Al-Si 二元合金の電気比抵抗と熱伝導率に対するケイ素含有量の影響

岩崎 祐紀

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 72, No. 1 (2022), 22–26
© 2022 The Japan Institute of Light Metals

Effects of silicon content on electrical resistivity and thermal conductivity of Al-Si binary alloys.

Yuki IWASAKI

Thermal conductivity is useful to improve performance and manufacturing process for various products. In this study, thermal conductivity was measured for solution-treated Al-Si alloys, and the influence of solute Si on thermal conductivity was studied. For quantification of metallurgical structure, electrical resistivity was measured. Ingots of Al-Si alloys were prepared with Si content between 0.5 and 10 mass%. Thermal conductivity was measured at room temperature (294–300 K), λ , after heat treatment at 843 K showed a good proportional relation to Si content up to 1.4%. The specimens of Si content above 5% showed negative deviations from the proportional relation, suggesting incomplete dissolution of silicon. Contribution per unit concentration of solute Si to the λ^{-1} was $0.856 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{mass}\%^{-1}$. Electrical resistivity was measured at room temperature (298 K) and 77 K. Electrical resistivity also showed a good proportional relation to Si content up to 1.4%. Contributions per unit concentration of solute Si to the resistivity at 77 K and at 298 K were $5.65 \text{ n}\Omega \cdot \text{mass}\%^{-1}$ and $5.71 \text{ n}\Omega \cdot \text{mass}\%^{-1}$, respectively. For specimens of Si content above 5%, volume fractions of Si particles were calculated from the measured values of thermal conductivity and electrical resistivity, respectively. Both of volume fractions were larger than calculated value from the concentration of solute Si.

(Received October 8, 2021 Accepted November 1, 2021)

Keywords: Al-Si alloy; thermal conductivity; electrical resistivity; solute concentration dependence; volume fraction

1. 緒 言

熱伝導率や比熱といった熱物性は様々な製品の機能の指標、および製造工程の改善に活用されている。重力 casting やダイキャストといった casting は金属材料の主要な製造方法であり、鋳物の性能向上や casting 欠陥低減を目的とした開発が進められている。鋳型設計や casting 方案策定のため、対象金属あるいは合金の複数の物性値がシミュレーションに使われている^{1), 2)}。例えば自動車では、エンジン等の主要部品にアルミニウム合金鋳物が多く採用されており、その熱効率向上のために熱伝導率などの熱物性値が設計に必要とされているが、アルミニウム合金では測定データがあまり公表されていない。Al-Si 二元合金については、電気比抵抗の測定データは公表されている³⁾が、熱伝導率の測定事例は少ない。Si 添加量を最大 60 mass% とした Al-Si 合金の Si 添加量依存性の報告があるものの、0 mass% の次は 12 mass% であり、一般的な casting 合金の添加量である 3–10 mass% のデータは無い⁴⁾。電気比抵抗と熱伝導率の両方を評価した研究については、電気比抵抗を測定してヴィーデマン・フランツ則から熱伝導率を算出したという報告がある⁵⁾が、両方を実測した報告は見当たらない。

ない。

本報では、鋳造用アルミニウム合金の主要な合金系である Al-Si 合金⁶⁾について熱伝導率と電気比抵抗を測定し、それぞれに対する Si 固溶量の影響を調査し、晶析出 Si 粒子の体積分率の推定を試みたのでその結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は Si 添加量を 0.5–10 mass% (以後は mass% を % と表記) の 5 水準とした Al-Si 二元合金である。合金組成を Table 1 に示す。鋳造は 99.7% Al 地金を使用し、鋳込重量約 1 kg の舟型インゴットを作製した。作製したインゴットから所定形状に加工した試験片を大気炉にて 843 K で 14.4 ks 保持後、氷水中に焼入れして溶体化処理した。溶体化処理温度は、Murray ら⁷⁾が整理した状態図から得られた Al-Si 二元系の平衡固溶度の式

$$C^{\text{Si}}/\text{mass}\% = 2034 \exp(-6053/T) \quad (1)$$

より Al-1.4% Si 合金での Si の完全固溶温度を 831 K と推定し、完全固溶温度より約 10 K 高い 843 K とした。

Table 1 Chemical compositions of the investigated specimens.

