

中小鑄物工場における 鑄鉄材の品質管理

(昭和56年度京都府鑄物産地振興事業実績報告書)

昭和57年3月

京都府銑鉄鑄物工業組合
京都府銅合金鑄造工業協同組合

京大・川野氏所 557.6.14

5. 球状黒鉛鑄鉄の引け巣欠陥とその熱解析および対策

5.1 はじめに

球状黒鉛鑄鉄は1947年に Morrogh¹⁾らにより始めて発見され、1949年 Gagnebin²⁾らにより Mg 処理方法が開発され、その工業的発展の基礎が築かれた。その優れた工業的特性のため、需要は著しく増加しているが、その凝固形態が片状黒鉛鑄鉄、鑄鋼などの Skin Formation Type と異なり、Massy Type のため、鑄造方法（押湯給湯法）はまだ一般に理解されておらず、現場での経験に頼っているのが実状であろう。

そこで本実験では、球状黒鉛鑄鉄の凝固メカニズムを理解し、その給湯法を確立するために、さしあたり試料を標準化し、肉厚20mmの平板球状黒鉛鑄鉄鑄物における押湯給湯効果について実験し、引け巣（ザク巣）、はり気等の機構について考察した。また引け巣の発生原因究明のため、鑄物各部位における冷却曲線を採取し、熱解析を行った。あわせて、実際の熱解析は非常に繁雑であるので、マイコンによって凝固計算を行い、実測値と比較した。

5.2 実験方法

5.2.1 引け巣（ザク巣）、はり気に関する実験方法

著者らの今までの一連の実験結果^{3)~4)}によれば、生砂型の場合、鑄型のつき固めを弱くするとはり気は大きくなるがザク巣の大きさはほとんど変化しない。また逆に、鑄型を十分つき固め（生型硬度約90程度）、上下鑄枠をしっかりとクランプすることにより、はり気は減少したが、ザク巣の大きさは同様にほとんど変化しなかった。また CE 値が大きいとザク巣面積は小さくなるが、消滅には至らなかった。

生砂型は数パーセントの水分を含み、注湯後鑄型界面から少し離れた所で、水分凝縮層を生じて、鑄型強度が低下し、溶湯の静圧及び球状黒鉛晶出時の膨張圧に耐えることができず、鑄型壁の移動が生じ、引け巣、はり気を生じやすいと報告されている⁵⁾。一方、フラン鑄型⁶⁾は生砂型と比べ、高温での鑄型剛性があるかに大きいため、黒鉛晶出時の外部への膨張圧にある程度対抗できると考えられる。そこで本実験ではフラン鑄型についての押湯給湯効果について検討し、生砂型の場合と比較した。

(1) 鑄造方案

試験片の寸法及び鑄造方案を図 5.1 に示す。押湯給湯距離を調べるために、試験片

の肉厚を20mm一定とし、長さLを100, 120, 140, 160, 180 mmの5種類とした。押湯はL = 180 mmの試験片に対して十分余裕をもたせる容量とし、この大きさを全試験片の押湯として採用した。

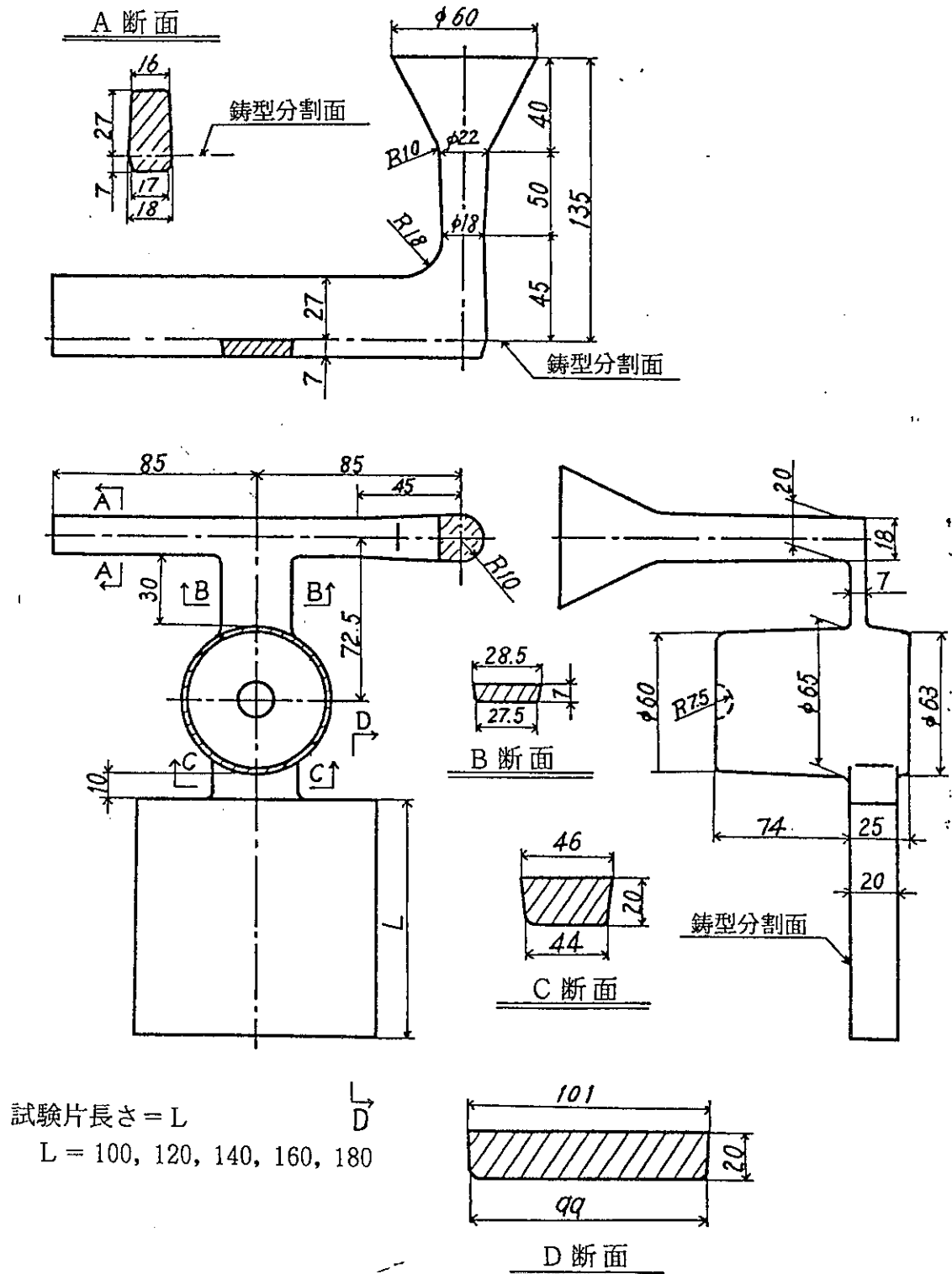


図 5.1 試験片寸法およびその方案

押湯及び押湯ネックの寸法は、Chvorinovらによって考案されたモジュラス法により計算した。その計算式は、 $M=V/S$ (M :モジュラス[cm], V :体積[cm^3], S :表面積[cm^2])で表わされ、 $M_r=K_r \cdot M_c$, $M_n=K_n \cdot M_c$ となる。(r, c, nの添字はそれぞれ、押湯、鋳物、押湯ネックについて表わし、kは係数である。)

本実験では $K_r=1.40$, $K_n=0.95$ とした。表5.1に試験片に対する M_r , M_n , M_c , K_r , K_n を示す。湯口径の寸法比すなわち湯口比は4:9:3とし、湯道はドロス等が除去されやすいよう縦に長い断面積を持つ形状とした。押湯は側面型盲押湯とし、押湯頂部に凝固皮殻ができないよう、小さなくぼみを設けた。

表 5.1 M_r , M_n , M_c , K_r , K_n の値: 肉厚20mm

試験片寸法 L (mm)	M_r	M_n	M_c	K_r	K_n
100	1.19	0.81	0.71	1.68	1.14
120			0.77	1.55	1.05
140			0.80	1.49	1.01
160			0.83	1.43	0.98
180			0.85	1.40	0.95

(2) 試料の溶製

溶解炉として実際の鋳物工場で作業している3.5 t低周波炉を用いた。原材料はソーレル鉄を10~20%、鋼屑を残り全部の割合で配合し、最高加熱温度を1,520℃とし、溶湯はあらかじめ予熱しておいた取鍋で、置き注ぎ法により球状化処理及び接種を行った。図5.2に低周波炉からの出湯状況を示す。1回の処理量は600kg、球状化剤はFe-Si-Mg 4.5%を使用し、溶湯

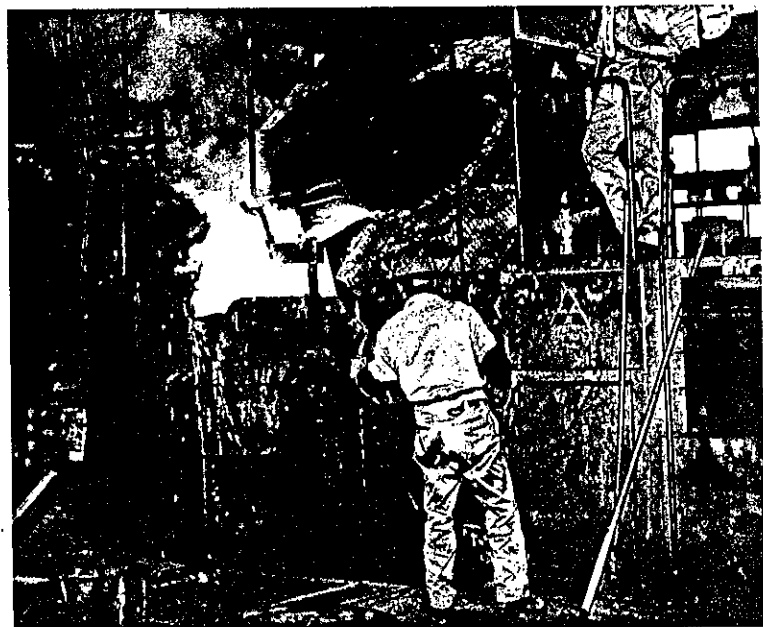


図 5.2 3.5 t 低周波炉からの出湯及び置き注ぎ法による球状化処理

量に対して1.6%の添加量である。接種剤は75%Fe-Siを使用し、接種量はSi量で0.3%である。目標化学組成はC:3.8%, Si:2.8%, Mn:0.2%, Mg:0.040~0.045%とした。

(3) 鑄型の作成及び注湯

フラン鑄型には主としてフラタリー砂を用いた。(フラタリー古砂約90%, 新フラタリー砂, 山川KF 5号約10%) に対してフランレジソ 0.8%, 硬化剤0.32%の配合割合である。図 5.3 に示す鉄板製鑄枠内で砂をつき固め, 一定の硬化後, 適宜ガス抜き穴を

