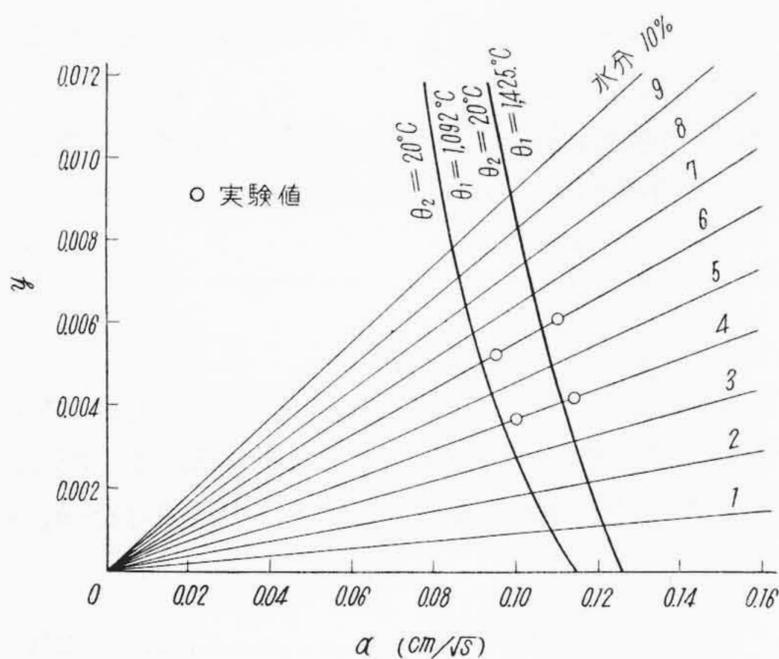
k_0 が変れば温度分布がどのように変化するかという一例として、第 4 表に示す数値につき計算したものが第 6 図である。これより各因子が温度分布に及ぼす影響がわかる。

(2) 生 型

実験値と比較検討するため、Victor Paschkis 氏⁽⁵⁾が実験に使用した第 1 表の 20~30 の砂について計算を行



第7図 $\phi(Z)$, $\phi'(Z)$, $1-\phi(Z)$ 線図



第8図 α の計算図表

つた。

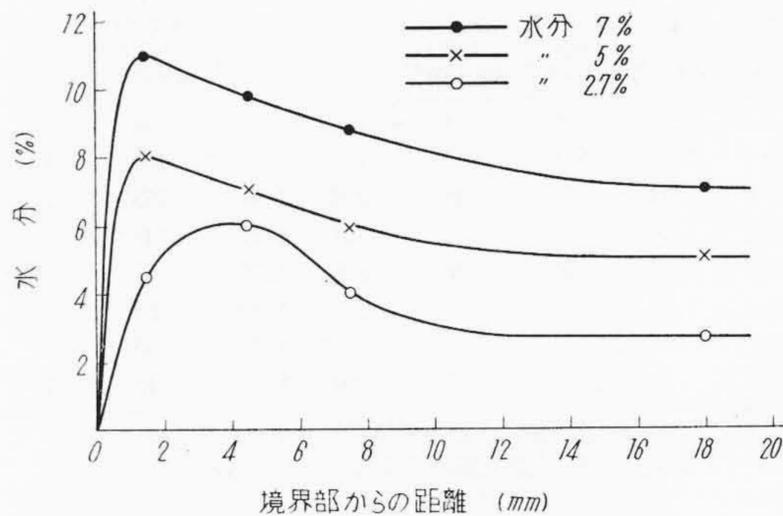
比例定数 α を計算するには、函数 $\phi(Z)$, $\phi'(Z)$, $1-\phi(Z)$ の値が必要であるがこれは前節(1)で求めたごとく計算値と実験値とがよく一致していることから、同砂の実験結果を利用して図式的に求めた。第7図はその結果を示したものである。

