



Title	種々の黒鉛形態を有する鑄鉄の熱伝導率について
Author(s)	野口, 徹; Noguchi, Tōru; 松本, 泰郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 87, 57-66
Issue Date	1978-06-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41457
Type	departmental bulletin paper
File Information	87_57-66.pdf



種々の黒鉛形態を有する鑄鉄の 熱伝導率について

野口 徹* 松本泰郎** 長岡金吾*
(昭和 52 年 9 月 30 日受理)

On the Thermal Conductivity of Cast Iron with Various Graphite Configurations

Tōru NOGUCHI* Yasuo MATSUMOTO** Kingo NAGAOKA*
(Received September 30, 1977)

Abstract

In order to investigate the role of graphite flakes on the thermal conductivity of cast iron, ferritic irons with various chemical compositions and graphite configurations were examined by the step-heating method. The effect of graphite flakes was expressed by the ratio λ_e/λ_c , where λ_e was the measured conductivity of the iron and λ_c was the conductivity of the matrix estimated from its chemical compositions.

The value of λ_e/λ_c was 1.7~2.4 in flake graphite iron. The values increased with increase in carbon content, the increase in coarseness and the length of graphite flakes. In spheroidal graphite iron, λ_e/λ_c was 1.03~1.15, and only slight increase was seen with the increase in carbon content. The role of eutectic D-type graphite was almost the same as in the case of flake graphite. The iron with less spheroidized wormtype graphite showed higher λ_e/λ_c values than fully spheroidal iron.

Form factor ψ was introduced according to Hamilton's method for the evaluation of the effect of graphite shape. A correlation was observed between λ_e/λ_c and the value of ψ calculated in some specimens. It is suggested that, in addition to the graphite shape, the remarkable difference in conductivity may be caused by the anisotropic structure of the graphites, and graphite-matrix coherency.

1. 緒 言

熱伝導率は鑄鉄を使用するうえで重要な物性値のひとつである。例えば、鑄鉄を広く用いる内燃機関では、熱伝導率は機関性能に直接影響し、製鉄用インゴットケースでは冷却能の違いが鋼塊の性質に影響を与える。さらに最近では鑄造用の金型材料として鑄鉄が注目されており、製品の凝固時間および型に発生する熱応力に関連して、熱伝導率のデータが要求されている。

鑄鉄は基質と分布黒鉛から成る複合組織の合金である。その組織は化学成分、冷却速度等により広範囲に変化し、熱伝導率もまたこれらの要因により著しく異なることが知られている^{1),2)}。

* 機械工学第二学科 機械材料学講座

** 現在は日産自動車(株)

しかし、熱伝導率の測定は技術的に困難であり、鑄鉄については測定例が少なく、熱伝導率に及ぼす各種要因の影響も明らかにされていない点が多い。

著者らは以前に、鑄鉄の加熱変質に伴う熱伝導率の変化を測定し、黒鉛組織による著しい影響を指摘した³⁾。また最近安江らは各種鑄鉄の熱伝導率を測定し⁴⁾、基地組織とともに黒鉛片の形状が熱伝導率を支配する重要な要因であることを報告している。

