

溶融金属-チル間の伝熱係数の測定

論文

鈴木俊夫*・宮田保教*²・佐久田博司*・太田睦彦*³

Measurement of Heat Transfer Coefficient between Melt and Chill

Toshio SUZUKI, Yasunori MIYATA, Hiroshi SAKUTA and Mutuhiko OHTA

Synopsis:

A method for the measurement of the heat transfer coefficient between melt and chill during rapid solidification at about 10^3 °C/s is proposed. Melt of tin with different superheat was dropped and solidified on a cylindrical chill of brass, stainless steel, nickel or chromium plated brass. Average values of the solidification time and the thickness of samples are obtained for each superheat, and then they are extrapolated to zero superheat.

By using these data at zero superheat, the value of heat transfer coefficient for each chill is calculated analytically. The obtained values for chill of brass, stainless steel, chromium plated brass and nickel plated brass are 0.70, 0.28, 0.39 and 0.33 cal/cm² °C/s, respectively. It is shown that the heat transfer coefficient does not depend on the thermal properties of chill materials but presumably on the wettability between melt and chill.

1. 緒 言

近年、急冷凝固薄帯製造や薄板連铸機など急速凝固を利用するプロセスの開発が著しい。これら急速凝固過程の解析では溶融金属-鋳型の伝熱係数が重要な意味を持つが、その報告例は少ない^{1)~3)}。また、その実験条件も冷却速度にして 10^4 — 10^7 °C/sであり、現在開発の進められている急速凝固プロセスに対するものとしては大きい。さらに、これらの測定では凝固以前、凝固後の状態の区分が明確でないなど凝固解析に適用する上での問題点も指摘できる。

そこで、本研究では、急速凝固プロセスにおける代表的な 10^3 °C/s 程度の冷却速度域における溶湯-鋳型間の伝熱係数の測定法を検討した。そして、異なる過熱度を持つ試料の凝固時間および凝固厚みを測定し、その値の過熱度 0 への外挿値より溶湯-チル間の伝熱係数を算出した。

2. 実験方法

2-1 実験方法

本実験では、供試材として 99.8 % のすずを用いた。試料の冷却速度を 10^3 °C/s、試料凝固厚みを 0.4 mm 程度にするために、融解した試料をチル上へ自然落下させた。試料約 4 g を ϕ 100 mm の平板チルへ滴下させた予備実験の結果では、チル表面上で溶湯が流動する間の温度降下が著しく、測定した凝固時間および試料厚みのばらつきが極めて大きかった。そこで、溶湯のチル上での流動の影響を減少させるため、チルの接面積を減らすことにより余分な溶湯を側面に落下させるとともに試料重量も約 2 g と減少させた。この改良チルの形状は直径 6 mm、高さ 30 mm の円柱形で、チル材としては、黄銅、SUS 304 ステンレス鋼、クロムめつきあるいはニッケルめつきを施した黄銅の 4 種類とした。なお、クロムおよびニッケルめつき厚さは、おのおの 6 μ m と 3 μ m であった。

Fig. 1 に、実験装置の概略図を示す。装置加熱炉で試

昭和 61 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1986)

* 長岡技術科学大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The Technological University of Nagaoka, 1603-1 Nagamine Kamitomioka-cho Nagaoka 940-21)

*² 長岡技術科学大学工学部 理博 (Faculty of Engineering, The Technological University of Nagaoka)

*³ 長岡技術科学大学大学院 (現: セイコーエプソン(株)) (Graduate School, The Technological University of Nagaoka, Now Seiko Epson Corp.)

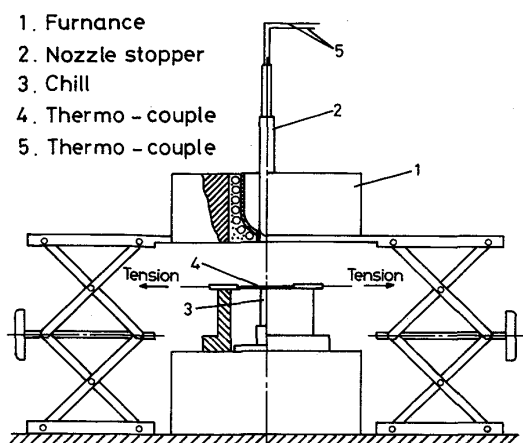


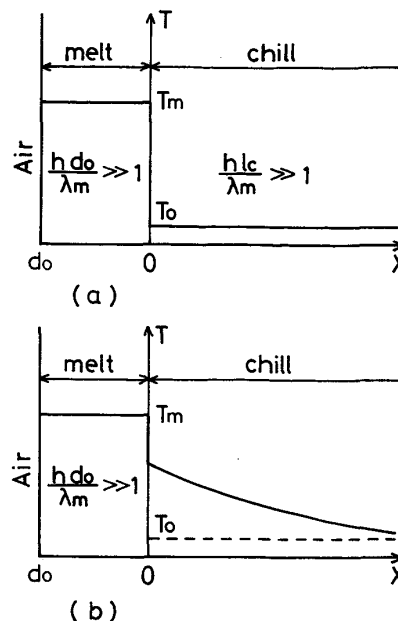
Fig. 1. Schematic drawing of experimental set-up.

