

Title	歯科鑄造における鑄造体各部の凝固時間に関する研究
Author(s)	黒田, 拓治
Citation	大阪大学, 1971, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/30232
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

歯科鑄造における鑄造体各部の
凝固時間に関する研究

黒田 拓治

Studies on Solidification Time in Various Portions
of Dental Casting.

Takuzi Kuroda

緒言

歯科鑄造において鑄造欠陥のない鑄造体を得ることは重要な課題である。

鑄造欠陥には、鑄巣 (porosity)、鑄込み不足による欠損、表面の凹凸、異物の混入など多種多様なものがある。Stickland¹⁾、Phillips²⁾は鑄造における諸因子が back pressure porosity に及ぼす影響について報告しており、Ryge³⁾、Skinner⁴⁾、Crowford⁵⁾は鑄巣 (porosity) を金属が凝固する際に生じるもの (shrinkage porosity) とガスの吸収によつて生じるもの (gas inclusion) とに分

類しているが Ryge は前者をさらに localized shrinkage porosity, subsurface porosity, micro-porosity とに分類している。

歯科鑄造においては、鑄造欠陥の一つとして鑄巣は重要なものであり、鑄巣のなかでも凝固収縮孔 (shrinkage porosity) は、特に重要なものである。

工業界における鑄造ではこの凝固に起因する欠陥をなくすために、冷し金や中子などを設けて、鑄物先端部から凝固が終了し、その終了部の位置がしだいに押湯側に移動し、最終的に押湯が凝固完了するように、鑄物の凝固に指向性をもたせている^(6,7)。

歯科鑄造においても、パターン辺縁がまず凝固し、次いでパターンのスプルー付着部、スプルー、そして最後に残り湯が凝固するように、すなわち、一定の順序に凝固が進行するように、凝固に指向性を持たせることが望ましい。

従来、歯科鑄造においては、凝固収縮孔を

防ぐ手段として太くて短いスプルー一線を使うことや湯溜りをつけることなどが提唱されているか^{13, 14)}、渡辺¹⁵⁾は鑄込みの状態を高速度カメラで撮影した結果から、湯溜りをつけると湯流れに乱れが生じ、酸化物、空気、あるいはガス混入の原因になる恐れがあると報告している。

したがって、スプルー一線を太く短くして凝固収縮孔を防ぐのが望ましいのであるが、そのためには鑄造時の凝固過程を知る必要がある。

凝固収縮孔が生じる原因は、パターンへの凝固時間 (t_p) とスプルーへの凝固時間 (t_s) の相対的な関係によるということはすでに示唆されている^{16, 17)}。すなわち、スプルーへの凝固時間がパターンへの凝固時間よりも短ければ、パターンへの凝固収縮を補うことができなため、パターンへの凝固が最も遅い部分に収縮孔を生じる。

桜井ら¹¹⁾、新明¹²⁾、八木¹³⁾は鑄造体を観察

して、収縮孔を生じないためのスプルー線の寸法を実験的に求めている。Leinfelder¹⁸⁾は鑄造体の比重を測定して porosity を検討し、スプルー線の太さ長さ、鑄型温度が鑄造体の比重に影響を及ぼす重要な因子であると述べており、また、Mason¹⁹⁾は太くて短いスプルーは凝固時間が長いことを理論的に述べている。

中村ら²⁰⁾は収縮孔を生じない最小のスプルー直径をパターンの体積と表面積比、すなわち、凝固速度に比例する因子から検討を加えている。また、井田¹⁷⁾はグラフから凝固収縮孔を生じさせないスプルー線の条件を求めることを試みている。このようにしだいに科学的に鑄造条件を求めることが試みられているが、スプルーの凝固時間や残り湯からスプルーへの熱の伝導に関する研究はみられない。

そこで本研究は、歯科鑄造における凝固収縮孔を防ぐための基礎的な実験として、残り湯、スプルーおよびパターンの凝固時間を測定し、これら各部の凝固時間の相互関係が、

種々の鑄造条件によつてどのように変化するかを検討するとともに、あわせて、残り湯からスプルーへの熱の伝導についても検討を加えたものである。

実験材料ならびに方法

使用した鑄造機はWhip-Mix社製空気圧鑄造機である(図1)。

鑄造用パターンは市販パラフィンワックス(厚さ1.4mm)を直径21mmの円板状に打ち抜いたものであり、スプルー線はレディキャストイングワックスを用いた。

凝固時間の測定は次のように行った。すなわち、図2に示す如く、残り湯(C)、パターン(P)(円板の中心)、および残り湯からの距離をいろいろ変えたスプルー内(S)の3ヶ所にアルメル-クロメル熱電対(長さ約15cm)を挿入埋設し、多ペンレコーダー(理化電機工業製4-Pen Recorder KA-40型)(図3)にて、金属の溶融

温度および鑄型温度を所定の条件にコントロールしつつ、上記3ヶ所の温度を同時記録し、記録紙上で各部の凝固時間を求めた。

鑄造用リングは全て高さ 40mm、直径 35mm のステンレス製のものを使用し、埋没材は市販クリストバライト埋没材 (同一 batch のもの) をメーカー指示による混水比 0.35 として使用した。

リングの加熱は埋没の翌日行い、加熱温度は 700°C とし室温からこの温度まで加熱するのに 1.5 時間を要した。そして、リングを 700°C に 30 分以上保持してのち、炉からとり出して所定の鑄型温度に達してから鑄造を行った。

使用金属としては次に示すような理由によって主として純銀を用いた。すなわち、(1) 純金属は凝固温度が一定であるから凝固時間の測定が明確に行える。(2) 純銀は凝固収縮による欠陥が一塊として表面にあらわれやすいため、収縮孔の判定が容易である。(3) 反覆使用が可能である。

純銀の溶融には都市ガスを用い、金属溶融時の gas inclusion をなるべく少なくするためにフラックスとして硼砂を使用した。

なお、熱電対の起電力と温度の関係を、水の氷点と沸点、鉛、銀の融点を用いて求め、標準直線(図4)とし、この標準直線により起電力を温度に換算した。

鑄造条件は表1に示すものを標準条件とし、比較する要因についてののみ条件を変えて実験を行った。

図5は温度-時間曲線の一例である。cは残り湯、sはスプルー内、pはパターンにおける温度-時間曲線で、多ペンレコーダーにて同時記録したものである。すなわち、金属を加熱し、 1055°C で鑄造を行うと金属の温度は下降し、凝固点に達すると凝固潜熱を放出して温度の下降に遅れを生じて曲線中に平坦部ができ、凝固が完了すると温度は再び下降する。

鑄造してから凝固点に達するまでの時間を

t_1 (cooling time), 平坦部の時間 (凝固開始から
 完了までの時間) を t_2 (solidifying time) とすると,
 t_1+t_2 が鑄込み開始から凝固完了までの時間 (total solidification time) である。実用上はこの t_1+t_2 に意味があるので、以後本報においては、 t_1+t_2 を凝固時間 t とし、残り湯、スプルーおよびパターン上の凝固時間をそれぞれ t_c, t_s, t_p で表わすことにする。

実験結果

実験1 熱電対の影響

残り湯やパターンのように、比較的熱容量が大きい部分の凝固時間を測定する場合には、熱電対の影響は少ないが、スプルーの如く、熱容量が小さいもの、中でも、直径 1.5mm のスプルーに熱電対を挿入した場合には、熱電対を通じて逃げる熱量を無視することができないので、熱電対挿入による凝固時間への影響

を考慮に入れなければならない⁽²⁾。

そこで、スプルー直径 1.5mm, 長さ 15mm の標準条件において、直径 0.3mm, 0.2mm, 0.1mm のアルメルクロメル熱電対をスプルー各部に挿入してスプルー各部の凝固時間を測定し、熱電対の影響について検討した。

図6はその結果を示したものである。熱電対からの熱の放散はその断面積に比例すると考えられる。上記3種の熱電対の断面積比は 9:4:1 であるから、各熱電対を通じて逃げる熱量の差の比は、熱電対を用いない場合も含めて考えると $(9-4):(4-1):(1-0)$, すなわち 5:3:1 になるはずである。図6をみると、直径 0.3mm, 0.2mm, 0.1mm の熱電対を用いた場合の凝固時間の差の比は、ほぼ 5:3 になっているので、熱電対を挿入しない場合の凝固時間は図6の破線のように推定される。すなわち、スプルーの直径が 1.5mm の場合でも、直径 0.1mm の熱電対を用いた場合には、熱電対を使用することによる凝固時間への影響は小さいことがわかった。

しかし、直径0.1mmの熱電対は電気炉で加熱中に酸化されてもろく切れやすくなるなどの操作上の困難から、以後の実験には主として直径0.2mmのものを使用し、スプルーの凝固時間の絶対値が必要な場合には、直径0.1mmのものを使用して図6より熱電対を挿入しない場合の凝固時間を推定した。

実験2 残り湯の凝固時間

スプルーの中でも残り湯に近い部分では残り湯からスプルーへの熱の伝導の効果があらわれ、スプルーの凝固時間は長くなる。その場合には残り湯の凝固時間の長さがスプルーの凝固時間に影響してくる。

残り湯の凝固時間に関係する因子として、残り湯の量、鑄込み温度、鑄型温度が挙げられるので、それらの条件を変えて凝固時間を比較したのが表2である。

すなわち、残り湯の量を多くすると、また、鑄込み温度を高くすると、残り湯の熱容量が増大するため凝固時間は長くなる。また、鑄

型温度を高くすると、埋没材の熱吸収能力が小さくなるために残り湯の凝固時間は長くなる。しかし、残り湯の量を多くしていても、凝固時間は必ずしもその量に正比例しなかった。

実験3 パターンの凝固時間

パターンに凝固収縮孔が生じるかどうかは、パターンの凝固時間 (t_p) がスプルーの凝固時間 (t_s) よりも短いかどうかによるのであるから、パターンの凝固時間は凝固収縮孔を生じるかどうかを考える場合に極めて重要である。そこで、パターンの凝固時間が、鑄込み温度、鑄型温度、金属の種類などによってどのように変化するかを比較検討した。(パターンは全て円板状にうち抜いたものである)

その結果、図7に示す如く、鑄型温度を高くするほど、また、鑄込み温度を高くするほど、パターンの凝固時間は急速に長くなった。

Cu-Zn系合金の融解温度は約 880°C で、純銀に比し 80°C 低いので、純銀における標準条件よ

りも 80°C 低い鑄込み温度でパターン上の凝固時間を測定した(図7のD)。その結果, Cu-Zn系合金の凝固時間は純銀のほぼ2倍であった。

実験4 スプルーの凝固時間

スプルー内の凝固時間は残り湯からの距離によって各部において異なるものであるから、一点によってスプルー全体の凝固時間を代表することはできない。そこで、残り湯からの距離をいろいろ変えたスプルー内に熱電対を挿入して、スプルー内各部の凝固時間を測定した。

しかし、凝固収縮孔が出来るかどうかは、スプルーからパターンに湯が補給されるかどうかにかかっているので、スプルーの凝固時間 t_s とパターン上の凝固時間 t_p との比 t_s/t_p をもって、スプルーの凝固時間を相対的にあらわした。すなわち、 t_s/t_p が 1.0 よりも大きいということとはスプルーの凝固時間がパターン上の凝固時間より長いことを意味し、スプルー全長にわたって t_s/t_p が 1.0 より大きいということ

とはスプルー内各部の凝固時間がパターンとの凝固時間より長いことであり、スプルーからパターンへの湯の補給が可能であることを意味している。また、 t_s/t_p で表現することは、鑄込み温度や鑄型温度を変えた場合、スプルー、パターン共に凝固時間は変化するわけであるが、いずれのオにより大きく影響するかということも判定でき、種々の因子を同一の尺度で比較できるところから意義があると思われる。

測定は次に示す6つの条件を変えた場合について行い、 t_s/t_p に及ぼす影響を検討した。

- (1) スプルーの長さ
- (2) スプルーの太さ
- (3) 金属の種類
- (4) 残り湯の量
- (5) 鑄型温度
- (6) 鑄込み温度

なお、標準条件におけるスプルーの凝固時間は図6に示したものである。

(1) スプルーの長さの影響

直径 1.5mm のスプルーで長さを 5mm, 10mm, 15mm の 3種について、スプルーの凝固時間 t_s とパターン（スプルー付着部直下）の凝固時間 t_p との比 t_s/t_p の値を縦軸に、残り湯からスプルー内に挿入した熱電対までの距離を横軸にとり、スプルーの長さの影響をみたのが図 8 である。

長さ 15mm のスプルーについては、図からわかるように、残り湯から 9mm 付近までの t_s/t_p は大きくなっていく。これには、スプルー壁埋没材予熱のほか、残り湯からの熱の伝導の影響が考えられる。9mm から 13mm までの間はスプルー壁埋没材予熱の影響がなく、残り湯からの熱の供給がなくなり、スプルー個々の熱量とスプルー側壁からの熱の放散との関係だけになるため、曲線は水平になる。さらにパターンに近づくともう一度はパターンからの熱の影響をうけて t_s/t_p 値は上昇する。

すなわち、この実験に用いた円板状のパタ

一に直径 1.5mm, 長さ 15mm のスプルー線を使用すると、スプルー内にはパターンとの凝固時間の $\frac{1}{2}$ 以下の時間で凝固を完了する部分が存在し、その結果、図9の左の鑄造体の如く、大きい凝固収縮孔を生じる。

長さを 10mm にすると、スプルー側壁からの熱の放散が少なくなり、全長にわたって、残り湯およびパターンの影響を受けるので、図8のごとく、 t_s/t_p は全体として上昇する。したがって、スプルー内の凝固が最も早い部分（残り湯からの距離が 7mm ぐらいのところ）における t_s/t_p 値は長さ 15mm の場合より高くなるが、スプルー全体としては t_s/t_p 値が 1.0 より小さい部分がかたまり存在する。その結果、図9の中央の鑄造体の如く、やや小さくはなるが凝固収縮孔が存在する。

