OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	生砂鋳型の水分凝縮層とその鋳造欠陥発生に関する基礎的研究
Author(s)	松浦, 正史
Citation	大阪大学, 1981, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/33074
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

生砂鋳型の水分凝縮層とその鋳造欠陥発生に関する基礎的研究

1980

松　浦　正　史

生砂鋳型の水分凝縮層とその鋳造欠陥発生に関する基礎的研究

松　浦　正　史

目　　次

記号表

第1章　緒　論…… 1
1－1　本研究の目的…… 1

1－2　従来の研究…… 2
1・2・1　生型の熱伝達…… 2
1・2・2　水分凝縮層の性質…… 4
1・2・3　鋳造欠陥との関係…… 5

1－3　本研究の基本方針…… 8

第2章　水分凝縮層の生成及び移動…… 9
2－1　水分凝縮層生成の観察…… 9
2・1・1　緒　言…… 9
2・1・2　多点電気抵抗式水分計の製作…… 9
2・1・3　実験方法……11
2・1・4　実験結果及び考察……11
2・1・5　結　言……17

2－2　蒸気吹込みによる水分凝縮層の生成とその通気性……18
2・2・1　緒　言……18
2・2・2　水分凝縮層の生成実験……18
2・2・3　水分凝縮層の通気性……23
2・2・4　結　言……28

第3章　水分凝縮層の移動に関係する水蒸気圧……31
3－1　緒　言……31

3－2　実験方法……32

3－3　実験結果及び考察……32
3・3・1　予備実験……32
3・3・2　型内の圧力分布……33
3・3・3　水分凝縮層の厚さと乾燥域の圧力との関係……35

3－4　結　言……36

第4章　鋳込み後，生型内における熱及び水分移動モデル……37
4－1　近似解析……37
4・1・1　緒　言……37
4・1・2　条件設定……37
4・1・3　境界条件……38
4・1・4　生型の温度分布……40
4・1・5　蒸発定数……41
4・1・6　実験及び考察……43
4・1・7　結　言……49

4－2　数値解析……50
4・2・1　緒　言……50
4・2・2　シミュレーション・モデル……50
4・2・3　実験方法……53
4・2・4　計算結果及び実験結果と考察……54
4・2・5　結　言……56

第5章　すくわれ系鋳造欠陥に及ぼす水分凝縮層の影響……59
5－1　水分凝縮層とすくわれとの関係……59
5・1・1　緒　言……59
5・1・2　シミュレーション実験……59
5・1・3　実験結果と考察……60
5・1・4　結　言……65

5－2　水分凝縮層に起因するすくわれ系欠陥の発生機構……66
5・2・1　緒　言……66
5・2・2　実験方法……66
5・2・3　実験結果及び考察……67
5・2・4　結　言……73

第6章　総　括……75

謝　辞……78

参考文献……79

記　号　表

〔記号〕	〔説　明〕	〔単　位〕
A (1)	試片断面積	cm^2
A (2)	定　数	
B	定　数	
b	熱拡散度$\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$	$cal/cm^2 \cdot sec^{1/2} \cdot ℃$
C	比　熱	$cal/g \cdot ℃$
C_{Pw}	水の比熱	$cal/g \cdot ℃$
C_{PS}	ベントナイトを含んだ砂の比熱	$cal/g \cdot ℃$
d	砂粒子径	cm
E	弾性係数	$(kg/cm^2)/(cm/cm)$
h (1)	試片高さ	cm
h (2)	蒸気－砂粒間の熱伝達率	$cal/cm^2 \cdot sec \cdot ℃$
k (1)	通気度	
k (2)	温度拡散率	cm^2/sec
$\overline{k}$	通蒸気度	
L	水の潜熱	cal/g
ℓ	長　さ	cm
m	飽和域の水分率	g/g
M	初期水分率	g/g
P	圧　力	mmAq
p	差圧力	$cm^2 \cdot g/cm^2/cm$
S_v	容積比表面積	cm^2/cm^3
Sc	平均通路断面積	cm^2
t	時　間	sec
T	温　度(1)	℃
Ts	鋳物／鋳型界面温度	℃
Tm	平均温度	℃
ΔT_{ss}	蒸気と砂粒の温度差	℃
v''	100℃，1気圧における水蒸気の比容積	cc/g
v	水蒸気の流速	cm/sec
V	単位時間当りの蒸気発生量（体積）	cm^3/sec
W	水蒸気量	g
x	距　離	cm
X_s	絶対湿度	g/g
Z	水の分子量	
α (1)	鋳型の空げき率	cm^3/cm^3
α (2)	線膨張係数	cm/cm

ε	歪	cm/cm
θ	温度(2)	℃
θ_i	鋳物／鋳型界面温度	℃
θ_o	鋳型初期温度	℃
λ	熱伝導率	cal/cm・sec・℃
μ	液体の粘度	c.p.
$\overline{\mu}$	粘性比　$\overline{\mu}_{steam}/\mu_{air}$	c.p./c.p.
$\overline{\mu}_{stam}$	100℃，1気圧における蒸気の粘度	c.p.
μ_{air}	100℃，1気圧における空気の粘度	c.p.
ρ_a	水蒸気の密度	g/cm³
ρ	鋳型の密度	g/cm³
σ	応　力	kg/cm²

Tの上付きp（＝0，1，2・・・）；時刻t＝p・Δtの値
Tの下付きn（＝0，1，2・・・）；x＝n・Δx（r＝n・Δr）の値

添　字
1またはD　乾燥域
2またはC　凝縮域

第1章　緒　　論

1－1　本研究の目的

生型用の砂はシステム・サンドとして繰り返し使用され，公害も比較的少なく，量産用鋳型として主流をしめている。

この水分を含んだ鋳型に金属溶湯を鋳込むことは，危険なことであり，矛盾しているようにもとれる。しかし現場で100年以上も日常的に利用されつづけてきたのは経験による試行錯誤の結果である。これまでは現場技術に依存し，理論的な裏付けがないがしろにされてきたのではないだろうか。そのためこの分野では欠陥対策に追われ根本的な究明は未解決である。

この生型に注湯すると型内の水分はどのような挙動を示し，製品である鋳物に影響を与えるか考えてみたい。主として鋳型の側から考えると，型は溶湯に接する方の面から加熱される，生型は，けい砂－粘土－水および空隙よりなっているのでこれらを媒介しての熱伝達を考えねばならない。なかでも水分は100℃にて蒸発し，空隙を通って移動する。熱と物質の同時移動が起っている。

また鋳造時における熱伝達は温度範囲が広く，室温から1,000℃以上に及ぶ。その熱流束もかなり大きい。このように考えてゆくと，生型を用いた鋳造プロセスは伝熱工学の問題としても興味深いものがある。

生型には，すくわれ，吹かれ，そして鋳型壁移動などの鋳造欠陥が発生しやすい。これらの

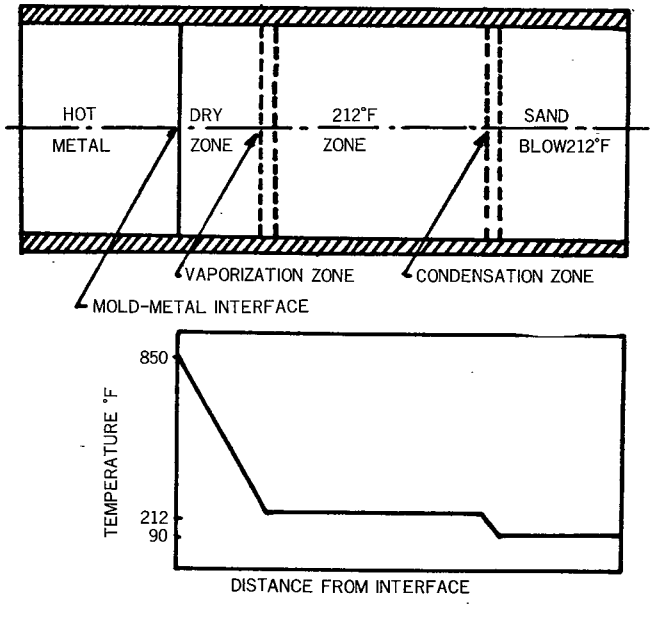


図1　Marekによる注湯後の生型内区分[1)]

欠陥の発生機構を解明してゆくうえには，水分凝縮層の挙動を含む鋳型内部に発生する諸現象を観察し，その特徴を理解することが必要である。

本研究は生型に注湯後発生する水分凝縮層の特性および，これに関連する生型熱伝達や鋳造欠陥の発生機構を明確にしようとするものである。

Marek[1]は注湯後の生型内の水分状態を図1のように区分したが本稿では以下に示すように，乾燥域，飽和域，凝縮域及び初期水分域と区分する。また，乾燥域と飽和域及び飽和域と凝縮域との境界をそれぞれ蒸発界面，凝縮界面とする。

乾　燥　域：温度が100℃以上で遊離水分のない範囲。

飽　和　域：温度がほぼ100℃で一定，水分率も一定の範囲。

凝　縮　域：温度が初期温度から100℃までの間で，水分も初期水分率から飽和水分率の範囲。

初期水分域：温度は初期温度，水分は初期水分率の範囲。

水分凝縮層：初期水分率より水分率の多い範囲，よって飽和域および凝縮域を含む。

生型に鋳造された鋳物が欠陥のない，健全なものであるよう多くの研究者によって，これまで調査研究されてきた。鋳造欠陥にも金属溶湯によるものや，鋳型によるもの，そしてそれらが互いに関係するものがある。それらのいずれかであるにせよ欠陥に対する要因の数が多く，その調査研究は方法論的にも多様である。従来では一つの鋳造欠陥に対して考えうる全ての要因をとりあげて，それらひとつひとつを実験条件として変化させ，造型・注湯・凝固のプロセスを経たうえで鋳物の欠陥の有無を調べ，鋳造欠陥と実験条件である要因との因果関係を求めた例が多い。

注湯から凝固に至るプロセスの中で，鋳型内での経時的な状態変化を理解することができれば，鋳造欠陥の発生する，あるいは発生しそうな注湯後の時間や場所を推測することが可能になり，鋳造欠陥の発生機構も明らかにできるものと考えられる。またこの研究で得られた生型内の状態変化の理解は鋳物の凝固解析にも多いに役立つことが予想される。水分凝縮層の研究は生型における鋳造欠陥の発生機構を明らかにしようとする必要から始められた。

1－2　従来の研究

1・2・1　生型の熱伝達

生型の熱伝達については，第一に乾燥型と比較して，鋳型内の水分が鋳物の冷却能にどのように影響するかRuddleら[2]，Berryら[3]および新山[4]が調べている。これらの研究では水分の影響は少ないと述べているが，みかけの熱伝導率だけで内容が考察されておらず，それだけで影響がないとは言えない。

第二には，すくわれ系の鋳造欠陥発生機構を調べるにあたって，水分凝縮層を調査する必要から生型熱伝達研究がおこなわれてきた。

第三は，生型が，けい砂－粘土－水系鋳型とも言われ，その熱伝達は固体－液体－気体の集合体による熱伝達で，水分は蒸気となって型内を移動するため，物質移動を含む熱伝達である。温度は室温から1,000℃以上に及ぶ高範囲であり，しかも伝達される熱流束はかなり大きい。熱伝達としては特異なもので，この点については新山[5]および梅村[6]の解説もある。

注湯後の生型熱伝達は鋳型にとっては表面からの急熱乾燥である。一般に乾燥型を製作する場合におこなわれている乾燥と異なる点は，加熱が一方向からおこなわれていること，加熱温度および熱流束が著しく大きいことなどである。よって一般におこなわれている段階的乾燥や，多孔質の表面乾燥（熱流束が比較的小さい場合）とはその乾燥機構が異なる。

1．シミュレーションによる方法

Paschkis[7),8)]はelectric analyzerを用いてアナログ的に生型の温度分布を求めている。水分の蒸発潜熱を電気容量におきかえる工夫をしている。これは棚沢のデータを用いているが，蒸気の移動や凝縮を考慮すれば問題がある。しかし，以後表わされた多くの文献と比較しても実用性に富んだまとまりのある研究である。

電子計算機を用いて温度分布を求めたのはCappy[9)]らである。計算の手続きが記されていないので，詳細についてはわからないが蒸気の流速を求めているので，水分の移動もとり入れて計算されているものと思われる。しかし実験による温度分布とかなりの隔りがあり，未だ完成されたものではないようである。

2．実験的方法による研究

Marek[1),10)]がまず最初にこの水分凝縮層の研究を行った。鋳込み後における水分凝縮層を含む生型各層の定義をおこない，各層に存在する蒸気圧を求め，10数㎜水柱圧であることがわかった[1)]。次いで各層の熱伝達をとりあげ，なかでも凝縮層の通気性に着目して水分凝縮層の生成との関係を求めている[10)]。しかし各層が単独に求められており，生型の熱伝達として考えられていない。

Hoffmann[11)]は生型試片をばく熱し，その重量減少量を測定した。あわせて鋳込み実験をおこなった結果，開いた鋳型空間と閉じた鋳型空間では水分の蒸発状況が異なると述べている。したがって水分凝縮層の発生も異なるのは当然であり鋳型の表面が金属溶湯で覆われた場合と，てらされた場合では水分凝縮層の発生が異なるので，鋳込み実験を想定したばく熱実験ではこれらのことを理解して実施すべきである。

Draper[12)]は過熱蒸気を標準試片に送り込んで，その温度変化を調べ，Marekの実験結果と比較している。すなわちベントナイト，けい砂粒度，水分率，通気度を変化要因とし，それぞれに対する蒸発界面，凝縮界面の移動への影響を調べ，熱伝達速度に影響する主な要因は1）通気度，2）試料砂の全表面積，3）試料砂の比熱などであることを指摘している。さらにDraperら[13)]は水分凝縮層の移動状況がわかるように，鋳込み実験の結果を距離－時間軸上に蒸発界面と凝縮界面をあらわし水分率，粘土含有量，鋳込み温度，けい砂の粒度によって5つの型に分類している。

3．解析的方法による研究

Veinik[14)]は鋳込み実験による温度変化曲線をべき指数nのn階放物線式であらわし，これをもとにフーリエの伝熱法則や熱収支を考えながら半実験解を求めている。温度分布と水分分布の関係を明らかにしている。半実験解であるため実際と良く一致している。

Hevek[15)]らはStefanの式をもとに通気度係数を用いて，鋳型内の水分率を求めているが，水分凝縮層内の最大水分率は鋳型空間が全て水分で満たされた状態である25%としており，その水分率測定に誤差が大きいので，理論値と実験値の差が多い。

Chowdiah[16)]は熱収支から蒸発界面移動係数と凝縮界面移動係数を求めたうえ，これを境界条件として伝熱偏微分方程式を解いた。凝縮域はみかけの熱伝導率を用いている。

しかし水分凝縮層の水分率に着目していないため境界条件を誤っている。

篠田[17]は生型の熱伝達に変数変換をおこない，Neumannの方法[19]で解いているが，水分率や通気性にはふれていない。

斎藤ら[18]は蒸気を吹き込んで求めた通気度を飽和域の等価温度拡散率としている。界面移動係数を実験によって求めた値を用いているので純粋に解析的方法とは言えない。また凝縮域の水分率は空隙を全て水で満たしているものとして求めており実際とは異っている。

生型熱伝達についてまとめると水分凝縮層の水分率を確認しないで，伝熱解析をおこなった研究が多く，それらは満足な解を得ていない。

飽和域から乾燥域に変化する蒸発界面の移動係数は氷の融解の問題で有名なNeumannの方法を用いるのが一般的である。このとき飽和域の水分率に注意しなければならない。蒸発界面で発生した蒸気がどのように飽和域を通過し，凝縮してさらに飽和域を生成せしめるのか，未解決の問題である。いずれにせよ，造型条件や注湯条件を設定すれば，注湯後の鋳型内温度および水分分布が求まるような解析が望まれる。

1・2・2　水分凝縮層の性質

1．水分凝縮層の水分率

生型熱伝達を考えるさいに飽和域の水分率を知ることをまず第一にすべきであると先に述べた。

型内の水分率を測定する方法については森[20]が文献を整理している。Gittus[21]およびHevek[15]は電気抵抗によって型内水分の移動状況を調べた。Marek[22]は初期水分率と飽和水分率との関係を図で示し，Veinik[14]は飽和水分率は凝縮による水分増加であるとした計算値と，鋳型から採取・測定した値との比較をおこない良い一致をみている。

2．水分凝縮層の強さ

一般に過多な水分を含んだ鋳型は最適添加水分を含んだ鋳型と比較して強さの低下はまぬがれない。水分凝縮層の過多水分は凝縮によって型砂表面に付着したものであり，練る作業を経ていないので，強さの低下は特に著しい。

Patterson[23]らによれば，水分凝縮層の強さは乾燥域の1/100，初期水分域の1/10である。Marek[24]は水分凝縮層の圧縮強さを初期水分域のそれと比較して55%の低下と述べている。

Patterson[25]らは水分凝縮層の引張強さを測定するための水分凝縮層の引張試験機を製作した。これは氏の研究からすくわれ系鋳造欠陥に水分凝縮層の引張強さが大きく関係しておりその必要から製作された。またMarek[24]も引張強さの測定をおこなっている。

3．水分凝縮層の通気性

これまでの通気度は鋳型空間ないし，鋳型内に発生したガスを型外に排出する指度として考えられていた。水分凝縮層の通気度はMarek[27]が初期水分域と比較して，31%減少することを調べ，また後に通気度のみをとりあげ，生型の各層における通気度の意義を述べている。

斎藤[18]らは飽和域内の蒸気移動が圧力勾配によるとの考え方から通気度を飽和域（蒸気通過層）内の等価温度伝導率に等しいとし，生型砂をつき固めたパイプの一方から圧力55mmAqの蒸気を吹き込み，圧力および温度分布の時間的変化から等価温度拡散率を

求めた。野幌砂で1～2㎠/min，オリビン砂で2～5㎠/minである。鋳込み後の型内の蒸気圧はMarek[28]によれば数10㎜Aq程度である。鈴木[29]らも同様な結果を得ている。

1・2・3　鋳造欠陥との関係

水分凝縮層はすくわれ系欠陥の発生機構を研究するさいに生じた問題である。熱伝達によって型内各層の発生・移動を知り，かつ各層の強度や通気性をあわせて考えて，鋳込み後型内のどのような場所と時刻に，どのような変化が起っていか知ることができれば生型の欠陥発生機構を解明することができる。

以上のような点を理解することができれば，生型の研究も体系化され，普遍的なものになってゆくと思われる。

その結果，これまでとは異った観点から型砂の管理や方案および鋳型の設計をおこなうことも可能となるであろう。生型砂の基本的な特性を理解したうえで，造型条件を設定すれば，欠陥が，どこにどの程度発生するか予測できるようになることが理想であろう。

1．すくわれ系欠陥

錦織[30]はすくわれ系欠陥の研究結果を地区別，年代別に整理している。鈴木[31]らは発生因子と，それを主張した研究者の一覧表を作成している。1960年代中頃まではもっぱら平らな生型表面に溶湯が接触し，鋳型のその部分は膨張する。その膨張に耐えられない強さであれば，型表面にき裂が発生し，型のき裂は鋳物の欠陥となって製品にあらわれる。すくわれ系欠陥の主な要因は鋳型の膨張と強さとの関係であるとされてきた。対策としては，新砂よりは古砂を，角ばった砂粒より丸い砂粒を，また膨張に対する緩衝材として木粉やピッチなどの第二次添加材を加えるのが良いということであった。鋳型強度については，ベントナイトの選択が重要とされ錦織[32]の研究はこの面に力点がおかれている。

すくわれ系欠陥の発生に水分凝縮層が関与していることをはっきりと明示しないまでも，その存在を最初に示唆したのは1954年Nicolas[33]である。同年Gittus[21]は電気抵抗によって水分凝縮層の存在を確認した。

Levelink[34]は鋳型の表面を急熱すると，鋳型の低い熱伝導により，わずかな薄い層が温度上昇する。生型ではこの層の水分が蒸発し，発生した蒸気の一部は型のさらに深部に達し，そして再凝縮する。表面には乾燥した層ができ，それに接する高い水分を含んだ層が存在する。これが水分凝縮層の生成を概念的にとらえた最初のものである。

Goad[35]はシリコニット発熱体で試片をばく熱し，きれつ発生試験をおこなった結果，きれつ発生時間の遅い（長い）ものほど欠陥の発生が少なく，そのためには木粉などの二次添加材が有効であると述べている。

また，Levelinkら[36]はばく熱によって加熱された型の一部に限定すると乾燥域には膨張力が発生し，それに接する部分には局部的に反力が起る。そしてその下層である水分凝縮層には乾燥域が剝離しようとする力の反力が存在する。剝離（peel formation）は膨張力が反力の和より大きいと発生すると述べている。

Patterson[37),38),39]およびBoenisch[40]は乾燥域の形成（schalen bildung）がすくわれや絞られ欠陥と強く関係しているとして，まずすくわれ系欠陥の分類をおこなった。すくわれ試験鋳型を用いて次のような欠陥発生傾向を求めた。

欠陥発生傾向＝圧縮力／水分凝縮層の強さ

特に水分凝縮層の引張強さを大きくすることが重要である。水分凝縮層の引張試験機を製作し，強さを調べた結果Naによるベントナイトの活性化が有効である。すくわれ試験鋳型に発生したすくわれの面積を横軸に，ベントナイト量および水分凝縮層の引張強さを縦軸にとると，どちらも横軸が増大するにつれて抵下する曲線になる。すくわれが生じない点のベントナイト量および水分凝縮層の引張強さをそれぞれ臨界ベントナイト量および臨界水分凝縮層強度とし，それ以上の値であれば，欠陥が発生しない。絞られについても横軸を絞られの長さで同様にあらわしている。1966年には縦軸に圧縮強さ横軸に水分凝縮層の引張強さをとったすくわれ線図(scab diagram)をあらわした。170例の実験や現場のデータを示しており，この図によれば添加剤の種類や量の効果が一目でわかる。

Marekら[41]はすくわれの発生状況には，a）蒸発界面の移動速度，b）すくわれを発生させる応力の発生速度が関係していると仮定した。鋳造プロセスでは鋳型底面の場合台皿の形をした乾燥域の深さが増すにつれて，蒸発界面が広くなり，この剪断面（蒸発界面での弱い方の側に剪断が発生するとする）は底面に対してしだいに傾きを増してくる。この最大剪断応力のはたらく角度ですべりを生じて皿状に剝離すると考えた。そこで水分凝縮層の剪断強度を求めるかわりに便宜的な方法として引張強さを求めた。

黒田[42]は型内を573℃以上に加熱されたA層，100～573℃をB層，水分を含んだ層をC層として型表面が加熱されたとき，各層の応力関係を考慮して最大膨張量のみで，鋳物砂のすくわれ傾向を論ずることは無理であると述べている。

二木[43]はすくわれ系欠陥の発生機構を調べるさいに，水分凝縮層の存在を認め溶湯と接触したとき型内にできる水分凝縮層の特性を知る必要があるとし，特に水分凝縮層のところにき裂の発生を示唆した。

以上のように，水分凝縮層の関係するすくわれ発生機構は，すべりによって起る説と剝離によって起る説とがある。決定的なことは言えないまでも，最近では砂粒の膨張のみがすくわれを発生するのではなく，水分凝縮層はなかでもその引張強度が引金を引く役割をになっているようである。

2．鋳型壁移動

今後，鋳物製品に寸法精度の良いものが要求されるのは明らかである。特に素材としての鋳物はNC工作機械などで加工される場合が増すと思われるのでその公差はますます厳しくなることが予想される。

鋳型壁移動については定義も研究者によってまちまちである。これまでの研究で体系的なものはBertolinoら[44),45)]によるA.F.Sの研究，およびBoenishら[46),47),48),49),50)]による研究がある。

研究の方法として，a）型ばらし後，鋳物の寸法を測定し移動量を求める方法。これはさらに長さを求めるものと，体積を求めるものに区別しうる。b）測定子を型内に挿入し，鋳込み後，鋳型壁移動の経過を調べる方法がとられている。BertolinoおよびToriell[51)]は(a)の方法をとり，Boenishおよび片島ら[53),54)]は(b)の方法を用いている。両者の測定結果は相対的にしか比較の方法がない。Zrimsekら[52)]は高圧造型における鋳型壁移動量を調査した。

高水分の生型に鋳型壁移動が多いことは古くから知られている。1960年代になって

Marekが水分凝縮層の研究にとりかかり，水分が多い場合は水分凝縮層が原因であるらしいということになったが，移動量に対する要因が多く，確定的なことは判っていない。それまでは生型の膨張が原因であるという報告もある。

鋳型壁移動についてまとめると，鋳込み条件を設定すれば移動量が具体的に推定できることが理想である。それには鋳型壁移動の機構を明らかにし，さらに溶湯に接する軟化層および，水分凝縮層の性質を調べる必要がある。枠の剛性や型砂のスプリングバック（spring back）および熱による軟化を含めた全体的な問題としての解決が望まれる。

3．吹かれ系欠陥

生型の造型圧は次第に高いものが使用されるようになってきたが，ベントナイトもより良質なものを利用し，水分率の低い範囲で使用されるため，吹かれ系の欠陥は山砂に比べ少なくなっている。

吹かれ系の研究についてはLockeら[55),56)]が1950年と1972年にまとめている。両年の間に，これまで述べてきた水分凝縮層の研究が盛んになってきたため1972年の論文は水分の影響についてそのほとんどをさいている。

すくわれ系欠陥によってその存在が認識された水分凝縮層の研究はMarekによって型内の圧力を調べられた。その結果水分が多ければ型内の最大水蒸気圧は高くなり，水分が10.5%以上では激しい吹かれが発生した。型内の圧力と吹かれに関係のあることをみつけた。

Draper[12)]は生型試片に加熱蒸気を送りこんで水分凝縮層の発生・移動のシミュレーションをおこなったが，型内の圧力は調べていない。

Levelinkら[57)]は溶融鉛の中に円筒砂試片を浸漬し，Boiling発生の時間的おくれと乾燥域の厚さとの関係を調べている。乾燥域の厚さで発生した蒸気量を求めることができるからであろう。型内の蒸気圧は調べていないが，型内の温度分布と型内蒸気圧との間に関係のあることを示唆している。

Dietartら[58),59)]はまず，1944年高温通気度を提唱し，次いで1948年鋳型内のガス圧を測定した。水分が増すとガス圧は急激に増加し，水分が9%では45mmAqになる。添加剤や鋳型硬度，通気度などの影響を調べている。特に通気度が高いと型内圧力は急激に低下する。型内では，蒸気の発生量と型外への排出量に関係のあることを示唆している。

Lockeら[56)]は，鋳込み時における鋳型内のガス圧を測定した。鋳型空間内のガス分析をおこない水分，二次添加剤および鋳型の場所によるH_2，O_2，N_2，CO_2などの発生量を調べている。水分を添加するとH_2の発生量が多くなり，水分2.5および5.0%でのH_2発生量のモルパーセントはそれぞれ30，50である。

牟田口[60)]は通気度について体系的な研究を行っているが水分凝縮層についてはふれていない。

これらの吹かれ系の欠陥の研究は溶湯を鋳込んで発生する蒸気量と排出蒸気量との差によって型内の圧力が決まるという説が多い。しかし熱伝達を考えて，蒸気発生量を求め，また生型各層の通気性から蒸気排出量を求めたうえで，鋳型内の圧力を推定するまでの具体的な研究はみあたらない。今後鋳型内の圧力は吹かれのみならず，生型研究のうえで重要となるであろう。

1－3　本研究の基本方針

これまで述べてきたように，水分凝縮層の研究は本格的に系統だてた研究が未だみられない。生型の伝熱解析は境界条件に水分凝縮層の水分率および通気性をとり入れた系で構成されていないため，実験値とかなりの開きがあり，その物理的な意味も不明確である。

本研究では第1章で水分凝縮層の従来の研究を調査し問題点を整理する。第2章では水分凝縮層の実態を把握し，さらに蒸気吹込みによって実際に水分凝縮層を生成させ，その生成機構を確認する。第3章ではこれまでほとんど考えられなかった，水分移動の駆動力となる型内の蒸気圧分布と水分凝縮層の移動との関係を調べる。

第2，第3章にて得られた結果をもとに，第4章では生型の伝熱解析を行う。まず近似解析をおこない，次いで数値解析をおこなう。第5章では鋳造欠陥との関係として，すくわれ系欠陥の発生機構を明らかにする。

第２章　水分凝縮層の生成および移動

水分凝縮層の研究にとりかかる端緒として生型に金属溶湯を鋳込むと型内の水分はどのような挙動を示すか調査した。

まず，多点電気抵抗式水分計を製作し，その電極を鋳型内に埋設し，鋳込み後の鋳型内の各点における水分率及び温度の変化を調べた。その結果水分率や温度から型内は４つの領域と一つの界面に分けて考えられ，さらに生型内の水分の移動について次の仮設が考えられる。

すなわち，水は蒸発界面にて蒸発して水蒸気となり，飽和域を通過し，凝縮域にて凝縮し，水となる。このとき潜熱を放出し，鋳型温度を上昇させる。

この仮設を立証するため，試片を蒸気に送りこみ試片を蒸気が移動するのか，あるいは，その蒸気は試片内部の冷たい砂に接し，水分凝縮層を生成するか確かめた。

さらに，上記のようなことが型内にておこなわれているとするならば，飽和域における水蒸気の透過は生型熱伝達にとって非常に重要な問題となってくる。すなわち飽和域における水蒸気の通気性である透過度は物質移動を含む生型熱伝達の示度のひとつであることがいえよう。飽和域における水蒸気の移動抵抗を調べるため通蒸気度試験器を製作し，各種配合砂の通蒸気度を測定した。

２－１　水分凝縮層生成の観察

２・１・１　緒　言

従来の研究では鋳型内の温度変化を観察し，100℃に停滞する間に水分凝縮層（厳密には飽和域）の存在期間として種々の現象の説明に利用してきた。しかし水分凝縮層は水蒸気の凝縮によって発生すること，およびこの層が100℃になったということはすでに蒸発が進行していて，水分凝縮層は消失する過程にあるのではないかとも考えられるので温度変化だけからの推定では正確なことは不明であろう。多点電気抵抗式水分計を製作し，これによって水分凝縮層を直接測定し，その生成や移動を確認することができた。