料を融解, 所定の滴下温度に保持後, チル上約 0.2 mm に設置した熱電対 (クロメル-アルメル熱電対, 直径 0.1 mm) の接点上に試料を滴下, 急速凝固させた. この時の滴下温度は, 300, 400, 500°C (過熱度 68.1, 168.1, 268.1°C) である. 熱電対の応答性を高めるために, 熱電対溶接点部を光学顕微鏡で観察しながら $\phi 0.1$ mm 程度に削るとともに, 溶湯衝突時の熱電対の振れを抑制するために, その特性が変わらない程度にわずかな張力を与えた. 熱電対の起電力変化はトランジェントメモリーに記憶させた後 (サンプリング周期 100 μ s), ペンレコーダーに出力させた. 得られた冷却曲線より各試料の最高温度, 最高温度到達時間および凝固時間を求めた. なお, 冷却曲線では過冷却は認められなかったため, 凝固時間は試料温度が融点に達するまでの時間とした.

実験後の試料を樹脂込めし, 研磨面が熱電対と垂直になるように研磨し, 熱電対接点部の試料断面を顕微鏡観察した. これより, 試料底部から熱電対上端までの厚み (以下, 凝固厚みと称す) を測定するとともに, 試料と熱電対の接触状態も観察した.

2.2 解析方法

溶湯に過熱度がある場合, 溶湯がチルに接触してから凝固する間の溶湯の冷却過程を予測するのは容易でない. そこで, 異なる過熱度での凝固時間および凝固厚みの平均値を求め, これを一次回帰分析により過熱度 0 への外挿値を求めた. この過熱度 0 に外挿した凝固時間 (試料の潜熱だけがチルへ移動する時間) および凝固厚み (過熱度 0 での粘性などにより決まる値) を用い, 伝熱係数を解析的に算出した. 一般に試料の Biot 数が小さい場合には, 試料の熱抵抗は無視できる^{4)~8)}. 予備実験で求めた伝熱係数および試料厚みより算出した試料の Biot



(a) Without thermal resistance in melt and chill
(b) With thermal resistance in chill

Fig. 2. Analytical models.

Table 1. Physical properties used for analysis.

Material	ρ [g/cm ³]	C_p [cal/g·°C]	λ [cal/cm·°C·s]	ΔH_f [cal/g]	T_m [°C]
Tin (liquid)	6.49	0.063	0.079	13.82	231.9
Tin (solid)	7.28	0.0559	0.1528		
Brass	8.56	0.092	0.236	—	—
Stainless	7.82	0.118	0.039	—	—
Chromium	7.1	0.1	0.1597	—	—
Nickel	8.9	0.105	0.214	—	—

数は 0.02 程度であつたので, 試料内の熱抵抗は無視した. また, 試料上面での冷却はそれが空気の対流伝熱であり, 実験時間も短いことから無視した.

これらの仮定のもとで, 試料の凝固過程を Newtonian 冷却条件下の一次元凝固問題として解析した. その解析モデルを Fig. 2 に示す. Fig. 2 (a) はチルの熱抵抗は無視した場合の解析モデルである. この時の伝熱係数は, (1) 式より算出できる.

$$h_0^{(1)} = \frac{\rho_m \cdot d_0 \cdot \Delta H_f}{\Delta t_0 \cdot (T_m - T_0)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 2 (b) はチルの熱抵抗を考慮したモデルであるが, チルを半無限とすると Newtonian 冷却される固体の解析解を用いて⁹⁾ 伝熱係数は次式で算出できる (Appendix 参照).

$$h_0^{(2)} \left\{ \frac{e^{H^2 \alpha_c \Delta t_0}}{H^2 \alpha_c} \operatorname{erfc}(H \sqrt{\alpha_c \Delta t_0}) - \frac{1}{H^2 \alpha_c} - \frac{2\sqrt{\Delta t_0}}{H \sqrt{\alpha_c \pi}} \right\} = \frac{\rho_m \cdot d_0 \cdot \Delta H_f}{T_m - T_0} \quad \dots (2)$$

ここで、 $H = h_0^{(2)}/\lambda_c$ 、 $\operatorname{erfc} x = \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi$ GAUSS の誤差関数。なお、解析に用いた物性値を Table. 1 に示す。

3. 実験結果

3-1 凝固時間および凝固厚みの測定結果

Fig. 3 は、黄銅チルを用いた実験結果の一例で、滴下温度 400 °C (過熱度 68.1 °C) における凝固時間と凝固厚みの関係を示す。測定されたデータのばらつきは大きい、全体として破線で示すくさび形の領域に分布している。また、これらのデータは、凝固時間が短く凝固厚みも小さいもの (図中○記号の集まる領域 A)、凝固厚みは小さいが凝固時間が長いもの (△記号の領域 B)、凝固時間は短いが凝固厚みが大きなもの (▲記号の領域 C) に大別できる。

