

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

肥 後 温 子* 平 野 美 那 世**

(Atsuko Higo)

(Minase Hirano)

Rate of Temperature Change with Five Pot and Pan Materials according to Bottom Thickness

The rate of temperature change during the processes of heating and air cooling was studied for pots and pans in five different materials with varying bottom thickness. Although the shape and sizes of the pots and pans have differed, remarkable correlation has been observed between the rate of temperature change and bottom thickness, as well as with such thermophysical properties of the materials as the thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity.

The rate of temperature rise during heating decreased with increasing bottom thickness, and did the rate of temperature drop during air cooling. Thick pans took 2 to 5 times longer to heat than thin pans. The rate of temperature rise for pots and pans made from Al-alloy and Cu materials, which have high thermal conductivity, was lower than the rate of temperature drop. On the other hand, the rate of temperature drop was lower than that of temperature rise for the pots and pans in carbon steel, stainless steel and heat-resisting glass materials which have relatively low thermal conductivity. The rate of external temperature rise for the Al-alloy and Cu materials detected at heater outside was much higher than that for the carbon steel, stainless steel and heat-resisting glass materials, while the difference in temperature for the Al-alloy and Cu materials between the heater inside and outside was much smaller than that for the carbon steel, stainless steel and heat-resisting glass materials.

キーワード：鍋 pots and pans；厚み thicknesses；材質 materials；熱物性 thermophysical properties；昇温 temperature rise；降温 temperature drop

実験方法

鍋は熱源の熱を直接、間接に食品に伝える熱媒体の役割をするので、使用する鍋の受熱特性によって調理時間や調理の仕上がり状態に差を生じることは少ない。特に近ごろ、熱源の高火力化が進み、また鍋肌を強熱して食材を短時間で加熱する乾式調理法が多くなったために、鍋の材質や底厚の違いが鍋肌の予加熱時間や食材の加熱状態に敏感に反映される機会が増したように思われる。

調理の現場では、中華料理には鉄鍋、卵焼きには銅鍋などと使い分けられ、その根拠が熱伝導率や比熱に

基づいて推察されることもあるが、実際には鍋の加熱温度と各材質鍋の熱物性値との関係を実証した研究はきわめて少なく、報告されても試験鍋数が少ない¹⁾。調理法に合った鍋選びは加熱調理の基礎であり、エネルギー節約の観点からも重要であるにもかかわらず²⁾、鍋に関する研究は使用テストや商品テストを加えても少なく^{3)~7)}、鍋の使い分けを指導するための裏付け資料、統一見解が無いのが実状である。

そこで、代表的な単一素材鍋であるアルミニウム合金、炭素鋼、ステンレス鋼、銅、耐熱ガラス鍋について底厚の異なる各種鍋をとりそろえ、材質や底厚の違いが鍋肌温度にどのような影響を与えるかを調べる基礎実験をおこなった。

その結果、用いた鍋の形状や大きさが種々異なるにもかかわらず、鍋底の厚みと鍋底の昇降温時間、昇降温速度、温度分布との間にきわめて高い相関性が認め

* 戸板女子短期大学
(Toita Women's Junior College)

** 相模女子大学
(Sagami Women' University)

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

表 1. 使用鍋および対照板の種類と温度測定値の最大, 最小値

分類	試料	底厚 板厚 (δ mm)	底径 板幅 (mm)	昇温時間 30 → 260°C (min)	初期昇温 速度 (°C/min)	降温時間 260 → 100°C (min)	初期降温 速度 (-°C/min)	B 点の初期 昇温速度 (°C/min)	A-B 間の 温度差(°C) A: 260°C	記号: 鍋, 対照板 材質別熱物性値
アルミ・ 銅 系	アルミニウム鍋 9 種	1.2~5.3	157~212	3.6~10.6	80~270	2.0~7.4	75~260	21~74	67~104	Al: ○, ○
	アルミニウム板 4 種	1.0~2.0	160 角	2.6~3.4	160~270	1.7~2.7	170~240	60~80	90~110	λ 200 C 0.9 ρ 2.7
	銅 鍋 6 種	1.0~4.0	135~275	1.8~4.0	220~330	1.8~3.8	160~280	70~110	70~105	Cu: △, △
	銅 板 1 種	0.8	160 角	1.8	340	1.7	290	110	105	λ 390 C 0.4 ρ 8.9
鉄 系	鉄 鍋 7 種	1.2~4.5	152~210	0.7~3.6	115~350	2.0~6.0	68~145	15~42	170~200	Fe: ●, ●
	鉄 板 1 種	1.0	160 角	0.8	360	1.8	180	30	205	λ 50 C 0.5 ρ 7.9
	ステンレス鍋 6 種	1.2~3.4	172~220	0.5~1.2	220~410	1.8~3.0	96~170	15~30	210~225	Su: ▲, ▲
	ステンレス板 2 種	0.8	160 角	0.6	400~420	2.0~2.1	185~190	23~28	210	λ 16 C 0.5 ρ 7.9
セラミッ ク系	耐熱ガラス鍋 4 種	4.2~6.2	124~205	1.6~2.4	105~160	7.4~10.9	52~75	8~12	207~230	Gl: ■, ■
	耐熱ガラス板 1 種	4.0	180 角	1.5	160	6.2	70	8	200	λ 3.5 C 0.8 ρ 2.5

注) ①鍋と対照板の種類, 各材質ごとの温度測定値の最小値~最大値を示す。各被検体の平均値 $\pm$ S. D. ($n=4\sim6$) は図 3~図 8 参照。

②鍋の形状はアルミ: 中深 6 種・深 3 種, 銅: 浅 3 種・中深 3 種, 鉄: 浅 6 種・中深 1 種, ステンレス: 浅 3 種・中深 3 種, 耐熱ガラス: 浅 3 種・中深 1 種。

③A 点はヒーター上, B 点は A 点より 10cm 隔てた測定点の温度 (図 1 参照)。以下 A 点の昇温時間 t_1 および降温時間 t_2 , A 点の昇温速度 V_{a1} および降温速度 V_{a2} , B 点の昇温速度 V_b , A-B 点の温度差 ΔT の略記号を用いる。

④物性値は近似値。 λ : 熱伝導率 ($W/m\cdot K$), C: 比熱 ($10^3 m^2/s^2\cdot K$), ρ : 密度 ($10^3 kg/m^3$)。

られ, またそれら測定値と鍋材質の熱伝導率, 熱容量, 熱拡散率などとの間にも密接な関係があることがわかった。鍋の材質, 厚みから鍋底の昇降温状態を予測する関係式も得られたので報告する。

1. 試験鍋

市販鍋の中から鍋底が平らで, 底厚 (δ , mm) の異なるアルミニウム合金 (以下アルミニウム), 銅, 炭素鋼 (鉄鍋と通称するので以下鉄とする), ステンレス鋼 (以下ステンレス), 耐熱ガラスの単一素材鍋各 4~9 種, 合計 32 種をそろえた (表 1 参照)。鍋底厚は 1.0~6.2mm, 鍋底直径は 135~275mm, 形状は浅型 (フライパン, 卵焼器, すきやき鍋など), 中深型 (煮物鍋などの汎用鍋, 無水鍋, 文化鍋, 天ぷら鍋など), 深型 (寸胴鍋, 圧力鍋など) で, 試験鍋の材質と熱伝導率 (λ , $W/m\cdot K$), 比熱 (C, $kJ/kg\cdot K$ または $10^3 m^2/s^2\cdot K$) は次のようである⁸⁾。

①アルミニウム・銅系鍋: アルミニウム鍋 9 種はすべてアルミ合金で, 薄手鍋 3 種には硫酸または蔭酸アルマイト処理されており, 銅鍋 6 種のうち 5 種は内側に錫メッキされた純銅鍋, 底厚 4mm の 1 種は砲金鍋 (Cu 86~90%, Sn 7~9%, Zn 3~5%) であった。Al 合金, Cu の熱伝導率 λ ($W/m\cdot K$) は約 200, 390 で両材質とも大きい, 比熱 C ($10^3 m^2/s^2\cdot K$) は約 0.9, 0.4 で銅がアルミニウムの 1/2 以下である。