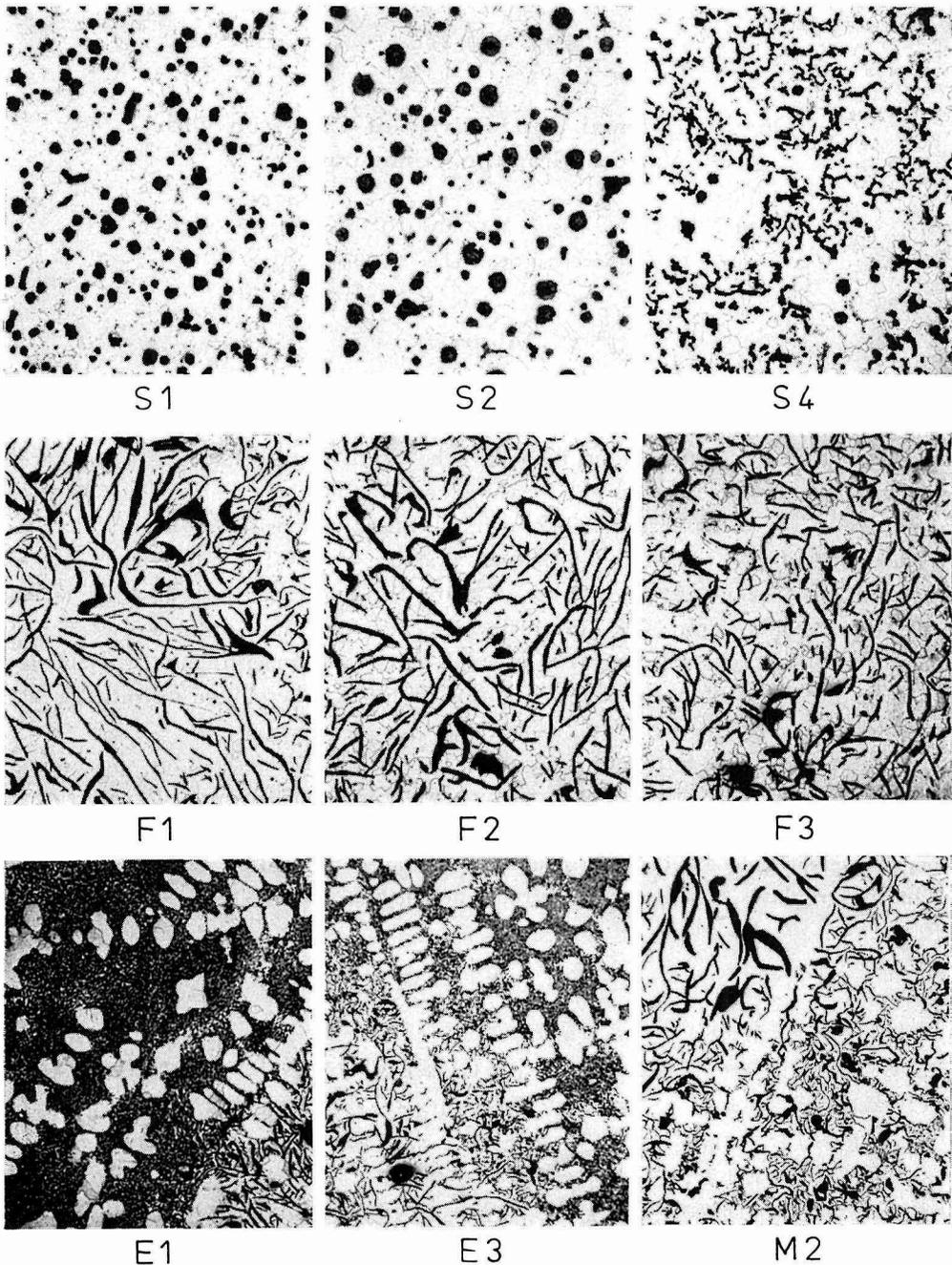


図-1 試料の顕微鏡組織 (ナイトール腐食 ×70)

本報では、主として熱伝導率に対する黒鉛片の効果を定量的に評価する目的で、化学成分、黒鉛形態の異なる十数種類のフェライト鋳鉄について、ステップ加熱法により常温での熱伝導率を測定した。

2. 試料

熱伝導率の測定に供した試料は、炭素、けい素量および黒鉛片の形状を種々に変えた鋳鉄 16 種類である。これらはその黒鉛形態により、球状系 (S1~S4)、片状系 (F1~F5)、共晶系 (E1~E3)、および片状と共晶の混合系 (M1~M4) に分類される。それらの化学成分を表-1 に示した。いずれも黒鉛化二段焼鈍により基質をフェライト化した後、熱伝導率測定用の円柱状試験片を製作した。顕微鏡組織の例を図-1 に示した。

表-1 試料の化学成分 (%)

試料	T.C	S _i	M _n	P	S	試料	T.C	S _i	M _n	P	S		
球状系	S1	2.74	3.00	0.17	.036	.012	共晶系	E1	3.10	2.95	0.19	.047	.007
	S2	3.64	2.45	0.26	.019	.014		E2	3.28	2.38	0.20	.043	.014
	S3	2.63	3.38	0.17	.032	.011		E3	2.89	3.35	0.19	.048	.007
	S4	3.00	3.37	0.19	.044	.004	混合系	M1	3.27	2.46	0.20	.042	.011
片状系	F1	3.78	1.79	0.47	.101	.047		M2	3.28	2.39	0.20	.043	.014
	F2	3.78	1.80	0.49	.101	.047		M3	3.64	2.28	0.20	.048	.011
	F3	3.42	1.59	0.49	.103	.047		M4	3.71	0.71	0.15	.026	.009
	F4	2.86	1.73	0.66	.066	.044							
F5	2.90	1.44	0.57	.057	.037								

