

アルミニウム鋳物合金の熱伝導率に及ぼす 熱処理条件の研究

Study of Heat Treatment Conditions that Impact Thermal Conductivity of Aluminum Casting Alloy

上 田 順 一¹
Junichi UEDA

家 永 裕 一²
Yuichi IENAGA

須 藤 建 次¹
Kenji SUTO

要 旨

アルミニウム鋳物合金製の部品に要求される機械的特性を達成した上で、熱伝導率を高める熱処理条件を設定するアプローチを研究した。シリンダヘッドの材料として使用されるアルミニウム鋳物合金 AC4B において、アルミニウム金属マトリクスに固溶して熱伝導を阻害する溶質原子の挙動に着目することで熱伝導率を高める熱処理条件を検証した。本研究は熱処理型アルミニウム合金全般への応用性があり、放熱特性の要求が高いアルミニウム合金製部品への展開が可能である。また、熱伝導率と電気伝導率の密接な関係から熱伝導率の簡便な代替測定方法の可能性を示した。

ABSTRACT

An approach was studied that sets the heat treatment conditions to increase thermal conductivity after achieving the mechanical properties demanded of aluminum casting alloy parts. The heat treatment conditions that increase thermal conductivity were verified by focusing on the behavior of solute atoms that solid solute in the aluminum metal matrix and obstruct thermal conduction in AC4B, an aluminum casting alloy used as a material for cylinder heads. This study is applicable to heat treatment type aluminum alloy in general, and can also be expanded to aluminum alloy parts with high demand for heat dissipation properties. In addition, the close relationship between thermal conductivity and electrical conductivity indicated the potential for a simple alternative method of measuring thermal conductivity.

1. はじめに

アルミニウム合金の熱処理仕様が熱伝導に影響することとは知られており、Table 1 にアルミニウム展伸材における熱処理の質別と熱伝導率について示す⁽¹⁾。熱伝導率はアルミニウム金属マトリクスに固溶する溶質原子の量(固溶量)に影響を受ける。固溶する溶質原子が室温時効の析出のみで消費され、残存する固溶量の多い T4 処理は最も熱伝導率が低い。T6 処理では後述する人工時効処理で溶質原子が更に消費されて熱伝導率が回復し、O 材ではほとんどの溶質原子が粗大な析出物に消費されて最も高い値となる。Cu 系の析出物で強化される代表的な 2000 系合金と、Mg₂Si の析出物で強化される代表的な 6000 系合金は同様な傾向にあり、熱伝導率は溶質原子の種類にかかわらず残存する溶質原子の固溶量に影響を受ける結果となっている。一方、アルミニウム合金の熱処理条件は材料強度の設

Table 1 Thermal conductivity of aluminum alloy with various temper designations

Alloy	Temper designation	Thermal conductivity (20°C) kW/(m·°C)
2014	T4	0.13
	T6	0.15
	O	0.19
2024	T3, T4	0.12
	T6, T81	0.15
	O	0.19
6061	T4	0.15
	T6	0.17
	O	0.18
6051	T4	0.16
	T6	0.17
	O	0.20

¹ ソリューションシステム開発センター

² ソリューションシステム開発センター、博士(工学)

定が主であり、特にリサイクル材で作られる鋳物用のアルミニウム合金では熱伝導率への影響の詳細に関しては言及されていなかった。内燃機関などの放熱性能が要求されるパワーユニットではアルミニウム鋳物合金製の部品が多く使われている。小型化が進むことで熱的負荷が増加する傾向にあるため、アルミニウム鋳物合金の熱伝導は今後の部品開発を考える上で重要な機能要素になると考える。

2. 目的

熱伝導率に対する熱処理の影響を知るためには、アルミニウム合金における溶質原子の固溶と析出の挙動を理解する必要がある。本研究では乗用車、二輪車、船外機用エンジンのシリンダヘッドに用いられる AC4B 合金について、要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高める熱処理条件設定のアプローチを探る。また、他のアルミニウム合金も含めて熱伝導率のコントロールに関する考え方を提言する。