$\lambda_0 = \lambda_{01} = \lambda_{02} = 0.20 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, $C_0 = 0.19 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$,
 $\rho_0 = 1,730 \text{ kg/m}^3$, したがって $k_{01} = k_{02} = 0.0411 \text{ cm}/\sqrt{s}$,
 $L = 539 \text{ kcal/kg}$, $\rho_w = 1,730a \text{ kg/m}^3$ (a は水分%を表わす)。

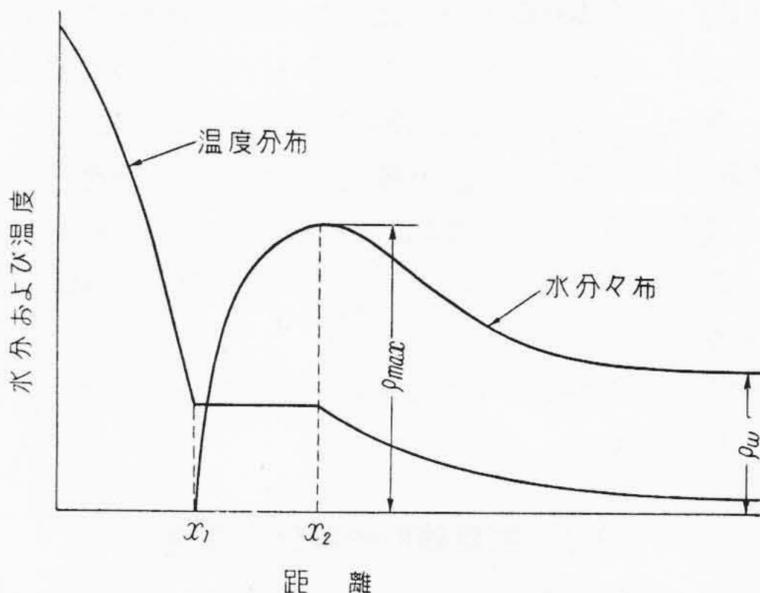
以上の数値により砂の接触面温度 $1,425^\circ\text{C}$, $1,092^\circ\text{C}$ の二つの場合について計算した結果を第8図に示す。

乾燥部分の厚さ ε と時間 t との関係は $\varepsilon = \alpha\sqrt{t}$ であるが、この比例定数 α を計算値と実験値とについて比較してみると、一般に計算値の方が小さい。この理由は理論において熱伝導のみで問題を解析したことで、実際には蒸気の移動をも考慮しなくてはならない。しかし鑄造

No.	配合	極細珪砂	ベントナイト	水分 (%)
1		100	5	2.7
2		100	7	5.0
3		100	10	7.0



第9図 未乾燥部における水分分布



第10図 水分分布と温度分布との関係

時のごとく時間の経過が少ない場合には、計算により求めた比例定数 α を使用しても、差支えないと思われる。

〔IV〕 生型砂内の水分分布

注湯時には生型砂内の水分が蒸発して蒸気が発生するため、砂内の水分状態が変化する。したがって当然未乾燥部における水分分布が問題となってくるが、最近 Wilkerm Wegener 氏⁽⁶⁾が実験的に研究を行っている。

筆者は第5表の砂で $70\phi \times 100\text{mm}$ の試験片を作り、その一端を 900°C に加熱した場合の水分変化を実験した。その結果を第9図に示す。実験では、蒸気が存在しているため水分と蒸気との混合したものしか測定できない。しかし実験結果ならびに温度分布より第10図が想像されるとともに次のことが考えられる。