２・１・２　多点電気抵抗式水分計の製作

１．構　成

製作した水分計は，定電圧装置，測定子，記録計で構成されている。鋳型中に測定子を埋め，定電圧をかけ，突出した電極間の鋳型の抵抗による電圧降下が記録される。電極は６対とし，各チャンネルは１つの閉回路を構成して互いに干渉しないようにしてある。電極としては先端の被覆を0.5㎜ほど剝いだφ1.6㎜エナメル線２本を15㎜隔てて一対とし，各線の外側には剛性を増すために磁製保護管がはめてある。固定板に取付けた６対の電極は鋳型内に測定子を埋め込んだ場合，鋳型壁面から１，３，５，10㎜のところにその先端を位置させるように埋め込み，各位置の温度変化も同時に記録した。

２．水分計の諸特性

水分計の特性は，電極露出部の長さ，鋳型密度，水分率および分極作用によって影響

されると考えられる。

(1) 電極の長さ：電極のエナメル被覆をはいだ部分が長いと，鋳物砂との接触が十分で安定した値が得られるが，水分凝縮層の厚さを測定するには不正確となる。また短かすぎると，値のばらつきが大きい。0.1～2.0㎜の範囲で検討した結果0.5㎜の場合に値のばらつきが小さくて正確であり適当であった。

(2) 鋳型密度：電極を試片作成台上の枠の中央におき試料砂を30㎝上のふるいを通して自由落下させたままの状態から，圧縮試験機による10kg/㎠の加圧造型まで，造型圧力を変化させて製作した試片について示度の変化を観察した結果造型圧力500g/㎠以上では変化が見られなかった。

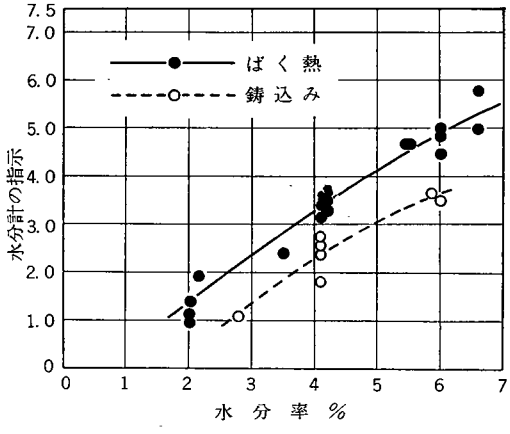


図2　水分率と水分計の指示

(3) 水分率：図2に示すように2～7%水分の間は水分率と水分計の指示とはほぼ直線的な関係にあり，設計条件を満たしている。なお水分中にはいろいろな電解質が含まれているから，鋳型の電気抵抗が変化するおそれがあると考えられるが，砂やベントナイトの中には多くの電解質が含まれているので，時に蒸留水を使う必要はないと考え，水道水を使った。

(4) 分極作用：直流式なので電極における分極作用の影響が考えられる。前述のような測定子を使った場合，分極作用によって示度に多少の変化は見られるが，水分凝縮層が電極部に到達したときには，分極作用をはるかに上回る著しい変化が認められるので，本実験は分極作用を無視した。

以上，水分を測定するにあたって，水分計の特性に及ぼす各因子の影響を述べたが，これらを勘案して水分計測定子の形状が決定された。電極工作上の問題および鋳型中へのセッティングの問題から，得られた値に多少の誤差を含むのは，現在この方法ではやむを得ない。

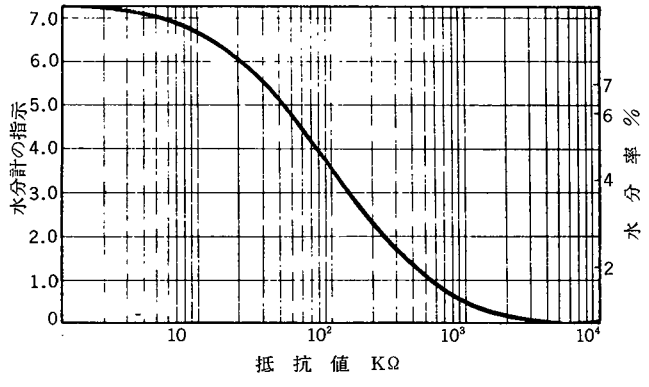


図3　水分計の抵抗－水分率持性曲線

実用に先立って水分計の抵抗値と水分率との関係を調べたところ図3が得られた。なお4%水分の合成砂の場合，測定値のばらつきは偏差値が約50KΩ（平均値300KΩ）の

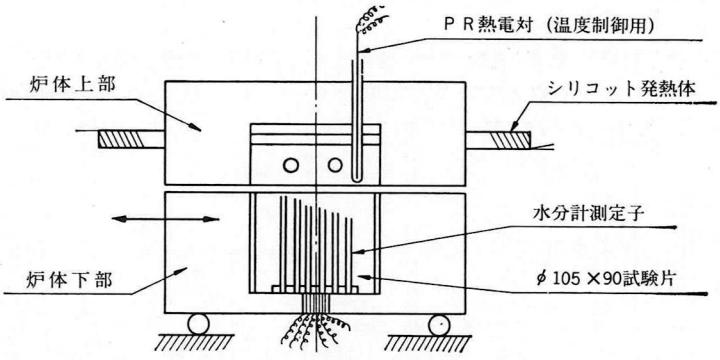


図4　シリコニット炉（ばく熱用）

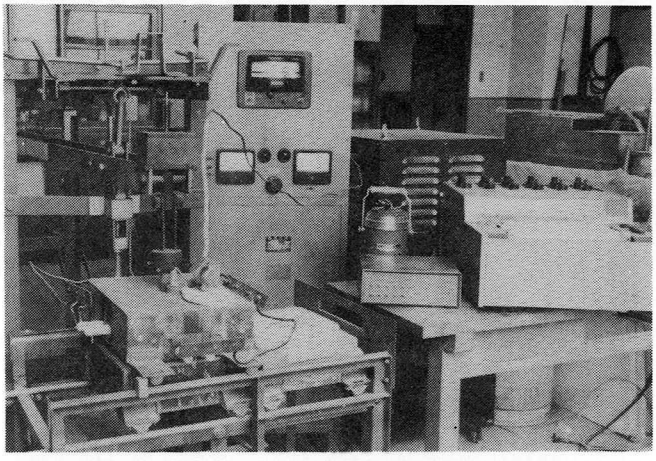


図5　ばく熱実験装置

程度で本研究にはじゅうぶん役立つことを確認した。

2・1・3　実験方法

試料砂は山陰産けい砂(黒井)5号に群馬県産ベントナイト6％を加えて空びき2minの後，目標水分2，4，6％となるように水を加えて5min混練して調製した。

試片は，内径φ100×H90㎜の鋼管内に見分け密度1.5kg/㎤になるようつき固めたもので試片裏側から前記の測定子を埋め込んである。ばく熱用シリコニット炉は上下に二分され，上部にはシリコニット発熱体が埋め込まれてあって固定され，下部にレールに乗って左右に動くようになっており，試片の受台を兼ねている。試片はシリコニット炉内で1,000～1,200℃にばく熱された。シリコニット炉を図4に，装置全体を図5に示す。

鋳込み実験における鋳込み方案および試験鋳型を図6に示す。

2・1・4　実験結果および考察

1．水分計による水分変化の観察

従来の熱電対を用いて鋳型の温度変化を測定し，それによって水分凝縮層の存在を調

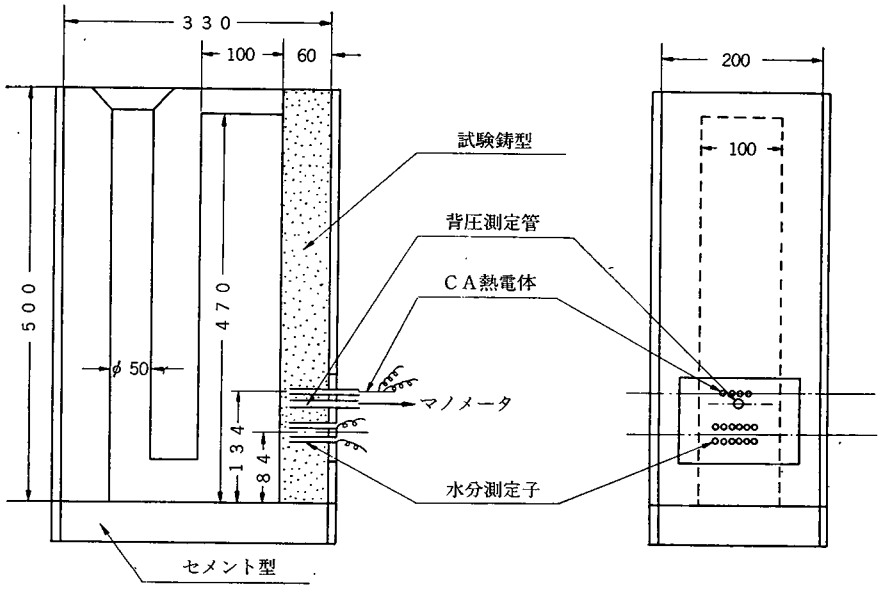


図6　鋳込み方案および試験鋳型

べた結果と本水分計によって調べた結果との比較を示す。図7はベントナイト6%，水分4%（6B4Mと呼ぶ）試片の表面から5㎜内部の点の温度と水分を同時に計測した結果である。

a点でばく熱を開始すると $\overline{ab}$ 間は試料砂の水分率そのままを表わしている。これを初期水分期と呼ぶことにする。つぎに $\overline{bc}$ 間にわたって水分が増加する。これを水分漸

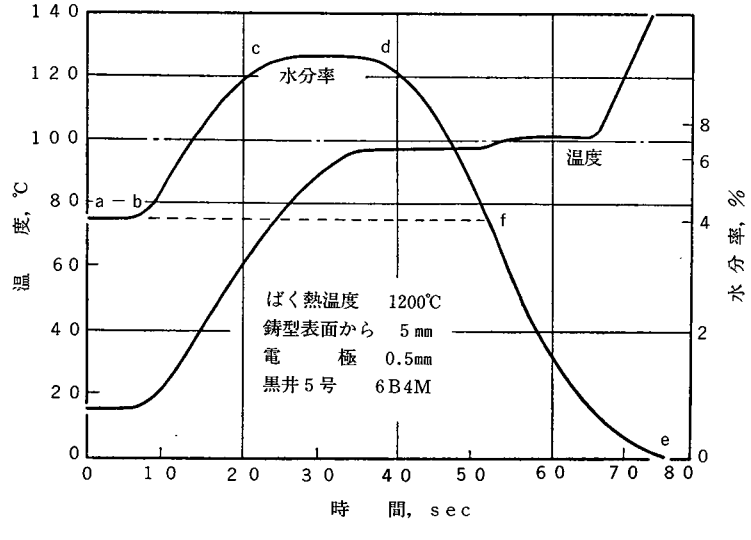


図7　試片内の温度と水分率の変化

増期と呼ぶと同様に飽和期$\overline{cd}$，漸減期$\overline{de}$を経て，乾燥期に入る。一方測定点の温度は時間の経過とともに上昇するが，水分の飽和期は温度の飽和期と比較して短い。同図$\overline{bf}$間を水分凝縮層と呼ぶことにする。また漸増期では温度は上に凸の曲線を描き，水分についても同様である。

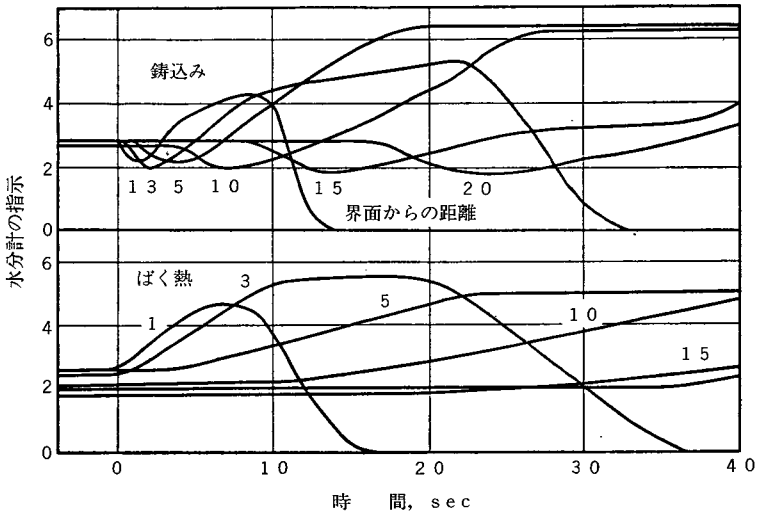


図8　鋳込みとばく熱による水分率の変化（6B4M）

図8には，ばく熱および鋳込み実験において水分計の6個の電極（試片表面から1，3，5，10，15，20㎜）による鋳型内の水分率の変化状態が示されている。ばく熱試験片について説明すると，電極の位置がばく熱面から隔たるにつれて初期水分期は長時間となり，また，それに続く水分漸増期をはじめとする各期は遅れると同時に長時間となっている。また水分漸増期の立ち上りはゆるやかであるが，これはばく熱面より測定点までの砂厚が大きくなるにつれ熱衝撃が小さくなることによるものである。飽和期の水分率は鋳型面から隔たるほど高いが，ある隔たり（20㎜以上）ではほぼ一定となるようである。

鋳込みによって得られた曲線はこれまで述べてきたばく熱試験片のそれによく似ているが，初期水分期の時間も比較的短く，飽和期もばく熱面近くで一定となる。

以上のことから水分凝縮層の移動状況をあらわすと図9のようになる。図9(a)では時間的な変化をとったが，図9(b)は縦軸を界面からの距離で示す。

各層の水分および温度は次のようである。

(1)　乾　燥　域：水分はなく温度は100℃以上の範囲。

(2)　飽　和　域：水分は飽和水分率，温度は100℃付近で一定。

(3)　凝　縮　域：初期水分率から飽和水分率に変化する範囲，温度は室温から100℃に

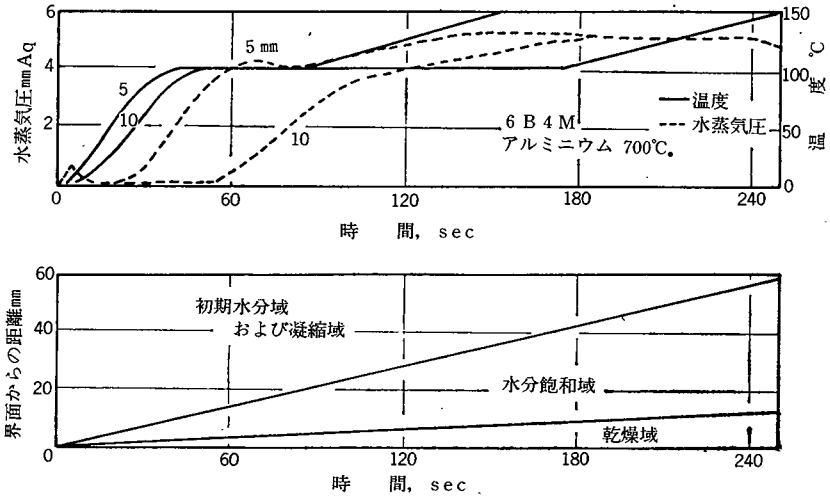


図 9　水分凝縮層の移動状況

変化する。

(4)　初期水分域：水分は初期水分率，温度は室温で未だ鋳物からの熱に影響されない範囲。

2．ばく熱による水分凝縮層の移動状況

鋳型内のある点の水分率は，時間に関して，三つのクニックと水分消失の合計四つの顕著な変化点を示す。つまり試片の水分率変化に及ぼす諸条件の影響を調べる段階では図7の点$\overline{\text{be}}$の$\overline{\text{bc}}$，$\overline{\text{de}}$の各種条件下の変化を比較すればよい。そこで本項においては，b，f 2点の出現が試片表面の隔たりによって変わる状況を比較することにした。

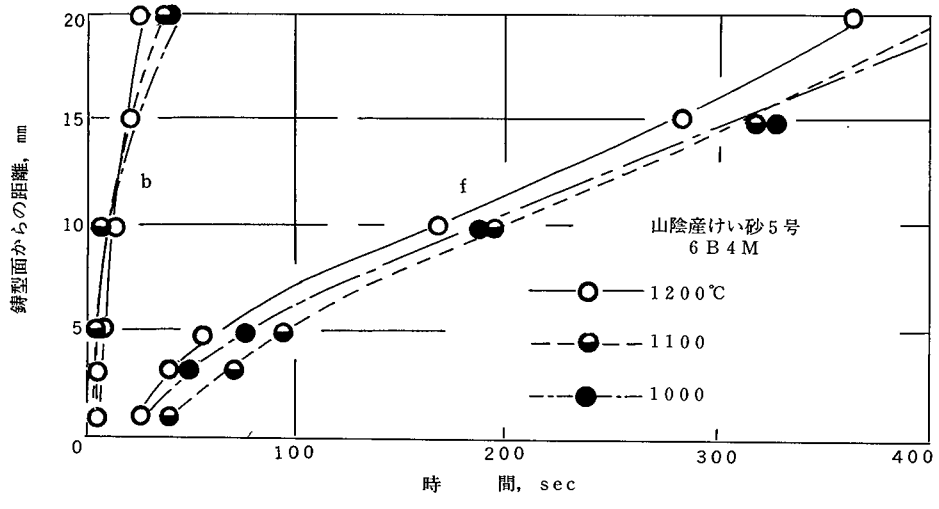


図10　水分凝縮層の移動（ばく熱温度の影響）

ばく熱実験では，ばく熱温度，鋳型の水分率，鋳型砂の粒度を変化させた。

(1) ばく熱温度の影響

6 B 4 M試片を1,000，1,100，1,200℃にばく熱した結果を図10に示す。熱源からの供給熱量が少ないので明確な結果を得にくかったが，ばく熱温度が高くなるにつれて，水分凝縮層の発生ならびに消失は早期に起こることがわかる。ことに試片表面層部で，両現象が，ばく熱後数secに完了することは興味深い。

(2) 水分率の影響

ベントナイトを6％配合した砂に水分を2，4，6％加え，1,200℃にばく熱した結果を図11に示す。水分率が異なれば，水蒸気発生量および試片の通気度が違うので，

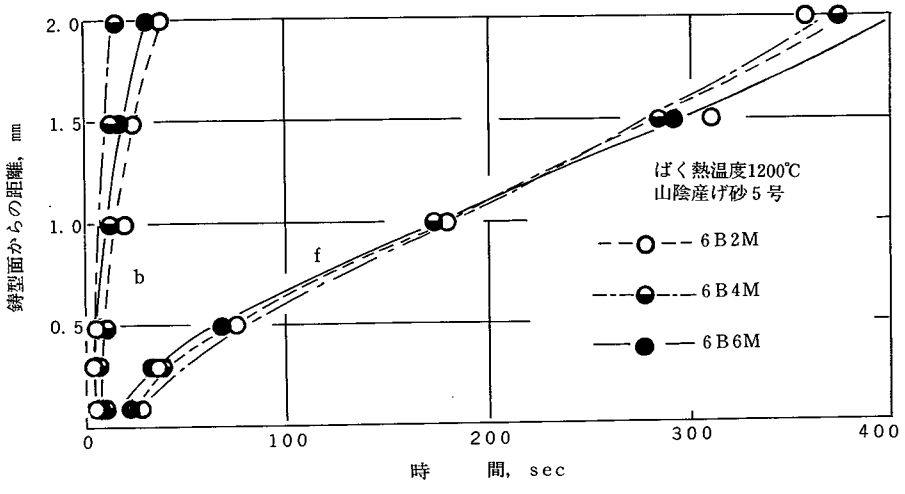


図11　水分凝縮層の移動（水分率の影響）

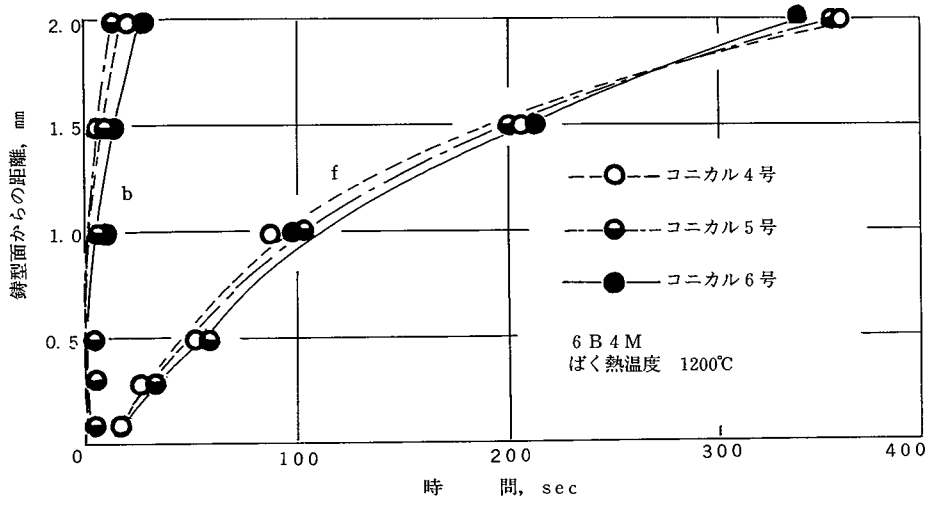


図12　水分凝縮層の移動（粒度の影響）

水蒸気の通過状態の異なることが予想され，そのため水分凝縮層の発生に大きな差が出るのではないかと予想されたが，水分率にかかわらず試片の表面下約15㎜あたりに水分凝縮層が発生しており，水分率が高くなれば，水分凝縮層の幅は広くなる。

(3) 粒度の影響

粒度変化の影響をみるためコニカルけい砂４，５，６号を用いて６Ｂ４Ｍ試料砂を作り供試した。図12に結果を示す。ｂ曲線，ｆ曲線とも予期された傾向（細粒になるにつれ水分凝縮層の移動速度が低下する一曲線が右へ寄る）は，ほとんど認められなかった。このことは熱伝導率[69]よりも大きく作用する他の因子のあることを示唆している。

以上，鋳物砂を構成する主要因および加熱条件を変化させてばく熱による水分凝縮層の移動状況を見てきた。これら３種類のばく熱実験で，水分凝縮層生成に及ぼすばく熱温度，水分率および粒度の影響を対比した結果，ばく熱温度は明らかな影響を及ぼすが，他の２者はほとんど問題にならない程度であることがわかった。また本実験中に水分計は的確に作動し初期の目的を達することも判明した。

3．鋳込みによる水分凝縮層の移動

ばく熱実験で鋳型中の水分凝縮層の移動の概要を知ることができたので，試験用鋳型（100×100×550㎜）に鋳鉄を鋳込んだときの鋳型内の水分凝縮層の移動を求めるために鋳込み実験をおこなった。鋳込み実験では溶湯のつごうで鋳込み温度を変えることができず，鋳型の水分率と粒度の影響だけについて調べた。

(1) 水分率の影響

ばく熱実験と同様に水分率は２，４，６％とした。図13のとうり，水分率が高いほどｂ曲線，ｆ曲線は右寄りで，水分凝縮層は長時間存在した。いいかえれば高水分率の試料ほど水分凝縮層の移動速度はおそい。鋳込み完了時（鋳込み時間約10sec）に水分凝縮層は鋳型内５㎜まで達し，表面下１㎜あたりはすでに乾燥し始めている。

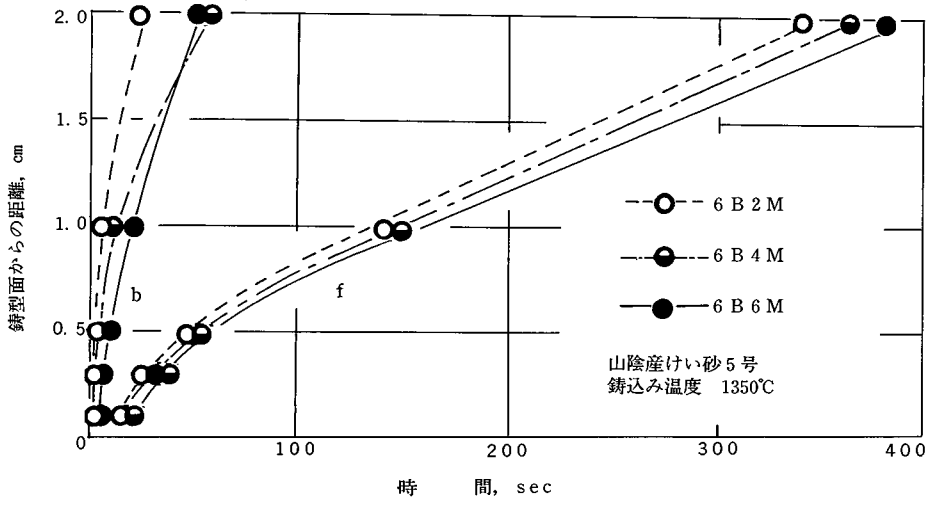


図13　水分凝縮層の移動（水分率の影響）

(2) 粒度の影響

粒度についてもばく熱実験と同様に，コニカルけい砂の４，５，６号を使用した。図14にその結果を示す。同図から明らかなように，細粒の砂を使用した鋳型ほど曲線は右寄りとなっている。鋳型の熱伝導率および通気度の低いことがその原因であろう。

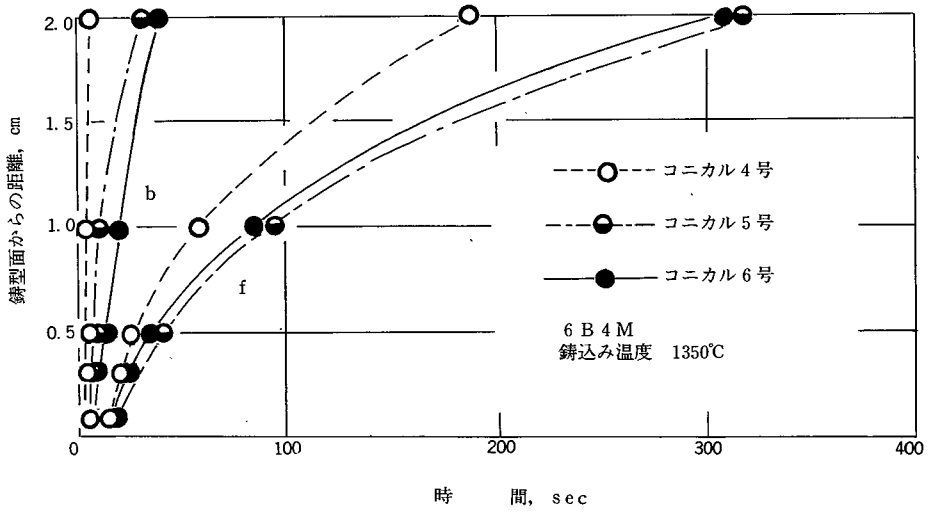


図14　水分凝縮層の影響（粒度の影響）

４．ばく熱実験と鋳込み実験との関連

ばく熱実験では水分率および粒度の影響が認められにくかったが，鋳込み実験では明らかに認められた。これは両実験における熱伝達に違いのあることはもちろんであるが，水蒸気の移動の差を第一に考えなくてはならない。ばく熱実験では水蒸気は試片表面および試片内部の両方に移動しうるのに対し，鋳込み時には，水蒸気の溶湯方向（試片表面方向）への逸出は極めて少ない。すなわち発生水蒸気はすべて試片内部を通過するので，ばく熱試片では得られなかった因子の影響も認められる。

２・１・５　結　言

多点電気抵抗式水分計を製作し，ばく熱試片および鋳込み試験用鋳型にその測定子を埋設して，鋳型内の水分率変化を追跡した結果，鋳型内における水分凝縮層の移動を確認することができた。得られた結果をまとめると次のようになる。

１．水分計により，水分凝縮層の存在およびその移動を明確に確認しうる。

２．水分計により認められた鋳型内の水分分布状況は，従来から用いられてきた温度の変化から推定する方法に比べ，より明確に区別することができる。

３．ばく熱実験と鋳込み実験では，水分凝縮層の表われ方に差異があり，水蒸気逸出方法の違いからと考えられる。

４．発生した水分凝縮層は時間が経過するにつれて鋳型内部へ移動する。この層は鋳型内部にゆくほど厚くなり，移動速度は遅くなる。

2－2　蒸気吹込みによる水分凝縮層の生成とその通気性

2・2・1　緒　言

前項において，水分凝縮層が存在している鋳型内の水分と温度の関係について明らかにすることができた。ところで水分凝縮層が鋳型内部で移動していることは，蒸発域にて発生した蒸気が飽和域内を通過し，凝縮することであると考えられる。

本項ではこの水分凝縮層の移動機構を考えるにあたり，その駆動力となる，凝縮層内の圧力について調査する。前半では蒸発域からの水蒸気発生にかえて，蒸気発生装置からの水蒸気を試片内に通した場合の水蒸気の移動過程を蒸気圧，水分率および温度の変化とともに調べることとした。すなわち，移動の推進要因と考えられる流入蒸気圧と抵抗要因となる型砂の配合およびつき固め度を変え，これらの関係を明らかにした。

次いで後半では鋳型内における水蒸気の移動抵抗（透過度）が求められるべきで，それによって流入蒸気圧に相当する乾燥域の水蒸気圧が決まるはずであると考え，Darcyの法則を用いて水分凝縮層内での水蒸気の移動抵抗である通蒸気度を求めた。

鋳型の通気性を示す値には湿態通気度と高温通気度がある。湿態通気度は単に通気度と呼ばれ，いいかえれば多孔質媒体中を気体が通過するときの透過度を示す値であり，空隙率や粒子の形状，大きさに関する定数である。

一方，実際に鋳型内に金属溶湯が注がれた場合，鋳型は高温になり，そこを通過するガスも高温であるとの考え方に基づき，高温試片内に空気を通して求める高温通気度も採用されている。

しかし，生型の水分凝縮層の存在を考えれば，次の問題が提起される。

1．水分凝縮層中を流れるのは水蒸気である。

2．水分凝縮層の水分は鋳込み前の初期水分率に比べて高く，かつ水分率はほぼ均一である。

3．生型から発生するガスの大部分は水蒸気である。

しかも水蒸気は凝縮域で凝縮してしまい，その外へは逃げない，つまり，もし鋳込みにさいして吹かれ系欠陥が起ったとすれば，それは発生した水蒸気が水分凝縮層中を通過しきれなかったことになる。

2・2・2　水分凝縮層の生成実験

1．実験方法

試料砂としては，山陰産けい砂6号に群馬県産ベントナイト6％および水分4％を配合して調製したものを基本砂とし，水分率（2～6％），ベントナイト量（3～9％），砂の粒度，つき固め回数を変化させて，種々の試片を作成した。

