

10. タスク 10 低温材料の開発

10.1 研究開発目標

10.1.1 第 期 の 目 標

液体水素雰囲気下での材料特性試験を行うとともに、最適溶接材料および最適溶接法に係る要素技術開発を実施する。また、材料特性データベースの拡充を図る。

10.1.2 平成 13 年度の目標

- (1) 候補材について、母材および溶接部の液体水素温度域での評価試験等を実施し、材料特性の基礎的データの蓄積を図る。また、薄肉材評価について検討を行う。
- (2) 従来溶接法による溶接継手の特性改善を図るとともに、減圧電子ビーム溶接、摩擦攪拌接合等の新規溶接・接合法に係る要素技術開発を実施する。
- (3) 極低温材料特性データベースの追加データインプットを行い、充実を図る。
- (4) 材料の組織、成分、変態挙動と低温脆化及び水素脆化のメカニズムを解明する。

10.2 平成 13 年度の研究開発成果

第 期研究開発では、選定した候補材（オーステナイト系ステンレス鋼：SUS304L, SUS316L, SUS316LN、アルミニウム合金：A5083, A5454）の液体水素雰囲気温度を含む低温域での母材および溶接部の材料特性評価を進めてきた。その結果、選定した母材については、液体水素雰囲気下でも十分な特性を有するものの、溶接部の低温靱性の改善が課題であることが明らかとなった。そのため、低温靱性向上の観点から、近年開発されつつある新規溶接・接合法や溶接材料の適用評価を行い、その効果を確認してきた。

平成 13 年度は、これらの新規溶接・接合法を、適用金属種を拡大して評価するとともに、低温靱性に及ぼす要因解析や脆化機構の解明を行った。また、従来からの疲労特性等の材料特性試験も継続実施し、データの拡充・蓄積を図った。以下に本年度得られた主要な成果を示す。

10.2.1 ステンレス鋼の材料特性評価

これまでに、ステンレス鋼溶接部では、フェライトが少量でも存在すると、これらが低温における亀裂伝播経路となり靱性が低下することが分かってきた。しかしながら、フェライトは溶接施工時の高温割れを防止するためには必須であり、低温靱性確保と溶接割れ抑制を両立することが課題となった。前年度までに、減圧電子ビーム溶接法では、フェライトが存在するにもかかわらず、SUS304LおよびSUS316Lで高い低温靱性を有すること、また、高温割れ感受性を低減させた高Mn系完全型溶接金属によるTIG溶接は、優れた低温靱性と溶接割れ防止を兼ね備えていることを見出してきた。

本年度は、減圧電子ビーム溶接法については、輸送容器の軽量化時に有利な高強度のSUS316LNへ適用し、その低温特性および水素感受性を評価した。また、完全型溶接金属・TIG溶接についても、SUS316Lを対象に水素感受性を調査した。

図 10.2.1-1 に、SUS316LNの減圧電子ビーム溶接部(RPEB)のシャルピー吸収エネルギーと破壊靱性値(K_{Ic})を示す。SUS316LNでは、母材の高窒素に起因したブローホール状溶接欠陥が発生しやすいという課題が残るものの、健全部ではSUS304LやSUS316Lと同様、TIG溶接法に比べ極めて高い低温靱性が得られた。また、水素チャージによる靱性値の低下も生じず、顕著な水素脆化感受性は認められなかった。

図 10.2.1-2 に、SUS316Lの完全型溶接金属・TIG溶接部(JJ1)の低温靱性を示す。従来の高フェライトTIG溶接法に比べ、高いシャルピー吸収エネルギーと K_{Ic} を示した。また、水素チャージによる靱性の低下も認められなかった。