スプルーの長さを 5mm にすると、スプルー全長にわたってスプルー壁予熱の影響を受けるとともに、いずれの部位も残り湯から十分多量の熱の供給を受けるので、スプルー全体の

t_s/t_p はいずれの部位でも 1.0 以上を示し、パターン
の凝固時間よりもスプルーの凝固時間の
方が完全に長く (図 8), したがって、凝固
収縮孔を作らない条件であることを示してい
る (図 9 の右の鑄造体)。

従来から、凝固収縮孔に関する研究にはし
ばしば純銀が使用されている。純銀はガス吸
収が大きいため生じた錆巣の中にはガス放出
孔もあると云われ、さらに凝固収縮孔も存在
すると云われているが²³⁾、一方、純銀の表
面に出来る欠陥は凝固収縮孔によるものであ
るといふ報告もある²⁰⁾。

本実験においては、スプルーの直径を大き
くするとパターン表面には欠陥が見当らない
うえに、直径 1.5mm で、長さを 10mm にした場合
には、長さ 15mm の場合よりも t_s/t_p が上昇し、
それに応じてパターン表面に出来る欠陥が小
さくなったので、その欠陥は凝固収縮孔によ
るものと判定した。

(2) スプルーの太さの影響

長さは 15mm で、その直径を 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm にした時のスプール内各部の t_s/t_p の値を示したのが図10である。スプール直径を 2.0mm, 2.5mm とすると、スプール個々の熱量が大きくなるうえに、残り湯からの熱の供給も容易となるため、いずれも t_s/t_p は 1.0 よりも大きく、スプール全長にわたってスプールの凝固時間のオがパターンの凝固時間よりも長く、したがって、この実験の場合、凝固収縮孔を作らないことを示している。

図11はスプールの太さを 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm にした時の鑄造体の写真である。すなわち、スプールの太さが 2.0mm, 2.5mm の場合には t_s/t_p はスプール全長にわたって 1.0 より大きく、鑄造体には全く凝固収縮孔が見当らないが、太さが 1.5mm の場合には、はっきりとした大きい凝固収縮孔が存在する。

図12は鑄造体の断面写真である。すなわち、Aのようにスプール線が太い場合には凝固収縮孔は表面にも内部にも存在せず、鑄造体は

見全であるが、Bのようにスプル一線が細い場合にはパターンの表面に出来た凝固収縮孔が内部にまで深く及んでいる。

(3) 金属の種類による影響

図13は金属の種類による影響をみるためにCu-Zn系合金と純銀とを比較したものである。Cu-Zn系合金（融点約 880°C ）の場合には純銀よりも融点が高いので、鑄込み温度は 975°C 、鑄型温度は 540°C 、すなわち、純銀の場合より低い温度にコントロールした。Cu-Zn系合金では純銀に比して、残り湯の影響を受ける範囲で t_s/t_p はやや低くなった。また、残り湯からの熱の伝達する範囲もやや短くなった。

(4) 残り湯の量の影響

図14は残り湯の純銀の量を1g, 5g, 9gにして、 t_s/t_p の変化をみたものである。残り湯の量を多くするほど残り湯に近い部分での t_s/t_p は大きくなり、残り湯が影響を及ぼす範囲も少し長くなった。

(5) 鑄型温度の影響

クリストバライト埋没材の変態温度区間は $210-260^{\circ}\text{C}$ であり、この温度より低温では熱膨張値が小さく、強度も低下するため、一般に、 350°C 以上で鑄造しなければならぬと云われている²³⁾。したがって、本実験では鑄型温度の最低値を 350°C とした。

鑄型温度を変えるとスプルー、パターンともに凝固時間は変るが、そのいずれに影響が大きくなるかを比較するため、鑄型温度を、 350°C 、 470°C 、 620°C にコントロールして t_s/t_p の変化をみたのが図15である。鑄型温度を低くするほど t_s/t_p はやや大きくなる傾向にある。

(6) 鑄込み温度の影響

鑄込み温度を、純銀の溶融状態直後の 1000°C 、標準条件の 1055°C 、およびかなり過熱した 1100°C の3種類にコントロールして t_s/t_p の変化をみたのが図16である。鑄込み温度を変えた場合、スプルーおよびパターンの凝固時間はともに変化するわけであるが、鑄込み温度を高くすると残り湯に近い部分において t_s/t_p は大きく

なり、鑄込み温度が低いと t_s/t_p は小さくなる。

パターンおよびスプルーの 凝固時間の近似式

以上により、種々の鑄造条件の下における鑄造体各部の凝固時間が実験的に求められたのであるが、これら鑄造条件が凝固時間による影響を解析するために、熱伝導の基本式を応用して、パターンの凝固時間 t_p およびスプルーの凝固時間 t_s と、鑄造操作における諸因子との関係を示す近似式を導くことを試みた。

1 パターンの凝固時間の近似式

= 物体間の温度差を ΔT とすると、時間 t の間に両物体間の接触面積 S を通って移動する熱量 Q は次式であらわされる²⁴⁾²⁵⁾。

$$Q = \alpha S t \Delta T \text{ ----- (1)}$$

α : 表面熱伝導率

式(1)より $t = \frac{Q}{\alpha S \Delta T}$ ----- (2)

式(2)を鑄造体の凝固現象の場合に当てはめて考えると、 t は凝固時間、 Q は金属が凝固するまでに放出する熱量、 $\alpha S \Delta T$ が単位時間に埋没材中へ放散する熱量に相当する。

ある鑄造条件において、鑄込まれた金属が凝固するまでに放出する熱量 Q_i は次式であらわされる。

$$Q_i = W_p [c(T_c - T_f) + H] \text{ ----- (3)}$$

W_p : パターンの重量 (g)

c : 金属の比熱 (cal/g°C)

H : 金属の凝固潜熱 (cal/g)

T_c : 鑄込み温度 (°C)

T_f : 凝固温度 (°C)

次に、埋没材への放散熱量について考えると、高温の溶湯が鑄型に流れ込んだ直後には、鑄型の内部（鑄造体の部分）では図17のAのように温度は急激に上昇し、埋没材壁の温度（熱電対の先端は埋没材壁より0.5mmの部位に挿入した）は図17のBのように徐々に上昇す

る。すなわち、パターンとそれに接触した埋設材の間の温度差は凝固期間を通じて一定ではなく、漸次変動するものである。したがって、図17に示す如き温度曲線 A および B を記録し、凝固期間中の平均的な凝固温度 T_f および凝固期間中のパターン壁埋設材の平均的な温度 T_p を図上より求め、両者の平均的な温度差を $(T_f - T_p)$ で表わすと、単位時間に埋設材へ逃げる熱量 Q_r は次式で表わされる。

$$Q_r = \alpha A_p (T_f - T_p) \text{----- (4)}$$

A_p : パターンの表面積 (cm^2)

式(2)、式(3)および式(4)より、パターンの凝固時間 t_p の近似式は次式のように表わすことができる。

$$t_p = \frac{W_p [c(T_c - T_f) + H]}{\alpha A_p (T_f - T_p)} \text{----- (5)}$$

なお、式(5)に標準条件における実験値を用いて、表面熱伝導率 α を求めると次のようになった。

$$5.8 = \frac{5.1 [0.064(1055 - 960) + 25.0]}{\alpha \cdot 7.85(965 - 770)}$$

$$\alpha = 0.018 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}^\circ \text{C}$$

この α の値は、使用する埋没材によって定まる定数であり、スプルーの凝固時間の計算の場合にも利用し得るものである。

2 スプルーの凝固時間 t_s の近似式

スプルーの凝固時間 t_s は、スプルー自身のもつ個有熱量による凝固時間 t_{s1} と、残り湯からの移動熱量による凝固時間 t_{s2} とが加わったものであると考えられる。

今、残り湯からもパターンからも影響を受けない部分の凝固時間を考えると、その部分ではスプルー自身のもつ個有熱量のみによって凝固時間が定まる。この場合には、その凝固時間 t_{s1} は、基本的にはパターンの凝固時間の近似式⁽⁵⁾と同じであるから、次のように表わすことができる。

$$t_{s1} = \frac{W_s [c(T_c - T_f) + H]}{\alpha A_s (T_f - T_s)} \quad (6)$$

W_s, A_s : スプルーの重量(g), 表面積(cm^2)

T_s : スプルー層埋没材の平均的な温度($^\circ\text{C}$)

次に、残り湯からの熱伝導による移動熱量を考へてみると、一般に、熱伝導の法則から、時間 t に伝わる熱量 Q_c は、温度勾配 $\Delta T/\delta$ と、断面積 S とに比例し、 λ を熱伝導率とすると次式で与えられる²⁵⁾。

$$Q_c = \lambda S t (\Delta T / \delta) \text{----- (7)}$$

しかし、スプルー内では各部で温度勾配が異なるので、スプルー内の任意の部分（四18の斜線の部分）に流入する熱量を Q_{c1} 、その部から流出する熱量を Q_{c2} とすれば、その差 $Q_{c1} - Q_{c2}$ （これを蓄積熱量 Q_a と称することにする）がその部分の移動熱量であり、これによつてその部分の凝固時間が決定される。

蓄積熱量 Q_a は次のごとく求めることができる。スプルー内の温度勾配は凝固期間中を通じて漸次変動するものであるが、同一条件においてスプルー各部の温度曲線を記録し、各部について、ある凝固期間（例えば4.5秒間）中の平均的な温度を温度曲線より求めると、スプルーの凝固期間中の平均的な温度勾配は

図19のように示すことができる。

図18において、流入面の温度勾配を $\Delta T_1/\delta_1$ とし、流出面の温度勾配を $\Delta T_2/\delta_2$ とすれば、蓄積熱量 Q_a は両面における温度勾配の差 $(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ によって決定されるので、図19よりスプール内の温度勾配 $\Delta T_1/\delta_1$ と $\Delta T_2/\delta_2$ を求めると、蓄積熱量が決定する。

また、残り湯に近い部分においては、金属溶融時にスプール壁埋没材が加熱されて、図21の如く残り湯から 6mm 付近までのスプール壁埋没材の温度が上昇するので、残り湯に近い部分の T_s は高くなる。

しかし、いずれにしてもスプール内の微小部分を考えると、埋没材への熱の放散は式(6)と同じであるから、流入によって蓄積された熱量による凝固時間 t_{s2} は次式で与えられる。

$$t_{s2} = \frac{\lambda S t_s (\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)}{\alpha A_s (\bar{T}_f - \bar{T}_s)} \quad \text{---(8)}$$

スプールの凝固時間 t_s はこの t_{s1} と t_{s2} の和であるから、式(6)と(8)より

$$t_s = \frac{W_s [c(T_c - T_f) + H] + \lambda S t_s (\Delta T_1 / \delta_1 - \Delta T_2 / \delta_2)}{\alpha A_s (T_f - T_s)}$$

すなわち、

$$t_s = \frac{W_s [c(T_c - T_f) + H]}{\alpha A_s (T_f - T_s) - \lambda S (\Delta T_1 / \delta_1 - \Delta T_2 / \delta_2)} \quad (9)$$

スプルーでは、金属の比重を ρ 、任意の部分の微小距離を d (図18)、半径を r とすると、

$$\left. \begin{aligned} W_s &= \pi r^2 d \rho \\ A_s &= 2\pi r d \\ S &= \pi r^2 \end{aligned} \right\} \text{----- (10)}$$

となり、式(9)に(10)を代入し整理すると、スプルーの凝固時間 t_s の近似式は最終的に次のように表わすことができる。

$$t_s = \frac{\rho [c(T_c - T_f) + H]}{(2\alpha/r) (T_f - T_s) - (\lambda/d) (\Delta T_1 / \delta_1 - \Delta T_2 / \delta_2)} \quad (11)$$

考 察

歯科鑄造における鑄造欠陥の一つとして、

金属が凝固する際に生じる凝固収縮孔を考へることかてきるが、これに関しては今日まで多くの報告がなされてゐる。すなわち、凝固収縮孔の防止には、太くて短いスプルー線の使用や湯溜りをつけることなどが提唱されてゐるが^(1,3,5,8-14)、これらはいずれも外見的な観察だけに基つくものである。

しかし、最近においては、しだいに科学的に鑄造条件を求めることが試みられてゐる。

中村ら²⁰⁾はスプルーを十分長くし、残り湯が押湯(湯溜り)効果を表わさないようにした時、鑄造体に収縮孔を生ぜしめないためにはどの程度までスプルーを太くすればよいかを実験的に求め、収縮孔を生じない最小スプルー径を鑄造体の体積と表面積比、すなわち、凝固速度に比例する因子から検討を加えて、押湯の実験式を求めてゐる。

向山²¹⁾はパターンの体積と表面積の比をいろいろ変えて、パターンの凝固時間の計算式を求めてゐる。

井田¹⁷⁾は凝固収縮孔を生じないためには、スプルーの凝固時間がパターン^{16,26)}の凝固時間より長くなければならぬことから、種々のパターンや種々の寸法のスプルー線について凝固時間を測定し、それらのグラフによって凝固収縮孔を生じないためのスプルー線寸法を求めることを試みている。

Kelly²⁸⁾はスプルーおよびパターンの温度変化を記録し凝固時間を比較している。しかし、スプルーの凝固時間は各所で異なるので、スプルー内の任意の一点のみによってスプルー全体の凝固時間を代表することは適当ではないと思われる。

これらの報告はいずれも凝固収縮孔が生じないための条件を数量的、科学的に求めようとする点において、従来の外見的な観察によるものより一歩前進したものであるが、スプルー内各部の凝固時間および残り湯からスプルーへの熱の伝導に関する機構が検討されなければ、凝固収縮孔を生じないための鑄造条