3. 熱伝導率測定法

3-1 測定の方法

本実験で用いた熱伝導率測定法は熊田らの考案⁵⁾によるステップ加熱法で、その原理は以下の如くである。

図-2 のように熱平衡状態にある厚さ l の無限平板の一面 ($x=l$) をステップ状に加熱するとき、対流およびふく射による熱損失を無視するならば、次式が成り立つ。

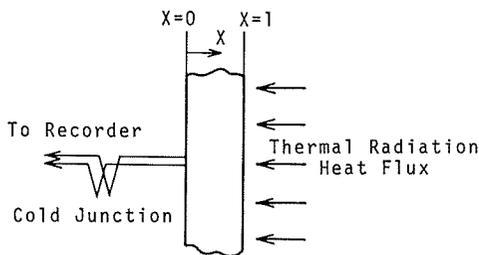


図-2 ステップ加熱法による熱伝導率測定の方法

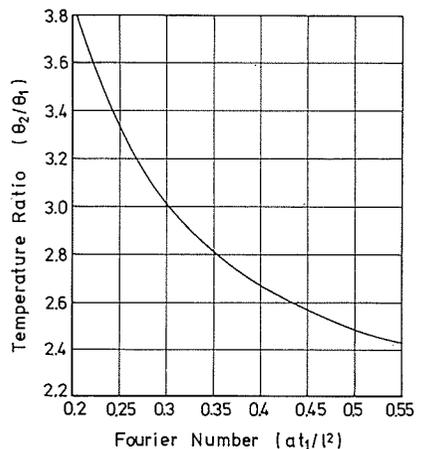


図-3 $\theta_2/\theta_1 - at_1/l^2$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (0 < x < l) \quad (1)$$

$$\lambda \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right] = 0 \quad (x = 0) \quad (2)$$

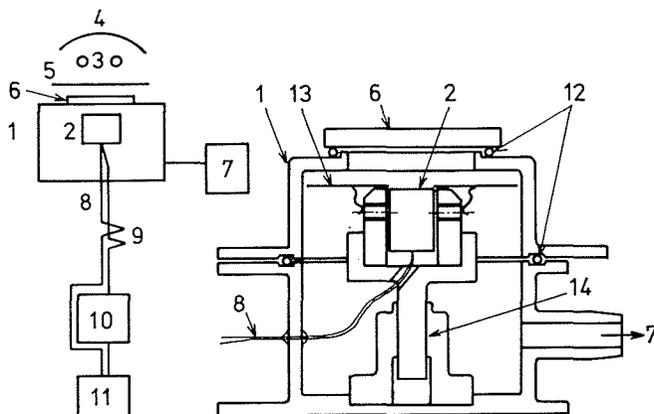
$$\lambda \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right] = H \quad (x = l) \quad (3)$$

θ : 無次元温度 H : 加熱熱流束 λ : 熱伝導率
 a : 温度伝導率 = $\lambda/c \cdot \gamma$ c : 比熱 γ : 比重

(1)~(3)式の解は時刻 t_1 と $t_2=2t_1$ における背面 ($x=0$) の温度の比 $\theta(0, t_2)/\theta(0, t_1)$ とフーリエ数 at/l^2 の関係として得られ⁵⁾, 図-3のように表わされる。したがって, ステップ加熱開始からの時間 t_1 および $t_2=2t_1$ での試料の背面温度を測定することにより温度伝導率 a が求められ, $\lambda=ac\gamma$ によって熱伝導率が算定される。

3.2 測定装置

前述の原理に基づく温度伝導率測定装置の概略を図-4に示した。測定容器(1)は内径, 高さとも 90 mm で, 対流による熱損失を防ぐために真空中に吸引される。熱源は 1 kW のハロゲンランプ 2 本 (3) で, 光はオプティカルガラス (6) を通して試験片 (2) に加えられる。試験片は直径 15 mm, 高さ 20 mm で, 先端の鋭利なビスで保持し, 上端面はふく射率が 1 となるようにすすを塗付した。試験片の背面はエメリー紙で研磨し, 0.1 mm 径の銅-コンスタンタン熱電対 (8) をアーク溶接した。



- | | | |
|------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1. Vacuum Vessel | 6. Optical Glass | 11. Pen Recorder |
| 2. Specimen | 7. Vacuum Pump | 12. O-Rings |
| 3. Halogen Lamps | 8. C-C Thermo Couple | 13. Heat Flux Shelter |
| 4. Reflector | 9. Cold Junction | 14. Specimen Holder and Adjuster |
| 5. Shutter | 10. mV Generator | |

