

Doc No. 18-180-I-180 Rev. 0

2021年5月25日

トランスニュークリア株式会社

株式会社神戸製鋼所

バスケット用ほう素添加アルミニウム合金（1B-A3J04-0）の Mg 固溶強化の維持
に関する説明資料

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。

1. はじめに

本図書は、2021年3月5日付け説明資料「TK-26型キャスク型式証明 ほう素添加アルミニウム合金の説明方針について (Doc No. 18-180-I-178 Rev. 1)」の1項～3項に対応する内容について説明する。

2. Mg 固溶強化の維持を検討する背景について

ほう素添加アルミニウム合金（以下、「本アルミ合金」という）のMg添加範囲を表1最下段に示すが、本アルミ合金のMg添加量は1.0～1.4mass%に設定されている。また、本アルミ合金は、使用条件を-40℃～250℃に設定しており、この温度条件を踏まえてMgの固溶強化が維持されることを説明する必要がある。図1に、Al(-Mn)-Mg系合金におけるMg固溶限の文献調査及びThermo-Calc[®]による熱力学計算の結果¹⁾を示す。この図に示すように、Mgの固溶限評価値は、150℃程度以下でばらつきが比較的大きい。このため、バスケットにMgの固溶強化を利用したアルミニウム合金を使用する場合は、Mg固溶限の文献値をそのまま直接的に用いて説明することは難しい。また、Mgの過飽和度を駆動力として生じるMg系化合物は、キャスクの貯蔵末期に相当する100℃付近では、その析出速度が非常に小さくなるため、現実的な試験時間で60年後の状態を判断することは難しいと考えられる。この点に関しB添加されていないAl-Mn-Mg系合金については、キャスクにおける60年間の使用環境下で懸念すべき固溶強化の低下を生じないMg添加量(1.0mass%)が特定されている¹⁾。このため本説明資料では、B添加された本アルミ合金についても、当該のMg添加量を適用できることを説明する。

2.1 時効処理試験

キャスクの使用温度におけるMg系化合物の析出挙動を調査するため、本アルミ合金の化学成分範囲に対しMgを過剰に添加した供試材を用意した。供試材の化学成分分析値を、表1に示す。本アルミ合金は、溶解工程においてB添加するため溶湯の粘性が高くなる傾向であるため、さらに溶湯の粘性を増加させるMgの添加量は、铸造性を考慮し最大約3mass%とした。これらの供試材は、125、150、175及び200℃の4水準で、最大で約10,000hまでの時効処理試験に供した。供試材は、所定の時効処理時間に対応した個数を用意し、初期状態における導電率をそれぞれ測定した。導電率は、日本フェルスター製シグマテスト2.069を用いて、試料温度を30℃に調整して測定した。時効処理を経た供試材についても、同様に導電率を測定した。なお、得られた導電率は、標準軟銅の30℃における比抵抗 $17.92\text{n}\Omega\text{m}^{1),2)}$ を用いて比抵抗に換算した。

なお、Mgが過剰に添加された供試材では、Mg系化合物として Al_3Mg_2 が析出するが、この化合物はフェノールに溶解することが知られており、このためアルミニウム母相と分離して抽出することは技術的に難しい^{3),4)}。また、アルミニウム合金中のMg量を測定するJIS規格は、サンプルを全て溶解させることが前提条件となっており^{5),6)}、ア

ルミニウム母相の固溶 Mg 量を評価する目的には適さない。このため、本試験では固溶 Mg 量の変化との対応関係が確認されている比抵抗値⁷⁾を用いた。

2.2 試験結果及び解析結果

2.2.1 比抵抗の変化傾向について

時効処理試験の結果得られた導電率及び比抵抗を、表 2 に示す。また、比抵抗の変化傾向を図 2 に示す。

まず、供試材 No. 1-1B 及び No. 1-2B は、いずれの温度条件においても 10,000h を通じて変化傾向は認められない。これらの供試材は、Mg 添加量が低く、析出の駆動力となる過飽和度が小さいために、10,000h までの時効処理試験では Mg 系化合物の析出がほとんど生じなかったと考えられる。なお、天野らは、Al-2.09at%Mg 合金について $150^{\circ}\text{C} \times 10^7\text{s}$ (約 0.32 年に相当) の時効処理試験を行い、この間比抵抗の変化傾向が認められなかったことを報告している⁸⁾。この結果は、本説明資料で同等の Mg 添加量である供試材 No. 1-2B に関する時効処理試験の結果と整合している(ただし、時効処理時間は本説明資料の方が長い)。天野らは、当該の時効処理試験について、 10^8s (約 3.2 年に相当) まで熱処理すれば、析出により比抵抗が変化すると考察している。本アルミ合金については、Mg 添加量が 1mass% とさらに少量のため、Mg 系化合物の析出にはさらに長時間を要すると考えられる。このため、Mg 固溶強化の維持については、キャスクの使用環境を踏まえた 60 年後の組織状態を適切に評価する必要がある。この観点で、過剰に Mg を添加した供試材を用いた時効処理試験により、Mg 系化合物の析出速度を解析し、キャスクの使用環境に着目した Mg 添加量を定量的に検討することが適切と判断している。

Mg をより過剰に添加した供試材 No. 1-3B については、比抵抗の減少傾向が認められる。図 3 に、比抵抗の減少量を示す(このグラフでは、比抵抗が減少する方向を正とした)。この図が示すように、供試材 No. 1-3B の比抵抗はいずれの温度条件においても減少する傾向が認められ、同等の Mg 添加量で B を含有しない供試材 No. 1-3 の減少傾向と同等である。なお、この比抵抗の減少は、過飽和 Mg が Mg 系化合物(Al_3Mg_2)を生じることで、アルミニウム母相の固溶 Mg 量が低下したことにより生じたと判断される^{1),8)}。

2.2.2 比抵抗変化傾向の解析

前節で確認した供試材 No. 1-3B に関する比抵抗の減少傾向を、速度論的に解析するための評価過程を以下に示す。

析出の反応率(析出量の割合)の時間依存性は、Johnson-Mehl-Avrami の式によって記述した。これは、析出の反応率を f ($0 \leq f \leq 1$)、時間を t とすると以下の式で表される⁹⁾。

$$f = 1 - \exp(-Kt^n) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 K : 反応速度定数、 n : 時間指数、である。この(1)式は、両辺の対数を2回取ると以下のように変形できる。

$$\ln \ln \frac{1}{1-f} = \ln K + n \ln t \quad \dots\dots (2)$$

この(2)式の左辺と $\ln t$ を用いてプロットして得られた直線の勾配及び切片から n と K が求まる。その結果により、各時効処理条件の比抵抗の減少傾向を速度論的に解析することが可能となる。このようなグラフを、Avrami プロットという。

