

金属加工部材の水素・アンモニア利用環境適合性評価技術の確立（第3報）

Development of Environmental Conformity Assessment Technology for Hydrogen and Ammonia Utilization in Metalworking Parts (3rd Report)

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 丸田淳央
材料技術部 分析・化学科 伊藤弘康

本研究は水素・アンモニア環境下で使用される金属加工部の適合性を安価、短時間で評価する技術開発を行うもので、3年目となる本年度は、水素環境はアルミ鋳造材を、アンモニア環境は二相ステンレス鋼の溶接部を対象に各種評価を行った。アルミ鋳造材の強度のばらつきと各因子の影響による変動を適切に扱うため、鋳造 CAE により元素組成の影響を定量的に評価するとともに、統計的な観点を加味した低温強度試験を行い、アルミ鋳造材が-196[°C]の低温でも、延性を維持しつつ強度が上昇することを示した。

Key words: 低温試験、液体アンモニア浸漬試験、アノード分極測定、鋳造 CAE

1. 緒言

近年、脱炭素・カーボンニュートラル社会への変革の流れを受け、化石燃料に替わる次世代燃料として、水素及びアンモニアに注目が集まっている。水素・アンモニアの利用拡大へ向けた技術的な課題として、ともに金属材料にとって耐食性の面で扱いが難しい点が挙げられる。

このため、水素・アンモニア環境における金属材料の耐食性評価に関する試験・分析ニーズが急速に高まっているが、技術的な困難さから、対応できる受託試験機関は少なく、試験コストも高額である。

以上より、本研究では、次世代燃料である水素・アンモニア利用環境における材料選定のために必要となる材料適合性評価の技術開発を行うこととした。特に県内企業が行う金属加工部材（鋳造や溶接、塑性加工など）の適合性を安価、短時間で評価することを目的としている。

最終年度となる今年度は、県内企業において、評価ニーズが高いと見込まれる材料として、水素環境適合性としてはアルミ鋳造材を、液体アンモニア環境においては二相ステンレス溶接部を評価対象として、試験体の採取方法も含めて、試験手法を検討した。

2. 実験

2. 1. 実使用環境に応じた強度試験の検討

今回、評価対象となるアルミ鋳造製品において、想定される用途では同一製品が低温環境と水素環境の両方に晒される。よって、本研究では、金属材料の強度評価として共通の形状を持つ試験片を対象に低温環境および水素環境の両方の試験ができるのが好ましいと考え、強度試験として曲げ試験に採用した。

曲げ試験による強度評価は、弾性変形を前提とした

材料力学計算により破壊強度を計算するもので、ガラスやセラミックスなど脆性材料の強度評価に用いられるが、金属材料で用いられることはほぼない。しかし、アルミ鋳造材は破断伸びが 1~3[%] と非常に小さいため、曲げ試験や曲げ応力による評価が可能と考えた。なお、本研究グループでは、曲げ試験から引張試験と同等の破断強度や破断伸びを得る研究成果¹⁾を得ており、本研究の試験にも適用可能である。

本研究の評価対象品が晒される液体水素温度は-253[°C]であり、低温試験としては液体水素（沸点-253[°C]）や、液体ヘリウム（沸点-269[°C]）などの冷媒を使用した浸漬試験が候補となる。しかし、液体水素を用いた試験は施設の安全対策や法規制への対応が必要であり、液体ヘリウム（沸点-269[°C]）は高コストであるため、本研究では液体窒素を用いた浸漬試験とした。液体窒素は工業的な利用実績が多く、入手や取り扱いが比較的容易である。

課題は液体窒素温度-196[°C]が液体水素温度より 57[°C]高い点であるが、低温環境での利用が想定される材料であるオーステナイト系ステンレス鋼やアルミ合金などは、結晶構造が面心立方格子 (fcc) 構造であり、低温になるとむしろ強度は上昇することが知られている。よって、室温から液体窒素温度である-196[°C]の強度試験データが揃えば、既存の試験データや既知の知見で補完し、57[°C]低温の液体水素温度における強度を推定することには一定の妥当性があると考えられる。

一方、水素環境の付与は昨年度同様、実験室環境で比較的容易に実施できる陰極水素チャージ法を用いた。陰極水素チャージ法では、表面から侵入した水素が拡散により中心まで移動し、中心部も十分に水素濃度が高まるまでの時間が必要とする考えが一般的である。この考えに基づくと、試験片寸法が増える場合には、相応のチャージ時間も増やすべきと考えるのが妥当である。図 1 は高力ボルトの水素適合性評価試験規格²⁾に示された 3 手法の強度試験の違いを、応力分布と水

素濃度分布の観点からの説明した図であり、図中、実線は応力分布、点線は水素濃度分布を表している。本規格では、ねじ底に相当する切り欠き部を設けた試験片を対象とするが、3手法の応力分布及び水素濃度分布は、それぞれ水素チャージや強度試験中に異なった変化をするが、最終的に切欠き部で、応力、水素濃度ともに最大となり、破壊が生じるという点で3手法は本質的にほぼ同一の評価をしていると理解されている。

図2は本研究で採用した曲げ試験における応力分布と濃度分布の模式図であるが、曲げ応力は、曲げの外周側表面で最大（引張応力）となり、破壊の起点となる。一方、水素濃度は、常に表面が最大で、中心が最小であり、チャージ時間が増えるほど表面と中心の濃度差が縮小すると考えられる。

以上より、本研究で行う水素チャージ後の曲げ試験では、最大応力が生じ破壊する試験片表面において最大の水素濃度となっていることから、試験片中心の水素濃度の低さが試験結果に与える影響は低いと考え、図3に示すように断面寸法 6[mm]×6[mm]の曲げ試験片に対する陰極水素チャージ時間を昨年度の引張試験と同じ48時間とした。