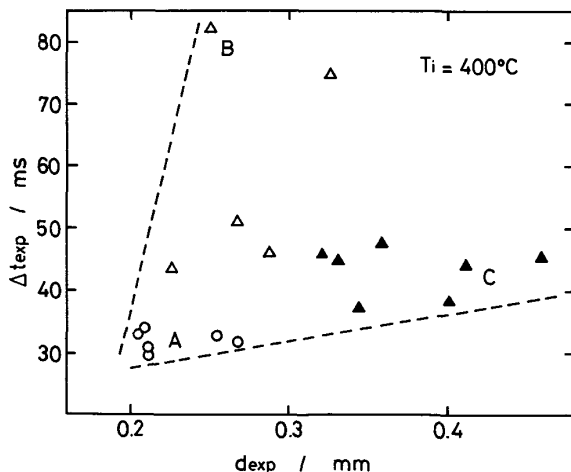
Fig. 4 は、Fig. 3 中の A, B, C に分類された試料の典型的な冷却曲線の例を示したものである。図中の各冷却曲線を比較すると、C の曲線は初期の立ち上がりが A の曲線に比べて遅い。また、B の曲線は立ち上がりは A の曲線にほぼ等しいが、A や C の曲線に比べて最高温度が高く、凝固時間も長い。A の曲線はこれらの曲線に比べ立ち上がりも早く、最高温度に達した後すみやかに温度

が低下している。

Photo. 1 は、Fig. 3 で A, B, C に分類された試料の代表的な断面写真を示す。A の試料では熱電対と試料の接触状態が良く、断面形状も熱電対を中心にほぼ対称となつている。これは、溶湯が熱電対接点に落下してから両側に広がったことを示している。これに対し、B の試料では試料厚みが左右で大きく異なり、試料が不連続に落下した段注ぎの状態を呈している。また、熱電対とすずの間にはエアギャップが形成されている。C の試料ではその断面がくさび状であることから、溶湯がチルの端部に落下し、側方から熱電対位置に流れて凝固したと考えられる。また、B の試料と同様に、熱電対とすずの間にエアギャップが認められる。

これらの試料断面の観察結果より、Fig. 3 に示された冷却曲線の特徴は次のように理解できる。まず、Fig. 3 の B の冷却曲線で示される試料では、段注ぎによる過剰な熱流入により最高温度が高く、エアギャップ形成によつて測定された凝固時間も長くなる。また、C の冷却曲線では、溶湯が直接熱電対接点に落下しなかつたために温度の立ち上がりが鈍く、エアギャップのために測定された凝固時間が長くなつたと考えられる。これに対して、A のような冷却曲線は試料落下位置が適正で、熱電対の接触も十分良い場合のものと考えられる。

これらのことより、Fig. 3 の例で示された凝固時間や凝固厚みのばらつきは、試料と熱電対の接触状態や熱電



A (○): Without air-gap between melt and thermocouple
B (△): With air-gap by discontinuous pouring
C (▲): With air-gap by miss positioning of melt drop

Fig. 3. Solidification time vs. solidification thickness (brass chill). Data are classified into three groups of A, B and C by observing their cross sections and cooling curves.

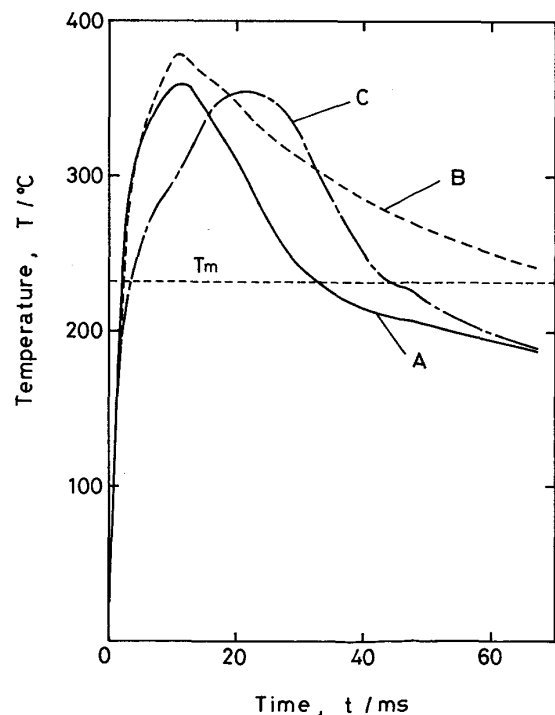
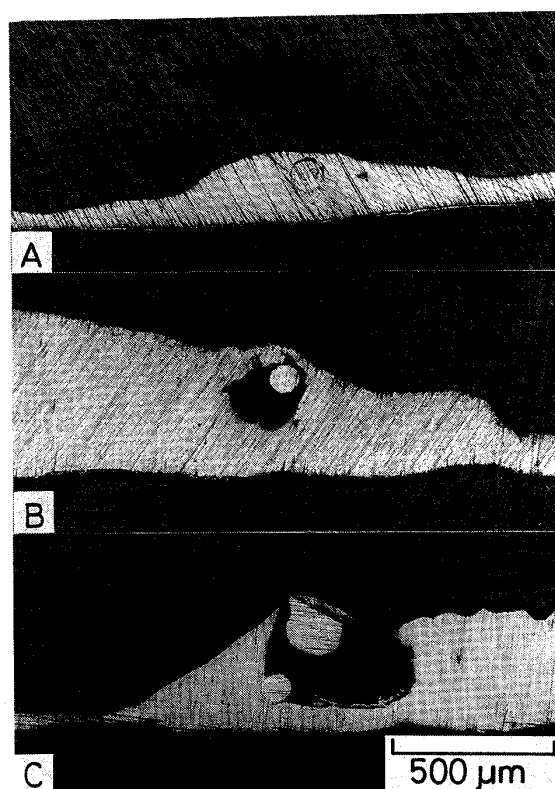


