

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「摩擦攪拌接合を適用した航空機構造部品の製作」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者: 近畿経済産業局

委託先: 国立大学法人 大阪大学

## 目 次

	頁
1 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景	2
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
2 本論	7
2-1 FSW 構造に則した航空機構造の策定	7
2-2 低圧力の FSW 技術の構築	7
2-2-1 ツールの設計・開発および製作	7
2-2-2 接合の加工試験	7
2-3 板厚変化に対応できる FSW 技術の構築	9
2-3-1 ツールの設計・開発および製作	9
2-3-2 接合の加工試験	9
2-4 閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築	11
2-4-1 ツールの設計・開発および製作	11
2-4-2 接合の加工試験	11
2-5 汎用工作機械に装着可能な FSW ツールの開発	12
2-5-1 ツールの設計・製作	12
2-5-2 接合試験によるツール等の評価	13
2-5-3 スポット FSW	14
2-6 部分構造の試作	14
2-6-1 部分構造の設計	14
2-6-2 部分構造の試作	14
2-7 代表的な航空機構造サンプルの試作	16
2-7-1 航空機構造の設計	16
2-7-2 航空機構造サンプルの試作	16
3 全体総括	18
4 専門用語の解説	21

## 1 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

近年、新しく開発される航空機はボーイング787やエアバス A350XWB に見られようにスピードや性能よりも環境や省エネルギーに重点をおき、燃料を削減するため軽量化の要求が更に高くなっている。そのためこれらの機体では軽量で強度が高い複合材料が構造重量の50%以上を占めるようになってきている。

アルミニウム合金で製作された構造は、アルミニウム合金の比重が複合材料の約1.8倍であるため複合材料に対して重量は増加する。しかし、結合部を効率良く設計・製作し重ね合わせ結合を無くすことができれば複合材料と同等の重量軽減が見込め、材料が格段に安いいため原価も大幅に低減できる。

現在、航空機構造に多用されている2000系、7000系のアルミニウム合金は溶接が不可能な材料であるが、これを摩擦攪拌接合により突合せ結合で接合することができれば、アルミニウム合金でも複合材料に対抗できる重量軽減が可能になる。

以上を踏まえ、従来の溶接では接合できなかった2000系、7000系のアルミニウム合金で、かつ接合時の圧力によって座屈し易い薄板が多用されている航空機構造に適用できる摩擦攪拌接合技術の確立を目指すことを第一の目的とした。併せて、摩擦攪拌接合を適用することで航空機構造の突合せ接合を可能にして重量軽減を図るとともに、前述したとおりアルミニウム合金の材料費が安価であるため、適用対象とする構造の大幅な原価低減を実現することも、この研究開発の目的とした。