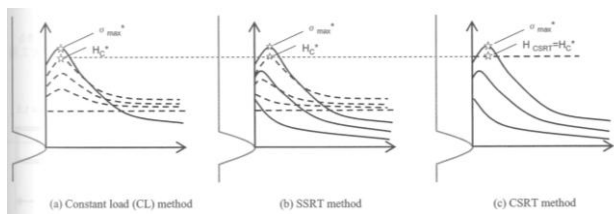


図1 高力ボルト向け水素適合性強度試験の比較
(左) 定荷重試験 (右) SSRT (右) CSRT

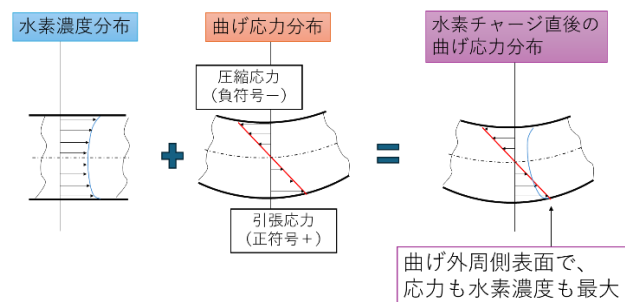


図2 曲げ試験における水素濃度分布及び応力分布

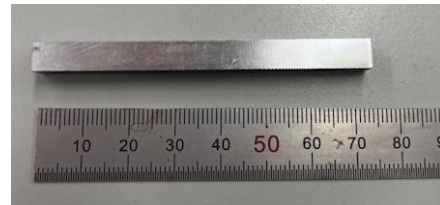


図3 曲げ試験片 (6×6×70[mm] 前後)

2. 2. アルミ鋳造供試体及び強度試験片の作成

水素環境で評価対象となるアルミ鋳造材は、熔融した金属が凝固した凝固組織がある程度維持されたまま、製品として使用される。このため、元素組成の違いや、厚肉部や薄肉部といった製品形状寸法の違いが、鋳造材の組織や特性に大きく影響する。図4はアルミ鋳造品の凝固組織に及ぼす凝固速度の影響を模式的に示した図である³⁾。アルミ鋳造組織は、純アルミに近い組成のデンドライト（樹枝状組織）とデンドライトのアーム間を埋める共晶相で形成される他、ポイド（気孔）や金属間化合物が含まれる。

金属材料では、一般的にマイクロ組織と強度特性との間に相関があるが、アルミ鋳造組織においては、図4中のデンドライト・二次アーム間隔（以下、DAS）が、凝固速度や、引張強度、0.2%耐力、破断伸びと相関性が高い指標として知られている。

さらに、アルミ鋳造材が特徴的なのは、元素組成や凝固速度など強度に影響を与える因子（以下、強度支配因子と呼ぶ）や DAS などマイクロ組織の指標が同一であっても、強度のばらつきが大きい点である。これは、ガラスやセラミックスなどの脆性的な同様に、材料中に確率分布的に存在する最弱部の強度が材料全体の強度を決定づける「最弱リンク説」に従う特徴を持つためである。マイクロ組織の観点から補足すると、アルミ鋳造材が低弾性・高延性のアルミ相と高弾性・脆性のシリコン相の両極端な二相が主体となる上、金属間化合物や気孔（ポイド）が分散されたマイクロ組織を持つことが強度のばらつきの原因と考えられる。

以上より、本研究では、元素組成や凝固速度などによる強度の変動を「強度支配因子による変動」、強度支配因子が一定でも生じる強度のばらつきを「本質的な強度のばらつき」と明確に区別する。アルミ鋳造材を対象に低温や水素の影響を調べる場合、どのような供試体から試験片を作成するか、その試験片は、「強度支配因子による変動」と「本質的な強度のばらつき」を含むのかを明確にすることが極めて重要と考える。例えば、組織や特性の異なる供試体から試験片を対象に水素脆化の評価をした場合、水素の影響が他の支配因子の影響や本質的なばらつきに紛れてしまう危険性がある。

以上に述べたアルミ鋳造組織の特徴を踏まえ、本研

究では、別鑄込み供試体と平板供試体の2つの供試体から、試験片を採取した。

別鑄込み供試体とは、JIS、ISOなどの規格で規定されているもので、図5に示すように製品と別な物体を、製品と同じ溶湯、同じ製造条件で製造したものであり、主に引張試験片や採取する目的で使用する。引張試験片採取位置の強度データは「強度支配因子による変動」は無く、「本質的な強度のばらつき」のみ存在すると見込まれる。

一方の平板供試体は、市販のアルミ鑄造プレートを利用したもので、本研究では図6に示すように、縦75[mm]×横110[mm]×板厚6[mm]のプレート全体から、切断により多数の曲げ試験片を採取した。プレートの各部位では、凝固速度の違いが多少なりともあるため、この多数の試験片の強度データには、「強度支配因子による変動」と、「本質的な強度のばらつき」の両方が含まれると見込まれる。

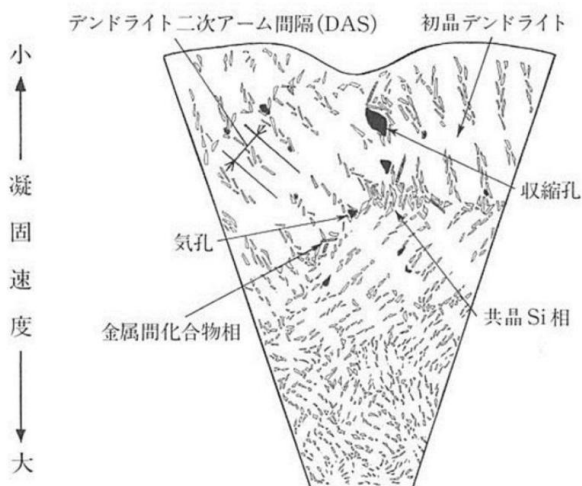


図4 アルミ鑄造組織における凝固速度の影響³⁾

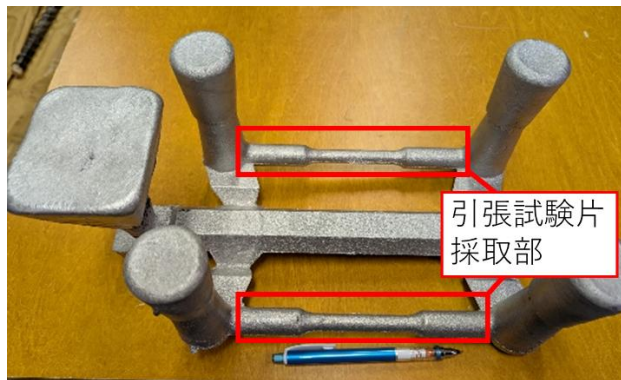


図5 別鑄込み試験体の例



図6 平板供試体から採取した曲げ試験片の例

2. 3. 曲げ強度試験

本研究では、AC4CH-T6材を対象とする試験結果を報告する。

曲げ試験は、室温、-90[°C]、-196[°C]の3水準の温度で実施した。-196[°C]環境は試験片を液体窒素に浸漬して、-90[°C]環境は液体窒素とアセトンの混合物に浸漬して実施した。