②鉄・ステンレス系鍋: 鉄鍋 7 種はすべて炭素鋼, ステンレス鍋 6 種中 4 種は 18-8 または 18-10 (クロム・ニッケル) ステンレス鋼, 残りは 18 (クロム) ステンレス鋼であり, Fe, ステンレスの λ は約 50, 16,

C は約 0.5, 0.5 で, 両素材とも熱伝導率, 比熱が小さい。

③セラミック系鍋: 耐熱ガラス鍋 4 種はすべて結晶化ガラスで, λ 約 3.5, C 約 0.8 と熱伝導率がきわめて小さく比熱が大きい。銅とは対照的な熱物性値をもつ素材である。

2. 対照板

鍋以外に材質および板厚を異にする 9 種類の対照板を用いた (表 1 参照)。アルミニウム板 4 種 (1.0, 1.5, 1.5, 2.0mm) はすべてアルミニウム合金で, 1.5mm の 2 種は硫酸または蔭酸アルマイト処理されている。銅板 1 種 (0.8mm) は純銅, 鋼板 1 種 (鉄板, 1.0mm) は炭素鋼, ステンレス板 2 種 (0.8mm) は 18-8, 18 ステンレス鋼, 耐熱ガラス板 1 種 (4.0mm) は結晶化ガラスであり, 板幅は 160×160mm であった。

3. 加熱器および加熱方法

温度分布が均一で一定の火力が得られる熱源を予備的に調べたところ, ハロゲンヒーターが最もこの条件

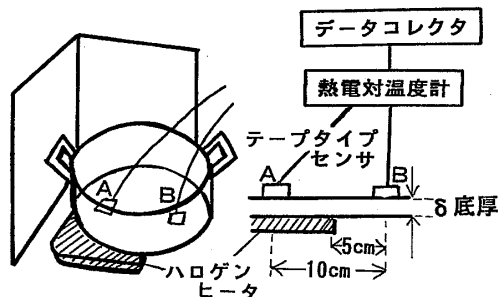


図 1. 接触式温度計による鍋底の温度測定装置

に適していたので、ハロゲンヒーター (2.0kW, 日立クッキングヒーター HTC-D4A) を用いて加熱した。気流の影響を少なくするため鍋およびヒーター周囲を図1のように囲み、フルパワーであらかじめヒーターのみを加熱し火口を安定化した後、鍋を置いて乾熱(空だき)し、下記の方法でくりかえし測温した。

4. 温度測定法および測定部位

テープ状温度センサ (安立計器モデル 529 E) を、鍋底および対照板上面の 10cm 離れた 2 点 A, B に耐熱テープで添付し、A 点がヒーターの端より 5cm 内側の熱源上の温度、B 点がヒーターの端より 5cm 外側の温度を測定するように設定しておき(図1参照)、ヒーター上にある A 点の温度が 280°C まで昇温した時点で、直ちに木板上に降ろして 80°C まで降温させ、鍋底および対照板上面の昇降温時の温度変化を測温用データコレクタ (安立計器 AM-7002) に記憶させた。この際、鍋検体の温度を 4~6 回測定して平均値を求めた。

5. 測定値の検討

昇降温曲線から得られた A 点における 30 → 260°C までの昇温時間 (min), 初期昇温速度 (加熱開始より 1 分以内の速度勾配, °C/min), 260 → 100°C までの降温時間 (min), 260°C からの初期降温速度 (降温開始より 1 分以内の速度勾配, °C/min), B 点における初期昇温速度 (°C/min), A-B 間の温度差 (°C), 昇降温時の速度係数 (k) などの加熱特性値と「底板厚 δ 」との間に高い相関がみられたことを大前提として、鍋の「蓄熱性能」を示す $\delta \cdot C$, $\delta \cdot C \cdot \rho$, 「熱伝播性能」を示す $\delta \cdot \lambda$, $\lambda / (\delta \cdot C \cdot \rho)$, および $\delta \cdot C \cdot \lambda$ との関連を相関図を用いて検討した。

相関に用いた関係式	単位
$\delta \cdot C$ (底板厚 × 比熱)	$m \times m^2/s^2 \cdot K = m^3/s^2 \cdot K$
$\delta \cdot C \cdot \rho$ (単位面積当り熱容量)	$m^3/s^2 \cdot K \times 10^3 kg/m^3 = 10^3 kg/s^2 \cdot K$
$\delta \cdot \lambda$ (底板厚 × 熱伝導率)	$10^{-3} m \times W/m \cdot K = 10^{-3} W/K$
$\delta \cdot C \cdot \lambda$ (底板厚 × 比熱 × 熱伝導率)	$10^{-3} W/K \times 10^3 m^2/s^2 \cdot K = W \cdot m^2/s^2 \cdot K^2$
$\lambda / (\delta \cdot C \cdot \rho)$ (熱拡散率/底板厚)	$m^2/s \div 10^{-3} m = 10^3 m/s$

ここで、 δ は鍋底厚 (mm または $10^{-3}m$), C は比熱 ($10^3 m^2/s^2 \cdot K$), ρ は密度 ($10^3 kg/m^3$), λ は熱伝導率 ($W/m \cdot K$), $\lambda / (C \cdot \rho)$ は熱拡散率 (m^2/s), $W = J/s$ である (表1参照)。

速度係数 (k): 鍋底の加熱時間 (t), 鍋底温度 (T), 気流中で加熱・冷却した場合の鍋底の最終到達温度

(T_{max}) を用い、横軸に t, 縦軸に $(1 - T/T_{max})$ の対数値をプロットし、 $\ln(1 - T/T_{max}) = kt$ より比例係数 k を求めた^{7)9)~10)}。昇温時の T_{max} は、実測値から鉄, ステンレス, 耐熱ガラス鍋の場合に 500°C, アルミニウム鍋の場合に 340°C, 銅鍋の場合に 360°C, 降温時の T_{max} は室温 (30°C) とした。

結果および考察

1. ハロゲンヒーターを用いた場合の 5 種類の鍋材質の昇降温曲線

図1のように、鍋底上面の 2 点 (A, B) に温度センサを添付し、A 点がハロゲンヒーター上の鍋底上面温度を、B 点がヒーターの端より 5cm 外側の鍋底温度を測定するよう設定し、加熱時および放冷時の昇降温値を連続計測した。5 種類の鍋材質の典型的な昇降温曲線と A 点の昇温時間, 初期昇温速度, 降温時間, 初期降温速度, B 点の初期昇温速度, A-B 間の温度差を図2に、材質別に求めた鍋および対照板の昇降温測定値の最大, 最小値を表1に示す。

図2に示したように、鉄, ステンレス, 耐熱ガラス鍋は、下段のアルミニウム, 銅鍋 (図表では Al, Cu, Fe の元素記号, Su, Gl の略記号を使用) に比べて A, B 間の温度差が大きく、また昇温時間が降温時間に比べて明らかに小さいなど、同材質の鍋の昇降温曲線には共通点が多い。鍋の大きさ, 形状, 厚みが種々異なる鍋間でも、5 種類の材質別の特徴がよく現われることがわかった。昇降温曲線から材質別の特徴を引き出すと、次のようになる (表1, 図2参照)。

(1) 加熱時の昇温速度と昇温時間: ヒーター上にある鍋底の温度上昇が速く直線的に昇温する材質と、160~200°C 付近より昇温速度が漸減する材質とがあり、鉄, ステンレス, 耐熱ガラス鍋など熱伝導率の小さい鍋は例外なく前者に、アルミニウム, 銅など熱伝導率の大きい鍋は例外なく後者に属する結果が認められた。そのため、鍋底が 260°C に達するまでの昇温時間 (260~280°C の昇温が不安定なので 260°C とした) は、鉄, ステンレス, 耐熱ガラスなど熱伝導率の小さい鍋では短かく、熱伝導率の大きいアルミニウム, 銅鍋では長くなった。