Fig. 4. Typical cooling curves. Symbols of A, B and C corresponds to those in Fig. 3.

対に対する試料の落下位置の変動などが原因であろう。試料と熱電対の接触状態が良く、試料形状が熱電対を中心にはほぼ左右対称であるものは、Fig. 3 中の A で表したデータのようにくさび形領域の先端部（凝固時間、凝固厚みともに小さい。）に集まり測定値のばらつきも小さくなる。

以上のように、試料断面の観察および冷却曲線の分類により測定データのばらつきを減少させることができ、



A: Without air-gap between melt and thermocouple
B: With air-gap by discontinuous pouring
C: With air-gap by miss positioning of melt drop

Photo. 1. The cross sections of specimens corresponding to the curves in Fig. 4.

本研究では、Fig. 3 の A に属するようなデータの平均値をその過熱度における凝固時間および凝固厚みとした。同様の処理を各チル、各過熱度での実験について行つた。その測定結果を Table 2 に示す。

各チルを用いた実験の結果より、凝固時間および凝固厚みを過熱度に対してプロットしたものを、Fig. 5～Fig. 8 に示す。これらの図より明らかなように、過熱度と凝固時間は明確に正の相関を示し、過熱度の減少につれ凝固時間も減少する。これに対し、過熱度と凝固厚さの関係では、そのような関係は明確でない。これは、過熱度による凝固厚みの変化そのものが小さいこととともに、熱電対の下部への溶湯の流入が溶湯とチルのぬれ性や溶湯の粘性によつても影響されるためである。

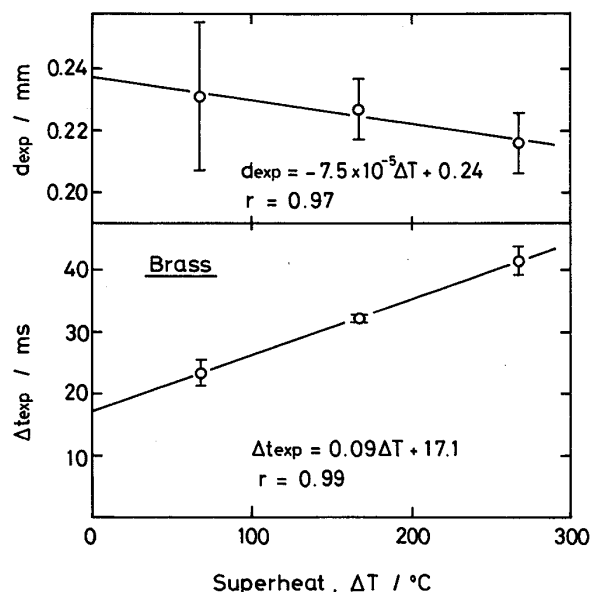


Fig. 5. Solidification time and thickness vs. superheat (brass chill).

Table 2. Experimental results of solidification time and solidification thickness.

Chill		Initial Temperature			Extrapolated values
		300°C	400°C	500°C	
Brass	$\Delta t_{exp} \pm \sigma$	23.4 ± 2.0	32.2 ± 0.5	41.6 ± 2.2	17.1
	$d_{exp} \pm \sigma$	0.231 ± 0.024	0.227 ± 0.010	0.216 ± 0.010	0.237
Stainless	$\Delta t_{exp} \pm \sigma$	40.4 ± 3.7	62.9 ± 3.2	81.7 ± 9.5	27.0
	$d_{exp} \pm \sigma$	0.169 ± 0.005	0.197 ± 0.017	0.227 ± 0.024	0.149
Cr plated Brass	$\Delta t_{exp} \pm \sigma$	30.3 ± 1.1	36.7 ± 1.8	46.0 ± 1.2	24.5
	$d_{exp} \pm \sigma$	0.182 ± 0.011	0.155 ± 0.015	0.144 ± 0.014	0.192
Ni plated Brass	$\Delta t_{exp} \pm \sigma$	29.6 ± 1.2	34.8 ± 2.6	47.3 ± 2.2	22.4
	$d_{exp} \pm \sigma$	0.165 ± 0.005	0.164 ± 0.009	0.179 ± 0.006	0.158