件を総合的に正確に判断することはできない。

著者は前述の実験において、種々の鑄造条件下における鑄造体各部の凝固時間を測定し、残り湯からスプルーへの熱の伝導の機構を考へることにより、パターンおよびスプルー内の任意の部位における凝固時間を求める近似式を導出したので、以下これらの実験結果を近似式との関連において考察する。

1 パターンの凝固時間に関する

近似式について

パターンの凝固時間の近似式は式(5)のよう
にあらわすことができたが、パターンの凝固
時間 t_p は一般にその体積 (V) と表面積 (S) との比
 (V/S) のほぼ2乗に比例するといわれている^(7,29,30)。

式(5)においては、 V に相当するものは W_p で
あり、 S に相当するものは A_p であるから、こ
の式は一見、単に V/S に比例するように思わ
れるが、 V/S が大きくなると $(T_f - T_p)$ は小さく
なり、したがって $\frac{1}{(T_f - T_p)}$ は V/S にほぼ比例し
て大きくなると思われる。すなわち、結果的

には式(5)は v/s のほぼ2乗に比例することになる。

また、パターン¹⁾の凝固時間が鑄型温度の指数函数に比例するという報告もある²⁾が、鑄型温度が金属の融点以上になった時には凝固時間は無限大となるべきであるから、金属の凝固温度と鑄型温度との差 ($T_F - T_p$) に逆比例すると考えるべきであろう³⁾。

2 パターンの凝固時間に及ぼす 鑄型温度および鑄込み温度の 影響について

パターンの凝固時間に影響する因子は式(5)に示すように種々のものがあるが、このうちパターンの大きさ⁴⁾と形状 (W_p, A_p)、埋没材の熱的性質 (α)、溶融金属の性質 (c, H, T_f) などの因子は鑄込み操作以前に決定されている因子であり、鑄型温度 (T_p) と鑄込み温度 (T_c) は鑄込みの際に変えることのできる因子である。そこで、鑄込みの際に変えることのできる因子をとりあげて、パターンの凝固時間⁵⁾およびその影響を検討

した。

鑄型が低温の場合には凝固時間は直線的に変化するが、高温になるに従って凝固時間は急速に長くなる(図7)。

パターン上の凝固時間に対し鑄込み温度と鑄型温度の影響の程度を判定するために、表3の如く、因子と水準を決定してL₈直交配列表にて分散分析を行った。すなわち、鑄込み温度を50°C、鑄型温度も50°C変えた場合の寄与率は鑄込み温度が29.5%、鑄型温度が59.2%、それらの交互作用が8%で、パターン上の凝固時間に対して鑄型温度の影響が著しいことがわかった。

3 スプルーの凝固時間について

スプルーの凝固時間の近似式(11)を用いて計算したスプルー内各部の凝固時間と、実験によって得た凝固時間(図6における熱電対を挿入しない場合の)とを比較すると表4の如くになり、ほぼ一致した。

例えば、残り湯から4-5mmの部位では、標準

条件においては、 $T_c=1055^\circ\text{C}$ 、 $T_f=960^\circ\text{C}$ であり、図17の如くにして求めた平均的な凝固温度と平均的な埋没材の温度は $T_f=965^\circ\text{C}$ 、 $T_s=725^\circ\text{C}$ である。残り湯から4mmと5mmの部位における平均的な温度勾配は図19より、 $\Delta T_1/\delta_1=45^\circ\text{C}/\text{cm}$ 、 $\Delta T_2/\delta_2=40^\circ\text{C}/\text{cm}$ であり、パターンの近似式より求めた表面熱伝導率は $\alpha=0.018\text{cal}/\text{cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ である。また、純銀の密度 $\rho=10.49\text{g}/\text{cm}^3$ 、比熱 $c=0.064\text{cal}/\text{g}^\circ\text{C}$ 、凝固潜熱 $H=25.0\text{cal}/\text{g}$ 、熱伝導率 $\lambda=0.9\text{cal}/\text{cmsec}^\circ\text{C}$ 、用いたスプルー半径 $r=0.075\text{cm}$ 、4mmと5mmの間の距離 $d=0.1\text{cm}$ であるから、これらの数値を式(11)に入れるとスプルーの凝固時間は次のようにして計算することができる。

$$t_s = \frac{10.49 [0.064 (1055 - 960) + 25.0]}{\frac{2 \times 0.018}{0.075} (965 - 725) - \frac{0.9}{0.1} (45 - 40)}$$

$$= 4.64 \text{ (sec)}$$

このようにして、残り湯から2-3mm, 4-5mm, 8-9mm, 10-13mmの部位の凝固時間を求めたのが表4の計算値である。

以上のように、スプルーの凝固時間の近似

式 (11) は、その凝固時間と鑄造操作における諸因子との関係を良く表現していることが認められた。

4 残り湯からの移動熱量による

凝固時間 t_{s_2} の分析

スプルーの凝固時間を、近似式を用いて、スプルー個有の熱量による凝固時間 t_{s_1} と、残り湯からの熱伝導による凝固時間 t_{s_2} とに分離し、また、これら t_{s_1} と t_{s_2} をスプルー壁埋没材の予熱による凝固時間の遅れとに分離した。その結果を図20に示した。すなわち、図20において、 t_{sh} は金属溶融時の加熱に伴うスプルー壁埋没材の予熱(図21)による凝固時間の遅れを示すもので、スプルー壁埋没材温度上昇の影響は残り湯から6mm付近まで及んでいる。 t_{sc} は残り湯からの熱伝導による凝固時間の遅れをあらわしている。

図20を作製するための計算方法を述べると次の如くである。

例えば、スプルー直径1.5mm, 長さ15mmの場合

合、残り湯から 4-5mm の部位のスパル一の凝固時間を分離して計算すると次のようになった。

(1) スパル一個有の熱量による凝固時間

- 1) 残り湯およびパターンから十分離れた部分で、両者の影響および金属溶融時の影響を受けない場合の凝固時間 (図 8 で残り湯から 10-13mm の部分)

式(6)より

$$t_{si} = \frac{10.49[0.064(1055-960)+25.0]}{\frac{2 \times 0.018}{0.075}(965-710)} = 2.66 \text{ (sec)}$$

- 2) 残り湯から 4-5mm の部分で、スパル一壁埋没材の予熱による影響を受ける場合の凝固時間

式(6)より

$$t_{si} = \frac{10.49[0.064(1055-960)+25.0]}{\frac{2 \times 0.018}{0.075}(965-725)} = 2.83 \text{ (sec)}$$

(2) 残り湯からの熱伝導による凝固時間

- 1) スパル一壁埋没材の予熱による影響のない場合の凝固時間

式(8)より

$$t_{s2}' = \frac{0.9 \times 3.14 \times 0.075^2 \times 4.64 (45-40)}{0.018 \times 2 \times 3.14 \times 0.075 \times 0.1 (965-710)}$$

$$= 1.73 \text{ (sec)}$$

2) スポル一壁埋没材の予熱による影響
のある場合の凝固時間

式(8)より

$$t_{s2}'' = \frac{0.9 \times 3.14 \times 0.075^2 \times 4.64 (45-40)}{0.018 \times 2 \times 3.14 \times 0.075 \times 0.1 (965-725)}$$

$$= 1.81 \text{ (sec)}$$

すなわち、

(1) スポル一個有の熱量による

凝固時間

$$t_{s1} = \underline{2.83 \text{ sec}}$$

1) 残り湯およびパターンの影響

かない場合の凝固時間

$$2.66 \text{ sec}$$

2) スポル一壁埋没材予熱の影響

による凝固時間の遅れ

$$0.17 \text{ sec}$$

(2) 熱伝導の熱量による凝固時間 $t_{s2} = \underline{1.81 \text{ sec}}$

1) 残り湯からの移動熱量だけに

よる凝固時間

$$1.73 \text{ sec}$$

2) スポル一壁埋没材予熱の影響

による凝固時間の遅れ

$$0.08 \text{ sec}$$

残り湯から 4-5mm の部位の

スプルーの凝固時間 --- $(ts_1 + ts_2) \equiv \underline{4.64\text{sec}}$

このようにして、スプルー内各部位におけるスプルーの凝固時間を分離して計算し、まとめたのが図21である。

すなわち、近似式⁽⁸⁾および⁽¹¹⁾を利用することによって、スプルーの凝固時間の遅れを、残り湯からの移動熱量による影響と、スプルー壁埋没材予熱の影響とに分析することかはじめて可能となった。

5 パターンとスプルーの凝固時間

の比 ts/tp に影響を及ぼす因子に

ついて

(1) 実験結果の検討

1) スプルーの長さの影響

一般の鑄造条件のもとでは、残り湯に近い部分では金属溶融時の火炎によるスプルー壁埋没材の温度上昇を伴い、その部分では他の部分に比べて高温の鑄型の中に金属を鑄込む

ことになるので凝固時間が長くなる。

その実験結果は図21の如く、その効果は直径1.5mmのスプルーにおいても残り湯から6mm付近にまで及んでおり、その上に残り湯からの熱伝導の影響があるので、凝固時間は更に長くなる。

しかし、スプルーの長さ t_s を15mmと十分に長くした場合には、スプルー壁埋没材予熱の効果や残り湯からの熱伝導の効果は、パターン
の凝固収縮孔に対しては全く意味がなくなり、その場合にはスプルー固有の熱量による凝固時間とパターンの凝固時間との関係になる。故に、 t_s/t_p を大きくする因子としては、スプルー太さの影響が最も大きい(図8)。

スプルーの長さ t_s を9mmより短くすると、残り湯からの熱伝導が影響してくる。その上にスプルー側壁から逃げる熱量も少なくなってくる。スプルーをさらに短くして5mm以下にすると、スプルー壁埋没材は全長にわたって予熱の影響を受けるようになる。

2) スプルーの太さの影響

スプルーの太さを大きくすると t_s/t_p は大きくなる。すなわち、スプルーの体積と表面積の比 V/S が大となり、スプルー自身の個有熱量が大きくなることと、伝導による熱量の流入速度がスプルーの断面積に比例するため、残り湯からの熱の供給が多くなる。

図10において、太さ 2.0mm の場合、残り湯から 6mm まではスプルー壁予熱の影響を受けるとともに、残り湯からの熱伝導が大であるが、10mm まではスプルー自身の個有熱容量の割合が大きくなり、さらにパターンに近づくとき、パターンへの熱の供給のため t_s/t_p は小さくなってくる。

3) 金属の種類の影響

金属が異なる場合、その金属の熱伝導率への値に応じて残り湯の熱供給の範囲が異なってくる。しかし、図13で比較した純銀と Cu-Zn 系合金は、熱伝導率の非常に大きい金属と小さい金属（用いた合金は 60 Cu-40 Zn 合金で、20°C

における熱伝導率は $\lambda = 0.29 \text{ cal/cmsec}^\circ\text{C}$ である³¹⁾)
 であるにもかかわらず両者の t_s/t_p 曲線にはそれ
 ほど大きい差がないところから、金属のち
 がいによる差はそれほど大きいものではな
 った。

4) 残り湯の量, 鑄型温度, 鑄込み温度 の影響

残り湯を多くするほど、鑄型温度を低くす
 るほど、また、鑄込み温度を高くするほど、
 残り湯に近い部分で t_s/t_p は大きくなり、残り
 湯の影響を受ける範囲も長くなる傾向にある
 が、本実験に用いたようなスプルー、すなわ
 ち、比較的細くて長いスプルーにおいては、
 いずれの場合にも t_s/t_p の最低値は変わらない
 (図14, 15, 16) ので、この場合にはパターンとの
 凝固収縮孔に影響を与えない。これらの因子
 の効果は、スプルーの長さが十分に短くなっ
 てきてはじめてあらわれてくるものである。

(2) 近似式による検討

式(5), (11) から、スプルーの凝固時間 t_s と、

パターンの凝固時間 t_p との比 t_s/t_p を求めると次のように表わすことができる。

$$\frac{t_s}{t_p} = \frac{(T_f - T_p)}{(2/r)(T_f - T_s) - (\lambda/\alpha d)(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)} \cdot \frac{A_p}{V_p} \quad (12)$$

A_p, V_p : パターンの表面積と体積

実験4の結果を式(12)で考えると表5のよう
に表わすことができる。

例えば、スプルーの太さを大きくすると、半径 r が大となり、スプルー内の平均的な温度勾配の差 $(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ も大となるので、式(12)の分母が小となり、その結果、 t_s/t_p は上昇する。

スプルーの長さを短くすると、平均的な温度勾配の差 $(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ が大になるとともに、金属溶融時の火炎によってスプルー壁埋没材が予熱されるので、スプルー壁埋没材の平均的な温度 T_s も高くなり、分母が小さくなるので t_s/t_p は上昇する。

金属が異なると、金属の熱伝導率 λ が異なるので、それに応じて t_s/t_p は変化する。

残り湯の量、鑄型温度、鑄込み温度についても表5の如く、 t_s/t_p は実験4-(4),(5),(6)と傾向が一致している。

以上のように近似式によって鑄造における諸因子と t_s/t_p との関係を定性的によく表現できた。

本実験に用いたような比較的細くて長いスプルーを使用した場合に、残り湯からの熱伝導の影響がない部分の t_s/t_p を計算してみると、その場合 $\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2 = 0$ となるから、式(12)は次式でもって表わされる。

$$\frac{t_s}{t_p} = \frac{r(T_f - T_p)}{2(T_f - T_s)} \cdot \frac{A_p}{V_p} \quad \text{----- (13)}$$

式(13)に本実験の測定値を用いて計算すると、

$$\frac{t_s}{t_p} = \frac{0.75(965-770)}{2(965-710)} \cdot \frac{1}{0.62} \\ = 0.46$$