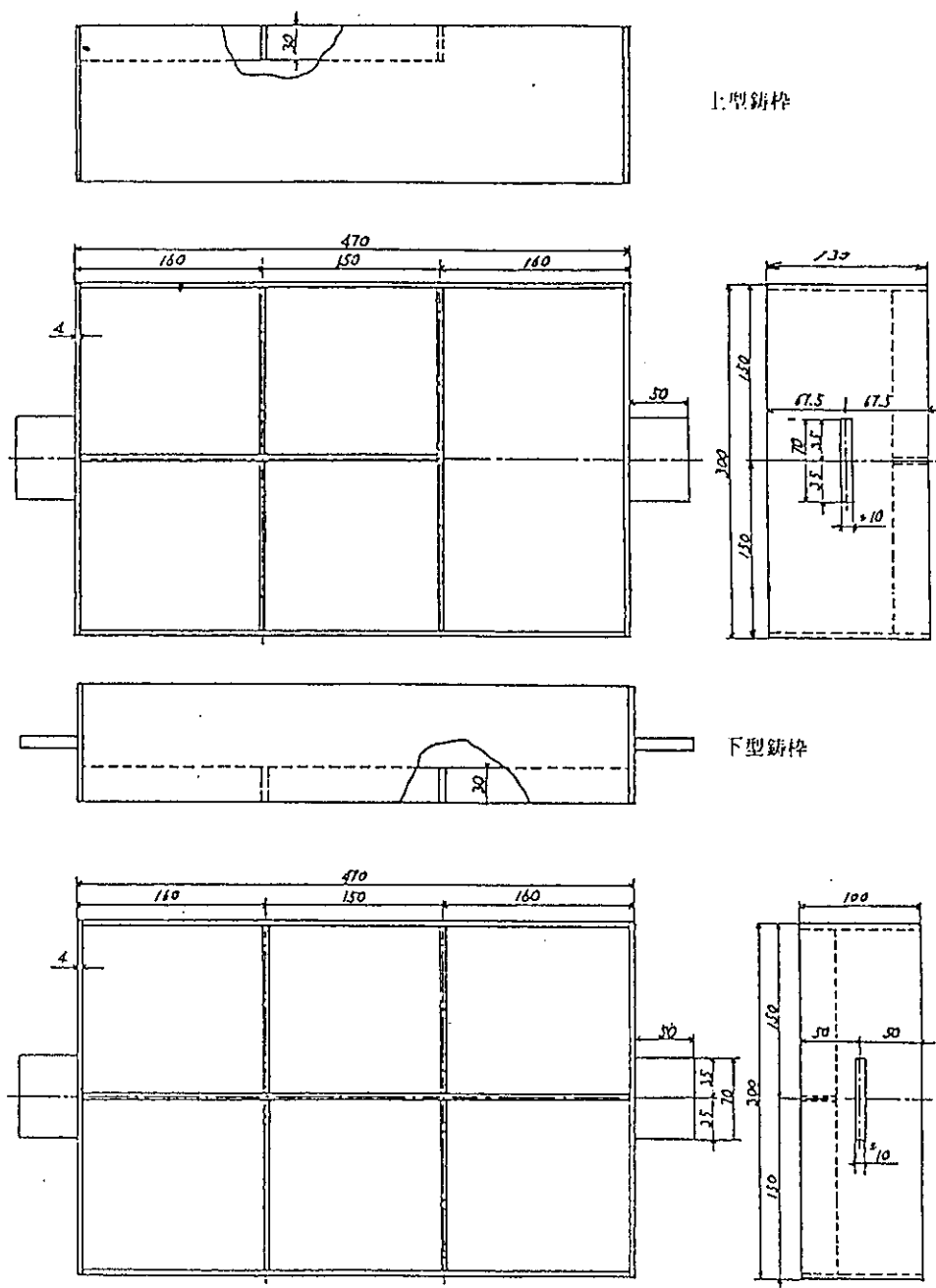
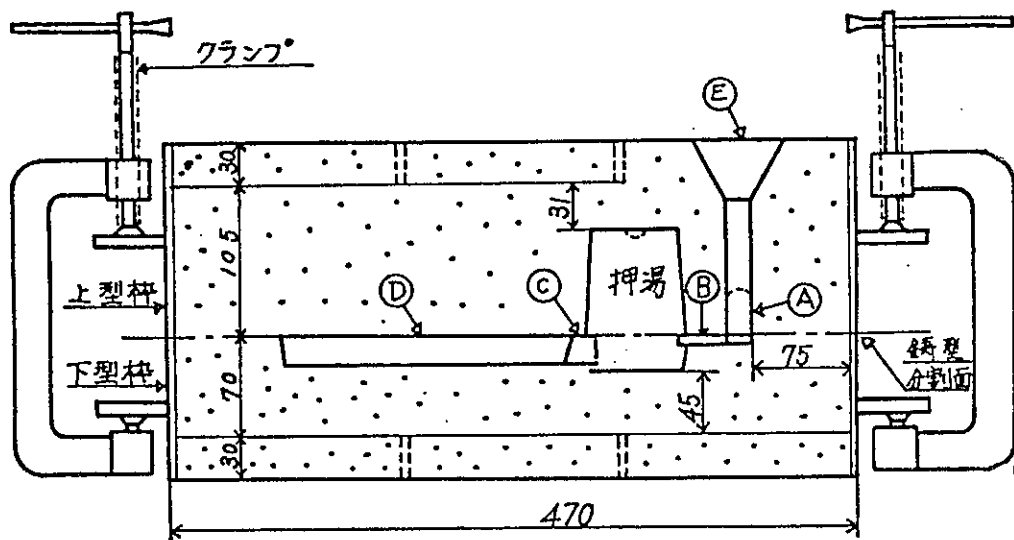


図 5.3 鑄枠形状及び寸法

設け、模型を抜型後、アルコール塗型（塗型剤：マグネシア系のもの）をほどこし、アルコール着火した。図 5.3 に鑄型断面図を示す。鑄型は図 5.4 のように鉄板製鑄枠をつけたまま、上下枠をクランプ締めした。球状化处理、接種の行われた溶湯をただちに予熱した手杓に移し、約 1,400°C で注湯した。一方、生砂型はすべてフラタリー新砂を用いボルクレー 7.2% とした（水分 2.6%）。なお、生型硬度 91~93 につき固め、上型に充分なガス抜き穴を設けた。



- ① 湯道
- ② 堰
- ③ 押湯ネック
- ④ 試験片
- ⑤ 湯口

図 5.4 鑄型断面図

(4) 試験片の測定

(a) 押湯収縮パイプの容積の測定：ビューレットの水を滴下により測定した。測定後、いくつかの押湯を縦に切断し、パイプの連続性を確認した。

(b) はり気の測定：試験片の表面に縦横 10 mm 間隔で格子状に線を引き、端面から 10 mm 以外の線の交点で試験片の厚さをダイヤルゲージで測定した。

(c) 引け巣の測定：工業用 X 線装置で X 線透過試験により巣の有無を判定した。X 線による引け巣の検出感度を上げるため、試験片上下面を約 1.5 mm ずつ切削した。

(d) 化学組成、顕微鏡観察：基地組織、黒鉛球状化率に直接関係のある C, Si, Mn, Mg について発光分光分析装置により化学組成を調べた。顕微鏡試料は試験片の中央

線上の押湯ネックから10mmの場所を採取した。

5.2 熱分析方法

(1) 冷却温度の測定

試験片の長さ100mm以上になるとザク巢の存在が認められるようになるので、試験片長さ100mmの試料で図5.5に示すような位置で白金、白金ロジウム熱電対によって温度測定した。熱電対の先端は応答性をよくするため、先端を露出させてある。

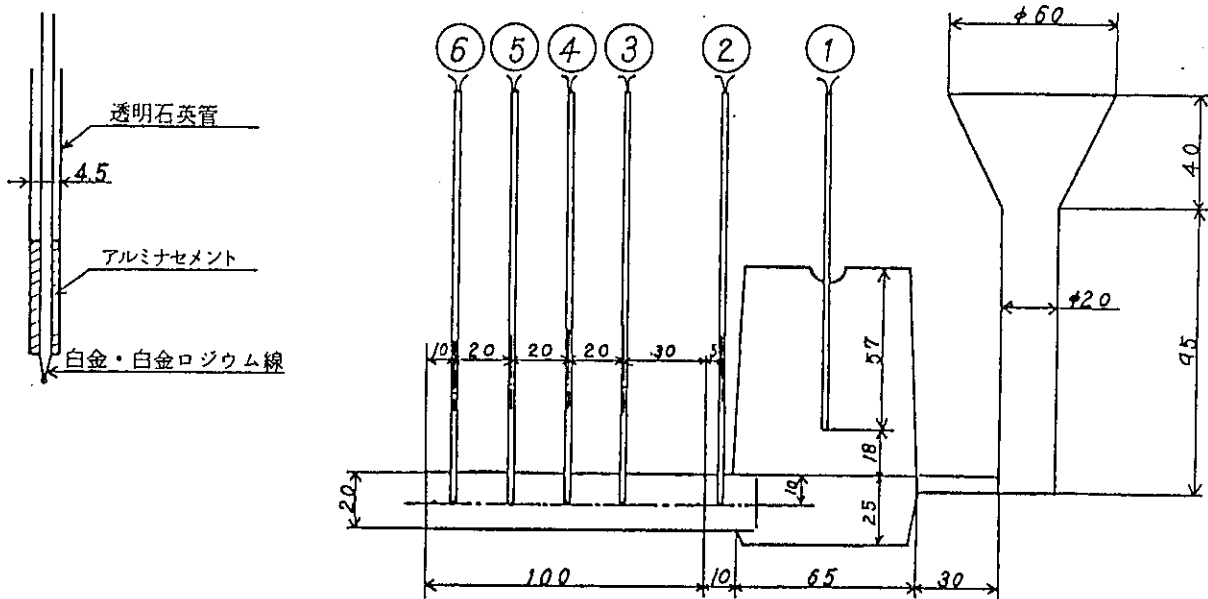


図5.5 鑄造方案及び試験場所

(2) 鑄型の作成

鑄型は生砂型（実験室作成鑄型と現場作成鑄型）2種類とフラン鑄型の3種類とした。実験室作成生砂型はフラタリー新けい砂にベントナイトとしてボルクレー7.2%、水分は2.65%と低水分で、鑄型硬度約91~93程度にエアーランマーでかたくつき固めたものである。

(3) 現場作成鑄型は現場での生砂型を鑄型硬度約80~85程度につき固めたものである。表5.2にそれぞれの鑄物砂の鑄物砂試験による $\phi 50 \times 50 \text{ mm}$ の試験結果を示す。

表5.2 $\phi 50 \times 50 \text{ mm}$ 、鑄物砂試験による鑄物砂特性

鑄物砂の種類	見かけ比重 (g/cm^3)	水分 (%)	通気度	抗圧力 (kg/cm^2)	硬度
実験室生砂	1.51	2.65	108	0.65	82
現場生砂	1.39	3.30	144	1.30	92
フラン砂	1.43	—	581	38.2	—

生砂については試験用サンドランマー3回つき固めによる。
フラン砂は手で押えた。

5.3 マイコンによる凝固時間の計算方法

マイコン（横河ヒューレットパッカード HP-85）を用い、鋳物の凝固時間を前後差分法によって数値解析した。これは鋳物、鋳型界面の境界条件を熱流束の形で表わし、鋳物内部だけについて差分計算するので、計算機の計算容量は非常に少なくすむ。以下計算方法について概略説明する。

(1) 凝固計算式

数値計算を行う上で、次のような仮定をおいた。

- (イ) 解析は、3次元の鋳物を考える。
- (ロ) 鋳型は、鋳込みと同時に溶湯に満たされる。
- (ハ) 溶湯の対流、湯流れは考えない。
- (ニ) 鋳型中の熱移動は、熱伝導だけによるものとする。
- (ホ) 熱物性値は、温度によらず一定とする。