Δt_{exp} (ms) d_{exp} (mm) σ : Standard deviation

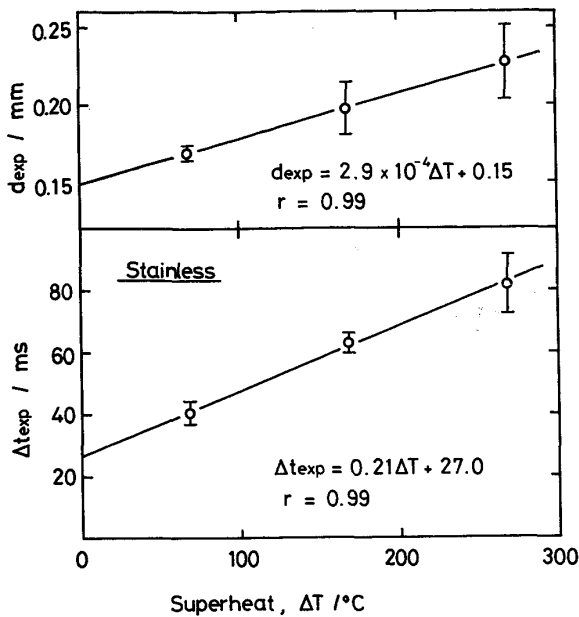


Fig. 6. Solidification time and thickness vs. superheat (stainless steel chill).

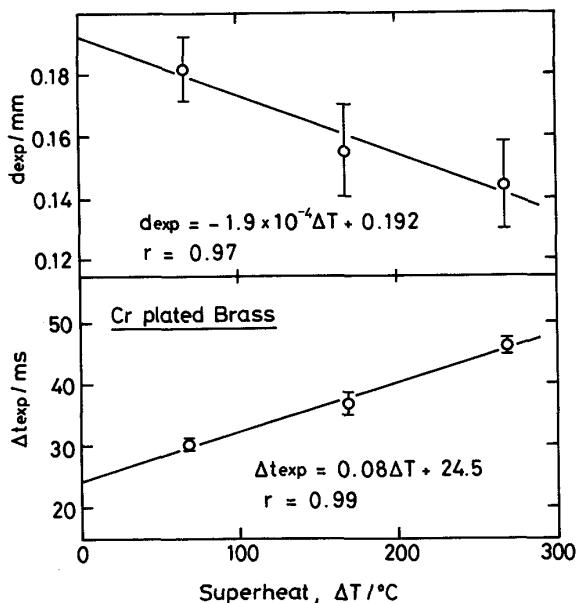


Fig. 7. Solidification time and thickness vs. superheat (chromium plated brass chill).

3.2 伝熱係数の算出結果

(1)式および(2)式より算出された各チルの伝熱係数およびその値より求めた試料の Biot 数を Table 3 にまとめて示す。この結果によれば、(1)式で算出された試料の Biot 数は 0.02~0.09 と小さく、試料の熱抵抗を無視した本解析はほぼ妥当であったといえよう。また、求められた伝熱係数はステンレスと黄銅で大きく異なるほか、黄銅表面に数 μm のめつきを施することによつ

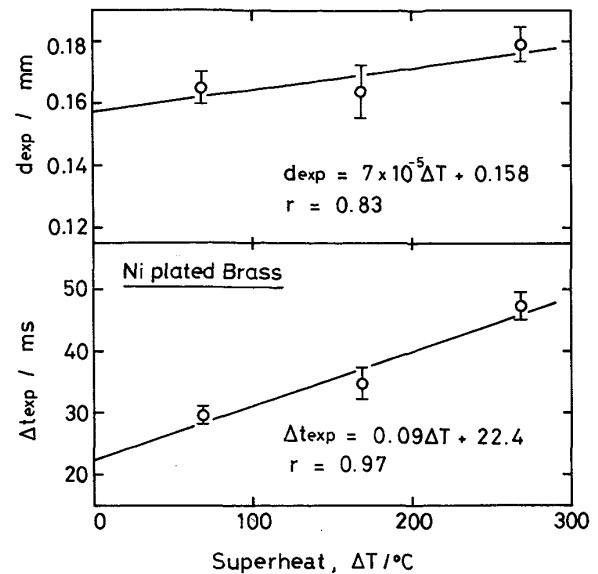


Fig. 8. Solidification time and thickness vs. superheat (nickel plated brass chill).

Table 3. Determined values of heat transfer coefficient, h_0 , and Biot number, Bi .

Chill	Equation	(1)	(2)
Brass	h_0	0.60	0.70
	Bi	0.09	0.11
Stainless	h_0	0.24	0.28
	Bi	0.02	0.03
Cr plated brass	h_0	0.34	0.39
	Bi	0.04	0.05
Ni plated Brass	h_0	0.31	0.33
	Bi	0.03	0.03

h_0 in $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

てもその値が変化することがわかる。さらに、(1)式より算出した熱伝達係数と(2)式より算出した伝熱係数の差は、高々 17% であり、溶湯-チル間の伝熱係数はチルの熱抵抗あるいはチル材の熱伝導率に依存していないと考えられる。

実際、黄銅に施したクロムおよびニッケルめつき層の熱抵抗を伝熱係数から算出される総括界面抵抗と比較すると、めつき層の熱抵抗は総括界面抵抗の 0.07% 程度と極めて小さい。従つて、このめつき層の熱抵抗を無視すれば、これらのチルの熱抵抗は黄銅のものと変わらず、溶湯-チル間の伝熱係数はチルめつき厚の熱伝導率に直接影響を受けていないことになる。そして、その値を支配する因子としては溶湯とチル表面とのぬれ性などの可能性が挙げられよう。

なお、得られた伝熱係数と報告されている値の比較を

Table 4. Heat transfer coefficient obtained by different researchers.

