

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14037

研究課題名（和文）IMC粒子に起因するAl-Zn-Mg合金の水素脆性・延性破壊の競合理解

研究課題名（英文）Competitive understanding of hydrogen embrittlement and ductile fracture based on IMC particles in Al-Zn-Mg alloys

研究代表者

清水 一行 (Shimizu, Kazuyuki)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：30748760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：Al-Zn-Mg合金の高強度化において水素脆性の克服が課題となっている。具体的な克服方法として、本研究では金属間化合物粒子の分散を提案した。放射光3D/4D破壊挙動解析および水素分布解析を駆使し、粒子分散によるAl-Zn-Mg合金の高強度化・高延性化に挑戦した。主な金属間化合物粒子として、Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe粒子およびMn系粒子を選定した。研究の結果、Mn添加合金では、内部水素トラップ能が高いMn系分散粒子が形成され、水素脆性が抑制されることを実験・計算の両面で実証できた。Mn系粒子は、Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Feよりも微細に形態制御可能であることから、合金の力学特性改善に資する粒子として強く期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Al-Zn-Mg合金は代表的な高強度アルミニウム実用合金であり、航空機や新幹線など重量比強度が要求される部材に用いられている。輸送コストや環境負荷の観点から高強度化が希求されているが、水素脆化がそれを阻んでいた。本研究では、新しい水素脆化の克服法として粒子分散を学術的に探究した。合金の内部に基相と異なる第二相を形成させ、これに水素を固定させるという視点は新奇であり、今後は学術的・産業的展開を大いに期待できる。

研究成果の概要（英文）：Overcoming hydrogen embrittlement is a challenge in strengthening Al-Zn-Mg alloys. As a specific method to overcome this problem, dispersion of intermetallic compound particles has been proposed in this study. Using synchrotron 3D/4D fracture analysis and hydrogen partitioning analysis, the challenge of increasing the strength and ductility of Al-Zn-Mg alloys by particle dispersion was taken up. Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe and Mn-bearing particles were selected as the main intermetallic compound particles. The study has demonstrated both experimentally and computationally that Mn-bearing dispersoids with high internal hydrogen trapping capacity are formed in Mn-added alloys, and that hydrogen embrittlement is suppressed. The Mn particles are more finely morphologically controllable than Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, and are therefore strongly expected to contribute to improving the mechanical properties of the alloys.

研究分野：水素脆性

キーワード：水素脆性 アルミニウム合金 放射光X線CT 変形破壊挙動 水素トラップ 金属間化合物粒子 Al-Zn-Mg合金

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

Al-Zn-Mg (A7000系)合金は、高強度アルミニウム展伸材であり、航空機や新幹線といった高い重量比強度が要求される部材に実用されている。図1に示すように、添加元素であるZn・Mg量を増加させれば強度を稼げることは認識されているが、同時に応力腐食割れ(SCC)の感受性も増加するため(図2)、実用に耐えない。Al-Zn-Mg合金のSCCは水素脆性支配であり、Al-Zn-Mg合金の高強度化は、水素脆性の克服に帰着するといえる。申請者は、JST「ヘテロ構造制御」(期間：H26年度～R1年度)において、Al-Zn-Mg合金の水素脆性を研究した。これまでの研究で、申請者は、放射光X線トモグラフィと第一原理計算の連成より、合金中のトラップ水素分布の定量解析技術を確立し、nmサイズのMgZn<sub>2</sub>析出物界面に材料全体の90%以上の水素がトラップされることを明らかにした。さらに、MgZn<sub>2</sub>析出物界面の水素密度が18.9 atomH/nm<sup>2</sup>に達すると、界面凝集エネルギーが0 J/m<sup>2</sup>にまで低下して界面が剥離し、これが水素脆性の起源であることを解明した。