となり、熱電対を挿入しない場合の推定値の0.45(図6より求めた、熱電対を挿入しない場合の t_s と、図7より求めた標準条件におけ

る t_p との比) とほぼ一致した。

6 湯溜りについて

床のように体積 (V) と表面積 (S) の比 (V/S) が小さい鑄造体、すなわち、鑄込まれると直ちに凝固する³⁰⁾ 鑄造体においては、凝固収縮孔は生じにくい。が、インレーやブリッジのように、 V/S が比較的大きい鑄造体においては凝固収縮孔が生じる恐れがある。その防止には、太くて短いスプルー線を使用することや湯溜りをつけることなどが提唱されている^{13, 5, 8-14)}。

一方、湯溜りをつけると湯流れに乱れを生じ、鑄巣の原因となる恐れがあるという報告もみられる¹⁵⁾。また、Graty³²⁾ は Co-Cr 合金の鑄造において、スプルー線の径が湯溜りの有無より重要であることを述べている。

しかし、歯科鑄造においては、細くて長いスプルー線を使用しなければならぬことがある。その場合には、湯溜りをつけて、金属の凝固収縮を補ってやらねばならない。

桜井¹¹⁾、新明¹²⁾、八木¹³⁾、Thompson³³⁾ は、

小型厚肉のろう型の場合には、その体積と同じか、それより大きい湯溜りを出来るだけ鑄造体に近ずけてつけるべきであると報告している。

本研究においては湯溜りをつけた実験を行なっていないが、実験結果より湯溜りをつけた場合のスポル一内各部の t_s/t_p を推定することができると。

一般に湯溜りはスポル一が十分に長い場合にパターン近くにつけるものである。したがって、図21の如くの金属溶融時の埋没材の温度上昇は、湯溜りをつける部分では生じない。

すなわち、湯溜りの凝固時間は、湯溜りの v/s によって左右されるものである。

いま、本実験に用いた残り湯と同じ凝固時間を有する湯溜りをつけたとすると、その湯溜りからの熱伝導によるスポル一の凝固時間は、図21におけるスポル一の凝固時間の分析図から t_{sh} を差し引いたものとなる。

故に、本実験においてはスポル一長さか。

5mm の場合には、パターンに凝固収縮孔を生じなかつたけれども、スプルー長さ 15mm のものを使用し、パターンから、5mm の部位に残り湯と同じ凝固時間をもつ湯溜りをつけても、パターンには凝固収縮孔が生じるものと思われる。したがって、湯溜りをつけることによってパターンの凝固収縮孔を防ぐには、湯溜りをパターンにより近く、また、湯溜りとパターンの間のスプルーをより太くしなければならぬことになる。

例えば、直径 1.5mm、長さ 15mm のスプルー線で、パターンから 5mm の部位に湯溜りをつけた場合の t_s/t_p の曲線は図 8 の結果から図 22 のように推定することが出来る。すなわち、湯溜りとパターンとの間のスプルーが太いときは湯溜りからパターンまでの t_s/t_p が 1.0 より大きいので凝固収縮孔はできないうが、湯溜りとパターンとの間のスプルーが細いときは両者の中間に t_s/t_p が 1.0 より小さい部分があるので、凝固収縮孔を生じることになる。

故に、湯溜りの効果を十分に発揮させるには、少なくともパターンとの凝固時間よりも遅く凝固するような湯溜りを、その熱量が十分にパターンに流れ込むように、パターンにより近くつけ、湯溜りとパターン間のスプルーをより太くすることが必要である。

総括ならびに結論

鑄造体各部の凝固時間を測定し、これら各部の凝固時間の相互関係が種々の鑄造条件のもとでどのように変化するかを知るとともに、残り湯からスプルーへの熱伝導の機構を知る目的で実験し、次の結果を得た。

1. スプルー直径の影響はきわめて大きく、これを太くするほど t_s/t_p は著しく増大した。

2. スプルーの長さが短くなるほど t_s/t_p は増大した。この場合には、鑄型温度、鑄込み温度、残り湯の量などの諸因子が t_s/t_p の値に

影響を及ぼして行くことがわかった。

3 金属溶融時の加熱はスプルー壁埋没材の温度を上げ、スプルーの凝固を遅らせるので、 t_s/t_p を増大させる原因となっていることがわかった。

4 スプルーの凝固時間 t_s と、パターンの凝固時間 t_p に関する近似式は、凝固時間と鑄造操作における諸因子との関係をよく表現していることが認められた。

以上、鑄造における諸因子がスプルーとパターンとの凝固時間の比 t_s/t_p に与える影響について比較した結果、スプルー直径およびスプルー長さの影響が大きく、鑄込み温度、鑄型温度、残り湯の量などの影響は比較的小さいことが認められた。また、熱伝導の基本式を応用し、残り湯からスプルーへの熱の伝導に関与する因子を考慮して、凝固時間に関する近似式を導き、計算値と実験値とを比較検討した結果、両者はほぼ一致することが認められた。

文 献

- 1) Stickland, W.D. and Sturdevant, C.M. (1959): Porosity in the full cast crown. J.Amer.Dent.Ass. 58, 69-78.
- 2) Phillips, R.W. (1947): Studies on the density of castings as related to their position in the ring. J.Amer.Dent.Ass. 35, 329-342.
- 3) Ryge, G., Kozak, S.F. and Fairhurst, C.W. (1957): Porosities in dental gold castings. J.Amer.Dent.Ass. 54, 746-754.
- 4) Skinner, E.W. and Phillips, R.W. (1969): The science of dental materials. 5th Ed, 487.
- 5) Crowford, W.H. (1940): Selection and use of investments, sprues, casting equipment and gold alloys in making small castings. J.Amer.Dent.Ass. 27, 1459-1479.
- 6) 梶山正彦, 雄谷重夫, 上田徹完, 大平五郎, 大和田野利郎 (1969): 鑄造技術の基礎. 日刊工業新聞社, 東京, 87-151, 昭和44.
- 7) 千々岩健吾 (1965): 鑄物の湯の流れと押湯. 誠文堂新光社, 東京, 38-71, 昭和40.

- 8) 長谷川二郎 (1969) : 歯冠鑄造修復
(5) 諸問題とその対策. 歯界広報, 5, (5),
37-42, 昭和44.
- 9) 金竹哲也 (1968) : 齒科理工学通論
永末書店, 京都, 107-108, 昭和43.
- 10) Wilson, J.L. (1941): Cause and control of shrinkage po-
rosity in inlay casting. Dent. Digest, 47, 407.
- 11) 桜井貞雄, 鈴木暎, 山口重雄 (1955)
: 湯溜りの効果に関する実験. 歯材畧誌, (2),
77-81, 昭和30.
- 12) 新明永江 (1959) : 湯溜りの効果に
関する研究. 歯材畧誌, (4), 26-45, 昭
和34.
- 13) 八木敏夫 (1959) : 湯溜りの効果に
重点をおりた中溶合金の齒科鑄造に関する研
究. 歯材畧誌, (4), 123-141, 昭和34.
- 14) Coleman, R.L. (1926): Physical Properties of dental mat-
erials. Bureau of Standards J. Res., 867-938.
- 15) 渡辺誠司 (1965) : 高速度カメラに
よる齒科精密鑄造の湯流れに関する研究. (才

2報). 齒理工誌, 6, (10), 37-50,
昭和39.

16) 井田一夫, 黒田拓治, 山賀礼一 (1968): ガス圧鑄造に関する研究. 才4報 鑄造体各部の凝固時間の測定. 齒技器誌, (18), 16-28, 昭和43.

17) 井田一夫 (1970): グラフによる鑄造条件の求め方. 才2報 収縮孔を生じないためのスプル-線寸法の求め方. 齒技器誌, (21), 19-22, 昭和45.

18) Leinfelder, K.F., Fairhurst, C.W. and Ryge, G. (1963): Porosities in dental gold castings. II. Effects of mold temperature, sprue size and dimension of wax pattern. J. Amer. Dent. Ass. 67, 816-821.

19) Mason, H.J. (1961): Sprue size adjustment in dental castings. Theory of control of heat flow. North West Dentistry, 40, 291-293.

20) 中村健吾, 鎌田俊夫, 西沢孝, 奈良友雄, 茂呂祐二, 井川邦雄 (1964): 歯科鑄造における押湯の実験式. 収縮孔を生ぜしめな

- 1) 最小のスパル一線径. 齒理工誌, 5, (9),
144-151, 昭和39.
- 21) 前園明一 (1970): 熱電対温度計の
選択と使用法. 金属, 40, (11), 81-84,
昭和44.
- 22) 梶井貞雄, 鈴木暎, 山口重雄 (1955)
: 純銀鑄造の経験 (上). 齒材器誌, (2),
71-76, 昭和30.
- 23) 三浦維四, 中村健吾 (1959): 最新
齒科金属学. アグネ出版社, 東京, 89-92,
昭和34.
- 24) 後藤憲一, 西山敏之, 山崎修一郎 (19
69): 詳解物理学演習 (下). 共立出版株
式会社, 東京, 4-9, 昭和44.
- 25) 材料研究会編 (1953): 工業材料便
覧, 金属. 理工出版社, 東京, 233-248,
昭和28.
- 26) 井田一夫, 古産谷隆, 山賀礼一 (196
8): ガス圧鑄造に関する研究. 才5報 鑄
造時の加熱の影響. 齒材器誌, (18), 29-35,

昭和43.

27) 向山秀城(1968): 歯科精密鑄造における凝固完了時間に関する研究(才1報) 凝固完了時間と鑄型の体積/表面積比の関係について. 歯理工誌, 9, (17), 210-216,

昭和43.

28) Kelly, G.P. (1970): Study of porosity and voids in dental gold castings. J. Dent. Res. 49, 986-993.

29) Chvorinov, N. (1939): Control of the solidification of casting by the calculation. Foundry Trade J. 61, 95-98.

30) 井田一夫(1969): グラフによる鑄造条件の求め方 才1報 鑄造欠損を生じないための条件. 歯材器誌, (20), 36-42,

昭和44.

31) Metals Handbook Committee (1948): Metals Handbook, The American Society for Metals, Cleveland, 917.

32) Grady, T.C. (1961): Porosity in chrome-cobalt castings. Dent. Practitioner and Dent. Record, 12 (3), 90.

33) Thompson, P.A. (1941): The wax pattern and its investment. Dent. Digest, 47, 306-309.