この研究開発の具体的な目標値および研究開発を実施した結果を以下に示す。

#### ① 性能目標(航空機構造における重量軽減目標):

航空機構造に FSW を適用することにより、従来のアルミ合金による板金構造に対して10~15%の重量軽減

→ 実施結果:約14%の達成見通し

#### ② 技術目標:

板厚1mm~2mm の7000系アルミニウム合金による薄板の立体構造について、FSW を適用して組み立てる加工技術

→ 実施結果:エルロンを製作できる加工技術の確立見通し

#### ③ 原価目標:

従来のアルミ合金による板金構造に対して20%以上の原価低減

→ 実施結果:達成見通し 60%以上

#### ④ 品質目標:

FSW を航空機構造に適用するために必須となる FAA 認証に必要なデータ整備

→ 実施結果:データ整備をするための「接合品質の安定化」の課題が残った

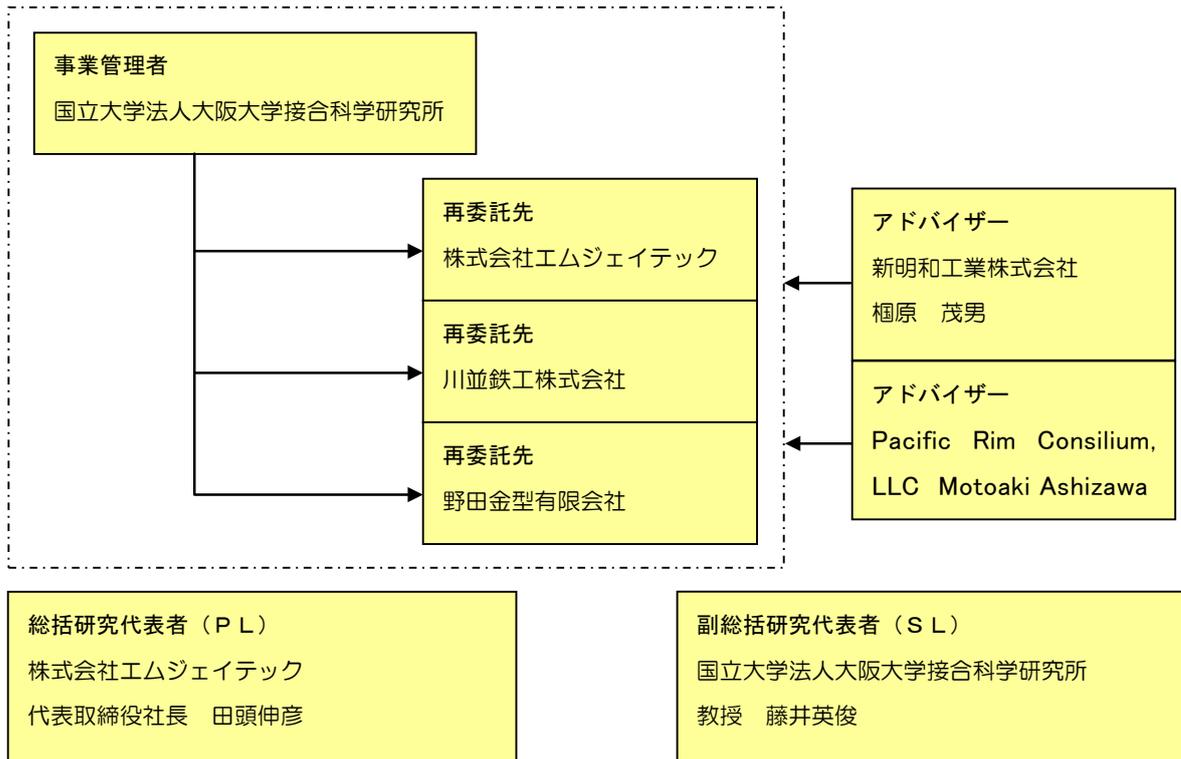
⑤ 時間目標:

TWI の基本特許権が切れる直後の2012年までに上記すべての見通しを得る

→ 実施結果:「接合品質の安定化」の課題が残った

1-2 研究体制

この研究開発を推進する体制を下図に示す。



### 1-3 成果概要

実施した本研究開発について全体の流れを図1-1に示す。

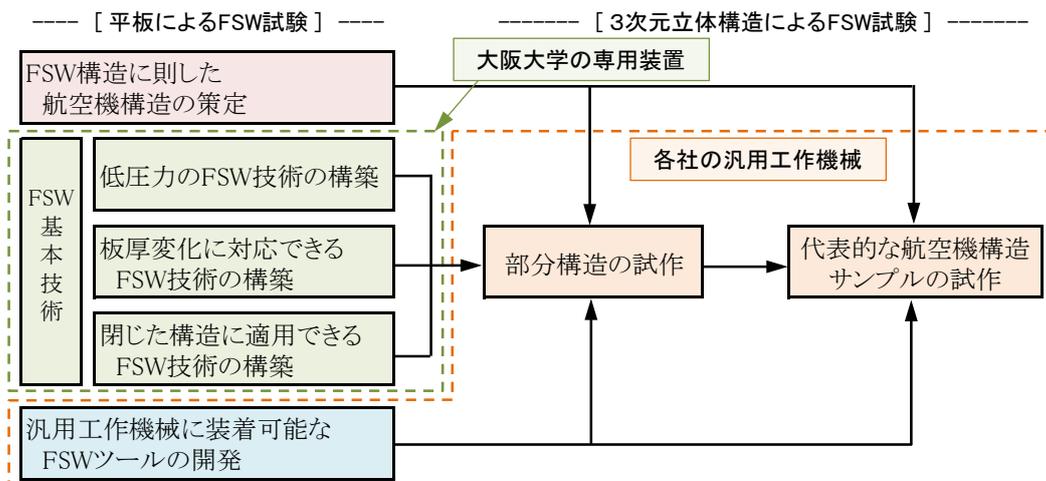


図1-1 研究開発全体の流れ

#### (1) FSW 構造に則した航空機構造の策定

ビジネスジェット機の動翼のひとつであるエルロンを対象に構造様式を検討し、突合せ接合を基本とした構造案を作成した。当初の設計案では重ね合わせ結合がなくなったことで約8%の重量軽減見通しができたが、3年間に亙る接合試験の成果を反映し当初設計案を改訂したことにより、研究開発の最終目標値を達成する約14%の重量軽減の見通しを得た。