Specimen	Analyzed composition / mass%							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.5%Si	0.504	0.101	0.006	0.001	0.001	<0.001	0.004	0.005
1.0%Si	0.927	0.100	0.006	0.001	0.001	<0.001	0.004	0.005
1.4%Si	1.40	0.098	0.006	0.001	0.001	<0.001	0.004	0.005
5%Si	5.00	0.066	0.006	0.001	0.001	<0.001	0.003	0.005
10%Si	10.06	0.074	0.007	0.002	0.001	<0.001	0.004	0.006

2.2 評価項目、測定条件

2.2.1 熱伝導率測定

熱伝導率は熱拡散率と比熱、密度の積から算出した。熱拡散率と比熱はアドバンス理工製熱定数測定装置TC-7000を使い、レーザーフラッシュ法で測定した。いずれの物性も測定温度は室温 (294~300 K) とし、同一の $\phi 10 \times 2$ mm試験片を使って測定した。熱拡散率は試料表面にパルスレーザーを照射した時の裏面の非定常温度変化を赤外線検出器により測定し、得られた規格化温度曲線をハーフタイム法により解析して熱拡散率を解析した。熱拡散率測定時の試料表面にはカーボンプレーで黒化処理を施した。パルス加熱用レーザーには波長1.06 μm 、パルス幅約0.5 msのNdガラスレーザーを使った。比熱測定では試料およびサファイアともにグラッシーカーボンを受光板としてシリコングリースを介して表面に貼り付けて測定に供した。サファイアを標準試料として予めパルスレーザーの熱量を校正しておき、試料にパルスレーザーを照射した時の試料裏面の入熱に伴う温度上昇を $\phi 0.1$ mmのR熱電対で計測して求め、入熱量を温度上昇で除した値から受光板とグリースの比熱の寄与を差し引いて比熱を算出した。熱拡散率と比熱はそれぞれ3回繰り返し測定し、その平均値を使って熱伝導率を算出した。密度は試験片の寸法および重量を測定して求めた。試験片の厚さと直径はマイクロメータで5点測定し、その平均値を使い密度を算出した。重量は電子天秤で1回測定した。供試材の密度は2.64~2.68 g/cm³であった。

2.2.2 電気比抵抗測定

測定方法は直流四端子法とし、 $3 \times 3 \times L$ 100 mmに切り出した試験片の両端に純ニッケルの電流および電圧リード線をスポット溶接し、アドバンス理工製電気抵抗測定装置TER2000 RH/Lを使って室温 (298 K) と液体窒素中 (77 K) での電気抵抗を測定した。試験片のサイズファクタは密度質量法⁸⁾を使った。電気比抵抗 ρ_D は電気抵抗と密度質量法サイズファクタの積より算出した。

一般的に、多元希薄固溶体の温度 T での比抵抗 $\rho^{SS}(T)$ は次式で表される。

$$\rho^{SS}(T) = \rho^{\text{PURE}}(T) + \sum C^i \Delta\rho^i \quad (2)$$

ここで $\rho^{\text{PURE}}(T)$ は理想的に純粋な溶媒金属の温度 T での ρ 、添字 i は溶質種、 C は溶質濃度、 $\Delta\rho$ は溶質単位濃度当たりの ρ への寄与である。小松ら⁸⁾は(2)式から300 Kと77 Kでの抵抗比 $R(= \rho_{300}/\rho_{77})$ を使い、

$$\rho_{77}^{SS} = (\rho_{300}^{\text{PURE}} - \rho_{77}^{\text{PURE}}) / (R - 1) \quad (3)$$

を誘導した。ここで ρ^{SS} は固溶体合金の比抵抗、 ρ^{PURE} は純金属の比抵抗である。小松らは実測した R と ρ から求めた経験式

$$\rho_{77} = \alpha / (R - 1) + \beta \quad (4)$$

$$\rho_{300} = \alpha' R / (R - 1) + \beta' \quad (4')$$

をマティーセン則経験式と呼び、そのプロットはマティーセンプロットと呼んで測定誤差の検出に使っている。晶出あるいは析出する第二相の ρ が固溶体に比較して十分に高い場合、実測した R からマティーセン則経験式を使って逆算した比抵抗 ρ_M は、第二相の影響を受けない基質固溶体だけの ρ と見なせる。本報告でも実測した ρ ならびに R よりマティーセン則経験式を使い、 ρ_M を算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 Al-Si二元合金の比抵抗の溶質濃度依存性