今回実施した時効処理試験結果を Avrami プロットにより解析するためには、比抵抗の減少傾向を反応率 f に換算する必要がある。この反応率 f は次に述べる手順で評価した。まず、本試験における反応率とは、固溶 Mg 量が各温度条件の固溶限と等しくなるまで過飽和 Mg が析出した状態における析出量（この状態は、 $f=1$ に対応する）と、各時効処理条件における析出量の比である。このため反応率 f を求めるためには、まず $f=1$ に対応する固溶限を設定する必要がある。本申請では、保守側の評価として、図 1 で最も小さい固溶限を示した天野らの式⁸⁾により各温度条件における Mg 固溶限を求めた。

$$\frac{\ln\left(\frac{C_{eq}}{0.385}\right)}{1-2C_{eq}} = 1.948 - \frac{2230}{T} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 C_{eq} : Mg 固溶限 (at%)、 T : 温度 (K) である。

時効処理試験に用いた供試材は、Al-Mn-Mg-B 系合金であるが、次に述べる理由により Al-Mg 系合金の Mg 固溶限を適用できると判断した。まず、300℃未満における Mn の固溶限はほぼゼロであり¹⁰⁾、添加された Mn はほぼ全量が Mn 系化合物 (Al₆Mn など) として晶出或いは析出していると考えられる。また、B については純アルミニウムの融点未満での固溶限はほぼゼロであるため¹¹⁾、アルミニウム母相にはほとんど存在していないと考えられる。さらに、AlB₂ は溶解工程において Mg を吸収することがわかっているが、当該化合物は熱的に極めて安定しておりキャスクの使用温度条件では変化しない（参照：2021年5月24日付け説明資料「バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-A3J04-0) の金属組織等に関する説明資料」Doc No. 18-180-I-179 Rev. 0)。したがって、本アルミ合金のアルミニウム母相には Mg のみが固溶している状態となっており、Al-Mg 系合金における Mg 固溶限を適用できると判断される。

反応率 $f=1$ に対応する析出反応が完了した状態での析出量は、供試材 No. 1-3B の Mg 添加量から、(3)式の Mg 固溶限及び供試材の製造過程で AlB₂ に吸収された Mg 量を差し引くことによって求まる。なお、AlB₂ に吸収された Mg 量は、B 添加量及び供試材 No. 1-3B に含有される B 系化合物の組成式 (Al_{0.9}, Mg_{0.1})B₂ により求まる（参照：2021年5月24日付け説明資料「バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-

A3J04-0) の金属組織等に関する説明資料」 Doc No. 18-180-I-179 Rev. 0) 。このように評価した Mg 系化合物の析出量は、文献値を用いて比抵抗減少量に換算できる。ここでは、Willey による固溶 Mg 及び非固溶 Mg の比抵抗に対する寄与量 (固溶 : $5.4n \Omega\text{m}/\text{mass}\%$ 、析出 : $2.2n \Omega\text{m}/\text{mass}\%$) ⁷⁾ を用いた。例えば、1.0mass% の Mg が析出する場合は、比抵抗は $3.2n \Omega\text{m}$ (= $5.4 - 2.2$) 減少すると評価される。以上の手順に基づき、各温度条件について反応率 $f=1$ に対応する比抵抗減少量を評価した。この結果を、表 3 に示す。表 4 には、この計算過程で用いた Al、Mn、Mg 及び B の原子量を示した。

反応率 f は、表 2 に示す各時効処理条件の比抵抗減少量を分子、表 3 に示す反応率 $f=1$ に対応する比抵抗減少量を分母とした比によって評価した。この結果を、表 5 に示す。なお、計算上反応率 f が負数になった値は、測定等のばらつきの影響と考えられるためゼロ (0.00) とした。この表には、比較のため供試材 No. 1-3 の値も合わせて示した (参照 : 補足説明資料 1-7 別紙 3-8 表)。

図 4 では表 5 の値を用いて Avrami プロットを評価した。これらの直線は、各データをを用いた回帰分析により求めた。ここには、比較のため供試材 No. 1-3 に関する評価結果を合わせて示すが、供試材 No. 1-3B とほぼ同等の傾向が認められる。なお、200°C におけるデータは、供試材 No. 1-3 と同様、比抵抗の減少量が小さいために Avrami プロットを整理できなかつた。図 4 に示す Avrami プロットの各直線の勾配 (n に対応) 及び切片 ($\ln K$ に対応) から求めた反応速度定数 K と時間指数 n を、表 6 にまとめて示す。これらの値を (1) 式に代入すると、任意の反応率 f に対応する時間 t を評価できる。

2.2.3 析出開始時間

本説明資料では、参考文献 1) と同様に、反応率 $f=0.10$ に対応する時間を析出開始時間 t^* として定義した。(3) 式に、 $f=0.10$ と表 6 に示す定数を代入して、供試材 No. 1-3B の各温度条件における析出開始時間 t^* を評価した。この結果を、表 7 に示す。

2.2.4 TTP 線図

表 7 に示す供試材 No. 1-3B の析出開始時間を、図 5 にプロットして示す。この図に示した供試材 No. 1-3、No. 1-4 及び No. 1-5 のプロットは、それぞれ参考文献 1) からの引用である。図中に示す曲線は、実測した析出開始時間に対し、以下のモデル式を用いて回帰分析により求めた析出開始線 (C 曲線) である。

$$t^* = \frac{k_1}{I_0} \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \exp\left(\frac{k_2}{R T^3 \left\{ (1-C_{Mg}^\beta) \ln \frac{1-C_{eq}}{1-C} + C_{Mg}^\beta \ln \frac{C_{eq}}{C} \right\}^2}\right) \dots\dots (4)$$

ここで、 I_0 、 k_1 、 k_2 : 係数、 Q_d : Mg の拡散の活性化エネルギー (121 kJ/mol) ¹³⁾、 R : 気体定数 (8.314 J/(K·mol))、 T : 絶対温度 (K)、 C_{Mg}^β : 析出相 (Al₃Mg₂) における Mg の原子分率 (0.385) ⁸⁾、 C_{eq} : 固溶限 (原子分率)、 C : 初期の固溶 Mg 量 (原子分率)、

である。

図 5 に示すように、供試材 No. 1-3B の C 曲線は、同等の Mg 添加量である供試材 No. 1-3 とほぼ一致する傾向が認められる。細かく比較すれば、供試材 No. 1-3B の C 曲線はわずかに長時間側にずれているが、これは Mg 系化合物の析出が遅くなる、すなわち Mg 固溶強化がより維持される方向の変化であるため問題無いと判断される。