一方、複合材料に比べて安価なアルミニウム合金が適用できることによる材料の原価低減に加え、従来の板金構造では手作業で行っていたリベットによる結合作業を汎用の工作機械により自動的に摩擦攪拌接合ができる見通しも立ち、60%を超える大幅な原価低減の達成見通しができた。

また、併せて摩擦攪拌接合によるエルロンの接合シーケンスも設定することができ、新しい加工技術に対するプロセス設定の見通しもでき、目標どおりの成果を得ることができた。

#### (2) 低圧力の FSW 技術の構築

構造様式の設定、接合様式の設定の基礎となる「低圧力による FSW 技術」について複動式両面摩擦攪拌接合について基盤となる十分な技術確立を達成することができた。この複動式両面摩擦攪拌接合は変動ファクタも多く、また技術的にも非常に高度であり、その最適接合領域は非常に狭いことも判明した。

より安定した接合品質を確立するために、従来の摩擦攪拌接合と異なり両面からの入熱に対して安定した入熱量が確保できる摩擦攪拌接合技術の構築(新規ツールの開発を含む)、さらに予熱を与えるための治工具等を考案する必要性も明確になった。

技術確立に加えノーハウ習得も出き、全般的に当初目標どおりの成果を得たといえる。

#### (3) 板厚変化に対応できる FSW 技術の構築

「低圧力の FSW 技術の構築」で得られたツールの開発・製作の技術、治工具の開発・製作

の技術をベースに板厚変化に対応できる荷重制御方式によるツールおよび治工具を製作し、摩擦攪拌接合試験を実施した。

その結果、片面が位置制御、もう一方の面が荷重制御による両面摩擦攪拌接合を適用し、板厚が変化する薄板材を低圧で突合せ接合することに成功した。

しかし、浸透探傷検査では小さな欠陥が点在することが判明し、今後、接合品質の向上に向けて、引き続き更なる検討が必要と考える。

#### (4) 閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築

航空機構造には主翼、尾翼、動翼等のボックス構造に代表される閉じた構造が多く存在するが、これらの閉じた構造では最終部品の組立工程において内部に治工具が装着できない。

摩擦攪拌接合をボックス構造に適用するに当たり、これらの閉じた構造の最終接合工程で適用できる部品の接合方法として T 型継手の接合の研究開発を実施した。

その結果、回転数、送り速度について最適領域を明らかにすることができ、良好な接合品質が得られる T 型摩擦攪拌接合の条件を確立することができた。

この領域はプローブ長さ(下面板への挿入深さ)により影響を受けるため、今後、T 型継手に対するプローブの最適長さを定量的に設定し、T 型継手摩擦攪拌接合の作業手順を確立していく必要がある。

#### (5) 汎用工作機械に装着可能な FSW ツールの開発

摩擦攪拌接合を適用した製品を実践的に製作できるように汎用工作機械に装着可能でかつ荷重制御が出来るツールを開発することができた。

開発したツールは両面摩擦攪拌接合用および片面摩擦攪拌接合用のふたつであり、いずれのツールも工作機械への装着部にバネを内蔵している。

これらのツールを評価するために突合せ接合試験および重ね合せ接合試験を実施し、いずれのツールも汎用の工作機械を用いて実機製品の製作に十分使える確証を得た。この後、以下で述べる「部分構造の試作」および「代表的な航空機構造サンプルの試作」に実際に適用し、実践的に非常に有効なツールであることを確認した。

なお、開発したツールについては特許を出願した。

(特許出願番号:特願 2012-209637、特許名称:回転ツール)

#### (6) 部分構造の試作

「FSW 構造に則した航空機構造の策定」、「低圧力の FSW 技術の構築」、「板厚変化に対応できる FSW 技術の構築」および「閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築」で実施したすべての成果を反映して、航空機の代表的な構造物のひとつである動翼について、ビジネスジェット機のエルロンを対象に部分構造を設計・試作した。

前述(2)～(4)の研究開発はすべて大阪大学の接合科学研究所において専用の装置を使用し、標準板厚を有する板材を用いて進めてきた。「部分構造の試作」の目的は各企業の工場において汎用の工作機械を用い、上記の確立した FSW 技術を立体の3次元構造に適用す