Fig. 1にSi含有量 C^{Si} と溶体化処理後の77 Kでの電気比抵抗 ρ_{D77} との関係を示す。 ρ_{D77} は1.4%までは C^{Si} に対して直線的に増加し、843 Kでの溶体化処理で添加されたSiが全量固溶したと考えられる。**Fig. 2**に示す298 Kでの電気比抵抗 ρ_{D298} でも同様の傾向が見られた。

Fig. 1と**2**それぞれについて1.4%以下までの $C^{\text{Si}} - \rho_D$ 直線を回帰して次式を得た。

$$\rho_{D77} / n\Omega\text{m} = 3.86 + 5.65 C^{\text{Si}} / \text{mass}\% \quad (5)$$

$$\rho_{D298} / n\Omega\text{m} = 29.1 + 5.71 C^{\text{Si}} / \text{mass}\% \quad (5')$$

求めた $C^{\text{Si}} - \rho_D$ 直線の勾配、すなわちAl中に固溶したSiの ρ への寄与 $\Delta\rho^{\text{Si}}$ を**Table 2**に示す。比較のため小松らの集録⁹⁾の値と比較したところ、両温度とも本報の測定値の方が収録の値よりも小さくなった。また、Al-Si系ではマティーセン則からのずれ (Deviation from Matthiessen's rule : DMR) があることが報告されており、小松¹⁰⁾らの取り扱いによればそのDMRは正とされている。本報で得られた $\Delta\rho^{\text{Si}}$ も298 Kが77 Kの値を上回り、正のDMRを示した。

Si添加量5%以上の試料では、 ρ_{D77} は1.4%以下とは異なる勾配で増加する傾向を示した。この ρ 増加は、最大平衡固溶度以上に添加されて晶出あるいは析出した単体Siによる通電断面積の過大評価が原因と考えられる。Si添加量1.4%以下の $\rho_{D77} - 1/(R - 1)$ プロットおよび $\rho_{D298} - R/(R - 1)$ プロットより、Si完全固溶状態のマティーセン則経験式を導出した。

$$\rho_{M77} / n\Omega\text{m} = 25.36 / (R - 1) - 0.01648 \quad (6)$$

$$\rho_{M298} / n\Omega\text{m} = 25.67 R / (R - 1) - 0.4821 \quad (6')$$

DMRがある系ではマティーセン則経験式にも影響が現れ、

Fig. 1 (a) Relation between Si content and resistivity at 77 K, and (b) Matthiessen plots according to equation (4). ρ_{M77} calculated from the resistivity ratio $R (= \rho_{298}/\rho_{77})$ using Matthiessen empirical relation in completely dissolved state, equation (5).

Fig. 2 (a) Relation between Si content and resistivity at 298 K, and (b) Matthiessen plots according to equation (4').

Table 2 Contributions of solute silicon in aluminum to resistivity, $\Delta\rho^{\text{Si}}$ and temperature of ρ measurement, T .

Investigators	$\Delta\rho$ / nΩm·mass% ⁻¹	
	77K	298K or 300K
Present work	5.65	5.71 (at 298K)
Komatsu et al.	6.30	6.68 (at 300K)