(2) 放冷時の降温速度と降温時間: アルミニウム, 銅, ステンレス鍋は降温速度がやや速く、鉄, 耐熱ガラス鍋は降温速度がやや遅い傾向がみられたが、昇温速度ほど明確な差はなかった。

(3) 昇温時間/降温時間比: 鍋材質別に昇温/降温時間比 (底厚を異にする鍋の平均値) を求めると、アル

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

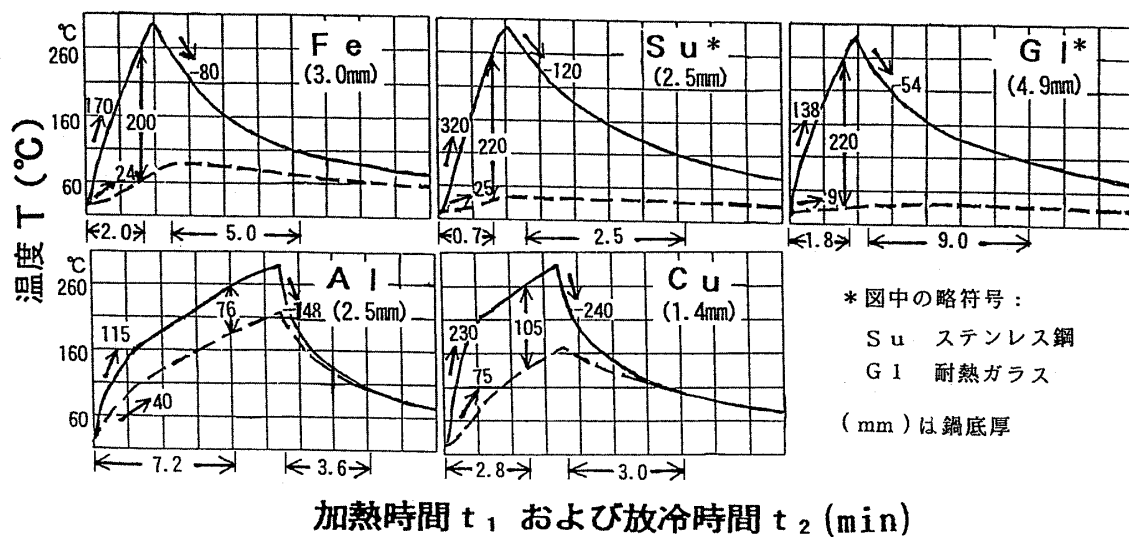


図2. 5種類の鍋材質の昇降温曲線と昇降温測定値

実線はA点、破線はB点における昇降温曲線（図1参照）。

図中の数字はA、B点における初期昇降温速度 V_{a1} ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)、 V_{a2} ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)、 V_b ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)、A (260 $^{\circ}\text{C}$)—B間の温度差 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)。横軸の数字は30→260 $^{\circ}\text{C}$ までの昇温時間 t_1 (min)，および260→100 $^{\circ}\text{C}$ までの降温時間 t_2 (min)。

ミニウム1.4～2.0，銅0.9～1.1，鉄0.3～0.5，ステンレス0.2～0.3，耐熱ガラス約0.2となり，アルミニウム，銅鍋は昇温/降温時間比が大きく，鉄，ステンレス，耐熱ガラス鍋は小さくなった。

(4) ヒーター外にあるB点の昇温速度：熱源から離れたB点の昇温速度は，アルミニウム，銅鍋では明らかに速く，鉄，ステンレス，耐熱ガラス鍋は遅かったが，特に熱伝導率が最も大きい銅鍋の昇温速度は速く，熱伝導率が最も小さい耐熱ガラス鍋は遅かった。

(5) ヒーター上・外における鍋底の温度差：熱伝導率が大きい鍋材質は例外なくA—B間の温度差が小さく，熱伝導率が小さい材質は温度差がきわめて大きかった。

以上(1)～(5)の結果は，鍋の底厚，大きさ，形状が種々異なるにもかかわらず，鍋材質の熱物性値の違いが昇降温曲線に色濃く反映され，鍋底の伝熱挙動に熱伝導率などの熱物性値が影響を与えたことを示すものである。

2-1. 鍋の底厚と昇温時間との関係

図3は，32種類の試験鍋と9種類の対照板について，材質ごとにマークを変え（表1参照），260 $^{\circ}\text{C}$ に達するまでの昇温時間を縦軸に，鍋底厚 δ を横軸にとって昇温時間と底厚間の相関関係を調べたものである。

(1) 鍋の底厚と昇温時間との関係：各鍋材質ごとに昇温時間と鍋底厚 (δ) との間には高い正の相関が認められ， δ が増すほど昇温時間は長くなった（図3左）。各材質の相関係数は，アルミニウム鍋0.845，鉄鍋0.902，耐熱ガラス鍋0.987，ステンレス鍋0.835であ

り，銅鍋は値が不安定で0.691と相関が劣ったものの，フライパンなどの浅鍋と寸胴鍋などの深鍋が混在する大きさや形が不揃いな鍋の間にもかかわらず，鍋底厚に従って昇温値がきわめて規則的に並んだ。

(2) 鍋の材質と昇温時間との関係：ステンレス，鉄，耐熱ガラス鍋（熱伝導率の小さい鍋，黒印）は鍋底厚の割に昇温時間が短く，銅，アルミニウム鍋（熱伝導率の大きい鍋，白印）は昇温時間が長かった（表1参照）。

(3) 対照板を含む相関：対照板を用いて同様の実験を行なった結果，鍋と対照板を合わせた相関はアルミニウム0.853，鉄（鋼）0.904となり，鍋のみの場合と同様に高い相関がみられた（図3右）。この結果は，鍋と対照板とが共に底板厚，材質に従って規則的に昇温したことを示すものである。

(4) 近似式：すべての鍋材質で鍋底厚の影響が大きく，鍋底厚 X と昇温時間 Y との間に線形近似の関係がみられた。この場合，鉄，耐熱ガラス，ステンレス鍋は鍋底厚にほぼ比例して昇温時間が大となり，アルミニウム，銅鍋は薄手でも昇温時間が大となる傾向がみられた。

鍋底厚と昇温時間との関係式に底厚 (X) 1～5mmを代入して加熱時間 (Y) を計算すると，厚手鍋は薄手鍋より昇温時間が2～5倍長く，またアルミニウム鍋は鉄鍋より2～6倍も長くかかることになる。鍋肌の昇温値がそのまま食材をのせた場合の加熱調理時間になるわけではないが，調理の際にどんな鍋を使用するかによって，鍋の昇温時間，消費エネルギー量が異なること

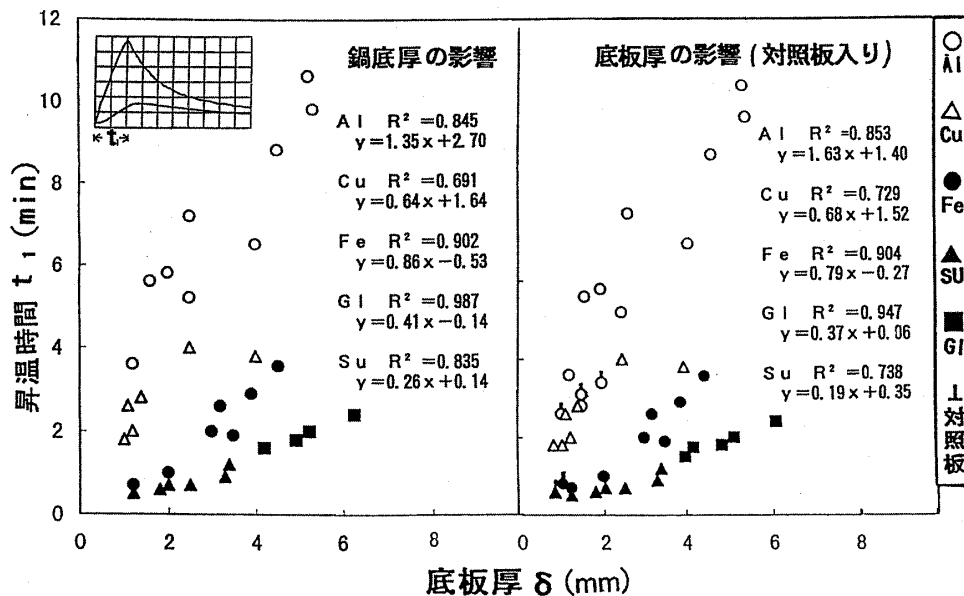


図3. 鍋底および対照板が30→260℃に到達するまでの昇温時間(空だき加熱時)

左: 昇温時間 t_1 - δ (鍋底厚) 間の相関図と測定箇所, 同図の材質別相関係数と線形近似式, 右: 対照板を含む t_1 - δ (鍋底・対照板厚) 間の相関図, 材質別相関係数と線形近似式. 平均値 $\pm$ SD は, Al 2.6~10.6 $\pm$ 0.4~1.0, Cu 1.8~4.0 $\pm$ 0.2~0.5, Fe 0.7~3.6 $\pm$ 0.2~0.3, Su 0.5~1.2 $\pm$ 0.1~0.2, Gl 1.5~2.4 $\pm$ 0.2 (表1参照).