3. 熱伝導率を高める熱処理条件

3.1. 熱処理における溶質原子の固溶と析出の挙動

まず、アルミニウム合金の材料強度を引き出す熱処理で起こる溶質原子の固溶と析出の概略を説明する。Fig. 1 はアルミニウム合金に施す代表的な T6 や T7⁽¹⁾ の熱処理パターンを示す。溶体化処理温度に保つことで溶質原子をマトリクス中に固溶させ、水焼入れなどで急冷することで溶質原子を過飽和な状態にすることを溶体化処理と言う。その後、時効処理温度に保つことで過飽和な溶質原子を人工的に析出させ、金属マトリクスの転位移動を阻害させることで金属の変形挙動を抑制して材料強度を向上させることを人工時効処理（以下、時効処理）と言う。

Fig. 2 に Fig. 1 の処理過程 (a), (b), (c) におけるアルミニウム金属マトリクス中での溶質原子の各状態を模式図で示す。Fig. 2 の (a) はアルミニウム合金の鋳造素材におい

て遅い凝固速度のために初期に形成された粗大な析出物を単純化したモデルである。(b) は溶体化処理によって溶質原子がマトリクス中に固溶していく状態で、(c) は時効処理によって溶質原子が材料強度向上に寄与する析出物として形成される状態である。

溶質原子の移動と析出によって起こる時効硬化特性は、溶体化保持時間によって変わる溶質原子の固溶量の影響を受けず、溶体化処理温度に基づいてマトリクス中に形成される原子空孔濃度に影響されることが知られている⁽²⁾。式 (1) は原子空孔濃度 C_v を表す^{(3), (4)}。 A は定数 (2 から 5), H_F は原子空孔形成エネルギー, k はボルツマン定数, T は絶対温度である。

$$C_v = A \cdot \exp[-H_F/(k \cdot T)] \quad (1)$$

原子空孔濃度は温度の関数であるために溶体化処理の保持温度で決まり、その空孔は水焼入れによってマトリクス中に凍結される。Fig. 3 は溶質原子が原子空孔によって移動する様子を模式図で示したものである。原子の移動に関しては原子空孔を介することでエネルギー障壁が低くなるため、アルミニウム原子や溶質原子が単位時間あたりに移動する量は原子空孔濃度に依存することになる⁽⁵⁾。