図7は曲げ試験片を乗せた状態の曲げ治具を示しており、段付き形状により試験片の位置決めをする狙いとしている。

図8は、液体窒素浸漬による曲げ試験の試験状況を示しており、ステンレス製容器の中に試験片と曲げ治具を設置した後、液体窒素等を注ぎ入れ、試験片が完全に浸漬された状態で曲げ試験を実施した。液体窒素等の冷媒は蒸発により徐々に不足し補給が必要であるが、不足や補給が試験に影響しないよう、試験速度は1[mm/min.]とし、概ね1~4[min.]で破断が生じ、試験が終了した。

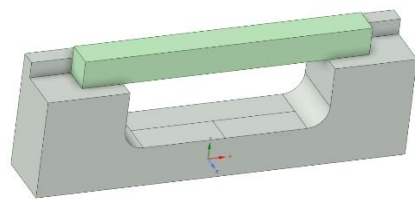


図7 曲げ試験片及び曲げ治具



図8 低温曲げ試験の様子

2. 4. 液体アンモニア環境における電気化学測定

液体アンモニア中の二相ステンレスの溶接部では、孔食底を起点とする応力腐食割れが生じることが明らかになっているため、液体アンモニア環境適合性評価として、応力腐食割れに特化した評価が必要である。また、短時間で評価を行うには、実使用に比べて試験条件を厳しくして試験時間を短くする必要があるが、過剰にし過ぎて実際と異なる現象が生じては試験としての妥当性が損なわれる。

図9はアノード分極曲線と応力腐食割れの発生形態を紐づけて表した図であるが⁴⁾、応力腐食割れ(図中SCC)は、耐食と腐食の遷移領域で生じるのが特徴である。本研究は、事前測定として実施するアノード分極測定グラフから、上記の遷移領域を見定めて、その遷移領域の電位を付与して、本試験である応力腐食試験を実施することとした。なお、アノード分極とは、アノード電極が平衡電位より高くなった状態を指し、アノード分極測定は、外部装置により電位を変化させ、それに応じて流れる電流を測定する評価手法である。これにより、耐食性を定量的に評価することができる。

図10は、分極曲線測定用のSUS821L1溶接試験片の外観であるが、図10(下)に示すように、溶接金属部、熱影響部、母材が含まれる領域を測定対象とした。電極面積は縦10[mm]×横20[mm]とし、その他の領域はマスキングテープを貼り付けている。図11は分極曲線測定の試験片や電極の設置状態を示している。

アノード分極測定は、はじめに自然電位を測定し、その後、自然電位から最大2.0[V]まで、印可速度20[mV/min.]の条件で実施した。なお、本研究における電気化学測定はすべてPt電極を用いたため、電位は全てPt基準の値である。

なお、測定温度は20[°C]で、後述する浸漬試験との整合性から、電解物質としてカルバミン酸アンモニウム(CH₆N₂O₂)を添加している。

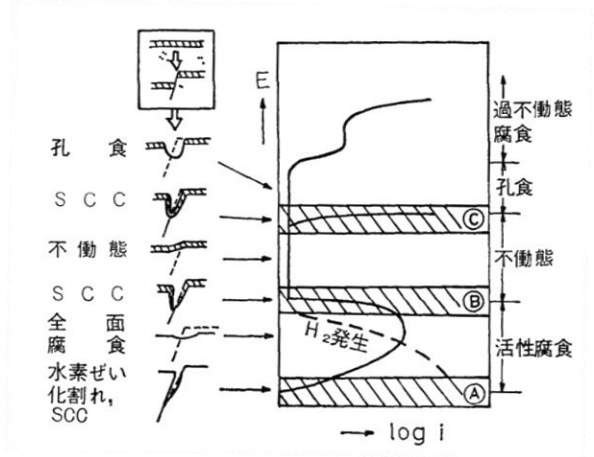


図9 アノード分極曲線と応力腐食割れの関係⁴⁾

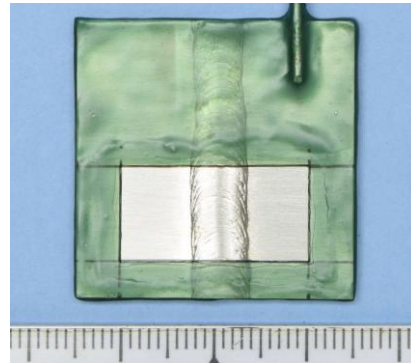
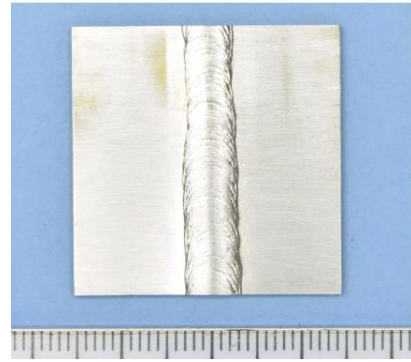


図10 分極曲線測定用溶接試験片の外観
(上) マスキング前 (下) マスキング後

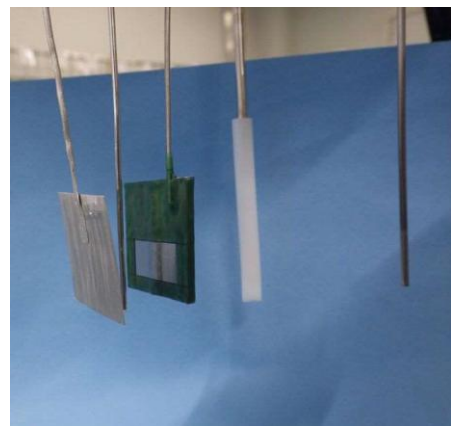


図11 分極曲線測定の状況(試験前)

2. 5. 液体アンモニア浸漬試験の条件検討

液体アンモニア環境適合性評価は、図12に示すように試験片を4点曲げ変形させた状態で治具に取り付けて、治具ごと液体アンモニア浸漬させた状態で実施した。現在の課題は、候補材料の耐食性が良好であるために試験時間が長期化することであることから、本研究では、妥当性が失われない範囲で厳しめの選択としている。表1に本年度の試験条件を一昨年、昨年との比較として示す。

電位は前項で述べた通り、アノード分極曲線の遷移

領域の電位より 0.9[V]と決定した。

負荷応力については、溶接部では一般に耐力同等の残留応力が生じているが、切断により試験片を作成する際に残留応力が解放される可能性があるため、素材の耐力と同等の 500[MPa]を基本とし、比較のため、その半分の 250[MPa]を加えた 2 条件とした。