その勾配 a および a' が偏移することが知られている⁸⁾。本報のように二温度での $\Delta\rho$ を測定している場合、それらを使って補正が可能だが、本報ではDMRが小さい事と ρ 測定精度を勘案して補正はしないこととした。(6) および (6') 式より5%Si および 10%Si の ρ_{M77} を計算すると、それぞれ11.8 nΩm, 11.7 nΩmと1.4%の実測値11.7 nΩmとほぼ一致した。ここで、各試料の ρ_{M77} を溶質が843 Kの平衡固溶度まで固溶した状態の ρ 計算値($\rho_{\text{cal.77}}$)と比較するためFig. 3に ρ_{M77} と $\rho_{\text{cal.77}}$ を示す。Siの溶質濃度は、1.4%Si以下の試料はSi全量固溶しているとしてTable 1の分析値を、5%Si以上は(1)式から計算した843 Kでの平衡固溶度1.55 mass%を、Feは843 Kでの平衡固溶度0.024 mass%¹¹⁾を使い、(2)式より $\rho_{\text{cal.77}}$ を求めた。 $\rho_{\text{77}}^{\text{PURE}}$ にはDesaiらの推奨値¹²⁾を77 Kに内挿して得た2.20 nΩmを、SiとFeの $\Delta\rho$ はそれぞれ集録の値⁹⁾6.30 nΩm·mass%⁻¹, 38.4 nΩm·

Fig. 3 Comparisons of ρ_{M77} and calculated resistivity ($\rho_{\text{cal.77}}$) in as quenched state of Al-Si alloys. $\rho_{\text{cal.77}}$ were calculated from equilibrium solubility of each solute in binary system at 843 K.

mass%⁻¹を使った。1.4%Si以下の試料では ρ_{M77} は $\rho_{\text{cal.77}}$ とほぼ一致し、5%Si以上は ρ_{M77} の方が10%前後低くなった。Al-Fe-Si三元系ではAl-Fe-Si系化合物が形成され、Siの平衡固溶度が減少する¹³⁾。さらに、1.4%Siも ρ_{M77} が $\rho_{\text{cal.77}}$ をわずかに下回っており、ごく少量のSiが未固溶のまま残留していた可能性を示唆している。もしこの仮説が正しいならば、Table 2の $\Delta\rho^{\text{Si}}$ が集録の値を下回ったことも説明できる。

3.2 晶析出の熱伝導率および電気伝導率への影響

熱伝導率 λ に対する C^{Si} の影響をFig. 4に示す。一般的な金属材料では熱伝導における主要な熱のキャリアは電気伝導と同じく自由電子であることが知られている。したがって、 λ は ρ の逆数である電気伝導率 σ と相関を持ち、 λ は ρ と増減の傾向が逆転する。 λ は1.4%Siまで C^{Si} に対して直線的に減少し、5%Si以上では1.4%Si以下とは異なる勾配で減少した。 λ の逆数 λ^{-1} でも ρ と同様にマティエン則が成立することが知られており、(2)式と同様の整理ができるはずである。そこで、 $C^{\text{Si}} - \lambda^{-1}$ プロットから基質固溶体中の固溶Siの単位溶質濃度あたりの熱伝導率の逆数への寄与を求めてみる。Fig. 5の $C^{\text{Si}} - \lambda^{-1}$ プロットに示す通り、やはり1.4%Si以下のプロットは1本の直線上に乗り、それらを直線回帰して次式を得た。

$$\lambda^{-1}/\text{W}^{-1}\text{m}\cdot\text{K} = 4.70 \times 10^{-3} + 0.856 \times 10^{-3} C^{\text{Si}}/\text{mass\%} \quad (7)$$

上述の通り、純金属固体では熱伝導は電気伝導とキャリアが同じであることからヴィーデマン-フランツ則が成り立ち、 λ と電気伝導率 $\sigma (=1/\rho)$ の関係は

$$\lambda = L T \sigma \quad (8)$$

と表されることが知られている。(8)式の係数 L はローレンツ数と呼ばれ、理論値は $2.445 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ である。室温での λ と σ の値をFig. 6にプロットした。図中の破線は純Alの300 Kの λ と σ の推奨値^{12), 14)}、それぞれ $237 \text{ W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, $36.6 \times 10^8 (\Omega\text{m})^{-1}$ を使って算出した $L = 2.16 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$ の直線である。0.5~1.4%Siは一つの直線上にあり、この $\lambda - \sigma$ 直線を回帰して次式を得た。

$$\lambda = 5.83 \times 10^{-6} \sigma + 12.5 \quad (9)$$

一方で、5%Siと10%Siは(9)式から乖離した。 λ と σ から算出した L をTable 3に示す。5%Si以上ではSi量の増加と共に L が大きくなった。これは晶析出Siによる通電断面積の過大評価の影響に加えて、ヴィーデマン–フランツ則が金属の自由電子による電気伝導に対して構築された理論であることを踏まえると、半導体である単体Siの λ への寄与の仕方が σ とは異なることを示唆している。

Fig. 4 Relation between Si content and thermal conductivity at room temperature (294~300K).