蒸気通過試験器を図15に示す。これは蒸気発生器（シーズヒータ600W付き）の上部に，耐熱プラスチック試片筒内に保持された試片（ϕ 50×H50）をとりつけたものである。蒸気発生器で発生した蒸気は，定圧装置によって所定圧力とされ，試片筒内へ流入する。流入蒸気圧力（鋳型内水蒸気圧力に相当，50㎜Aqを標準とした。）はマノメータにより測定される。試片のつき固め面を上面として，蒸気は試片内を下から上へと流れる。試片には，蒸気流入面から10，20，30㎜のところにCA熱電対，水分測定子および圧力測定用ガラス管がそう入されている。

2．実験結果および考察

(1) 試片内定位置の温度，圧力，水分の変化

試片内の蒸気流入面から15㎜の位置のところの温度，圧力および水分率の変化状況を図16に示す。試片はベントナイト6％，水分 4％(6 B 4 M)，3回つき固めとし，流入蒸気圧は50㎜Aqとした。

蒸気流入がはじまってある時間経過すると，水分と温度はほとんど同時に上昇し，しかも同時に飽和水分率および100℃に到達する。つまり，飽和域が形成されたわけである。

一方，水蒸気圧力は，水分が飽和してからゆるやかに上昇を始める。これは，注湯後の鋳型において次に述べるような現象の起こることを意味する。すなわち，境界面に近い蒸発域で発生した水蒸気は，蒸発域外側の飽和域を通過してさらにその先へと移動するが，その部分は低温であるため，凝縮して水分を増加させる。その際，水蒸気のもつ顕熱および潜熱は凝縮域を加熱したことになり，やがてそこを飽和域へと変える。

このようにして，〔蒸発域－飽和域－凝縮域〕は一組みとなって鋳物から遠ざかり，そのあとには乾燥域が残る。

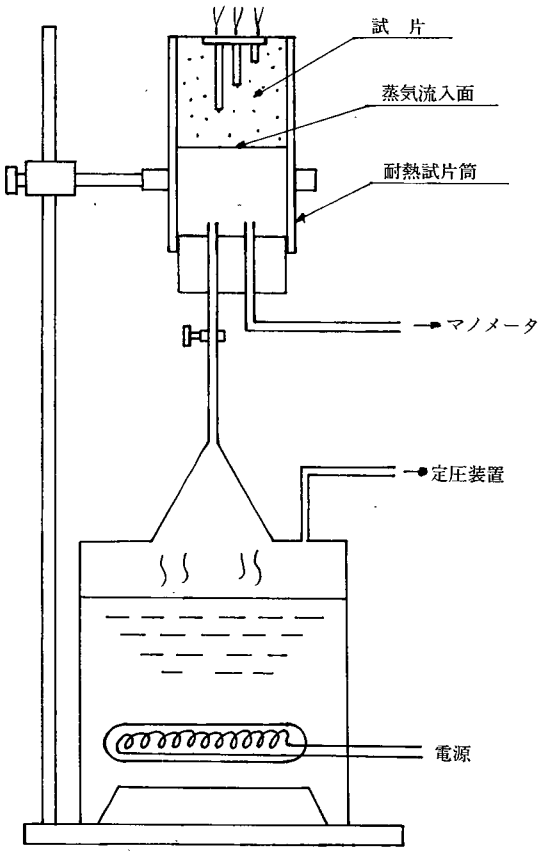


図15　蒸気通過試験器

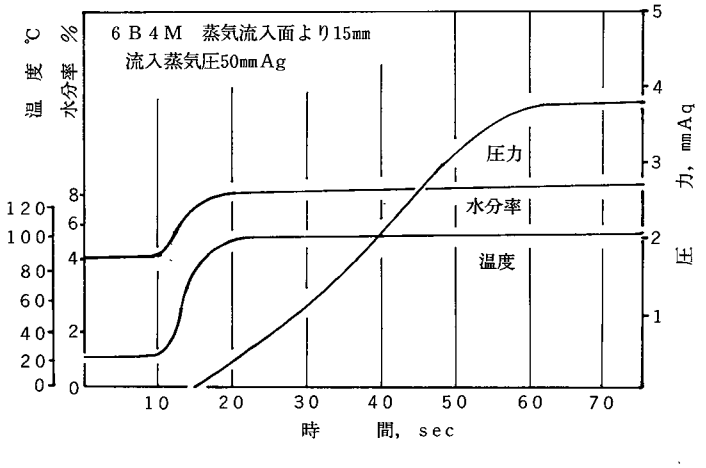


図16　試片内一点における水分，温度，圧力の変化

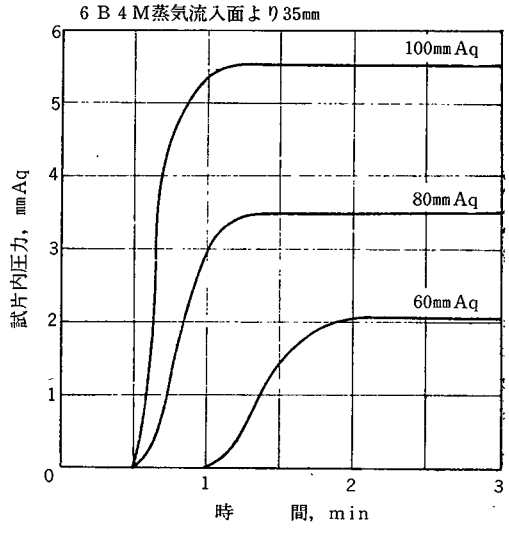


図17　流入蒸気圧の変化による試片内の圧力変化

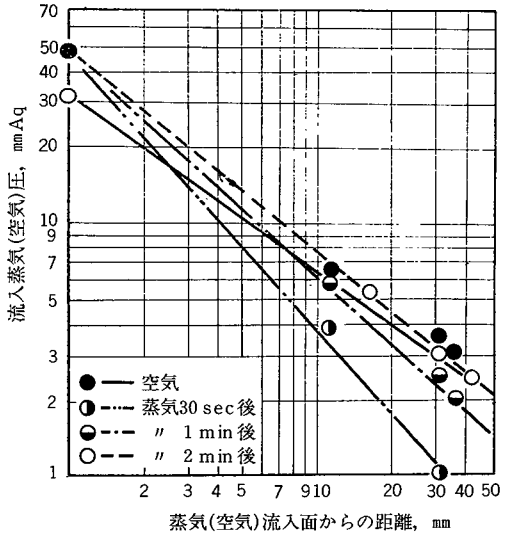


図18　試片内の圧力こう配

(2)　流入蒸気による試片内の圧力変化

移動の推進力となる流入蒸気圧を変化させて，試片内の圧力変化を求め，これを図17に示した。流入蒸気圧が高いほど試片内の圧力上昇は早期に起こり，また，立ち上がりも大きく，高い圧力で止まる。この流入蒸気圧は乾燥域から蒸発域へ伝達される熱量と飽和域の水分率および飽和域における水蒸気の通気性によって決まると考えられる。これに関しては後に述べる。

(3)　試片内の蒸気圧分布

鋳込みのさいに発生した水蒸気は，飽和域を通過してその外側で凝縮する。したがって蒸気の流れは，凝縮を起こしている凝縮域までと考えられる。いいかえれば，試片内の圧力は水分凝縮層のある位置までは存在し，それよりも外側では存在しないはずである。また圧力の高さは飽和域の通気性に関係するであろう。そこで蒸気通過中の試片内圧力の分布状態を計測し，通気度試験における標準試片内の圧力分布と比較検討した。

空気を通過させるために，試験機のコックを開くと，試片内はただちに図18の実線に示すような圧力分布があらわれ，2,000ccの空気が通過する間はほとんど変化しない。試片内の空気流入面からの距離とその点の圧力を両対数にとると直線的である。

つぎに，蒸気流入による試片内の圧力分布を調べた，試片の一端に蒸気圧を加えて流入し始めると，飽和域となった流入面に近い部分から順次に圧力が上昇を始める。空気と水蒸気では，この点に大きな違いが認められる。つまり，水蒸気が試片内に流入する場合，試片がすべて飽和域となっていない限り，その水蒸気は試片内で凝縮し，外部へは流出しない。

このことは，試片の端面から水蒸気が流出しはじめたときに，試片全体が100℃になっていることでわかる。つき固め面から水蒸気が出始めると，その時点から水蒸気の動きは空気と同様で，圧力は両対数にとると直線である。

図18において，蒸気圧曲線の傾斜は時間の経過につれてゆるやかになり，ついには空気のそれにほぼ平行となることは，このへんの事情をよく物語るものである。

定常状態での圧力と界面からの距離との関係を最小二乗法によって直線回帰を求めることができる。空気を通し型砂が６Ｂ４Ｍの場合

$$p=36.7x^{-0.722} \quad (p:\mathrm{g/cm^2},\ x:\mathrm{mm}) \qquad (2\cdot2\cdot1)$$

となった。水蒸気を通した場合は，

$$p=49.6x^{-0.804} \qquad (2\cdot2\cdot2)$$

となる。

(4) 飽和域の移動速度

鋳込み時の水分凝縮層の移動状況をとらえる基礎的実験として，試片に水分測定子を埋め込み，水蒸気を通して試片内の水分率の変化を求め，飽和域の移動を観察した。したがって，ここでは混乱をさける意味で，〝飽和域の移動速度〟と呼ぶことにする。

６Ｂ４Ｍ試片に，蒸気流入面から15，25，35㎜の位置に，抵抗式水分計の測定子をあらかじめ埋め込んでおき，50㎜Aqで蒸気を通じた。結果の一例を示すと図19となり，蒸気流入面に近い点から水分率が急増している。これは，飽和域が試片内部に向かって移動していく様子を示している。２－１で示したばく熱実験および鋳込み実験の場合と同じであって，本実験の方法が正しいことを裏書きしている。耐熱樹脂製試験筒を耐熱ガラス製のものに替え，試料にベンガラを少々加えて同様に蒸気を通せば飽和域は濃い赤褐色となって，その存在および移動を肉眼で確かめることができる。

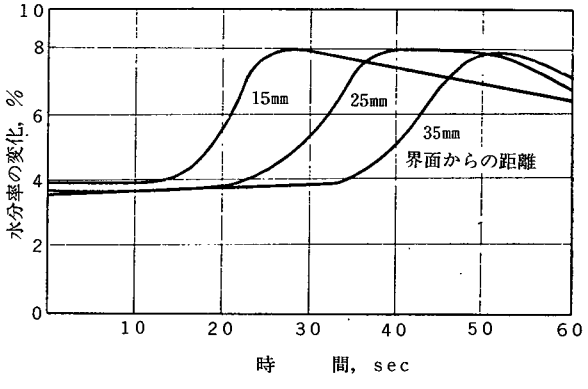


図19　試片内の水分率変化

飽和域の移動速度とは飽和域が試片内の所定２点間を通過したとき，その２点間の距離を経過時間で除した値である。ここで所定の２点とは，蒸気流入面から15㎜および35㎜の点であり，求めた値は試片のほぼ中央部における飽和域の移動速度である。

図20は，ベントナイトを６％に一定し，水分率を変化させて，移動速度を求めたものである。水分率が増すにつれて，移動速度は小さくなっている。

図21は，水分を４％に保ち，ベントナイト量を変化させた結果である。ベントナイト量を増せば，移動速度はおそくなる。

また，骨材に国府けい砂６号を用い，６Ｂ４Ｍ配合の場合，つき固め回数を３～10の範囲に変化させたときの結果を図22に示す。つき固め回数が大きいほど，移動速度は小

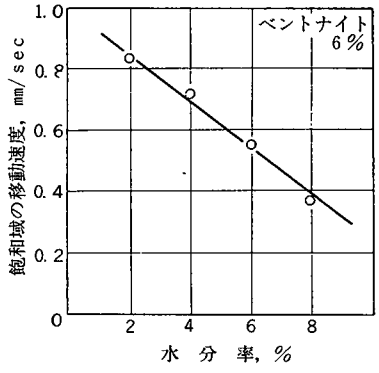


図20　水分率と飽和域の移動速度

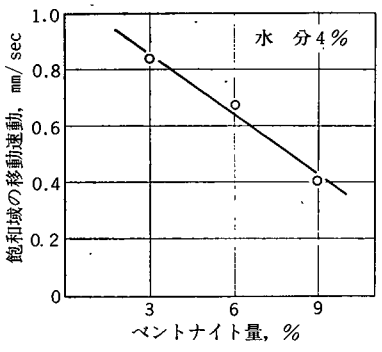


図21　ベントナイトと飽和域の移動速度

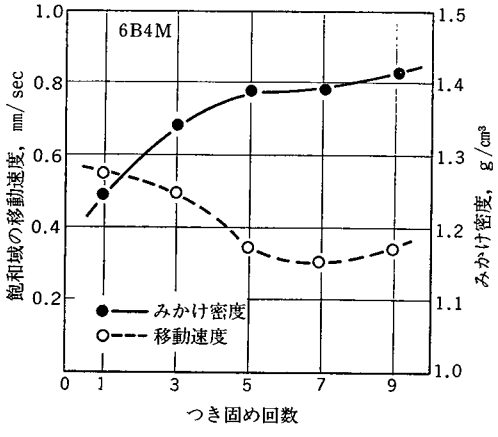


図22　つき固め回数と飽和域の移動速度

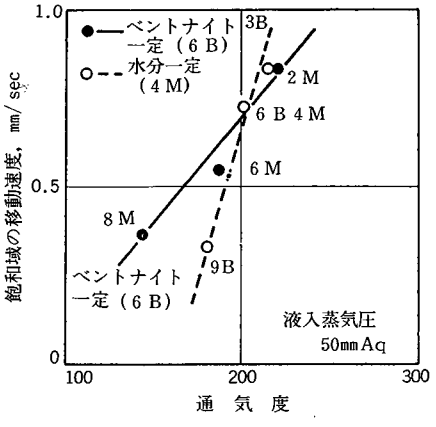


図23　通気度と飽和域の移動速度との関係

さくなる。

以上，試片の水分率，ベントナイト量，密度（つき固め回数）を変化させた場合について，飽和域の移動状態を示したが，通気度は移動速度に関連する要因と考えられるので，さきの図20および図21の例について通気度を測定し，それと移動速度に関してまとめると図23となる。ベントナイト量は，通気度変化因子として働き，飽和域での蒸気通過の難易を左右するであろう。水分は試片の通気度変化因子としてばかりでなく，ベントナイトと水分の比熱の差からの影響を示すようである。

水分率，ベントナイト量，密度，通気度をとりあげて，これら凝縮域の移動速度すなわち飽和域の移動速度との関係を調べ，各因子の作用に違いのあることがわかった。

(5)　水分凝縮層の水分率

水分凝縮層の水分率を実測するには，多くの困難がともなう，試作した電気抵抗式水分計は，時間的な水分率変化状況を追跡する場合にきわめて便利であるが，厳密にいうと，使用にさいして制約があり，水分範囲によっては，これによって求めた水分率を全面的に信頼することはできない。

多少の誤差を含む危険性はあるが，蒸気を通した試片の飽和域から試料をとり出し，乾燥によって求めた値がよい。この方法では，試料を秤量ビンに入れるまでに，含有水分が蒸発するおそれがあり，実際に目に見えて試料表面が乾燥し，色も変わる。しかし慣れて要領良くなれば，測定値のバラツキは減少する。測定結果を図24に示す。この値は他の研究者[61]によって得られた値と一致した。

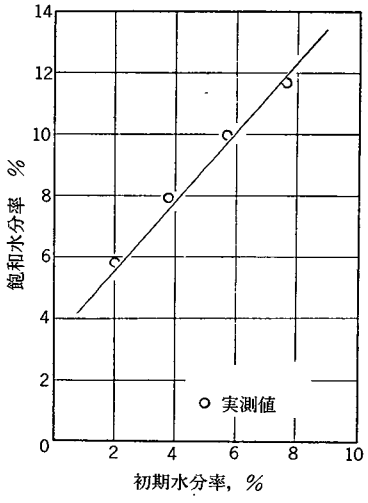


図24　初期水分率と飽和水分率との関係

水蒸気の潜熱だけが試片の温度を上昇させる。すなわち，凝縮域での熱伝導がないと仮定すれば，計算によって飽和域の水分率を得ることができる。つまり，ある部分を100℃に上昇するために必要な熱量をもっている水蒸気は，凝縮して水となり，ある厚さにわたって初期水分域に分布すると考えられる。

飽和域の水分率は

$$m=M+\{M\cdot Cpw+(1-M)\cdot Cps\}\cdot(\theta_{100}-\theta_0)/L \qquad (2\cdot2\cdot3)$$

砂の比熱を0.23cal/g，初期水分域の温度を20℃として，測定値と計算値とを比較したものを図24に併記している。

2・2・3　水分凝縮層の通気性

1．通蒸気度の考え方

水分凝縮層の生成実験にて求めた飽和域の移動速度では，それぞれの因子がどのように移動速度に影響を与えるか，相対的にしかわからず，水分凝縮層の移動抵抗を知ることにはならない。蒸発域で蒸発した水蒸気がすべて飽和域をとうり，凝縮域で完全に凝縮するならば，飽和域の水蒸気透過度で与えられる。

具体的に通蒸気度を求める場合，試片内に飽和域をつくらなければならないが，それには，初期水分の試片に水蒸気を流入凝縮させ，凝縮水分で飽和した凝縮試片を用いる。ところが通蒸気度を求めるには，試片の状態を不変に保って，水蒸気を通過させなくてはならない。

Marek[1),62)]は凝縮試片に空気を通して通気度試験をおこなっているが，試験中に試片が乾燥するので，この方法によって得られた通気度は信頼をおき難い。さらに彼は鋳込み後，ある時間経過した後の型内のガス圧と，乾燥域内ですでに蒸発した水分を気体に換算した量とから，通蒸気度を求めているが，物理的な意味をもった通蒸気度ではあり得ない。

透過法により，通蒸気度を求めるためには，飽和域を温存させつつ，100℃の水蒸気を透過させるような試験器を試作しなければならない。

2．測定原理および実験装置

一般に砂層を通過する流体についてはDarcy[26]の法則が成立する。

$$V/t = A \cdot k \cdot \Delta p / (\mu \cdot h) \qquad (2 \cdot 2 \cdot 4)$$

ここで，透過度は$\mu = 1$とすれば通気度に相当する式（2・2・4）より，kは

$$k = (V/t) \cdot \mu \cdot h / (\Delta p \cdot A) \qquad (2 \cdot 2 \cdot 5)$$

で与えられる。

一定寸法の試片を用いるならば，透過度は流速V/tと圧力降下量Δpから求められる。

試験器の概略を図25に示す。蒸気発生器および発生量調節のためのスライダック，試験片，冷却管，マノメータ，蒸気輸送パイプ，試片筒保温パイプ，保温用チューブ，保温用蒸気発生器から構成されている。耐熱パイプ（試片筒）のまわりをはじめ，蒸気輸送パイプも100℃に近い蒸気で保温し，通過水蒸気の冷却による液化防止に努めた。

試片筒を図26に示す。内径50㎜の耐熱ビニールパイプで半割りできるようになっている。

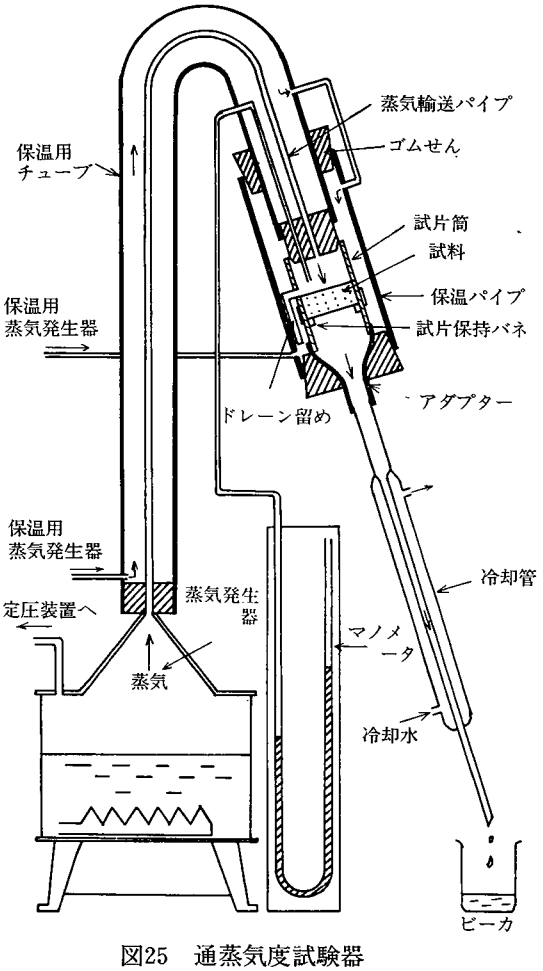


図25　通蒸気度試験器

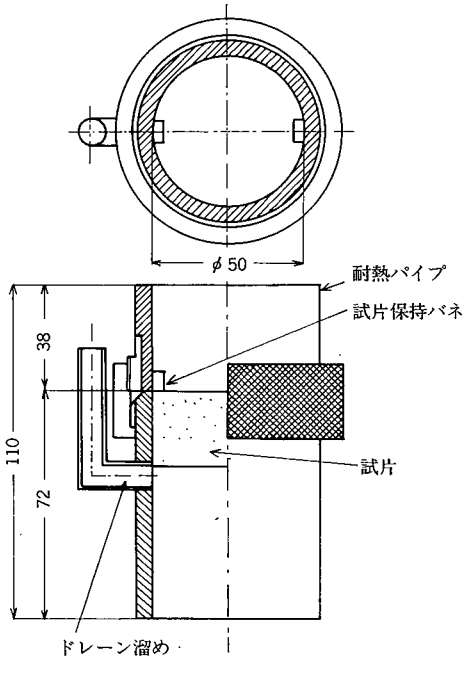


図26　試片筒

試片筒の２つのパイプをねじ止めした状態で，その中に標準試片を作成し，ネジをゆるめ２つのパイプの間で試片を切断すると25㎜高さの試片となる。その半分を抜き取り，試片保持バネを密着してのち再び２つのパイプをネジ止めして試験に供する。試片の薄い方が通過域は速く形成され，得られた値のばらつきも少なく，水蒸気の通過が困難な試片でも凝縮試片が製作可能である。

3．測定方法

試片筒を保温パイプのアダプターに差し込み，上部にゴム栓をし，保温用蒸気を送り，同時に一定の蒸気圧の水蒸気を試片に通す。冷却管下部から水滴が滴下しはじめた時に，試片全体に飽和域が形成されたものと判断して，水蒸気発生量を所定値に保った。その場合，一定時間（２min）内に冷却管より滴下する水分をもって試片を通過した水蒸気量とした。それを100℃，１気圧の水蒸気に換算して通過水蒸気の平均流量（cc/min）を求めた。通過流量にバラツキが生じることがわかったので，予備実験として水蒸気送り込みにあたっては通蒸気度実験のように2,000ccを通過させるだけでなく，送り込む水蒸気の流量を小～大の数段階に分けて通し，各々の場合の圧力差を計測して，各流量に対する通蒸気度を求め平均値をもって通蒸気度とした。

圧力差はスライダック電圧制御の後，１分経過したときのマノメータの水柱圧（㎜Aq/㎠）で読む。同一配合の試片でも，流量を変える場合には新しい試片にとりかえて測定した。

計算に用いた試片寸法および水蒸気の物性値は以下に示す。

$$\bar{k} = (V/t) \cdot \bar{\mu} \cdot h / (\Delta p \cdot A) \qquad (2 \cdot 2 \cdot 6)$$

h：試片高さ 2.5cm

A：試片断面積 19.6㎠

Δp：圧力差 g/㎠

V/t：貯留重量 g/min（100℃，１気圧における水蒸気の比容積1,760cc/gを乗じて容積に換算する）

μ：粘性比 $\bar{\mu}_{steam}/\mu_{air} = 0.707$

$\bar{\mu}_{steam}$：100℃，１気圧における蒸気の粘度 0.0128c. p.

μ_{air}：100℃，１気圧における空気の粘度 0.0181c. p.

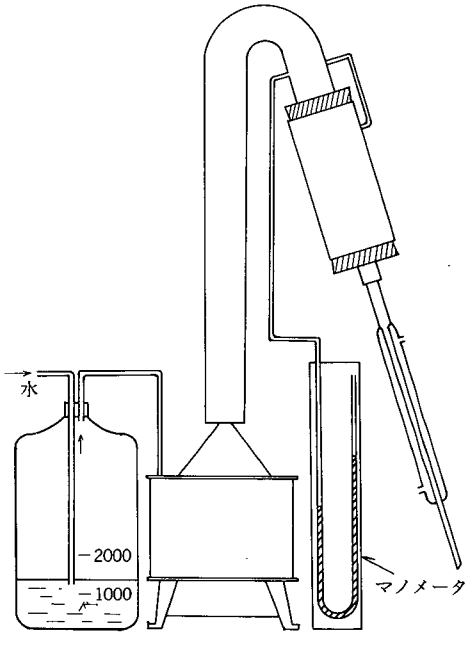


図27　通蒸気度補正装置

4．実験結果および考察

通気度と通蒸気度を比較するためには，この通蒸気度試験器の特性を調べること，そして通過媒体の粘性について検討をおこなうことが必要である。

まず，通蒸気度試験器の特性を調べるための本装置に図27に示すようなタンクをつけ，

表1　JIS通気度と試作装置との比較

配　合	JIS通気度	試作装置
6 B 2 M	119	116
6 B 4 M	201	198
6 B 6 M	178	175

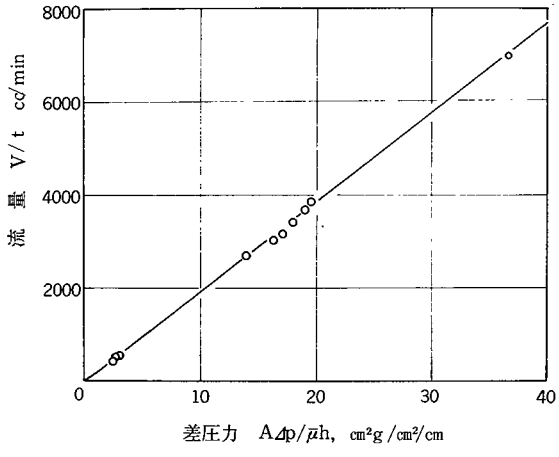


図28　通蒸気度試験器の流量と差圧力の関係

これを通気度試験器として用いて，JIS規格による通気度試験と比較した。その結果を図28および表1に示す。本装置で通気度を測定した場合は，3だけ抵い値であり，十分使用可能である。

次に，水蒸気の粘性は通蒸気度を求めるとき，水蒸気の粘性係数を用いないで，水蒸気と空気の粘性係数の比（μ_{steam}/μ_{air}）を用いた。これは通気度試験では通過流体として空気を用いるにもかかわらず，粘性係数を1としているためである。通気度と通蒸気度の比較のためにはこの方法をとるが，水分凝縮層を通過する蒸気の流量計算などに通蒸気度を用いる場合には蒸気の粘性係数を用いなければならない。

以上のことを考慮して，通蒸気試験を行った場合の流量と圧力勾配との関係を示したものが図29～図32である。

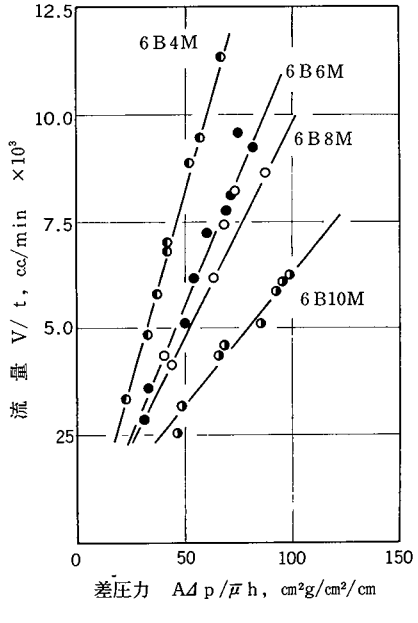


図29　流量と差圧力の関係（I）

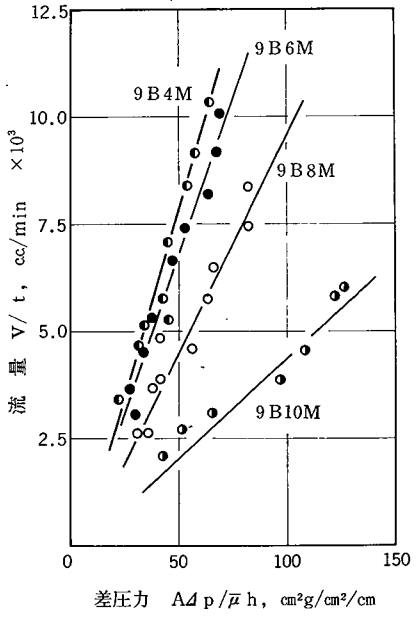


図30　流量と差圧力の関係（II）

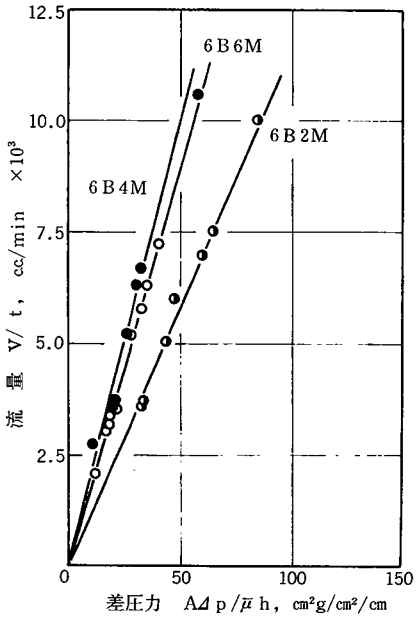


図31　流量と差圧力の関係(Ⅲ)

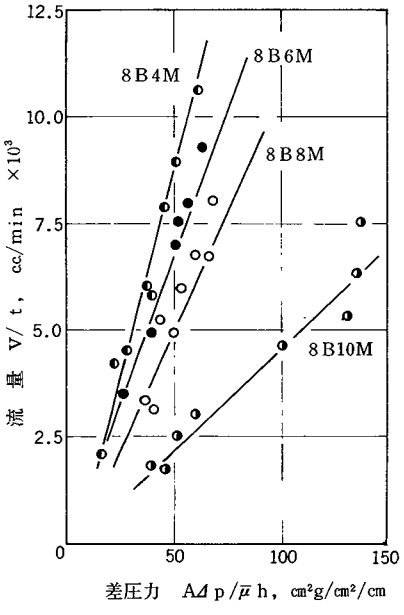


図32　流量と差圧力の関係(Ⅳ)