計算に使用する記号を表5.3に、鋳物形状とその分割を図5.6に示す。そして分割した各要素の計算データを表5.4に、鋳物及び鋳型の熱物性値を表5.5に示す。

表5.3 計算に使用する記号及びその説明

記号	説明 (単位)
A_{ij}	要素 i と j の接触面積 (cm^2)
c, c'	鋳型と金属の比熱 ($cal/g^{\circ}C$)
G_{ij}	i に対する j の影響の係数 ($cal/^{\circ}C$)
i, j	要素番号
k, k'	鋳型と金属の熱伝導度 ($cal/cm\ sec^{\circ}C$)
K	熱流束の定数 ($cal/cm^2\ sec^{-2}$)
L	凝固潜熱 (cal/g)
q	熱流束の時間積分値 (cal/cm^2)
ΔQ_i	i から表面に出る熱 (cal)
ΔQ_{ij}	i から j へ出る熱 (cal)
S	鋳物鋳型の接触面積 (cm^2)
t	時間 (sec)
Δt	時間刻み (sec)
t_f	凝固時間 (sec)
V	体積 (cm^3)
X_{ij}	i と j の距離 (cm)
θ, θ'	$t, t + \Delta t$ における温度 ($^{\circ}C$)
θ_0, θ_0'	鋳型, 金属の初期温度 ($^{\circ}C$)
θ_b	鋳物鋳型境界温度 ($^{\circ}C$)
ρ, ρ'	鋳型, 金属の密度 ($cal/^{\circ}Cg$)

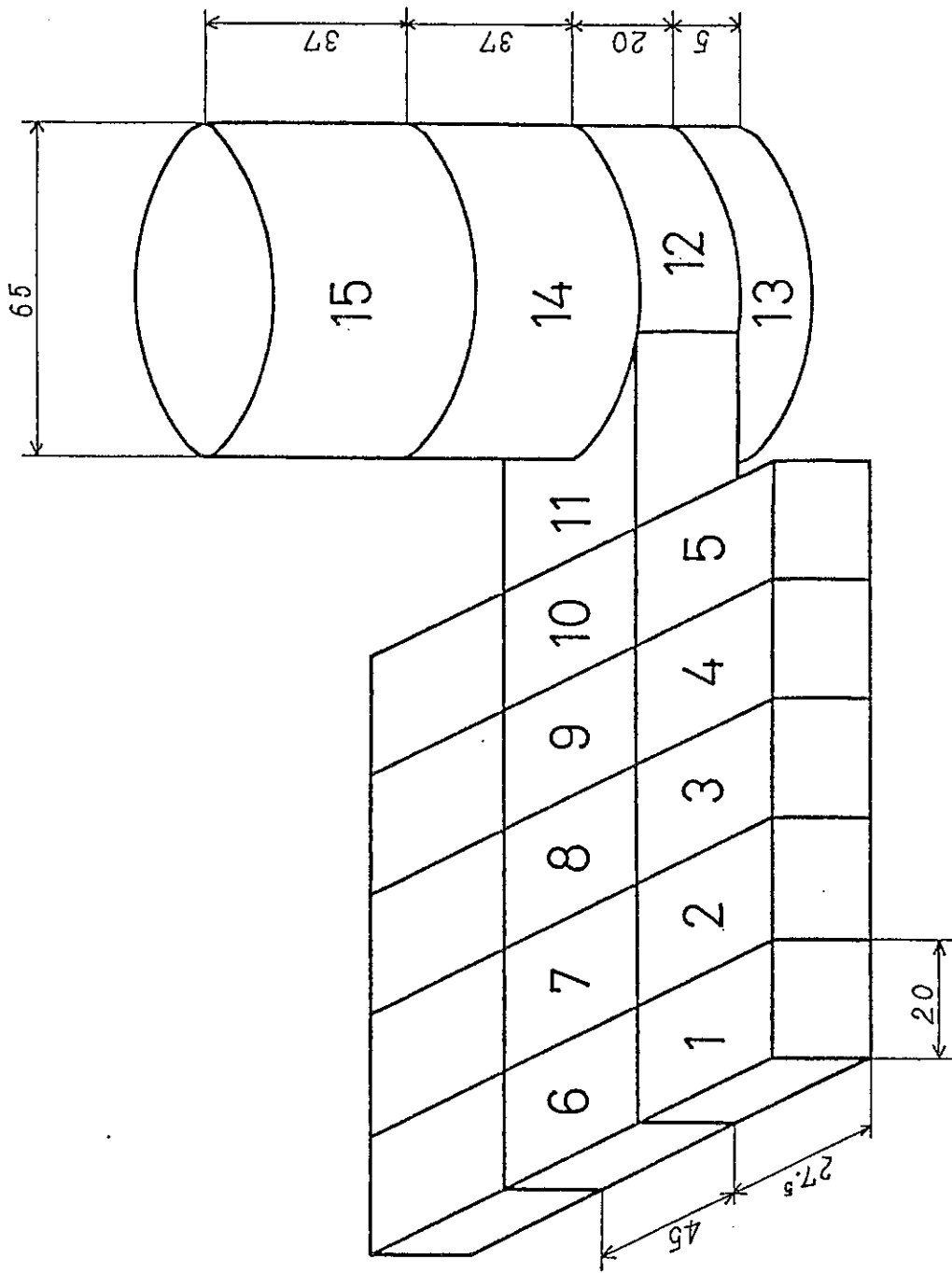


図5.6 要素分割と要素の結合関係

表5.4 各要素の計算データ

要素番号	体積 V (cm ³)	鑄型と接触面積 S (cm ²)	接触面積 A (cm ²)	距離 X (cm)
1	11.00	20.50	5.50	2.00
2	11.00	15.00	5.50	2.00
3	11.00	15.00	5.50	2.00
4	11.00	15.00	5.50	2.00
5	11.00	20.50	—	—
6	18.00	27.00	9.00	2.00
7	18.00	18.00	9.00	2.00
8	18.00	18.00	9.00	2.00
9	18.00	18.00	9.00	2.00
10	18.00	18.00	9.00	1.50
11	11.58	19.18	9.92	3.75
12	66.34	30.92	33.17	1.25
13	16.58	43.37	—	—
14	122.72	75.52	33.17	3.70
15	122.72	108.70	—	—
1-6	—	—	4.00	3.63
2-7	—	—	4.00	3.63
3-8	—	—	4.00	3.63
4-9	—	—	4.00	3.63
5-10	—	—	4.00	3.63
12-14	—	—	33.17	2.85

表5.5 使用した熱物性値

	熱伝導度 k (cal/cmsec °C)	比熱 c (cal/°C g)	密度 ρ (g/cm ³)	初期温度 θ ₀ (°C)
鑄物	0.08	0.25	7.1	1,300
砂型	0.002	0.20	1.5	30
凝固潜熱 L : 50 (cal/g) 凝固温度 θ _f : 1,145 (°C) (共晶凝固温度範囲 : 1,155 ~ 1,145 (°C))				
共晶凝固潜熱表示は、鑄物の見掛上の比熱の増大とみる。 $\text{見掛上の比熱} = \frac{\text{凝固潜熱}}{\text{共晶凝固温度}} + \text{真の比熱}$ $= 5.25 \text{ (cal/°C g)}$				

凝固時間計算式の導き方を以下説明する。

広い平面を介して鋳物に接している鋳型について厚さ半無限、鋳物鋳型境界温度 θ_b に一定、と仮定すると、時間 $t = 0$ から t までの鋳型の熱吸収量は、

$$q = K\sqrt{t}$$

$$\text{ただし、} K = (2/\sqrt{\pi})(\theta_b - \theta_o) \sqrt{k\rho c}$$

となる。

そこで鋳物をいくつかの要素に分割し、要素 i が鋳型に接する面積を S_i としたとき時間 t から $t + \Delta t$ の間に i から鋳型に吸収される熱量は、

$$\Delta Q_i = K S_i (\sqrt{t + \Delta t} - \sqrt{t}) \dots\dots\dots (1)$$

となる。これは、時間とともに変化する熱流束の形の境界条件である。

鋳物内部で要素 i と j が隣接し、その接触面積を A_{ij} 、要素内代表点間距離を X_{ij} とするときの i から j への熱移動量は、

$$\Delta Q_{ij} = G_{ij}(\theta_i - \theta_j) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここで } G_{ij} = A_{ij} k' \Delta t / X_{ij}$$

である。

要素 i が j 個の隣接要素をもち j の温度が t から $t + \Delta t$ に変わる間に θ_i から θ_i' に変化するときの熱収支は、

$$(\theta_i - \theta_i') V_i \rho' c' = \Delta Q_i + \sum \Delta Q_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式に(1)、(2)式を代入すると

$$\theta_i' = \theta_i - (1/V_i \rho' c') [K S_i (\sqrt{t + \Delta t} - \sqrt{t}) + \sum G_{ij} (\theta_i - \theta_j)] \dots\dots\dots (4)$$

となり前進差分式が得られる。凝固計算には、この(4)式を用いた。

なお、熱流束定数(K)について下記に示す。

K を求めるには、 θ_b (境界温度)が必要になる。

溶湯が鋳型面から平面凝固する場合を考え、鋳型に接する温度 θ_b 一定と仮定し、また平面鋳物の凝固層が X となり、温度分布が図5.7のとおりとする。

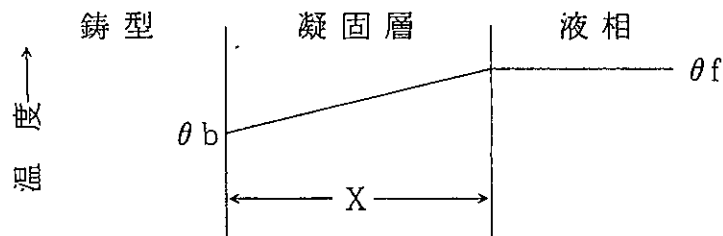


図 5.7

いわゆる Stefan の解により

$$X = \sqrt{\frac{2k(\theta_f - \theta_b)}{\rho' \{L + c'(\theta'_o - \theta_f)\}}} \times t$$

が得られる。

また、 $X = q \sqrt{t}$ により、

$$q = \sqrt{\frac{2k(\theta_f - \theta_b)}{\rho' \{L + c'(\theta'_o - \theta_f)\}}} \dots\dots\dots (5)$$

一方、 q は凝固定数とよばれ、次の式で定義される。

$$q = \frac{2bi(\theta_b - \theta_o)}{\sqrt{\pi} \rho' \{L + c'(\theta'_o - \theta_f)\}} \dots\dots\dots (6)$$

(ここで $bi = \sqrt{k\rho'c}$ で熱拡散度である。)

(5)式の q と(6)式の q を等置して整理すると、

$$\frac{2bi^2(\theta_b - \theta_o)^2}{\theta_f - \theta_b} = k\pi\rho' \{L + c'(\theta'_o - \theta_f)\}$$

が得られ、 $bi = \sqrt{0.002 \times 0.20 \times 1.5} = 0.0006$, $\theta_o = 30$, $\theta'_o = 1,300$, $\theta_f = 1,155$, $k = 0.002$, $\rho' = 7.1$, $L = 50$, $c' = 0.25$ を代入して、境界温度を求めると
 $\theta_b = 1,136$ (°C)