Fig. 5 Relation between Si content and reciprocal of thermal conductivity, λ^{-1} .

Fig. 6 Relation between electrical conductivity and thermal conductivity.

価の影響に加えて、ヴィーデマン–フランツ則が金属の自由電子による電気伝導に対して構築された理論であることを踏まえると、半導体である単体Siの λ への寄与の仕方が σ とは異なることを示唆している。

3.3 複合則による晶析出Siの体積分率の推定

母相中に分散している球状の第二相粒子について、その体積分率 V_2 が母相の体積分率 V_1 よりも十分に小さいと見なせる時、粒子分散型複合材料の熱伝導率 λ や電気伝導度 σ 等の物性 X はマクスウェルの式で表される¹⁵⁾。

$$X = \frac{2X_1 + X_2 + 2V_2(X_2 - X_1)}{2X_1 + X_2 - V_2(X_2 - X_1)} X_1 \quad (10)$$

(10)式の X は λ あるいは σ であり、添字の1は母相、2は第二相を意味する。ここで(10)式を変形して、本報で測定した λ および σ のそれぞれについて5%Siおよび10%Siに含まれる晶析出Si粒子の体積分率 V_{Si} を試算してみる。

(10)式の X を λ としてAl-Si合金に適用すると、 λ から求めた晶析出Si粒子の体積分率 $V_{\lambda-\text{Si}}$ は次式で表される。なお、母相はAl基固溶体、第二相粒子は晶析出Siであることから、式中の添え字1, 2はそれぞれAl, Siと書き換えた。添え字の無い λ は供試材の実測値である。

$$V_{\lambda-\text{Si}} = \frac{-(2\lambda_{\text{Al}} + \lambda_{\text{Si}})(\lambda_{\text{Al}} - \lambda)}{(\lambda + 2\lambda_{\text{Al}})(\lambda_{\text{Si}} - \lambda_{\text{Al}})} \quad (11)$$

次に σ についても晶析出Si粒子の体積分率 $V_{\sigma-\text{Si}}$ を算出してみる。Si粒子の電気伝導度 σ_{Si} は大きく見積もっても $0.01(\Omega\text{m})^{-1}$ であり、母相の電気伝導度 σ_{Al} と比べて極めて小さいため $\sigma_{\text{Si}} \approx 0$ とみなすことができる。この点を踏まえて(10)式を σ に適用すると、 $V_{\sigma-\text{Si}}$ は次式のように近似できる。(12)式の添え字も(11)式と同様であり、添え字の無い σ は供試材の実測値を使った。

$$V_{\sigma-\text{Si}} = \frac{2(\sigma_{\text{Al}} - \sigma)}{2\sigma_{\text{Al}} + \sigma} \quad (12)$$

晶析出Si粒子の体積分率 V_{Si} の試算にあたり、Si粒子の λ_{Si} は $138.5 \text{ W(m·K)}^{-1}$ とし¹⁶⁾、基質固溶体の λ_{Al} は1.4%Siの実測値 170 W(m·K)^{-1} を使い、 σ_{Al} は ρ_{M298} から算出した値を使用した。 λ と σ から算出した V_{Si} をTable 4に示す。また、 ρ_{M298} を使って(5')式より推定したSi固溶量 $C_{\text{Si}}^{\text{SS}}$ を除いた全量が晶析出Si量であると仮定して次式より求めた $V_{\text{sol-Si}}$ もTable 4に併記した。

$$V_{\text{sol-Si}} = \frac{(C_{\text{Si}}^{\text{Total}} - C_{\text{Si}}^{\text{SS}})/D_{\text{Si}}}{(100 - C_{\text{Si}}^{\text{Total}} + C_{\text{Si}}^{\text{SS}})/D_{\text{Al}} + (C_{\text{Si}}^{\text{Total}} - C_{\text{Si}}^{\text{SS}})/D_{\text{Si}}} \quad (13)$$