計算結果を表2に示す。

表2　通蒸気度実験値

配　合	試片重量(g)	通蒸気度	通気度
6 B 4 M	148	178	250
6 B 6 M	152	121	212
6 B 8 M	155	101	192
6 B10M	157	62	146
8 B 4 M	147	188	236
8 B 6 M	150	135	217
8 B 8 M	157	112	192
8 B10M	157	48	148
9 B 4 M	147	171	223
9 B 6 M	150	145	206
9 B 8 M	157	102	178
9 B10M	160	42	140

図33はベントナイト量を一定にして初期水分率を変化させた場合の通気度と通蒸気度を示したものである。いずれの場合でも通蒸気度は通気度に比べ抵い値を示している。また高水分ではその差が大きい。このことについては次のように考えられる。

第一に空隙の差について，観察実験[63]の結果に基づいて考察する。生型の砂粒表面はかなりの凹凸をもって粘土ペーストで被覆されているが，水分凝縮層の砂粒の粘土被膜は生型のそれに比べて滑らかで薄くなっており，このことだけから判断すれば，通蒸気度は通気度よりもかえって高い値を示すはずである。ところが凝縮水により過飽和となった粘土ペーストは砂粒表面を流下し，砂粒接合部に集まり，空隙をうめる。さらに，小さな空隙は完全に閉ざされてしまうことも考えられる。以上のことから，同一初期水分率においては，通蒸気度は通気度に比べて低い値を示す。

第三に生型試片と凝縮試片とに密度の差がない場合，通気度と通蒸気度には大きな差が生じていないことである。（この場合，水蒸気と空気による通過流体の違いの透過度におよぼ

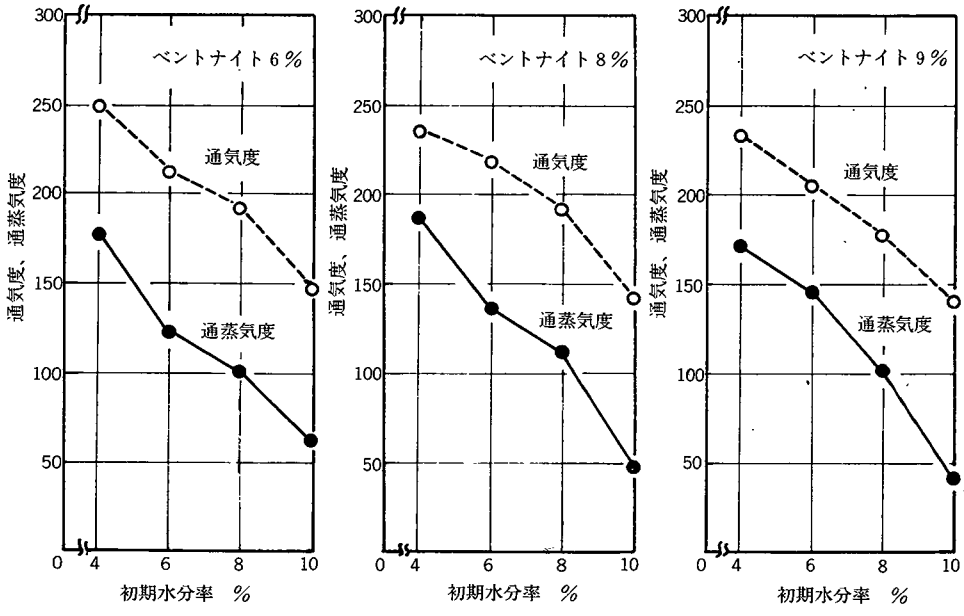


図33　初期水分率と通気度・通蒸気度の関係

す影響は考えなくてもよい。)

通蒸気度を定義し実験をおこなった結果，水分率を基準にして従来の通気度と比較したとき，両者の間にはあまり差がないことが確認された。本項において述べた通蒸気度の定義ははじめに意義づけしたような意味をもつが，実際の取扱いについては，従来の通気度試験法でまにあう。しかし通蒸気度の応用については通気度とは異なり，乾燥域と飽和域の間に発生した水蒸気がさらに鋳型内部に移動するときの透過度を示すものである。この通蒸気度によって抵抗をうけながら通過した水蒸気は生型における凝縮域の熱伝達をうけもっていると予想され，これを明らかにすることは意義のあることだと考えられる。

2・2・4　結　言

蒸気発生器から標準試片に水蒸気を流入させて，水分凝縮層を発生させ，その移動状況を明らかにすることができた。

室温の試片に100℃の水蒸気が流入し始めると，水蒸気は凝縮して，水分凝縮層をつくる。この水分凝縮層では100℃に昇温するまで水分の増加が続くが，100℃になると，その部分へ来た水蒸気を通過させるだけになる。こうして，試片のさらに奥の部分に凝縮が移る。

一方，蒸気流入の推進力となる蒸気圧は，試片内に入ると指数関数にしたがって抵下し，飽和域を過ぎれば零となる。これは流入蒸気圧の高いほど飽和域の移動速度が速いことと同意義である。

水分率やベントナイト量はいずれも増加すれば飽和域の移動速度を小さくするが，両者では作用の機構が異なる。

また，上のような考え方に立脚して飽和域の水分率を求める式をたて，計算値と実験値とを比較したところ，良く一致した。

蒸気の移動抵抗として通蒸気度を提唱した。従来から考えられていた，通気度および高温通気度に加えて，通蒸気度の測定原理を明らかにし，試作した通蒸気度試験器の特性を調べた上で通蒸気度を求めた結果次の点が明らかとなった。

1．空気と水蒸気の粘性比を用いて通気度と通蒸気度との比較をおこなった。

2．同一配合砂では通蒸気度の方が抵い値を示す。

3．初期水分率が凝縮試片とほぼ同一の試片を比較したところ，大きな差はなかった。

第３章　水分凝縮層の移動に関係する水蒸気圧

３－１　緒　言

水分凝縮層の発生・移動状況から凝縮域内にはある程度の圧力勾配が存在しなければならない。そこで，鋳型内での圧力について考えてゆかねばならないが，前章ではこのことを予想して，水蒸気の逸出抵抗である通蒸気度を提唱した。

本章では蒸発界面における水蒸気の発生や通蒸気度を手がかりとして，型内の水蒸気圧分布と水分凝縮層の移動との関係を明らかにし，ガス逸出挙動について考察を加えた。

従来から鋳型内のガス逸出については多くの研究がなされているが，その多くは鋳物内に発生する気泡やピンポールとの関係を求めるものであった。

Marek[10]は水分凝縮層と水蒸気圧との関係を求めているが，吹かれとの関係が主である。

Hoffmann[11]は型内水蒸気逸出の難易によって温度分布が異なることを示し，型内での圧力の存在を示唆した。

Draper[12]は，過熱蒸気を生型試片に送り込み，水分凝縮層を発生させその挙動を調べている。定圧装置によって過熱蒸気を試片内に送り込み水分凝縮層を発生させ水分凝縮層内に圧力の存在を示唆している。

斉藤[18]らは水分凝縮層を蒸気通過域と呼び，圧力勾配があるはずと述べている。試片に水蒸気を送り，その移動量を等価温度伝導度として測定している。

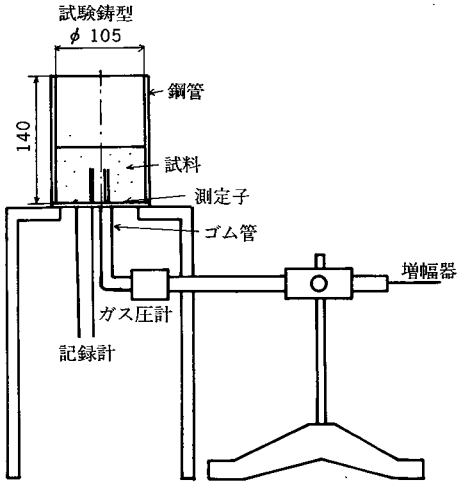


図34　実験装置

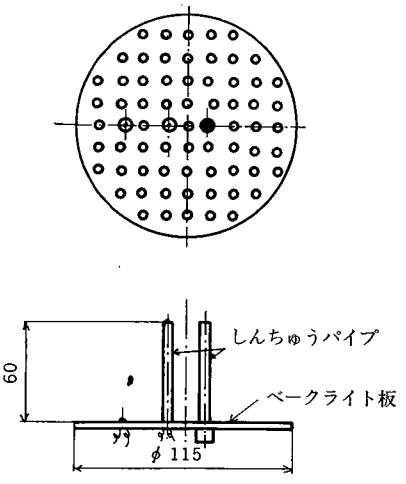


図35　測 定 子

3－2　実験方法

実験装置は図34に示すように試験鋳型，型の温度および圧力の測定子，ガス圧計（直流増巾器），および記録計から構成されている。

1．測 定 子

測定子は図35に示すように基板，ガス受圧パイプおよび熱電対から構成されている。基板にはベークライト板を使用し，多数の孔をあけ，鋳型からのガス逸出抵抗を除いた。ガス受圧部には黄銅パイプを用いた。ガス受圧部および熱電対は同一高さのものを一対とし高さの異なるものを数種作製した。

2．ガス圧計

ガス圧計は拡散半導体小型圧力変換器を用いた。

3．試 料 砂

島根県産6号けい砂に群馬県産ベントナイトを添加した。砂調製はシンプソンタイプの実験室用ミルで砂にベントナイトを加えて，空びき2 minの後水を添加し，混練5 minとした。

4．試験鋳型

図36に示すように2種類のものを用意した。造型方法は，測定子を置き，銅管（鋳枠）をかぶせ，所定量の砂を管内につめ，サンド，ランマー(重量10kg)にて密度の均一化に留意しつつ突き固めた。

5．鋳込み金属

使用した溶金が工業用純アルミニウム(99.7%Al)の場合鋳込み温度700℃，普通鋳鉄では1,300℃を目標とした。

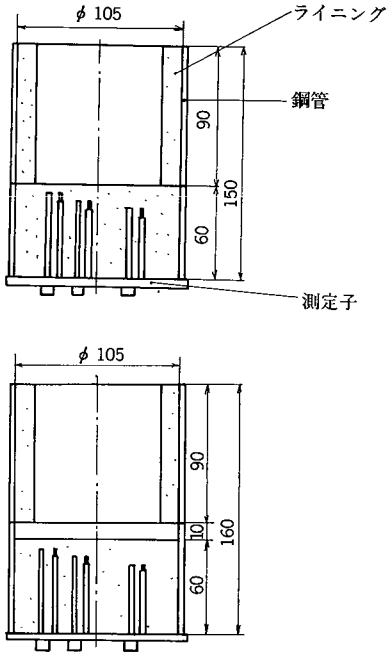


図36　試験鋳型

3－3　実験結果および考察

3・3・1　予備実験

上記の装置が初期の目的にかなった測定をおこなっているか調べるための予備実験をおこなった。

1．パイプ内での凝縮

測定方法上，ガス受圧パイプ内で水蒸気が凝縮し，圧力を低く感知する恐れを考慮してガス圧入部にシリコン・オイルを満たして，実験をおこなったが，シリコンオイルを用いない場合と同じ傾向が得られた。よってパイプ内での水蒸気の凝縮による圧力変化は小さいものとみなし，特殊な測定子を用いる必要はないことが判明した。

2．鋳込み直後における界面附近の小ピーク圧力

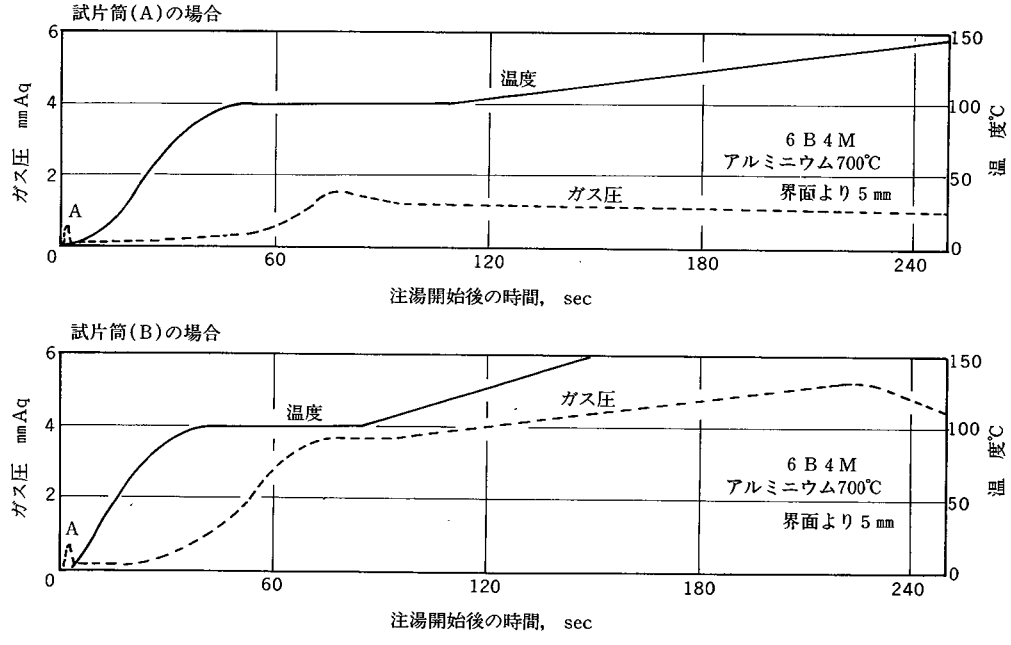


図37　鋳込み後の温度，ガス圧変化

図37に示すように鋳込み直後ピークAがあらわれるが，これは次のように発生したものと考えられる。注湯時に，鋳型表面は，きわめて高温にさらされるため，鋳型界面近くの水分が瞬間的に気化し，過熱蒸気となることによるものであろう。加えて，鋳型空間内の空気も膨張し，双方の気体が混合して，急激に型内外に排出される。このような理由から，小ピークが感知されたものであろう。このピークは，アルミニウム鋳込みよりも鋳鉄の方が，また，型内部より型の表面近くの方が大きく表われた。このピークは鋳込み後の過度的な圧力であり，この圧力の存在が直接水分凝縮層の移動に影響するとは考えられないのでここでは無視する。

3．感知するガスの種類

ガス圧計に感知する圧力は水蒸気であるか，又はそれ以外の気体であるかを判定するため，ピッチを2％添加してガスの逸出挙動の差異を比較した。ピッチを添加すると鋳込み時に発生する小ピークが無添加のものに比べると大きいが，温度が100℃になってから上昇する圧力には差がほとんどみられなかった。鋳込み時に発生する小ピークは過熱蒸気やピッチから発生した，非凝縮性ガスによる圧力であり，その後，飽和域に達してから上昇する圧力は水蒸気圧によるものとみなす。

3・3・2　型内の圧力分布

まず，鋳型内蒸気圧分布の概略を知るため界面より，5㎜の点に測定子をおき，アルミニウムを鋳込んだ。このとき用いた試験鋳型は図36(A)である。得られた結果を図37(A)に示す。この場合は，測定値がかなりばらつき，実験の再現性に乏しかった。そのため図36(B)に示す試験鋳型を用いたところばらつきも少なく，再現性がでてきた。鋳型(A)を用いた場

合は，上型と下型の間や，上型のライニングはすぐに乾燥するため通気性が良くなるので，上型をとうして水蒸気が散逸するものと思われる。そのため圧力の測定値にバラツキがみられたものと考えられる。他方，鋳型(B)にすると上記のようなことはみられないため，型内の圧力は鋳型(A)に比較して高い値を示している。鋳型(B)の方案は特殊な型をしているように見えるが，一般の鋳型では砂つきが厚くて，見切り線や上型をとうして，水蒸気は逃げないはずであるから，むしろ普通の鋳型と同じくらいの圧力を示しているものと考えられ，以後の実験は鋳型(B)を用いた。

図37において，鋳型(A)と鋳型(B)の場合を比較すると圧力の高さが異なるだけでなく，温度が100℃に到達する点および100℃以上に上昇を開始する点も異っている。すなわち，水分凝縮層の移動状況が異っている。型内の水蒸気圧が高い方が水分凝縮層の移動速度も速くなっている。このように同じ条件の鋳型であっても，方案が異なることによって，水分凝縮層の移動に違いがあることは興味のある問題である。

鋳型(B)では230sec付近で水蒸気圧が最大値を示し，以後減少しているが，このとき鋼管(鋳枠)底部から水蒸気の逸出がみられた。

図38では，上図が型内温度と水蒸気圧曲線，下図では温度曲線から水分凝縮層の移動状況がわかるように，初期水分域，飽和域そして乾燥域に区分したものである。鋳込み後250sec経過した点においては，乾燥域/飽和域の境界は界面より10㎜と15㎜の間に位置している。この時点では，界面より，5㎜，10㎜の測定点はいずれも乾燥域に位置している。このときの水蒸気圧曲線は深い方の点の温度が100℃以上になったときから重なっていることがわかる。

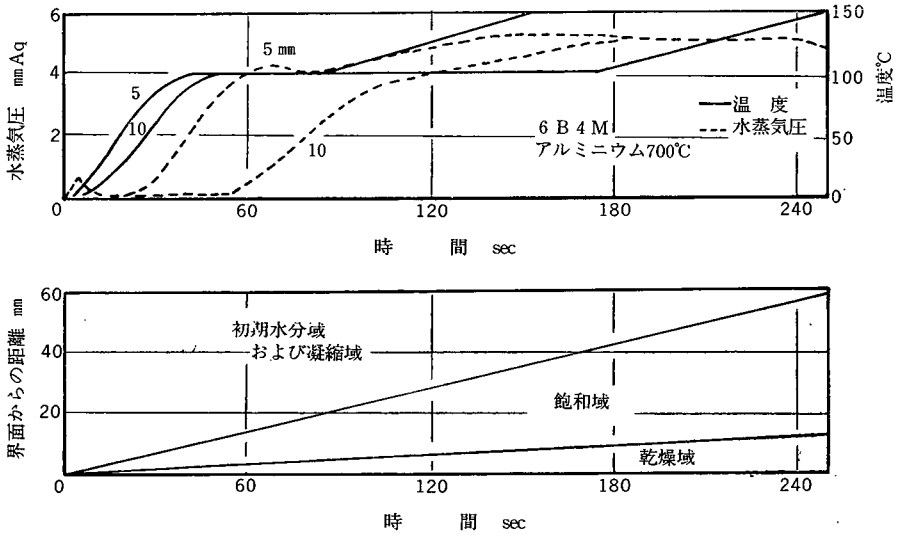


図38　鋳込み後の温度，水蒸気圧の変化と飽和域の分布状況

界面から測定子の距離を変化させて，同様の実験をくり返しても同じ結果が得られた。乾燥域は高温の部分もあり，当然過熱蒸気が存在するにしても，乾燥域内はほぼ等圧のようである。

また，飽和域/凝縮域界面が鋳型端面，すなわち，界面より60㎜の点に到達する時刻，注湯開始後240sec において，水蒸気圧減少の傾向がみられた。この時刻前後において，水蒸気は鋳型端面から型外へと逸出を開始するが，このことは，飽和域が水蒸気の通過域であることを示している。鋳型端面付近が，初期水分域，凝縮域である間は水蒸気の型外逸出は起らず，鋳型端面が，飽和域に達してから水蒸気の型外逸出が起り始める。したがって，生型内の水蒸気圧は乾燥域，飽和域のみに存在することになる。

以上の結果から生型内の各層における圧力，温度水分の分布を模式的に示せば図39のようになる。

3・3・3　水分凝縮層の厚さと乾燥域の圧力との関係

型内のガス圧分布を明らかにしてきたが，ここでは背圧，すなわち乾燥域の圧力におよぼす飽和域の厚さの影響について考える。飽和域は厚さを増しつつ型の内部に移動してゆくので，水蒸気の移動抵抗は時間の経過とともに増し続けると推察できる。これまでは半無限平面鋳型を想定してきたが，ここでは鋳型厚さがある有限の長さであるとする。水分凝縮層が鋳型の外側に移動し，その飽和域端が鋳型壁外面まで移動してくると，そのときから水分凝縮層の厚さは薄くなり始める。乾燥域内で上昇しつづける水蒸気圧もこの時点を最大値として降下しはじめる。

水分凝縮層を流れる水蒸気は非定常流であるが，流速もあまり大きくなく，その変化も小さいので，Darcy の法則がなりたつものと仮定して，乾燥域の圧力である最大蒸気圧を求めてみる。ここでは水分凝縮層が鋳型外端に達し型から蒸気が流出を始める直前の乾燥域の蒸気圧を求めようとするものである。Darcy の法則は，

$$Q = \bar{K} \cdot A \cdot p / \bar{\mu}_{steam} \cdot \Delta x \qquad (3 \cdot 1)$$

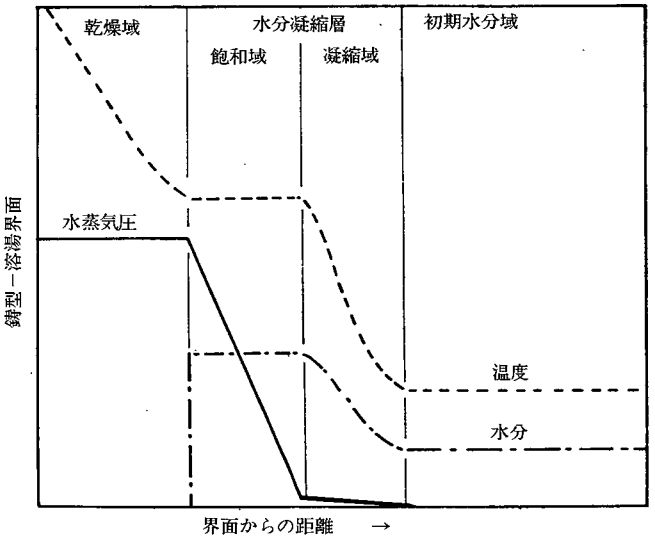


図39　水分凝縮層の温度，水分，水蒸気圧の関係の概略

これから

$$p=Q\cdot\bar{\mu}_{steam}\cdot\Delta x/\bar{K}\cdot A \qquad (3\cdot 2)$$

鋳込み後，t sec における乾燥域の厚さ$x_1$cmは

$$x_1=C_1\sqrt{t} \qquad (3\cdot 3)$$

ただし蒸発界面および凝縮界面の移動速度係数をC_1，C_2とおくと水分凝縮層の厚さは，

$$\Delta x=(C_2-C_1)\sqrt{t} \qquad (3\cdot 4)$$

水蒸気の流量は蒸発域から発生する蒸気量とすれば，

$$Q=m\cdot\rho\cdot v''\frac{dx_1}{dt} \qquad (3\cdot 5)$$

式（3・3）より

$$Q=C_1\cdot m\cdot\rho\cdot v''/2\sqrt{t} \qquad (3\cdot 6)$$

ゆえに

$$P=C_1\cdot m\cdot\rho\cdot v''\cdot\bar{\mu}_{steam}\cdot(C_2-C_1)/2\cdot\bar{K}\cdot A \qquad (3\cdot 7)$$

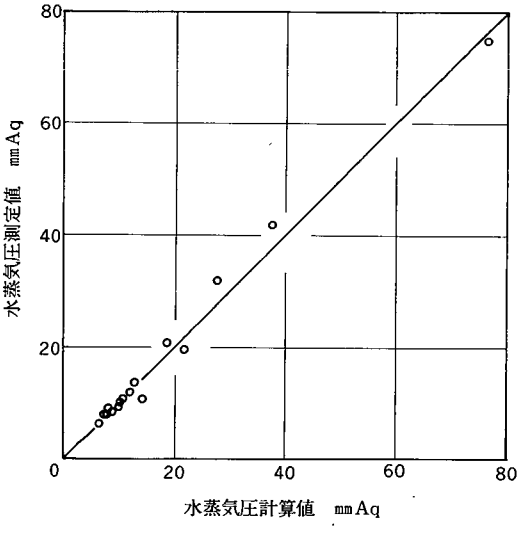


図40　水蒸気圧の測定値と計算値

実験によるC_1，C_2および式（3・7）を用いて計算した圧力Pと鋳型内圧力との比較を図40に示す。

以上のように生型内の圧力分布を調べ，その結果から最大蒸気圧を求めることができた。これによって生じる飽和域内の圧力勾配が駆動力となって水蒸気は飽和域をとおって，凝縮域内に流れ込み，水分凝縮層がさらに鋳型内部に移動しているものと思われる。

3－4　結　　言

生型内の水蒸気圧分布およびその変化を調べたが，まとめると次のとおりである。

1．水蒸気と非凝性ガスとではその逸出挙動が異なる。

2．乾燥域内はほぼ等圧である。

3．Darcy の法則がなりたつものとして，水分凝縮層の厚さから乾燥域の水蒸気圧を求めたところ，実験値と良く一致した。

第4章　鋳込み後，生型内における熱及び水分移動モデル

鋳込みを行う前に予め計算によって鋳込み後の生型内の温度変化を求めることができれば乾燥域や水分凝縮層の存在する場所や時刻を求めることができて，鋳造欠陥の発生機構の解明や鋳造方案の決定等に有用である。そのため生型の伝熱解析は極めて重要な課題である。

従来の解析[15),16),17),18),]による研究はいずれも水分凝縮層の性質やその発生機構を良く理解せずに境界条件を設定しているため満足のゆく解が得られていない。それ故にこれらの研究も計算結果と実験結果の比較をしているものの精度についての考察は全くみあたらない。

本章では生型内各層の性質を再確認したうえで，飽和域から乾燥域に変わる境界条件及び初期水分域から飽和域に変れる境界条件を設定した。次いで生型内各域の伝熱方程式の解を求めた。

しかし解析では凝縮域にておこなわれている凝縮と伝導をみかけの温度拡散率として表わすしかなく，限界がある。

そこでこの点についての物理的意味をより明確にするため数値解析をおこなった。同時に円筒鋳型や中子などを想定して界面形状を変え，計算結果と実験結果を比較した。

4－1　近似解析

4・1・1　緒　　言

鋳込み後における温度，水分，蒸気圧の分布および水分凝縮層の水分率がこれまで実験的に明らかにされた。これら鋳型の状態を表わす変量は相互にある関係を保ちながら鋳物からの熱を吸収し，水分凝縮層が型内部に移動してゆくことが判明した。

前章までの実験結果をもとに，本節では生型熱伝達の解析をおこなう。

4・1・2　条件設定

解析を行う前に，前章までに明らかになった鋳型の状態をまとめ，そして条件の設定を行う。

ここで考える鋳型は半無限平面鋳型とし，界面温度は一定とする。

1．乾 燥 域

鋳物/鋳型界面と飽和域までの間が乾燥域である。温度は界面温度から飽和域の100℃までの範囲で水分は零である。水蒸気圧は型内では最も高く，5,6mmAqから40，50mmAqである。ここでは熱伝達はみかけの熱伝導とみなす。界面付近は高温になり放射熱による影響も考えられるが，ここでは熱伝導率は一定とする。

2．飽 和 域

温度はほぼ100℃で，水分はこの範囲が最も高く，その水分率は初期水分率と鋳型の初期温度によって決まる。蒸発域にて発生した水蒸気がこの飽和域の空隙を流れることによって熱伝達をおこなっている。そのためここには蒸気圧の圧力勾配がある。普通の鋳型であれば，飽和水分率になっても，水蒸気が移動しうる空隙は充分ある。

3．凝 縮 域

初期温度から飽和域までの範囲が凝縮域で飽和域を通過してきた水蒸気がここで凝縮し，水分と温度が上昇しているところである。水蒸気圧はほとんど零に近い。

4．初期水分域

造型時（鋳込み時）の温度，水分を保ったままで，未だ鋳物からの熱に影響されない部分。

5．蒸発界面

乾燥域と飽和域の境界である。温度が 100℃を越す点である。水分はこの範囲で飽和水分率からほとんど零に変化している。凝縮域と比較してここは幅が狭いので，面として考える。

これまでの実験結果をまとめると，鋳込み後の生型内は4つの領域と1つの界面に分けうる。なかでも蒸発界面と凝縮域は相の変化をしている。

4・1・3　境界条件

1．飽和域から乾燥域に変わる境界条件

蒸発界面では飽和水分率から，水分が蒸発して乾燥域に変わる境界である。乾燥域を通ってきた熱によって水分が蒸発し，やがて乾燥域になる。飽和域は温度勾配がなく，全域を通じてほぼ，100℃であるから，乾燥域を通ってきた熱は水分蒸発だけに費される。

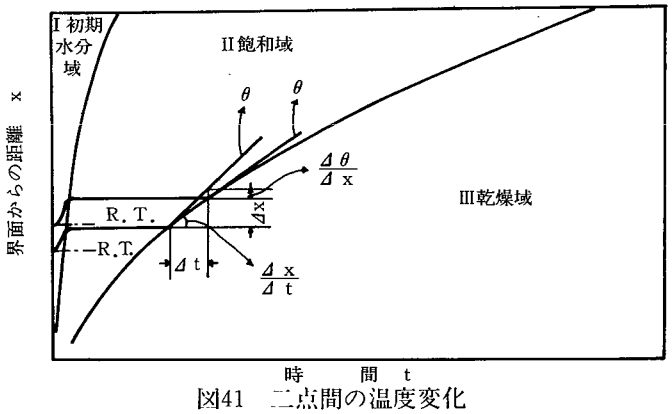


図41　二点間の温度変化

図41は，鋳込み後の鋳型温度の変化を埋設深さΔxだけ変えた2個の熱電対で測ったもので，xは界面からの距離である。

Δx cmの飽和域が乾燥するのにΔt sec を要するとしたら，乾燥域から飽和域に入った熱量は，

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot A \cdot \Delta t \qquad (4・1・1)$$

一方，Δxだけ乾燥に要する熱量は

$$L \cdot \rho \cdot m \cdot \Delta x \cdot A \qquad (4・1・2)$$

式（4・1・1）と式（4・1・2）は等しいはずであるから

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot A \cdot \Delta t = L \cdot \rho \cdot m \cdot \Delta x \cdot A$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = L \cdot \rho \cdot m \frac{dx}{dt} \qquad (4 \cdot 1 \cdot 3)$$

これが飽和域から乾 燥域に変わる境界条件である。この式（4・1・3）はまたNeumann の相の変化の条件である。

2．初期水分域から飽和域に変わる境界条件

乾燥域の水分はすべて蒸発して鋳型内部に移動し，飽和域を形成すると考えると，図42のようになる。また，飽和域の水分率は式（2・2・1）で示すように初期水分率と初期温度で決定される。