図-4 温度伝導率測定装置

光源を点灯し, 定常化した数秒後にシャッター (5) を開けると, 記録計にスタートマークが入り, 背面温度の上昇が記録される。本実験では $t_1=10$ sec, $t_2=20$ sec とした。

装置を検定するために純度 99.5% の鉛を試料として温度伝導率を測定した。3回の測定の平均値として $0.0847 (\pm 0.0014) \text{ m}^2/\text{hr}$ の値が得られた。この値は従来の測定値⁶⁾ $0.085 \text{ m}^2/\text{hr}$ とほとんど一致し, 装置は本実験の目的に十分かなうものと判断された。

4. 熱伝導率の測定結果

各試料の温度伝導率 a (m^2/hr) の測定結果およびこれから算出した熱伝導率 λ ($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$) の値を表-2に示した。数値はいずれも3回の測定の平均値であり、測定ごとのばらつきは $\pm 2\%$ 以内であった。また、測定中の背面温度の上昇は、試料によって異なるが、室温 ($20^\circ C \pm 1^\circ C$) を基準としておよそ $30 \sim 40^\circ C$ であった。

表-2 温度伝導率 (a), 熱伝導率 (λ) の測定結果

試料	S1	S2	S3	S4	F1	F2	F3	F4
a ($10^{-2} \cdot m^2/hr$)	3.02	3.16	2.79	3.16	7.44	6.87	6.46	5.55
λ ($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)	25.6	25.9	23.5	26.9	60.9	54.8	53.5	45.7

試料	F5	E1	E2	E3	M1	M2	M3	M4
a ($10^{-2} \cdot m^2/hr$)	5.69	5.24	5.66	4.67	5.77	5.24	5.63	8.63
λ ($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)	46.5	45.0	46.2	38.8	48.7	44.9	47.8	71.2

熱伝導率の算出に必要な比熱は水熱量計法により実測した。いずれの試料でも $0.11 \sim 0.12$ $kcal/kg \cdot ^\circ C$ の値が得られた。また比重量は円柱試験片の体積と重量より算出した。

表-2の実験結果によれば、フェライト鋳鉄の熱伝導率は化学成分および黒鉛形態により、最も低いS3の 24 $kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$ から、最も高いM4の 71 $kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$ まで、約3倍の差があることがわかる。全体として片状黒鉛系の熱伝導率が最も高く、混合系、共晶系はこれよりやや低い。球状黒鉛系は最も低く、他の約 $1/2$ の値である。

熱伝導率の測定結果を炭素量およびけい素量の関係として整理し、図-5および6に示した。熱伝導率は炭素量が多いほど、またけい素量が少ないほど大きい。黒鉛の熱伝導率は結晶方向によって異なるが、その値は $60 \sim 320^{7),8)}$ $kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$ で、基質フェライトの数倍～十数倍である

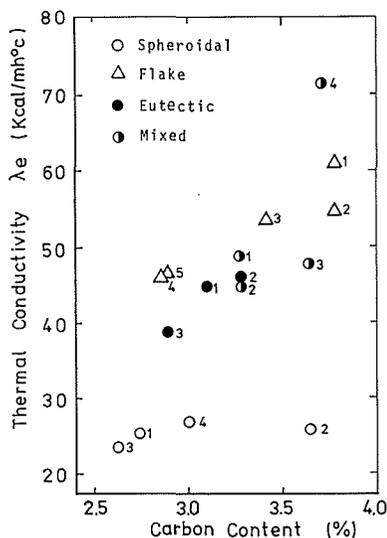


図-5 実験結果1 (熱伝導率と炭素量の関係)

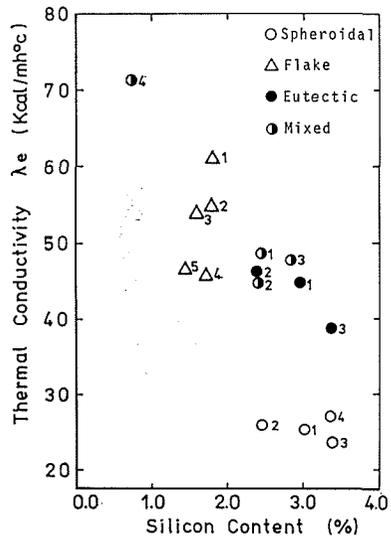


図-6 実験結果2 (熱伝導率とけい素量の関係)