2.2.5 SLP 線図 (S-L 平面)

本アルミ合金に対し過剰に Mg を添加した供試材 No. 1-3B の試験結果を、本アルミ合金における Mg 添加量設定の妥当性の検討に用いるためには、SLP 線図 (S-L 平面) が必要となる¹⁾。SLP 線図の作図に用いた評価式を以下に示す。

$$S = \frac{C - C_{eq}}{C_{eq}} \quad \dots\dots (5)$$

$$L^* = L^* \times \sqrt[3]{C(at\%)/1.0(at\%)} \quad \dots\dots (6)$$

$$L^* = \sqrt{2Dt^*}, D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 D_0 : 振動数因子 ($0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$)¹³⁾である。SLP 線図は、(5)式によって表される過飽和度 S を横軸にとり、(6)式によって表される拡散距離 L^* を縦軸にとり作図される。この図では、析出のメカニズムが同じであれば、異なる Mg 添加量の供試材の析出開始条件を過飽和度 S と拡散距離 L^* により一意的に定めることができる。このような特徴により、過剰に Mg を添加した供試材 No. 1-3B の析出開始時間を用いて、本アルミ合金の Mg 添加量の妥当性を検討することができる。

図 6 に、供試材 No. 1-3B に関する SLP 線図を示す。この図には、比較のため供試材 No. 1-3~No. 1-5 のデータも合わせて示した。この図より、供試材 No. 1-3B の析出開始線 (赤色の三角マーク及び曲線で示した) は、供試材 No. 1-3~No. 1-5 の析出開始線とほぼ一致する傾向が認められる。SLP 線図では、析出開始線より原点側の領域では析出が生じないため、固溶 Mg 量の低下による強度低下が生じないと判断できる。図 6 には、キャスクにおける使用条件を想定し、Mg 添加量を 1.0 mass% とした本アルミ合金 (組成は、Al-1.5Mn-1.0Mg-1.0B (mass%) とした) を 60 年間一定温度で保持した場合の条件を赤色の実線で示した。代表点として、50°C、75°C 及び 100°C で 60 年間保持された場合の条件をこの実線上にプロットして示している。この 60 年基準線と称される曲線は、SLP 線図におけるキャスクの使用環境を表している。なお、本アルミ合金に関する 60 年基準線の直ぐ右上の実線は、B 添加しない場合の Al-1.5Mn-1.0Mg (mass%) 合金に関する 60 年基準線である。2021 年 5 月 24 日付け説明資料「バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-A3J04-0) の金属組織等に関する説明資料」 (Doc No. 18-180-I-179 Rev. 0) で説明したように、本アルミ合金の化学成分範囲で作製された供試材は、B 系化合物が $(Al_{0.72}, Mg_{0.2})B_2$ として存在していることが確

認められている。このため、貯蔵初期におけるアルミニウム母相の固溶 Mg 量は減少し、これに伴い Mg の過飽和度が低下するため、Al-1.5Mn-1.0Mg (mass%) 合金と比較して、本アルミ合金の 60 年基準線は左側にスライドする結果となった。

2.3 考察

本アルミ合金に Mg を過剰に添加した供試材 No. 1-3B に関する Mg 系化合物の析出速度は、以下に示す比較検討の結果、同等の Mg 添加量を含有する供試材 No. 1-3 と同等と認められる。

- 比抵抗の減少傾向 (図 3)
- Avrami プロット (図 4)
- TTP 線図 (図 5)

以上より、Mg 系化合物の析出速度は、B 添加によりほとんど影響を及ぼされないと判断される。また、過飽和度と拡散距離を用いて評価した SLP 線図において、供試材 No. 1-3B の析出開始線が、Al-Mn-Mg 系合金について評価された析出開始線とほとんど一致する傾向が認められた。したがって、本アルミ合金についても、Al-Mn-Mg 系合金を用いて決定した Mg 添加量 (1.0mass%) を適用できると認められる。なお、本アルミ合金について新たに評価した 60 年基準線は、Al-Mn-Mg 系合金のそれと比較してより左側にスライドし、析出開始線との間隔が広がる結果となったが、これは Mg 固溶強化の維持の観点から、裕度が大きくなる方向であり問題無い。なお、キャスクの温度条件は、供用期間中に指数関数的に低下するが、60 年基準線は一定温度で保持した条件で評価されている。これは、拡散及び過飽和度の温度依存性を踏まえれば、非常に保守性の高い前提条件である。

一般に析出のメカニズムには、アルミニウム母相内にランダムに新しい相 (Al_3Mg_2) が形成される均一核生成と、結晶粒界上や晶出物あるいは分散粒子の界面上で生じる不均一核生成がある。不均一核生成は、均一核生成と比較して生じやすいと考えられている。2021 年 5 月 24 日付け説明資料「バスケット用ほう素添加アルミニウム合金 (1B-A3J04-0) の金属組織等に関する説明資料」(Doc No. 18-180-I-179 Rev. 0) で説明したように、本アルミ合金は、B 添加により結晶粒組織が微細化することが認められている。これは、定性的には Mg 系化合物の核生成サイトを増加させる方向、つまり析出速度を増加させる方向の組織変化であるが、本説明資料の時効処理試験において、B 添加により Mg 系化合物の析出速度の変化は認められなかった。この結果より、本アルミ合金では、Mg 系化合物の核生成サイトとして Mn 系化合物の析出物が支配的になっていると考えられる。したがって、仮に B 添加により Mn 系化合物の析出組織が変化したとす

れば、Mg系化合物の析出速度に反映されると考えられることから、B添加はMn系化合物の析出組織に影響を及ぼしていないと判断される。上述の説明資料においては、TEM観察によりMn系化合物の析出組織を確認しており、その観察結果は以上の考察と整合している。

2.4 まとめ

本アルミ合金の化学成分範囲を超え過剰にMgを添加した供試材を用いて、時効処理試験を実施し、固溶Mg量の減少に伴う比抵抗の減少傾向を整理した。この比抵抗の減少傾向を用いて、Avramiプロット及びTTP線図を評価した結果、同等のMg添加量を有しBを含有しないAl-Mn-Mg系合金とほぼ同等の傾向が認められた。さらに、TTP線図よりSLP線図を評価した結果、本時効処理試験の結果得られた析出開始線は、参考文献1)で報告されているAl-Mn-Mg系合金のそれとほぼ一致する傾向が認められた。その結果、本アルミ合金の化学成分範囲に適合した供試材については、固溶Mg量は変化せず、60年後においてもMgによる固溶強化が維持されると判断された。

以上の結果より、本アルミ合金のMg添加量は、Bを含有しないAl-Mn-Mg系合金を基に検討したMg添加量(1.0mass%)に基づき規定できると判断される。

参考文献)