試験温度については、温度上昇に伴う腐食反応の反応速度の増加を期待し試験温度を 20[°C]とした。なお、液体の状態を保つため、20[°C]の時の試験容器中の圧力は約 4 気圧となると見込まれる。

不純物は電解液中の CO₂ 濃度を高める作用を期待し、カルバミン酸アンモニウム (CH₆N₂O₂) を添加した。

なお、本研究では、電位測定及び浸漬試験は外部機関に委託して実施した。

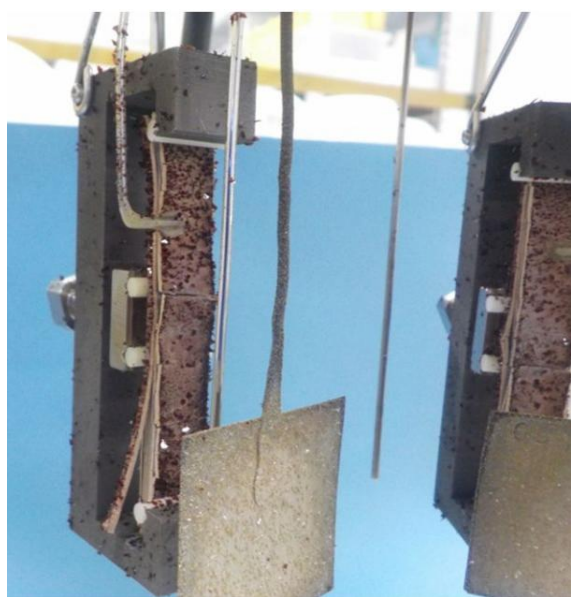


図 12 浸漬試験の状況 (試験後)

表 1 液体アンモニア浸漬の試験条件比較

試験条件		1 年目 (一昨年度)	2 年目 (昨年度)	3 年目 (本年度)
加工の有無		母材	母材	溶接部
浸漬時間 (時間)		96	200	200
応力因子	曲げ応力	200 MPa	500 MPa	250、500 MPa
	(耐力基準表現)	(40%YS)	(100%YS)	(50、100%YS)
環境因子	温度	-33°C	20 °C	20 °C
	不純物	なし	あり	あり
			※ CH ₆ N ₂ O ₂ 添加	※ CH ₆ N ₂ O ₂ 添加
電位	なし	あり	あり	
		※ アノード分極測定で決定	※ アノード分極測定で決定	

3. CAE 解析

3. 1. 鋳造 CAE の活用

本研究では、鋳造加工の解析に特化したコンピュータ・シミュレーション (以降、鋳造 CAE と呼ぶ) を行うソフトウェアとして「MAGMASOFT」を使用した。鋳造 CAE は広くは普及しておらず、あまり知られてないため、その仕組みや特徴を簡単に紹介する。

鋳造 CAE の解析は、主に湯流れ解析と凝固解析と 2 つの解析を行う。湯流れ解析は、溶融した金属が鋳型に注がれる際の流体としての挙動を計算するものである。一方、凝固解析は溶融した金属が凝固し、固体になる過程や、冷却による熱収縮による変形などを計算する解析である。また、「新山パラメータ」など学術的な知見に基づく鋳造欠陥の発生の予測も可能である。

また、近年では、湯流れ及び凝固解析における 1 次的な解析結果に基づいて材料組織予測や材料物性値予測を行ったり、指定された設計条件の組み合わせの中から最適条件を探索したり、結果を吟味するためのデータ解析などの高機能化も進んでいる。

図 1 3 に鋳造 CAE ソフトの操作画面を、図 1 4 に新規プロジェクト作成画面を示す。本ソフトでは、ダイカストや砂型低圧鋳造など多様な鋳造方式や、鉄系、アルミ系、銅系など鋳造加工で使用される多様な合金系の解析に対応する。

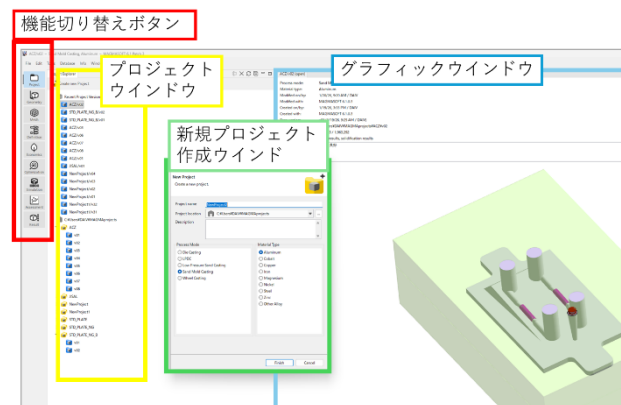


図 1 3 鋳造 CAE ソフト画面

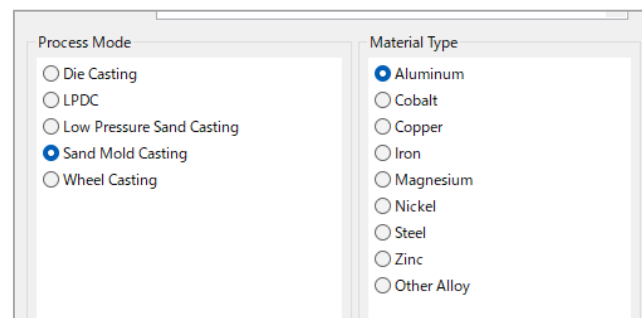


図 1 4 鋳造手法と材料の選択画面

鋳造加工は、溶融した液体金属が冷却され凝固し固体になり、さらに熱収縮や相変化する過程を計算する必要があるため、幅広い温度における種々の材料物性値が必要である。また、鋳造加工を行うには、鋳造材料だけでなく、砂型や金型を使用するため、型材料の物性値も必要である。ユーザー自身がこれら全ての材料物性を入手するのは極めて困難であるため、鋳造CAEは代表的なデータを備えており、図15に示すように、データを選択するだけで、実用されている鋳造材料の材種や砂型材料の材料物性値を利用することが可能である。

次に、元素組成の扱いについて述べる。鋳造加工では再資源化された素材を使用することが多いため、元素組成は溶湯ごとに変動することが一般的である。鋳造材は、元素組成の大小により、機械的特性が変化することが知られているため、鋳造CAEソフトに備えられた標準組成の物性値ではなく、実際の溶湯の元素組成に応じた物性値で計算した方がより正確な解析となる。MAGMASOFTでは、オプション機能として、図16に示すように、アルミ鋳造材に関して元素組成を数値入力し、その影響を反映した解析を行う機能を保有している。本研究では、この機能を用いて、元素組成の変動に関する計算を行い、統計分析あるいはデータサイエンス解析を行うためのデータセットを作成した。