が予想される。

2-2. 鍋材質の熱伝導率, 比熱と昇温時間との関係

一般に鍋の昇温時間, 昇温速度に熱伝導率が影響すると考えられており, 図2の昇温曲線からも熱伝導率が関与していると推察される。そこで, 熱伝導率, 比熱の影響を調べた(図4)。

(1) 昇温時間と熱伝導率との関係: 横軸に底厚 $\times$ 熱伝導率($\delta \cdot \lambda$), 底厚 $\times$ 比熱 $\times$ 熱伝導率($\delta \cdot C \cdot \lambda$)をとって昇温時間との相関を求めると, 図4右のように相関係数が0.552, 0.870と高くなり, 昇温時間 Y と $\delta \cdot \lambda$ 間に近似式 $Y = 0.005X + 1.4$, $\delta \cdot C \cdot \lambda$ 間に $Y = 0.009X + 1.1$ の関係が得られた(図4左右)。この結果は昇温時間と熱伝導率および比熱間に密接な関係があることを示している。

(2) 昇温時間と蓄熱性能との関係: 横軸に底厚 $\times$ 比熱($\delta \cdot C$)をとり, 昇温時間と蓄熱性能との関係を調べると, 図3より若干相関が増す傾向がみられたが, 全試料鍋間の相関は低く, 熱伝導率の異なる材質間の測定値の差が目立った。

図3, 図4において異材質鍋間の昇温時間の違いに底厚, 熱伝導率, 比熱が関与することが明らかになった。本実験に使用した32種類の鍋間で, 昇温時間はステンレス, 耐熱ガラス $\leq$ 鉄 $<$ 銅 $\leq$ アルミニウムの順に長くなり(表1参照), 底厚 $\times$ 比熱 $\times$ 熱伝導率($\delta \cdot C \cdot \lambda$)

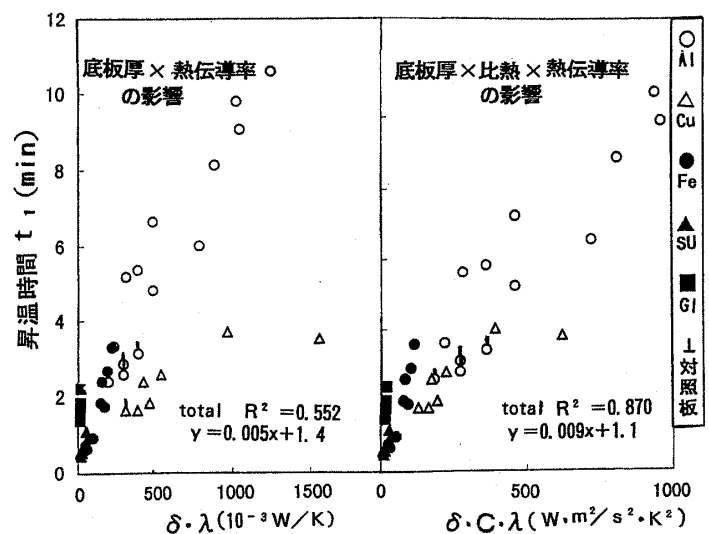


図4. 昇温時間におよぼす熱伝導率, 比熱の影響

左: 昇温時間 t_1 - $\delta \cdot \lambda$ (底板厚 $\times$ 熱伝導率) 相関図と線形近似式による相関係数, 右: t_1 - $\delta \cdot C \cdot \lambda$ (底板厚 $\times$ 比熱 $\times$ 熱伝導率) 相関図と線形近似式による相関係数。

($W \cdot m^2 / s^2 \cdot K^2$) の値もステンレス, 耐熱ガラス10~30 $\leq$ 鉄30~110 $<$ 銅160~640 $\leq$ アルミニウム220~950の順に大きくなった(図4参照)。

3-1. 鍋の底厚, 比熱と初期昇温速度との関係

気流中で鍋を空だきする場合, 昇温速度は刻々と変化して漸減するので, 昇温曲線の初期勾配より求めた初期昇温速度を調べるか, または速度係数を求めて比較することが行なわれている。図5は, 鍋底の初期昇温速度を縦軸に, 底厚(δ)または底厚 $\times$ 比熱($\delta \cdot C$)

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

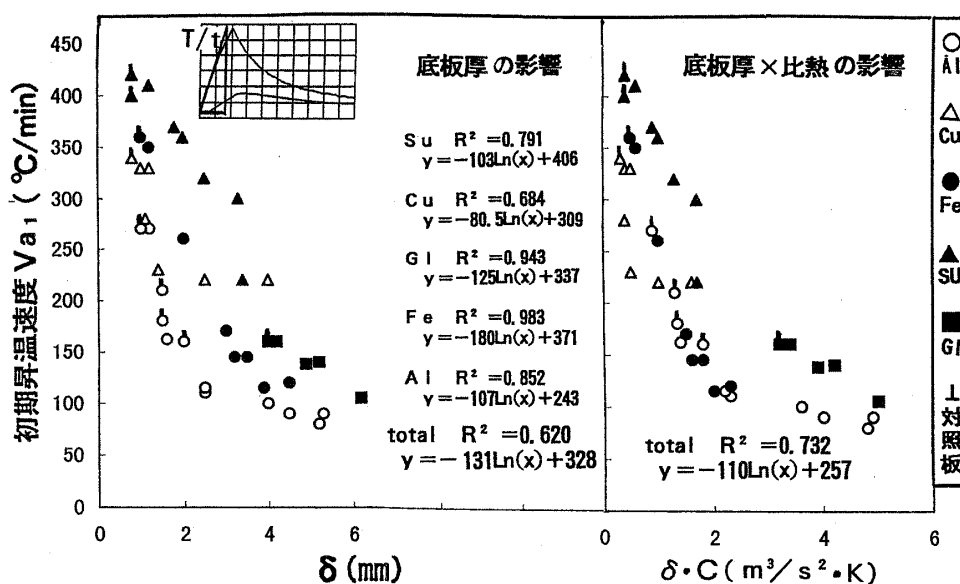


図5. 空だき加熱時における初期昇温速度

左：昇温速度 V_{a1} — δ 間の相関図と測定箇所，同図の材質別相関係数と対数近似式，右： V_{a1} — $\delta \cdot C$ (底板厚×比熱) 相関図と相関係数。平均値±SD は，Al 80~270±10~80，Cu 220~340±15~40，Fe 115~360±15~30，Su 220~420±12~352，GI 105~160±6~10 (表1参照)。

を横軸にとり，両者の相関を調べたものである。

(1) 底厚と初期昇温速度との関係：鍋の材質にかかわらず，すべての試験鍋で δ が増すにつれて初期昇温速度は対数近似式に従って漸減し，底厚が増すほど遅くなった(図5左)。この際，材質別に求めた相関係数はアルミニウム 0.852，鉄(鋼) 0.983 と高く，32 種類の鍋すべてと対照板とを合わせて求めた総相関係数は 0.620，近似式は $Y = -131 \ln(X) + 328$ となり，材質の異なる鍋間において底板厚が増すと昇温速度が遅くなる関係があることがわかった。