Al-Zn-Mg合金の水素脆性の起源が解明された一方で、その具体的な水素脆性克服手法が次の課題として残った。加工・熱処理により、粒径・転位密度・空孔濃度を増減させても、アルミニウム合金の水素脆性は解決しない。これらの水素トラップエネルギー(粒界・転位・空孔：0.25・0.08~0.17・0.29 eV/atom)は、析出物界面のそれ(0.35 eV/atom)よりも低いためである。析出物界面のトラップ水素を低減させて水素脆化を防止するためには、0.35 eV/atom以上のトラップエネルギーをもつサイトを合金中に設ける必要がある。このサイトとして、本提案では、μmサイズの金属間化合物(IMC)粒子内部を提案する。これまでの検討で、Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe粒子は、析出物よりも強い水素トラップエネルギー(0.55 eV/atom)をもつことが明らかになっており、粒子添加による水素脆化抑制を期待できる(IMC粒子の正の効果)。しかし、IMC粒子は延性破壊(デンプル型破壊)の核としても作用する(IMC粒子の負の効果)。水素脆性抑制を目的として、合金にIMC粒子を添加しても、それを適切に制御しない限り早期の延性破壊(破壊の助長)を招き、合金の延性は改善されない。

2. 研究の目的

本提案では、IMC粒子による水素脆性破壊の抑制と延性破壊の促進という、破壊特性に対する競合の理解を目的とする。力学・破壊挙動の3D解析および水素分布解析により、IMC粒子による水素脆性亀裂進展の抑制およびIMC粒子損傷・剥離(ポイド形成)に及ぼす水素の影響を定量評価する。この水素分布解析は、申請者が独自に確立させた技術であり、第一原理計算による水素トラップエネルギーと放射光トモグラフィによる水素トラップサイト密度マッピングを連成し、水素分布を可視化する技術である(図3)。