である。

この場合、熱流束定数は、 $K = (2/\sqrt{\pi})(\theta_b - \theta_o)\sqrt{k\rho'c}$

より

$$K = 30.577 \text{ (cal/cm}^2 \text{ sec}^{1/2}\text{)}$$

となる。

(2) コンピュータの利用

(イ) 使用したコンピュータの概要

鋳物が凝固するまでの数値計算を手計算で行うには膨大な時間を要し、また途中で一度間違えば以後の計算値は全て間違いとなるため、本計算にはコンピュータを適用した。用いたコンピュータの概要を表5.6に示す。

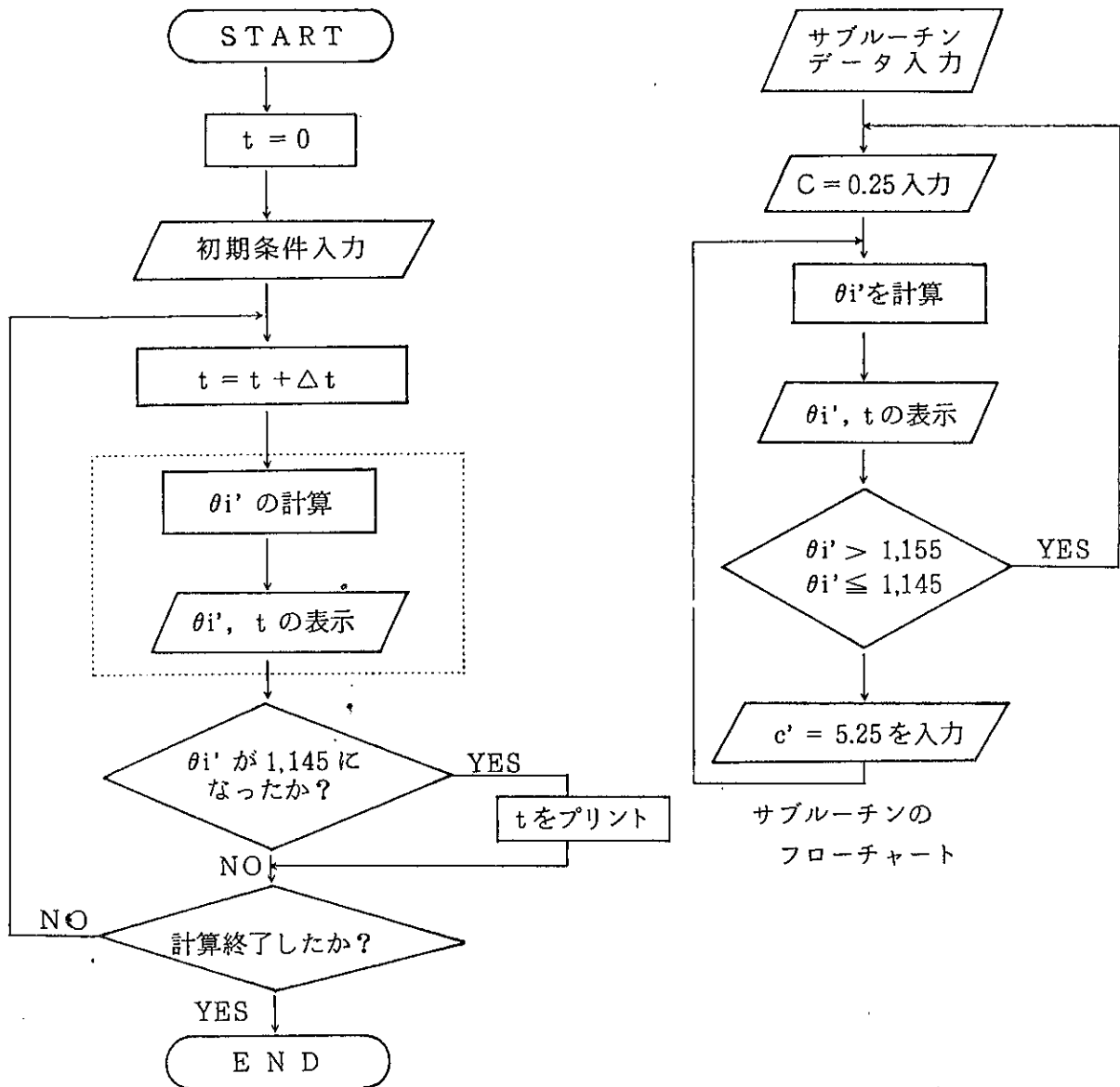
表 5.6 使用したマイクロコンピュータの概要

メモリ	32KB, 8 bit
プログラム言語	BASIC
CRTディスプレイ, サーマルプリンター付	
機種名	横河ヒューレットパッカー HP-85

(ロ) プロミング

プログラムの作成にあたって、入力データの簡素化、出力結果のわかりやすさ、計算時間の短縮などに留意した。

構成は、メインプログラムと1個のサブプログラムから成る。出力結果は、指定ステップごとの各分割の凝固時間とした。図5.8に計算方法の概略のフローチャートを示す。これを具体化したプログラムリストを図5.9(a)~(c)に示す。



メインプログラムのフローチャート

図 5.8 凝固計算のフローチャート

図 5.9 (a) 凝固計算のプログラムリスト

```

10 REM *F.TIME(100)*
20 OPTION BASE 1
30 DIM A(15)
40 T=0
50 DISP T;"sec"
60 DISP "PLACE.....deg....."
70 FOR I=1 TO 15
80 READ A(I)
90 DATA 1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300,1300
100 NEXT I
110 FOR I=1 TO 15
120 DISP "(";I;")";A(I)
130 NEXT I
140 PRINT "PLACE.....deg....."
    ..sec"
150 DISP "S" sec (S:TIME STEP)";
160 INPUT S
170 T=T+S
180 DISP T;"sec"
190 DISP "PLACE.....deg....."
200 GOSUB 1000
210 FOR I=1 TO 15
220 DISP "(";I;")";A(I)
230 NEXT I
240 FOR I=1 TO 15
250 IF A(I)>=1145 AND A(I)<1145.
    07 THEN PRINT "(";I;")";A(I)
    );T
260 NEXT I
270 FOR I=1 TO 15
280 IF A(I)>=1145 THEN GOTO 170
290 NEXT I
300 END
1000 REM *SUBPROGRAM*
1010 COM V(15),B(15),X(15,15),Y(
    15,15),G(15,15)
1020 REM *E:BOUNDARY TEMP.(deg)*
1030 REM *F:FIRST MOULD TEMP.*
1040 REM *K(1):MOULD THERMAL CON
    DUCTIVITY(cal/cm deg sec)
1050 REM *K(2):METAL T.C.*
1060 REM *C(1):MOULD SPECIFIC HE
    AT(cal/g deg)*
1070 REM *C(2):METAL S.H.*
1080 REM *R(1):MOULD DENSITY(g/c
    m^3)*
1090 REM *R(2):METAL D.*
1100 E=1135
1110 F=30
1120 K(1)=.002
1130 C(1)=.2
1140 R(1)=1.5
1150 Z=2/SQR(PI)*K(1)*SQR(K(1)*
    C(1)*R(1))
1160 K(2)=.08
1170 R(2)=7.1
1180 FOR I=1 TO 15
1193 ON I GOTO 1200,1330,1490,16
    50,1780,1910,2040,2200,2360
    ,2520,2680,2810,2970,3070,3
    200
1194 NEXT I
1200 REM *A(1)*
1201 IF A(1)>1155 OR A(1)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1210 V(1)=11
1220 B(1)=20.5
1230 X(1,2)=2
1240 X(1,6)=3.63
1250 Y(1,2)=5.5
1260 Y(1,6)=4
1270 G(1,2)=Y(1,2)*K(2)*S/X(1,2)
1280 G(1,6)=Y(1,6)*K(2)*S/X(1,6)
1300 L=1/V(1)/R(2)/C(2)
1310 M=Z*B(1)*(SQR(T+S)-SQR(T))
1320 N=G(1,2)*(A(1)-A(2))+G(1,6)
    *(A(1)-A(6))
1330 A(1)=A(1)-L*(M+N)
1330 REM *A(2)*
1339 IF A(2)>1155 OR A(2)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1340 V(2)=11
1350 B(2)=15
1360 X(2,1)=2
1370 X(2,3)=2
1380 X(2,7)=3.63
1390 Y(2,1)=5.5
1400 Y(2,3)=5.5
1410 Y(2,7)=4
1420 G(2,1)=Y(2,1)*K(2)*S/X(2,1)
1430 G(2,3)=Y(2,3)*K(2)*S/X(2,3)
1440 G(2,7)=Y(2,7)*K(2)*S/X(2,7)
1450 L=1/V(2)/R(2)/C(2)
1460 M=Z*B(2)*(SQR(T+S)-SQR(T))
1470 N=G(2,1)*(A(2)-A(1))+G(2,3)
    *(A(2)-A(3))+G(2,7)*(A(2)-A
    (7))
1480 A(2)=A(2)-L*(M+N)
1490 REM *A(3)*
1491 IF A(3)>1155 OR A(3)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1500 V(3)=11
1510 B(3)=15
1520 X(3,2)=2
1530 X(3,4)=2
1540 X(3,8)=3.63
1550 Y(3,2)=5.5
1560 Y(3,4)=5.5
1570 Y(3,8)=4
1580 G(3,2)=Y(3,2)*K(2)*S/X(3,2)
1590 G(3,4)=Y(3,4)*K(2)*S/X(3,4)
1600 G(3,8)=Y(3,8)*K(2)*S/X(3,8)
1610 L=1/V(3)/R(2)/C(2)
1620 M=Z*B(3)*(SQR(T+S)-SQR(T))
1630 N=G(3,2)*(A(3)-A(2))+G(3,4)
    *(A(3)-A(4))+G(3,8)*(A(3)-A
    (8))
1640 A(3)=A(3)-L*(M+N)