から、炭素量、したがって黒鉛量が増加すれば熱伝導率は増大する。また、けい素はフェライト中に固溶して電気伝導度および熱伝導率を低下させることが知られており、図-5, 6の結果は定性的に理解される。しかし、例えば試料 S2 (C: 3.64%, Si: 2.45%) と M3 (C: 3.64%, Si: 2.28%) では、炭素、けい素量がほとんど同じであるにもかかわらず、 λ の値は 26 および 48 kcal/m·hr·°C と、ほぼ倍の差がある。また、同じ片状系の F1 と F2 は、炭素、けい素量が同一であるけれども λ の値が約 10% 異なる。これらのことから、鑄鉄の熱伝導率には、基質の熱伝導率と黒鉛の量のみでなく、黒鉛片の形状、分布が大きな影響を及ぼすものと考えられる。

5. 黒鉛による熱伝導率上昇の効果

基質の化学成分、特にけい素量の異なる鑄鉄において、熱伝導に及ぼす黒鉛片の効果を評価するにはまず基質の熱伝導率を見積ることが必要である。

純鉄にけい素が固溶した場合の熱伝導率の低下は、けい素鋼による実測例⁶⁾ から 図-7 の曲線 S_i のように見積られる。また、マンガンも同様にフェライトの熱伝導率を低下させるが、これについては実測例がないため、Söhnchen⁹⁾ による Lorenz 則を用いた計算値(図-7, 曲線 M_n)を示した。リン、硫黄等、他の元素は微量であるのでその効果を見捨ると、各試料の基質フェライトの熱伝導率 λ_c は、表-1 の S_i, M_n (%) と 図-7 を用いて求められる。

純鉄の熱伝導率を 63 kcal/m·hr·°C として算定した基質の熱伝導率 λ_c と試料の熱伝導率 λ_e の関係を 図-8 に示した。 λ_c は、けい素量が著しく低い M4 のみが 39 kcal/m·hr·°C であるが、けい素量 1.5~3% の一般的な鑄鉄では 25±2 kcal/m·hr·°C の範囲に分布する。一方、この範囲で、試料の熱伝導率は 23 から 60 kcal/m·hr·°C まで変化する。したがって、図-6 に示したけい