図1 空気圧鋳造機

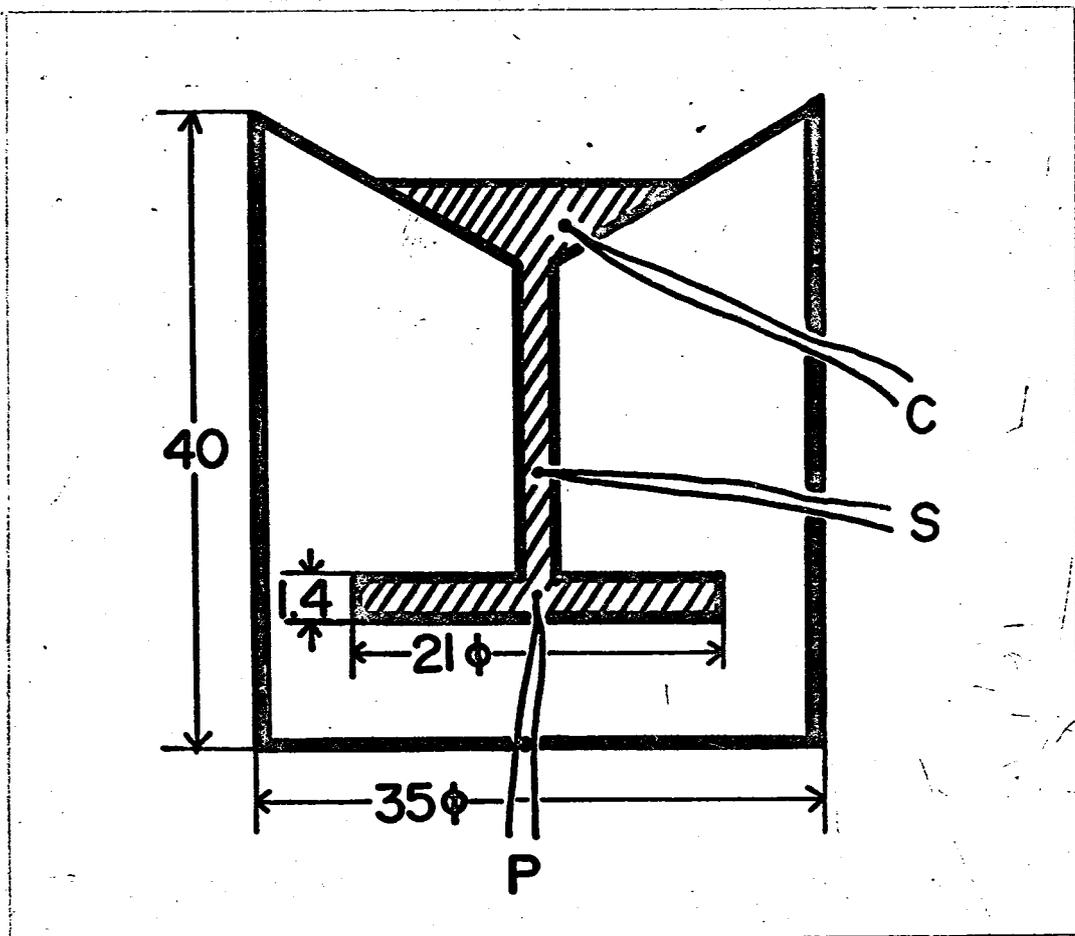


図2 パターンの寸法及び熱電対挿入部位

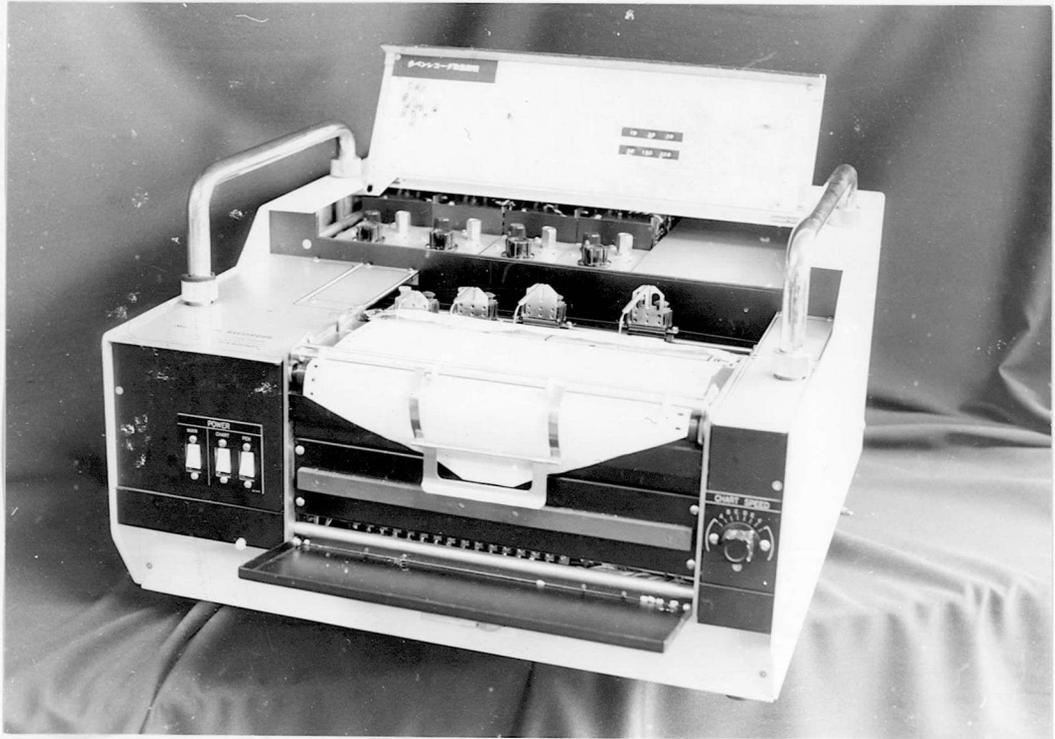
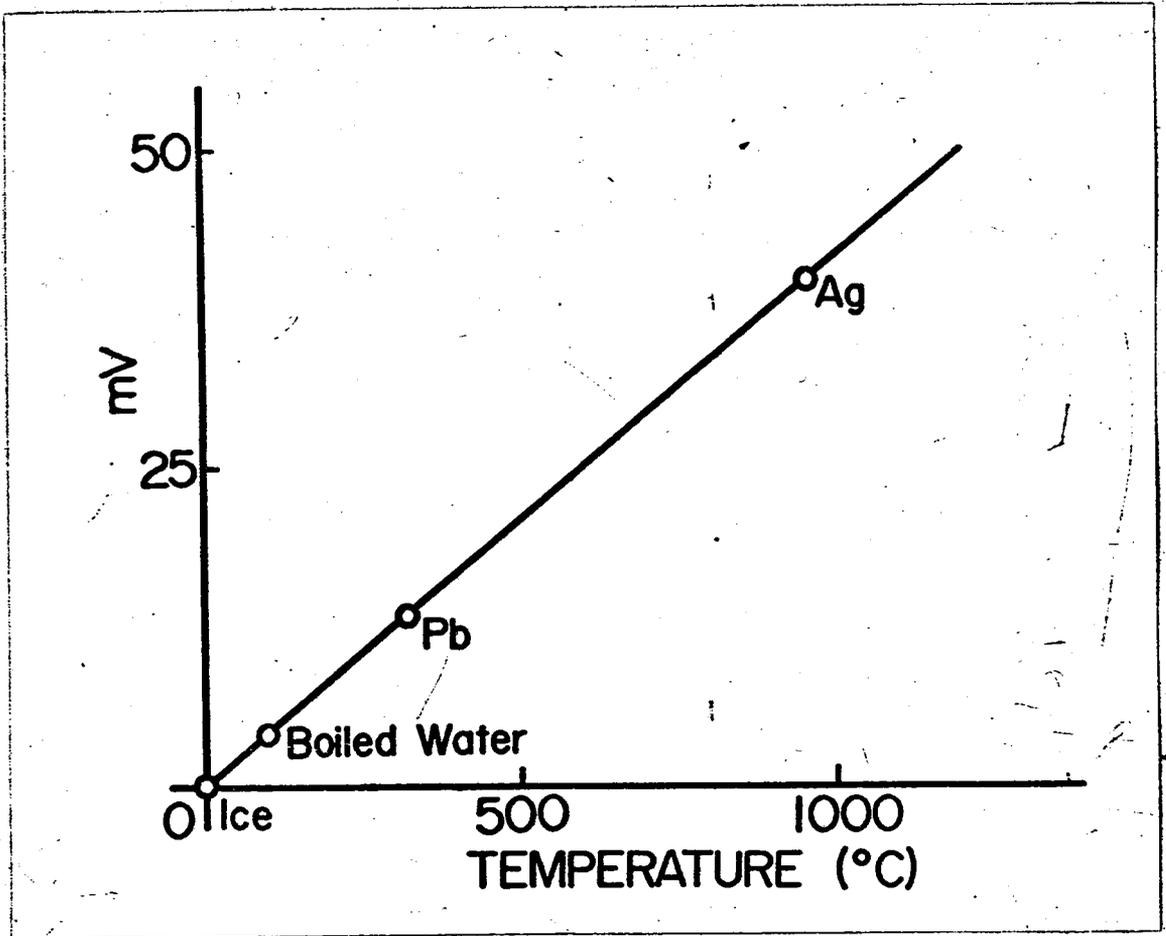


図3 多ペンレコーダー



四四 起電力-温度図
 (アルメル-クロメル熱電対による)

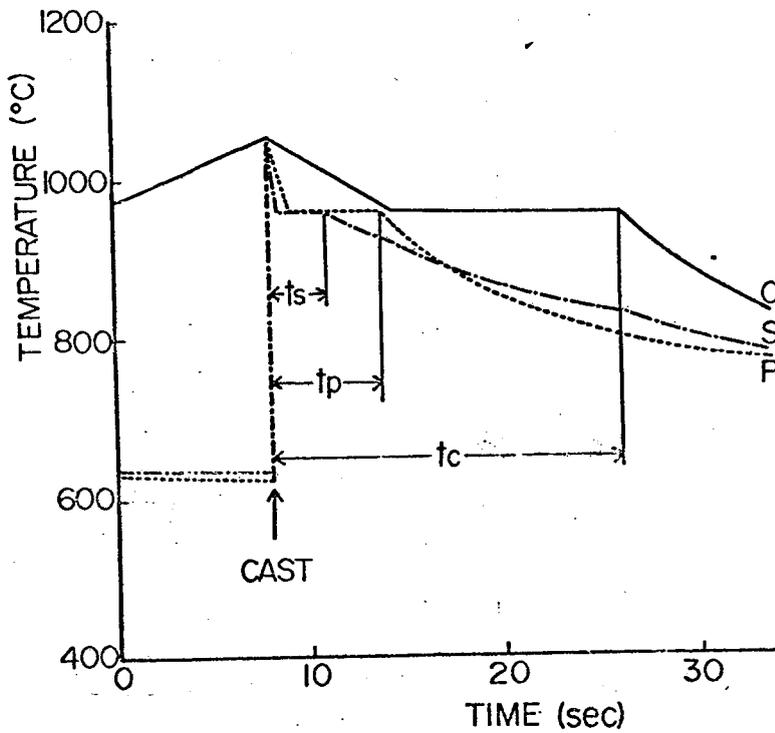
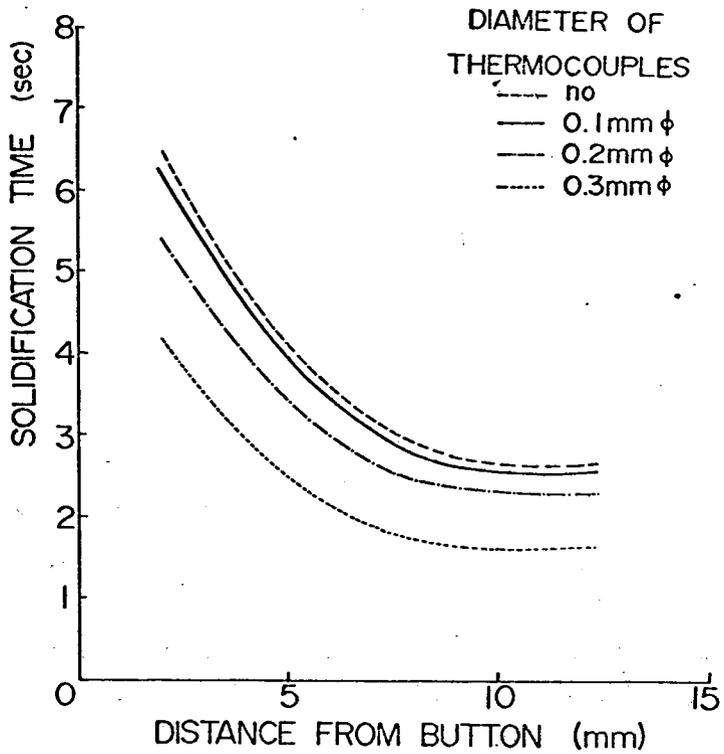


図5 鑄造体各部の温度曲線

(C : 残り湯
 S : スプルー内
 P : パターン)



四六. 熱電対の太さによるスプルーの
 凝固時間への影響
 (破線は、熱電対を挿入しない場合の
 推定による凝固時間)

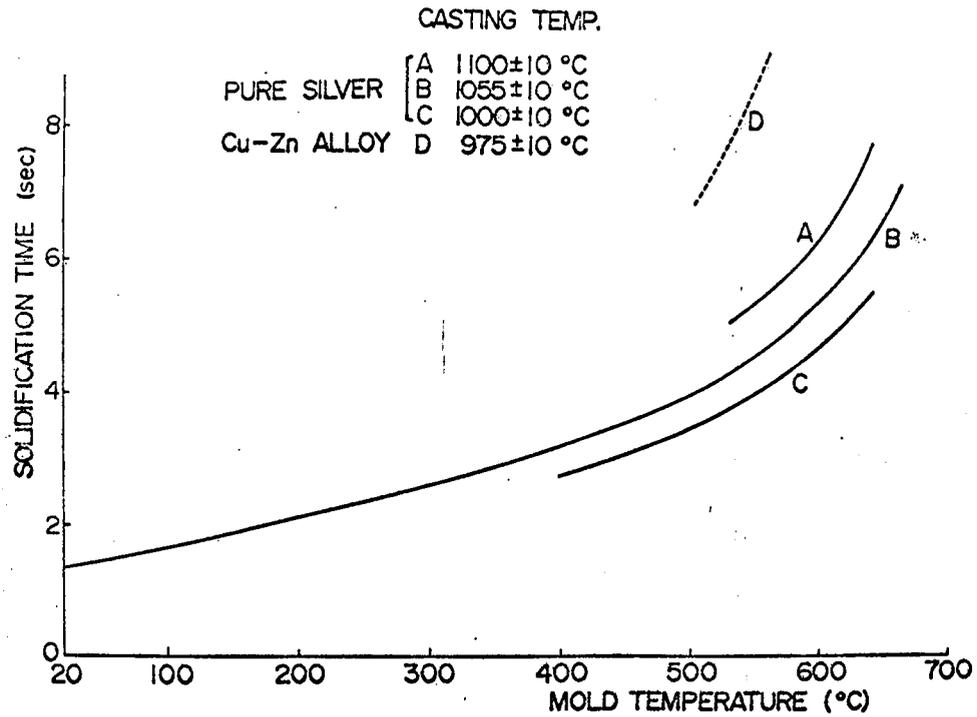
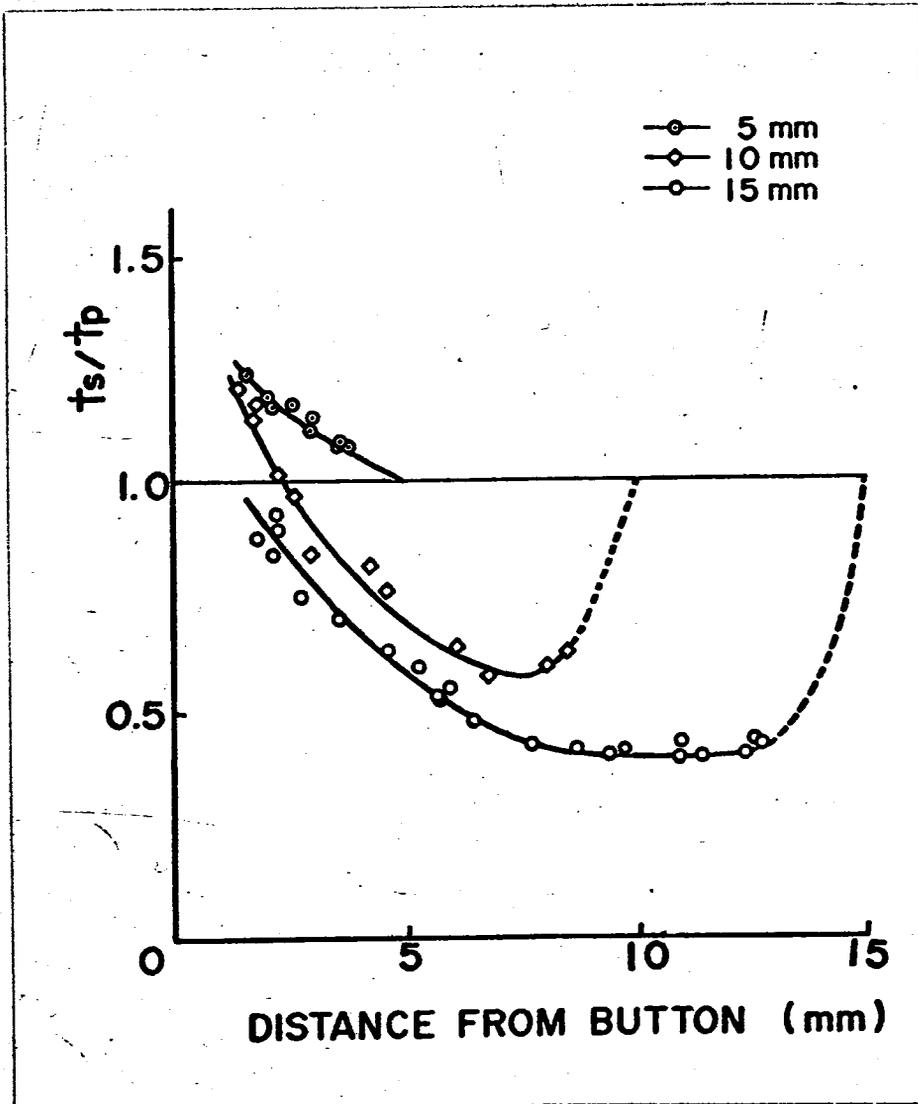