```

図 5.9(b) 凝固計算のプログラムリスト

```

1650 REM #A(4)*
1651 IF A(4)>1155 OR A(4)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1660 V(4)=11
1670 B(4)=15
1680 X(4,3)=2
1690 X(4,5)=2
1700 X(4,9)=3.63
1710 Y(4,3)=5.5
1720 Y(4,5)=5.5
1730 Y(4,9)=3.63
1731 G(4,3)=Y(4,3)*K(2)*S/X(4,3)
1734 G(4,5)=Y(4,5)*K(2)*S/X(4,5)
1736 G(4,9)=Y(4,9)*K(2)*S/X(4,9)
1740 L=1/V(4)/R(2)/C(2)
1750 M=2*B(4)*(SQR(T+S)-SQR(T))
1760 N=G(4,3)*(A(4)-A(3))+G(4,5)
    *(A(4)-A(5))+G(4,9)*(A(4)-A
    (9))
1770 A(4)=A(4)-L*(M+N)
1780 REM #A(5)*
1781 IF A(5)>1155 OR A(5)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1790 V(5)=11
1800 B(5)=20.5
1802 FOR I=1 TO 15
1810 X(5,4)=2
1820 X(5,10)=3.63
1830 Y(5,4)=5.5
1840 Y(5,10)=4
1850 G(5,4)=Y(5,4)*K(2)*S/X(5,4)
1860 G(5,10)=Y(5,10)*K(2)*S/X(5,
    10)
1870 L=1/V(5)/R(2)/C(2)
1880 M=2*B(5)*(SQR(T+S)-SQR(T))
1890 N=G(5,4)*(A(5)-A(4))+G(5,10)
    *(A(5)-A(10))
1900 A(5)=A(5)-L*(M+N)
1910 REM #A(6)*
1911 IF A(6)>1155 OR A(6)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
1920 V(6)=13
1930 B(6)=27
1940 X(6,1)=3.63
1950 X(6,7)=2
1960 Y(6,1)=4
1970 Y(6,7)=9
1980 G(6,1)=Y(6,1)*K(2)*S/X(6,1)
1990 G(6,7)=Y(6,7)*K(2)*S/X(6,7)
2000 L=1/V(6)/R(2)/C(2)
2010 M=2*B(6)*(SQR(T+S)-SQR(T))
2020 N=2*G(6,1)*(A(6)-A(1))+G(6,
    7)*(A(6)-A(7))
2030 A(6)=A(6)-L*(M+N)
2040 REM #A(7)*
2041 IF A(7)>1155 OR A(7)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
2050 V(7)=13
2060 B(7)=13
2070 X(7,2)=3.63
2080 X(7,6)=2
2090 X(7,8)=2
2100 Y(7,2)=4
2110 Y(7,6)=9
2120 Y(7,8)=9
2130 G(7,2)=Y(7,2)*K(2)*S/X(7,2)
2140 G(7,6)=Y(7,6)*K(2)*S/X(7,6)
2150 G(7,8)=Y(7,8)*K(2)*S/X(7,8)
2160 L=1/V(7)/R(2)/C(2)
2170 M=2*B(7)*(SQR(T+S)-SQR(T))
2180 N=2*G(7,2)*(A(7)-A(2))+G(7,
    6)*(A(7)-A(6))+G(7,8)*(A(7)
    -A(8))
2190 A(7)=A(7)-L*(M+N)
2200 REM #A(8)*
2201 IF A(8)>1155 OR A(8)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
2210 V(8)=13
2220 B(8)=13
2230 X(8,3)=3.63
2240 X(8,7)=2
2250 X(8,9)=2
2260 Y(8,3)=4
2270 Y(8,7)=9
2280 Y(8,9)=9
2290 G(8,3)=Y(8,3)*K(2)*S/X(8,3)
2300 G(8,7)=Y(8,7)*K(2)*S/X(8,7)
2310 G(8,9)=Y(8,9)*K(2)*S/X(8,9)
2320 L=1/V(8)/R(2)/C(2)
2330 M=2*B(8)*(SQR(T+S)-SQR(T))
2340 N=2*G(8,3)*(A(8)-A(3))+G(8,
    7)*(A(8)-A(7))+G(8,9)*(A(8)
    -A(9))
2350 A(8)=A(8)-L*(M+N)
2360 REM #A(9)*
2361 IF A(9)>1155 OR A(9)<=1145
    THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5.2
    5
2370 V(9)=13
2380 B(9)=13
2390 X(9,4)=3.63
2400 X(9,8)=2
2410 X(9,10)=2
2420 Y(9,4)=4
2430 Y(9,8)=9
2440 Y(9,10)=9
2450 G(9,4)=Y(9,4)*K(2)*S/X(9,4)
2460 G(9,8)=Y(9,8)*K(2)*S/X(9,8)
2470 G(9,10)=Y(9,10)*K(2)*S/X(9,
    10)
2480 L=1/V(9)/R(2)/C(2)
2490 M=2*B(9)*(SQR(T+S)-SQR(T))
2500 N=2*G(9,4)*(A(9)-A(4))+G(9,
    8)*(A(9)-A(8))+G(9,10)*(A(9)
    -A(10))
2510 A(9)=A(9)-L*(M+N)

```

図 5.9 (c) 凝固計算のプログラムリスト

```

2520 REM #A(10)*
2521 IF A(10)>1155 OR A(10)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
2530 V(10)=18
2540 B(10)=18
2550 X(10,5)=3.63
2560 X(10,9)=2
2570 X(10,11)=1.5
2580 Y(10,5)=4
2590 Y(10,9)=9
2600 Y(10,11)=9
2610 G(10,5)=Y(10,5)*K(2)*S/X(10,5)
2620 G(10,9)=Y(10,9)*K(2)*S/X(10,9)
2630 G(10,11)=Y(10,11)*K(2)*S/X(10,11)
2640 L=1/V(10)/R(2)/C(2)
2650 M=Z*B(10)*(SQRT(S)-SQRT(T))
2660 N=G(10,5)*(A(10)-A(5))+G(10,9)*(A(10)-A(9))+G(10,11)*(A(10)-A(11))
2670 A(10)=A(10)-L*(M+N)
2680 REM #A(11)*
2681 IF A(11)>1155 OR A(11)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
2690 V(11)=11.58
2700 B(11)=19.18
2710 X(11,10)=1.5
2720 X(11,12)=3.75
2730 Y(11,10)=9
2740 Y(11,12)=9.92
2750 G(11,10)=Y(11,10)*K(2)*S/X(11,10)
2760 G(11,12)=Y(11,12)*K(2)*S/X(11,12)
2770 L=1/V(11)/R(2)/C(2)
2780 M=Z*B(11)*(SQRT(S)-SQRT(T))
2790 N=G(11,10)*(A(11)-A(10))+G(11,12)*(A(11)-A(12))
2800 A(11)=A(11)-L*(M+N)
2810 REM #A(12)*
2811 IF A(12)>1155 OR A(12)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
2820 V(12)=66.34
2830 B(12)=30.92
2840 X(12,11)=3.75
2850 X(12,13)=1.25
2860 X(12,14)=2.85
2870 Y(12,11)=9.92
2880 Y(12,13)=33.17
2890 Y(12,14)=33.17
2900 G(12,11)=Y(12,11)*K(2)*S/X(12,11)
2910 G(12,13)=Y(12,13)*K(2)*S/X(12,13)
2920 G(12,14)=Y(12,14)*K(2)*S/X(12,14)
2930 L=1/V(12)/R(2)/C(2)
2940 M=Z*B(12)*(SQRT(S)-SQRT(T))
2950 N=G(12,11)*(A(12)-A(11))+G(12,13)*(A(12)-A(13))+G(12,14)*(A(12)-A(14))
2960 A(12)=A(12)-L*(M+N)
2970 REM #A(13)*
2971 IF A(13)>1155 OR A(13)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
2980 V(13)=16.58
2990 B(13)=43.37
3000 X(13,12)=1.25
3010 Y(13,12)=33.17
3020 G(13,12)=Y(13,12)*K(2)*S/X(13,12)
3030 L=1/V(13)/R(2)/C(2)
3040 M=Z*B(13)*(SQRT(S)-SQRT(T))
3050 N=G(13,12)*(A(13)-A(12))
3060 A(13)=A(13)-L*(M+N)
3070 REM #A(14)*
3071 IF A(14)>1155 OR A(14)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
3080 V(14)=122.72
3090 B(14)=75.52
3100 X(14,12)=2.85
3110 X(14,15)=3.7
3120 Y(14,12)=33.17
3130 Y(14,15)=33.17
3140 G(14,12)=Y(14,12)*K(2)*S/X(14,12)
3150 G(14,15)=Y(14,15)*K(2)*S/X(14,15)
3160 L=1/V(14)/R(2)/C(2)
3170 M=Z*B(14)*(SQRT(S)-SQRT(T))
3180 N=G(14,12)*(A(14)-A(12))+G(14,15)*(A(14)-A(15))
3190 A(14)=A(14)-L*(M+N)
3200 REM #A(15)*
3210 V(15)=122.72
3211 IF A(15)>1155 OR A(15)<=114
5 THEN C(2)=.25 ELSE C(2)=5
.25
3220 B(15)=108.7
3230 X(15,14)=3.7
3240 Y(15,14)=33.17
3250 G(15,14)=Y(15,14)*K(2)*S/X(15,14)
3260 L=1/V(15)/R(2)/C(2)
3270 M=Z*B(15)*(SQRT(S)-SQRT(T))
3280 N=G(15,14)*(A(15)-A(14))
3290 A(15)=A(15)-L*(M+N)
3300 RETURN

```


5.3 実験結果及び考察

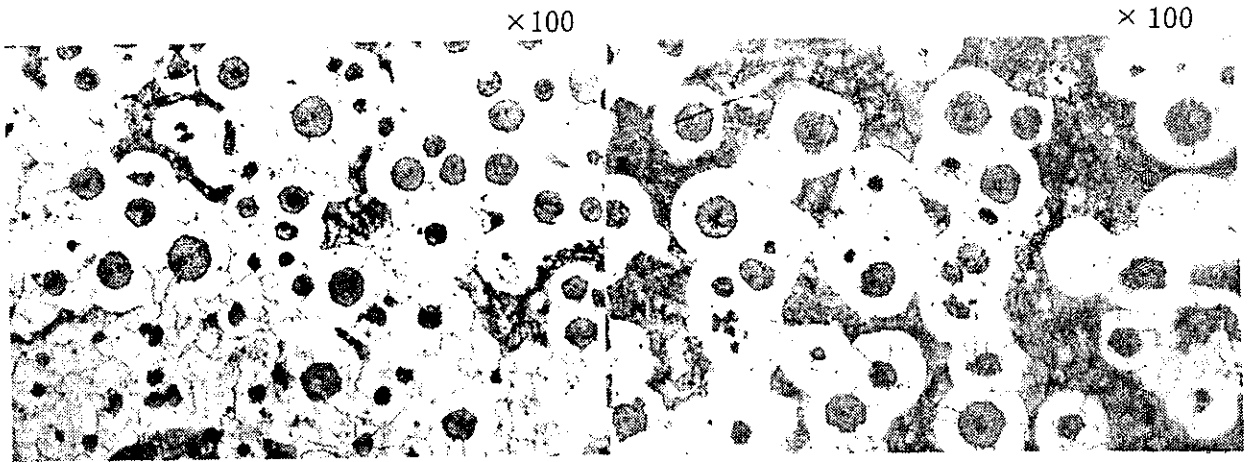
5.3.1 引け巣、はり気に関する実験結果

表 5.7 に実験結果を一覧表にして示した。生砂型の場合のデータは前述の文献より^{3)~4)}、本実験条件と合致したものを記載し、比較したものである。金属組織の一例を図 5.10 に示す。図 5.11 に試験片長さとザク巣の大きさの関係を示したが、フラン鑄型、生砂型いずれも試験片長さが、100 mm 以上でザク巣が存在するようになり、試験片が長くなるほどザク巣面積は大きくなり、その程度は両鑄型で大きな差はない。図 5.12 に試験片長さとはり気の程度を示す試験片の最大厚みを示すが、試験片が長くなると（140 mm 以上）、はり気が小さくなる傾向を示した。（なお、鑄枠にクランプを施さないで生砂型の場合 2 mm 内外のはり気を生じる。本実験はすべてクランプを施した。）