第 6 表 配 合 表

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

第 7 表 鋳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。

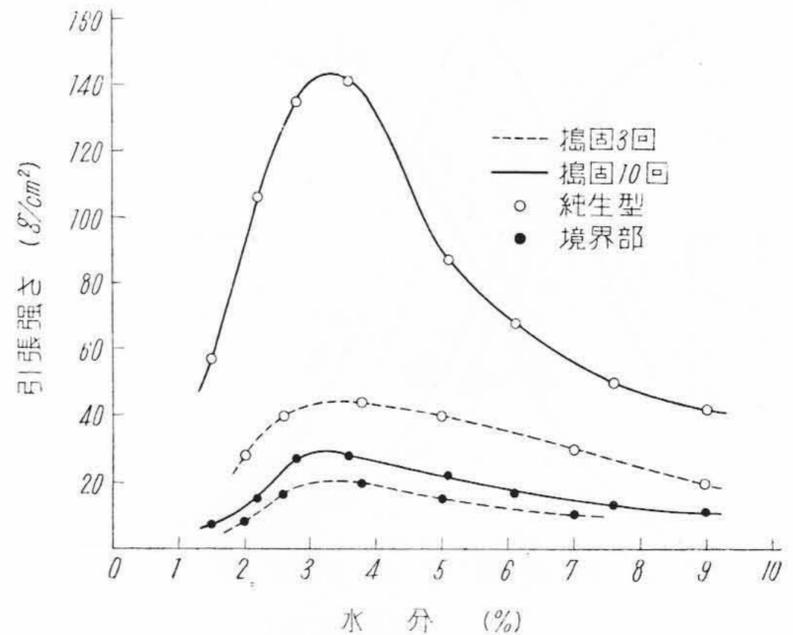
- (i) 乾燥部分と未乾燥部分との境界 x_1 においては水分が存在しない。
- (ii) 温度 100°C の所では蒸発，凝固の熱平衡が保たれているから水分は増加しない。したがって最大水分 ρ_{max} は常に温度 100°C 以下の所にある。
- (iii) 最初の水分 ρ_w と最大水分 ρ_{max} との比 $\frac{\rho_{max}}{\rho_w}$ は水分 3~4% で約 2 倍であるが， ρ_w がこれより大きくなるにしたがって $\frac{\rho_{max}}{\rho_w}$ は減少する傾向がある。
- (iv) 鋳込後時間の経過が少い範囲で ρ_{max} は一定で移動する。

〔V〕 生型砂の境界部の強さ

従来，砂の強さはほとんど全部抗圧力によつて表わされ，これに基き実験ならびに研究が行われてきた。しかし一般に砂は圧縮よりも引張に対する方がはるかに弱い。したがって注湯時，砂内部に圧縮および引張の 2 力が生じ，圧縮力の方が砂の抗圧力より小さくても引張の方が砂のそれより大きい場合には，砂は当然引張のため破壊する。また生型では注湯時に乾燥部分と未乾燥部分とができるが，乾燥部分に比べて未乾燥部分の方が弱いことはあきらかである。特に両者の境界部では蒸発した水分がふたたび凝固して水分のみが急激に増加するため，強さは初めの状態すなわち注湯前の状態よりも弱くなつていゝと考えられる。以上のような観点から，生型砂の乾燥部と未乾燥との境界部の強さについて実験ならびに力学的考察を行つた。

(1) 実験方法

抗圧力に比べて引張強さの方が弱いこと，および境界部の強さの実験には抗圧力試験が困難であることなどを



第 11 図 引張強さと水分との関係

考慮して引張強さの実験を行つた。砂の引張強さを求めるのに一般には実験方法として次の二つの方法がある。

(a) 引張試験

厚さ一定の瓢箪形の試験片を引張り，力 P で切断した場合，最小断面積を A ，引張強さを σ_T とすると

$$\sigma_T = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (26)$$

(b) 曲げ試験

矩形断面の細長い試験片を台の一端より突出してゆき，長さ l の時，砂の自重によつて折れる。この場合，試験片を片持梁の等分布荷重と考え，引張強さを σ_b とすると