	Heat transfer coefficient (cal/cm ² ·°C·s)	Melt	Substrate	Technique	Cooling rate (°C/s)
HARBUR et al. ¹⁾	4.4~5.0	Al Pb Sn-Pb	Cu	Piston-Anvil	6.9×10 ⁵ ~1.2×10 ⁶
DAVIES et al. ²⁾	2.2	Al-Cu Al-Si	Steel	Single roll	9×10 ⁵ ~10 ⁷
FRYKENDAHL ³⁾	0.45~1.5	Fe-alloy	Ag	Melt drop	1.8×10 ⁴ ~6.3×10 ⁴
Present authors	0.28~0.7	Sn	Brass Stainless Ni/Cr plated brass	Melt drop	1.7×10 ³ ~6.4×10 ³

Table 4 に示すが、求められる伝熱係数は試料の冷却方法あるいは冷却速度により異なることがわかる。

4. 考 察

本研究では、各過熱度での凝固時間および凝固厚さを過熱度 0 へ外挿し、その値を用いて伝熱係数を算出した。この方法の問題点として熱電対の応答性が挙げられるほか、過熱度を持つ試料の簡便な取扱い方法も検討に値する。これらの問題点について、以下にその考察を述べる。

4.1 熱電対の応答性

熱電対の応答性を評価するために、溶湯-熱電対間の伝熱係数が必要となるが、以下の方法でその値を算出した。Fig. 1 に示した装置のチルの代わりに断熱材（石綿）を用い、チルへの滴下実験と同様な手順で溶湯の温度変化を測定した。得られた曲線より溶湯温度が滴下温度の 90% になった時の時間を応答時間 t_r として求めた。この応答時間に対する溶湯-熱電対間の熱伝達係数 h_t は、熱電対内部の熱抵抗を無視すると、次式より算出できる。

$$h_t = -\frac{R_t \cdot C_{pt} \cdot \rho_t}{2t_r} \ln \left(\frac{0.1 T_i}{T_i - T_0} \right) \dots \dots \dots (3)$$

上式より求めた溶湯-熱電対間の伝熱係数は 0.56 (cal/cm²·°C·s) となる。

これとは別に、本実験で得られた冷却曲線より求めた最高温度および最高温度到達時間のおおのの平均値を用いて(3)式により伝熱係数を求めた結果、溶湯-熱電対間の伝熱係数は、0.49 (cal/cm²·°C·s) となった。この値は前述の 0.56 (cal/cm²·°C·s) よりも小さいが、これはチル上での溶湯の冷却の影響を受けるためである。黄銅チルおよびアスベスト上に溶湯を滴下させた場合の熱電対の加熱曲線を Fig. 9 に示すが、両者の立ち上がりはほぼ等しく、溶湯-熱電対間の伝熱係数の値としては 0.56 (cal/cm²·°C·s) が妥当と考えられる。

熱電対の応答曲線を計算するために、後述のように溶湯の冷却過程を仮定した、各滴下温度において仮定した

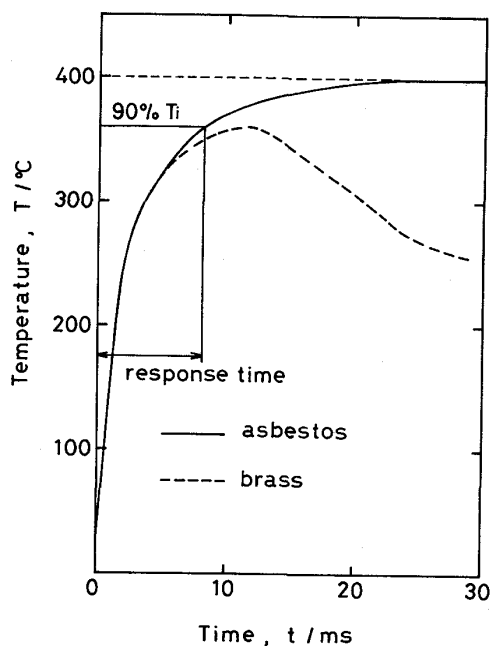


Fig. 9. Response curves of a thermocouple.