ここで $C_{\text{Si}}^{\text{Total}}$ はTable 1に示す各試料のSi添加量、 D_{Si} と D_{Al}

Table 3 Lorenz numbers of Al-Si alloys.

specimen	Lorenz number $10^8 L / \text{W}\Omega\text{K}^{-2}$
0.5%	2.09
1.0%	2.11
1.4%	2.11
5%	2.21
10%	2.33

はSi粒子と基質固溶体の密度であり、それぞれ純金属の値である $2.328 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とした¹⁷⁾。 $V_{\sigma\text{-Si}}$ は $V_{\text{sol-Si}}$ より約30～50%大きくなった。これは小松ら¹⁸⁾が提唱する電流遮蔽領域の影響で $V_{\sigma\text{-Si}}$ が過大評価されたと考えられる。一方、 $V_{\lambda\text{-Si}}$ は $V_{\text{sol-Si}}$ の5～7倍とさらに大きな乖離を示した。熱伝導も上記電流遮蔽領域と同様に、界面熱抵抗という形で熱のキャリアが遮蔽される事象の考え方があがあるが、そのオーダーは $10^{-7} \text{ W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$ より小さいと言われている¹⁹⁾。Si粒子と基質固溶体間の界面熱抵抗を試算してみる。単純化のためSi粒子と基質固溶体を二層材料と仮定し、二層間の一方向の熱伝導での界面熱抵抗を逆算すると $10^{-7}\sim 10^{-6} \text{ W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$ となり、上記の数値からはまだ1桁程度は大きく、界面熱抵抗だけでは上記の説明は難しい。

金属と半導体との λ のオーダーの違いは 10^4 程度であり、 σ の 10^7 程度に比べると大幅に小さい。そのため基質固溶体中に分散しているSi粒子の熱伝導への寄与は、電気伝導とは異なり無視できないと考えられる。この点は(11)式と(12)式でも現れている。複合材料中の分散粒子サイズが熱のキャリア、すなわち自由電子の平均自由行程に近づく、界面でのキャリア散乱頻度が増加して分散粒子の λ は低下するだろう。また、Si粒子中へのAl固溶量は非常に小さいと推定され、自由電子や正孔だけではなくフォノンも熱のキャリアとして一定の割合を占めている可能性が高い。フォノン伝導に対するサイズ効果は、粒子サイズがナノスケールになると顕著になるという計算結果が報告されている²⁰⁾。供試材のミクロ組織をFig. 7に示す。Si粒子サイズは大きなものでは数十 μm だが、厚さ数 μm 程度の針状の粒子も散見され、一部の微細なSi粒子では λ_{Si} 降下が起こり得る可能性がある。ただし、Fig. 7からもわかる通り、5%および10%SiではSi粒子の体積分率は数%～十数%と考えられ、マクスウェルの式の前提である第二相粒子の体積分率が母相よりも十分に小さいという条件を満たしていない。そのため定量的な議論ができていない可能性がある。さらに詳細に考察するためには粒子の体積分率や形状などを考慮して複合則の式を検討する必要があるが、この点については今後の課題としたい。

以上のことから、本報の測定結果にマクスウェルの式が適

用できると仮定して解析すると、 $V_{\lambda\text{-Si}}$ が $V_{\sigma\text{-Si}}$ に比べて $V_{\text{sol-Si}}$ と大きな乖離を示したことは界面熱抵抗と微細Si粒子での λ_{Si} 降下が原因とすれば、定性的ではあるが理解できる。

4. 結 言

(1) 溶体化処理したAl-Si合金の電気比抵抗 ρ を測定し、アルミニウムに固溶したSiの77 Kおよび298 Kでの ρ への寄与として、それぞれ $\Delta\rho_{77}^{\text{Si}} = 5.65 \text{ n}\Omega\text{m}\cdot\text{mass}\%^{-1}$ 、 $\Delta\rho_{298}^{\text{Si}} = 5.71 \text{ n}\Omega\text{m}\cdot\text{mass}\%^{-1}$ が得られた。

(2) 熱伝導率 λ についても同様に固溶Siの λ^{-1} への寄与として、 $0.856 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1}\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{mass}\%^{-1}$ が得られた。