るに当って必要な技術を確立することにある。このため「部分構造の試作」は前項の(5)で開発したツールを各企業の汎用工作機械に装着して実施した。

その結果、両面摩擦攪拌接合の突合せ接合については外観検査で上面、下面とも良好な結果が得られたケースは1体の供試体で、かつふたつのリブのうち片側のリブの接合だけとなった。また、片面摩擦攪拌接合の突合せ接合についてはいずれもクラックが発生したが、そのうち半分は微小なクラックであり外観的にはほぼ良好な接合ができたといえる。

一方、片面摩擦攪拌接合の重ね合せ接合についてはアドバンシング・サイドで直線的に切断するか、または直線状のクラックが発生し、接合はできたが良好な接合品質レベルを得ることはできなかった。

これらの原因は、標準の平板を用いラボレベルで確立した新規の摩擦攪拌接合技術が、未だ実際の3次元立体構造物に適用できる完全に安定した品質レベルに達していないためであると考えられる。

「部分構造の試作」を行った結果、薄板の3次元立体構造を摩擦攪拌接合で組立てる際に注意すべき重要な成果が得られ、この成果は引き続いて実施した「代表的な航空機構造のサンプルの試作」に反映した。

#### (7) 代表的な航空機構造サンプルの試作

摩擦攪拌接合を適用した航空機製品の事業化の目途および課題を確認するために、3年間に亘って実施したすべての成果を反映し、航空機構造の代表的なサンプルとして動翼のひとつであるビジネスジェット機のエルロンを設計・製作した。

その結果、座屈し易い薄板で構成される航空機構造に摩擦攪拌接合を適用する目途が大凡ついたといえる。また、公差、歪みを有する3次元立体構造に摩擦攪拌接合を適用した製品を、各企業が自社所有の汎用工作機械で製作する目途もついた。

しかし、その一方で実機に装着可能な製品としての品質レベルを確保し、かつ事業化に結び付けるためには接合品質の安定化を図ることが必須であり、そのためには被接合部材のセット方法および治工具の設計にさらなるノウハウを蓄積することが非常に重要であるといえる。また、実践的な製造法として摩擦攪拌接合を確立するには修理法の確立も必須の技術課題であることが明らかになった。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 エムジェイテック 代表取締役 田頭 伸彦