冷却曲線による凝固時間 Δt_{mod} と、前述の溶湯-熱電対間伝熱係数を用い、仮定した冷却曲線に対する熱電対の応答曲線より求めた凝固時間 Δt_{cal} を比較した。この Δt_{cal} と Δt_{mod} の差は、溶湯の初期温度が 300, 400, 500 °C の場合で高々 1.8% であつた。

一方、本実験で得られた滴下温度 300, 400 および 500 °C での凝固時間に対する標準偏差の平均は凝固時間のおおのの ± 6.4 , ± 4.8 , $\pm 6.2\%$ であり、 Δt_{mod} と Δt_{cal} の差より大きい。このことから、実測した凝固時間のばらつきは試料の落下状態などによるもので、熱電対の応答性に起因する凝固時間測定の誤差は無視できる。

4.2 過熱度の取扱い

各過熱度での溶湯の冷却状態が予測しにくく、凝固時間および凝固厚みの過熱度 0 へ外挿を試みた。ここでは、溶湯の冷却曲線を仮定し、これに対する熱電対の応答曲

線を計算し、これをもとに、溶湯の過熱度の取扱いや伝熱係数への過熱度の影響を検討した。

過熱度を持つ溶湯を解析的に取り扱うために、溶湯の冷却曲線を次のような区間に分けられると仮定した。

時間 step I: 滴下溶湯のチル表面位置通過時間 (溶湯先端がチルに接し、後端がチル表面を流れさるまでの時間)。この間、溶湯は滴下温度を保つ。この区間の時間は、本実験で得られた最高温度到達時間の平均値より求められ、各滴下温度とも 12 (ms) であった。

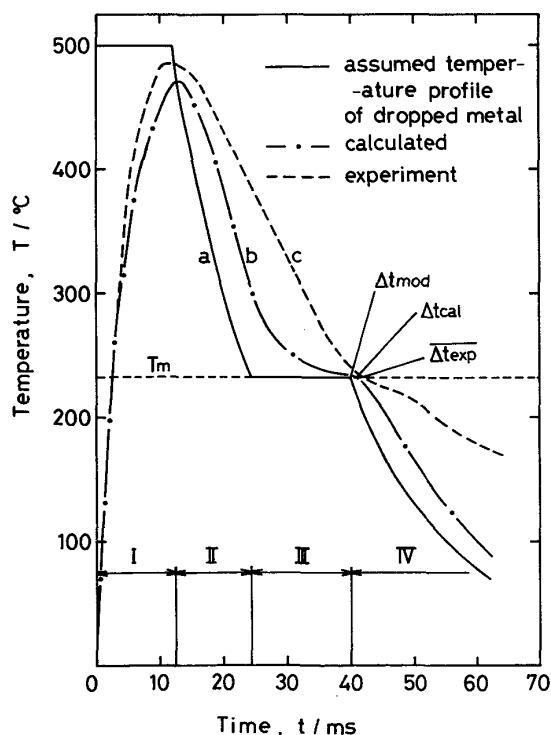
時間 step II: 滴下温度から融点まで冷却される。

時間 step III: 融点に達してから凝固終了までの時間。この間の溶湯温度は融点に保たれる。

時間 step IV: 固相の冷却。

また、熱電対の応答曲線の計算では、熱電対は円柱であり、熱電対内部の熱伝導は無視できると仮定した。これらの仮定をもとに、過熱度を持つ溶湯の冷却曲線に対する熱電対の応答曲線を計算した。なお、試料厚み、溶湯-チル間の伝熱係数は前項で求めた値を用いた。

Fig. 10 に仮定した冷却曲線、これを基に計算した熱電対の応答曲線および実験で得た冷却曲線を示す。これは、黄銅チルに対し滴下温度は 500 °C で試料を滴下した場合であるが、実験とモデルの一致は悪く、滴下溶湯の冷却過程の推定が困難なことを示している。ただ、求



a: Assumed temperature profile of dropped melt
b: Calculated cooling curve of thermocouple with interface thermal resistance
c: Experimental cooling curve with corresponding conditions

Fig. 10. Comparison of cooling curves.

められた凝固時間の差はさほど大きくない。

計算した応答曲線より求めた凝固時間 Δt_{cal} と実験より求めた凝固時間 Δt_{exp} の関係を Fig. 11 に示す。各チルともに凝固時間が短くなるほど、すなわち、過熱度が小さくなるほど両者の差が大きくなる。また、両者の凝固時間が一致するよう溶湯-チル間の伝熱係数を求めることができるが、この値と (1) 式より算出した伝熱係数の値を比較すると過熱度の増加とともにその差は減少していく。これは、低過熱度では溶湯がチル表面を移動している間の冷却が大きく、滴下温度に保たれているという仮定が適切でないためである。さらに、過熱度が低いと落下による溶湯の流動も減少することが予想され、これも溶湯温度の降下に影響するだろう。従つて、低過熱度溶湯のチル面上での入熱や冷却を正確に評価することは困難である。

したがつて、過熱度を持つ溶湯のチル上での冷却過程を一般的に取り扱うモデルを提案することは難しい。したがつて、本方法のように過熱度 0 への外挿値による伝熱係数の算出も実用的意味を有すると言えよう。しかし、過熱度が大きい場合には、 Δt_{cal} と Δt_{exp} の差は相対的に小さく、一定過熱度での凝固時間と凝固厚みを測定することで、溶湯-チル間の伝熱係数の評価が可能であることを示唆している。この場合には、溶湯の熱容量が凝固潜熱と同程度になるような過熱度を与えればよいだろう。