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{Z} \dots\dots\dots (27)$$

ここで $M_{max} = \frac{l^2 w}{2}$, $Z = \frac{bh^2}{6}$

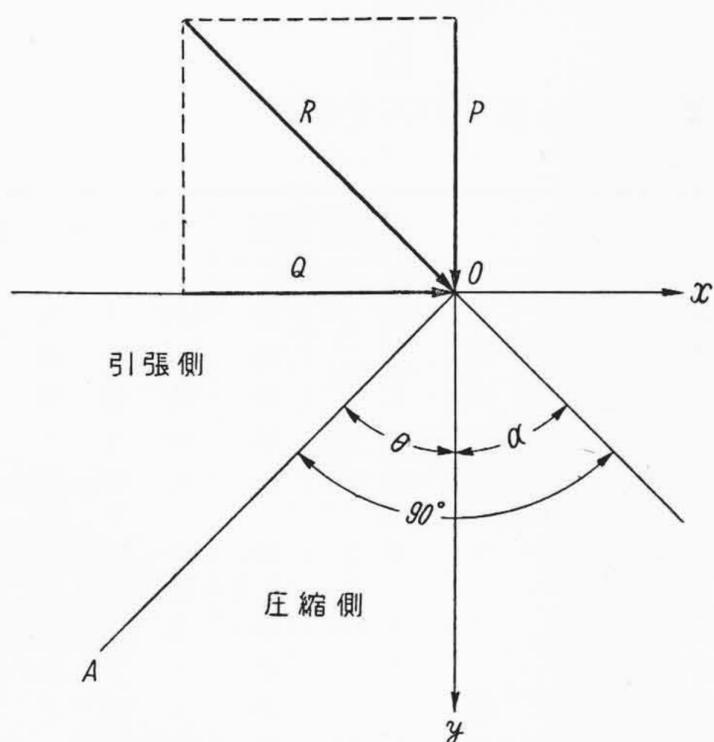
w : 単位長さの重量, b : 幅, h : 高さ

以上 (a), (b) の 2 方法により基礎実験を行つた結果，両者のいずれの方法で求めても，引張強さは大体同じであつた。したがって実験方法の簡単な曲げ試験により境界部強さの実験を行つた。

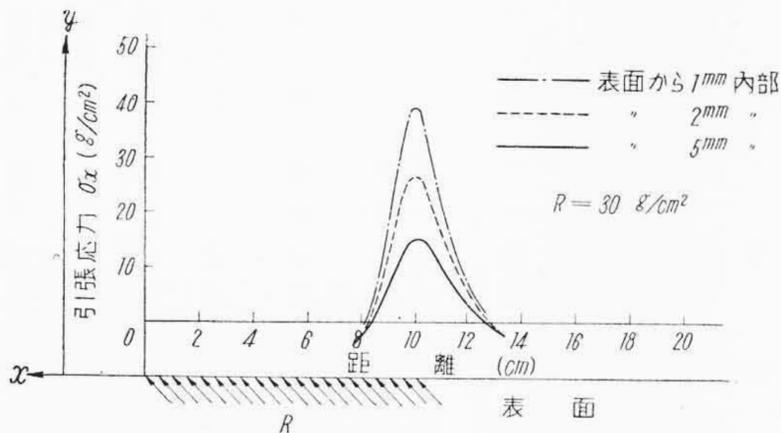
(2) 結 果

第 6 表の鋳鋼用純生型砂で 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 7 表，第 11 図に示す。実験結果から次のことがわかる。

- (i) 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。
- (ii) 生の最大引張強さは抗圧力の約 1/5 で，抗圧力に対して引張強さは非常に弱い。
- (iii) 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つていゝ。
- (iv) 搗固回数の影響は生では大きく表われていゝ