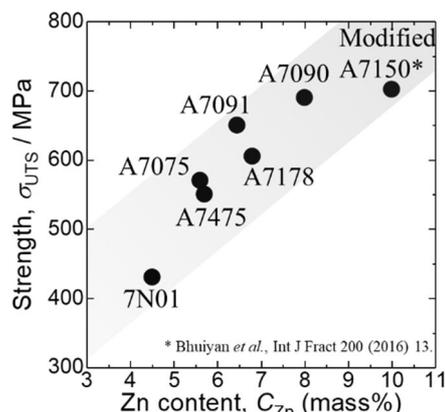


図1 Al-Zn-Mg合金の強度とZn量

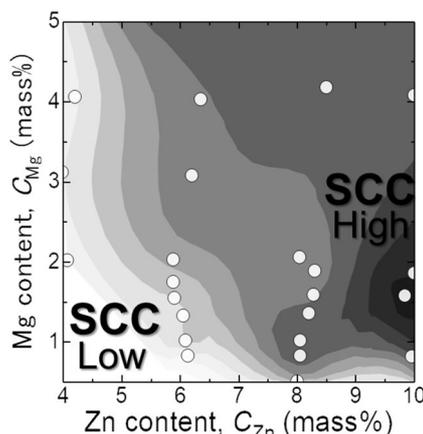


図2 Zn・Mg量とSCC感受性

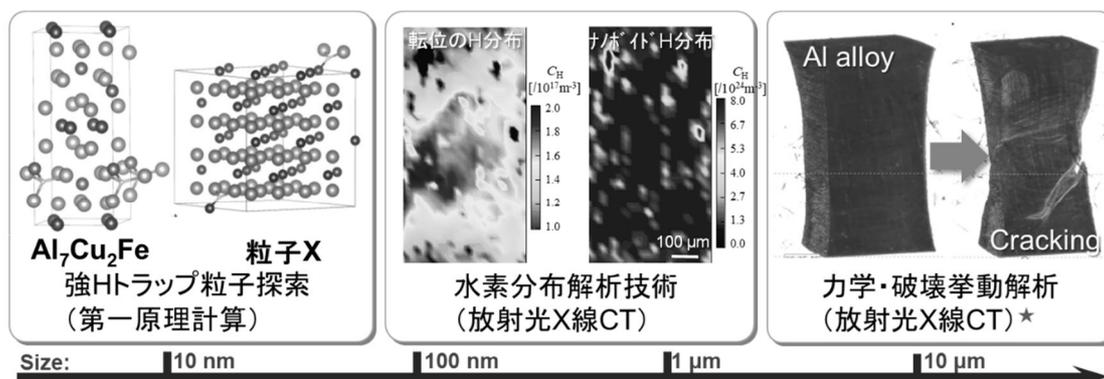


図3 水素分布解析技術を軸としたIMC粒子のナノミクロマシ構造制御

### 3. 研究の方法

本提案では、2年間の研究期間内にて、申請者が推進してきた放射光 3D/4D 破壊挙動解析および水素分布解析を駆使し、IMC 粒子による Al-Zn-Mg 合金の高強度化・高延性化を拓く。IMC 粒子種として、初年度は  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子に絞る。二年度は、第一原理計算による水素トラップ解析の第一人者である、日本原子力研究開発機構の研究者と情報交換の上、0.5 eV/atom 以上の水素トラップエネルギーをもつ IMC 粒子 X を選定し、粒子 X を添加した Al-Zn-Mg 合金の水素脆化抑制・延性破壊助長効果を検証する。

初年度は、IMC 粒子 ( $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ) を分散させた Al-Zn-Mg 合金の変形破壊挙動を放射光 X 線トモグラフィーにより 3D/4D 観察する。特に、以下の 2 項目に重点を置く。(i)  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子の水素脆化抑制効果：水素脆性（粒界・擬へき開亀裂の進展挙動解析、(ii)  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子の延性破壊助長効果：破断・剥離した粒子の 3D 形態解析と水素の影響評価。放射光 X 線トモグラフィーは、非破壊 3D 観察技術であり、合金試料に引張負荷を与えながら破壊に至るまでの時間発展挙動を 3D その場観察可能である。水素脆性において、その破面が 100% 水素脆性を示すことは稀で、多かれ少なかれ IMC 粒子起点の延性破壊も混在する。さらには、粒子の損傷・剥離における水素の影響も評価する。このような、従来は矮小化・埋没していた、水素脆性破壊と延性破壊の競合を分離して解釈する。二年度には、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  以外の IMC 粒子 X による、水素脆化抑制と延性破壊助長の解析を行う。これにより、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  以上に Al-Zn-Mg 合金の高強度化・高延性化に資する IMC 粒子を探索する。水素脆化抑制の評価は、申請者が確立させた水素分配解析を実施し、IMC 粒子、粒界、析出物、転位、空孔等の全ての水素トラップサイトの水素量を定量化する。延性破壊助長の評価では、IMC 粒子を起点とする延性破壊（ディンプル破壊）において、ポイドの発生サイト（IMC 粒子の界面剥離ないしは割れ）と成長挙動、および関連する局所塑性歪みを 3D イメージベース解析する。これは、ミクロ組織特徴点追跡法（豊橋技科大の小林・九州大学の戸田らが開発）として確立されている。IMC 粒子パラメータ（組成、水素トラップ能、形態、局所体積率）と破壊パラメータ（脆性・延性亀裂進展、局所歪み、ポイド発生・成長）との相関を精査し、IMC 粒子による水素脆化抑制と延性破壊助長の競合を理解する。

### 4. 研究成果

#### (4-1) 成果： $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ および $\text{Mg}_2\text{Si}$ の損傷におよぼす水素の影響

高水素（HH）および低水素（LH）の Al-Zn-Mg-Cu 合金を準備し、変形中の粒子損傷に及ぼす水素の影響を調査した。結像型 X 線 CT により、変形中の粒子とポイドの 3D 像を図 4 に示す。ここでは、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子を水色、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  粒子をグレー、ポア・ポイドを赤色で示している。粒子の損傷形態に着目すると、HH 材と LH 材の両者で、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  いずれの粒子においても破断損傷と剥離損傷が観察された。一方で、HH 材と LH 材を比較すると、粒子損傷傾向の違いは認められず、3D 像の定性評価からは水素が粒子の破断・剥離に与える影響が不明瞭であった。そこで、粒子の破断・剥離・非損傷割合を統計的かつ三次元的に画像解析した。