水分の収支から

$$M \cdot x_1 = (m - M)(x_2' - x_1) \qquad (4 \cdot 1 \cdot 4)$$

$$x_2' = \frac{m}{m-M} x_1 = \frac{m}{m-M} C_1 \sqrt{t} \qquad (4 \cdot 1 \cdot 5)$$

x_2'はある時刻t における境界面から飽和域と初期水分域との境界までの距離である。x_2'も，x_1と同様，時間の平方根に比例するはずであるから。

$$x_2' = C_2' \sqrt{t} \qquad (4 \cdot 1 \cdot 6)$$

とおける。式（4・1・5）と式（4・1・6）から

$$C_2' = \frac{m}{m-M} C_1 \qquad (4 \cdot 1 \cdot 7)$$

C_1およびC_2'は，乾燥域の水分量にだけ着目して水分凝縮層の厚さを求めたり，境界条件として表わすために導入した定数であるが，凝縮域の成因から考えて，C_2'には水分量だけでなく，飽和域における水蒸気の通過しやすさ，つまり，通蒸気度に関係していることは，容易に推測しうる。（乾燥域を通じての熱伝達だけによって決定するC_1は通蒸気度により影響されない。）

そこで，次のように考えてC_2'値を補正する。すなわち，基準配合砂を含む一連の試料砂の通蒸気度を測定する。

いま，初期水分率M%，ベントナイト量B_a，B_b，……B_x%の試料A，B……Xの通蒸気度が，K_a，K_b，……K_xであるとき，基準配合砂Aの通蒸気度K_aと他の試片の通蒸気度との比K_a/K_b，K_a/K_c，……K_a/K_Xをとる。基準試片のC_2'にこれを乗ずれば，通蒸気度を加味した凝縮定数が求まるはずである。すなわち，

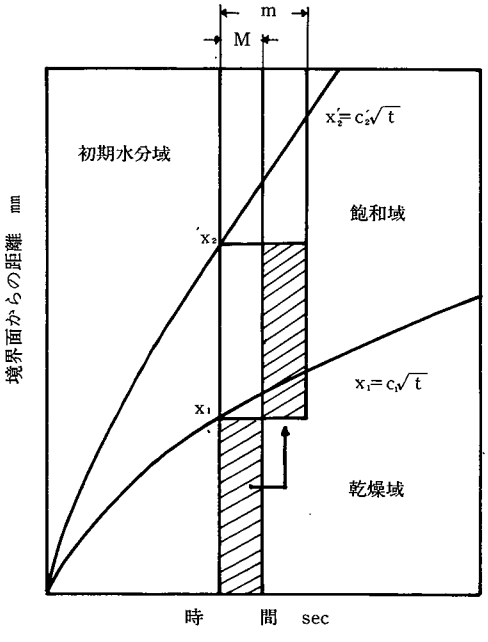


図42　凝縮界面を求める模式図（I）

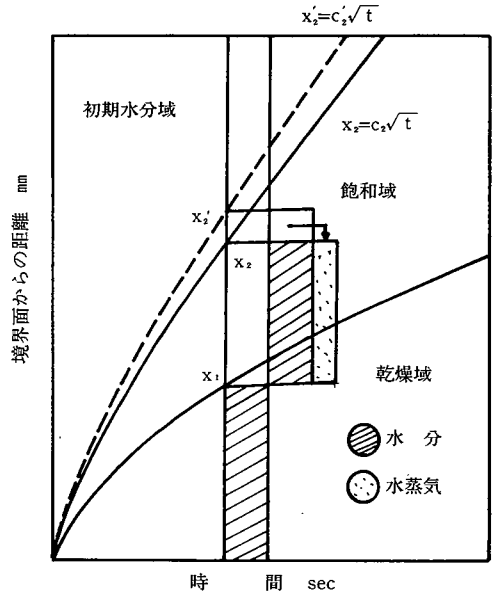


図43　凝縮界面を求める模式図(II)

$$C_2\ (X)=\frac{K_a}{K_X}C_2' \qquad (4\cdot1\cdot8)$$

C_2'がC_2に変わることは図43において$x_2'=C_2'\sqrt{t}$の曲線が右あるいは左に変位することである。

以上の方法で，補正された凝縮定数を求めることができるが，試片の条件（試料砂配合，造型条件など）が変化し，通蒸気度が悪くなると，水分凝縮層の厚さが小さくなる。この場合，発生した水蒸気は水分凝縮層を形成すると同時に未凝縮のままで層内に存在していると考えざるを得ない。

一般に，通蒸気度が悪ければ，鋳型内の背圧が高いことは，上記の考え方を裏付けるものである。

4・1・4　生型の温度分布

1．乾燥域

$x=0$のとき，$\theta=\theta_i$　　(4・1・9)

飽和域は100℃であるから

$x=\ell$のとき，$\theta=100$　　(4・1・10)

ただし，蒸発界面は時間の平方根に比例して移動するので，比例定数をC_1として

$$\ell=C_1\sqrt{t} \qquad (4\cdot1\cdot11)$$

C_1を蒸発定数と呼ぶ。

次に乾燥域における伝熱の方程式は

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=K\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \qquad (4\cdot1\cdot12)$$

ただし，$K=\frac{\lambda}{c\cdot\rho}$乾燥域の温度拡散率㎠/secである。

この式の解は一般に

$$\theta=A+B\cdot\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k\cdot t}}\right) \qquad (4\cdot1\cdot13)$$

初期条件からA，Bを求めて

$$\theta=\theta_i-\frac{\theta_i-100}{\mathrm{erf}\ (c_1/2\sqrt{k})}+\frac{\theta_i-100}{\mathrm{erf}\ (c_1/2\sqrt{k})}\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k\cdot t}}\right) \qquad (4\cdot1\cdot14)$$

ただし，乾燥域であるから$\theta>100$℃の範囲で有効である。

2．飽和域

$$\theta=100 \qquad (4\cdot1\cdot15)$$

$$\ell_1<x<\ell_2 \qquad (4\cdot1\cdot16)$$

$$\ell_1=C_1\sqrt{t} \qquad (4\cdot1\cdot17)$$

$$\ell_2=C_2\sqrt{t} \qquad (4\cdot1\cdot18)$$

3．凝縮域

$$x=\ell_2 \text{のとき} \theta=100 \quad \ell_2=C_2\sqrt{t} \qquad (4\cdot1\cdot19)$$

$$t=0 \text{のとき} \theta=\theta_0 \qquad (4\cdot1\cdot20)$$

熱伝達方程式は

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=k\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \qquad (4\cdot1\cdot21)$$

kは凝縮域の温度拡散率　㎠/sec

一般に上式の解は

$$\theta=A+B\cdot\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k\cdot t}}\right) \qquad (4\cdot1\cdot22)$$

で表される。初期条件および境界条件からA，Bを求め整理すると，

$$\theta=\theta_0+\frac{100-\theta_0}{\mathrm{erfc}\ (C_2/2\sqrt{k})}\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k\cdot t}}\right) \qquad (4\cdot1\cdot23)$$

これが，凝縮域の温度分布を示すものであり，$\theta<100$℃の範囲で有効である。

以上で，生型の温度分布を解析的に求めることができた。境界温度，鋳型初期温度，乾燥域の温度拡散率，凝縮域の温度拡散率の値が必要である。

4・1・5　蒸発定数

式（4・1・11）および式（4・1・14）の蒸発定数C_1は実験結果から求めることもできるが，式（4・1・3）の境界条件を用いて解析的に求めることもできる。

式（4・1・3）の左辺に式（4・1・14）をxにて微分して入れると，

$$y_1=\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x} \qquad (4\cdot1\cdot24)$$

$$=\frac{100-\theta_i}{\mathrm{erfc}\ (C_1/2\sqrt{k})}\,e^{-\frac{C_1^2}{4K}}\frac{b}{\sqrt{\pi\cdot t}} \qquad (4\cdot1\cdot25)$$

ただし　$b=\sqrt{\lambda\cdot C_1\cdot\rho}$

式（4・1・4）の右辺は　$x=C_1\sqrt{t}$をtで微分して

$$y_2=L\cdot\rho\cdot m\frac{\partial x}{\partial t} \qquad (4\cdot1\cdot26)$$

$$=L\cdot\rho\cdot m\frac{C_1}{2\sqrt{t}} \qquad (4\cdot1\cdot27)$$

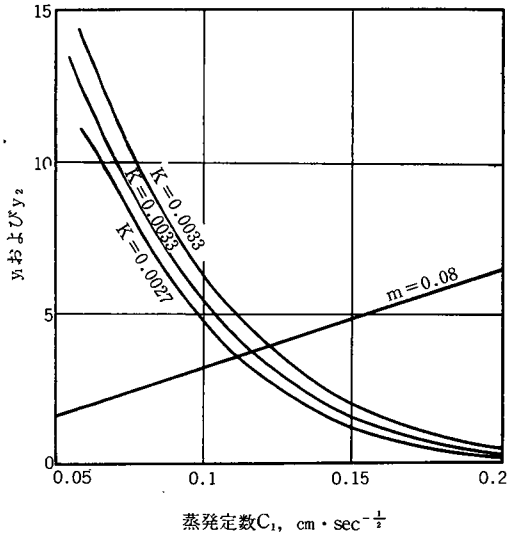


図44　温度拡散率と蒸発定数との関係

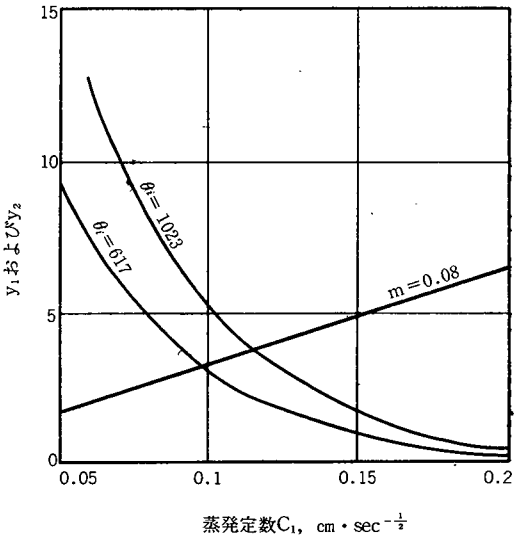


図45　界面温度と蒸発定数との関係

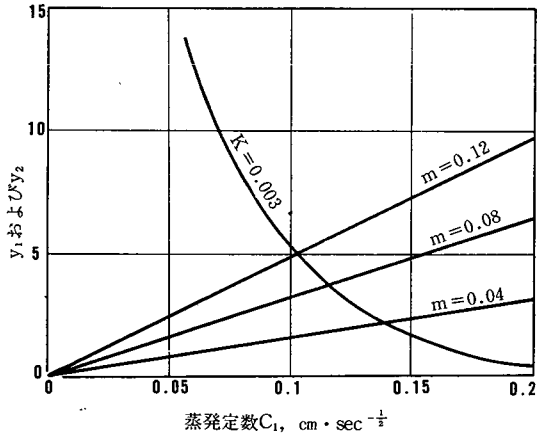


図46　飽和域の水分率と蒸発定数との関係

図44のように横軸に蒸発定数C_1をとり，縦軸にy_1とy_2をとって，交った点のC_1を求めればよい。図44は鋳型の飽和域の水分率8％の場合，鋳型の温度拡散率を変えて蒸発定数を求めたものである。図45は鋳型の飽和水分率8％の場合で溶湯／鋳型界面温度によって蒸発定数を求めたものである。この界面温度は鋳込み実験によって求めたものである。図46は飽和域の水分率による蒸発定数の変化を求めたものである。

蒸発定数C_1は式（4・1・25）および式（4・1・27）からもわかるように，界面温度，乾燥域の温度拡散率，飽和域の水分率，および鋳型密度などによって変化するが，これをまとめると次のようである。

1．鋳型の温度拡散率が高いほど大きくなる。

2．溶湯／鋳型界面温度が高いほど大きくなる。

3．飽和域の水分率が大きいほど小さくなる。

蒸発定数が大きくなることは，ある点まで乾燥する時間が少ないことを示している。上の結果は従来から経験されている傾向と一致している。

先に述べた凝縮定数と計算によって求めた蒸発定数を表３に示す。

以上を総合して生型の温度分布が求まる。この温度分布の計算値を斜眼紙上に三次元的に表わしてみた。

図47は鋳鉄鋳込みを想定して求めた生型の温度分布である。100℃の台地状になっている斜線部が飽和域である。

図48は水分８％の場合であって，４％と比べれば飽和域がさらに深いところに達している。

図49はアルミニウムの鋳込みを想定したものである。

４・１・６　実験および考察

１．実験方法

鋳鉄および工業用純アルミニウム（99.7%Al）を鋳込んで，生型の温度分布を調べ，解析的に求めた解と比較した。

表３　蒸発定数と凝縮定数の計算値

界面温度 1,023℃
型のみかけ密度 1.5g/cm³
乾燥域の温度拡散率 0.003cm/sec

配　合	蒸発定数 $\frac{1}{2}$ cm・sec$^{-\frac{1}{2}}$	凝縮定数 $\frac{1}{2}$ cm・sec$^{-\frac{1}{2}}$
6 B 2 M	0.127	0.198
6 B 4 M	0.116	0.236
6 B 6 M	0.108	0.266
6 B 8 M	0.108	0.289
3 B 2 M	0.127	0.270
3 B 4 M	0.116	0.254
3 B 6 M	0.108	0.297
3 B 8 M	0.108	0.340
9 B 2 M	0.127	0.156
9 B 4 M	0.116	0.222
9 B 6 M	0.108	0.248
9 B 8 M	0.108	— *

＊背圧測定不能

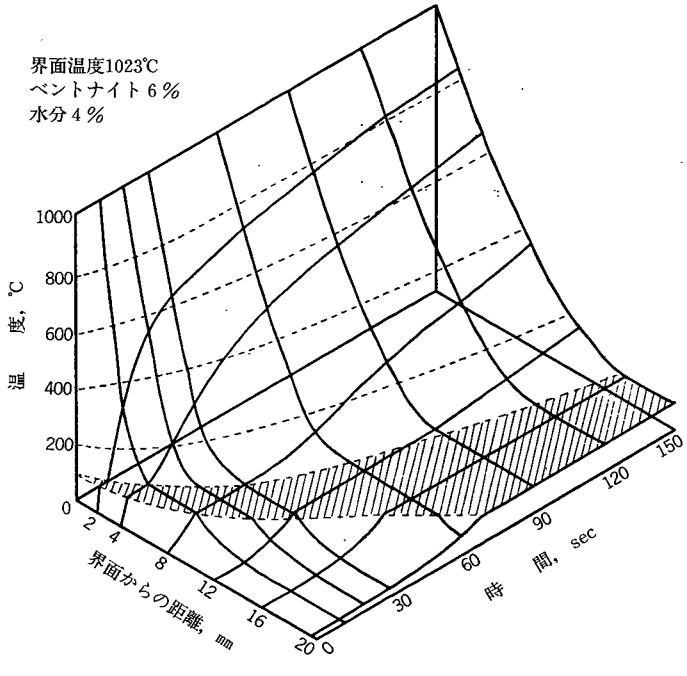


図47　生型の温度分布（Ⅰ）

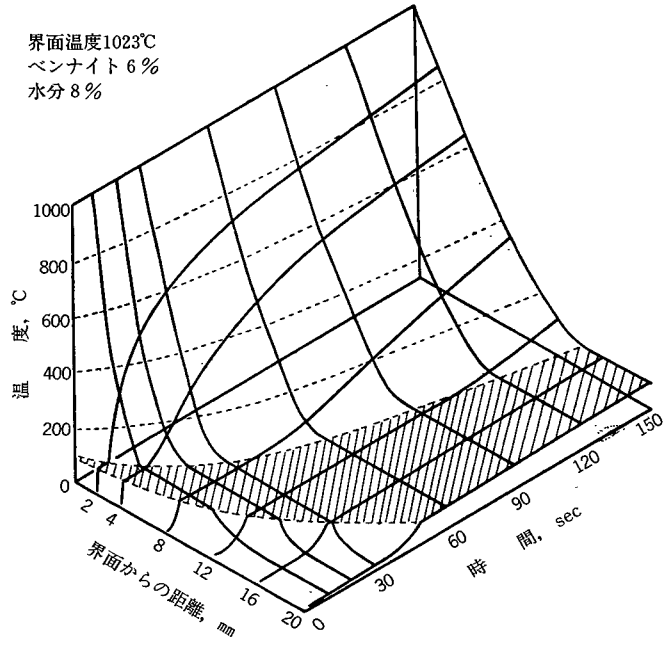


図48　生型の温度分布（II）

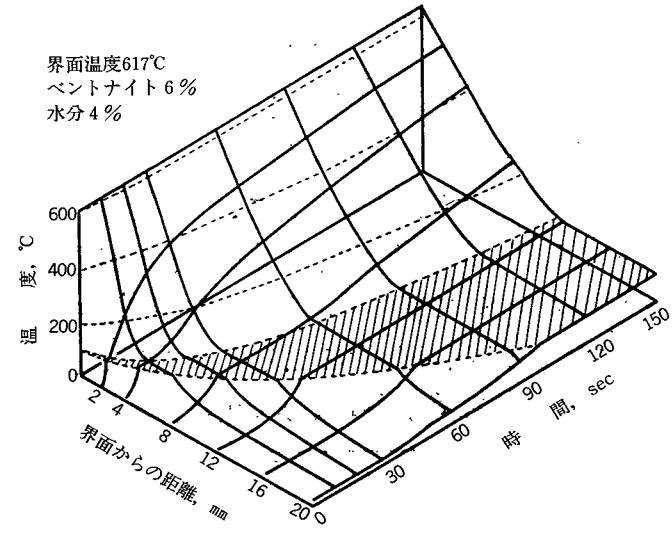


図49　生型の温度分布（III）

試料砂は，山陰産５号けい砂に，群馬産ベントナイトを６％加え，からびき２min，混練５minして調製した。

鋳込み実験における方案および試験鋳型を図50および図51に示す。熱電対を鋳型内に埋設するにあたっては，測定子が界面からの熱流を妨げないように心がけた。すなわち，ベ

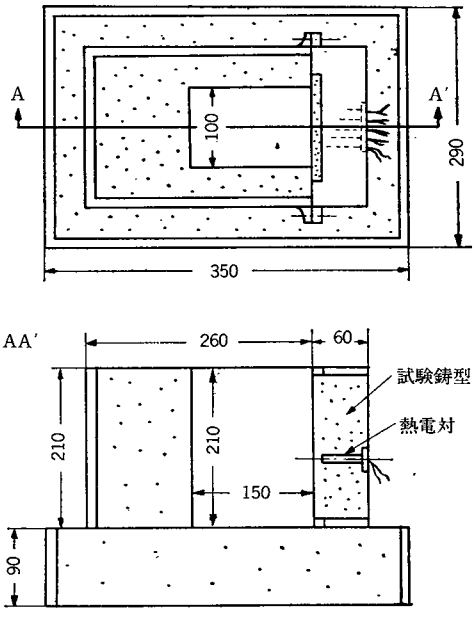


図50　鋳造方案および試験鋳型（鋳鉄）

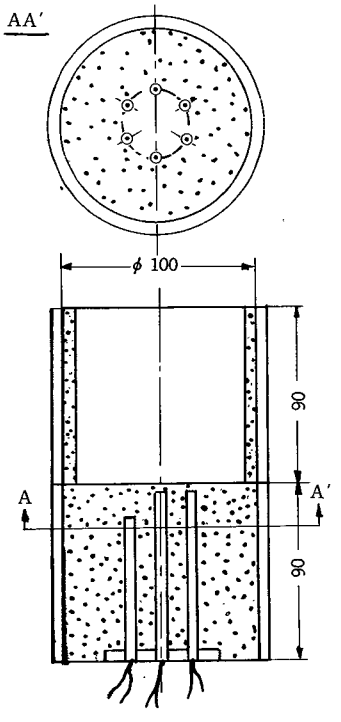


図51　試験鋳型（アルミニウム）

ークライト基板に直角にたてた熱電対保護用磁製管が熱流に平行になるようつとめた。なお，熱電対の間隔は５㎜とした。

鋳込み温度を鋳鉄では1,350℃，アルミニウムでは680℃とした結果，界面温度はそれぞれ1,023℃と617℃となった。通蒸気度は第２章にて述べたものを使用した。

２．解析による解と実験結果

解析解に用いる熱的性質は，文献を参考にしながら表４のような値を選んだ。図52は蒸発界面と凝縮界面の実験値と解析的に得た結果の代表例である。実験値と解析解との一致がみられなかった理由は，次のように考えられる。

(1)　鋳込み直後の水蒸気の挙動が明ら

表４　計算に用いた熱物性値

記号	名　称	物　性　値
Cps	砂の比熱	0.23　cal/g
ρ	鋳型密度	1.5　g/cm³
λ	熱伝導率	0.00093　cal/cm・sec・℃
k	温度拡散率	0.003　cm²/sec
b	熱拡散度	0.032　cal/cm²・℃・$sec^{\frac{1}{2}}$

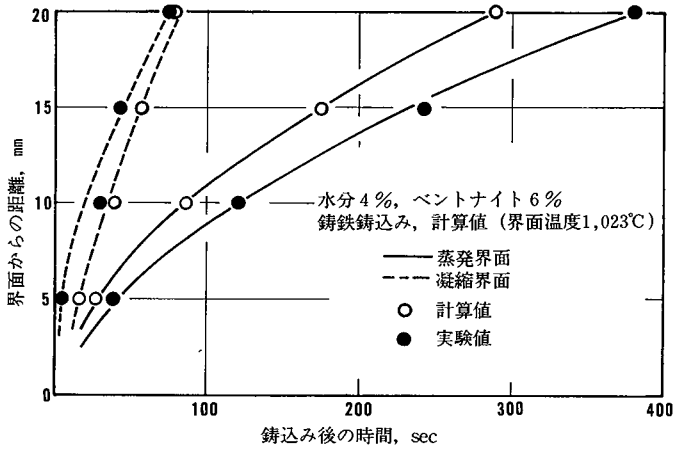


図52　蒸発線と凝縮線の計算値と実験値

かになっていない。鋳込みと同時に，溶湯にごく近い鋳型表面では水分が急熱され，過熱蒸気となって，鋳型内部に浸透するのではないか，また照らされた部分からは，鋳型空間のほうに蒸気の一部が逸出しているのではないか。つまり，鋳型内において，蒸発→凝縮のプロセスとは違う挙動をとるものがあるのであろう。

(2)　鋳型密度の不均一。

(3)　凝縮界面については，凝縮の進行の源となる飽和域内の蒸気圧について，ここでは考慮されていない。

図53は鋳鉄を鋳込んだときの図54はアルミニウムを鋳込んだときの乾燥域の温度分布を示したものである。図55はアルミニウムを鋳込んだ場合の温度分布の距離的な変化を表わしたものである。生型における乾燥域の温度分布を求めるとき水分凝縮層などは無視して，見かけの熱伝導率から温度分布を求めることができよう。このようにして求めた解と式(4・1・14)による解および実験値を併記して比較した。これら図53～図55において，式(4・1・14)による値は実験値と必らずしも一致しなかったが，変化傾向はほぼ同一である。このことは，式（4・1・14）の考え方が正当であることを意味するとみてよいが，うまく一致しなかった点について検討する必要がある。

実験値では400～600℃の間が低くなっていることが共通にみられる。これは，鋳型の熱伝導率が400～600℃の間でかなり低いためである。実際に，実験値から得られた値を用いて蒸発定数C_1を計算すると，100℃付近はもっと近似が良くなるものと思われる。図56は初期水分を変化させて温度分布を求めたもので，計算値および実験値ともに，水分率が多いと，100℃以上に昇温を開始するまでに時間がかかり，その後も温度が低いことがわかる。これらのことから，解析的に求めた解と実験値との間に一致がみられなかったことの原因を考えると，

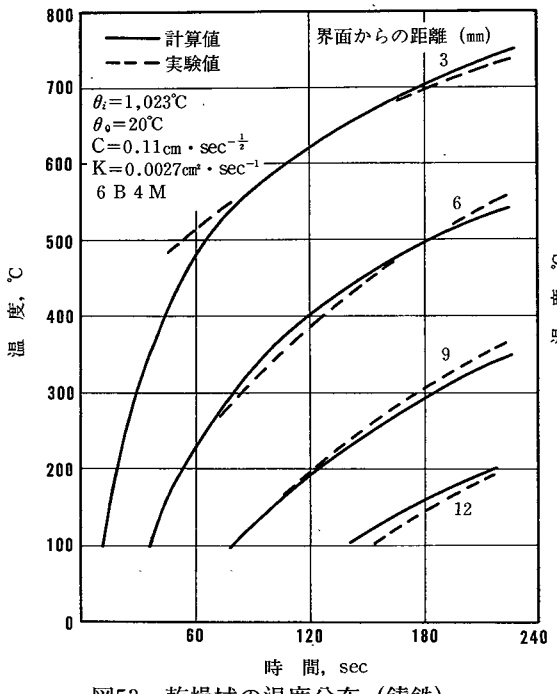


図53　乾燥域の温度分布（鋳鉄）

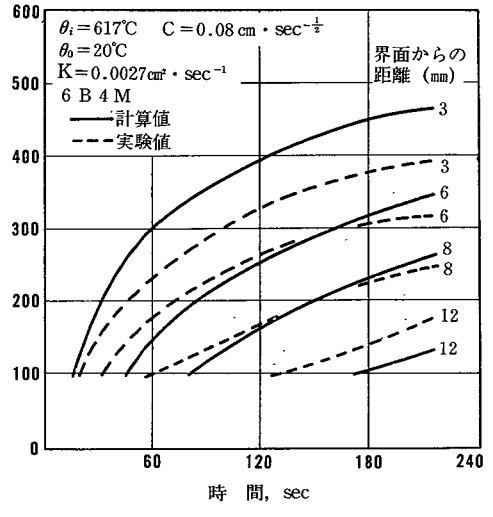


図54　乾燥域の温度分布
（アルミニウム）

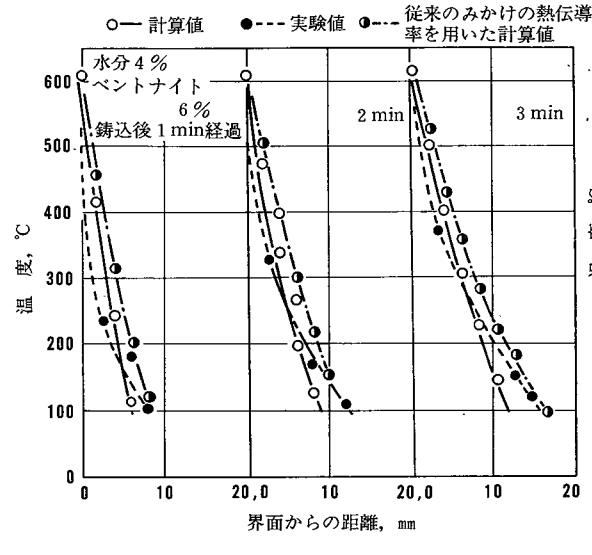


図55　乾燥域の温度分布（アルミニウム）

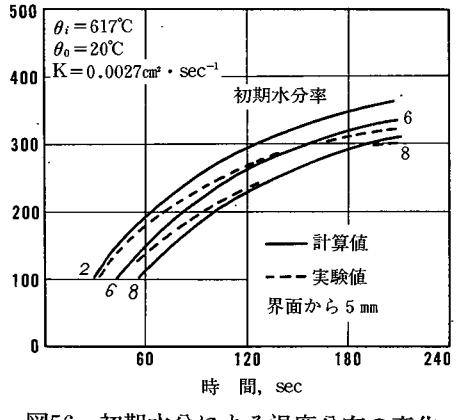


図56　初期水分による温度分布の変化
（アルミニウム）

(1) 溶湯／鋳型界面近くの水蒸気は，一部鋳型空間に逸出しているようであり，必らずしも鋳型全体にわたって蒸発定数C_1が一定してはいない。
(2) 鋳型の比熱や熱伝導率の値が温度によってかなり変っているが，ここでは一定とした。
(3) 鋳型密度が水分率によって異なるにもかかわらず，その変化を温度拡散率や蒸発定数の中にとり込まなかった。
(4) 溶湯／鋳型界面温度を鋳込みから凝固開始間は一定としたが，鋳込み時には溶湯温度が高いため，それより少し高いことも無視した。
などが考えられる。

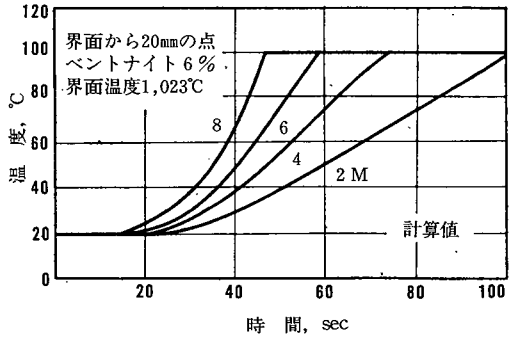


図57 凝縮域の温度分布
(水分率の変化)

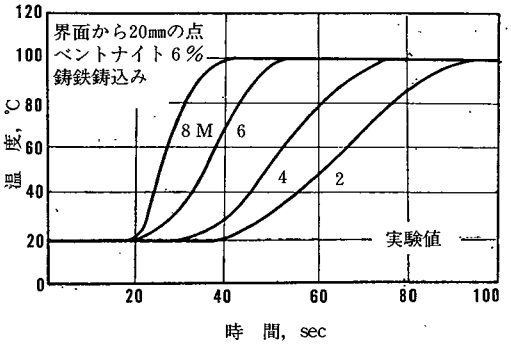


図58 凝縮域の温度分布
(水分率の変化)

図57は鋳鉄鋳込みを想定して計算した温度分布である。水分率の多いほど，鋳型内の所定点の昇温は早い，換言すれば熱伝達が速いといえる。図58はその実験値である。計算値と比べたとき，80℃以上において，温度分布の形の違いに気付くが，これについては後に述べる。

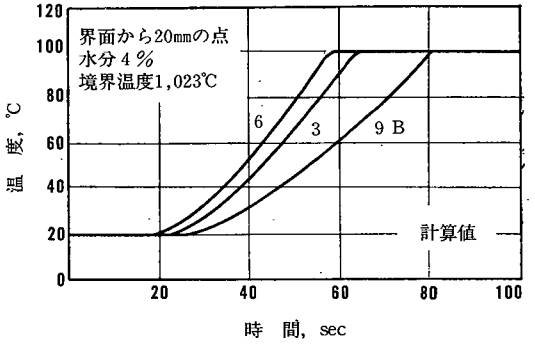


図59 凝縮域の温度分布
(ベントナイト量の変化)