第12図 平面上に作用する力



第13図 内部に生ずる引張応力 σ_x

が、これに反し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つてわずか強くなっているだけである。

(3) 力学的考察

今平面上に第12図に示すような力が作用した場合、内部に生ずる応力 σ_x, σ_y は次式にて表わされる⁽⁷⁾。

$$\sigma_x = -\frac{2R}{\pi} \cdot \frac{1}{y} \cos(\alpha + \theta) \cos \theta \sin^2 \theta \dots (28)$$

$$\sigma_y = -\frac{2R}{\pi} \cdot \frac{1}{y} \cos(\alpha + \theta) \cos^3 \theta \dots (29)$$

$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ であるから、 $\sin \theta > 0, \cos \theta > 0$ 、したがって σ_x, σ_y が引張応力となるためには $\cos(\alpha + \theta) < 0$ でなければならない。すなわち $\alpha + \theta > \frac{\pi}{2}$ 、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。作用する力がある範囲にわたっている時には (28), (29) 式を積分すればよい。

したがって注湯時において砂内に引張応力が生じた場合、境界部は非常に弱くなるので、内部に生ずる引張応

力が境界部の強さより大きくなれば、砂は境界部から破壊する可能性が多分にあると思われる。たとえば堰先の上型面に生ずる掬れなどは、このような原因のために起るのではないかと思われる。

今、大体的見当をつけるため 10 cm の範囲にわたつて、 30 g/cm^2 の力が平面に対して 45 度の傾斜で作用すると仮定した場合、内部に生ずる応力 σ_x を計算したのが第13図である。同図から砂の接触面附近 1~2mm の所には、境界部の強さよりも大きい応力が生じていることがわかる。ゆえに注湯時においてこのような状態が起るならば、砂は境界部から破壊し、掬れが生ずるのは当然である。

[VI] 結 言

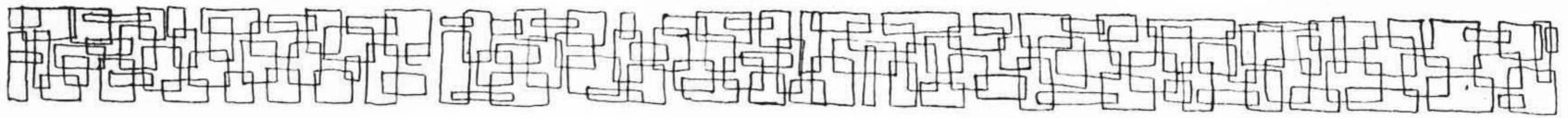
以上の研究結果を要約すると下記の通りである。

- (1) 乾燥型内の温度分布は計算値と実験値とがよく一致している。したがって温度分布は計算により求められる。
- (2) 生型では、注湯時に乾燥部と未乾燥部とができるが、その境界には水分がなく温度は 100°C である。また乾燥部の厚さ ϵ と時間 t との関係は $\epsilon = \alpha \sqrt{t}$ である。
- (3) 鑄型内の最大水分 ρ_{\max} は常に 100°C 以下の所にある。
- (4) 最初の水分状態 ρ_w と ρ_{\max} との比は ρ_w が大きくなるにしたがつて減少する傾向にあり、かつ ρ_{\max} は一定で移動する。
- (5) 乾燥部と未乾燥部との境界部の強さは搗固回数にはたいして影響されないが、最大強さは生型砂の強さの約 $\frac{1}{5}$ に減少し、非常に弱くなる。
- (6) 堰先の上型面に発生する掬れは、注湯時に上型面内部に生ずる引張応力のためであると考えられる。

終りに臨み、本研究に対して終始御指導賜つた九大石橋教授、御鞭撻下さつた日立製作所笠戸工場矢部工場長および松本部長に対し深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 吉田正夫： 鑄鋼用生型砂の基礎研究 (昭-27)
- (2) C.F. Lucks: Trans. A.F.S. Vol. 55 (1947)
- (3) 日高孝次： 数値積分と数値計算 (昭-24)
- (4) J.M. Middleton: Trans. A.F.S. Vol. 61 (1953)
- (5) Victor Poschkis: Trans. A.F.S. Vol. 59, 60 (1951, 1952)
- (6) Wilkelm Wegener: Giesserei 26 Mai (1955)
- (7) Timoshenko: Theory of Elasticity (1951)