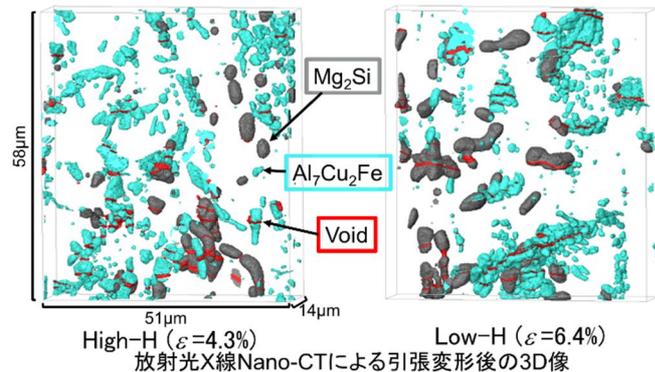


図 4 放射光ナノ CT により可視化した粒子とポイド

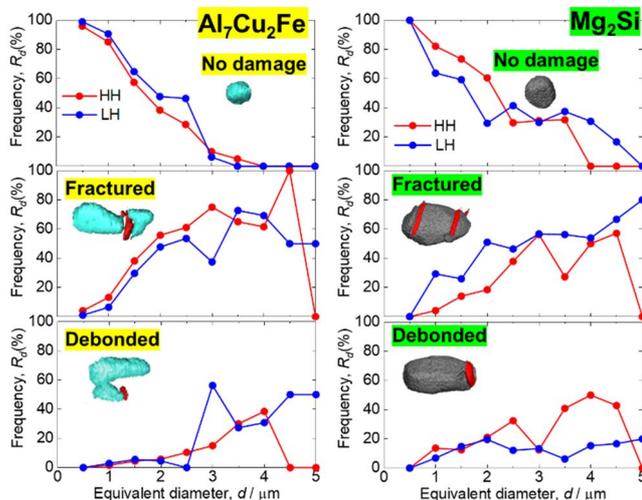


図 5  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  と  $\text{Mg}_2\text{Si}$  の損傷解析結果

図 5 は、非損傷、破断、剥離といった損傷形態を球相当直径で整理した結果である。 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  は、HH 材および LH 材ともにサイズが大きいほど破断・剥離損傷が生じやすいことがわかる。 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  は内部に 0.56 eV/atom の水素トラップサイトを持ち、転位や空孔よりも強く水素をトラップすることから、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  内部の水素濃度は母相のそれよりも高いと考えられる。これに起因して、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子自身が水素脆化することが懸念されたが、特筆すべきことに図 5 の結果から、水素による粒子破断・剥離の促進は認められなかった。LH 材と HH 材で  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  の破断・損傷傾向がわずかに異なっているが、これは水素に依るものではないと考えられる。本実験で

は、時効処理後に水素チャージを行っており、水素は母相から  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  内部へと拡散する。 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  の水素拡散係数は不明であるが、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  が粗大であるほど粒子内部と粒子表面での水素濃度差が大きくなると考えられる。換言すれば、微細な  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ほど粒子内部の水素占有率は高くなる。そのため、もし  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  自身が水素脆化する場合、微細な  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  ほど水素の影響が損傷挙動に現れ、破断・剥離割合が HH 材と LH 材で異なると推測できる。しかしながら、図 5 の結果では、粗大な粒子ほど損傷・剥離が多いことから、HH 材と LH 材で現れた  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  の損傷の違いは水素によるものでなく、粒子の分散・凝集、粒子近傍の局所歪み分布ないしは粒子周囲の塑性拘束といった力学状態の違いによるものと考えられる。一方で、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  において、破断損傷に関しては、LH 材と HH 材で大きな差はなく、LH 材で破断損傷が多い傾向にあった。 $\text{Mg}_2\text{Si}$  は  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  と異なり、内部に水素トラップサイトを持たない。そのため、この破断損傷の違いは水素に依るものではないと考えられる。剥離損傷に着目すると、HH 材の  $\text{Mg}_2\text{Si}$  が LH 材よりも剥離損傷し易い傾向にあった。LH および HH 材に分散している  $\text{Mg}_2\text{Si}$  は、 $\mu\text{m}$  オーダーのサイズであり、粒子サイズから考えるとこの  $\text{Mg}_2\text{Si}$  界面は非整合と推測できる。 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Al}$  非整合界面は、水素のトラップサイトであることがごく近年の第一原理計算で明らかになっている。 $\text{MgZn}_2$  界面で報告された水素による界面凝集エネルギーの低下が  $\text{Mg}_2\text{Si}$  界面でも生じ、結果として HH 材で界面剥離が生じ易かったと考えられる。すなわち、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  の界面剥離には水素の影響があったと結論できる。尚、これらの解析の詳細は、軽金属 72(2022)p.411-419 を参照されたい。