(3) 電気比抵抗と熱伝導率はSiのほぼ全量が固溶している1.4 mass%Siまではヴァーデマン・フランツ則に従ったが、5 mass%Siと10 mass%Siは晶析出Si粒子の影響で1.4 mass%Si以下とは異なる傾向を示した。

(4) マクスウェルの式を使って熱伝導率および電気比抵抗の実測値から計算したSi粒子の体積分率 $V_{\lambda\text{-Si}}$ と $V_{\sigma\text{-Si}}$ は、いずれもマティーセン則経験式を使って求めた ρ_{M} を基に算出した $V_{\text{sol-Si}}$ より大きくなった。 $V_{\sigma\text{-Si}}$ の乖離については晶析出粒子のキャリア遮蔽効果の寄与、 $V_{\lambda\text{-Si}}$ の乖離はそれに微細Si粒子界面でのフォノン散乱の寄与が加わったものと仮定すると、測定結果が無理なく説明できる。

参 考 文 献

- 1) 大中逸雄：鑄造工学, **87** (2015), 265-286.
- 2) 堀川 宏：軽金属, **58** (2008), 259-274.
- 3) 例えば、小松伸也、池田勝彦、筑田昌宏、小林絃二郎：軽金属, **41** (1991), 510-514.
- 4) 貞富信裕、濱本直也、西郷恒和、山下 治：粉体および粉末冶金, **49** (2002), 793-798.
- 5) R.Brandt and G.Neuer: Int. J. Thermophys., **28** (2007), 1429-1446.
- 6) 北岡山治：軽金属, **61** (2011), 485-503.
- 7) J.L. Murray and A.J. McAlister: Bull. Alloy Phase Diagrams, **5** (1984), 74-84.
- 8) 小松伸也、藤川辰一郎：軽金属, **47** (1997), 170-181, 396-406.
- 9) 小松伸也、村松俊樹：軽金属, **50** (2000), 518-526.
- 10) 小松伸也、池田勝彦、松尾 守、村松俊樹：軽金属, **41** (1991), 465-470.
- 11) 西尾通卓、那須三郎、村上陽太郎：日本金属学会誌, **34** (1970), 1173-1177.
- 12) P.D. Desai, H.M. James, and C.Y. Ho: J. Phys. Chem. Ref. Data, **13** (1984), 1131-1172.
- 13) G. Ghosh: Landolt-Börnstein New series IV/11A2 Light Metal Systems. Part 2: Selected Systems from Al-Cu-Fe to Al-Fe-Ti, Springer, (2005), 359-408.
- 14) Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho and P. G. Klemens: Thermophysical properties of matter - the TPRC data series. Volume 1. Thermal conductivity - metallic elements and alloys, IFI/Plenum, (1970), 1-9.
- 15) 杉本孝一、長村光造、山根壽己、牧 正志、菊池潮美、落合庄治郎、村上陽太郎：材料組織学, 朝倉書店, (1991), 161-178.
- 16) 日本金属学会編：“金属データブック”, 改訂4版, 丸善, (2004), 13.
- 17) 日本金属学会編：“金属データブック”, 改訂4版, 丸善, (2004), 10.
- 18) 小松伸也、池田勝彦、筑田昌宏、小林絃二郎：軽金属, **41** (1991), 510-514.
- 19) T. Baba, N. Taketoshi and T. Yagi: Jpn. J. Appl. Phys., **50** (2011), 11RA01.
- 20) 塩見淳一郎：伝熱, **50** (2011), 21-28.

Table 4 Comparisons of volume fraction of Si particles calculated from λ , σ and solute Si concentration calculated from ρ_{M} , $V_{\lambda\text{-Si}}$, $V_{\sigma\text{-Si}}$ and $V_{\text{sol-Si}}$, respectively.

Specimen	Solute Si $C_{\text{Si}}^{\text{SS}} / \text{mass}\%$	Volume fraction / vol. %		
		$V_{\lambda\text{-Si}}$	$V_{\sigma\text{-Si}}$	$V_{\text{sol-Si}}$
5%Si	1.41	28%	6.3%	4.1%
10%Si	1.39	53%	13%	9.9%

Fig. 7 Microstructures of Al-Si alloys.