ここで時効硬化特性が溶体化処理温度に基づいてマトリ

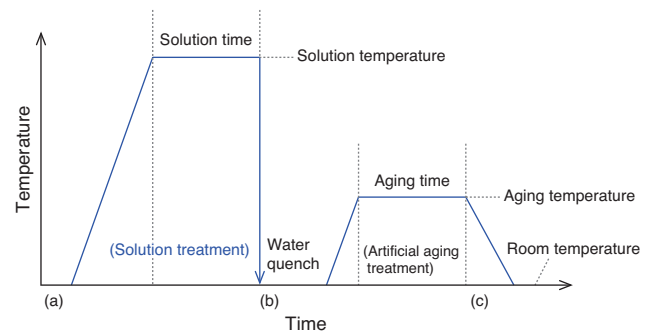


Fig. 1 Typical pattern of T6 and T7 heat treatments for aluminum alloy

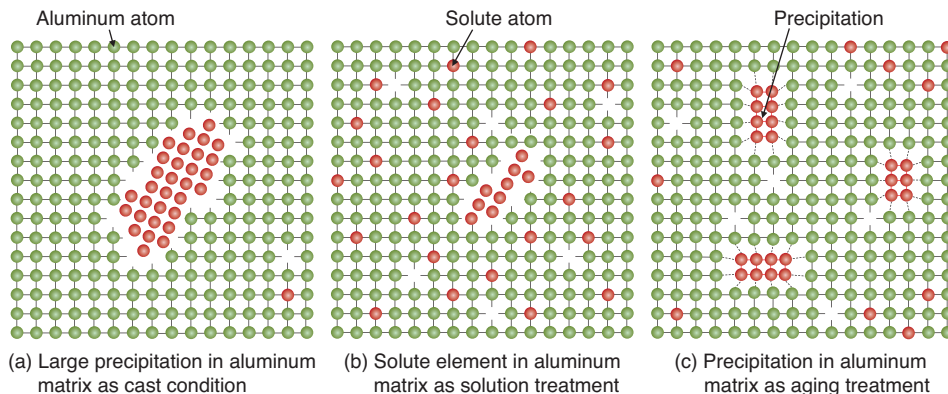


Fig. 2 Diagram of solid solution and precipitation in aluminum alloy

クス中に形成される原子空孔濃度のみに依存し、溶体化保持時間で決まる溶質原子の固溶量に依存しないことを検証する。Fig. 4 はキャストホイールに使われる AC4CH 合金における溶体化保持時間と機械的特性の関係を示す。溶体化処理温度は 540℃ で、時効処理条件は 140℃ × 150 分間で統一した。AC4CH 合金の析出硬化は Mg_2Si の析出物による。溶体化保持時間が長いほど溶質原子の固溶が進み固溶量は増加するが、溶体化保持時間を延ばしても機械的特性への影響が少ない。これは時効硬化特性が溶体化処理温度で決まる原子空孔濃度に影響されることを示す。Fig. 5 は Fig. 4 と同じ熱処理条件での溶体化保持時間と伸びの関係

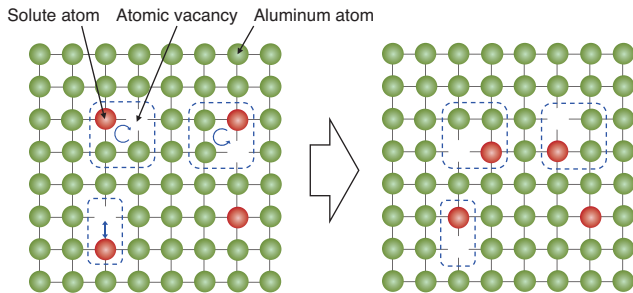


Fig. 3 Diagram of atomic vacancy and atomic diffusion

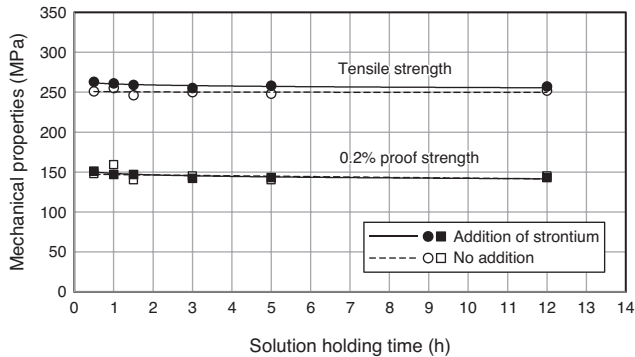


Fig. 4 Effect of solution temperature holding time on mechanical properties of AC4CH-T6

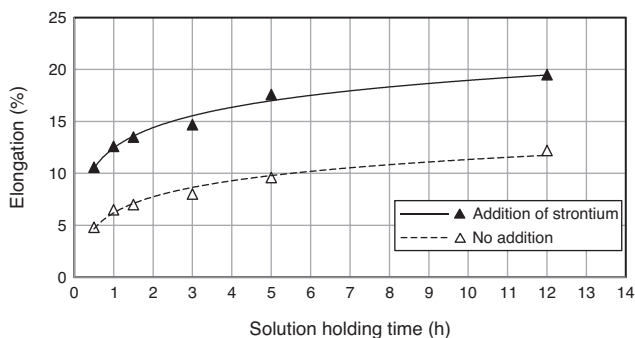


Fig. 5 Effect of solution temperature holding time on elongation of AC4CH-T6

Table 2 Chemical composition of AC4B alloy test sample

	(wt%)					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn
AC4B sample	8.2	2.7	0.34	0.76	0.67	0.24

を示す。溶体化保持時間と共に伸びが向上するのは、共晶 Si の球状化が進んで亀裂伝播速度が遅くなることが要因である。なお、キャストホイールにおける Sr 添加は共晶 Si を微細にして伸び特性を安定化させ、求められる衝撃吸収特性を保証することが目的である。キャストホイール用の材料では、部品要求特性上で重要な伸び値を保証できる範囲内で溶体化保持時間を短縮することにより生産効率の向上が図れるため、Sr 添加は有効な手法として使われている。

3.2. AC4B 合金の時効硬化特性と熱伝導率

シリンダヘッドの材料として、鋳造性や機械的特性および高温特性のバランスに優れたアルミニウム鋳物用 AC4B 合金が広く使われている。Table 2 に本研究における供試材 AC4B 合金の組成を示す。

Fig. 6 は 500℃ × 360 分間の溶体化処理をおこなった AC4B 合金の時効処理温度による時効硬化特性を示す。溶体化処理から時効処理の間にかかる室温時効の影響を排除するために、水冷による溶体化処理直後から時効処理炉に投入までの間は全ての試験片を -20℃ で保管した。また時効処理では温度が一定に保持されるように熱風循環型の乾燥炉を使用した。AC4B 合金の主たる析出硬化は Cu 系の析出物による。