#### (4-2)成果：水素分配解析に基づく Mn 系粒子による水素脆性防止

$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  粒子は、水素脆化防止機能をもつ一方で、粒子そのものが脆性であるため、積極的に添加しても力学特性向上を図ることは難しいことが明らかになった。そこで、水素脆化防止を期待できる他の粒子として Mn 系粒子に着目した。図 6 は、0.6% の Mn を添加した Al-Zn-Mg-Cu 合金の走査型電子顕微鏡像と HAADF-STEM 像、EDS マップである。微量の Mn 添加により、 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$ 、 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$  が母相中に形成されていることが分かる。

これらの Mn 系粒子の内部水素トラップエネルギーを DFT 計算 (VASP) により導出した。図 7 が各 Mn 系粒子の結晶モデルであり、各粒子の格子間サイトをポロノイ分割により特定し、すべての格子間サイトの内部水素トラップエネルギーを網羅的に探索した。計算された最強の水素トラップサイトは、 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$  では頂点に Mn 原子 2 つと Al 原子 3 つを持つ六面体サイト、 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$  では Al 原子を頂点とする四面体サイト、 $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$  では、頂点に 1 個の Mn 原子と 3 個の Al 原子を持つ四面体のサイトであった。 $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ 、 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$ 、 $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$  の最大水素トラップエネルギーは、それぞれ、0.24、0.36、0.66 eV/atom であった。これらの各最強の水素トラップサイトは単位胞内に結晶学的に等価なサイトを複数持つ。これらのサイトでの複数の水素トラップを計算した結果も図 6 に示している。この多重水素トラップ解析により、 $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$  がこれら 3 つの粒子の中で最も水素を捕獲する粒子であり、0.66eV/atom の水素トラップエネルギーと 12 atomH/cell のトラップサイト密度をもつことが明らかになった。

図 8 は、0.0Mn 合金と 0.6Mn 合金における水素分配の解析結果である。0.0Mn と 0.6Mn の結果を比較すると、0.0Mn 合金では  $\text{MgZn}_2$  半整合界面に、0.6Mn 合金では IMC 粒子 ( $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$ ) に最も多くの水素がトラップされることが分かる。0.6Mn 合金では、Mn の添加により形成された第二相粒子への水素の分配により、 $\text{MgZn}_2$  半整合界面に捕捉され

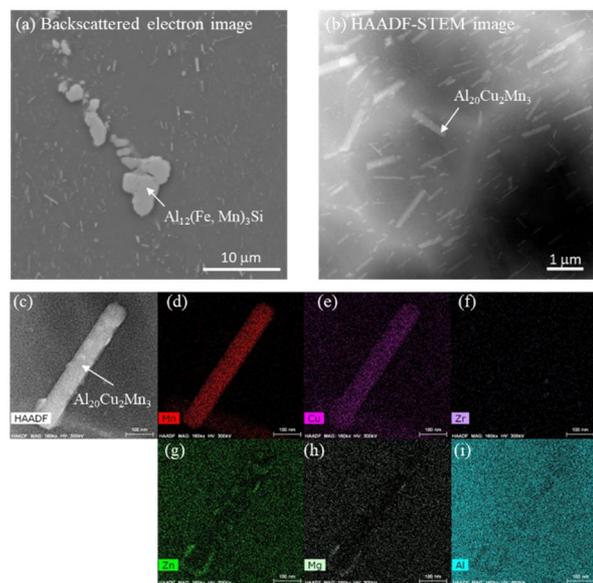
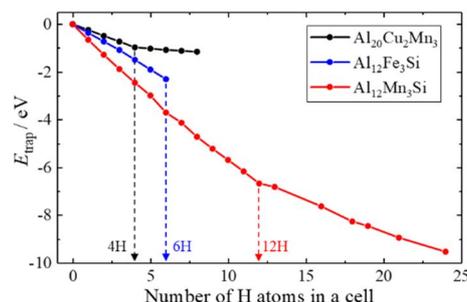
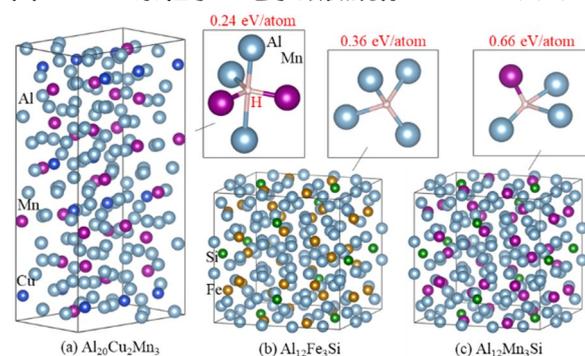