- 1) 篠崎崇、下条純、赤松博史、松本克史、新谷智彦、水谷淳、中林洋右、“Al-Mn-Mg合金におけるβ相の析出挙動に及ぼすMg添加量の影響とそのモデル化”、軽金属、70巻、p43、(2020)
- 2) 日本産業標準調査会：JIS C 3001、“電気用銅材の電気抵抗”、(1981)
- 3) 松尾守、村松俊樹、浅沼彰、小松伸也、池田勝彦、“フェノール溶解ろ液法によるアルミニウム合金中の固溶FeおよびMnの分析”、軽金属、47巻、p15、(1997)
- 4) 佐藤健、泉巖、“アルミニウム合金中の金属間化合物の科学的抽出分離と定量分析”、第68回軽金属学会春期大会講演概要、No. 28、(1985)
- 5) 日本産業標準調査会：JIS H 1306、“アルミニウム及びアルミニウム合金の原子吸光分析方法”、(1999)
- 6) 日本産業標準調査会：JIS H 1357、“アルミニウム及びアルミニウム合金中のマグネシウム定量方法”、(1999)
- 7) L. A. Willey: quoted by W. A. Dean in “Aluminum”, ed. K. R. van Horn, ASM, vol. 1, p174, (1967)
- 8) 天野英隆、小松伸也、池田勝彦、河本知広、“アルミニウム中のMgの523 K以下の平衡固溶度”、軽金属、52巻、p210、(2002)
- 9) 里達雄、“アルミニウム大全”、日刊工業新聞社、(2016)
- 10) 梶山毅、深田和博、“Al-Mn系合金”、軽金属、38巻、p362、(1988)

- 11) O. N. Carlson, "The Al-B (Aluminum-Boron) System", Bulletin of Alloy Phase Diagrams, Vol. 11, No. 6, p560, (1990)
- 12) 理科年表 (平成 28 年) 、丸善出版、 (2015)
- 13) 平野賢一、 "アルミニウム中の拡散" 、軽金属、29 巻、 p249 (1979)

表 1 時効処理試験に用いた供試材の化学成分分析値

供試材 No.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	B	Al
1-1B								残
1-2B								残
1-3B								残
1-1 ^{※1}								残
1-2 ^{※1}								残
1-3 ^{※1}								残
1-4 ^{※1}								残
1-5 ^{※1}								残
1B-A3J04-O の規定範囲								0.25 以下

※1) 本アルミ合金の Mg 添加量の検討に使用した参考文献 1) の供試材。

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (1/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
125	1	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	20	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	50	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	100	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	200	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (2/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	熱処理前	熱処理後	減少量
125	293	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	600	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	1011	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	2500	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5141	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	10010	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (3/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
150	1	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	20	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	50	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
100	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						
200	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (4/8)

保持 温度 (°C)	保持 時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
150	293	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	600	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	1011	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	2500	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5142	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
10011	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (5/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
175	1	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	20	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	50	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	100	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
200	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (6/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率 (%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
175	293	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	600	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	1011	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	2500	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5141	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
10010	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (7/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率(%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
200	1	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	20	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	50	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
100	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						
200	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表 2 時効処理試験材の導電率及び比抵抗 (8/8)

保持温度 (°C)	保持時間 (h)	供試材 No.	導電率(%IACS)		比抵抗 (nΩm)		
			時効処理前	時効処理後	時効処理前	時効処理後	減少量
200	293	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	600	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	1011	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	2500	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
	5141	1-1B					
		1-2B					
		1-3B					
10009	1-1B						
	1-2B						
	1-3B						

表 3 反応率 $f=1$ に対応する各供試材の比抵抗減少量 (評価値)

(nΩm)

	供試材 No.
温度(°C)	1-3B
125	
150	
175	
200	

表 4 Al、Mn、Mg、及びBの原子量¹²⁾

元素	Mn	Mg	Al	B
原子量	54.94	24.31	26.98	10.81

表 5 各時効処理条件における反応率 (1/2)

(a) 125℃の反応率

保持温度 (℃)	供試材 No.	保持時間(h)					
		1	5	20	50	100	200
125	1-3						
	1-3B						
	供試材	保持時間(h)					
	No.	293	600	1011	2500	5141	10010
	1-3						
	1-3B						

(b) 150℃の反応率

保持温度 (℃)	供試材 No.	保持時間(h)					
		1	5	20	50	100	200
150	1-3						
	1-3B						
	供試材	保持時間(h)					
	No.	293	600	1011	2500	5142	10011
	1-3						
	1-3B						

表 5 各時効処理条件における反応率 (2/2)

(c) 175°Cの反応率

保持温度 (°C)	供試材 No.	保持時間 (h)					
		1	5	20	50	100	200
175	1-3						
	1-3B						
	供試材	保持時間 (h)					
	No.	293	600	1011	2500	5141	10010
	1-3						
	1-3B						

(d) 200°Cの反応率

保持温度 (°C)	供試材 No.	保持時間 (h)					
		1	5	20	50	100	200
200	1-3						
	1-3B						
	供試材	保持時間 (h)					
	No.	293	600	1011	2500	5141	10009
	1-3						
	1-3B						

表 6 各時効処理条件における時間指数 n 及び反応速度定数 K

保持温度 (°C)	供試材 No.	n	$\ln K$	K
125	1-3			
	1-3B			
150	1-3			
	1-3B			
175	1-3			
	1-3B			