150℃ から 180℃ の時効では、GP (1) ゾーンと呼ばれる準安定な析出物による HRB 60 程度の硬度から GP (2) ゾーンと呼ばれる中間相の形成によって硬度が上昇する⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。200℃ から 235℃ の時効では、初期段階から中間相の析出による硬化が進むことで HRB 75 程度の硬度とな

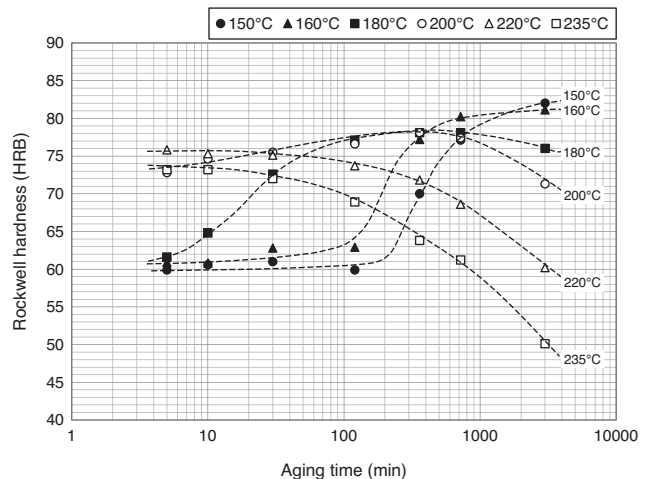


Fig. 6 Aging curve of AC4B alloy

り、時効時間が長くなると中間相が粗大化して安定相となり軟化が起こる。

ここで固溶している溶質原子が時効析出で消費される過程で熱伝導率がどのように変化するかを検証する。Fig. 7 は Fig. 6 と同じ条件で溶体化処理をおこない、時効硬化特性が異なる 160℃、180℃、220℃ での時効時間と熱伝導率の変化を示す。熱伝導率 λ は、レーザーフラッシュ法によって熱拡散率 α を測定し、室温での密度 ρ と DSC 法で測定した比熱 C_p を乗じて算出した。式 (2) に熱伝導率 λ を示す。

$$\lambda = \rho \cdot \alpha \cdot C_p \quad (2)$$

λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]

ρ : 密度 [g/cm³]

α : 熱拡散率 [m²/s]

C_p : 比熱 [J/(g·K)]

時間と共に固溶している溶質原子が析出に消費され、それによって熱伝導率が向上していくことが確認された。時効温度が高いほど析出はより速く進み、溶質原子が多く消費されて熱伝導率が高くなる傾向がある。また、硬度が低下する過時効領域においても熱伝導率が向上し続けていることから、残存する溶質原子が熱伝導を阻害していると推定される。

3.3. AC4B 合金の熱伝導率を高める熱処理条件設定

ここで残存する固溶量を少なくして熱伝導率を高める条件設定へのアプローチを検証する。Fig. 8 は AC4B 合金の 200℃ の時効硬化特性に与える 500℃ の溶体化保持時間の影響を示す。200℃ の時効硬化特性は観察時間の中で硬度が上昇する亜時効領域と硬度が低下する過時効領域を有し、変化が分かり易い条件として選定した。硬度が上昇する亜時効の領域において、溶体化保持時間が 10 分間、180