図 6 Mn 系粒子の電子顕微鏡像と EDS マップ



(d) multiple hydrogen trapping at each of the strongest hydrogen trapping sites

図 7 Mn 系粒子の H トラップ挙動

る水素量が相対的に減少し、マクロな水素脆化防止挙動が現れたと言える。この現象は、0.6Mn合金の  $Al_{12}Mn_3Si$  は、 $MgZn_2$  セミコヒーレント界面の水素トラップエネルギー（0.55eV/atom）よりも高い水素トラップエネルギー（0.66eV/atom）を持つために生じる。水素占有率に関しても、トラップ水素量の挙動と同様であり、0.6Mn合金の第二相粒子の水素占有率は、 $MgZn_2$  半整合界面のそれよりも高かった。水素脆性破壊のメカニズムとして、水素による空孔の安定化に伴う水素-空孔複合体の形成、ナノボイドの形成、水素-転位相互作用などが報告されている。しかし、図に示すように、空孔や転位にトラップされる水素は、 $MgZn_2$  のトラップ水素に比べて数桁少ない。このような空孔、転位、粒界の希薄なトラップ水素がアルミニウムの水素脆化を支配しているというのは、合理的に考え難い。我々は、Al-Zn-Mg系合金の水素誘起準断面破壊のメカニズムとして、 $MgZn_2$  析出物界面での水素の捕捉とその脱離を提案する。尚、本結果の詳細については、Corrosion Journal 79 (2023) pp.1-13 を参照されたい。