住所: 〒589-0001 大阪府大阪狭山市東野西3丁目693番地1

電話:(072)365-9036

E-Mail:mj-tagashira@h7.dion.ne.jp

## 2 本論

### 2-1 FSW 構造に則した航空機構造の策定

摩擦攪拌接合 (FSW) を適用する航空機構造の対象をビジネスジェット機のエルロンとし、FSW の突合せ接合を基本とした構造様式を設定した。

なお、エルロンには前縁構造があるが、これは今回の研究開発の対象外とした。

適用材料は7075-T6 とし、板厚は設計でのサイジング結果に基づいた。

設定した FSW のエルロン構造の最終案 (研究成果を反映した案) を図2-1に示す。

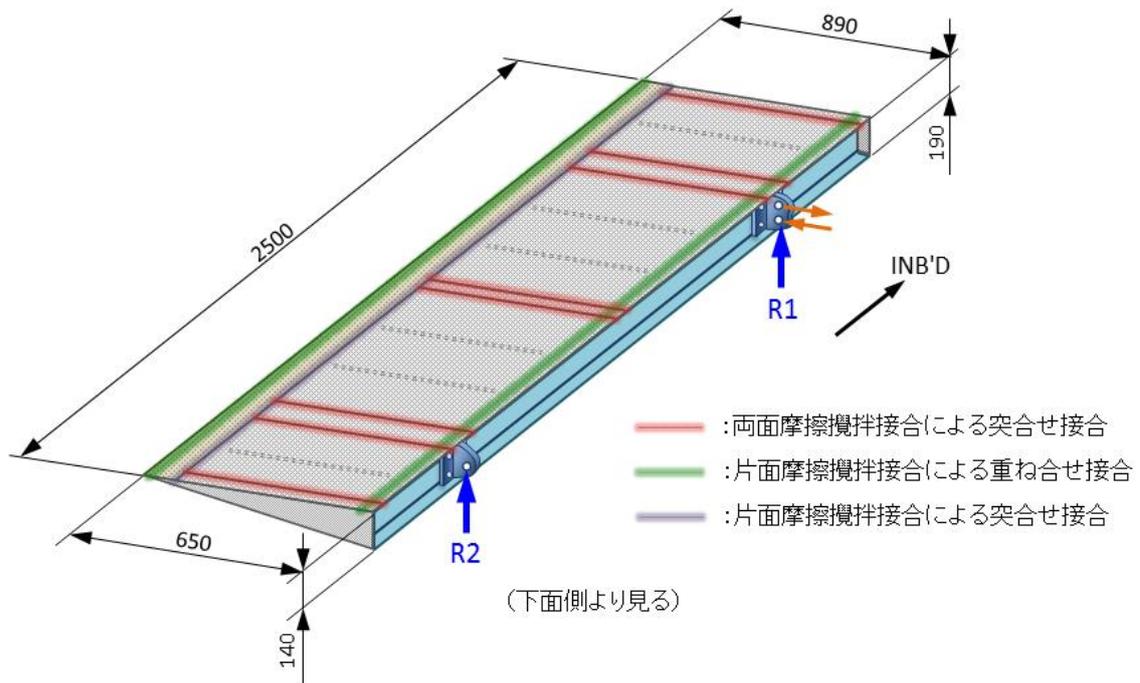


図2-1 設定した FSW によるエルロン構造

### 2-2 低圧力の FSW 技術の構築

#### 2-2-1 ツールの設計・開発および製作

低圧力で接合できる FSW 技術の構築に向け、複動式両面摩擦攪拌接合に適した各種ツールを開発・製作し接合の加工試験に供した。

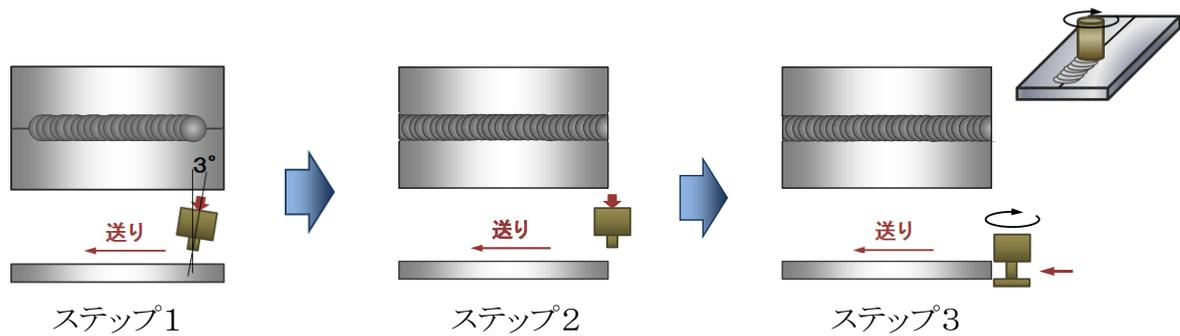
ツール開発は従来のツール形状をベースとし、プローブは4mm φ、5mm φ、6mm φ の3種類の径、付与したネジはピッチ0.5と0.7の2種類を製作した。

ショルダは上側ショルダを7タイプ、下側ショルダを4タイプ製作し、その径は14mm φをベースにプローブ径に合わせて変化させたものも製作した。

#### 2-2-2 接合の加工試験

低圧力の摩擦攪拌接合試験は以下に示す3つのステップに分け、大阪大学の摩擦攪拌接合装置:3号機を用いてステップ・バイ・ステップで進めた。

- ① ステップ1 : 7075-T6 アルミニウム合金の最適接合条件の設定
- ② ステップ2 : プローブ傾き角 (前進角)  $0^{\circ}$  による接合条件の設定
- ③ ステップ3 : 複動式両面摩擦攪拌接合の確立



### (1) ステップ1の試験結果

航空機構造において汎用され、今回の研究開発の対象として選定した7075-T6 アルミニウム合金に対する最適接合領域を得ることができた。この領域を図2-2に示す。

この図より7075-T6 の最適接合領域は回転数:1750rpm、送り速度:200~350mm/minにあるといえる。なお、回転数については使用した設備の最大回転数が1750rpm であるため、今回の試験では上限値は定められなかった。