日立製作所社員社外寄稿一覧 (昭和31年11月受付分)

寄稿先	題 目	執筆者所属	執 筆 者
産業機械協会	ワールドストリップミル	日立工場	山本 秀幸
火力発電技術協会	Ⅲ-3 褐炭の熔融性とサイクロン燃焼	日立工場	山崎 泰三
火力発電技術協会	Ⅲ-6 石炭灰中のアルカリ定量法	日立工場	佐藤 信三
電気書院	誘導機応用の新しい考え方	日立工場	麻生 重健
特殊鋼倶楽部	四重スキンパス圧延設備	日立工場	田中 野塚
アグネ出版社	核燃料の非破壊検査法	日立工場	小野 飯島
日本鉄道車輛工業協会	ウイリソン連結器の強度	笠戸工場	進 藤子
日本鉄道車輛工業協会	日立GSA-6型戸ジメ機械について	笠戸工場	金子 橋剛
日本鉄道車輛工業協会	ケープルカーの制動装置	笠戸工場	大寺 多崎
コロナ社	化学工業用ポンプ	亀有工場	本 真
コロナ社	ポンプの運転計画設備	亀有工場	本 真
興学館	チェインコンベヤ	亀有工場	真 崎
工学出版社	運搬物の特性	亀有工場	真 崎
工業調査会	トランスファマシンのワークセッティングの方法と加工精度	川崎工場	松 倉
自動制御研究会	トランスファーマシンについて	川崎工場	花岡 浩一
小峰工業技術KK	マグネティッククラッチ	川崎工場	松 倉 寿
養賢堂	等比標準数による切削工具管理の合理化	川崎工場	葛 上 一
養賢堂	量産工場におけるトランスファーマシンの利用	川崎工場	花岡 浩一
農業電化協会	最近のコンデンサモートルについて	亀戸工場	園山 正
埼玉県X線技師会	間接撮影時の散乱線防護装置について	亀戸工場	石橋 正
養賢堂	下請工場の管理	亀戸工場	飯島 正
広島通商産業局	H種乾式変圧器	亀戸工場	鬼頭 正
日本印刷出版KK	H種絶縁交流アーク熔接機	亀戸工場	鬼頭 正
電気通信学会	線型回路網の機械的節点解析法について	戸塚工場	徳 永利
日刊工業新聞社	14吋90度偏向FMB-490について	戸塚工場	真 島
日本規格協会	二次計画について	中央研究所	島 萱
照明学会	点灯管余談	中央研究所	山本 博
日本鋳物協会	球状黒鉛鉄の理論	中央研究所	奥 本
日本規格協会	二元配置実験における効果の曲面方程式の推定	中央研究所	宮 城
日本金属学会	クロム銅の研究(第1報)銅側状態図について	中央研究所	土 井
日本鉄鋼協会	黒鉛坩堝内の鉄鋼試料の测温	中央研究所	米 田
東大総合試験所	A New Electron Microscope Excited with Permanent Magnet	中央研究所	木 村
四国電力	電気冷蔵庫	大阪営業所	池田 文
四国電力	井戸ポンプ	大阪営業所	池田 文
日産自動車KK	ニッサン、オースチンA50の国産気化器	本社	木 邑
生産技術協会	日立の船用機関の現況について	本社	森 島
規格協会	設備投資の経済性計算	本社	村 川
日本科学技術連盟	設備計算の仕方	本社	村 川
生産技術協会	日立の火力発電機器の現況	本社	細 井
鉄道電化協会	日立の輸出電気車輛について	本社	河 合
工業資料社	わが国通信機の一、二の動向について	本社	村 上
千元社	抄紙機のヘルパードライブ	本社	村 上