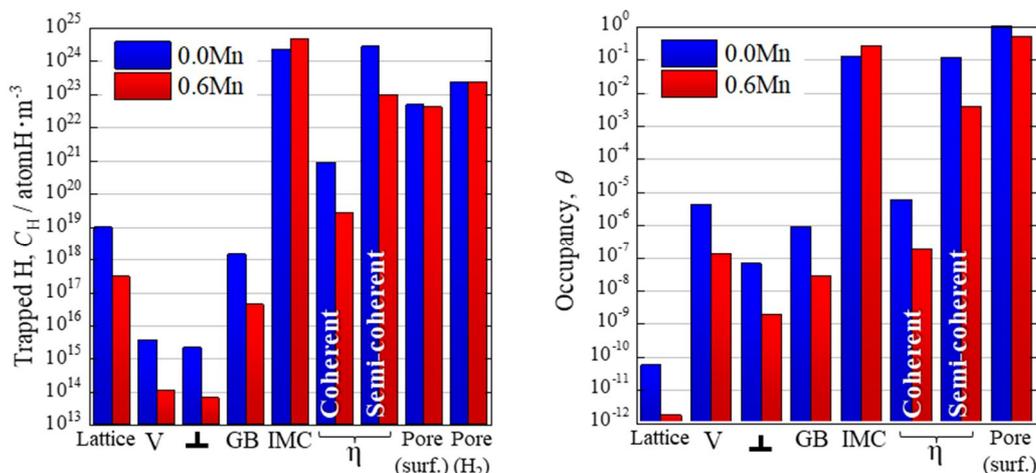


図8 水素分配解析によるAl-Zn-Mg-Cu合金中の各サイトのトラップ水素量と水素占有率

(4-3)関連する国内外の研究動向：水素脆化研究は、水素検出の困難さを理由にして定性的な議論に留まる実験的研究、計算容量を理由にして非現実的仮定の下で行われる計算的研究が散見されていた。析出物への水素トラップに限っても、確証を欠く様々な解釈が対立していた。この析出物への水素トラップは、申請者が参加したJST「ヘテロ構造制御」(期間：H26年度～R1年度)の研究プログラムにて、日本原子力研究開発機構のグループが第一原理計算を用いて明らかにし、申請者がその妥当性を水素分配解析により定量的に実証した。このような実材料中の水素分布を緻密に定量化し、脆化メカニズム解明へと繋げた研究は、世界中を見渡しても他に例はない。事実、申請者による水素分配解析は、軽金属学会奨励賞受賞、3D材料国際会議での招待講演と、国内外で評価されている。