表 7 各時効処理条件における析出開始時間

保持温度 (°C)	供試材 No.	析出開始時間 (h)
125	1-3	
	1-3B	
150	1-3	
	1-3B	
175	1-3	
	1-3B	

表 8 各時効処理条件の過飽和度 S と析出開始時間に対応する拡散距離 L^*

保持温度 (°C)	No. 1-3		No. 1-3B	
	S (-)	L^* (μm)	S (-)	L^* (μm)
125				
150				
175				

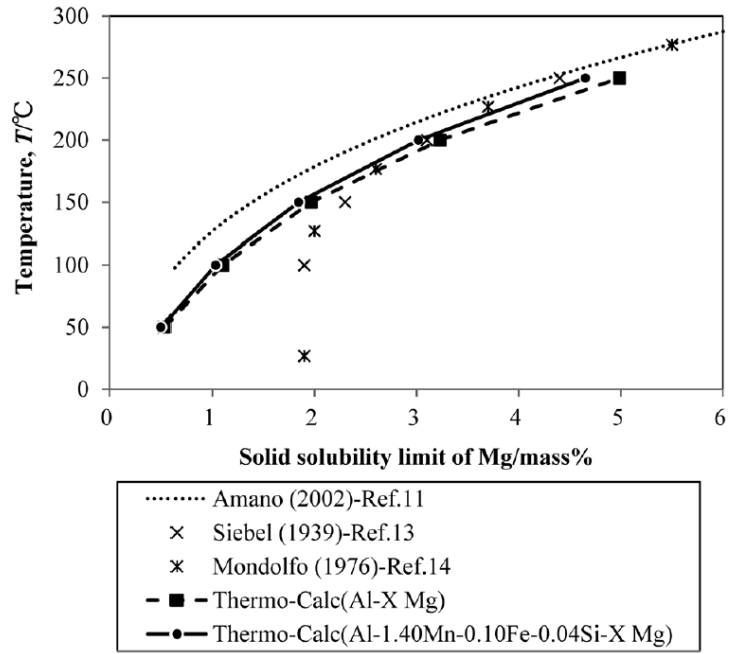
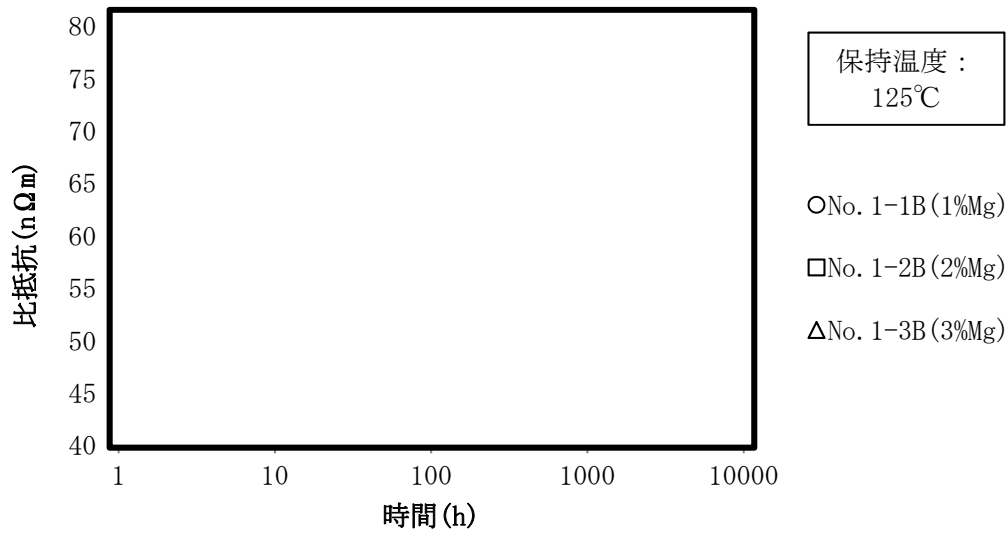
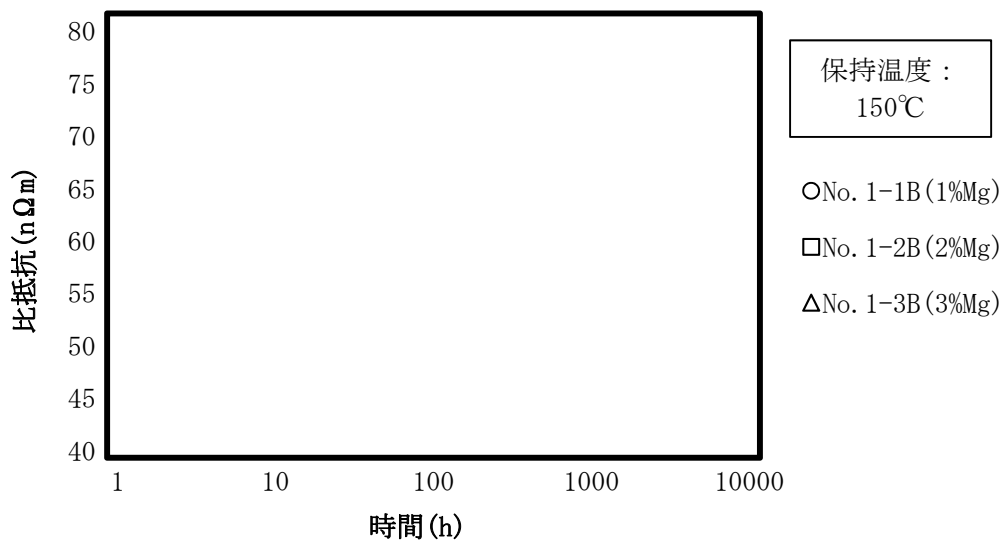