図7. パターンの凝固時間



四八 スプルー長さを変えた場合、
スプルー内各部位の t_s/t_p



図9 スプルー長さを変えた場合、
凝固収縮孔のちがい

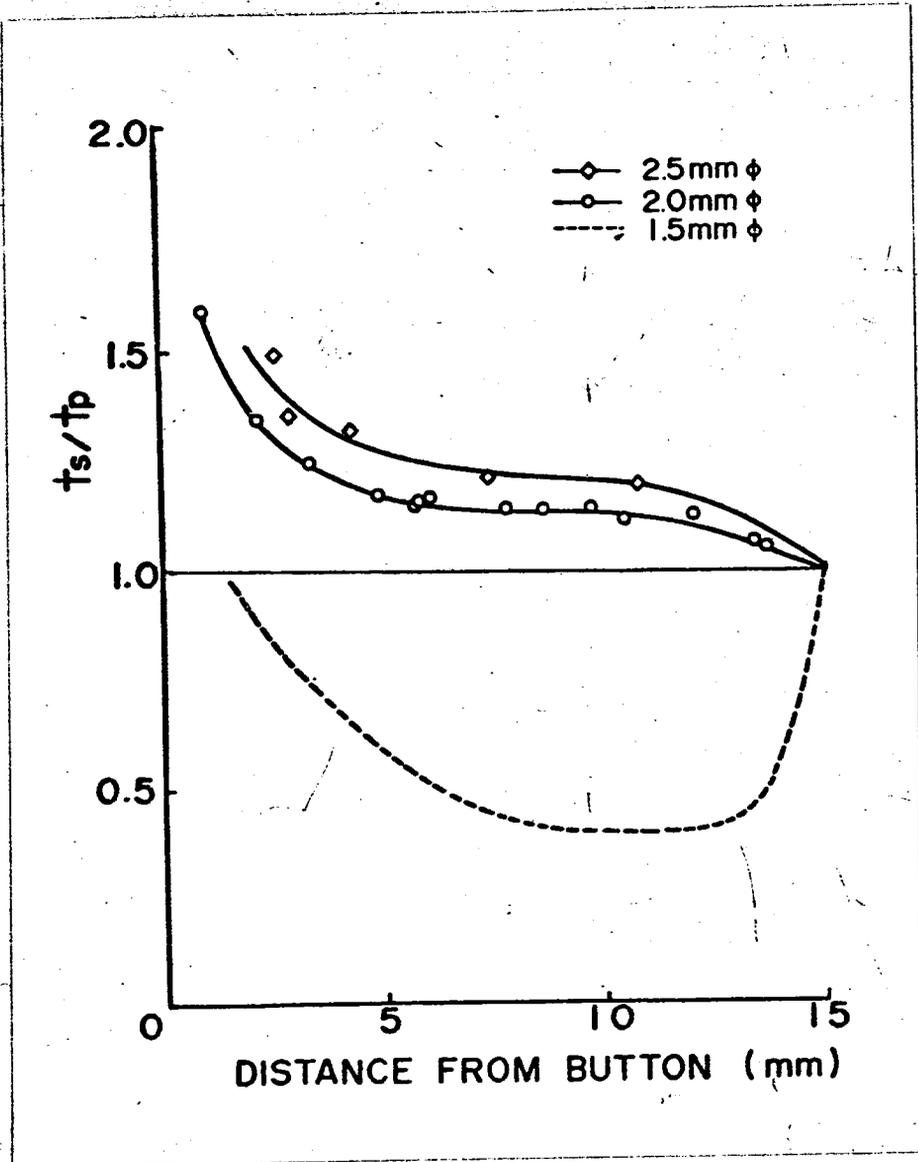
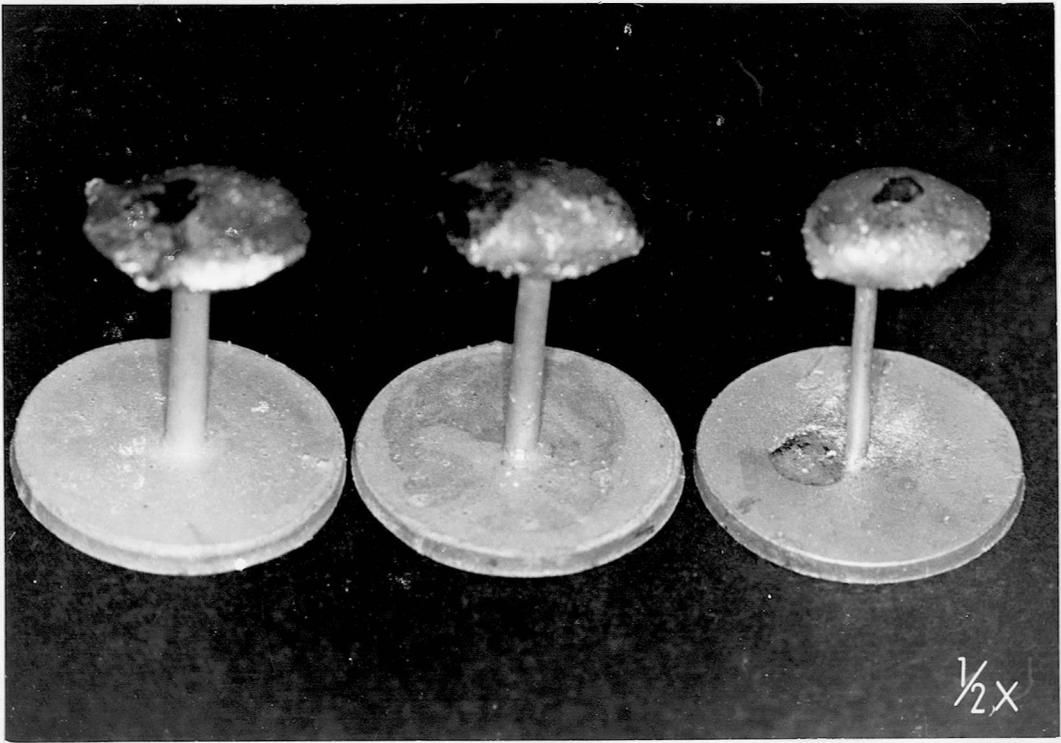


図10. スプルー太さを変えた場合、
スプルー内各部位の t_s/t_p



四11 スプルー太さを変えた場合、
凝固収縮孔のちがい

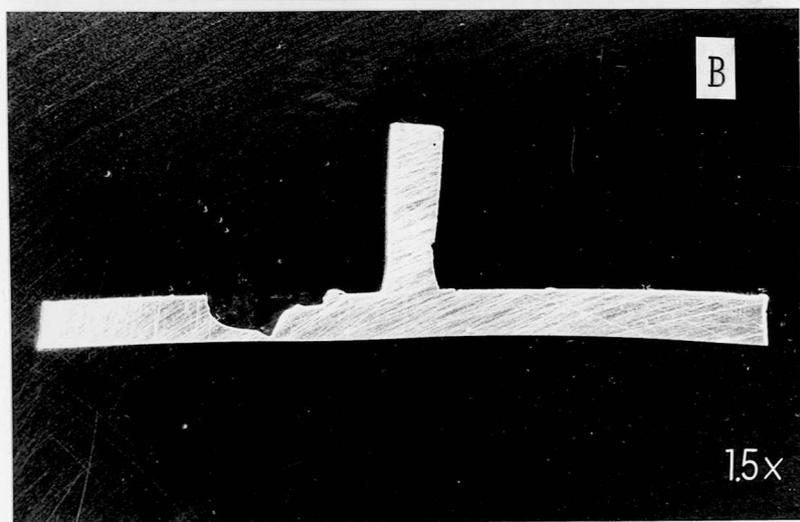
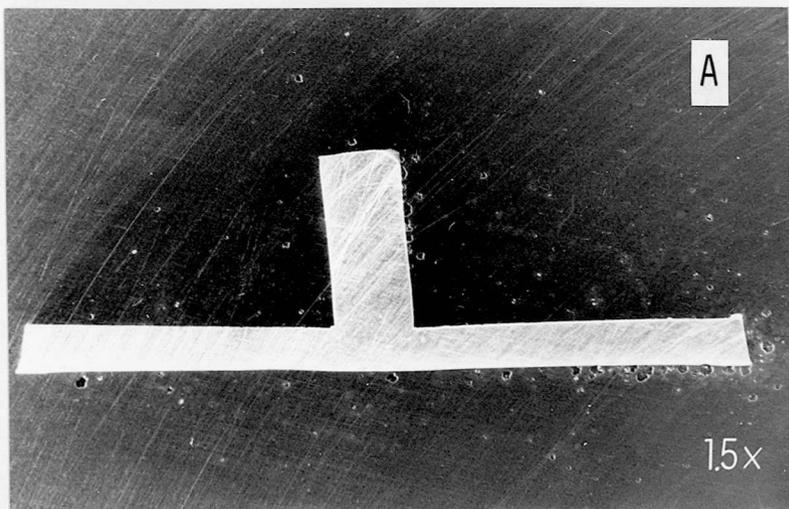