(4-4)本研究の位置づけ：本研究の軸は、IMC粒子内部水素トラップの高強度・高延性化への活用である。「IMC粒子の水素トラップ」は、広く学術的に認識されているが、その具体的なトラップサイトが、界面なのか粒子近傍の応力場なのか粒子内部なのか曖昧なまま議論される傾向がある。本研究では、曖昧な理解から脱却し、粒子内部にサイトを特定し、脆化抑制に有効なトラップエネルギーとして0.5 eV/atomと定めた。このような定量的なIMC粒子内部の水素トラップに基づく、ボトムアップ型の水素脆化抑制研究は、前例がない。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 及川 涼一, 清水 一行, 鎌田 康寛, 戸田 裕之, 藤原 比呂, 上楢 真之, 竹内 晃久	4. 巻 72
2. 論文標題 Al-Zn-Mg-Cu合金中のIMC粒子損傷に及ぼす水素の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 軽金属	6. 最初と最後の頁 411 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.72.411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shimizu Kazuyuki, Toda H, Fujihara Hiro, Yamaguchi Masatake, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa, Nishijima Masahiko, Kamada Yasuhiro	4. 巻 79
2. 論文標題 Hydrogen embrittlement and its prevention in 7XXX aluminum alloys with high Zn concentrations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 CORROSION	6. 最初と最後の頁 1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5006/4300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 八重樫祥之, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之, 藤原比呂, 上楢真之, 竹内晃久	4. 巻 73
2. 論文標題 高純度アルミニウムおよびA6061アルミニウム合金におけるポアの成長挙動と水素脱離挙動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 軽金属	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.73.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oikawa Ryoichi, Shimizu Kazuyuki, Kamada Yasuhiro, Toda Hiroyuki, Fujihara Hiro, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa	4. 巻 63
2. 論文標題 Influence of Hydrogen on the Damage Behavior of IMC Particles in Al-Zn-Mg-Cu Alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1607 ~ 1616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-L2022020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xu Yuantao, Toda Hiroyuki, Shimizu Kazuyuki, Wang Yafei, Gault Baptiste, Li Wei, Hirayama Kyosuke, Fujihara Hiro, Jin Xuejun, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 236
2. 論文標題 Suppressed hydrogen embrittlement of high-strength Al alloys by Mn-rich intermetallic compound particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 118110 ~ 118110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.118110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Yafei, Toda Hiroyuki, Xu Yuantao, Shimizu Kazuyuki, Hirayama Kyosuke, Fujihara Hiro, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 227
2. 論文標題 In-situ 3D observation of hydrogen-assisted particle damage behavior in 7075 Al alloy by synchrotron X-ray tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117658 ~ 117658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2022.117658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujihara Hiro, Shimizu Kazuyuki, Toda Hiroyuki, Takeuchi Akihisa, Uesugi Masayuki	4. 巻 63
2. 論文標題 Suppression of Hydrogen Embrittlement due to Local Partitioning of Hydrogen to Dispersed Intermetallic Compound Particles in Al-Zn-Mg-Cu Alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1406 ~ 1415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-L2022007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oikawa Ryoichi, Shimizu Kazuyuki, Kamada Yasuhiro, Toda Hiroyuki, Fujihara Hiro, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa	4. 巻 72
2. 論文標題 Influence of hydrogen on the damage behavior of IMC particles in Al-Zn-Mg-Cu alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 411 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/JILM.72.411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 小野竜司, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之, 藤原比呂, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-Zn-Mg-Cu系合金の水素脆化における高温時効の影響
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八重樫祥之, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之, 藤原比呂, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-Mg-Si合金中のプリスターの高温曝露下での成長挙動
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 B. Sharma, Y. Wang, H. Fujihara, K. Shimizu, K. Hirayama, A. Takeuchi, M. Uesugi, H. Toda
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement prevention in Al-Zn-Mg by Sn addition
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Al-Zn-Mg-Cu合金の時効析出と水素脆化挙動
2. 発表標題 小野竜司, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之, 藤原比呂, 上相真之, 竹内晃久
3. 学会等名 軽金属学会第143回秋期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 藤原比呂, 平山恭介, 山口正剛
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金におけるT相の水素トラップと水素脆化防止
3. 学会等名 軽金属学会第143回秋期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田裕之, 清水一行, 平山恭介, 藤原比呂, Sharma Bhupendra, Yafei Wang
2. 発表標題 Al-Zn-Mg合金の水素脆化防止
3. 学会等名 軽金属学会第143回秋期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Al-Zn-Mg合金中のT相優先析出による水素脆化防止挙動
2. 発表標題 清水一行, 土屋昇大, 戸田裕之, 藤原比呂, 平山恭介
3. 学会等名 日本金属学会第172回春期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Toda, M. YAMAGUCHI, T. TSURU, K. SHIMIZU, H. FUJIHARA, K. HIRAYAMA, K. EBIHARA, K. MATSUDA
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg alloys: Semi-spontaneous interfacial decohesion of precipitates
3. 学会等名 ICAA18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. WANG, B. SHARMA, Y. XU, K. SHIMIZU, H. FUJIHARA, K. HIRAYAMA, A. Takeuchi, M. Uesugi, H. Toda
2. 発表標題 Improved resistance to hydrogen embrittlement by switched age-hardening precipitates for high-strength aluminum alloys
3. 学会等名 ICAA18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. SHIMIZU, H. TODA, H. FUJIHARA, K. HIRAYAMA, M. Yamaguchi, A. Takeuchi
2. 発表標題 Prevention of hydrogen embrittlement via preferential hydrogen partitioning to particles
3. 学会等名 ICAA18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. ONO, K. SHIMIZU, Y. KAMADA, H. TODA, H. FUJIHARA, A. TAKEUCHI
2. 発表標題 Effect of high temperature aging on hydrogen embrittlement in 7XXX alloys
3. 学会等名 ICAA18 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 及川涼一, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之
2. 発表標題 Al-Zn-Mg-Cu合金中のIMC粒子損傷に及ぼす水素の影響
3. 学会等名 軽金属学会第140回春期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田裕之, Yafei Wang, Yuantao Xu, 清水一行, 平山恭介, 藤原比呂, 竹内晃久, 上相昌之
2. 発表標題 7000系アルミニウム合金の水素脆化挙動とその防止
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 及川涼一, 清水一行, 鎌田康寛, 戸田裕之, 竹内晃久
2. 発表標題 Al-Zn-Mg-Cu合金の水素脆化挙動に及ぼすMn添加の影響
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水一行, 戸田裕之, 藤原比呂, 平山恭介, 上相真之, 竹内晃久
2. 発表標題 微量添加元素XによるAl-Zn-Mg-X合金の水素脆化防止
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第183回春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Toda, M. Yamaguchi, T. Tsuru, K. Shimizu, K. Hirayama, K. Ebihara, K. Matsuda
2. 発表標題 Hydrogen embrittlement mechanism of Al-Zn-Mg alloys: semi-spontaneous interfacial decohesion
3. 学会等名 MRM2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 アルミニウム合金材の水素脆化防止方法および水素脆化防止剤	発明者 清水一行、戸田裕之、山口正剛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-063424	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 アルミニウム合金材の水素脆化防止剤	発明者 清水一行、戸田裕之、山口正剛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/024630	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 特許権	発明者 清水一行、戸田裕之、山口正剛	権利者 岩手大学、九州大学、原子力研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-103677	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------