表 5.7 鑄造欠陥に関する実験結果の一覧表

試験片長さ L (mm)	鑄型の種類	試料番号	化学成分 (%)				盲押湯の パイプ面積 (cc)	X線試験 による引 け巣面積 (mm ²)	試験片の 最大厚み (mm)
			C	Si	Mg	CE			
100	生砂型	27-1	3.59	2.86	0.040	4.5	10.5	0*	0.6
		29-1	3.72	2.52	0.040	4.6	6.5	0*	0.4
	フラン鑄型	31-5	3.62	2.82	0.043	4.6	0	0*	0.5
		32-1	3.71	2.86	0.041	4.7	0	11	0.5
120	生砂型	26-1	3.57	2.80	0.044	4.5	12.0	111	0.4
		30-1	3.69	2.67	0.045	4.6	7.7	58	0.4
	フラン鑄型	31-4	3.62	2.82	0.043	4.6	0	40	0.5
		32-2	3.71	2.86	0.041	4.7	0	59	0.7
140	生砂型	30-2	3.69	2.67	0.045	4.6	9.9	36	0.5
	フラン鑄型	31-3	3.62	2.82	0.043	4.6	0	58	0
		32-3	3.71	2.86	0.041	4.7	0	66	0.4
160	生砂型	27-2	3.59	2.86	0.041	4.5	13.6	191	0.5
		29-2	3.72	2.52	0.040	4.6	7.3	153	0.5
	フラン鑄型	31-2	3.62	2.82	0.043	4.7	0	158	0.5
		32-4	3.71	2.86	0.041	4.7	0	19	0.3
180	生砂型	26-2	3.57	2.80	0.044	4.5	14.6	161	0.7
		28-2	3.76	2.81	0.039	4.7	10.1	96	0.4
	フラン鑄型	31-1	3.62	2.82	0.043	4.6	0	195	0
		32-5	3.71	2.86	0.041	4.7	0	177	0.3

* X線試験ではザク巣が確認されなかったが、切断、研磨により、微細なザク巣の存在が認められた。



試料番号：31-5, C: 3.62, Si: 2.82, CE: 4.6

(断面中央部)

(断面, 端より5mm)

図5.10 組織写真の一例

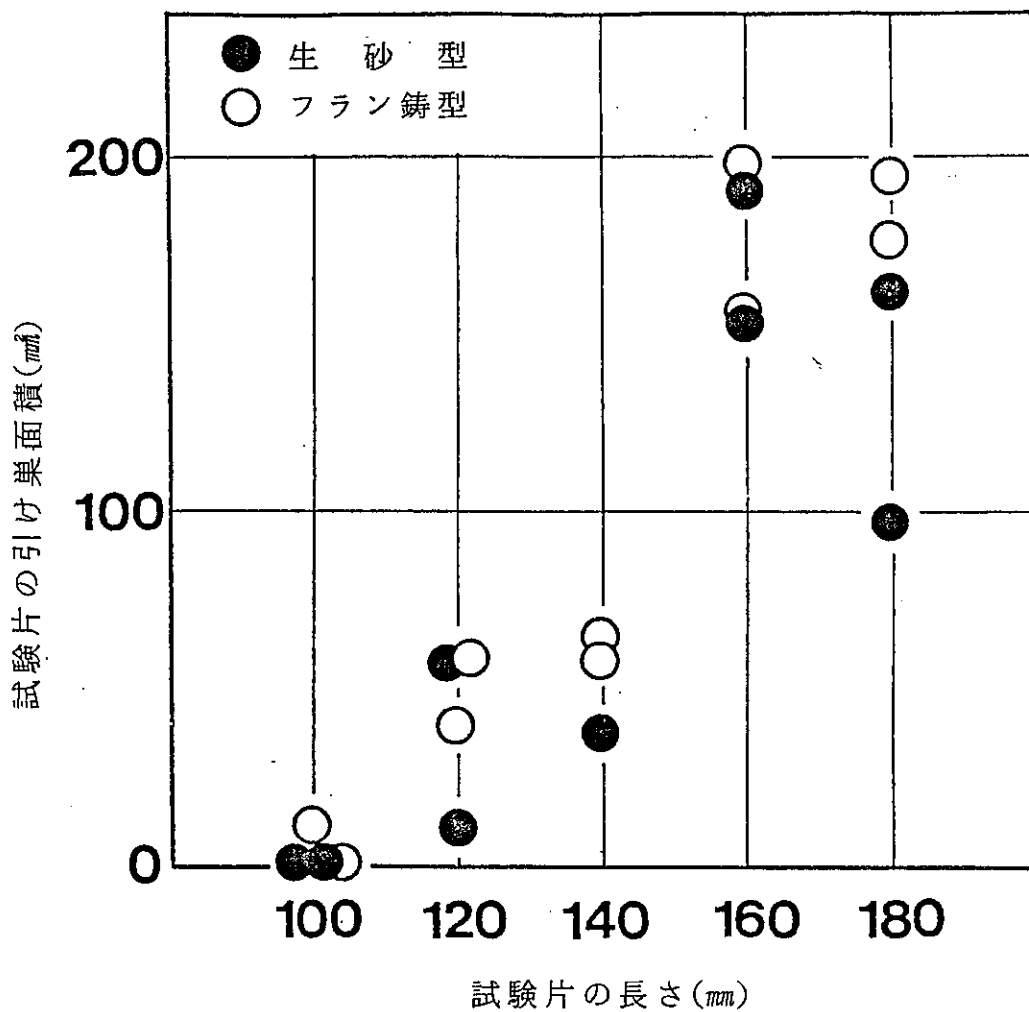


図5.11 試験片の長さと言け巢の関係

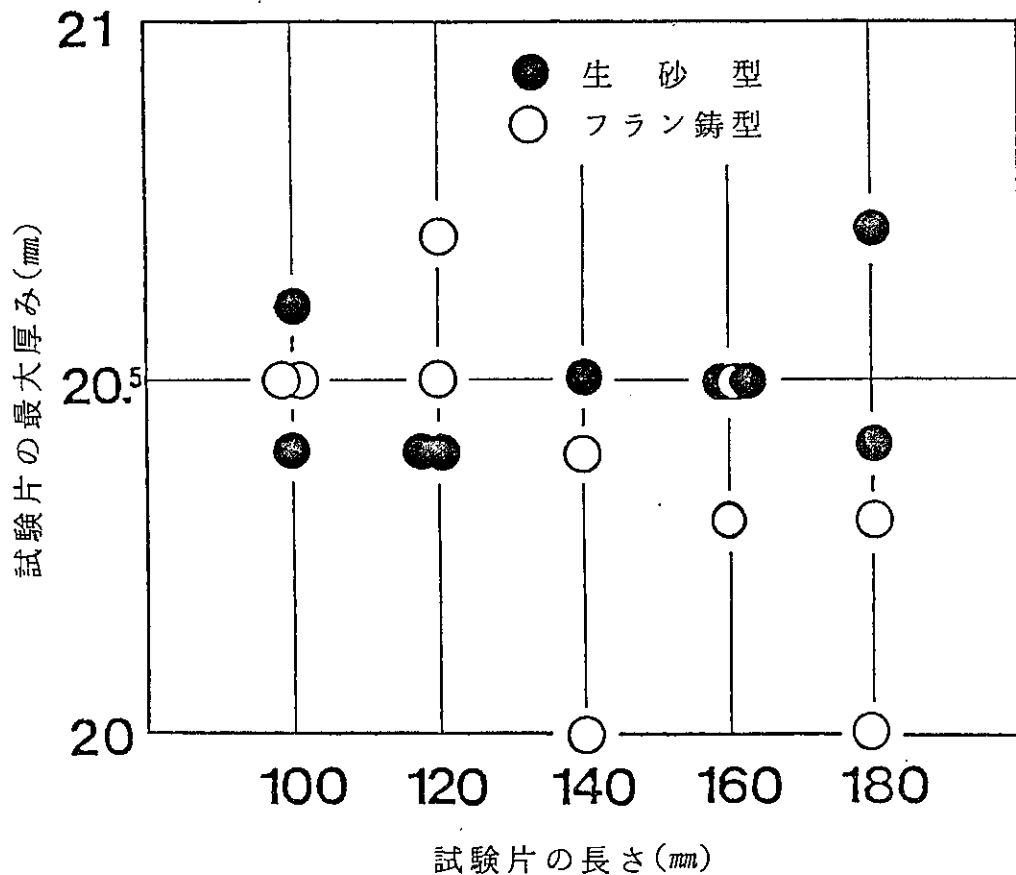


図 5.12 試験片の長さとの最大厚みの関係

図 5.13 にはり気の程度とザク巣の大きさをプロットしてみたが、生砂型は引け巣の大きさにかかわらず、はり気は一定であったが、フラン鑄型ではむしろ、はり気が減少しているにもかかわらず、引け巣が大きい場合もある。生砂型とフラン型の違いは盲押湯部における収縮パイプ体積の違いに大きく表われた。図 5.14 に試験片長さと盲押湯パイプ体積の関係を示すが、フラン鑄型では盲押湯の外引け（収縮パイプ）は皆無である。これはフラン型における見切り面での押湯部の直径が 64.0 mm で、生砂型の場合（ 65.5 mm ）よりかなり小さく、高温状態でのフラン鑄型の横方向の剛性が生砂型より大きいためと思われる。また、図 5.12 での試験片長さが 140 mm 以上になると、フラン鑄型でははり気が減少する傾向とも共通することであるが、試験片内での溶湯の一部が共晶凝固中に押湯ネック部を通じて押湯部に逆流したものと推測される。もし、押湯ネック面積を本実験よりもっと小さくし、この部分を早期に凝固させると逆流が妨げられて、押湯部に収縮パイプが生じたり、また、はり気の減少にはならないものかと推察されるが、今後検討の必要があろう。いずれにしても、フラン鑄型、生砂型の平板球状黒鉛鑄鉄鑄物でのザク巣の大きさには差が認められないことから、押湯の