図1 Al(-Mn)-Mg系におけるMg固溶限曲線の文献値比較¹⁾

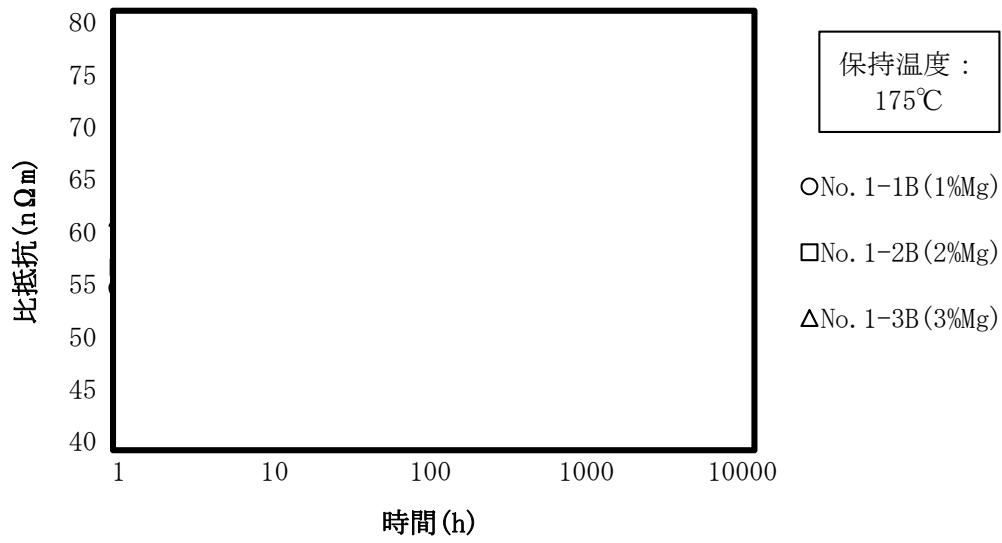


(a) 保持温度 : 125°C

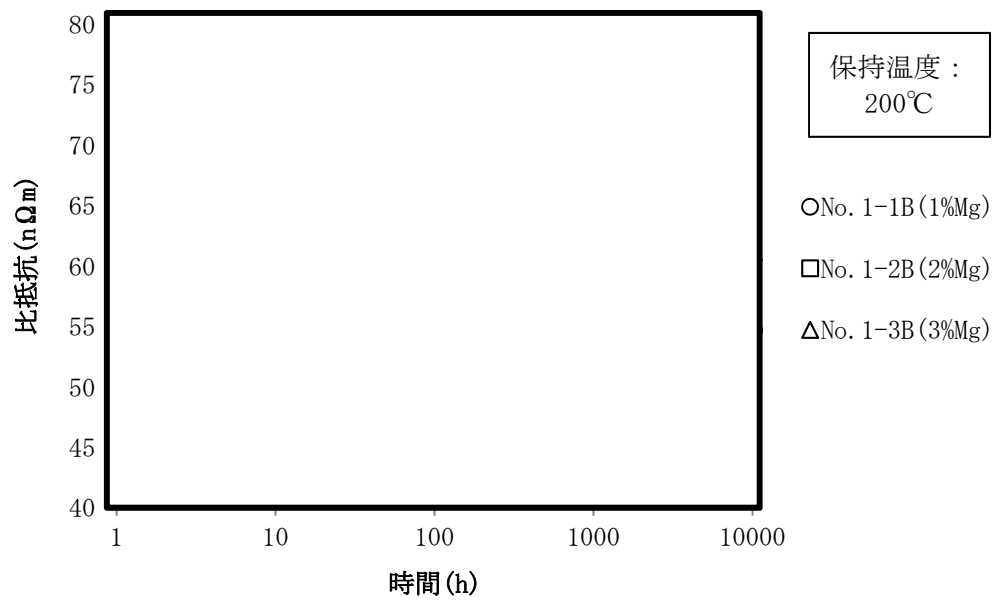


(b) 保持温度 : 150°C

図2 時効処理試験による比抵抗の変化 (1/2)

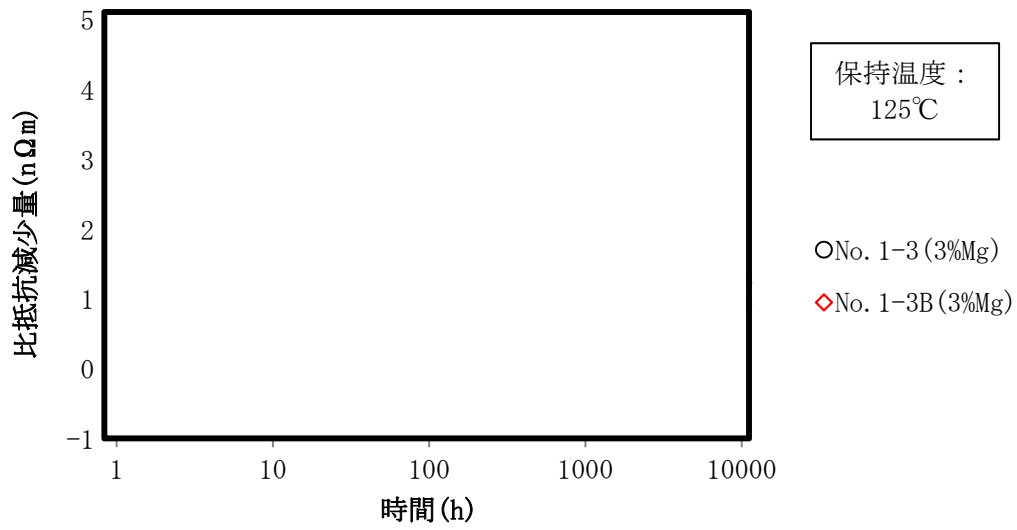


(c) 保持温度 : 175°C

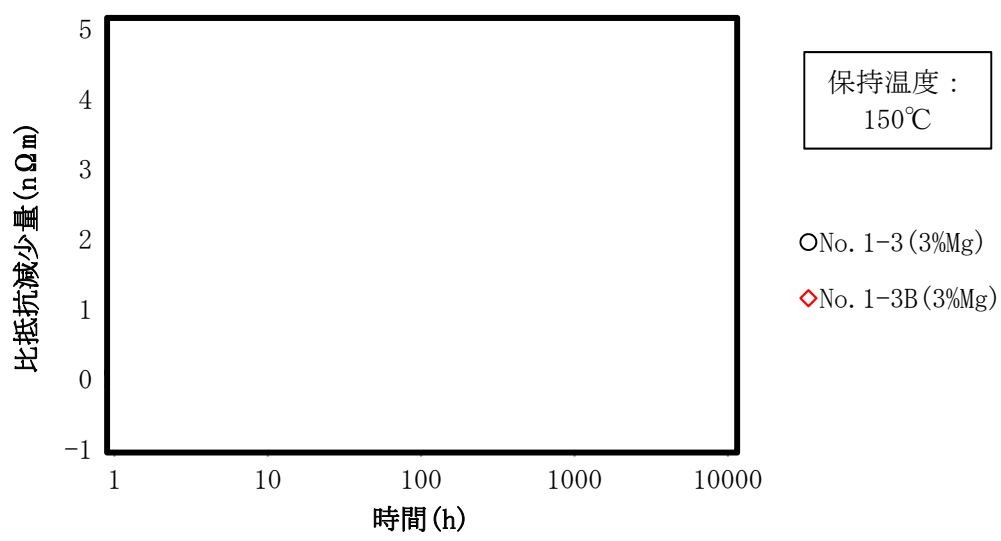


(d) 保持温度 : 200°C

図 2 時効処理試験による比抵抗の変化 (2/2)