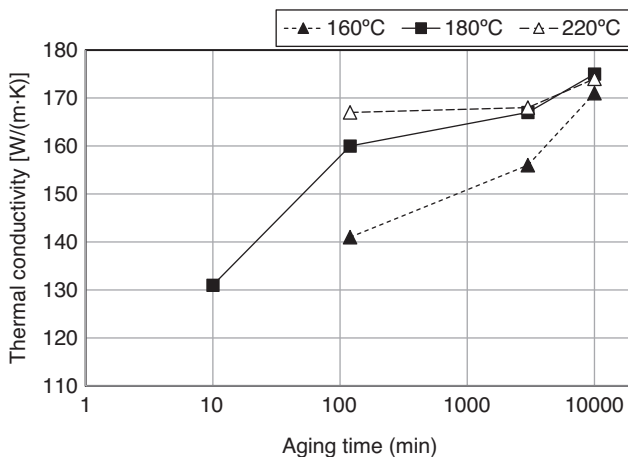


Fig. 7 Thermal conductivity with various aging treatments

分間、360 分間で硬度に差は認められなかった。耐力と密接な相関性がある硬さに差が無いことより、Fig. 4 において AC4CH 合金の機械的特性に対して溶体化保持時間が影響を及ぼさない結果と同様な状況であることが確認された。硬度が低下する過時効の領域で、溶体化保持時間 10 分間のものが 180 分間と 360 分間に対して硬度が低いのは、固溶量が少ないために析出に必要となる溶質原子が枯渇したためと考えられる。

Fig. 9 は 500℃ でそれぞれ 10 分間、180 分間、360 分間保持して溶体化処理をおこなった直後のものと、その後に 200℃ × 120 分間の時効処理を加えて硬度が等しいもので熱伝導率を測定した結果を示す。溶体化直後の固溶量が室温時効で減少しないように全ての試験片を -20℃ で保管した。更に溶体化処理直後の状態を測定する試験片は、熱伝導率の測定までの間に室温時効によって固溶した溶質原子が消費されることを防ぐために、-20℃ での保管に加えて

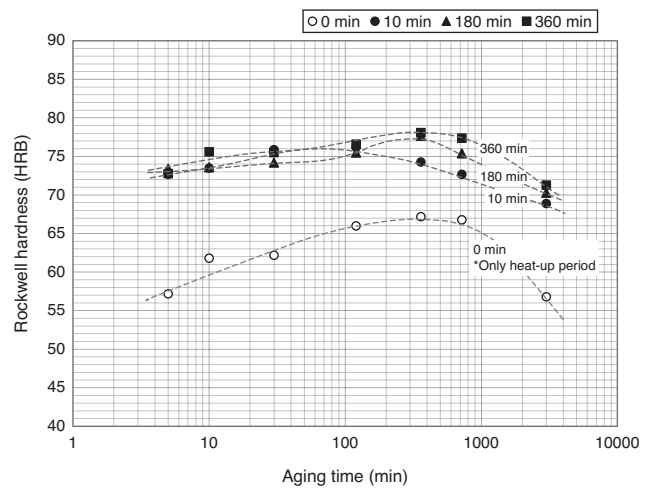


Fig. 8 200°C aging curve of AC4B alloy with various solution holding times

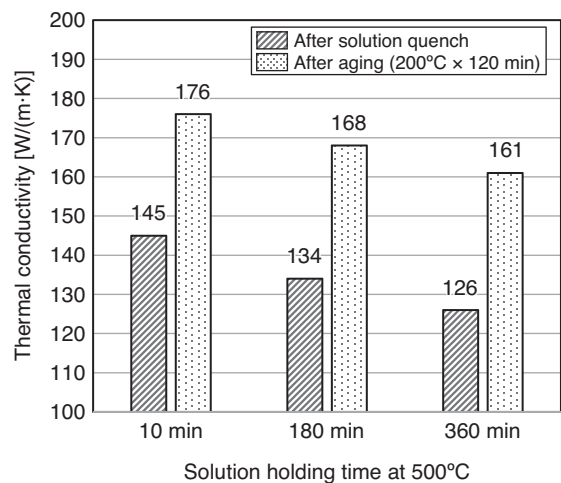


Fig. 9 Thermal conductivity with various solution holding times

100℃の炉へ10分間投入して常温より高い温度にさらし、室温時効の進展を防ぐ処理を施した。

溶体化処理直後では溶体化保持時間の増加に従って熱伝導率は低下し、溶質原子の固溶量が増加していることが分かる。200℃×120分間の時効処理後では時効処理で溶質原子が消費されて、それぞれ熱伝導率が回復しているが、時効処理後も溶体化保持時間が長いほど熱伝導率が低いことから、溶体化保持時間が長いほど残存する溶質原子の固溶量が多いことが想定される。このことから時効処理で消費される量を超えて固溶された溶質原子は時効処理後も残存して熱伝導を阻害する要因になると考えられる。

従って、要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高めるためには、時効処理後に残存する溶質原子の固溶量を低減する必要がある、そのためには時効析出に必要十分な固溶量になるよう溶体化処理条件を設定することが重要となる。Fig. 8のように定められた時効条件で溶体化保持時間を変えた検証をおこなうことにより、時効析出に必要十分な溶質原子の固溶量を把握することができる。部品から切出した試験片で検証できるこのようなアプローチは熱伝導率を高める溶体化処理条件の設定において有効である。