統計分析を行うデータセットを効率よく行うには、実験計画法における直交表のように、偏りのない条件の組み合わせが必要であるが、MAGMASOFTはこのような条件の組み合わせを作成する機能を備えている。

図17は設計変数の設定画面であり、上限と下限とステップを入力する仕組みである。本研究では元素組成の影響を知るため、Siについて下限6.5[%]、上限8[%]、ステップ0.5[%]の4水準、Mgについて下限0.25[%]、上限0.40[%]、ステップ0.05[%]の4水準、Feについて下限0.1[%]、上限0.4[%]、ステップ0.1[%]の5水準、Srについて下限0[%]、上限0.03[%]、ステップ0.01[%]の4水準とし、解析リスト総数を27と設定した。MAGMASOFTで条件作成した結果、元素組成が規則性なく割り当てられていることを確認した。

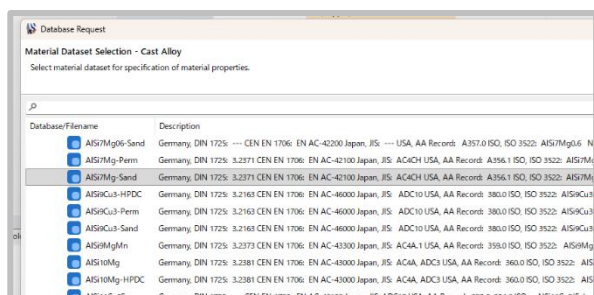


図15 材種選択画面（アルミ鋳造材の例）

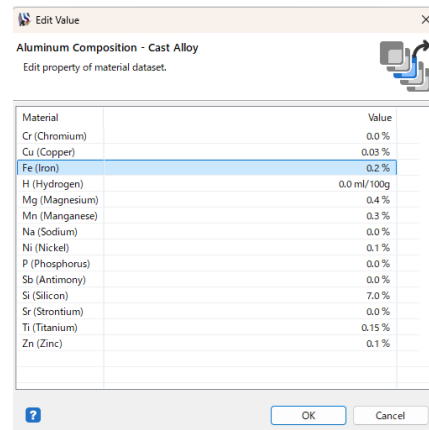


図16 元素組成編集画面

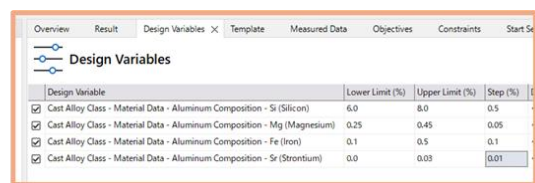


図17 データセットのための設計変数の設定

4. 実験解析結果

4. 1. 低温曲げ試験結果

本研究では、同一ロットの平板供試体3枚から、1枚あたり15本の曲げ試験片を作成し、曲げ試験を行った。同一温度の試験片15本は、同一供試体から採取したため、元素組成は同一であるが、部位による凝固速度の違いがあるため、強度試験の結果は「強度支配因子による変動」と「本質的な強度のばらつき」の両方を含むと考える。

図18は室温で実施した曲げ試験結果である。試験片の寸法は若干の個体差があったため、縦軸は試験片形状や支点間距離から計算した曲げ応力とし、試験片寸法の影響を排除した。なお、曲げ応力は、線形弾性の条件に基づく計算であるため、若干の塑性変形が生じるアルミ鋳造材では過剰評価であり、破壊時の曲げ応力は見かけの曲げ強度である。なお、試験開始直後に生じた試験毎のずれは、弾性変形域の直線を頼りに、グラフを水平移動する補正を行った。全ての結果で、弾性域の直線がほぼ重なりつつも、塑性変形の開始点や破断直前の荷重低下のタイミングが変動する挙動となった。また、塑性変形開始後、荷重低下が生じるまで、一定以上のストロークがあり、水素適合性評価で一般的な「破断ストローク」での評価も可能である。以上より、アルミ鋳造材を対象とした曲げ試験で、引張試験の代替として利用可能であることを確認した。

図19は-90[°C]環境で実施した曲げ試験結果、図20は-196[°C]環境で実施した曲げ試験結果である。低

温試験では、試験中に試験片が動いてしまうなど適切に試験できない場合があり結果から除外し、-90[°C]環境では15本中13本、-196[°C]環境では14本中11本の結果を採用した。

表2に最大の曲げ応力（見かけの曲げ強度）、水素脆化での評価で使用されることの多い「破断ストローク」の平均値と標準偏差を示した。以上のように、アルミ鋳造材 AC4CH-T6 材では、低温になっても、延性を維持しつつ強度が上昇することが分かった。

表2 試験温度と曲げ強度及び破断ストロークの関係

温度	曲げ強度(MPa)		破断ストローク(mm)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
RT	485.0	29.0	1.956	0.72
-90	524.3	30.3	2.078	0.86
-196	584.0	54.5	2.075	0.52