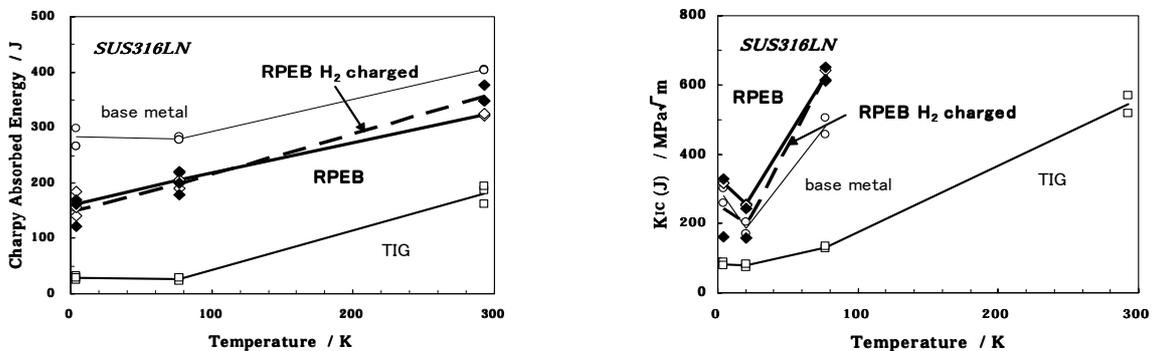


図 10.2.1-1 SUS316LN 減圧電子ビーム溶接部のシャルピー衝撃特性および破壊靱性

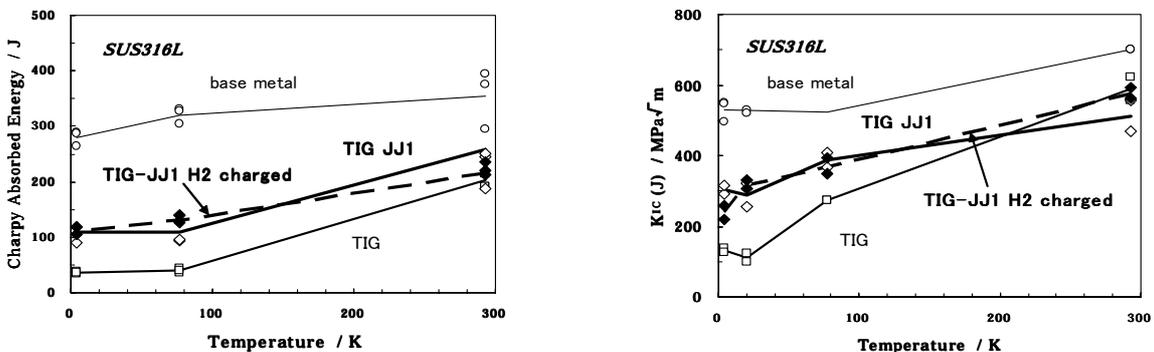


図 10.2.1-2 SUS316L JJ1・TIG 溶接部のシャルピー衝撃特性および破壊靱性

また、前年度に引き続き、SUS304L、SUS316LおよびSUS316LNの母材および溶接部の疲労試験を実施し、データを蓄積した。その結果、いずれの母材も0.2%耐力相当の高応力下で、 $10^6 \sim 10^7$ 回以上の疲労寿命を有していることが分かった。しかしながら、TIG溶接部では、作製した溶接継手によっては低疲労寿命のものがあり、溶接時の微小な凝固割れ状欠陥が

起因と推定された。

10.2.2 アルミニウム合金の材料特性評価

前年度までに、摩擦攪拌接合法(FSW)は、接合部の微細な組織形成を介して、アルミニウム合金の低温靱性を改善させることを示してきた。一方、低温靱性は、母材Mg含有量を低減することで向上することも分かってきた。本年度は、低Mg(3%)・A5454合金にFSW法を適用し、前年度までのA5083(Mg:5%)と比較評価した。図10.2.2-3に結果を示す。シャルピー吸収エネルギーおよび K_{Ic} ともに、A5454はA5083よりもさらに高い低温靱性となった。なお、A5454・FSWのシャルピー吸収エネルギーは、いずれの温度でも本試験機の衝撃力では破断にいたらず、実際にはこれ以上の値を有するものと考えられる。

一方、Mg含有量の低下は、低温靱性を向上させる反面、引張強度が低下する。これらのバランスを把握するため、本年度は新たに4%Mg含有のA5086合金を取り上げ、大電流MIG溶接部の特性を調査した。図10.2.2-4にその結果を示す。Mg含有量の低下とともに耐力、引張強度は低下し、 K_{Ic} は高くなることわかる。破面観察の結果から、低温靱性の向上は、Mg含有量の減少による粒界偏析の低減と粒内変形能の向上によるものと考えられる。4KにおけるA5083の引張強度の低下も、高Mg量のため同様の原因で早期に破断したものと考えられる。