図12 スプルー太さを変えた場合、
鑄造体の断面

A : スプルー直径 2.5 mm

B : スプルー直径 1.5 mm

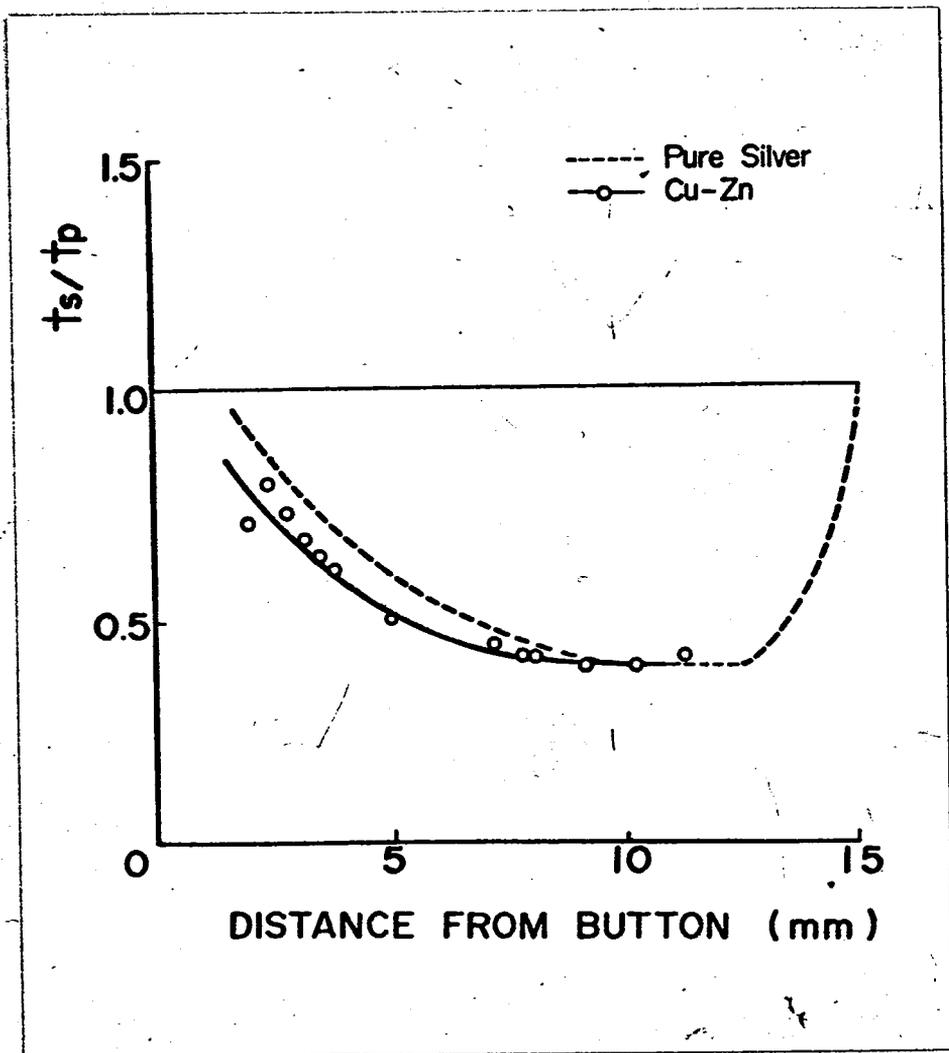


図13. 金属の種類によるスプォーの
 t_s/t_p 値への影響

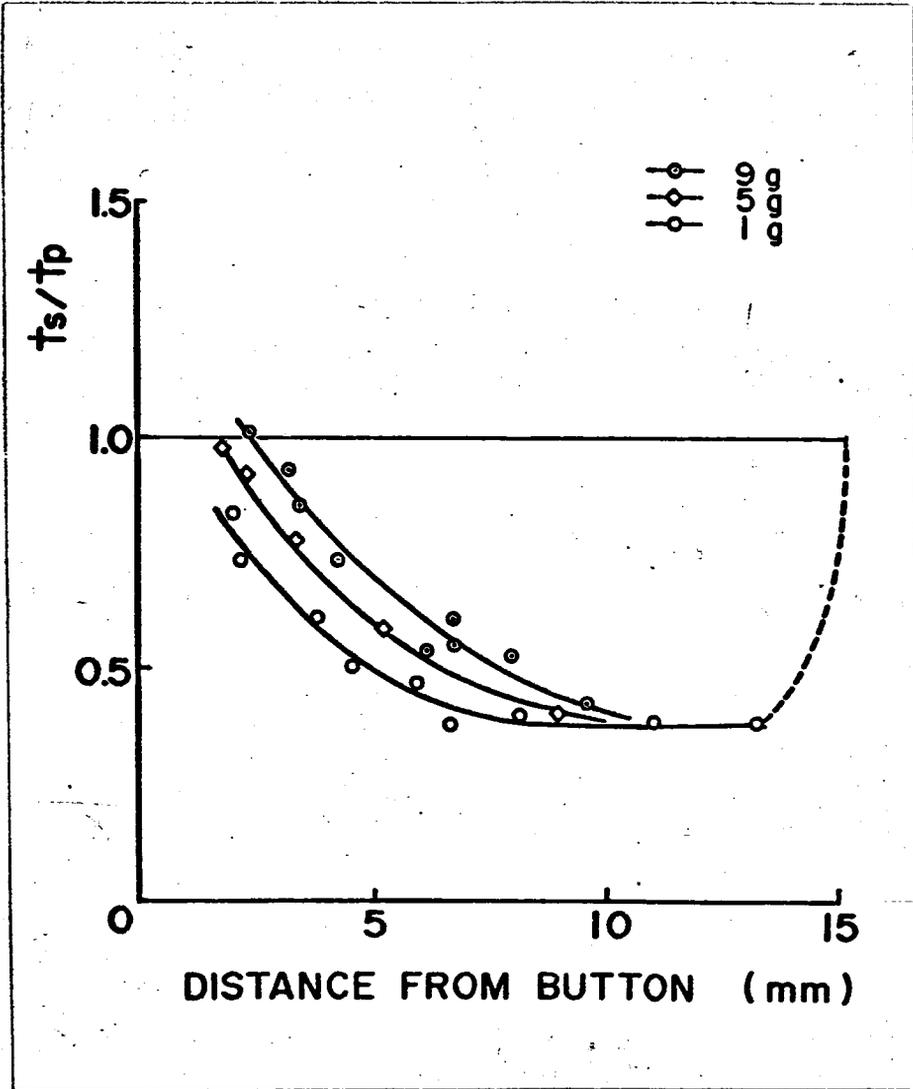


図14. 残り湯の量によるスフォールの
 未知値への影響

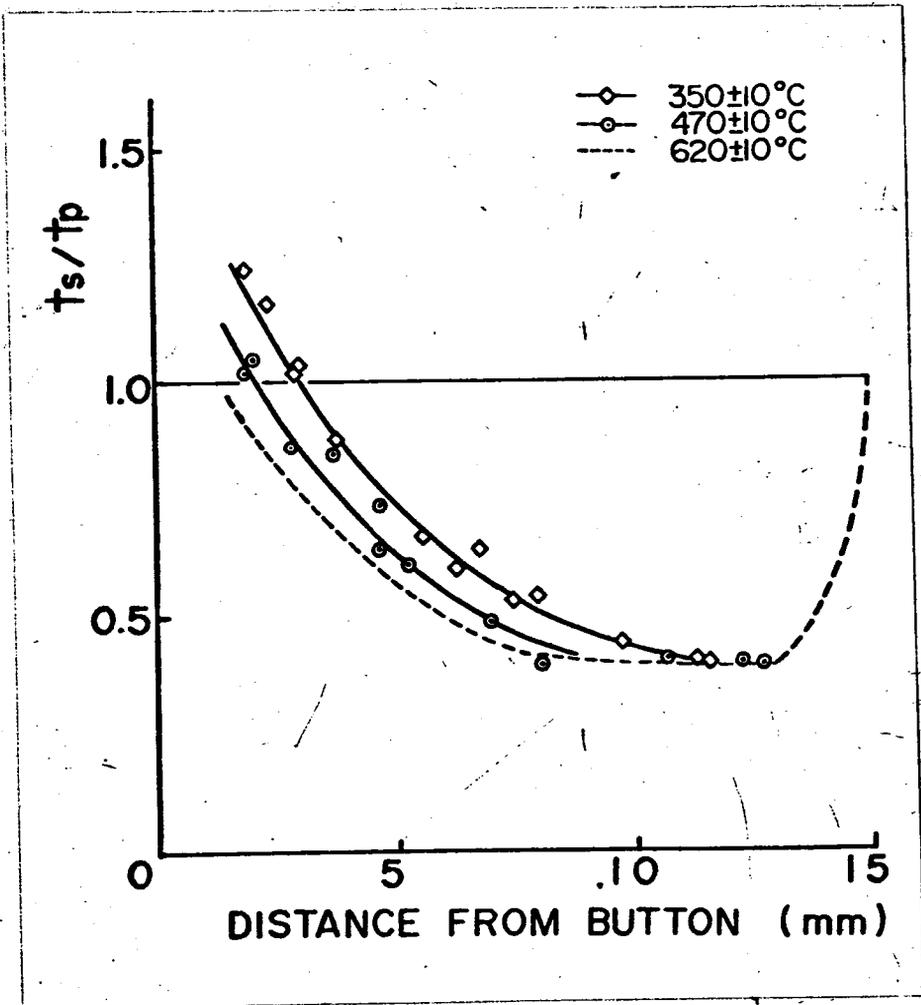
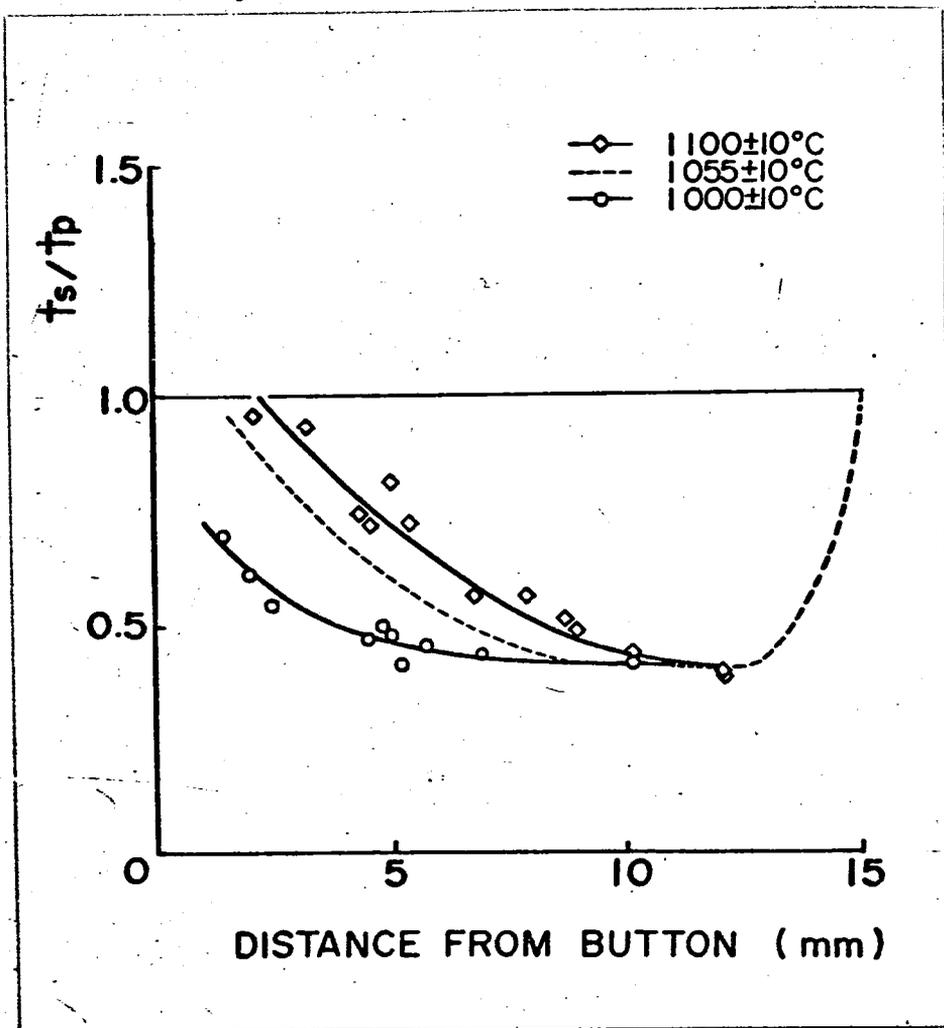


図15. 鋳型温度によるスプルーの t_s/t_p 値への影響



四16. 鑄込み温度によるスプルーの
 t_s/t_p 値への影響

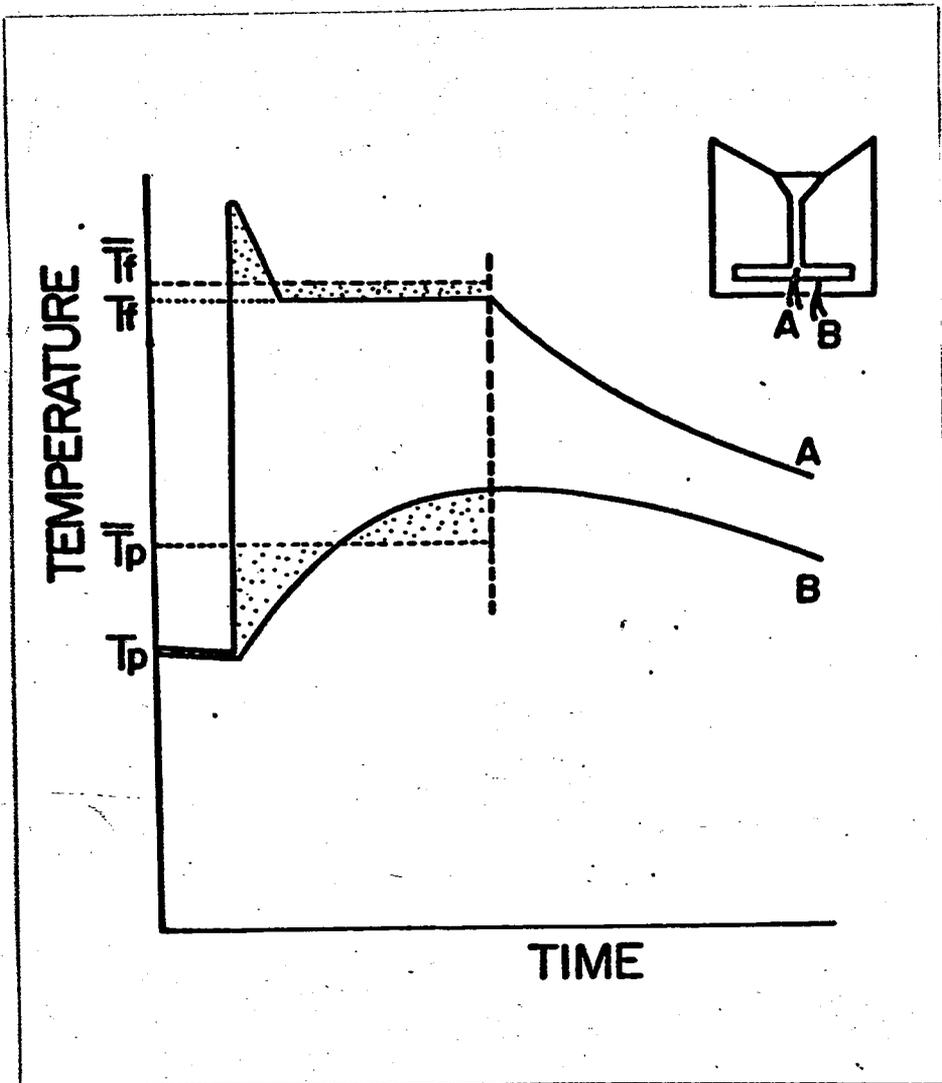


図17. 鑄造時の鑄造体及びパターンの壁
 埋没材の温度上昇
 (A: 鑄造体内部
 B: スプルー壁埋没材中)