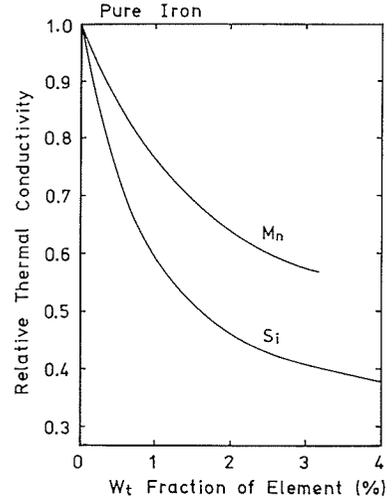


図-7 S_i, M_n による純鉄の熱伝導率の低下

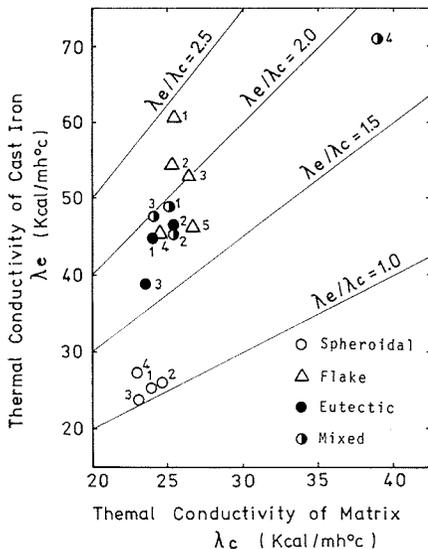


図-8 鑄鉄の熱伝導率と基質の熱伝導率の関係

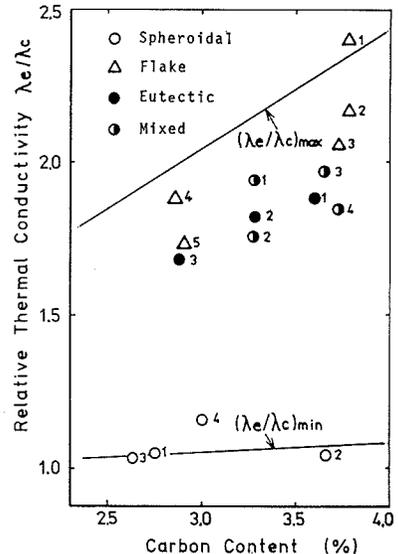


図-9 熱伝導率比 λ_e/λ_c と炭素量の関係

素量の増加による熱伝導率の低下は、けい素による基質熱伝導率の低下と直接対応するものではなく、むしろこれに伴う黒鉛組織の変化等の影響が大きいと見るべきである。

鋳鉄の熱伝導率を基質の熱伝導率で除した値 λ_e/λ_c と炭素量の関係を 図-9 に示した。 λ_e/λ_c は黒鉛片による熱伝導率の上昇効果を示す。 λ_e/λ_c は片状、共晶、混合系で 1.7 から 2.4 の値である。すなわち、これらの形状の黒鉛を有する鋳鉄では、重量で 3~4%、体積で 9~12% の黒鉛により、熱伝導率が約 2 倍、最大 2.4 倍にまで上昇することになる。共晶状黒鉛の場合には、黒鉛片の大きさが片状に比べて著しく小さいにもかかわらず、熱伝導率に対する効果は片状よりもやや低い程度であって、1.7~1.9 倍の上昇効果を持つ。したがって、片状黒鉛と共晶状黒鉛の混合した組織の熱伝導率もまた、これらとほぼ同じである。基質がフェライトであることから、炭素量は黒鉛の体積率に対応するが、いずれの黒鉛形状でも、 λ_e/λ_c は黒鉛量の増加とともに増大する傾向を示す。一方、球状黒鉛鋳鉄では λ_e/λ_c が 1.03~1.15 であり、黒鉛による熱伝導率の上昇はわずかである。また黒鉛量による変化も片状系に比べて小さい。

球状黒鉛鋳鉄と片状黒鉛系の鋳鉄におけるこのような著しい差は、黒鉛片の形状の違いに起因すると考えられる。黒鉛が十分に球状化せず、いも虫状である S4 が、他の球状系試料に比べて高い λ_e/λ_c 値を有することからも、黒鉛片の形状が熱伝導率に大きく影響することが推量される。また片状系の試料においても、F1~F3 は、その炭素量がほとんど同じであるにもかかわらず、 λ_e/λ_c に約 20% の差があるが、このような差も黒鉛片の形状によるものであろう。組織写真によれば、高い λ_e/λ_c 値を有する F1 では黒鉛片が最も粗大で、また連続性が大きく、これに比べて λ_e/λ_c の小さい F3 では、比較的短かい黒鉛片が独立して分布する特徴が明らかである。

黒鉛片の熱伝導率に及ぼす上昇効果は、図-10 に示す結晶方向の異なる伝熱モデルの極限状態に対して、最大値および最小値が考えられ、それぞれ次式で示される。

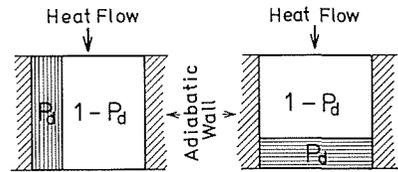


図-10 λ_e/λ_c の最大値および最小値を与える伝熱モデル

$$(\lambda_e/\lambda_c)_{\max} = \left\{ \lambda_a \times P_d + \lambda_c \times (1 - P_d) \right\} / \lambda_c \quad (4)$$

$$(\lambda_e/\lambda_c)_{\min} = \left\{ 1 / (P_d/\lambda'_a + (1 - P_d)/\lambda_c) \right\} / \lambda_c \quad (5)$$

P_d : 黒鉛の体積率

λ_a, λ'_a : 黒鉛の積層と平行方向およびこれと垂直方向の熱伝導率

$\lambda_a = 320 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, $\lambda'_a = 60 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ とした場合の $(\lambda_e/\lambda_c)_{\max}$ および $(\lambda_e/\lambda_c)_{\min}$ と炭素量の関係を 図-9 に直線で示した。ただし、基質の熱伝導率を $25 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、黒鉛の比重量を $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。これらの計算値と実測値を比較するならば、片状共晶状および混合黒鉛では、最大値の約 70~80% 以上の熱伝導率上昇効果が実現されていることになる。特に F1 における $\lambda_e/\lambda_c = 2.4$ はほぼその最大値である。これに対して球状黒鉛鋳鉄では λ_e/λ_c は (5) 式による最小値とほとんど一致する。