(2) 材質と初期昇温速度との関係：初期昇温速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) はステンレス鍋がやや速く，鉄，銅鍋がそれに次ぎ，耐熱ガラス，アルミニウム鍋の昇温速度が遅い傾向がみられたが(表1参照)，底板厚と昇温速度の関係に比べて差が少なかった。

(3) 初期昇温速度と蓄熱性能との関係：底厚×比熱 ($\delta \cdot C$) と昇温速度との関係を求めると，図5右のようにほぼすべての鍋で $\delta \cdot C$ が増すにつれて対数近似式に従って昇温速度が漸減する負の相関がみられ， $\delta \cdot C$ と初期昇温速度との間で求めた相関係数はアルミニウム 0.876，鉄 0.982，鍋と対照板すべてについて求めた総相関係数は 0.732 となった。これは初期昇温速度に蓄熱性能が関係することを示すものである。

空だき加熱時の昇温速度は鍋の底厚が厚くなり，鍋材質の比熱が大きくなるほど遅くなることがわかった。熱供給のある昇温条件では，昇温速度 (dT/dt)，受熱量 (Q_{in})，被加熱物の質量 (m)，比熱 (C) 間に，

$dT/dt = Q_{in}/m \cdot C$ の関係があり，鍋底厚が薄いと $m \cdot C$ が小さいので初期昇温速度が速くなり， δ および $\delta \cdot C$ 間に負の相関がでたものと推察される¹¹⁾¹²⁾。260 $^{\circ}\text{C}$ 付近まで昇温する場合には放熱の影響があるので熱伝導率が大きく関与するが，初期昇温速度のみを比較すると，鍋底厚，比熱，熱容量の影響がはるかに大きいことになる。

3-2. 昇温速度係数

鍋をハロゲンヒーター上で空だきして極限まで昇温した場合，図6上に示したようにアルミニウム，銅鍋は 350 $^{\circ}\text{C}$ 付近から温度上昇が横ばいになり，鉄，ステンレス，耐熱ガラス鍋はヒーター温度である 500 $^{\circ}\text{C}$ 付近で横ばいになる。このように，空冷されて非定常的な熱伝導がおきる場合，鍋底温度 (T)，加熱時間 (t)，物体の最終到達温度 (T_{max}) 間に， $\ln(1 - T/T_{max}) = -kt$ の関係があるとされており，本実験の場合にも横軸に t ，縦軸に $(1 - T/T_{max})$ の対数値をプロットするときれいな直線となった(図6下)。そこで，上記の式が成立したとみなして，直線の傾きより昇温時の速度係数 k を求めると，ステンレス鍋の速度係数が大きく，鉄，銅鍋がそれにつぎ，耐熱ガラス鍋の k が最も小さくなった⁷⁾⁹⁾¹⁰⁾。

昇温時の速度係数 k については，降温時の k と合わせて後でまとめて述べる (図9参照)。

4. 放冷時における鍋底の降温時間と蓄熱性能

一般に鍋の降温時間，降温速度などの蓄熱性能は熱容量と関係が深いと考えられるので，熱源上の鍋板底

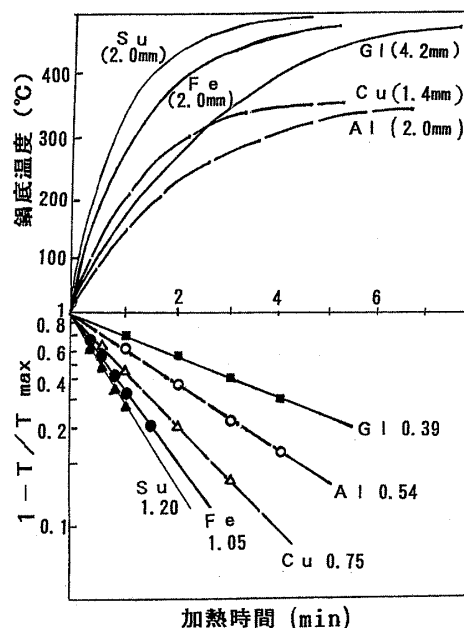


図6. 5種類の鍋材質の昇温時における温度変化

上：鍋底の昇温曲線，(mm) 数値は鍋底厚 δ ，下： $\ln(1-T/T_{\max}) = -kt$ によるプロット，図中の数値は速度係数 K 。

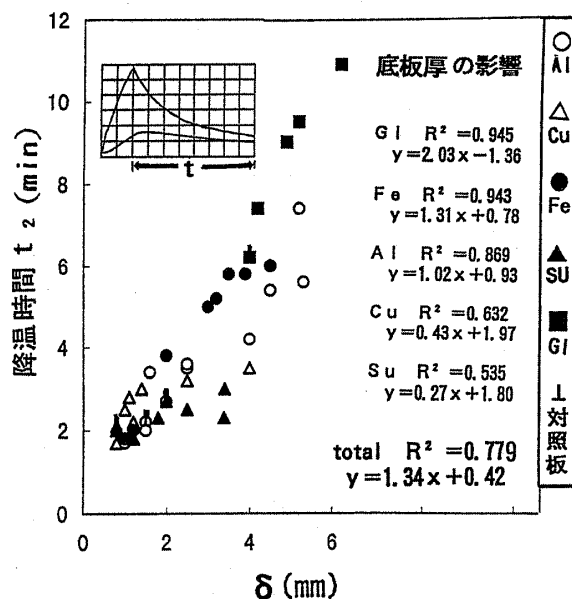
が 280°C に達した時点で，直ちに鍋・板を木板上に移して放冷し蓄熱性を試験した。降温曲線より降温時間 (280°C 付近は誤差が大きいため $260^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}$ の降温時間とした) を求めたところ，図7の結果が得られた。

(1) 鍋底厚と降温時間との関係：鍋底厚 (δ) が増すほど降温時間は長くなり，降温時間と底厚との間に正の相関が認められた。降温時間の短い銅，ステンレスでは相関係数が $0.54 \sim 0.63$ と低めであるが，鉄，耐熱ガラス，アルミニウムの相関係数は $0.87 \sim 0.95$ と高く，またすべての鍋・対照板において降温時間と底板厚の間に総相関係数 0.779 の相関があることがわかった。

(2) 鍋材質と降温時間との関係：図のように薄手鍋の多いステンレス，銅の降温時間は短かく，厚手鍋が多い耐熱ガラスの降温時間は長かった。なお，同じ厚さで比べると熱伝導率の高い材質の方が降温時間がやや短い傾向が認められた。

(3) 降温時間と蓄熱性能との関係：降温時間と底厚 $\times$ 比熱 ($\delta \cdot C$) との間にも， $\delta \cdot C$ が増すにつれ降温時間が増える傾向がみられ， $\delta \cdot C$ と降温時間との間で鍋・対照板すべてについて求めた総相関係数は 0.687 となった (図省略)。

以上の結果は，降温時間に鍋底厚および比熱と関係があることを示すものである。鍋底厚と降温時間との関係式に底厚 (X) を代入して $260^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}$ の降温時

図7. 鍋底および対照板が $260 \rightarrow 100^{\circ}\text{C}$ に達するまでの降温時間

降温時間 $t_2 - \delta$ 間の相関図と測定箇所，同図の材質別相関係数と線形近似式。平均値 $\pm$ SD は，Al $1.7 \sim 7.4 \pm 0.2 \sim 0.6$ ，Cu $1.7 \sim 3.8 \pm 0.1 \sim 0.2$ ，Fe $1.8 \sim 6.0 \pm 1.2 \sim 0.4$ ，Su $1.8 \sim 3.0 \pm 0.1 \sim 0.2$ ，Gl $6.2 \sim 10.9 \pm 0.3 \sim 0.6$ (表1参照)。