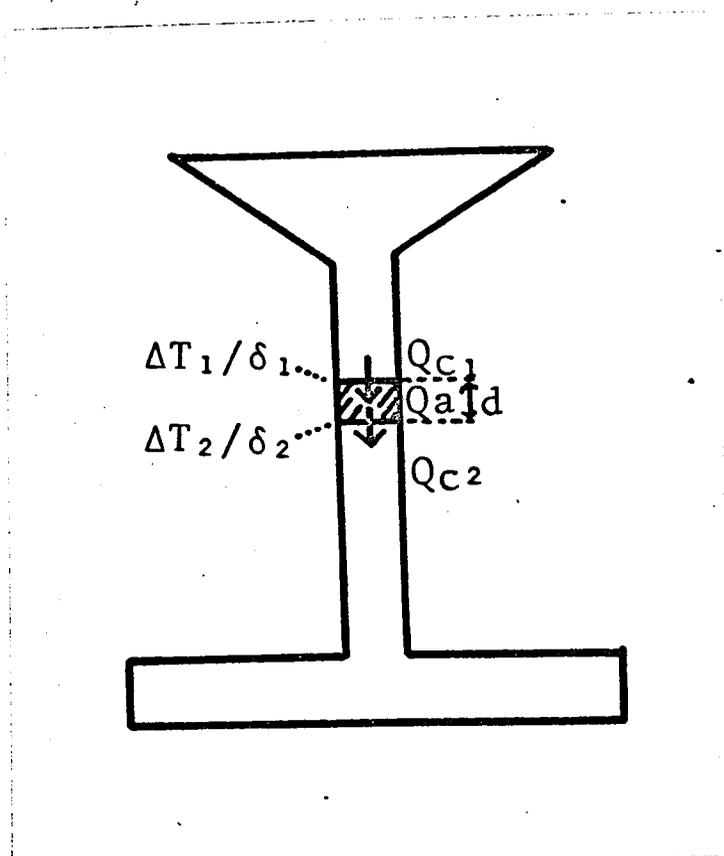


図18. スパイラル内の任意の部位における
移動熱量の説明図

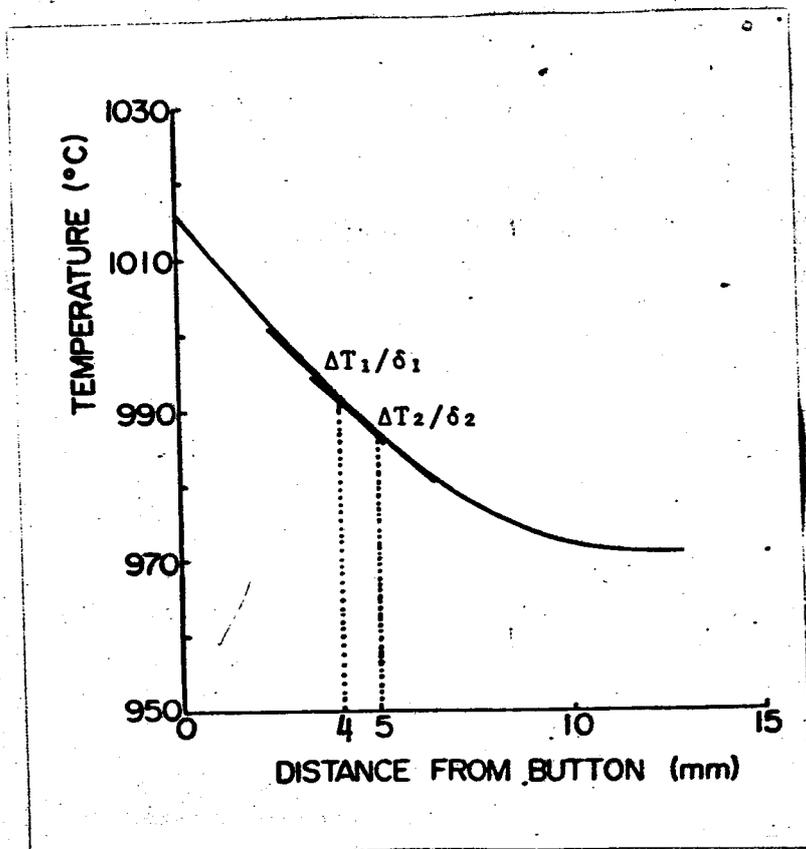


図19 スプルー内各部の、一定の凝固期間中の平均的存温度勾配

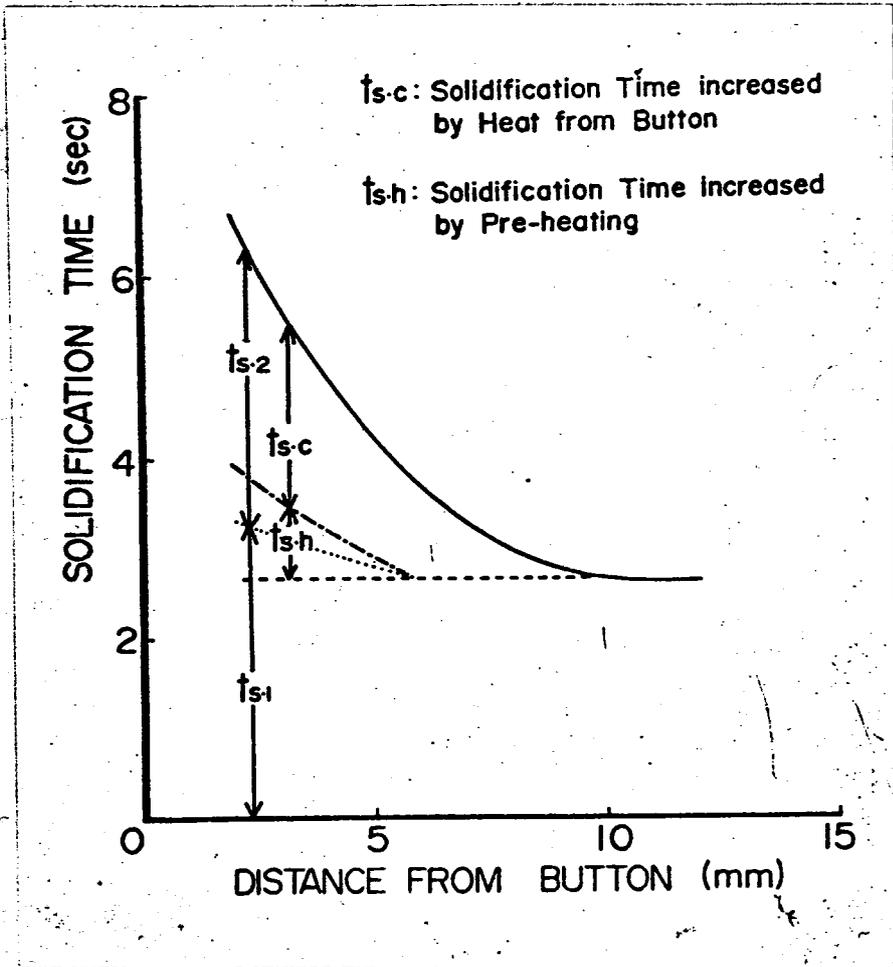


図20 スプールの凝固時間の分析

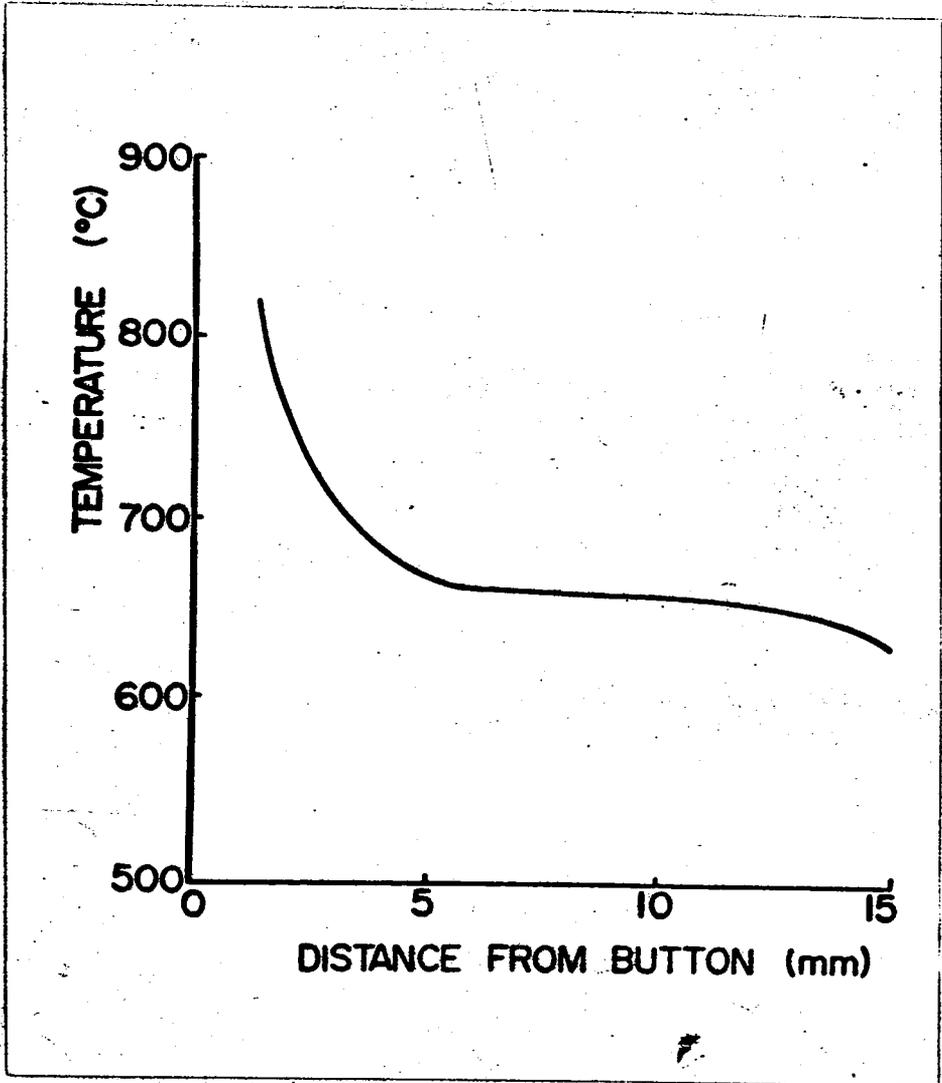


図21. スプルー壁埋没材の温度上昇
(金属溶融のためのブローパイプ)
による

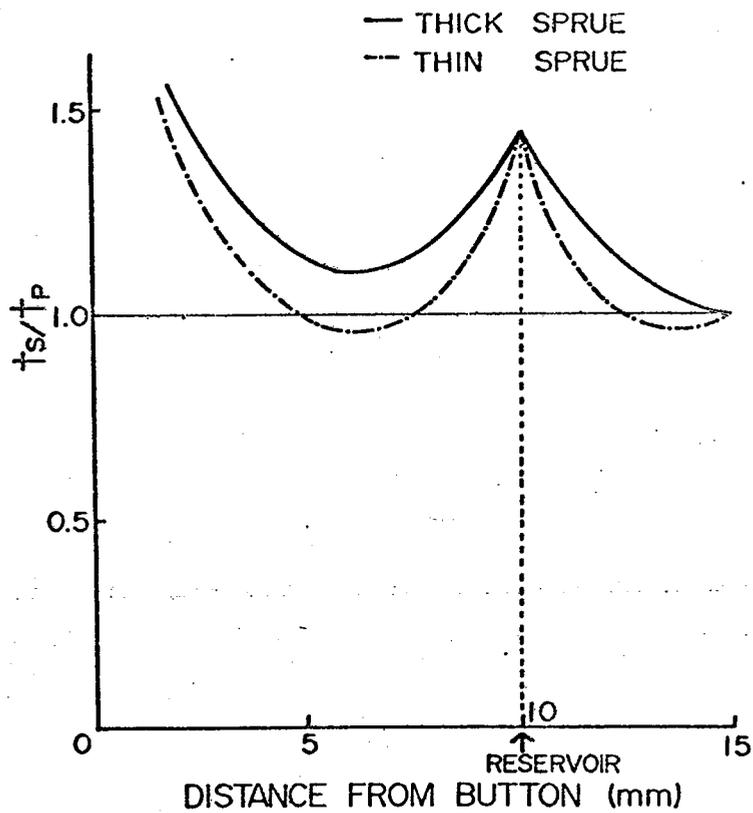


図22. 湯溜りをつけた場合の t_s/t_p 曲線

表1. 鑄造の標準条件

Variables	Conditions
Sprue Dimention	1.5 mm Diameter 15 mm Length
Casting Metal	pure Ag
Weight of Sprue Button	3.0g
Fusing Temperature	1055±10°C
Mold Temperature	620±10°C
Casting Method	Air Pressure Casting (1.0 Kg/cm ²)

表2. 残り湯の凝固時間

Fusing Temperature	Mold Temperature	Weight of Button		
		1.0g	3.0g	5.0g
1000±10°C	610±10°C		12.7±1.3sec	
1055±10°C	350±10°C		12.4±1.8	
	460±10°C		14.4±2.0	
	610±10°C	12.1±1.7	16.9±2.7	20.7±2.9
1100±10°C	610±10°C		17.0±1.5	

表3. パターンの凝固時間の分散分析

Factors	1	2	S	ϕ	V	F ₀	\bar{y}
A : Casting Temp.	1010°C	1060°C	0.81	1	0.81	35.88	29.5
B : Mold Temp.	570°C	620°C	1.62	1	1.62	72.08	59.2
A × B			0.22	1	0.22	9.69	~ 8.0
Error			0.09	4	0.023		3.3
Sum			2.74	7			100.0

表4. スプルーの凝固時間の
計算値と測定値

Distance from Button	Calculated Values	Measured Values
2-3 mm	6.6sec	6.0sec
4-5	4.6	4.4
8-9	3.1	2.8
10-13	2.7	2.6

表5. 各種鑄造因子と t_s/t_p

Diameter of Sprue ↑	r ↑ $(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ ↑	t_s/t_p ↑
Length of Sprue ↓	$(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ ↑ \bar{T}_s ↑	t_s/t_p ↑
Casting Alloy	λ	t_s/t_p
Weight of Button ↑	$(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ ↑	t_s/t_p ↑
Mold Temperature ↑	$(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ ↓	t_s/t_p ↓
Casting Temperature ↑	$(\Delta T_1/\delta_1 - \Delta T_2/\delta_2)$ ↑ \bar{T}_s ↑	t_s/t_p ↑