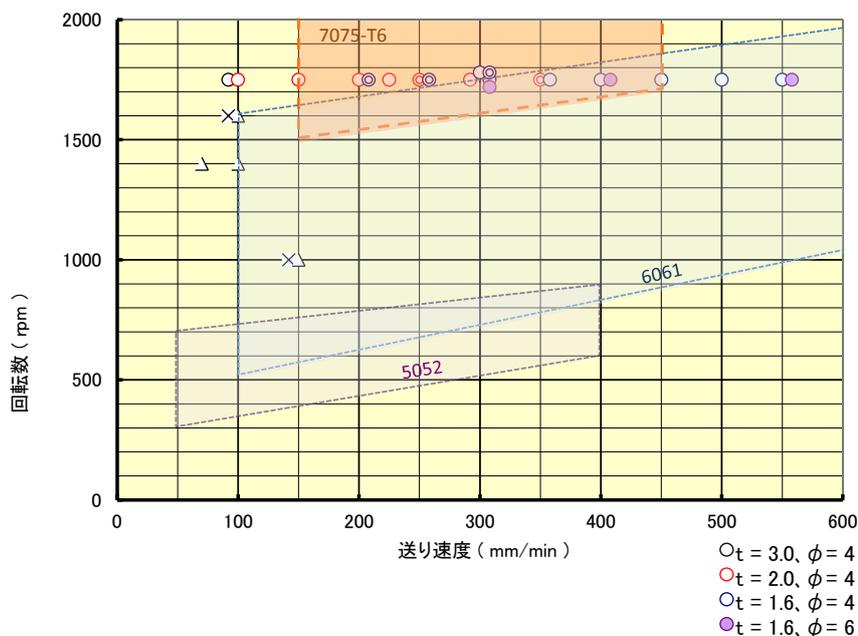


図2-2 7075-T6 アルミニウム合金の最適接合領域の設定結果

### (2) ステップ2の試験結果

上下面からショルダを挟み込む複動式両面摩擦攪拌接合の接合条件を想定し、ツール送り方向に対するプローブの傾き角(前進角)を $0^\circ$ とした場合の接合試験を実施した。

その結果、ステップ1で設定した接合条件と同一の条件で接合できること、およびプローブ径等のツールによる接合条件に対する明確な影響が無いこと等を確認した。

### (3) ステップ3の試験結果

上面ショルダおよび下面ショルダの双方から入熱する複動式両面摩擦攪拌接合の接合条件を設定し、その接合技術を構築した。

複動式両面摩擦攪拌接合は両面から入熱されるため、入熱量はほぼ倍になると考えられ、ステップ1、ステップ2において設定した接合条件はそのまま適用できない。

この対策として入熱量を調整するため、ショルダ形状の変更(塑性流動している材料を内部へ集めるために設けた接触面のスクロールの付与等)、ショルダの回転数や送り速度の変更、さらには今回位置制御とした複動式両面摩擦接合における被接合材料の板厚に対する上側ショルダー下側ショルダ間の距離の差分について検討した。

以上の種々の条件を組み合わせることで接合試験を重ねた結果、下記条件で「低圧による複動式両面摩擦攪拌接合」の下記の適合条件を得ることができた。

- ・ 回転数:1200 rpm、送り速度:100 mm/min、プローブ径:6.0mm φ

しかし、浸透探傷検査において若干の欠陥の存在が示され、光学顕微鏡による断面観察において内部欠陥の存在が確認された。また強度試験においても引張強度が母材の2/3程度であり、接合品質はまだ十分に安定しておらず、さらなる検討を加える必要がある。

## 2-3 板厚変化に対応できるFSW技術の構築

### 2-3-1 ツールの設計・開発および製作

ツールは前項の研究成果をベースに本項の試験結果を反映させながら開発した。プローブについてはネジの有無、ショルダについてはスクロールの有無を含む各種形状のツールを開発・製作し、試験結果に基づき最適なツールを選定した。

### 2-3-2 接合の加工試験

板厚変化に対応できる摩擦攪拌接合は上下のショルダ間隔が変化することが求められるため、荷重制御方式の両面摩擦攪拌接合技術の確立を目指し、試験は大阪大学の摩擦攪拌接合装置:3号機および5号機を用いて3つのステップに分けステップ・バイ・ステップで進めた。

- ① ステップ1 : 荷重制御方式による片面摩擦攪拌接合の接合条件設定
- ② ステップ2 : 荷重制御方式と位置制御方式による両面摩擦攪拌接合の接合条件設定  
(一定板厚の平板)
- ③ ステップ3 : 荷重制御方式と位置制御方式による両面摩擦攪拌接合の確立  
(板厚変化する平板)