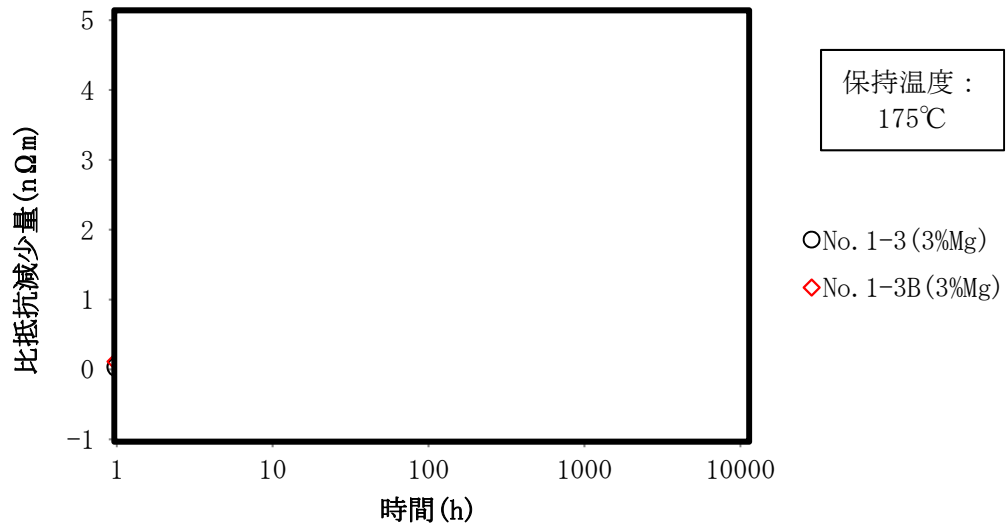


(a) 保持温度 : $125^{\circ}C$

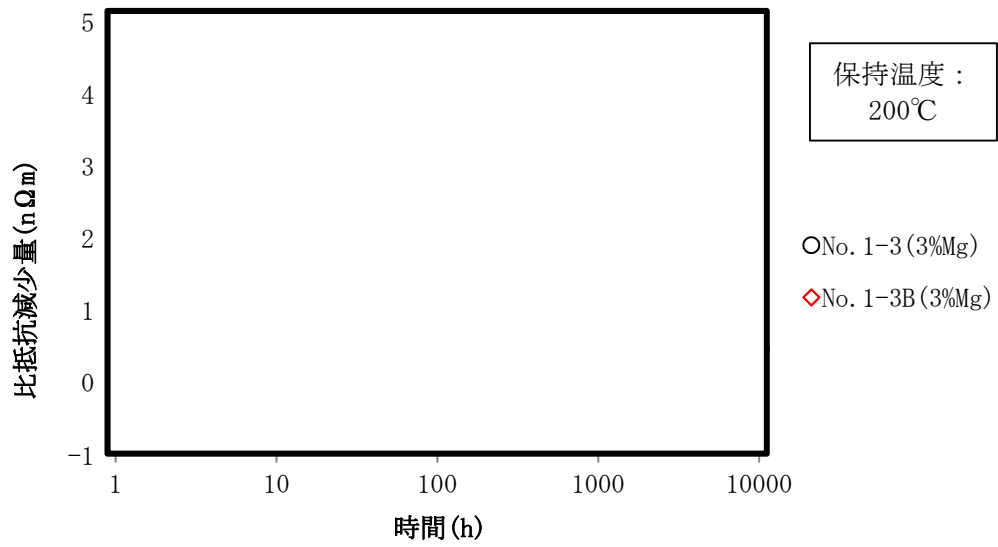


(b) 保持温度 : $150^{\circ}C$

図3 供試材 No. 1-3 と No. 1-3B に関する比抵抗減少量の比較 (1/2)

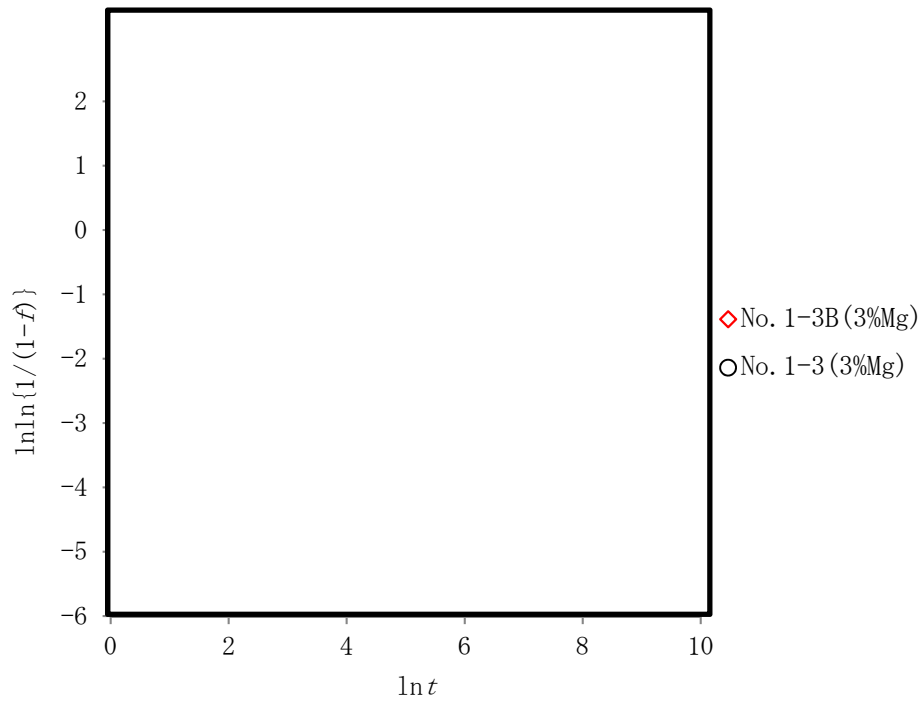


(c) 保持温度：175°C

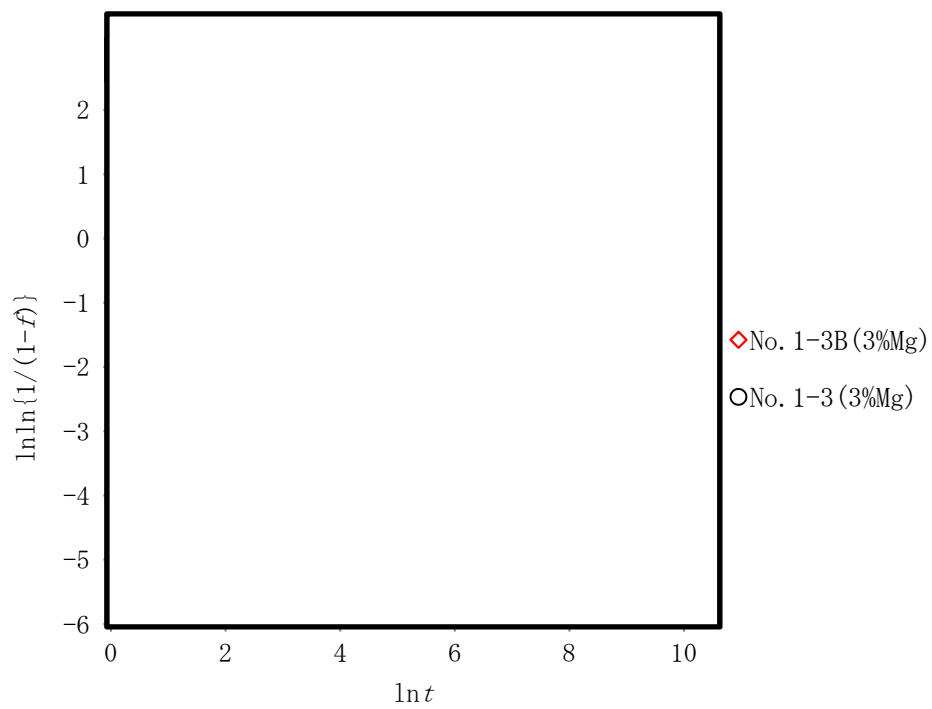


(d) 保持温度：200°C

図3 供試材 No. 1-3 と No. 1-3B に関する比抵抗減少量の比較 (2/2)