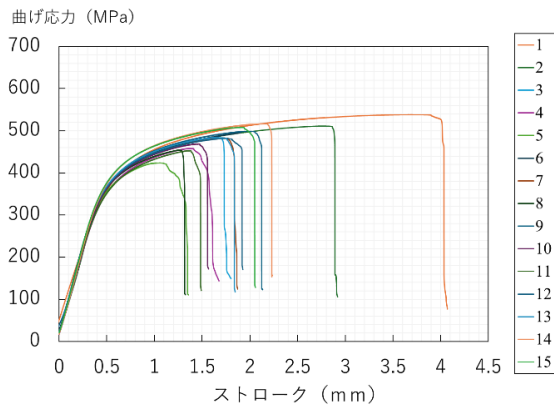


図18 曲げ試験結果（室温）

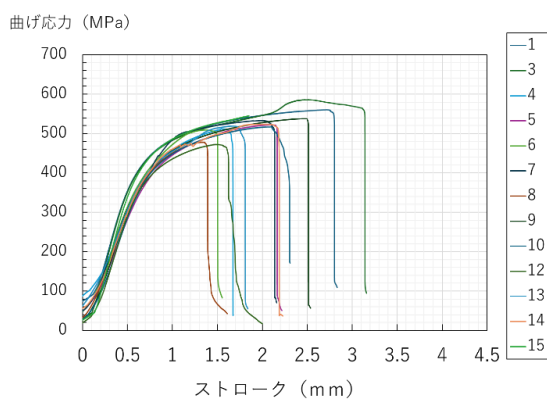


図19 曲げ試験結果（-90[°C]）

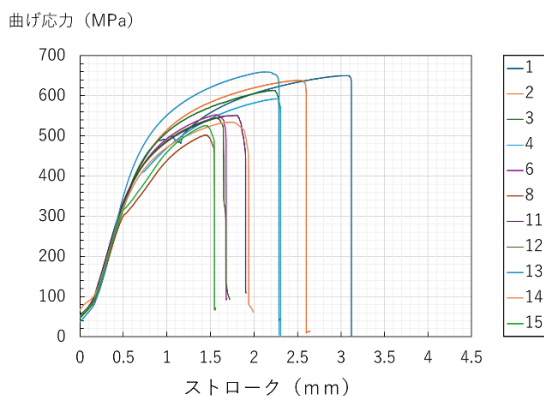


図20 曲げ試験結果（-196[°C]）

4. 2. 液体アンモニア中の電気化学測定及び浸漬試験

電気化学測定はすべて Pt 電極を用いたため、電位は、全て、Pt 基準の値である。

図21に、分極測定後のサンプルの外観を示すが、試験前と比較すると、若干、茶褐色に変色している。

図22に、SUS821L1 溶接試験片の自然電位測定結果を示す。自然電位は測定された40分間では、安定せずに、最終的に-0.2[V]程度であった。

図23にアノード分極測定結果を示す。図中青線は昨年度実施した母材の結果、赤線は今年度実施した溶接部の結果を示している。溶接部では母材より小さい電流密度で分極しており、母材と溶接部は耐食性に関する電気化学挙動の面で違いがあることが確認できた。図9の説明で前述した、耐食と腐食の遷移領域を-0.1~0.8[V]の範囲とみなして、図中に追記した。この範囲を若干上回る0.9[V]を液体アンモニア浸漬試験の電位条件として選定し、210時間の浸漬を行った。

浸漬試験終了後、試験サンプルを確認したところ、図12に示すように、茶褐色の腐食生成物が確認できたが、目視で判別できるような割れは確認されなかった。

以上により、二相ステンレス鋼 SUS821L1 材は一定水準以上の良好な耐応力腐食割れ特性を有していることを確認した。

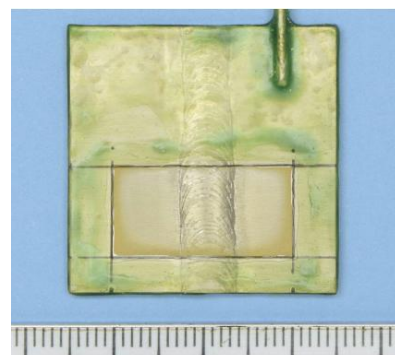


図21 分極曲線測定後のサンプルの外観

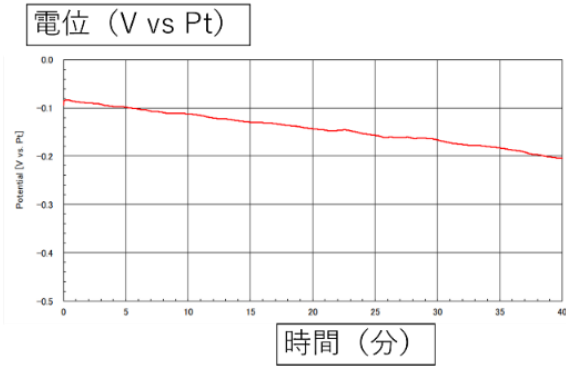


図 2.2 溶接試験片の自然電位測定結果
(液体アンモニア浸漬下)

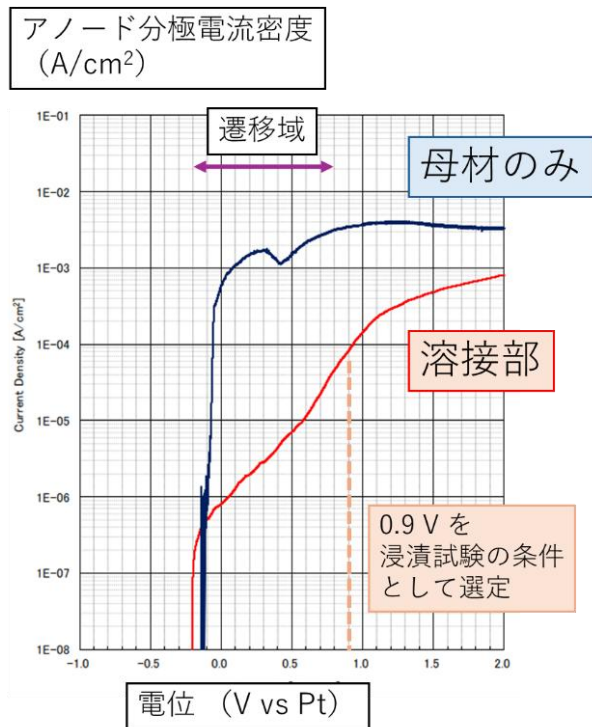


図 2.3 SUS821L1 材のアノード分極曲線の比較
(液体アンモニア浸漬における結果)

5. CAE解析結果

5.1. 鑄造CAEによる湯流れ・凝固解析

湯流れ解析の代表的な結果として、図 2.4 に湯流れ状況を粒子の流れとして可視化するパーティクルフロー図を示す。この図では溶湯に注がれた後の経過時間を色分けして表示している。

次に、凝固解析の代表的な結果として、固相率、温度分布の結果を示す。

図 2.5 に注湯終了後 1 分経過した時点の固相率の解

析結果を示す。図中透明な部分は、固相率が 90[%]を超えて凝固が完了したと判定された領域である。また、4 か所の押し湯の天面中心に引けの発生し始めたことが確認できた。

図 2.6 は注湯終了 2 分経過後の温度分布図である。概ね固相線温度である 550[°C]以下の領域は、透明表示している。供試体中の引張試験片平行部はこの時点で凝固が完了したと判定されている。

湯流れ解析及び凝固解析は、時々刻々の計算結果を算出するタイプの解析であるため、時間経過も加味した評価を全ての計算点で実施することも可能である。一例として、図 2.7 に、経過時間当たりの温度変化、すなわち、冷却速度を示す。別鑄込み試験片の引張試験片部が最も冷却速度が速いことが分かる。