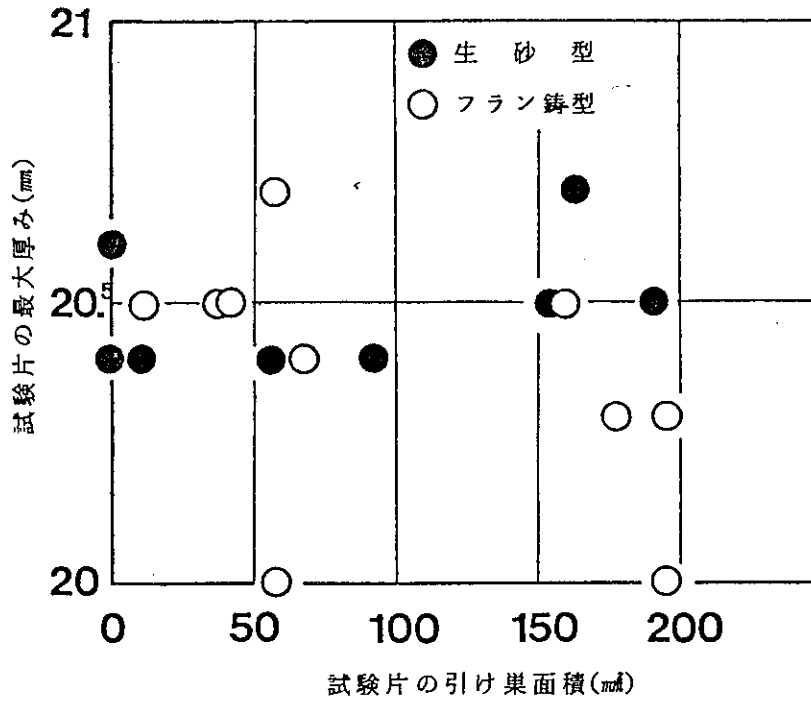


図 5.13 試験片の引け巣と最大厚みの関係

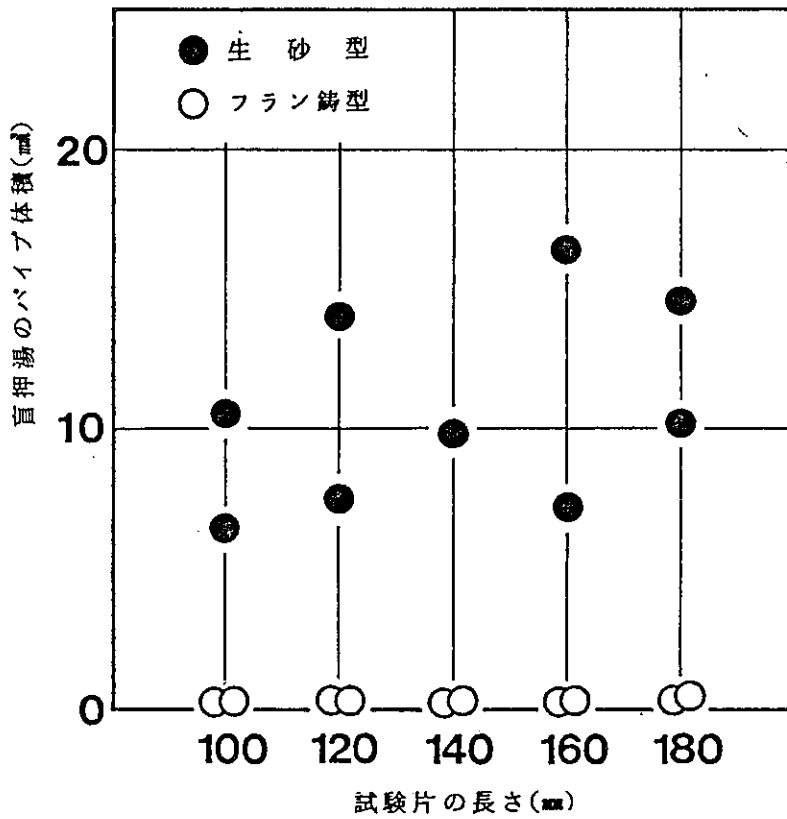


図 5.14 試験片の長さとは盲押湯のパイプ体積との関係

モジュラス，押湯ネックモジュラスを試行錯誤的に変化させても，完全にザク巣をなくしてしまうことは極めて困難と思われる。

また，川野らは球状黒鉛鑄鉄のザク巣近傍において炭素含有量が部分的に全体の含有量よりもかなり少ないことを認めている⁸⁾。著者らの一連の実験の中でも，図 5.15 の組織写真に示すようにザク巣近傍では黒鉛が少さく，その量は少ないのが定性的に



図 5.15 球状黒鉛鑄鉄のザク巣附近のミクロ組織(× 200)

認められる。今後の研究の方向として、共晶凝固終期における炭素濃度の推移や、介在物等の挙動についてミクロ的な探索を行うことにより、ザク巣を完全に防止するための手がかりが得られるものと推察される。ともあれ、本実験結果からは、さしあたりの対策としては、熱勾配を大にし、指向性凝固をさせ、それに応じた最小の押湯を設けることがもっとも有効と思われる。

5.3.2 熱解析の結果及び考察

図 5.16 に実験室及び現場作成生砂型の比較を示す。図から明らかなように、鑄物砂を十分つきかためた鑄型は冷却能が大である。全体としてはほぼ試験片先端から押湯方向に向っての指向性凝固を示しているが、3、4 の位置でわずかに逆転しているのが認められる。

図 5.17 にフラン鑄型の場合の結果を示し、現場生砂型の場合と比較した。フラン鑄型の方が生砂型よりも冷却能が大きい。フラン鑄型の見掛け比重は表 5.2 から推定されるように、実験室生砂型(見掛け比重 1.52 以上)と現場生砂型(見掛け比重 1.39 以下)の

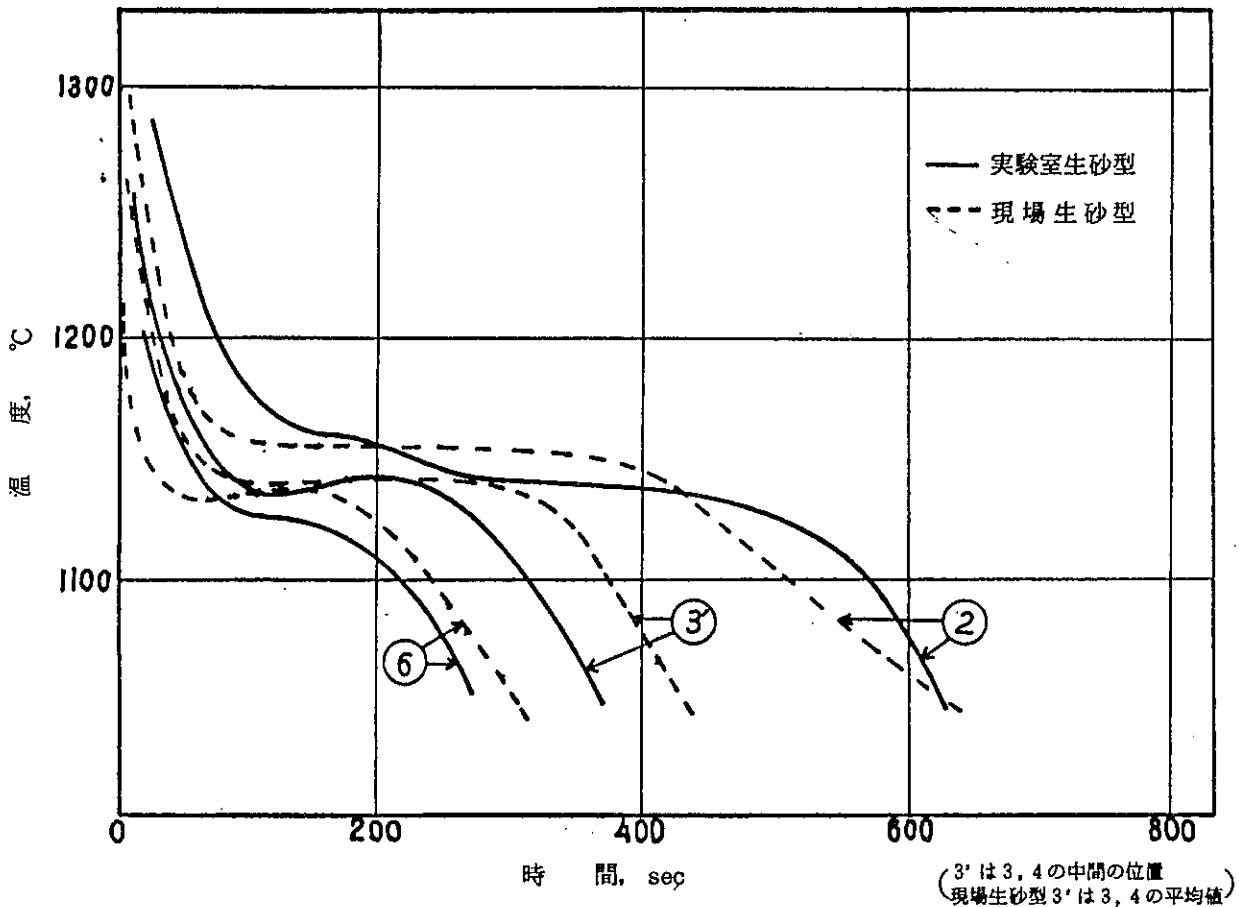


図 5.16 実験室生砂型、現場生砂型での冷却曲線の比較

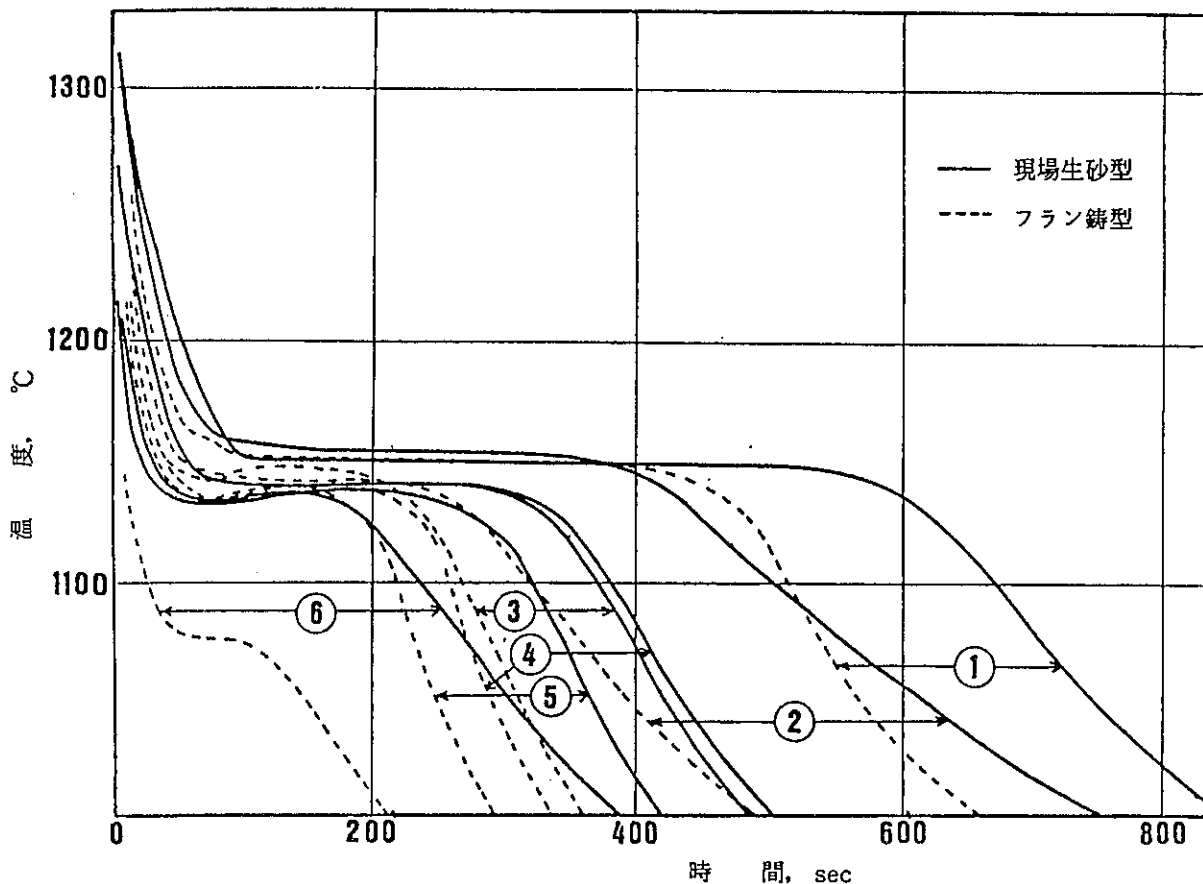


図 5.17 現場生砂型とフラン鑄型との比較

中間的な値 (1.43) であるので、納得できない結果である。この原因については溶湯と鑄型のぬれ (フランは MgO 系塗型してある)、生砂型での湿潤層の発生にともなう断熱性等が考えられるが、これに関してはさらに研究を続行しなければならないであろう。凝固順序は指向性凝固であるが、共晶凝固終了附近の温度差はわずかである。