3. Hamilton の形状係数による考察

Hamilton は連続体中に分散する粒子の形状係数 ψ を (6) 式のように定義した場合、その熱伝導率に対する効果が (7) 式で示されるとした¹¹⁾。

$$\phi = (\text{分散体の表面積})/(\text{同体積の球の表面積})^* \tag{6}$$

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_c} = \frac{(n-1)+K+(n-1)P_d(1-K)}{(n-1)+K+P_d(1-K)}, \quad n = 3 \times \phi^* \tag{7}$$

ただし、 $K = \lambda_d/\lambda_c = (\text{分散粒子の熱伝導率})/(\text{基質の熱伝導率})$ である。

ϕ は粒子が球状の場合 1.0 であり、粒子の偏平度あるいは凹凸が激しいほど大きな値となる。 ϕ が十分大きいとき、(7)式は $\lambda_e/\lambda_c = 1 + P_d(1-K)$ となり、(4)式に一致する。また(5)式は $n=1$ の場合に相当する。今、片状黒鉛の形状係数 ϕ を次のようにして求めてみる。

黒鉛の体積率を V_v 、単位体積あたりの黒鉛の表面積を S_v 、単位体積あたりの黒鉛の個数を N_v とすれば、

$$\bar{\phi} = \frac{S_v/N_v}{4\pi(3V_v/4\pi N_v)^{2/3}}$$

ただし、 $\bar{\phi}$ は測定範囲内での ϕ の平均値である。 V_v は $C\%$ から、また S_v は Saltykov による次式から求められる¹²⁾。

$$S_v = \bar{N}_i \quad (N_i: \text{任意の試験線 } L \text{ の単位長さあたりの粒子境界線との交点の数})$$

また N_v は、共晶細胞内では黒鉛が連続しているものと見なし¹³⁾、単位体積あたりの共晶細胞の個数を N_v とする。 N_v は、単位面積あたりの共晶細胞数 N_A から、求められる¹⁴⁾。

$$N_v = \frac{2}{3} N_A^{3/2}$$

試料 F1, F2, F3 について測定した V_v, S_v, N_A 、およびこれから求めた $\bar{\phi}$ の値を表-3 に示した。 $\bar{\phi}$ は図-11 の黒鉛形状の特徴とよく対応し、また図-11 に示すように、 λ_e/λ_c の上昇傾向ともよく対応する。

表-3 V_v, S_v, N_v の測定値と $\bar{\phi}$ の計算値

試料	V_v ($10^{-2} \cdot \text{mm}^3/\text{mm}^2$)	S_v (mm^2/mm^3)	N_v ($1/\text{mm}^3$)	$\bar{\phi}$
F1	11.7	59.0	1.10	49.6
F2	11.7	51.8	1.41	40.0
F2	10.7	46.8	3.16	29.3

図-11 に実線で示したのは (7) 式による λ_e/λ_c と ϕ の関係である。ただし、 $K=320/25$ とし、体積率 P_d は 0.12 および 0.10 の場合を示した。(7) 式による計算値は $\phi=30 \sim 50$ の片状黒鉛の λ_e/λ_c の実測値とおおむね一致する。しかし、(7) 式によれば、 $\phi > 20$ の範囲で、 λ_e/λ_c は(4)式による最大値とほとんど一致し、 ϕ による変化がごくわずかであるのに対し、実験結果からは、このような範囲でもなお黒鉛形状の効果が無視できないことが示唆される。

図-11 において、 $\phi=1.0$ は球状黒鉛の場合に相当するが、 $\lambda_d=320$ の場合 $\lambda_e/\lambda_c=1.3$ であり、実

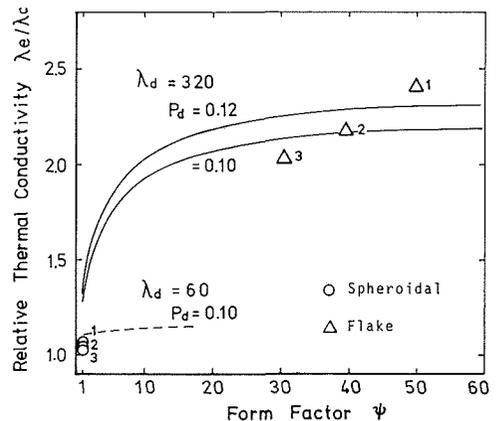


図-11 形状係数 ϕ と λ_e/λ_c の関係

* ϕ は Hamilton による定義の逆数

測値 1.03~1.05 に比べて大きい。 $\lambda_e=60$ とした場合の計算値を破線で示したが、 $\psi=1.0$ で $\lambda_e/\lambda_c=1.1$ であり、なお実測値より大きい。いも虫状黒鉛を有する S4 の 1.15 がほぼこの値である。