間 (Y) を概算すると，厚手鍋は薄手鍋より降温時間が2～3倍長い計算となる。

5. 放冷時における鍋底の初期降温速度

熱源上の鍋および対照板を木板上に移し，温度降下し始めた 260°C より1分以内の降温曲線の勾配より初期降温速度を求めた。図8は鍋と対照板との初期降温速度を縦軸に，底厚 δ を横軸にとり，降温速度と δ 間の相関を調べたものである。

(1) 鍋底厚と初期降温速度との関係：放冷時の初期降温速度は，鍋材質にかかわらずすべての試験鍋で底厚が増すほど遅くなり，対数近似式に従って漸減した。この際，鍋と対照板すべての間で求めた総相関係数は 0.719 ，近似式は $Y = 92 \ln(X) - 222$ となり，底板厚が増すと降温速度が遅くなる関係が材質の異なる鍋間においても成立することがわかった。

(2) 鍋材質と降温速度との関係：鍋の降温速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) は銅 $160 \sim 280$ ，アルミニウム $75 \sim 260$ に対して，鉄 $68 \sim 145$ ，ステンレス $96 \sim 170$ ，耐熱ガラス $52 \sim 75$ となり (表1参照)，熱伝導率が高い材質の降温速度がやや速いところから，熱伝導率が降温速度に影響すると推察される。

(3) 蓄熱性能と初期降温速度との関係：降温速度は単位面積当たりの熱容量 (底厚 $\times$ 比熱 $\times$ 密度， $\delta \cdot C \cdot \rho$) が増すにつれて対数近似式に従って漸減し， $\delta \cdot C \cdot \rho$ と降温速度との間の総相関係数は 0.697 となった。底板

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

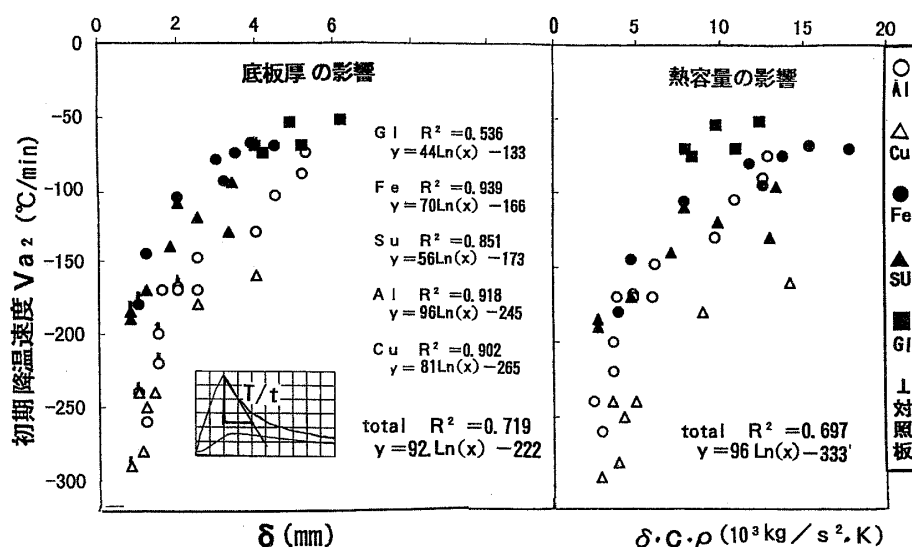


図8. 放冷時における初期降温速度

左：降温速度 V_{a2} — δ 間の相関図と測定箇所，同図の材質別相関係数と対数近似式，右： V_{a2} — $\delta \cdot C \cdot \rho$ 相関図と相関係数。平均値 $\pm$ SD は，Al 75 $\sim$ 260 $\pm$ 12 $\sim$ 30，Cu 160 $\sim$ 290 $\pm$ 12 $\sim$ 40，Fe 68 $\sim$ 180 $\pm$ 8 $\sim$ 15，Su 96 $\sim$ 190 $\pm$ 6 $\sim$ 20，GI 52 $\sim$ 75 $\pm$ 3 $\sim$ 5（表1参照）。

厚のみとの相関係数 0.719 よりやや低いので，底板厚を含めた熱容量が降温速度に影響すると考えるのが妥当であろう。

以上のように鍋の底厚が厚くなり熱容量が大きくなるほど降温速度が遅くなる結果が得られ，降温速度が熱容量などの保温性能に関係する事実がほぼ裏付けられた。鍋底厚と降温速度との関係式に底厚 (X) を代入して 260°C における降温速度 (Y) を計算すると，薄手鍋は厚手鍋より約 3 倍速く降温する計算となる。なお関係式より，熱伝導率が高い銅，アルミニウム鍋は同じ底板厚の鉄鍋より約 2 倍速く降温する計算になるので，熱伝導率の影響も無視できないと考えられる。

降温速度は加熱がストップした時に蓄えられた熱 ($Q_{st} = T \cdot m \cdot C$) が周囲に拡散していく過程を示すものであり，熱容量が多分に影響すると考えられる。また，放熱量が熱伝導率 $\times$ 表面積 ($\lambda \cdot S$) に比例して大きくなることが知られており⁹⁾¹¹⁾，薄く平らな鍋底板表面において熱伝導率が高い材質鍋の方がやや速く降温する結果がみられたものと推察される。

6. 昇降温時の速度係数

昇温時および降温時の速度係数 k と底板厚 (δ)，底板厚 $\times$ 比熱 ($\delta \cdot C$) 間の相関を図9に示した。昇降温時の速度係数は極限温度 T_{max} に達するまでの直線の傾きを使用しており（図6参照），初期昇温速度，初期降温速度より広い時間帯を使って速度係数を求めることができる。

(1) 昇温時の速度係数 k と底板厚との関係：図9上左に昇温時の k と底板厚との関係を示した。図にみ

られるように，対照板を含む全試料間において k と底板厚 δ 間に総相関係数 0.551 の相関がみられた。速度係数 k はアルミニウム 0.30 $\sim$ 0.72，銅 0.75 $\sim$ 1.02，鉄 0.46 $\sim$ 1.20，ステンレス 0.85 $\sim$ 1.35，耐熱ガラス 0.34 $\sim$ 0.50 となり，ステンレスの k が大きく耐熱ガラスの k が小さいのが目立った。

(2) 昇温速度係数 k と蓄熱性能の関係： k と底板厚 $\times$ 比熱 ($\delta \cdot C$) 間には全試料間において総相関係数 0.679 と， δ 間より高い相関がみられ，昇温速度係数に比熱が関与していることがわかった（図9上右）。比熱の小さいステンレス，鉄，銅の k がやや大きく，比熱，熱容量の大きい耐熱ガラス，アルミニウムの k がやや小さい結果は，図5の初期昇温速度の結果と類似しており，蓄熱性能が昇温速度に影響することが昇温速度係数からも裏付けられた。

(3) 降温速度係数 k と底板厚の関係：図9下左のように， k と底板厚 δ 間に総相関係数 0.819 の高い相関がみられ，薄手鍋の多い銅鍋と厚手鍋の多い耐熱ガラス鍋の降温速度係数には 2 $\sim$ 3 倍差があった。この結果は，図8の初期降温速度と同様に底板厚の影響が大きいことを示すものである。

(4) 降温速度係数 k と蓄熱性能の関係： k と底板厚 $\times$ 比熱 ($\delta \cdot C$) 間には総相関係数 0.674 の相関がみられ（図9下右），底板厚 $\times$ 比熱 $\times$ 密度 ($\delta \cdot C \cdot \rho$) 間にも総相関係数の 0.702 の相関がみられた（図省略）。