試験片 100 mm では③の近辺において微細なザク巣が存在することが確認されていることから、この附近に Hot spot 部の存在が推定されるが、またたとえ、わずかに熱勾配が生じていても、球状黒鉛鑄鉄の凝固特性を考慮すると、その程度が小さい場合は押湯の給湯が不十分であればザク巣が発生すると推察される。たとえ正の多少の熱勾配があっても、たとえば押湯給湯経路に介在物がつまるなどして給湯の通路がせまくなれば、押湯給湯が不十分になり、ザク巣が発生するであろう。Mg 量とザク巣が対応するといわれるのは、Mg 介在物の影響でないかとも推察される。

5.3.3 マイコンによる凝固計算結果

図 5.5 のように押湯、押湯ネック、試験片を分割し、 Δt (タイムステップ) を変

化させた場合の各要素における凝固時間(秒)を表 5.7 に示した。 Δt を小さくすれば計算精度は向上するが、当然、演算時間が長くなる。今回の場合、0.5 sec 程度が適当と思われる。以下の計算について安定した結果を示した (Δt : 7 ~ 0.2 sec) 中間値 0.5 sec をステップ時間として計算していた。

表 5.8 Δt (タイムステップ) を変化させた場合の凝固時間と計算に要した時間

Δt (sec)	5.0	3.0	1.0	0.5	0.2
要素番号					
1	165.0	108.0	146.0	142.0	142.2
2	180.0	198.0	201.0	206.0	205.6
3	125.0	234.0	219.0	230.5	228.8
4	155.0	192.0	197.0	215.5	206.0
5	125.0	102.0	134.0	152.0	143.0
6	190.0	201.0	193.0	206.5	202.0
7	225.0	267.0	273.0	287.0	283.0
8	220.0	297.0	318.0	326.5	323.8
9	275.0	303.0	316.0	322.0	319.6
10	255.0	255.0	274.0	286.0	282.6
11	260.0	243.0	242.0	239.0	237.6
12	500.0	537.0	533.0	526.5	520.8
13	235.0	255.0	250.0	241.0	234.0
14	735.0	759.0	755.0	753.5	745.6
15	550.0	588.0	612.0	610.5	598.4
演算時間	14分	24分	70分	138分	285分

計算結果を冷却曲線にして、図 5.18 に現場生砂型の場合の実測値と比較した。3 ~ 4 の位置では比較の実測値と計算値が一致しているが、1, 2 の位置ではそれらの間の差が大きい。2 の押湯部では鑄型が内角になっており、熱流束の形で境界条件を設定した場合には鑄型の過熱状況が加味されていない。鑄型との有効接触面積のとり方など、工夫する必要があるだろう。また、初期条件の設定、ブロック間の有効接触面積のとり方、さらには凝固様式をとり入れるなどすれば精度は向上しよう。今後の研究の課題である。

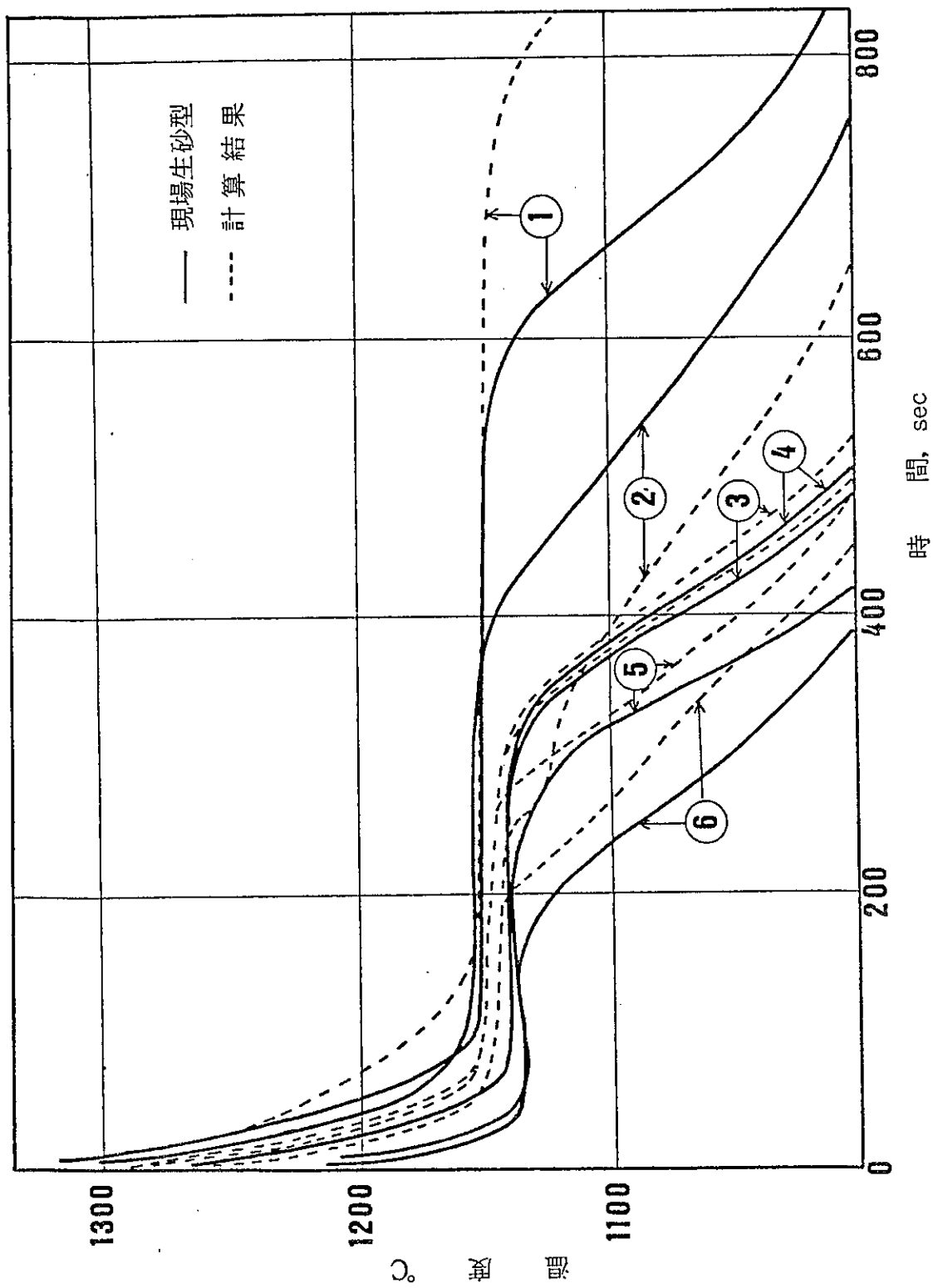


図5.18 計算結果と現場生砂型との比較

5.4 ま と め

- (1) 球状黒鉛鑄鉄の引け巣（ザク巣）についてフラン鑄型を用いて肉厚20mmの平板球状黒鉛鑄鉄鑄物の試験片の長さを変えることにより、押湯給湯効果について検討し、生砂型の場合と比較した。
- (2) いずれの鑄型においてもザク巣の大きさについてその差は認められなかった。
- (3) フラン鑄型の場合、盲押湯の収縮パイプは皆無で、試験片が長くなるとはり気は減少したが、これはフラン鑄型の横方向の剛性及び共晶凝固時における試験片から押湯部に向っての逆給湯現象によるものと推察される。
- (4) 適正な炭素当量及び押湯モジュラス、押湯ネックモジュラスにより、ザク巣を小さくすることができるが、十分な熱勾配をつけ方向性凝固させる以外には完全になくすることは困難と思われる。
- (5) 今後の研究方向として、共晶凝固終期における炭素濃度の推移、介在物の除去等の探索により、その手がかりが得られるものと思われる。
- (6) 熱解析の冷却曲線の採取のための実験は非常に繁雑であるので、マイコンを使用して凝固のシュミレーションを試み、実測値と比較した。本実験での方法では、初期条件の設定、境界条件の設定など改善すべき点が多かった。
今後、大型コンピュータの利用、凝固時の熱発生等を考慮し、不連続の微分方程式の解であるステファン法を用いることなどにより展望が開れたとみられ、目下研究続行中である。

第5章の参考文献

- 1) J.H. Morrogh, W.J. Williams : JISI, 155 (1947), 321
- 2) A.P. Gagnebin, K.D. Mills, N.B. Pilling : Iron Age, 163 (1949-Jan.), 30
- 3) 糸藤, 川野, 市村, 斉藤, 二川 : 鑄物, 第99回講演大会概要集 (1981) 5
- 4) " " : 日本鑄物協会可鍛鑄鉄研究委員会 資料 52-8 (1981)
- 5) 片島, 松浦 : 鑄物, 46 (1974) 10, 840
- 6) 山本, 山田, 斉藤 : 鑄物, 50 (1978) 1, 14
- 7) 新山 : 鑄物, 49 (1977) 10, 608
- 8) 川野, 近藤, 保木, 山根, 上原 : 鑄鍛造 (1968) 1, 59

6. 結 言

自由世界（西側）の銑鉄鑄物工業は、たしかに斜陽産業的な様相を濃くしている。これに対し、社会主義国群（東側：主としてソ連と中国）ではむしろ花形産業であり、全世界生産量は定常ないしむしろ上昇的ですからある。このような相違はどこから生じたのであろうか。

これを単に後者の日常生活レベルの低さだけで結論づけることは危険である。今日、円安、欧米の不況による購買力の低下、米国を中心とした西側諸国の対日輸入規制、円安による輸入原材料の高騰などにより、これまで好景気を示していたがすでにかげりをみせはじめていた自動車、鉄鋼両産業はもとより、ドル箱といわれた家電産業、工作機械産業においてすら56年度は前年度より落ちこみ、さらに将来の展望は暗い。これらの原因をあげつらうのは本研究の主題ではありえないが、ハード面のみをとりあげても、共通点のあることに気が付く。すなわち、電気産業、機械産業の圧倒的な技術輸入は依然としてつづいていることである。その点、鉄鋼産業は技術的に世界水準をはるかに抜き、諸産業中唯一の技術出超産業であり、この産業に関する限り将来の展望は暗さがなく、業界も自信をもっている。

これらのことは創造的な技術力が今後の日本の将来を左右する重大な鍵であることを示唆している。

鑄造業界もその例外であり得ないことはいうまでもない。わが国はVプロを発明し、またはじめて自硬性鑄型（Nプロ）を開発して、世界鑄造界を驚嘆させた。また球状黒鉛鑄鉄の高品質なこと、遠心鑄鉄管技術等も世界一を誇っている。一方、一般の鑄鉄業界は未だ「経験と勘」に頼り、業界の団結もきわめて弱い。現在の鑄鉄業界では、不良の採算点は平均2%といわれて来ている。筆者らの経験では「経験と勘」では平均5%以下に不良を下げることは困難である。

そのギャップをうめるのが良質の情報の迅速な収集能力および厳密な品質管理であり、その本質は鑄造技術に科学性を如何に付与するかということにつきると断言して差支えないであろう。

さらにまた、精神面での脆弱さの克服（物質文明やかっこよさに圧倒されている若者群の問題）、作業環境の根本的改善（公害などの社会問題はその結果として生じたことであり、根源問題ではない。）などソフト面と上記のハード面（技術面）との整合性が必要とされよう。

本年度は先ずハード面での四課題にしばったが、その方法は厳密性と創造性とを重

視した。このような実践の中におのずからソフト面の厳しさを、ささやかではあるが創造の喜びを全委員や協力者が体得しえたと思う。

これらの本年度における実践的、創造的手法をふまえ、次年度の諸課題に取り組む所存である。

(川野)