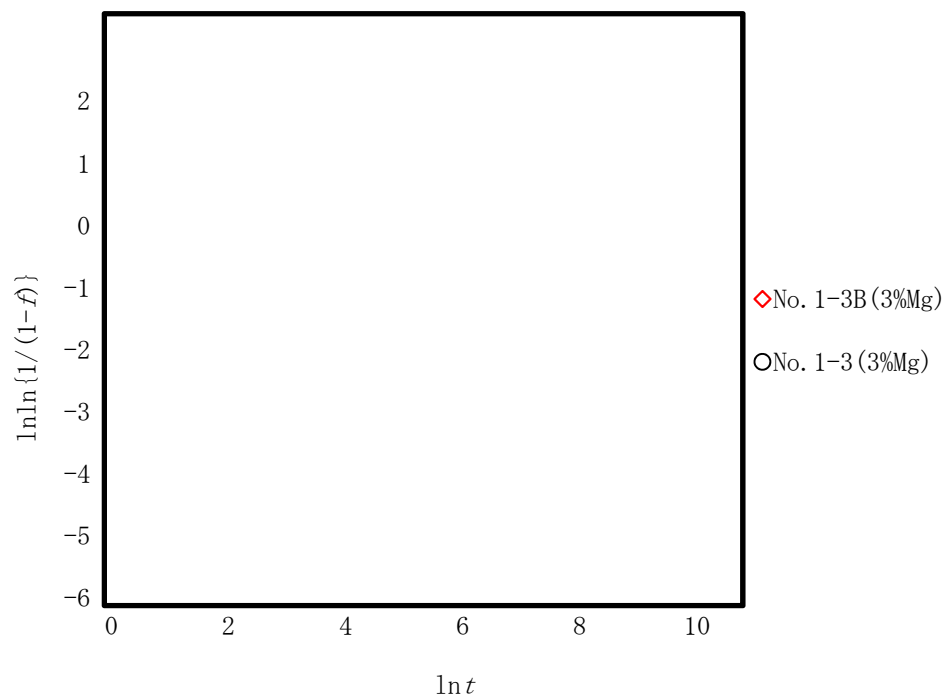


(a) 保持温度 : 125°C



(b) 保持温度 : 150°C

図 4 各時効処理試験条件における Avrami プロット (1/2)



(c) 保持温度 : 175°C

図 4 各時効処理試験条件における Avrami プロット (2/2)

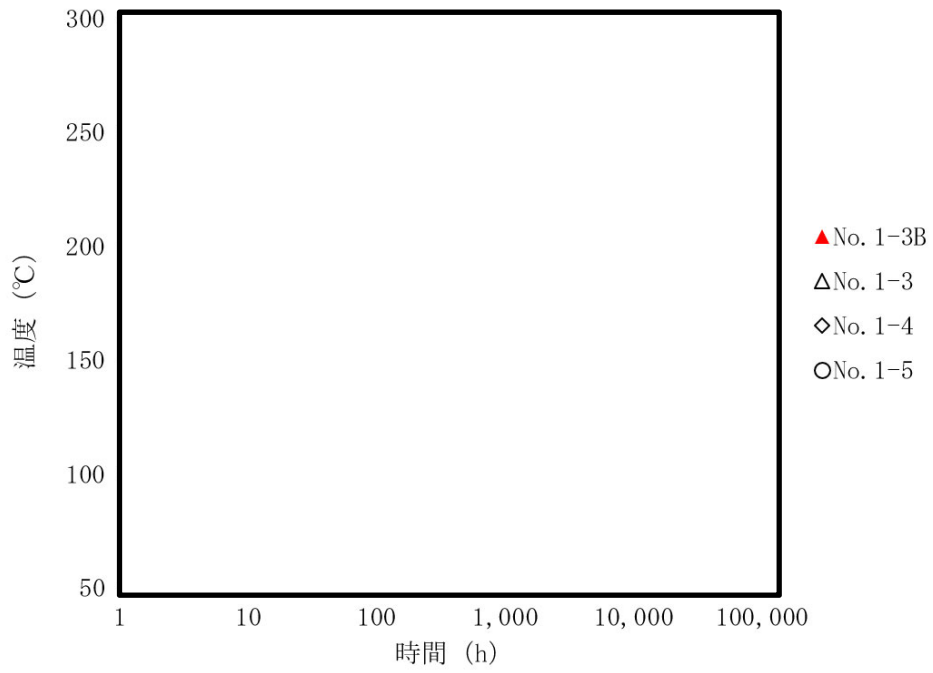


図5 時効処理試験の結果から得られた TTP 線図

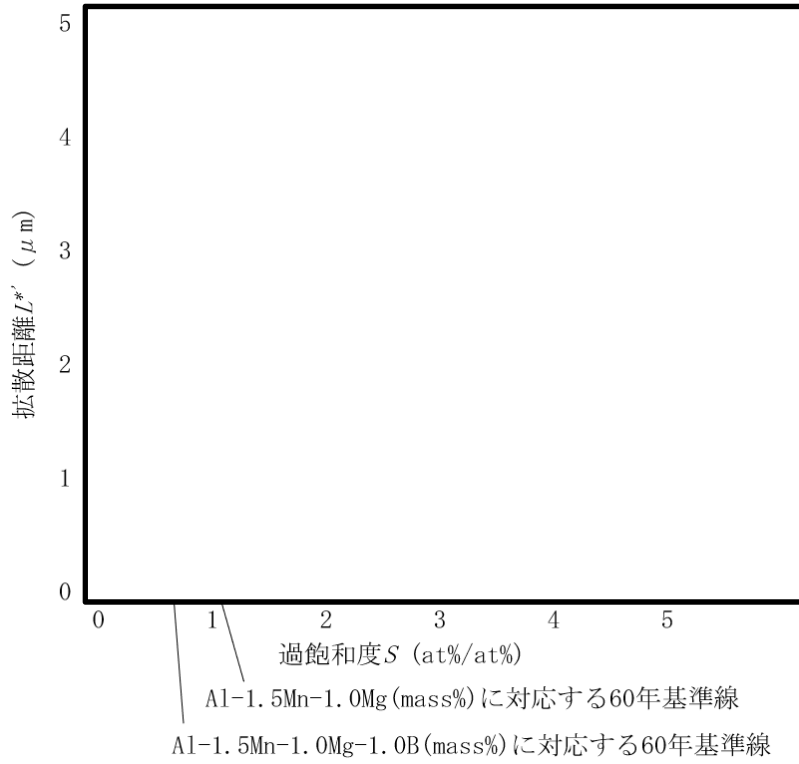


図6 過飽和度と拡散距離による析出開始条件の評価 (SLP 線図)