図59は，水分率を4％に一定して，ベントナイト量を変えた場合である。先に，凝縮定数を求める際に，通蒸気度が関係すると述べたが，その効果がここに表われている。鋳型内のある点の昇温順序は，水分一定の場合，通気度の良い順になっている。図60の実験値でこの考え方の正当性が裏付けられている。図61はアルミニウム鋳込みを想定して計算した温度分布である。図62の実験値と比べると，かなり異っている。これは凝縮定数の値によるものであり，実験によって求めた凝縮定数を用いればもっ

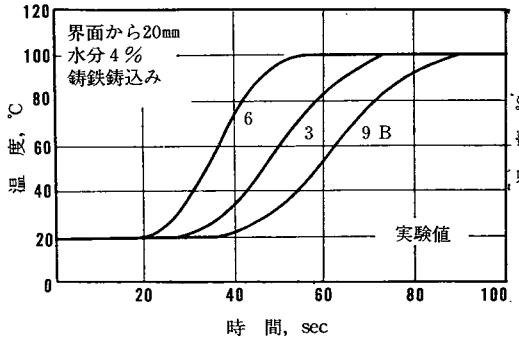


図60　凝縮域の温度分布
(ベントナイト量の変化)

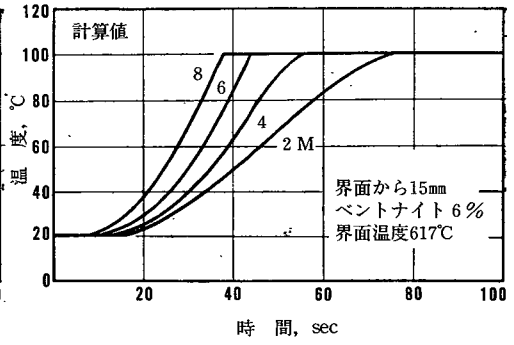


図61　凝縮域の温度分布
(水分率の変化)

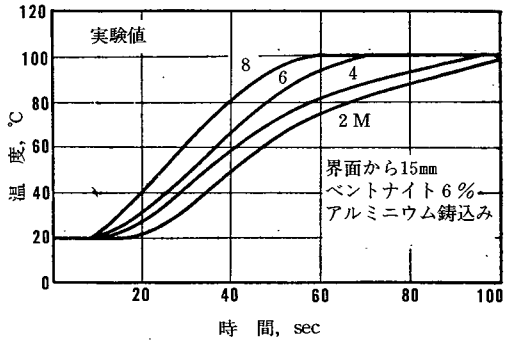


図62　凝縮域の温度分布
(水分率の変化)

とよく合うはずである。凝縮域において，実験値と解析的に求めた解との完全な一致が得られなかった原因として考えられる要因は，先に乾燥域のところで述べた原因に加えて次のようである。すなわち，凝縮域の熱伝達は，いわゆる凝縮熱伝達（潜熱熱伝達）と熱伝導の双方によっておこなわれている。特に凝縮熱伝達では温度によって水蒸気の凝縮量に大きな違いがあるはずである。換言すると，温度拡散率（K）は温度の関数となるにもかかわらず，一定として計算した。それゆえ，温度曲線の形状が相違したものと思われる。

4・1・7　結　言

これまでに明らかとなった水分凝縮層の諸性質を利用し生型内の温度分布を解析的に求めた。結果をまとめると次のようである。

1．初期水分率と飽和水分率との関係から，水分凝縮層の厚さを求めることができた。

2．蒸気が飽和域を移動する。移動しやすさが，生型の熱伝達に重要な関係をもっており，通蒸気度の考え方を導入した。

3．初期温度から100℃までは潜熱熱伝達がおこなわれており，そのみかけの熱伝達率は温度の関数である。

4．生型の温度分布を解析的に求めたところ従来のものより，よい近似が得られた。

4－2　数値解析

4・2・1　緒　言

4－1では凝縮域における温度分布を求めるとき，みかけの熱伝導率を使用して計算した。このみかけの熱伝導率を使用した温度分布は図63の破線で示すように下に凸の曲線となり，実験による温度分布と異った傾向を示す。またみかけの熱伝導率の物理的意味が明確でなく，このような取扱いには問題がある。

そこで本節ではみかけの熱伝導率を使用せず，水蒸気の凝縮をもう少し物理的に考え，さらに，鋳物／鋳型界面形状を考慮に入れた数値シミュレーション・モデルを考え数値解析をおこなう。また，従来調べられていない界面形状の異った鋳型の水分移動情況を実験的に調べ，計算値と比較検討した。

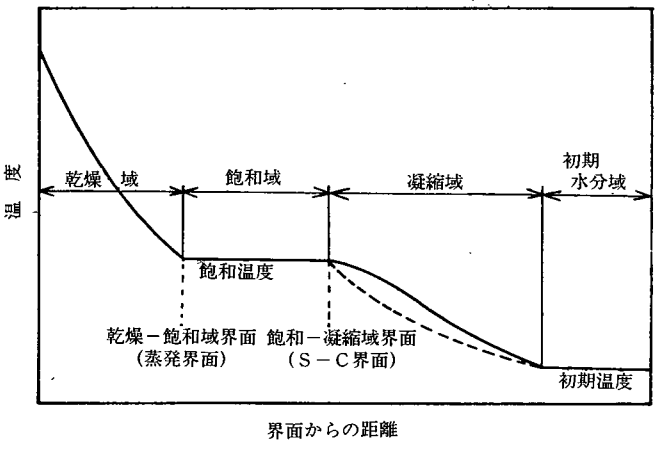


図63　鋳型内温度分布の模式図

4・2・2　シミュレーション・モデル

1．仮　定

シミュレーション・モデルとして，次のような仮定をおいた。

(1) 鋳物／鋳型界面温度は一定とする。計算には実験値を用いた。

(2) 鋳型密度は均一とする。

(3) 熱物性質は，温度あるいは鋳型密度によらず一定とする。（温度および鋳型密度の影響を考慮して計算することは必要であるが，現在，信頼できる砂型の熱物性値のデータがないためここでは簡単化のため一定とした。）

(4) 乾燥域における熱移動は，熱伝導だけによるものとし，飽和域の温度は100℃一定とする。

(5) 鋳込みと同時に界面近傍に差分の最小きざみ巾の飽和域ができると仮定し，初期飽和域とそのときの温度分布を質量収支，エネルギー収支を考慮して与える。

(6) 蒸発は蒸発界面のみでおこり，蒸発した水分は，すべて鋳型内に移動して，水分量は保存されるとする。

(7) 蒸発界面で発生した蒸気はすぐに飽和域を通過して，凝縮界面に達するとする。

(8) 凝縮域での蒸気の温度は，潜熱を放出すると砂粒の温度と共に減少する。そのとき，蒸気自身の温度降下による熱量は，潜熱放出量に較べて小さいとする。

(9) 砂粒は球形と仮定する。

(10) 毛細管現象は無視する。

2．基礎式

以上の仮定を基に次の基礎式を導いた。

(1) 乾燥域の温度分布

一次元の伝熱問題とすると，時刻t＝p・⊿t，距離x＝n・⊿x（またはr＝n⊿r）における階差式[64]を平面と曲率をもつ場合について示すと次のようになる。ただし本章に限って温度にはTを用いることにする。

平面　$T_n^{p+1}=K_D\cdot(T_{n+1}^p+T_{n-1}^p)+(1-2\cdot K_D)\cdot T_n^p$　　(4・2・1)

曲率　$T_n^{p+1}=K_D\cdot(1+1/2n)\cdot T_{n+1}^p+K_D\,(1-1/2n)\cdot T_{n-1}^p$

$+(1-2\cdot K_D)\cdot T_n^p$　　(4・2・2)

ただし　$K_D=\lambda_D/C_D\cdot\rho$　　(4・2・3)

$T_1^p=T_B$　　(4・2・4)

(2) 飽和域と乾燥域の境界条件

先に述べたように飽和域の水分量は

$$m=M+\{M\cdot C_w+(1-M)\cdot C_D\}\cdot(T_{100}-T_0)/L \qquad (4\cdot2\cdot5)$$

そして境界条件を示すと

$$\lambda_D\frac{\Delta T}{\Delta x}=L\cdot\rho\cdot m\frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (4\cdot2\cdot6)$$

(3) 凝縮域の水分および温度分布

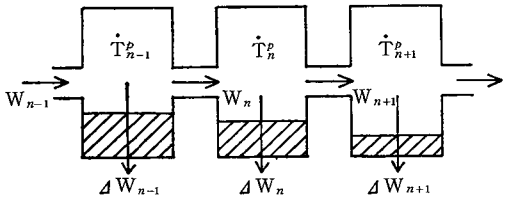


図64　凝縮域のモデル

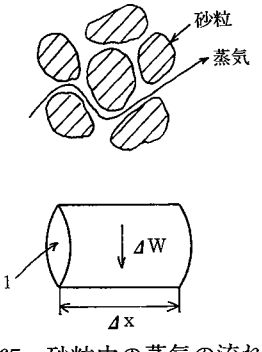


図65　砂粒中の蒸気の流れ

図64に凝縮域を模式図的に示した。入力としての蒸気量Wが，凝縮域の差分の1ブロックごとにΔW_i凝縮してゆき，Wが初期鋳型温度で未凝縮のまま存在できる量になるまで凝縮を続ける。時刻t＝P・⊿t，凝縮界面からの距離x＝n・⊿x（あるいまr＝n・⊿r）における熱収支を考えると次のようになる。

$$\lambda_C\frac{T_{n-1}^p-T_n^p}{\Delta x}\cdot\Delta t-\lambda_C\frac{T_n^p-T_{n+1}^p}{\Delta x}\cdot\Delta t+\Delta W_i\cdot L=\rho\cdot C_C\cdot\Delta x\cdot\Delta T \qquad (4\cdot2\cdot7)$$

すなわち，

$$\Delta T = K_C \cdot (T^p_{n+1} - 2 \cdot T^p_n + T^p_{n-1}) + \frac{L \cdot \Delta W_i}{\rho \cdot C_C \cdot \Delta x} \qquad (4 \cdot 2 \cdot 8)$$

式（4・2・7）は，熱伝導による熱収支を考慮しており，左辺第一項は熱伝導によって入ってくる熱量，第二項は出ていく熱量，第三項は凝縮することによって放出される潜熱量でその総和が凝縮域の温度をΔT変化させる。式（4・2・7）よりΔTを求めると式（4・2・8）となる。

次に水蒸気の凝縮量を考える。水蒸気が砂粒中を図65で示すように流れ砂粒と蒸気の熱交換によって凝縮量がきまるとする。断面積が1，巾がΔxの体積要素中での凝縮量ΔWは水蒸気と砂粒との間の熱伝達率h，水蒸気と砂粒の温度差ΔT_{SS}，さらに砂粒の容積比表面積S^*_νに比例する。それを示すと次のようになる。

$$h \cdot S_\nu \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot \Delta T_{SS} = \Delta W_i \cdot L \qquad (4 \cdot 2 \cdot 9)$$

ここでの変数としてはh が問題となる。h を一定値とした場合と流速 v に比例する場合の二通りをここでは考えた。

流速 v については，凝縮域の圧力は実測によるとほぼ大気圧であるので一定とし，単位時間当りの発生蒸気量Wを次式を用いて体積V に変換した。

$$V = W \cdot (22.4 \times 10^3/Z) \cdot (273 + T_C)/273 \qquad (4 \cdot 2 \cdot 10)$$

そしてV を砂粒間の平均通路断面積S_Cで割ることによって求めた。

$$v = V/S_C \qquad (4 \cdot 2 \cdot 11)$$

ここでS_Cが問題となるが，これは砂粒間の形状，充填度などによって異なるが，適当な値がない。そこで，ここでは簡単のために，砂粒の平均半径の1/2の半径をもつ円の面積に等しいと仮定した。

さらに砂粒中で未凝縮のまま存在する蒸気量を考える。水蒸気はすべて凝縮するとは限らず，いく分かは未凝縮のまま空隙中に浮遊していることが考えられる。その量ΔW_fは絶対湿度[65]によって規定される。ΔW_fは次のようになる。

$$\Delta W_f = \Delta X_S \cdot 1 \cdot \Delta x \cdot \alpha \cdot \rho_a \qquad (4 \cdot 2 \cdot 12)$$

但し，$\Delta X_S = X_S(T^{p+1}_n) - X_S(T^p_n)$

しかし，このΔW_fは実際に計算するとかなり微量であり，計算に際しては，無視しても差支えないことが確められた。

鋳物／鋳型界面形状が異なる場合についても鋳型の曲率を考慮して同様に考えることができる。

---

* S_νについては適当なS_νの値がない。そこで球の稠密充填および表面の凹凸を考慮して$S_\nu = 6/d$（d：粒子径）と仮定した。

(4) 計算方法

実際の計算のフローチャートを図66に示す。計算に先立ち，Δx (Δr)，Δtのとり方について検討した。その結果，$\Delta x = 1$ mm，$\Delta t = 1$ secにすれば，かなり収束した値が得られたので，計算にはこの値を用いた。

物性値は，密度については実測したが，かなりばらついたので，全て一定値を使用した。また他の文献[2),66),67)]も参照して使用した。

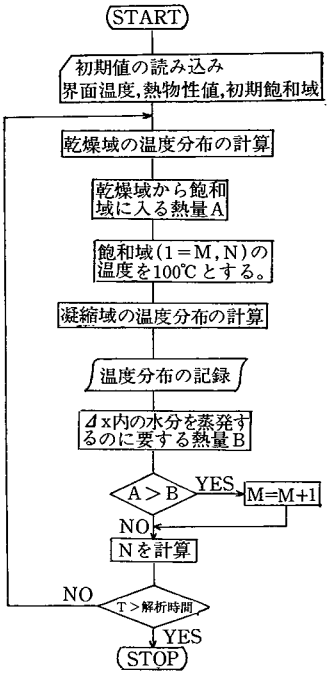


図66 プログラムのフローチャート

4・2・3 実験方法

図67に示すような鋳物／鋳型界面形状をもつ鋳型に工業用純アルミニウム（99.7%Al）と鋳鉄を鋳込み，設置した熱電対によって鋳型内の温度変化を測定した。この温度測定結果より，水分飽和域の移動を求めた。

目標鋳込み温度はAlの場合720℃，鋳鉄は1,350℃とした。試料砂はけい砂にベントナイト6%を加え，空びき2 minの後，目標水分率になるように水分を添加し，5 min混練した。目標水分率は2.5，4，8%とした。

平面鋳型は熱流束が平行，半円筒は発散，半円柱は収束する形になっている。半円筒，半円柱はそれぞれ円筒鋳型，円柱中子を想定したものであるが，鋳型密度を均一にすることや，熱電対の埋め込み方を考慮して半円形とした。

円の半径は凝固時間と砂つきを考えて4 cmとした。鋳物／鋳型界面からの距離は砂表面と熱電対の先端の鋳枠からの距離をdepth micrometerで測定し，その差を測定値とした。

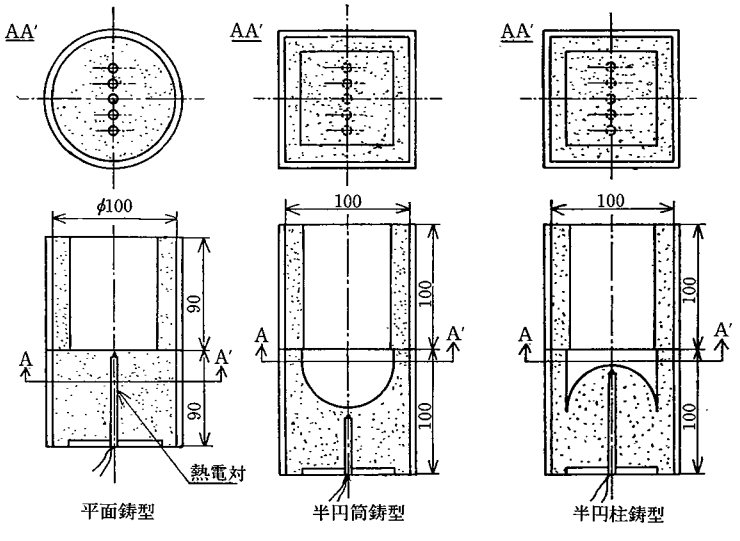


図67 実験に使用した鋳型形状・寸法

実験に際しては，界面温度も同時に測定し，界面温度がほぼ一定値を示す間を測定時間とした。実験によると，各形状ともＡｌの場合630℃，鋳鉄の場合約1,140℃となった。

4・2・4　計算結果および実験結果と考察

1．凝縮域での熱移動のメカニズム

図68に凝縮域の熱伝導による熱移動の影響を示した。みかけの熱伝導率を使用すると温度曲線が下に凸となるが，熱伝導項を無視して凝縮のみ考えた場合は，蒸気－砂粒間の熱伝達率だけをいかに変化させても実験結果と同じ傾向にはならなかった。すなわち,凝縮域の熱移動は熱伝導によるものと，蒸気の凝縮によるものと両方を考えねばならない。

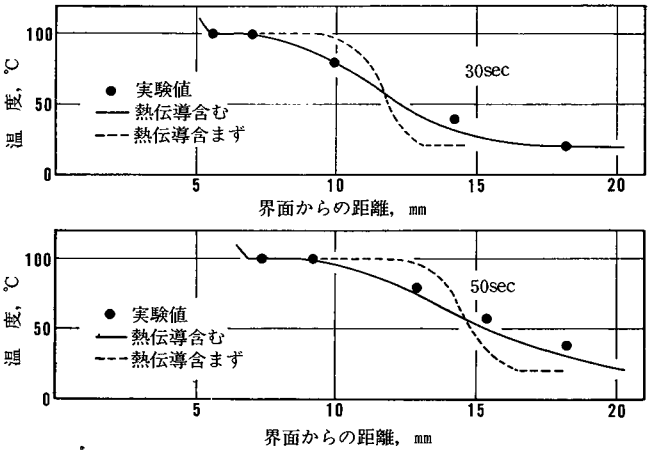


図68　凝縮域の温度分布におよぼす砂粒間の熱伝導の影響

2．凝縮域での蒸気－砂粒間の熱伝達率

図69は蒸気－砂粒間の熱伝導率ｈを一定とした場合と蒸気の流束に比例するとした場合の計算結果を実験結果と比較して示したものである。流速に比例するとした場合の方が，実験結果とよく一致していることがわかる。

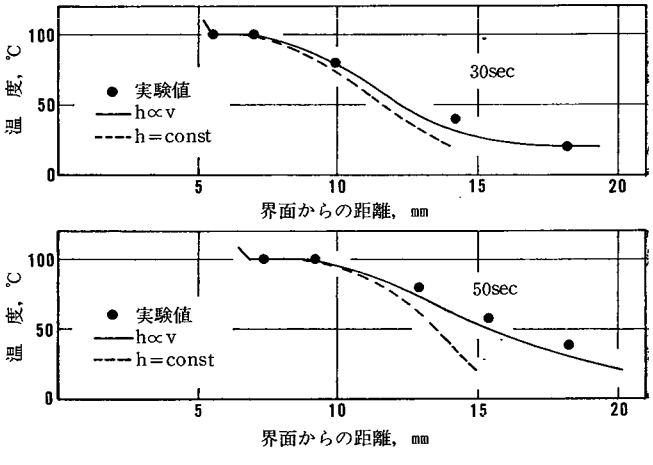


図69　凝縮域の温度分布におよぼす蒸気－砂粒間の熱伝達率の影響

なお，ここでの蒸気－砂粒間の熱伝達率ｈの流速に対する比列定数は実験値とよく一致するものを選んだわけであるが，ｈの値としては流速がかなり遅いために，平板に加熱蒸気を吹きつけて凝縮させるいわゆる滴状凝縮[64]における値よりは，かなり小さい値となっているが，蒸気の熱伝導率λ_sを砂粒間の平均間隔ℓ_mで割った値λ_s/ℓ_mよりは大きな値となっており，オーダー的には妥当な値の範囲内にあるものと思われる。

このｈについては，砂粒の表面性状，砂粒間の蒸気の流れの状態などが影響するものと

考えられ，今後検討の余地があるが，少なくとも，従来のみかけの熱伝導率を用いた考え方よりは，本シミュレーションの方が物理的意味においてまさっていると考える。

3．飽和域の移動

(1) 鋳物／鋳型界面形状の変化の影響

水分率を一定として，鋳物／鋳型界面形状を変化させた場合の飽和域の移動について，計算値と実験値とを比較したものが図70である。熱物性値はすべて形状によらず同じものを用いた。実験値は鋳込み温度720℃，水分率4％の一定とし，界面形状を平面，半円柱，半円筒と変化させた場合の結果である。

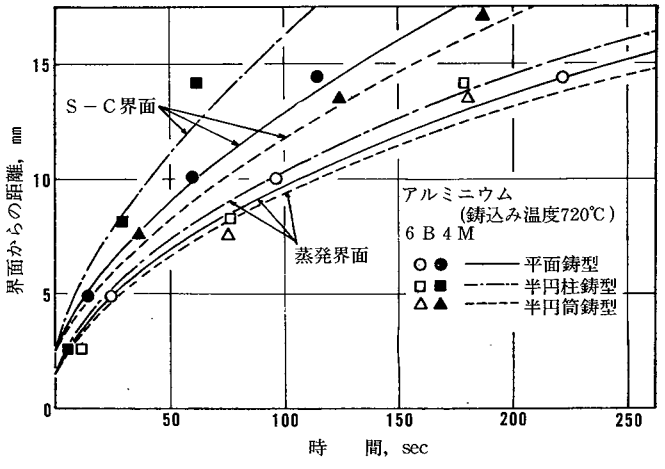


図70　飽和域の移動におよぼす形状変化の影響
（線は計算値，記号は実験値）

実験値の傾向として，蒸発界面の移動はあまり顕著な差はなく，半円柱がややはやく移動する程度である。飽和域の幅（蒸発界面と凝縮界面の距離）は，半円筒，平面，半円柱の順に広くなるという予想通りの結果を示した。これは半円筒の場合蒸気が分散し，半円柱は集中し，平面はその中間に位置するためである。また計算値は実験値とかなりよく一致しており，シミュレーションの方法の妥当性を示しているものと思われる。

(2) 水分率の影響

平面鋳型において，水分率を2.5，4，8％と変化させた場合の飽和域の移動を図71に示す。一般に水分率が増加するにつれて蒸発界面の進行は遅く，凝縮界面の移動ははやくなり飽和域の幅は広がる。

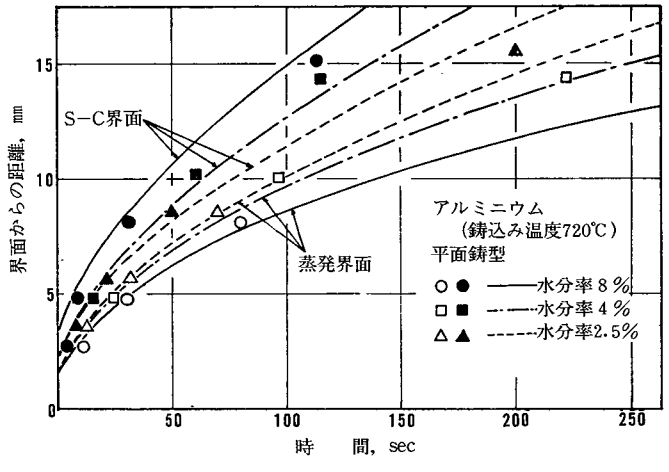


図71　飽和域の移動におよぼす水分率の影響
（線は計算値，記号は実験値）

これは初期水分が多いと蒸発に要する熱量が増加し，蒸発界面の進行は遅れるが，発生蒸気量が多いために飽和域の幅は広がるものと考えられる。

図71の計算には，砂粒－蒸気間の熱伝達率h の流速に対する比例定数として図72に示すような値を使用した。(S_νは一定。)このことはhあるいはS_νが初期水分率の関数となっていること

を示すものであろう。水分率を変化させると凝縮域の鋳型密度，通気性，比表面積などが変化し，蒸気流速も変化してhに影響を与えたものと考えられるが，これらをうらづける適当なデータが今のところ見当らない。

(3) 界面温度の影響

界面温度を変化させた場合の飽和域の移動を図73に示す。計算には鋳鉄の場合の界面温度は1,140℃とし，他の熱物性質はAlの場合と同じものを用いた。

Alの場合の飽和域の移動を図中では一点鎖線で示す。これに比較して鋳鉄を鋳込んだ場合は，飽和域の移動がかなりはやくなるが，飽和域の幅にはあまり差がない。

実験値と計算値を比較すると，計算値の方が全体的に遅れる傾向がある。そこでλ_Dを30%増加させると点線のようによく実験値と一致する。これは実験値の場合放射熱の影響がかなり強いためと考えられる。すなわち鋳鉄，鋳鋼となると，乾燥域での放射熱を考慮してλ_Dを増加する必要がある。例えばAtterton[69]は1,000℃における熱伝導率は600℃の時より約40%増大することを示している。

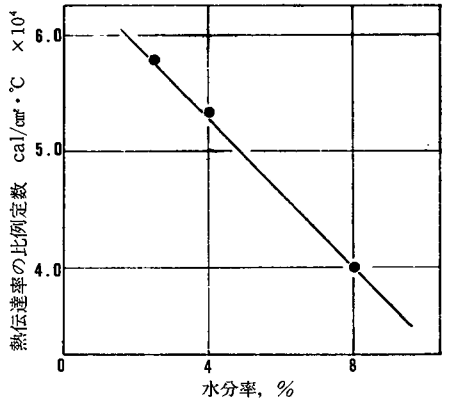


図72 蒸気－砂粒間の熱伝達率の流量に対する比例定数と水分率の関係

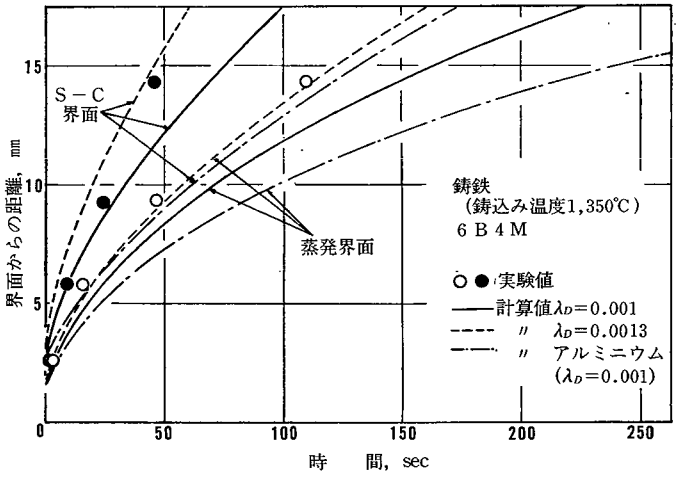


図73 鋳鉄を鋳込んだ場合の飽和域の移動

4・2・5 結 言

以上の実験により，次のような点が明らかになった。

1．鋳型中における水分の蒸発，移動，凝縮の考え方を導入して鋳物／鋳型界面形状の変化をも含む数値解析をおこなうことができ，その結果として次のことがわかった。

(1) 凝縮域の熱移動は，水蒸気の凝縮と砂粒間の熱伝導の両方を考慮する必要がある。

(2) 水蒸気の凝縮量を蒸気－砂粒間の熱伝達率を導入することによって求めることができる。

この場合，熱伝達率は，蒸気の流速に比例させる必要がある。この比例定数は(4～5.8)×10^4cal/cm℃であった。初期水分率が増すとこの比例定数は低下する傾向を示した。ただし，S_v，ρ，λ_cを一定とした場合。

2．円筒鋳型，円柱中子というような形状の異なる鋳型において，水分凝縮層の移動について，その幅が円筒，平面，中子の順に広くなってゆくことを計算および実験で確めた。今後，砂の容積比表面積，熱伝導率の実測，水分凝縮層生成の初期段階の解析が必要である。

第5章　すくわれ系鋳造欠陥におよぼす水分凝縮層の影響

鋳型が水分を含んでいるために発生する欠陥として，すくわれ系欠陥，鋳型壁移動，そして吹かれ系欠陥などをあげることができる。これらのように，生型のみに顕著に発生する鋳造欠陥はそのほとんどが水分凝縮層に関係しているものと考えられる。水分凝縮層がこれらの欠陥に及ぼす影響及び程度は異っていると予想されるが，本章ではすくわれ系欠陥をとりあげ，その発生機構の解明をこころみた。

まずばく熱によるシミュレーション実験として，型の表面にき裂を発生させ，水分凝縮層との関係を調べ，次に，湿態や水分凝縮層の圧縮試験，高温圧縮試験および急熱膨張試験などを数種の粘土を用いて，すくわれ発生との関連性を求め，すくわれ発生時の鋳型内の状態からすくわれ発生機構を明らかにする。

5－1　水分凝縮層とすくわれとの関係

5・1・1　緒　言

すくわれ系欠陥は生型が山砂から合成砂に変更され急激に増加した欠陥である。従来の研究でまとまりのあるものは，Levelink[34)36)]，Goad[35)]，Pattersonら[37~40)]によっておこなわれた研究である。これらは一応に水分凝縮層の存在をその要因の第一にあげ，かつ鋳型やそれにみたてた試片に鋳込み，あるいはばく熱してき裂を発生させすくわれ系欠陥との関連を求めた。しかしある条件の鋳型を製作し鋳込んだ結果すくわれ系欠陥の発生を確めるもので，直接鋳込み後の型内の水分凝縮層の存在を確かめ，すくわれ系欠陥との関係を求めたものではない。