鑄造分野では、平衡状態図や、冷却速度による凝固温度のシフトである「過冷却」現象など、凝固に関する知見が豊富であるため、鑄造 CAE ではそれらの知見に基づいた凝固挙動の計算を行える点が貴重である。

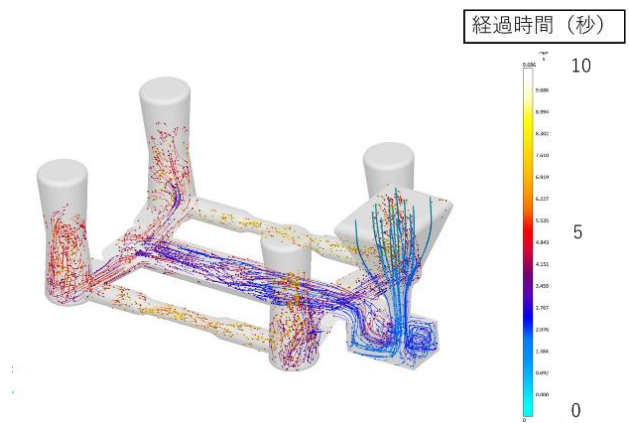


図 2.4 パーティクルフロー図

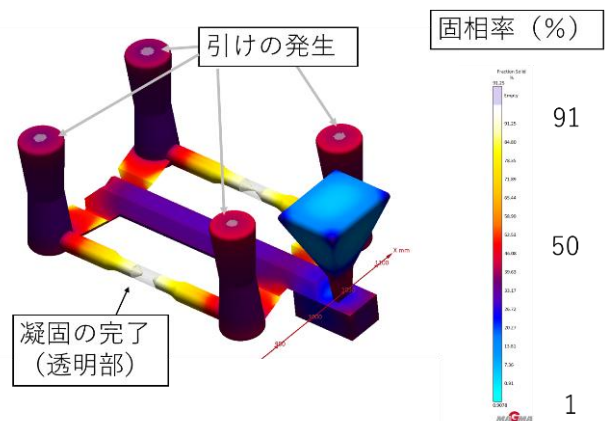


図 2.5 固相率の分布図 (注湯終了 1 分後)

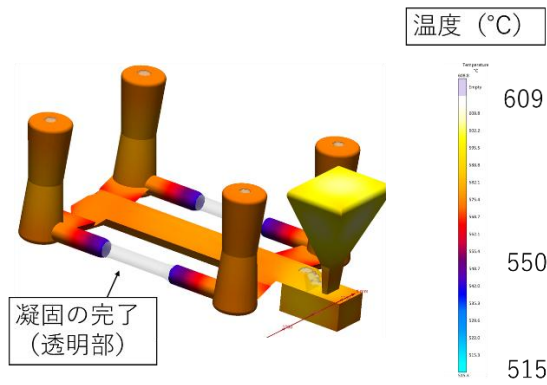


図 2 6 温度分布図 (注湯終了 2 分)

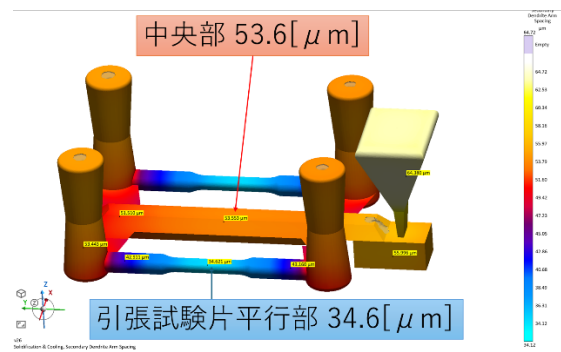


図 2 8 DAS 値の予測結果

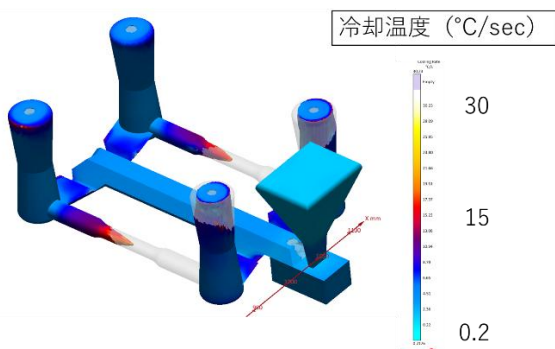


図 2 7 冷却速度の分布図 (注湯終了 8 分後)

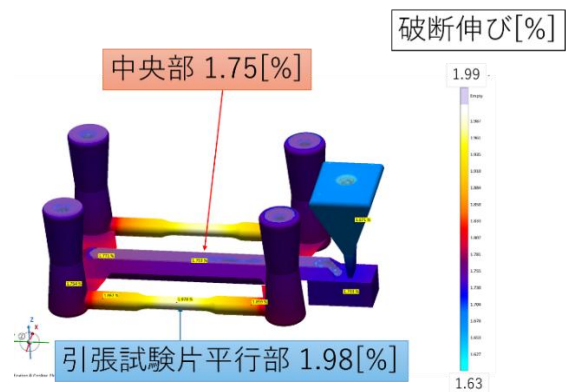


図 2 9 破断伸びの予測結果

5. 2. 鋳造 CAE による組織予測・特性予測

次に、本研究で特徴的な取り組みとして実施した組織予測・特性予測の結果を示す。これらの解析は、前述した凝固解析の計算結果を基に、実験データなど過去の知見も加味して、二次的に計算したものである。

図 2 8 は DAS 値の分布図結果である。引張試験片平行部の $34.6[\mu\text{m}]$ に対して、中央部では $53.6[\mu\text{m}]$ と大きく異なる結果となった。

図 2 9 は、T6 処理をした場合の破断伸びの分布図である。引張試験片平行部の $1.98[\%]$ に対して、中央部では $1.75[\%]$ と比較的差は小さい結果となった。

MAGMASOFT ではアルミ鋳造について、F 材 (鋳放し状態) と T6 処理材の特性予測を区別して算出可能である。一例として、表 3 に、解析リスト 1 番の引張試験片平行部中央点で計算された F 材 (鋳放し状態) と T6 処理材の計算結果を示す。

以上のように、鋳造 CAE により、組織予測および特性予測ができることを確認した。図 1 8 などで示すように、実際の鋳造製品の強度は本質的なばらつきを持つため、統計的に意味のある結果を得るために、同一条件で 10~20 本程度の試験数が必要であるが、鋳造 CAE はこのような本質的なばらつきを排除し、元素組成など強度支配因子の影響を定量化できる点が貴重であると考えられる。