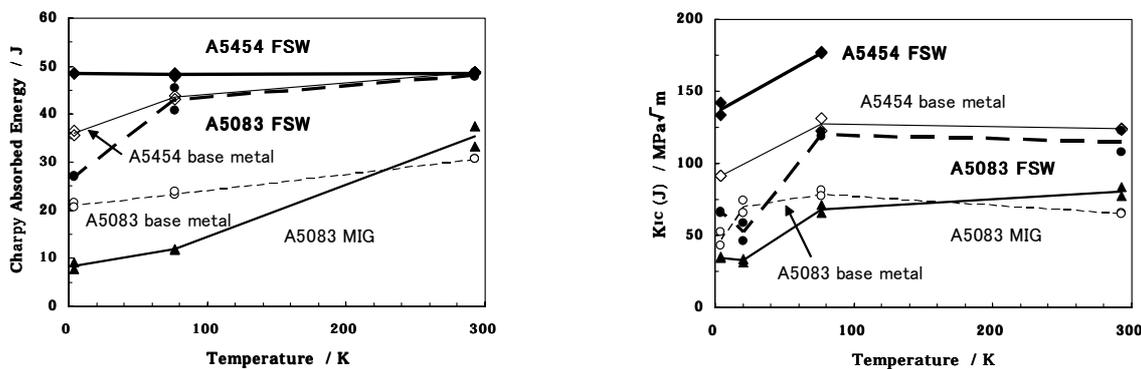


図 10.2.2-3 A5454 摩擦攪拌接合部のシャルピー衝撃特性および破壊靱性

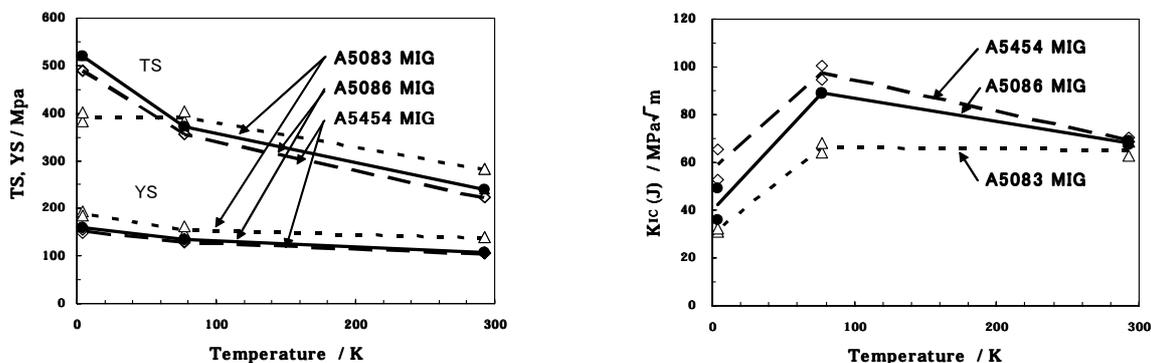


図 10.2.2-4. アルミニウム合金における Mg 量の引張特性および破壊靱性に及ぼす影響

10.2.3 ステンレス鋼溶接部の低温脆化および水素脆化に関する検討

TIG溶接においては、厚肉材では多パス溶接となり、この際の熱影響が低温靱性に影響を及ぼすことが考えられる。図 10.2.3-1 は、高エネルギー密度・1パス溶接であるRPEB材を熱処理してシャルピー衝撃特性を調べたものである。熱処理条件が高温かつ長時間になるに従い、TIG溶接部並にシャルピー吸収エネルギーが低下しており、熱影響による靱性低下が確認された。今後、破断面観察や組織調査を行い、こうした現象の原因を究明していく予定である。また、本年度は、溶接部の部位による破壊靱性の違いを明らかにする精密破壊靱性試験も実施し、低温脆化挙動を調査した。

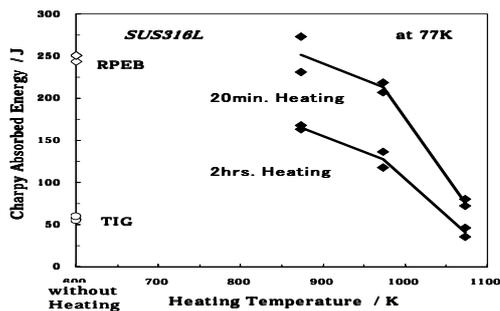


図 10.2.3-1 ステンレス鋼のシャルピー吸収エネルギーに及ぼす熱処理の影響

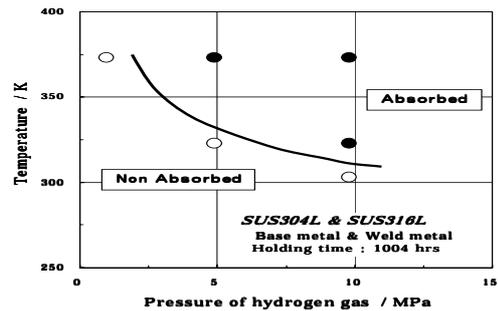


図 10.2.3-2 ステンレス鋼における水素侵入条件

ステンレス鋼中に水素が侵入すると特性が劣化する場合がある。図 10.2.3-2 は種々の温度、圧力の水素ガス雰囲気中に長時間暴露し、水素侵入の有無を調べたものである。100 °C では水素侵入限界圧力は、1～5Mpaの間に存在すると推定される。また、高圧になるほど水素侵入限界温度は低下する。今後、20Mpa超の高圧水素ガス貯蔵に着目し、水素侵入の可能性とそれによる材質への影響を調査していく予定である。また、水素ガス環境脆化については、ステンレス鋼成分との関係に関する研究も、前年度に継続して実施した。

10.3 まとめと今後の展開

低温靱性向上に効果的な新規溶接・接合法について、適用金属種を拡大適用して評価した。ステンレス鋼での減圧電子ビーム溶接は、高強度SUS316LNでも他鋼種と同様の高い低温靱性を示した。水素チャージの影響も認められなかった。完全溶接金属・TIG溶接も、高靱性を有するとともに、水素感受性への影響は認められなかった。また、低Mg含有量・A5454 アルミニウム合金への摩擦攪拌接合法の適用は、飛躍的な低温靱性の向上が見出された。Mg含有量による強度・靱性バランスに関する知見を得た。

今後は、水素供給ステーション等での分散利用開発が加速・推進されていることから、中・小規模容器用薄肉材料の特性評価や高圧水素ガス環境下での脆化特性の評価研究にも着手していく予定である。