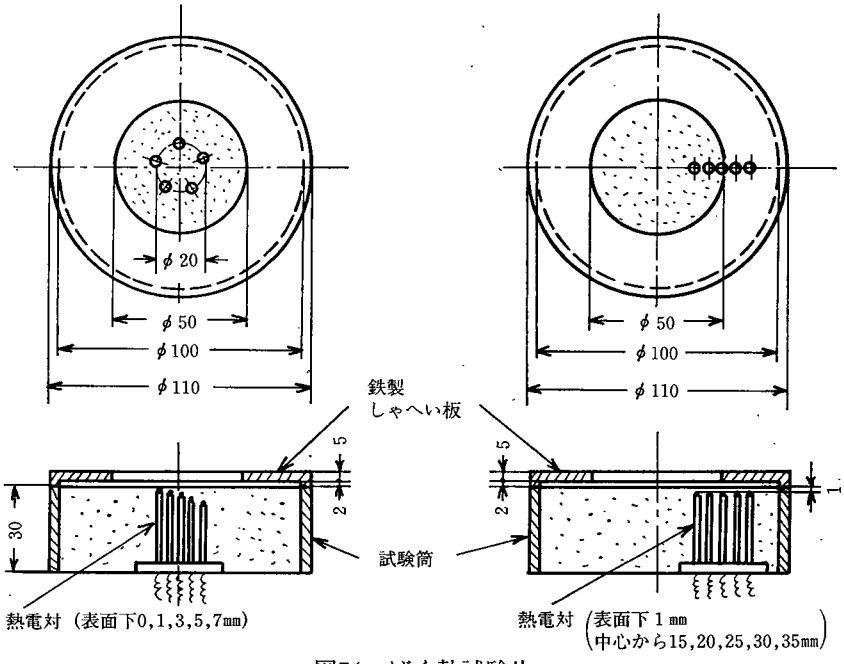
本節では前章までで明らかになった水分凝縮層の挙動を礎として，型内に熱電対を埋設して水分凝縮層の発生やその位置を求め，またき裂発生については型表面に変位計を取付け，きれつ発生の時刻を測定した。従来の方法では推測の域を出なかったすくわれ系欠陥と水分凝縮層との関係が，本節の実験によるばく熱及び鋳込み後の型内での変化を調べることによって明確にしたい。

本節ではまず，溶湯によって鋳型が急激に加熱され，その一部が破壊することにより，すくわれが発生するとの前提のもとに，この状態をばく熱実験によりシミュレートした。すなわち，ばく熱により試片にき裂を発生させて，水分凝縮層との関連を調べ，これをもとにして，すくわれ発生機構について検討した。

5・1・2　シミュレーション実験

ばく熱試験片を図74に示す。試片は試料砂を内径100，高さ30㎜の鋼管内に，つき固め機（重錘10kg，落下高さ5㎝）を用い，つき固め回数7回を標準にして作成した。試片上の中央にϕ50の穴のあいた鉄製しゃへい板を置き，試片表面の中央部だけをばく熱するようにした。

試片内の水分凝縮層の発生，移動状況を知るため，試片内の所定位置に5対の熱電対を埋設し，各点の温度変化を記録して，これから試片内の温度分布を求めた。温度測定は，ばく熱面に対して垂直方向の試片内温度と，さらに試片のばく熱部分としゃへい部分との温度変



（a）垂直方向温度測定　図74　ばく熱試験片　（b）水平方向温度測定

化の状態，また表面のき裂と温度との関係を調べるため，表面下1㎜における水平方向について行った。水平方向の温度測定位置については界面が望ましいが，熱電対の設置が困難なため，表面下1㎜とした。

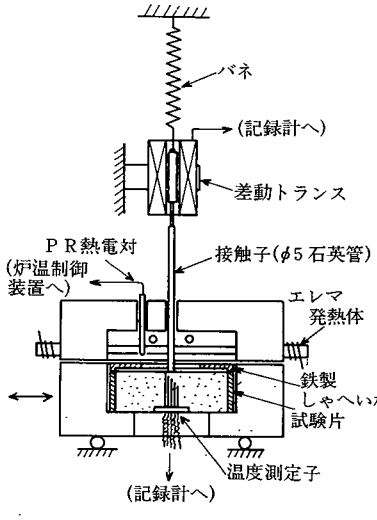


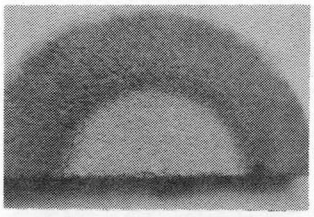
図75　ばく熱試験装置

図75にばく熱試験装置を示す。装置は4本のエレマ発熱体をもつばく熱炉と，温度測定部，変位測定部からなっており，試片を可動台にセットし，所定温度に保持された炉の下部に移動，固定して，試片上面をばく熱する。ばく熱によって生じる試片のき裂発生時期はばく熱時の表面中心部の変位と時間との関係を調べ，その結果を解析して求めたが，これは試片にき裂が発生すると表面変位に何らかの変化が生じると考えたためである。試片の表面変位は差動トランスに直結した石英管接触子の動きで検知し，試片内の温度とともに同時に測定して，記録計に自記させた。

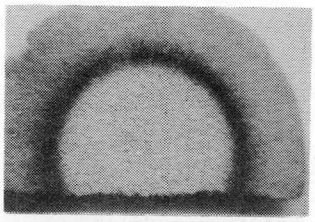
また試験後，試片表面および断面を観察し，また，き裂の発生位置，形状等を観察して，熱電対の埋設位置についても確認した。

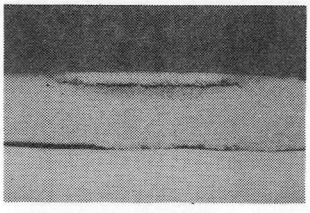
5・1・3　実験結果と考察

図76は，試験後の試片表面および断面の破壊状況を示した写真で，ベントナイト6％，水分6％配合の試片を1,300℃に1 minばく熱した後，縦方向に切断したものである。試片のばく熱された面の表面下約5㎜の位置に，表面と平行に約φ50～60の範囲に全面にわたってき裂が入り，さらにそのき裂



試片表面





試片断面

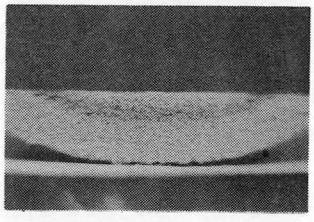


図76　試験後の試片の状態
（ベントナイト量　6％
水分率　6％
ばく熱温度　1,300℃）

図77　試験後の試片の状態
（ベントナイト量　6％
水分率　2％
ばく熱温度　1,300℃）

の一部は，端部で表面にまで達しており，硬化した表面層が試片本体から浮き上った状態になっている。

図77はばく熱によりき裂の発生しない試片の状況を示したもので，ベントナイト6％，水分2％配合試片を同じ条件でばく熱したものである。この場合，試片表面および断面のいずれにも，き裂は認められなかった。なお，試片断面の下部が半円形になっているのは，熱影響によって硬化した部分を意味し，ここでの論点には関係ない。

図78は，図77のばく熱時の試片表面の変位および試片内垂直方向の各点の温度変化を示したものである。

試片表面は，ばく熱開始後，時間の経過とともに徐々に上へ向かって上昇するが，A点すなわちばく熱を開始して18sec後に上昇が急増となり，B点に達した後は，ほとんど変化しなくなる。き裂を発生した試片の場合，表面変位はいずれもこのように急激に変化する点が明りょうに

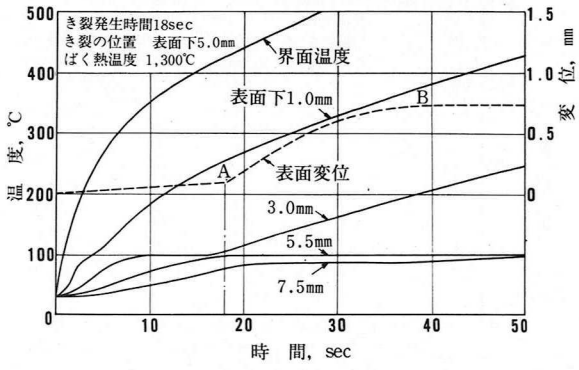


図78　試片内の温度変化（垂直方向）と変位

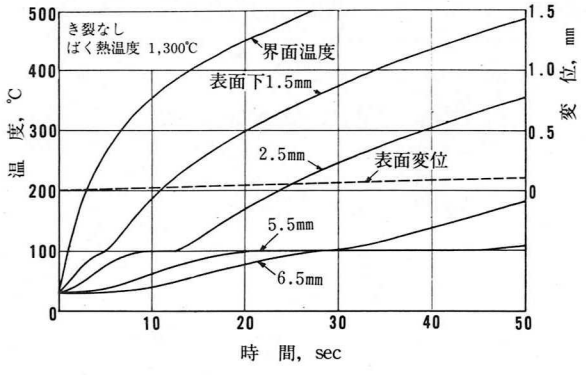


図79　試片内の温度変化（垂直方向）と変位

認められたが，一方きれつの発生しない図77の場合には，図78に示すような変位の急激な変化は見られず，時間の経過とともに表面は徐々に上昇を続ける。

以上の結果から図78のばく熱開始からＡ点までの変位，また図79のき裂のない場合の変位は，試片内乾燥域の熱膨張によるもので，Ａ点からの急激な変位上昇は試片にき裂が発生したことが原因と考えられる。

すなわちＡ点で試片内部にき裂が発生し，表面硬化層が試片本体からはく離すると同時に，層内に存在する温度こうばいによって生じる不均一な熱膨張のため，この層は上に向かって凸（とつ）形の変形を始める。このため，表面の変位が急激に上昇するものと考えられる。

以上のことから，試片表面の変位が急激に変化する点が試片のき裂発生時期であり，ばく熱開始からこの点までの時間をき裂発生時間とした。

また，図78から試片内の温度変化を見ると，ばく熱開始後，各点の温度は上昇を始め表面下３㎜以下の点では，100℃に停滞する期間，すなわち飽和域の存在が明確に認められる。

このとき各点の温度変化から求めた試片内の温度分布を図80に示す。試片のき裂発生時間は18secで，き裂は表面下５㎜の位置に水平に発生していたのであるから，き裂発生時18secの試片内の温度分布を見ると，表面下約2.5～６㎜は飽和域であり，明らかに飽和域内でき裂が発生したことがわかる。

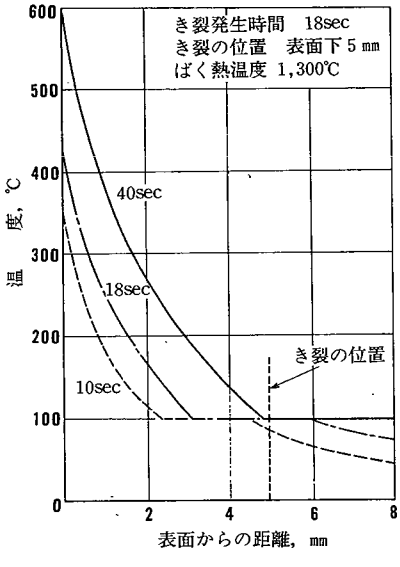


図80　試片内の温度分布
（垂直方向
ベントナイト量　６％
水分率　６％）

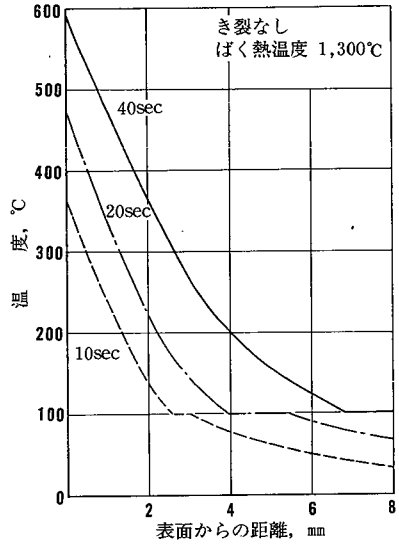


図81　試片内の温度分布
（垂直方向
ベントナイト量　６％
水分率　２％）

図81にき裂の発生しない場合の試片内の温度分布を示す。図80と比較してみると，界面温度はほぼ同じであるが，温度勾配は多少ゆるやかになっており，飽和域の幅も短くなっている。これは水分率が２％と少ないためであろう。

図82は，表面下１㎜水平方向の試片内各点の温度変化と表面変位を示したものであり，き裂は17secで発生している。ばく熱開始後，各点の温度は上昇し始めるが試片の中心に近い

ほど温度は高く，ばく熱面としゃへい面との境界，すなわち中心から25㎜の点を境にして，ばく熱面では温度上昇が早く，しゃへい面では非常に遅くなっている。

この場合，飽和域は認められないが，これは，ばく熱試片の場合，試片表面は大気に接しており，表面付近の水分は大気中に散逸するため，表面下１㎜程度では飽和域を形成しないことによるものと思われる。このときの試片内の温度分布を図83に示す。ここで，試片のき裂は表面下５㎜で中心から25～30㎜の位置まで水平に入り，その一部は表面にまで達している。

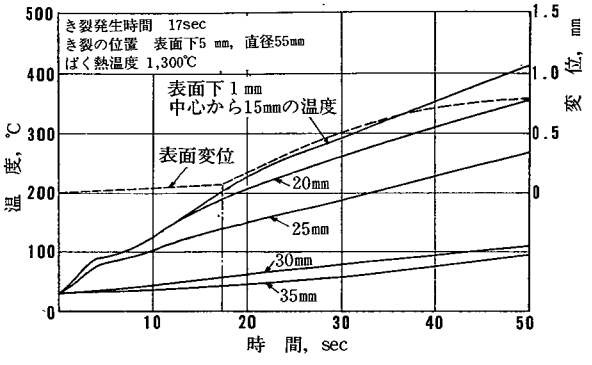


図82　試片内の温度変化（水平方向）と変位
（ベントナイト量　６％
水分率　　６％）

これから，き裂発生時（17sec）における温度分布を見ると，中心から27㎜以上では100℃以下であり，き裂の周辺部も飽和域，または生型に近い状態にあった。

上記の外，配合，つき固め密度，ばく熱温度等，種々試験条件を変えてばく熱実験をおこなったが，いずれもき裂は飽和域内で発生することを確認した。

以上の結果から，き裂発生時の試片内の状態を推察すると図84の模式図に示すようになっていると考えられる。ばく熱により試片は表面から順に，乾燥域，凝縮域，初期水分域の状態になっており，このときの温度分布は図81，図83に示すとうりである。

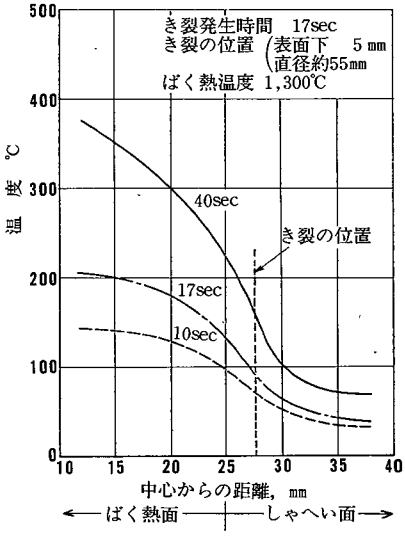


図83　試片内の温度分布（垂直方向）

ここで，乾燥域が一体となって水平方向に膨張すると，それは周囲の初期水分域の部分によって拘束され，内部に応力が発生する。この応力が，乾燥域直下に発生している水分凝縮層内にせん断力として働らくことになり，層内にすべりによるき裂が生じる。これは，実際のてらされの状態を表していると考えられるが，他のすくわれ系欠陥の発生機構についても原理的には同様であって，このようにして鋳型にき裂が入った後，その表面硬化層（乾燥域）は鋳型本体から容

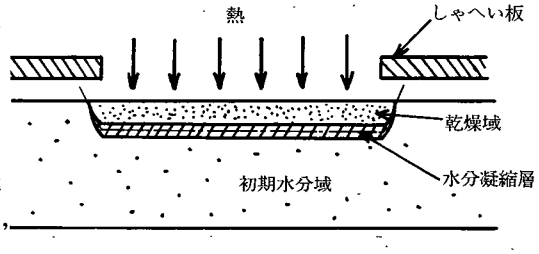


図84　ばく熱時の試片内の状態

易にはく離し，すくわれの原因になるのであろう。

図85は生試片と比較のため乾燥試片内の温度分布を示したもので，水分を含んでいないために水分凝縮層は発生せず，き裂も生じなかった。

ばく熱による試片のき裂と水分凝縮層との関連が，鋳込みの場合についても同様にいえるかどうかを確かめるため，ばく熱試験に用いた鋳型で実際に鋳込みをおこなった結果を図86に示す。

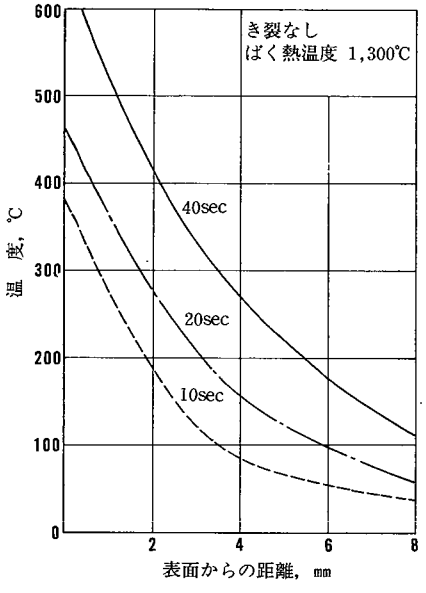


図85　試片内温度分布
（垂直方向・乾燥型）

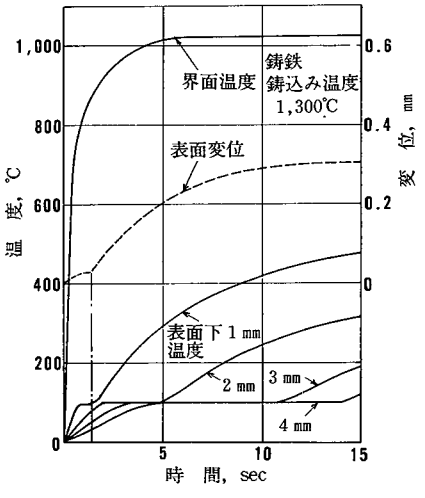


図86　試片内の温度変化と表面変位
（ベントナイト量　6％
水分率　6％）

鋳込みは，試片上に直径50，高さ10mmの雲母板で作ったわくを置きその中に1,300℃の鋳鉄の溶湯を流し込み，試片表面の変位および試片内の温度変化を測定した。温度測定は，界面から4mmまで1mmおきに5点とし，表面変位の測定には二重の石英管を用い，外管を固定ガイドにして，内管（接触子）が溶湯を直接接触しないようにしておこなった。

図に示されているとうり，鋳込み直後から各点の温度は上昇し始め，界面は約5secでほぼ一定に達している。試片内の各点は，それぞれ100℃に停滞する期間があり，飽和域が発生していることがわかる。表面変位は，ばく熱のときほど明りょうではないが，鋳込み後約1.5secのところに同様の変化点が見られ，この時点で試片にき裂が発生したものと考えられる。

試験後，試片の破壊状況を観察した結果，溶湯に接していた部分の表面下約1mmの位置にき裂が水平に入り，表面層がはく離した状態になっていた。以上のことからき裂発生時，約15sec後の試片内の水分凝縮層の発生状況をみると，表面下1mm付近に飽和域が発生しており，鋳込みの場合にも，ばく熱と同様に，試片のき裂は飽和域内で生じることが確認された。

図87は水分率，ベントナイト量，つき固め密度およびばく熱温度をそれぞれ変化させて，

ばく熱試験をおこない，き裂発生時間を求めたもので，ベントナイト６％，水分４％配合のつき固め回数７回の試片で，ばく熱温度1,300℃を基準にしている。図から，き裂発生時にはベントナイト量による影響があまりないが，水分率，つき固め回数を増すほど，またばく熱温度が高くなるほど，き裂発生時間は短くなっている。

このようなばく熱と試片のき裂発生時間との関係は，拘束ばく熱試験[70]で従来の短いものほど，すくわれやすいとされている。本試験法も，一種の拘束ばく熱試験であるが，試片のばく熱面を金枠で拘束するのでなく，しゃへい板を用いることによって，型自身で拘束するようになっているため，実際の鋳型により近い条件ですくわれ性判定に用いることができると思われるが，さらに実際の鋳込みの結果との相関について，詳しく調べる必要がある。

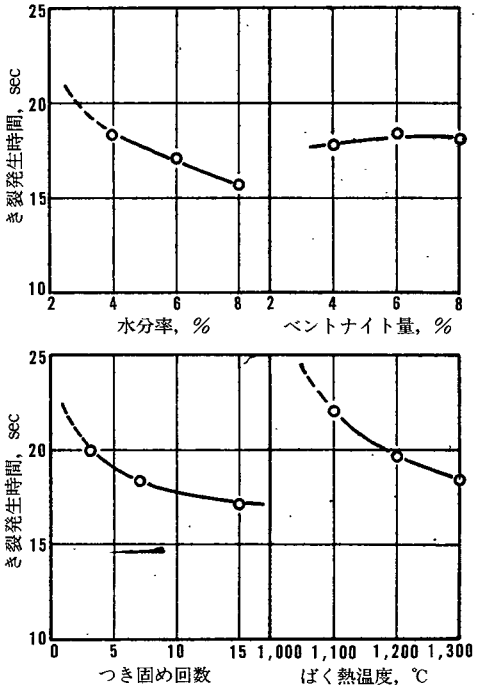


図87　ばく熱試片のき裂発生時間

5・1・4　結　言

すくわれ発生時の鋳型の状態を，ばく熱試験によりシミュレートしすくわれと水分凝縮層との関連について調べた結果，溶湯により加熱された鋳型は，型内に発生した飽和域内ですべりによるき裂を生じることが明らかになった。

このようにしてき裂が発生した後は，その表面層は鋳型本体から容易にはく離し，すくわれの原因になるのであろう。以上のことから，すくわれに対しては，水分凝縮層の機械的性質，特にその強度特性が大きく関係してくるものと思われ，さらに鋳型の高温性質，常温性質を含め，これら三者が相互作用の形ですくわれに影響をおよぼすものと考えられる。

5－2　水分凝縮層に起因するすくわれ系欠陥の発生機構

5・2・1　緒　言

前節において型のきれつ発生と水分凝縮層（飽和域）との関係を明確にすることができた。本節ではすくわれ欠陥発生傾向としてのきれつ発生時間とすくわれ欠陥との相関を求め，次いで生型の湿態，水分凝縮層（飽和域），及び乾燥域における圧縮強度，変形量，変形係数及び急熱膨張量を測定し，このデータをすくわれ発生のモデルにあてはめ要因の検討をおこなった。

従来の研究では生型各層の諸特性は求められているものの単に水分凝縮層はたいへん軟弱な層であるという認識にたってそれだけをすくわれの要因とみなしてきた。しかし鋳込み後の生型には溶湯に接する乾燥域があってその下に水分凝縮層が存在するわけで，ここではこれらの層の相対的な関係から欠陥が発生すると考えた。この相対的な関係として，水分凝縮層を含む鋳物／鋳型界面付近の挙動を単純化し得られた各層のデータを基にそれぞれに働らく力関係から熱膨張量等を求めすくわれ欠陥の発生機構を明らかにする。

5・2・2　実験方法

1．試料砂

実験に使用したけい砂は鳥取県産6号である。粘結材には，物理的性質の異なるベントナイトA（米国産），B（西独産），C（国産），D（国産）の4種類を用い，各ベントナイト配合砂の諸性質およびすくわれ性を調べるとともに，種類による差異についても検討した。供試したベントナイトの化学組成および諸性質を表5に示す。試料砂の配合は4種類のベントナイトにつきベントナイト量を6％に一定し，水分率を2，4，6％と変化させて得られた計12の試料について試験をおこなった。

表5　ベントナイトの化学成分W(%)および物理的性質

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	膨潤度 (A.C.C)	液性限界
ベントナイトA	63.16	10.29	2.34	2.83	2.57	2.54	0.16	28	543
〃　B	53.41	17.33	4.74	3.73	1.40	2.07	1.24	21	450
〃　C	73.18	15.79	1.80	0.54	0.42	1.73	0.46	20	341
〃　D	72.33	15.41	1.65	0.50	0.42	1.83	0.56	18	264

2．ばく熱および鋳込み試験

ばく熱試験はシミュレーション実験と同様であり，試片をばく熱して表面にき裂を発生させ，そのき裂発生時間をもってすくわれ性を判定した。

また，ばく熱試験と実際の鋳込みとの関係を確かめるため，名工試型のすくわれ試片を用い，いくつかの試料砂について鋳込み試験をおこなった。鋳込みはFC35相当の鋳鉄で，注湯温度は1,350℃とした。鋳込み試験によるすくわれ性の評価は，錦織[71]のすくわれ評価法に準じた。

3．湿態および水分凝縮層の圧縮試験

標準生試片の圧縮破壊時の圧縮強さ，変形量および変形係数を求めた。水分凝縮層につ

いては標準試片に水蒸気を流入通過させて，水分凝縮試片を作成して供試した。

4．高温圧縮試験および急熱膨張試験

試料砂で高温試片（1⅛″Diam，×2″）を作成し，これを圧縮試験機に組み込まれた炉の中にそう入して，試験温度900℃で3 min保持後，圧縮試験をおこない，高温の圧縮強さ，変形量および変形係数を求めた。

急熱膨張試験についても高温試片を用い，試験温度を900℃とした。試験に用いた熱膨張計は，溶融石英製の本体上に試片を乗せ，高温炉中にそう入後の試片の膨張，収縮量を測定するもので，この変化を差動トランスにより記録計に自記させ，そのときの膨張量の最大値をもって急熱膨張量とした。

ここで，圧縮試験，膨張試験とも試験温度を900℃とした理由は，鋳型の破壊は鋳込み直後に発生し，そのときの鋳型表面温度が約900℃であったことと，一般に鋳物砂は900℃付近で最高高温強度を示すことから，この温度で試験をおこなえば，その鋳物砂の高温性質全体の傾向を把握できると考えたからである。

5・2・3　実験結果および考察

1．ばく熱試験および鋳込み試験

図88に，ばく熱試験結果と鋳込み試験結果の関係を示す。縦軸は鋳込み試験によるすくわれ評価値を示したもので，数値は官能判定による減点値であり，マイナスの値が小さいほどすくわれが少ないことを表わしている。横軸は，ばく熱試験によるき裂発生時間である。図からわかるように，すくわれ評価値とき裂発生時間とは非常に良い相関を示しており，き裂発生時間の長いものほどすくわれ発生が少ないことがわかる。このことから，以下本実験では，すくわれ性の判定にき裂発生時間を用いることにした。

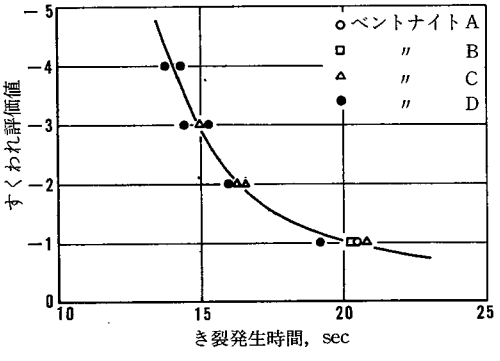


図88　すくわれとき裂発生時間との相関

図89に，ばく熱試験より求めた各試料砂のき裂発生時間を示す。ここでベントナイトA，Bの水分率2％のものは，き裂を生じなかった。各ベントナイトとも水分増加とともに，き裂発生時間は短くなり，すくわれやすくなっている。またベントナイトの種類についてみると，外国産のA，Bはほぼ同等にすくわれにくく，以下C，Dの順にすくわれやすくなっている。これから，膨潤度や液性限界の高い，いわゆる良質のベントナイトほどすくわれにくい傾向を示すことが確認された。

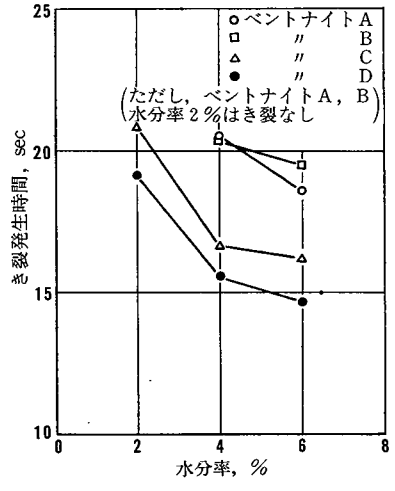


図89　試料砂のき裂発生時間

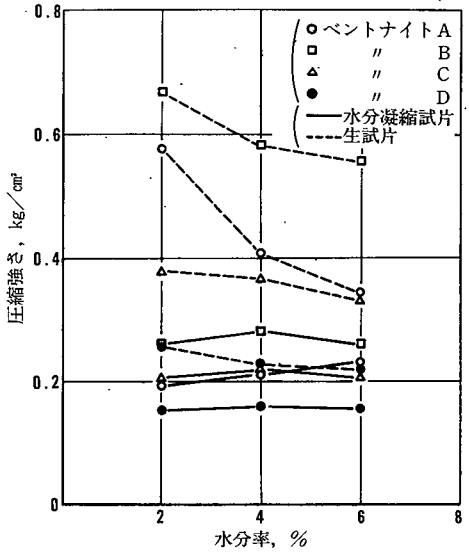


図90　湿態および水分凝縮層の圧縮強さ

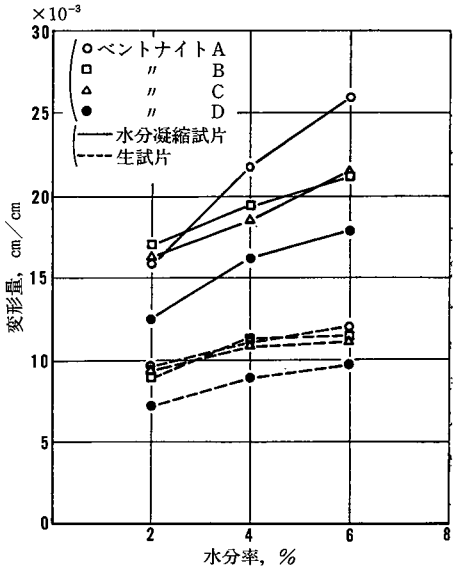


図91　湿態および水分凝縮層の変形量

2．水分凝縮層と湿態の諸性質およびそれらとすくわれとの関係

図90～92に水分凝縮試片および生試片の圧縮強さ，変形量，および変形係数を示す。圧縮強さはどのベントナイトでも，水分凝縮試片では生試片に比べて著しく低い。生試片では水分率の増加とともに圧縮強さが低下するが，水分凝縮試片では水分率にあまり関係なくほぼ一定の値を示している。また，生試片の圧縮強さの大きいベントナイトほど水分凝縮試片のそれも大きいようであるが，ベントナイトAのような例外も認められた。

変形量は，どのベントナイトの場合にも，水分凝縮試片では生試片に比べて著しく大きく，水分率とともに増加している。変形係数は圧縮強さと似た傾向を示し，どのベントナイトも水分凝縮試片は生試片に比べて著しく低くなっている。また生型試片の変形係数はベントナイトにより大きな差があるが，水分凝縮試片のそれは，いずれも同程度の低い値を示している。

以上のように，どのベントナイトの場合も，水分凝縮層試片では生試片に比べて圧縮強さおよび変形係数は著しく低く，逆に変形量は大である。また湿態性質と水分凝縮層の性質との関係はベントナイトにより異なり，湿態性質の優れたベントナイトが水分凝縮層についても同様であるとは必らずしもいえない。