4. 考察

4.1. 他合金系への応用

ここでCu系析出物によって析出硬化するAC4B合金と同様に、Mg₂Siの析出で強化するAl-Si-Mg系合金においても熱伝導率を高める熱処理条件設定の考え方が当てはまるのかを検証する。Fig. 10はAC4CHと同じように耐衝撃性が求められるAl-5%Si-0.3%Mgアルミニウム鋳物合金において、標準的な535℃と500℃で溶体化処理をおこなった場合の時効特性の比較を示す。500℃に対して535℃で溶体化処理をおこなった方が時効硬化の硬度が高く、溶体化保持時間が2時間と5時間で差が無いため、時

効硬化特性に対してはAC4Bと同様に原子空孔濃度が支配的であることが分かる。従って、時効析出に必要十分な溶質原子の固溶量を把握することがAC4B合金と同様に可能である。残留する溶質原子の固溶量を制御することで熱伝導率を変えるアプローチは、溶質原子の種類に関らずに熱処理型アルミニウム合金全般への応用性があり、放熱性が求められるアルミニウム合金製部品への展開や逆に断熱性が求められる部品への展開も考えられる。

4.2. 実用化への課題

現状、熱伝導率の測定には専用の装置と技能を有するオペレータが必要であり、熱伝導率を要求特性として保証するためにはより簡易な方法が求められる。ここで熱伝導率と相関性のある電気伝導率を用いて代替する方向性を考える。Fig. 11に各種アルミニウム展伸材合金における熱伝導率と電気伝導率の相関関係を示す⁽¹⁾。

金属の熱伝導では格子振動(フォノン)による熱伝導よ

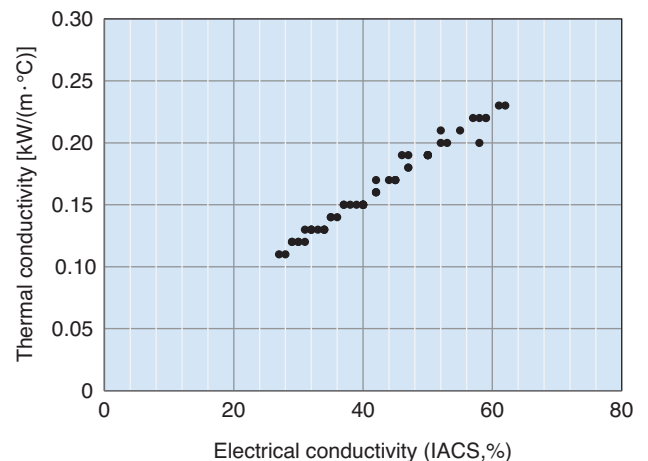


Fig. 11 Relation between thermal conductivity and electrical conductivity

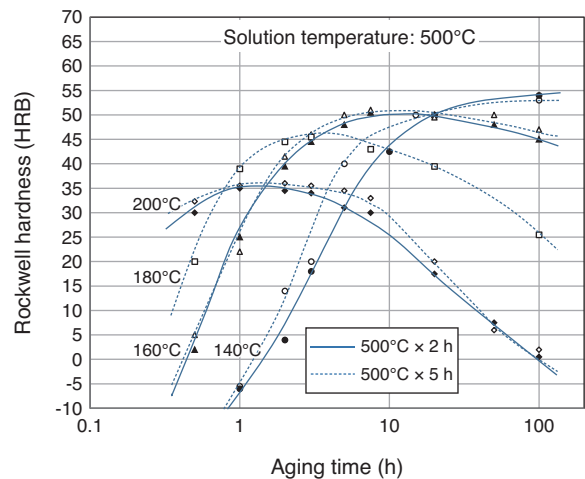
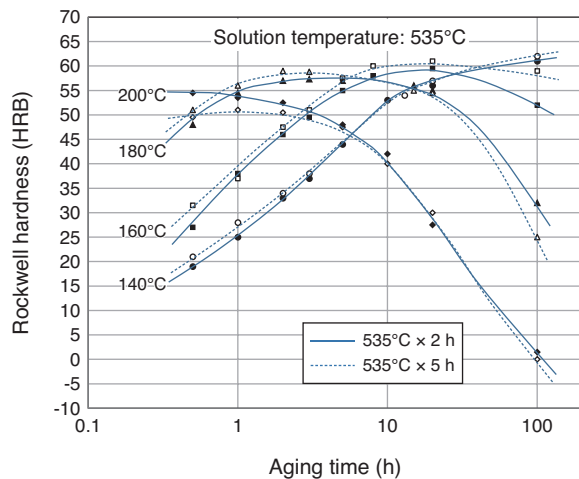