以上から，鍋の昇降温時の速度係数は鍋底厚，比熱などの蓄熱性能でほぼ説明でき，底厚の影響が特に大きいことが裏付けられた。しかし図のように，熱伝導

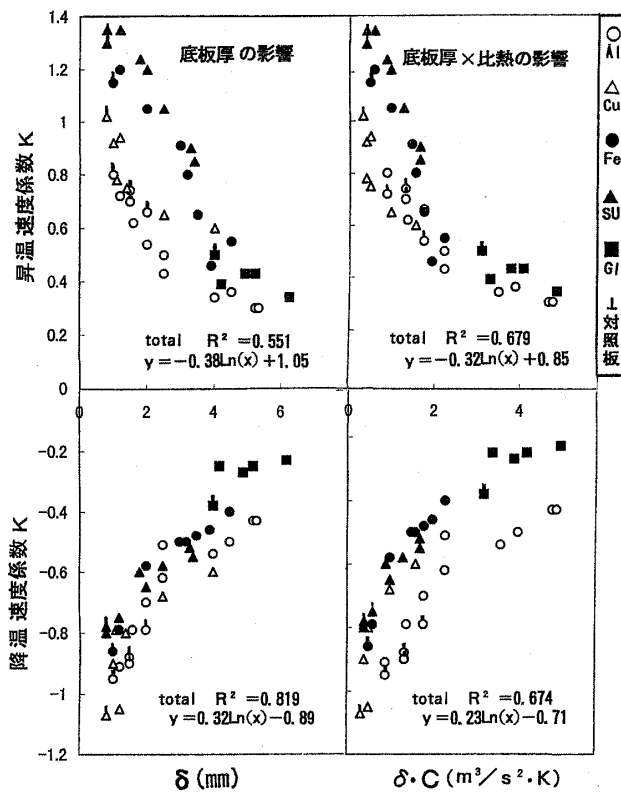


図9. 昇温および降温時の速度係数

上左：昇温時の $K-\delta$ 相関図と対数近似式による相関係数，上右：昇温時の $K-\delta \cdot C$ 相関図と対数近似式による相関係数，下左：降温時の $K-\delta$ 相関図と対数近似式による相関係数，下右：降温時の $K-\delta \cdot C$ 相関図と対数近似式による相関係数。

率の大きい材質（白印）と熱伝導率の小さい材質（黒印）の昇降温挙動に差があり，熱伝導率の関与も無視できないと推察される。

7. 熱源の外における鍋底の昇温速度

ヒーターの熱が熱伝導で伝わる熱源より 5cm 外側の鍋底面の B 点において鍋底温度を測定し（図 1 参照），初期昇温速度と鍋底厚，熱拡散率/底厚（底厚と測定値間に密接な関係が認められたので熱伝播性能として $\lambda/(\delta \cdot C \cdot \rho)$ を用いる）との関係を図 10 に示した。

(1) 鍋底厚と B 点における昇温速度との関係：B 点の初期昇温速度は，ほぼすべての試験鍋で底厚が増すほど遅くなり，対数近似式に従って漸減する負の相関がみられたが（図 10 左），総相関係数は 0.405 と低かった。

(2) 鍋材質と B 点における昇温速度との関係：B 点の初期昇温速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) は熱伝導率の大きい銅，アルミニウム鍋が 70~110，21~74 と速く，熱伝導率の小さい鉄，ステンレス，耐熱ガラス鍋が 15~42，15~30，8~12 と遅くなり，明らかに熱伝導率の影響がみられた。

(3) 熱伝播性能と B 点における昇温速度との関係：熱拡散率/底厚 $[\lambda/(\delta \cdot C \cdot \rho)]$ と B 点の初期昇温速度との関係を求めると，図 10 右のように，ほぼすべての鍋と対照板の間に $\lambda/(\delta \cdot C \cdot \rho)$ が増すにつれて昇温速度が増加し，総相関係数 0.746（対数近似の場合）または 0.900（線形近似の場合）の高い正の相関がみら

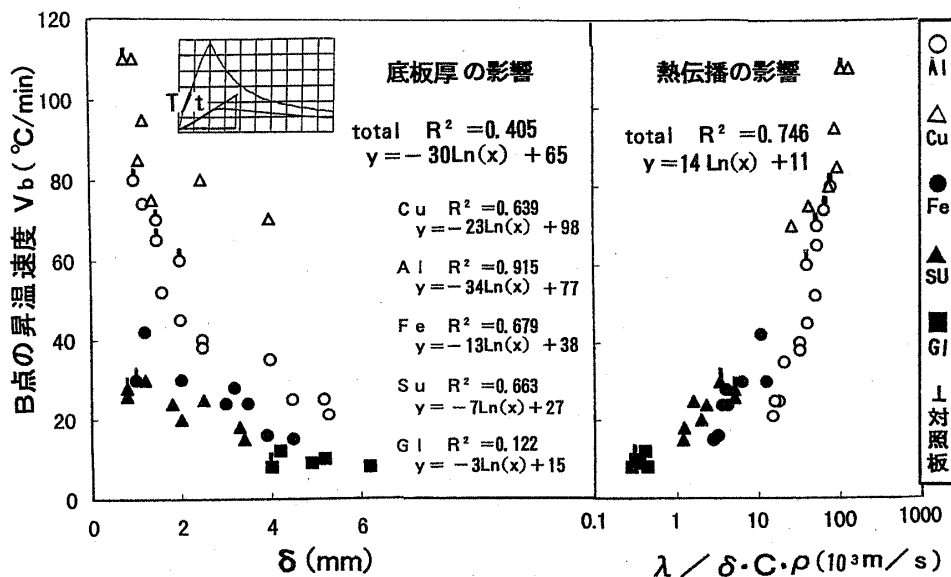


図10. ヒーターの延長線上にある B 点の初期昇温速度

B 点は A 点より 10cm 離れた鍋底上の測定点（図 1 参照）。左：B 点の昇温速度 $V_b-\delta$ 相関図と測定箇所，同図の材質別相関係数と対数近似式，右： $V_b-\lambda/(\delta \cdot C \cdot \rho)$ 相関図と対数近似式による相関係数。平均値 $\pm$ SD は，Al 21~80 $\pm$ 3~5，Cu 70~110 $\pm$ 10~15，Fe 15~42 $\pm$ 3~5，Su 15~30 $\pm$ 3~5，GI 8~12 $\pm$ 1（表 1 参照）。

底厚の異なる五種類の鍋材質の昇降温特性

れた。

以上の結果は、熱の移動先（B点）における昇温速度が熱拡散率と密接な関係にあり、熱伝導率に比例し熱容量に反比例することを示すものである^{9)~12)}。熱源上における昇温速度と逆に、熱伝導率が大きい材質の昇温速度が大きくなったので、B点の昇温速度/A点の昇温速度比を求めると、銅、アルミニウムで約1/2~1/3、鉄、ステンレスで約1/5~1/6、耐熱ガラスで約1/10~1/15となり、熱伝導率が大きい材質ほどこの比は大きくなる。

8. 熱源上・外にある2点間の温度差

熱源上のA点の鍋底温度が260°Cになった時点でA点とB点との温度差を求めると、図11のように、熱伝導率が大きい材質はすべて温度差が小さく、熱伝導率が小さい材質はすべて温度差が大きかった。

(1) 鍋材質と熱源上外の温度差との関係：A—B間の温度差が熱伝導率が大きいアルミニウム、銅は67~104°C、70~105°Cで100°C以下が多く、熱伝導率が小さい鉄、ステンレス、耐熱ガラスは170~200°C、220~225°C、207~230°Cで200°C以上が多い。熱伝導率によってははっきりと2つに分かれた（図11左）。

(2) 底厚と2点間の温度差との関係：底板が厚くなると温度差が若干小さくなる傾向はあるが、材質の影響に比べて小さかった。

(3) 熱伝導率と2点間の温度差との関係：材質の異なる鍋・対照板間において、底板厚×熱伝導率（ $\delta \cdot \lambda$ ）と温度差との間に総相関係数0.808の密接な関係が成立することがわかった（図11右）。

熱源から給与された一定量の熱Qは底厚 δ の鍋底上面のA点、および10cm先のB点に達する。B点における昇温速度は熱拡散率と密接な関係にあり、熱伝導率に比例するので^{9)~12)}、熱伝導率が大きい材質の温度差が小さくなり、温度差と熱伝導率 λ 間に負の相関が成立したと推察される^{9)~12)}。