次に，上述のことがらとすくわれとの関係について検討してみる。ここですくわれは水分凝縮層内で鋳型が破壊するために発生するので，水分凝縮層の強度あるいは変形量が大きいほど，すくわれ発生は少なくなると考えられる。

まず図90，および図91から水分凝縮層の圧縮強度とすくわれとの関係についてみると，どのベントナイトでも水分率の増加とともにすくわれやすくなっているが，水分凝縮層の強度は水分率によって変化しない。また，ベントナイトAとCとでは，すくわれ性に大きな差異が認められるが，強度にはあまり差がなく，水分率2％および4％では逆にベント

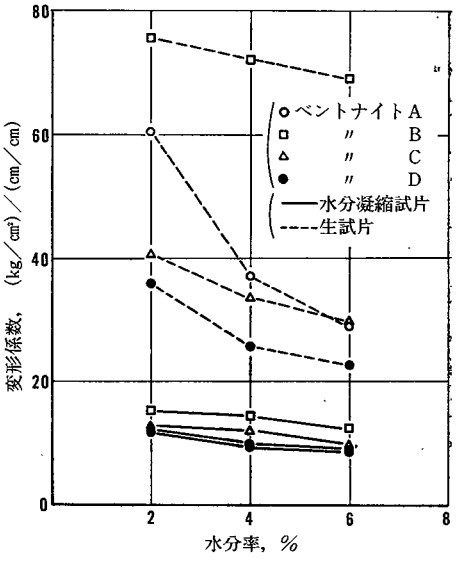


図92　湿態および水分凝縮層の変形係数

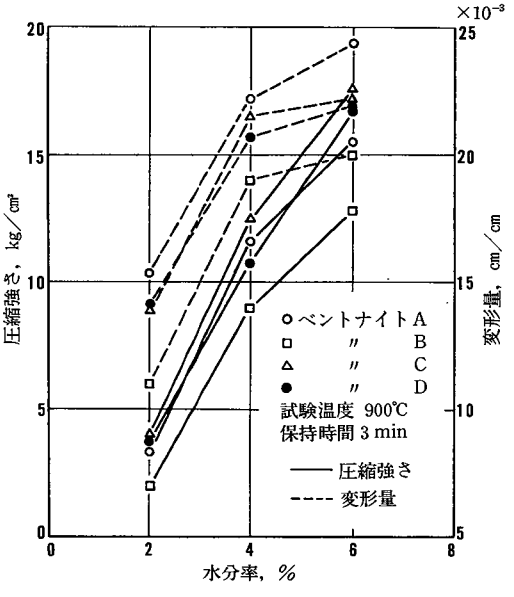


図93　高温圧縮強さと変形量

ナイトAのほうが低強度になっている。

次に図92からベントナイトの種類による差異，また水分率との関係についてみると水分凝縮層とすくわれ発生傾向とは一致しないことがわかる。

このように水分凝縮層の強度および変形量とすくわれとの関係を見た限りでは両者の間に明りょうな関係は見いだせなかった。他の湿態性質および水分凝縮層の変形係数との関係についても同様であった。

3．高温の諸性質およびそのすくわれとの関係

高温の強度は，変形量とすくわれとの関係について数多く報告されているが，まだ明確な結論は出されていないようである。

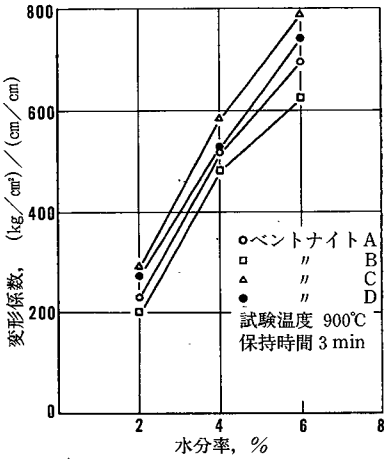


図94　高温の変形係数

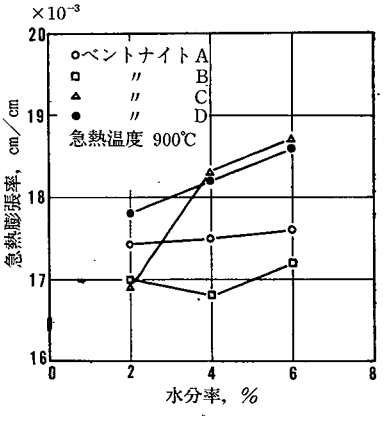


図95　急熱膨張量

図93に高温の圧縮強さと変形量を示すが，これらの結果から見る限り，両者ともすくわれとはあまり関係がないように思われる。先に述べたように，水分凝縮層が鋳型の破壊発生場所であることから鋳型の高温性質とすくわれとの関係については，高温強度や変形量よりもむしろ熱膨張力あるいは熱膨張量の面から検討すべきであろう。

図94は高温の変形係数を示したものである。この場合の変形係数は二木[72]が提唱した変形能の逆数に相当し，同氏は，変形能と熱膨張力との間には密接な関係があり，鋳型内に発生した応力が変形能を上回ると鋳型が破壊されて，すくわれの原因となり，また，同一系統の砂については，変形能により，すくわれ傾向を判定できるとしている。このことから，図の各ベントナイトについて水分率だけの影響をみると，水分率の増加とともに変形係数は大きくなっており，すくわれ傾向と一致するが，ベントナイトの種類による差異については，必らずしも傾向は一致しない。

図95は急熱膨張量を示したもので，ベントナイトによりそれぞれ異なる変わりかたをしており，ベントナイトC，Dは水分率とともに急激に増加しているが，A，Bの変化は少ない。急熱膨張量についても，すくわれとの間に明りょうな関係は認められなかった。

4．すくわれ発生機構およびすくわれ要因の検討

前項では，水分凝縮層，湿態および高温の諸性質とすくわれとの関係を個々について調べたが，いずれにも明りょうな関係は見いだせなかった。これは，すくわれに対してそれらの諸性質が互に影響をおよぼしあっているためで，すくわれの発生原因を解明するためには，まず，どの因子がどのような形ですくわれに影響をおよぼしているかを明らかにしなければならない。ここでは前項の実験結果をもとに，すくわれ発生機構およびその要因について理論的検討を試みる。

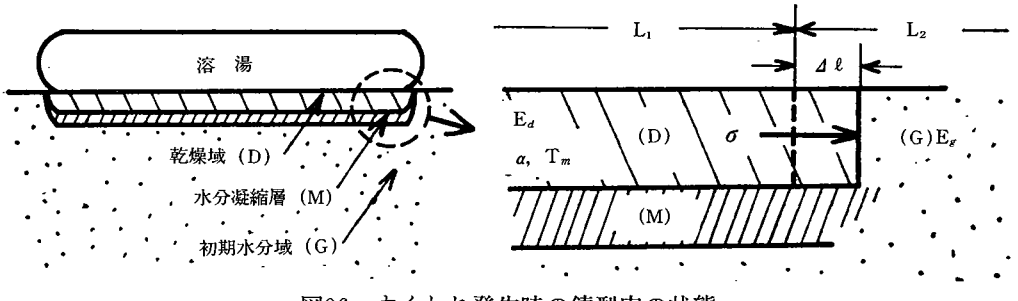


図96　すくわれ発生時の鋳型内の状態

図96は，すくわれ発生時の鋳型内の状態を模式的に示したもので，溶湯の加熱により，鋳型は表面から順に乾燥域（以下Dとする），水分凝縮層（以下Mとする），初期水分域（以下Gとする）の状態にある。この状態において，Mは100℃以下とDに比べてかなり低温であるため，熱膨張は無視し得る程度であり，またGは熱影響を受けていないため変化しない。

一方高温に加熱されたDは一体となって横方向へ膨張しようとするが，この膨張は主としてD周辺のGによって拘束されることになる。このように膨張が拘束されると，DおよびG内には圧縮応力が発生し，また，この応力がMに対してせん断力として働らくことになり，このせん断力のためにM内ですべりが起きて，き裂が発生すると考えられる。

このようにいったんき裂が入った後は，表面層であるDは鋳型本体から容易にはく離し，

すくわれの原因となるので，以下このき裂発生の要因について検討する。

まず，熱応力について考えると，弾性体では，その温度，熱膨張率，弾性係数，および拘束状態によって熱応力が決まる。鋳型についても弾性体であると仮定して，同様に考えることができるが，鋳型の場合には，それら諸条件が非常に複雑になってくる。

このため，鋳型の熱応力を求める方法として一般に熱膨張力試験がおこなわれているが，この試験では試片の膨張を許さず，完全に拘束した状態にあるため，実際の鋳型の状態を表わしているとはいえない。すなわち実際の鋳型では乾燥域の熱膨張は主として生型の部分によって拘束されるため，膨張はある程度許され，また発生する熱膨張力も生型性質によって左右される。

ここで図96の右図に示すように，鋳型内の状態をさらに簡単化して，すくわれ発生時の応力状態について考える。いま，Dの最初の長さをL_1，熱膨張率をα，平均温度をT_mとすれば，Dの横方向への自由膨張による伸び$\Delta\ell_1$は

$$\Delta\ell_1=\alpha\cdot T_m\cdot L_1 \qquad (5\cdot 2\cdot 1)$$

で表される。しかしこのDの膨張はGによって拘束されるためDには圧縮応力が生じ，この圧縮応力σによるDの縮み$\Delta\ell_2$は

$$\Delta\ell_2=\frac{\sigma}{E_1}\cdot L_1 \qquad (5\cdot 2\cdot 2)$$

と表される。ただしE_1はDの弾性係数であるが，ここで高温の変形係数がこれに相当するものと仮定する。Dの実際の伸びは式（5・2・1）から式（5・2・2）を引いたものであり，これを$\Delta\ell$とすると

$$\Delta\ell=\Delta\ell_1-\Delta\ell_2=\alpha\cdot T_m\cdot L_1-\frac{\sigma}{E_1}\cdot L_1 \qquad (5\cdot 2\cdot 3)$$

となる。一方，この$\Delta\ell$はGの縮みに等しいことからGの長さをL_2とすると

$$\Delta\ell=\frac{\sigma}{E_2}\cdot L_2 \qquad (5\cdot 2\cdot 4)$$

と表される。ただしE_2は湿態の変形係数である。

式（5・2・3），式（5・2・4）からDの圧縮応力σおよびDの伸び$\Delta\ell$を次式のように表わすことができる。

$$\sigma=\frac{\alpha\cdot T_m}{\frac{1}{E_1}+\frac{L_2}{L_1}\cdot\frac{1}{E_2}} \qquad (5\cdot 2\cdot 5)$$

$$\Delta\ell=\frac{\alpha\cdot T_m\cdot L_1}{1+\frac{L_1}{L_2}\cdot\frac{E_2}{E_1}} \qquad (5\cdot 2\cdot 6)$$

あるいは，伸び$\Delta\ell$をDの単位長さ当りの膨張量εで表わすと

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{L_1} = \frac{\alpha \cdot T_m}{1 + \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{E_2}{E_1}} \qquad (5 \cdot 2 \cdot 7)$$

以上のように，鋳型の乾燥域Dの圧縮応力σおよび膨張量εを自由膨張量$\alpha \cdot T_m$，湿態の変形係数E_2，高温の変形係数E_1で表わすことができる。ここで，乾燥域Dの圧縮応力σは，鋳型の膨張力といわれるもので，この脚張力が水分凝縮層に対してせん断力として働き，また，乾燥域Dの熱膨張により，水分凝縮層が変形することになる。

一方，水分凝縮層にき裂が発生する条件としては，次の二つが考えられる。

(I) 水分凝縮層に働らく応力，すなわち乾燥域の膨張力が，水分凝縮層の強度を上回る。

(II) 乾燥域の膨張量が水分凝縮層の変形量を上回る。

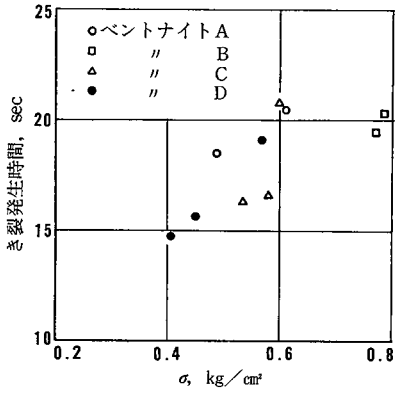


図97　き裂発生時間と膨張力との関係

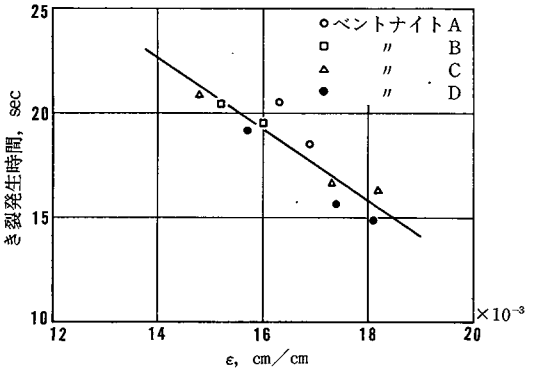


図98　き裂発生時間と膨張量との関係

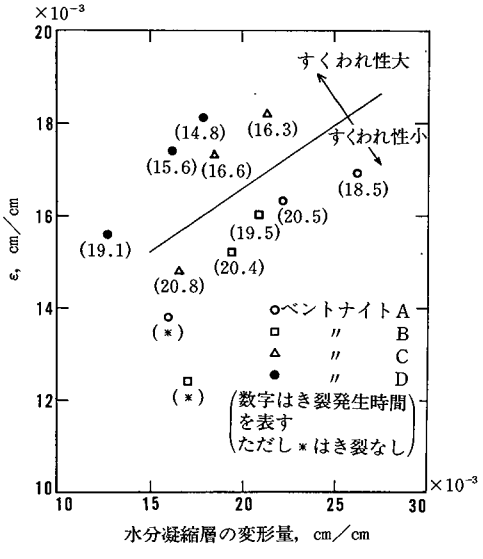


図99　すくわれと膨張量および水分凝縮層の変形量との関係

そこで，上に示した(I)，(II)のいずれが妥当であるかを確かめるため，式（5・2・6），式（5・2・7）において，$L_1/L_2 = 1$とし，E_1，E_2，$\alpha \cdot T_m$に求めた湿態および高温の変形係数，急熱膨張量の値をそれぞれ代入して，計算により，膨張力，膨張量を求めてみた。これらの計算値が必らずしも実際の鋳型の状態を定量的に表わしているとはいえないかもしれないが，定性的に比較するにはこれでじゅうぶんであろう。この結果を図97，図98に示す。

横軸に膨張力あるいは膨張量をとり縦軸はき裂発生時間である。まず膨張力とすくわれ性との関係をみると両者の間にはっきりした関係はなく，しいていえば膨張力の大きいものほどすくわれにくくなるという矛盾した傾向がみられる。一方，膨張量が大きくなるほどすくわれやすくなっており，両者の間には明りょうな関係

が認められる。

この関係についてさらに詳しく知るため，縦軸に膨張量，横軸に水分凝縮層の変形量をとり，すくわれとの関係を調べたものが図99である。図中の数字はき裂発生時間を示す。これからわかるように，膨張量が小さく，水分凝縮層の変形量の大きいものは，すくわれにくく，逆に膨張量は大きく，変形量の小さいものはすくわれやすくなっている。

以上のことから，すくわれの要因としては，乾燥域の膨張量と水分凝縮層の変形量との関係が考えられ，すくわれ発生原因に関しては，前述の(II)の関係が一致することが明らかとなった。したがって，水分凝縮層の変形量および湿態の変形係数の大きい，また，急熱膨張量および高温の変形係数の小さい型砂ほど，すくわれ発生は少なくなる。

これらのことは造型に関してもいえることで鋳型密度が不均一である場合など密度の低い部分は変形係数も低く拘束力が弱いため，膨張による伸びがその部分に集中し，すくわれが発生しやすくなることも考えられる。

5・2・4 結 言

各種ベントナイト配合砂の水分凝縮層，湿態および高温の諸性質とすくわれとの関係について調べ，さらにすくわれ発生機構およびその要因について検討した結果次のようなことが明らかとなった。

1．水分凝縮層，湿態および高温下の鋳型の圧縮強度，変形量さらに急熱膨張量などとすくわれとの関係を個々について調べたが，いずれの場合にも明りょうな関係を見いだすことはできなかった。

2．鋳型の熱膨張力および熱膨張量を急熱膨張量，湿態および高温の変形係数に関した式で表わし，大まかな値を計算によって求めた。それらの値をもとに，すくわれ発生機構について検討した結果，すくわれの要因としては，鋳型の熱膨張量と水分凝縮層の変形量との関係が考えられ，熱膨張量が水分凝縮層の変形量を越えると鋳型が破壊され，すくわれの原因になることがわかった。

3．したがって，水分凝縮層の変形量および湿態の変形係数が大きく，急熱膨張量および高温の変形係数の小さい鋳物砂ほどすくわれは少なくなる。

第6章　総　　括

生砂鋳型に金属溶湯を鋳込んだ後に鋳型内に生成する水分凝縮層について基礎的な研究をおこなった。従来の研究では水分凝縮層はいずれも鋳造欠陥の一要因とみなされてきただけで系統的に調べられたわけではない。

本研究は水分凝縮層の生成機構を明らかにし，これをもとにして生型熱伝達についての解析をおこない，次いですくわれ系欠陥との関連を明確にし，その発生機構について検討した。

本研究によって明らかになった事項について総括すると以下のようである。

第1章は従来の研究から問題点を整理し，本研究の目的を考えてその基本方針について述べた。

第2章は，水分凝縮層の生成及び移動状況を詳細に研究した。まず，電気抵抗式水分計を製作し，鋳込み後における鋳型内の水分凝縮層の挙動を調べた結果，次のようなことが明らかとなった。すなわち，従来は型温度が100℃になることによって水分凝縮層の生成とみなしてきたが，実際には水分率の変化を確かめなければ正確なことは把握できないと思慮し，水分測定子と熱電対とを同じ位置に設置して，測定した結果，型内の水分率と温度の変化は同じ挙動を示し，従来の温度測定による方法で挙動を推測してもよいことが判明した。

次に鋳型内での水分移動は従来蒸発，移動及び凝縮を繰り返していると考えているだけであったが，移動には，型内に圧力勾配が存在するはずである。そこで鋳型に相当する砂型試片の端から蒸気を一定圧力で送り，型内の水分率，温度及び圧力の変化を調べた結果，次のような事が明らかになった。

1）試片内のある点では水分率と温度はほぼ同時に上昇を開始し，水分率は飽和水分率に，温度は100℃に達してから水蒸気圧が上昇する。

2）蒸気流入の推進力となる水蒸気圧は試片内部に進むに従って指数関数的に抵下し，凝縮域をすぎれば零となる。

3）流入蒸気圧が高いほど水分凝縮層の移動速度は速い。

4）試片の水分率やベントナイト添加量が増加すれば水分凝縮層の移動速度が遅くなるが，両者ではその作用機構が異っている。

5）水蒸気の凝縮により，水分凝縮層が生成しているとして，飽和域の水分率を求めた結果，実験値と良い一致をみた。

以上の結果から水分凝縮層の生成機構が明らかとなり，鋳型内での水分率，温度及び圧力の関係を明確にすることができた。すなわち，水蒸気は飽和域を通過し，凝縮域にて凝縮する。凝縮域のある点では水蒸気が凝縮することによって温度と水分率が上昇する。温度が100℃となり，水分率も飽和水分率に達すると凝縮は完了する（飽和域となる)。そして水蒸気は鋳型のさらに内部へと移動してゆくことになり，飽和域は蒸気を通過させるための通路となる。

したがって，飽和水分率に達した飽和域は水蒸気を通過させるだけの空隙を備えていないと健全な鋳物が得られにくいことがわかった。そこでDarcyの法則を用いて飽和域における蒸気の移動抵抗として通蒸気度を求めた。その結果以下のような点が明確になり，

1）空気と水蒸気の粘性比を用いて，通気度と通蒸気度との比較をおこなった。

2）同一配合砂では通気度より通蒸気度の方が低い値を示す。

3）水分凝縮層と初期水分域の水分率が等しい場合は両者の通蒸気度は等しい。

飽和域内通気度は健全な鋳物をうるための重要な指標となる。

第3章は実際の鋳型内で上で述べたような水分率，温度及び圧力の関係を保ちながら，水分凝縮層の移動がおこなわれているかについて調べたところ以下のような点がわかった。

1）水蒸気と非凝縮性ガスとではその逸出挙動が異なる。

2）乾燥域内はほぼ等圧である。

3）Darcyの法測がなりたつものとして水分凝縮層の厚さから乾燥域の水蒸気圧を求めたところ，実験値と良く一致した。

4）一般に使用されている鋳型の圧力は数10㎜水柱圧であった。

これらは前章で調べた水蒸気吹込みによる飽和域の生成実験や通蒸気度の考え方が適正であることを立証している。

第4章は鋳込み後の生型内の熱及び水分移動モデルを用いて伝熱解析をおこなった。

これまでも近似解析によって生型の熱伝達は解析されているが，水分凝縮層の性質を正確に把握しないままにおこなわれてきたため不十分なものであった。

そこで本研究は境界条件として蒸発定数及び通蒸気度を考慮した凝縮定数を用いて，鋳型内の温度分布を近似解析によって求めた。その結果水分が多いほど水分凝縮層の移動速度は遅く，またその厚さも大きくなることがわかり，実験結果とのほぼよい一致が得られた。

さらに，凝縮域における物理的意味をより厳密にするため，凝縮域における水蒸気の凝縮量は水蒸気と砂粒との熱伝達率，水蒸気と砂粒との温度差，及び砂粒の容積比表面積に比例すると仮定して数値解析を行った。その結果，近似解析よりも精度よく実験結果と一致することが判った。また，水蒸気と砂粒との熱伝達率が，水蒸気の流速に比例するとした場合と単に一定であるとした場合では前者の方が実験結果と良く一致した。さらに，凝縮域には温度勾配が存在することから，単に凝縮のみでなく熱伝導も同時におこなわれているとして計算した方が実験結果と良い一致をみた。

そこで，平面鋳型における水分凝縮層の移動に関する実験結果をさらに拡張するため，円筒鋳型，円柱中子等，界面形状の異なる鋳型について調べた。水分凝縮層の移動は円筒，平面，中子の順に広がっていることが確かめられ，これらは数値解析結果でも確認された。

第5章はこれまで調べた水分凝縮層と鋳造欠陥発生との関係，特にすくわれ系欠陥との関連性について検討した。

すくわれ系欠陥の発生は従来，水分凝縮層に関係していると言われてきたが，実際に鋳型内の温度変化や鋳型と溶湯の接触表面変位量を計測したものではなく，厳密に言えば推測の域を出なかった。

本研究では鋳込み後の型内温度や溶湯接触表面の型変位時刻及び量とを調べ，すくわれ欠陥の発生する場合とそうでない場合との間に明らかな差があることを認めた。そして，すくわれ系欠陥の発生位置は水分凝縮層内であることを確認した。

次いで数種のベントナイトを用いた鋳型の水分凝縮層，湿態及び高温での鋳型強度，変形量さらに急熱膨張量などを測定し，これらとすくわれ系欠陥との関係を調べたが，いずれの場合も明りょうな関係を見出すことはできなかった。そこで生型に金属溶湯が鋳込まれた場合の鋳物／鋳型界面付近の状態にこれまで調べた水分凝縮層の性状及び挙動を導入したモデルに上で

求めた急熱膨張量や変形係数の値を用いて鋳型の膨張力及び膨張量を算出した結果，鋳込み実験やばく熱実験によるすくわれ系欠陥やきれつ発生傾向と良く一致した。したがって，すくわれ系欠陥の発生機構と水分凝縮層との関連性が十分理解できた。

さて，機械工業に素型材を提供する鋳造工場において，生型鋳造はもっとも量産に適しかつ経済的プロセスである。従って，生産現場における欠陥発生率を減少し，また，生産プロセスにおける管理や制御を飛躍的に進歩させるには生砂鋳型の基礎的研究が重要であることは言うまでもない。すでに100年以上の歴史をもつこのプロセスは理論よりもむしろ経験の積み重ねによって進歩してきたと言えよう。がしかし，これからはさらに詳細な水分凝縮層の挙動，その性状及びその制御法などについて調べ，鋳型による欠陥発生機構の解明と，欠陥防止樹立のための研究が続けられることを期待したい。

謝　　辞

終りに本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり，種々有益なる御指導と御助言を賜りました大阪大学工学部教授福迫達一先生に深甚なる謝意を申し上げます。

本論文作成にあたり有益な御討論と御助言を賜わりました大阪大学工学部教授近江宗一先生及び大阪大学産業科学研究所教授岡本平先生に心から感謝いたします。

また本研究の計画，遂行にあたり終始懇切な御指導と有益な御討論をいただきました広島大学工学部教授片島三朗先生，大阪大学工学部助教授大中逸雄先生には心から感謝いたします。

また実験遂行に際し惜しみなき御協力をいただいた，金沢洋三君，松浦誠君，菊地正君，山本茂昭君，八島幸雄君にお礼申し上げます。

参 考 文 献

1) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **66** (1958) 361
2) R.W.Raddle and A.L.Mincher : J.Inst.Metals 1949−50, 76, 43
3) J.Berry, V.Kondic and G.Martin : Trans.A.F.S. **67** (1959) 449
4) 新山：鋳物 **28** (1956) 9, 633
5) 新山：鋳物 **42** (1970) 12, 1006, **43** (1971) 1, 28

6) 梅村：鋳物 **46** (1974) 12, 1068
7) V.Paschkis : Trans.A.F.S. **59** (1951) 381
8) V.Paschkis : Trans.A.F.S. **60** (1952) 163
9) M.Cappy and G.W.Scholl : Trans.A.F.S. **82** (1974) 355
10) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **71** (1963) 185

11) F.Hoffmann : Trans.A.F.S. **70** (1962) 1
12) A.B.Draper : Trans.A.F.S. **77** (1969) 407
13) A.B.Draper and P.Shah : Trans.A.F.S. **81** (1973) 328
14) A.I.Veink (日ソ通信社訳)：鋳型の熱力学 (日ソ通信社) (1969)
15) A.Hevek and L.Jenicek : A.F.S.Cast Metals Reserch Journal **4** (1968) 181

16) M.P.Chowdiah : Giesserei **58** (1971) 9, 582
17) 篠田：日立評論 **39** (1957) 3, 382
18) 斉藤，関，斉藤：日本機械学会論文集 **32** (1966) 3, 582
19) Carslow and Jaeger : Conduction of Heat in Solids, Oxford (1959) 283
20) 森：日本鋳物協会，システムサンド部会報告

21) J.H.Gittus : B.C.I.R.A. **5** (1954) 4, 264
22) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **73** (1965) 139
23) W.Patterson and D.Boenisch : Giesserei **33** (1961) 2, 81
24) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **77** (1969) 335
25) W.Patterson and D.Boenisch : Giesserei Techn.-Wiss. Beihefte **13** (1961) 7, 157

26) 岡本：応用流体力学 (誠文堂新光社) (1973)
27) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **73** (1965) 134
28) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **66** (1958) 361
29) 鈴木・山岡：鋳物 **33** (1961) 10, 733
30) 錦織：鋳物 **35** (1963) 2, 86

31) 鈴木・上岡・小田：鋳物 **40** (1968) 12, 927
32) 錦織：鋳物 **35** (1963) 2, 96
33) P.Nicolas : Giesserei **24** (1954) 1, 333
34) H.G.Levelink : Giesserei **2** (1958) 1, 1
35) P.W.Goad : Trans.A.F.S. **67** (1959) 436

36) H.G.Levelink and Van den Berg : Trans.A.F.S. **70** (1962) 152
37) W.Patterson and D.Boenisch : Giessenei **11** (1958) 9, 565
38) W.Patterson and D.Boenisch : Giesserei **6** (1961) 4, 157
39) W.Patterson and D.Boenisch : Giesserei Techn.-wiss. Beihefte **15** (1963) 25
40) D.Boenisch and W.Patterson : Modern Casting (1966) 10, 94

41) C.T.Marek and S.G.McCuen : Trans.A.F.S. **77** (1969) 335
42) 黒田：普通鋳型（日刊工業)(1968), 98
43) 二木：名工試報告 **8** (1959) 10, 714
44) Bertolino and Wallace : Trans.A.F.S. **75** (1967) 708
45) Bertolino and Wallace : Trans.A.F.S. **76** (1968) 589

46) Boenisch, Engler and Köhler : Giesserei **60** (1973) 669
47) Boenisch, Engler and Köhler : Giesserei **60** (1973) 679
48) Boenisch, Engler and Köhler : Giesserei **60** (1973) 725
49) Boenisch, Engler and Köhler : Giesserei **60** (1973) 832
50) Boenisch, Engler and Köhler : Giesserei **60** (1973) 839

51) L.I.Toriello and J.F.Wallace : Trans.A.F.S. **71** (1963) 404
52) A.H.Zrimzek and G.J.Vingas : Trans.A.F.S. **72** (1964) 331
53) 片島，重松，里吉：鋳物 **44** (1972) 5, 416
54) 片島，重松，里吉：鋳物 **45** (1973) 11, 945
55) C.Locke and R.L.Ashbrook : Trans.A.F.S. **58** (1950) 584

56) C.Locke and R.L.Ashbrook : Trans.A.F.S. **80** (1972) 91
57) Levelink and Van den Berg : Trans.A.F.S. **78** (1970) 410
58) Dietart, Fairfield and Brewster : Trans.A.F.S. **56** (1948) 528
59) Dietart, Dolman and Benett : Trans.A.F.S. **52** (1944) 737
60) 牟田口：鋳物 **31** (1959) 9, 775

61) 篠田：砂型鋳造における熱伝達（日本機械学会伝熱講習会教材） (1961－10)
62) C.T.Marek : Trans.A.F.S. **74** (1966) 70
63) 小西，片島：広島工大研究紀要 **8** (1974) 75
64) 片山，服部，斎藤：伝熱工学の進展3 (養賢堂)(1974)
65) 内田：湿り空気と冷却塔 (裳華房)(1963)

66) K.L.Narayama and G.Ramakrishnan : British Foundryman **69** (1976) 1
67) 化学工学協会：化学工学便覧 (丸善)(1968)
68) 棚沢，落合：日本機械学会論文集 **38** (1972) 3, 193
69) D.V.Atterton : Journad of the Iron and Steel Institute (1953) July, 201
70) 丹治：鋳物 **34** (1962) 1, 35

71) 錦織：鋳物 **34** (1962) 9, 644
72) 二木：名工試報告, **7** (1958), 8, 570