以上のことから、熱伝導率に対する黒鉛片の形状の効果を形状係数 ψ によって評価する可能性が示唆されたが、Hamilton の式の直接の適用は球状黒鉛で λ_e/λ_c を過大に見積ること、および ψ の大きい片状黒鉛で実測された形状効果の方が大きいことなど、なお検討の余地がある。また、片状黒鉛と球状黒鉛の熱伝導率の著しい差は、その形状の違いに起因することはもちろんであるけれども、さらに黒鉛片の結晶構造が片状では層状、球状では放射積層状であることによる有効熱伝導率の差、および黒鉛片と基質との連続性の違いが、その効果をさらに顕著にしていることが考えられる。

7. 結 言

鋳鉄の熱伝導率に対する黒鉛片の効果を考察する目的で、種々の化学成分、黒鉛形態を有するフェライト鋳鉄の熱伝導率を測定した。実測された熱伝導率と、化学成分から推定される基質の熱伝導率の比 λ_e/λ_c を黒鉛片による熱伝導率上昇効果とし、これと炭素量、黒鉛形態との関係を考察した。その結果次の事が明らかになった。

黒鉛片の熱伝導率に対する寄与は球状黒鉛鋳鉄と片状黒鉛鋳鉄とで著しく異なる。片状黒鉛では体積率 9~12% の黒鉛片により、熱伝導率は基質の 1.7~2.5 倍になる。これは伝熱学的に考えられる熱伝導率上昇効果の上限に近い。一方球状黒鉛では λ_e/λ_c が 1.03~1.15 であり、黒鉛片の効果はわずかである。

片状黒鉛では黒鉛片が長大なほど λ_e/λ_c が大きく、細かい A 型黒鉛ではその値が低い。D 型の共晶黒鉛、ならびに共晶と片状の混合した組織では黒鉛の効果は片状の場合に準ずる。また、いも虫状の黒鉛は完全な球状黒鉛よりも高い λ_e/λ_c 値を示した。これらのことから、片状黒鉛においても、また球状黒鉛においても、黒鉛の形状が熱伝導率に対して大きな効果を持つことが示唆された。

Hamilton の手法による形状係数はこのような黒鉛片の形状の効果の評価に有効と考えられるが、推算式への直接の適用にはなお幾つかの考慮すべき問題が残されている。また、片状黒鉛と球状黒鉛の結晶構造の違いによる熱伝導率の差、および基質との連続性の差が形状効果をさらに顕著にする要因として考えられる。

最後に、本研究に多大なるご助力をいただいた室蘭工業大学井川克也教授、ならびに多くの有益なご助言をいただいた北大工学部関信弘教授、同じく原子工学科熊田俊明助教授に謝意を表します。

文 献

- 1) Löhberg, K.: Giesserei. 23 (1957), 5, p. 305.
- 2) Brophy, J. H.: Trans. ASM. 52 (1960), p. 567.
- 3) 野口 徹, 長岡金吾: 鋳物, 42 (1970), 8, p. 629.
- 4) 安江和夫ほか 3 名: 鋳物協会第 91 回全国大会講演概要集 (1977), p. 80.
- 5) 小林清志, 熊田俊明: 原子力学会誌, 9 (1967), 2, p. 58.
- 6) 日本機械学会編: 伝熱工学資料 (1965), p. 210.
- 7) Berman, R.: Proc. Phys. Soc. (London), A 65 (1952), p. 1029.
- 8) 日本鋳物工業会編: 鋳鉄の材質 (1965), p. 131, コロナ社.

- 9) Söhnchen, E.: *Arch. Eisenhüttenwes.* 8 (1934), p. 223.
- 10) 日本金属学会編: 金属データブック (昭49), p. 13, 丸善.
- 11) Hamilton, R. L., Crosser, O. K.: *I & EC Fundamentals.* 1 (1962), 3, p. 187.
- 12) DeHoff, R. T., Rhines, F. N.: *Quantitative Microscopy* (1968), p. 151, McGraw Hill.
- 13) 8) に同じ, p. 22.
- 14) 12) に同じ, p. 77.