9. 鍋の昇降温測定値と熱物性値との関係

大きさや形状の不一致にもかかわらず、鍋の昇降温測定値が鍋の底厚、鍋材質の熱伝導率、比熱の影響を受けて規則的に変化することが示されたので、これら熱物性値と鍋の昇降温測定値との関連性について考察する。図12は各鍋材質の昇降温時間、B点の温度上昇速度、A—B間の温度差と鍋材質の熱物性値とのかかわりを示したものである。

(1) 比熱の影響：比熱が小さいステンレス、鉄、銅

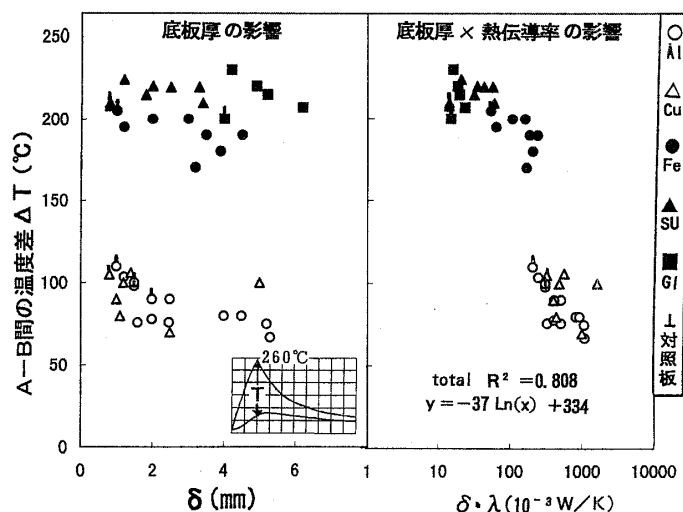


図11. ヒーター上・外にある鍋底および対照板上の2点A—B間の温度差

A点はヒーター上の測定点(260°C)、B点はA点より10cm離れたヒーター外の測定点（図1参照）。左：温度差 ΔT — δ 相関図、右： ΔT — $\delta \cdot \lambda$ 相関図と対数近似式による相関係数。平均値 $\pm$ SDは、Al 67~110 $\pm$ 4~12、Cu 70~105 $\pm$ 5~10、Fe 170~205 $\pm$ 6~11、Su 210~225 $\pm$ 5~10、GI 200~230 $\pm$ 5~10（表1参照）。

鍋は昇降温時間がともに短い、比熱が大きい上に熱伝導率が大きく放熱量の多いアルミニウム鍋は昇温時間が長く、比熱、熱容量が大きく蓄熱性能が高い耐熱ガラス鍋は降温時間が長くなる傾向がある（図12左）。

(2) 熱伝導率の影響：銅、アルミニウムなど熱伝導率が大きい材質ほどB点の昇温速度が速く、A—B間の温度差が小さい。鉄、ステンレス、耐熱ガラスなど熱伝導率が小さい材質の鍋は熱源から離れたB点の昇温速度が遅く、A—B間の温度差が大きい不均一な加熱状態になる（図12右）。

各鍋材質の昇降温時間、B点の昇温速度、A—B間の温度差には、このように比熱、熱伝導率の違いがよく反映されていることがわかった。

フッ素樹脂加工、ほうろうなどの表面加工鍋、ステンレスクラッドなどの多層鍋、チタン、セラミックなどの新素材鍋、また食材をのせた状態での温度測定の実験をさらに継続している。

要 約

底厚の異なる5種類の材質鍋をハロゲンヒーターで加熱し、放冷して温度変化を調べたところ、形状や大きさの異なる鍋間にもかかわらず、鍋材質と底厚の違いを色濃く反映した昇降温挙動が認められ、熱伝導率、比熱、熱容量、熱拡散率などとの関連性が示唆された。

(1) 鍋底表面の昇温時間、加熱後の降温時間は、すべての鍋材質において底厚が増すに従ってきわめて規

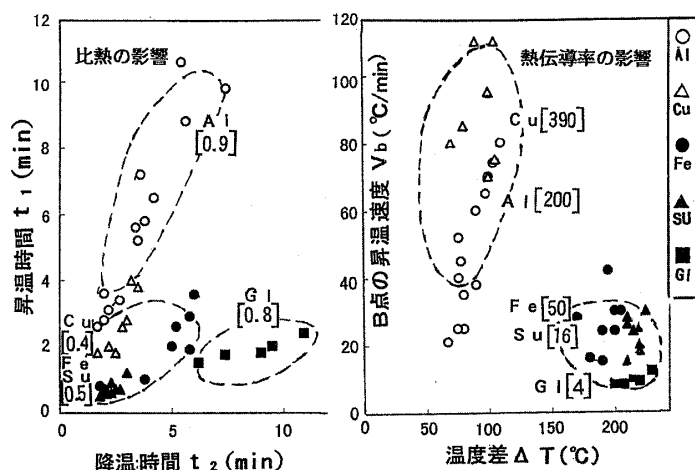


図 12. 鍋底の温度測定値によらず熱伝導率, 比熱の影響

左: A 点の昇温時間 t_1 —降温時間 t_2 の関係 (図中の数字は各鍋材質の比熱 $10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$ を示す)。右: ヒーター外による鍋底 B 点の初期昇温速度 V_b —AB 間の温度差 ΔT の関係 (図中の数字は各鍋材質の熱伝導率 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ を示す)。

則的に増加し, 厚手鍋は薄手鍋に比べて昇温時間が 2~5 倍も長くなることわかった。

(2) 炭素鋼, ステンレス鋼, 耐熱ガラスは昇温速度が速く, 熱伝導率の大きいアルミニウム合金, 銅は高温になると次第に昇温速度が低下した。そのため, 前者は昇温時間が短かく, 後者は昇温時間が長くなった。

(3) ヒーター外にある鍋底面の昇温速度は, 熱拡散率の高いアルミニウム合金, 銅が炭素鋼, ステンレス鋼, 耐熱ガラスに比べて著しく速く, ヒーター上外の 2 点における温度差は, アルミニウム合金, 銅が炭素鋼, ステンレス鋼, 耐熱ガラスに比べて著しく小さかった。

(4) 昇降温速度係数は底厚別では昇降温時とも薄手鍋の方が大きく, 材質別では昇温時にはステンレス鋼が大きく, 降温時には銅が大きかった。

本実験のために便宜をはかっていただいた関東学院女子短期大学の和田淑子教授, 機器を提供いただいた安立計器株式会社, 貴重な助言をいただいた慶応義塾大学の長島昭教授に感謝いたします。

文 献

- 1) 辰口直子, 渋谷祥子: 材質および形状の異なる鍋の調理適性, 平成 9 年度調理科学会要旨集。
- 2) 日本ガス機器検査協会 (1995.3) 省エネルギー形ガス燃焼機器の燃焼性能の標準化に関する調査研究。
- 3) 松元文子, 小林トミ, 大井裕子, 金山江利子 (1976.9) フライパン・材質の違いが調理にどう響くか, 栄養と料理, 129~136。
- 4) 日本消費者協会 (1981.12) 商品テスト・フライパン, 月刊消費者, 268, 14~19。
- 5) 日経ホーム出版社 (1982.12) なべを使いこなしていますか, ショッピング, 99~109。
- 6) 大日方光, 小池田道子, 内山澄子 (1983) 空だきできる厚手鍋, 商品科学研究所, 330~334。
- 7) 平野美那世 (1987) アルミニウム鋳物鍋の加熱時における熱挙動, 家政誌, 38, 799~804。
- 8) 日本熱物性学会編 (1990) 「熱物性ハンドブック」, 養賢堂, 22~27。
- 9) 千輝淳二 (1993) 「伝熱計算法」, 工学図書, 5, 193~213 など。
- 10) 飯田嘉宏 (1996) 「食品加熱の科学」(渋谷祥子編), 9, 12~17 など。
- 11) 西川兼康, 北山直方 (1995) 「伝熱工学の学び方」, オーム社, 19, 48, 127 など。
- 12) 飯淵貞明 (1987) 調理科学 20, 104~110。

(1999 年 8 月 23 日受理)