Fig. 10 Aging curve with solution temperatures of 535°C and 500°C of Al-5%Si-0.3%Mg alloy

りも電子の寄与が支配的であることが知られており、電子が電気伝導と熱伝導の両方を担っていることから相関性が現れる⁽¹⁰⁾。

式(3)は一般にヴィーデマン-フランツ則と呼ばれる金属の電気伝導率と熱伝導率の関係を示す。 λ は熱伝導率、 σ は電気伝導率、 L はローレンツ数、 T は温度である。

$$\lambda / \sigma = L \cdot T \quad (3)$$

これは温度が同じであれば、金属の種類が異なっていて熱伝導率と電気伝導率の比がほぼ同じであることを示す。今後は比較的簡便な電気伝導率の測定で熱伝導率の測定を代替できる可能性があり、熱伝導率を要求特性として実用化すると共に、更に詳細な熱伝導率の変化を検証する一助となりうる。

アルミニウム合金は資源のリサイクル環境が整っており、AC4B合金を含めてリサイクル材料が多く使われ、サステナブルマテリアルとしての要素を有する。そこに熱伝導率のコントロールという技術が加わることにより、既存部品の性能向上や用途の拡大が期待される。

5. まとめ

アルミニウム合金 AC4B を用いた熱伝導率に関する検証および考察により、以下の結論が得られた。

- (1) 要求される材料特性を達成した上で熱伝導率を高めるためには、時効処理後に残存する溶質原子の固溶量を低減する必要がある、そのためには時効析出に必要十分な固溶量になるよう溶体化処理条件を設定することが重要である。
- (2) 時効析出に必要十分な固溶量を把握し、残留する溶質原子の固溶量を制御することで熱伝導率を変えるアプローチは、溶質原子の種類に関わらずに熱処理型アルミニウム合金全般への応用性がある。
- (3) 今後熱伝導率の実用化を想定すると測定方法に課題があるが、比較的簡便な電気伝導率の測定で代替できる可能性があることを示した。

参考文献

- (1) 日本アルミニウム協会標準化総合委員会 編：アルミニウムハンドブック第6版，日本アルミニウム協会，358p., (2001)
- (2) 平野賢一：アルミニウムおよびアルミニウム合金中の拡散，軽金属，Vol. 19, No. 12, p. 577-590, (1969)
- (3) 紀隆雄，小野興太郎：金属中の原子空孔源，日本金属学会会報，Vol. 21, No. 7, p. 518-522, (1982)
- (4) 白井泰治：陽電子でみるアルミニウム合金中の原子空孔の挙動，軽金属，Vol. 56, No. 11, p. 629-634, (2006)

- (5) 成田麻未：アルミニウム合金の時効硬化現象における原子空孔の役割，まてりあ，Vol. 61, No. 3, p. 160-165, (2022)
- (6) 里達雄，北岡山治，神尾彰彦：Al-Cu 系合金，軽金属，Vol. 38, No. 9, p. 558-578, (1988)
- (7) 吉田英雄，内田秀俊：アルミニウムの熱処理，軽金属，Vol. 45, No. 1, p. 41-55, (1995)
- (8) 鈴木寿，菅野幹宏：アルミニウム合金の析出時効，軽金属，Vol. 31, No. 4, p. 277-298, (1981)
- (9) 里達雄：アルミニウム合金の時効析出研究の歴史と今後の展望，軽金属，Vol. 69, No. 3, p. 138-148, (2019)
- (10) 川路均：固体の熱伝導，化学と教育，Vol. 59, No. 10, p. 488-491, (2011)

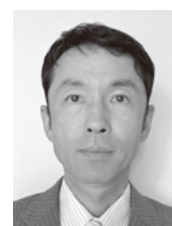
■著 者■



上田 順一



家 永 裕 一



須 藤 建 次