表 3 F 材と T6 材の特性予測の比較

質別	DAS値	強度	0.2%耐力	破断伸び
	μm	MPa	MPa	%
F材	35.1	153.1	105.4	1.56
T6材		195.3	165.5	1.46

5. 3. 元素組成データセットによる評価

本研究では、図 1 7 に示した解析条件リスト作成機能により、27 条件の計算を行った。1 条件の解析時間は約 2 時間であるが、MAGMASOFT では 1 連の解析条件を順次計算することも可能であり、この場合 27 条件の計算は 54 時間 (2 日強) で実施可能である。

図 3 0 は、作成したデータセットの全データの引張強度と破断伸びをプロットしたものである。このプロット点が散らばった領域は、元素組成という強度支配因子によって変動する領域を意味する。また、引張強度と破断伸びは正の相関関係があることが確認できる。

次に、各元素の影響の評価例として、強度に対する Si% の影響と、破断伸びに対する Fe% の影響について紹介する。

図 3 1 は、データセットを横軸が Si 量、縦軸が引

張強度のグラフとしてプロットしたものであるが、両者は正の相関関係を持ち、近似関数の係数から、Si 量が 1[%] 増えると引張強度が 10.6[MPa] 増加すると見込まれる。

図 3 2 は、データセットを横軸が Fe 量、縦軸が破断伸びのグラフとしてプロットしたものであるが、両者は負の相関関係を持ち、近似関数の係数から、Fe 量が 0.1[%] 増えると破断伸びが 0.23 ポイント減少すると見込まれる。

以上のように、解析数 27 程度のデータセットであっても、Si や Fe など元素組成の影響を定量化できることが確認できた。

実際の casting では、元素組成を狙い通り調整するのはかなり困難であるため、自由な元素組成で組織予測や特性予測を行えることは、casting CAE の大きなメリットである。

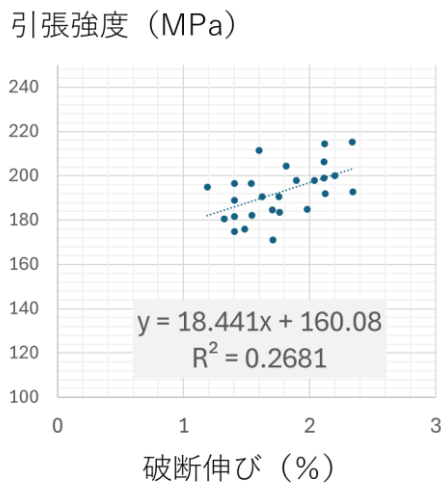


図 3 0 全データセットの強度と破断伸びの関係

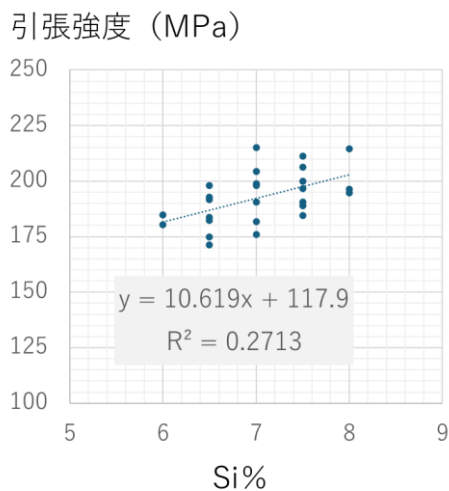


図 3 1 引張強度に対する Si% の影響

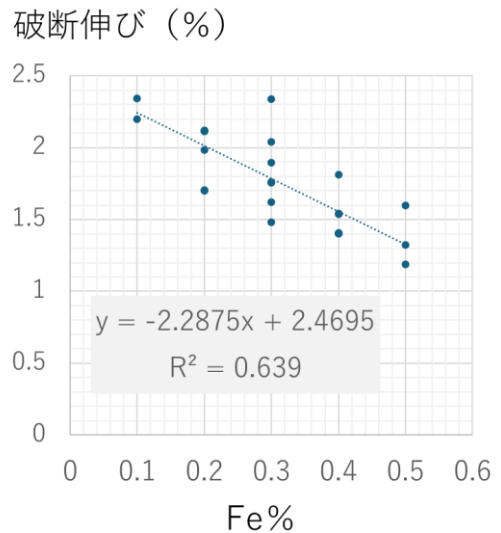


図 3 2 破断伸びに対する Fe% の影響

6. 結言

本研究は、水素・アンモニア環境下など過酷な環境で使用される金属加工部の適合性を評価する技術開発を行うものである。

3 年目となる本年度は、アルミ casting 材を対象とした低温強度試験や、二相ステンレス溶接部を対象とした液体アンモニア浸漬下応力腐食割れ試験、casting CAE を用いた組織予測・特性予測、元素組成に関するデータセット作成とデータ解析実施し、以下の知見を得た。

- ① 水素環境下および低温下の両方に同一の試験片で試験できる強度試験として、曲げ試験を採用し、液体窒素など冷媒に浸漬する低温試験を実施し、得られた曲げ応力-ストロークグラフから、アルミ casting 材を対象とした曲げ試験で、引張試験の代替として利用可能であることを確認した。
- ② 室温、-90[°C]、-196[°C] の 3 水準の温度で、アルミ casting 材 AC4CH-T6 材の曲げ試験を実施した結果、低温になっても延性を維持しつつ強度が上昇することが分かった。
- ③ 二相ステンレス鋼 SUS821L1 材溶接部を対象に、液体アンモニア浸漬下応力腐食割れ試験を実施した結果、210 時間の試験でも、明確な割れは生じず、一定水準以上の良好な耐応力腐食割れ特性を有していることを確認した。
- ④ casting CAE ソフト MAGMASOFT によりアルミ casting 材の組織予測、特性予測を定量的に評価できることを確認した。実際の casting 製品が持つ強度の本質的なばらつきを排除して、定量的な評価ができる点が、casting CAE の大きなメリットである。

- ⑤ 鋳造 CAE で元素組成を変動させた 27 条件のアルミ鋳造材の解析を行うことで作成したデータセットにより、各元素の強度特性に与える影響を定量的に評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 工藤ら, 画像解析を用いたアルミ鋳造材の強度評価, 2018, ハイテクプラザ平成 30 年研究報告
- 2) (一社) 日本鋼構造協会標準, IV-10 高力ボルトの遅れ破壊評価法ガイドライン(2014) .
- 3) アルミニウム合金の強度, p198(2001)
- 4) 大久保ら, 応力腐食割れとその対策, 材料, Vol. 30, p963(1981) .