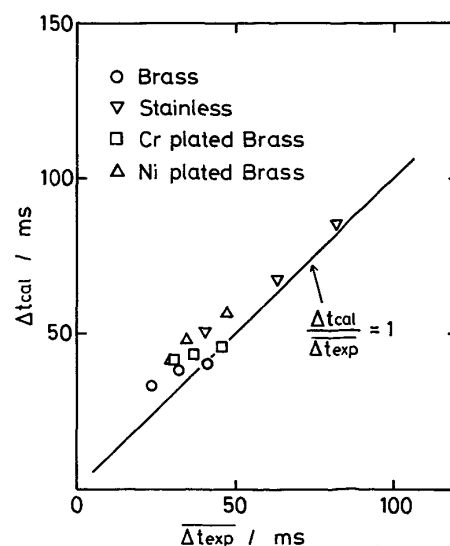


Fig. 11. Calculated solidification time vs. experimental ones.

5. 結 言

すず溶湯小滴をチル上に落下させ、その凝固時間より溶湯-チル間の伝熱係数を決定した。ここでは、各過熱度で測定した凝固時間および凝固厚みを過熱度 0 へ外挿した値より溶湯-チル間の伝熱係数を解析的に求めるとともに、その妥当性を検討し、以下の結論を得た。

(1) 試料断面の観察および冷却曲線の分類を行うと、凝固時間、凝固厚みのデータのばらつきを減少させることができる。

(2) 各過熱度で求めた試料の凝固時間、凝固厚みの値を過熱度 0 に外挿した値により伝熱係数を求める方法は有効である。また、過熱度が大きい場合には、溶湯がチル表面を移動している間滴下温度に保持されるという仮定も近似的に成立する。

(3) 本測定法で算出された溶湯-チル間の伝熱係数は黄銅、ステンレス鋼、クロムまたはニッケルをめつきした黄銅についてそれぞれ、0.70, 0.28, 0.39, 0.33 (cal/cm²・°C・s) であった。また、伝熱係数の値はチル材質の熱伝導率には依存せず、溶湯とチルとのぬれ性に依存することが推論された。

最後に、本研究を遂行するにあたりさまざまな御援助いただきました(株)日立製作所日立研究所第 5 部の新山英輔博士ならびに児玉英世博士に心からの謝意を表します。

Appendix

本文中(2)式の導出を簡単に示す。

一定温度 ($T_m^0 = T_m - T_0$) の試料と境界面で接し、伝熱係数 h_0 を持ち加熱される半無限チル内の温度分布は、文献 9) p. 71 の(1)式により、

$$\frac{T(x, t)}{T_m^0} = \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{\alpha_c t}} - e^{(Hx + H^2 \alpha_c t)} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{\alpha_c t}} + H\sqrt{\alpha_c t} \right\}$$

$$H = h_0 / \lambda_c$$

で与えられる。

凝固時間 Δt_0 に発生する試料の潜熱とチルへの伝熱量を等置すると、

$$\rho_m d_0 \Delta H_f = \int_0^{\Delta t_0} h_0 (T_m^0 - T(0, t)) dt$$

$$= h_0 \int_0^{\Delta t_0} e^{H^2 \alpha_c t} \operatorname{erfc}(H\sqrt{\alpha_c t}) dt$$

となる。これを整理すれば(2)式が得られる。

記 号

Bi : ビオ数; $h \cdot x / \lambda$
 d : 凝固厚み
 h : 伝熱係数
 l : 長さ
 r : 相関係数
 T_0 : 室温 (25°C)
 T_1 : 溶湯の初期温度、滴下温度
 T_m : すずの融点 (231.9°C)
 R : 半径
 ΔH_f : すずの凝固潜熱
 Δt : 凝固時間
 $\bar{\Delta t}$: 凝固時間の平均値
 C_p : 比熱
 α : 温度伝導率; $\lambda / (\rho \cdot C_p)$
 λ : 熱伝導率
 ρ : 密度
 添 字
 c : チル
 cal : 計算値
 exp : 測定値
 l : 液相
 m : 溶湯
 mod : モデル
 0 : 外挿値
 (1): (1)式による値
 (2): (2)式による値

文 献

- 1) D. R. HARBUR, J. W. ANDERSON and W. J. MARAMAN: Trans. TMS. AIME, **245** (1969), p. 1055
- 2) H. A. DAVIES, B. G. LEWIS and I. W. DONALD: Rapid Solidification Processing (1978), p. 78 [Claitor's Pub. Div.]
- 3) B. FRYKENDAHL: Proceeding of the 2nd Japan-Sweden Symposium on Process Metallurgy (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 193
- 4) R. C. RUHL: Mater. Sci. Eng., **1** (1967), p. 313
- 5) H. JONES: Mater. Sci. Eng., **5** (1969/70), p. 297
- 6) 森山昭: 日本金属学会誌, **47** (1977), p. 27
- 7) P. G. BOSWELL: Met. Forum, **2** (1979), p. 40
- 8) P. H. SINGU and R. OZAKI: Metall. Trans., **6A** (1975), p. 33
- 9) H. S. CARSLAW and J. C. JAEGER: Conduction of Heat in Solids' 2nd Ed. (1959), p. 70 [Oxford Uni. Press]