#### (1) ステップ1

このステップでは位置制御方式で得られた最適接合条件時の荷重を荷重制御方式における負荷荷重とし、位置制御方式と同等の接合品質が得られる負荷荷重を求めた。

その結果、位置制御方式と同等の回転数、送り速度において負荷荷重 250kgf~300kgf の範囲で良好な接合が得られた。

## (2) ステップ2

荷重制御方式による両面摩擦攪拌接合技術を確立するため、ステップ1で得られた「片面摩擦攪拌接合時のプローブの軸方向荷重」を下面側(荷重制御側)ショルダの負荷荷重とし、上面側ショルダは位置制御として、一定板厚の被接合体について接合試験を実施した。

この接合試験で得られた適合領域を図2-3に示す。

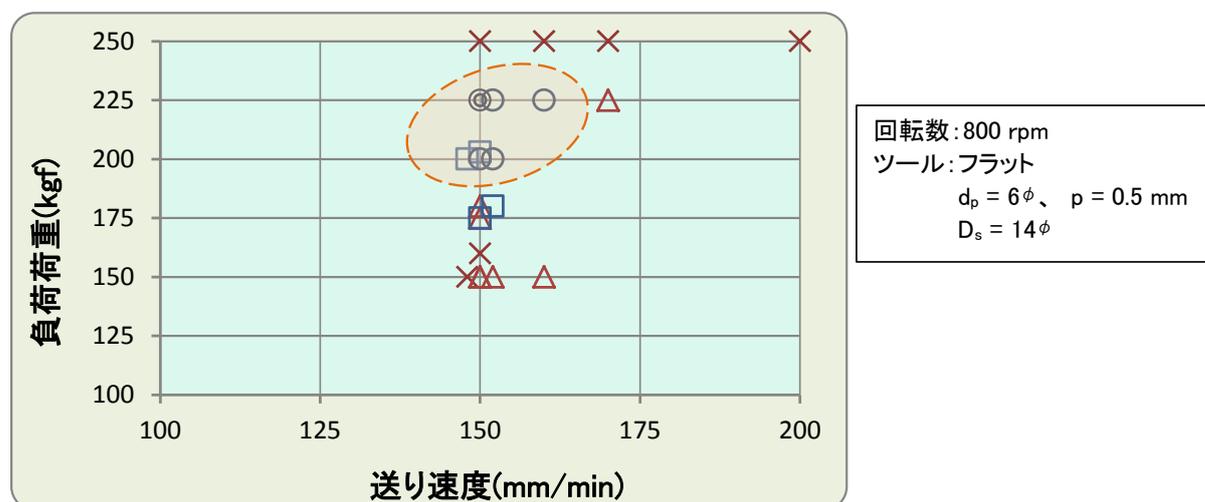


図2-3 荷重制御による両面摩擦攪拌接合の適合領域

図2-3に示す通り、負荷荷重 225kgf (回転数:800rpm、送り速度 150mm/min) で外観検査、浸透探傷検査ともに良好な接合品質が得られた。

なお、負荷荷重をこれ以上高くすると、塑性流動したアルミニウム合金が負荷荷重により潰されて上下ショルダが閉じてしまい接合が出来ず、荷重制御の場合、入熱量に対し負荷荷重に限界があることが分かった。しかし、この定量的な関連は明らかにすることが出来なかった。

## (3) ステップ3

ステップ2で得られた荷重制御方式による両面摩擦攪拌接合の接合条件を適用し、被接合体の板厚を変化させて接合試験を実施した。

被接合体の板厚は 2.0t→1.6tに変化させ、その変化率(テーパ部の傾き)は 1/100 とした。この結果、1個の供試体はほぼ良好な接合ができたが、その再現はできなかった。

この原因として以下のふたつが想定され、今後の課題として残された。

ひとつは両面摩擦攪拌接合では片面摩擦攪拌接合のように下面側に放熱される治工具がなく入熱した熱が片面摩擦攪拌接合より長い時間蓄熱されるため、板厚 2.0t の個所と板厚 1.6t の個所では蓄熱量が異なり、適正な入熱量も板厚によって異なると推察される。

もうひとつは、テーパ部では前進角を有する接合、一定板厚部では前進角のない接合となるため、前進角が異なるふたつの領域に適する共通のツール(ショルダ)が必要と考えられる。

## 2-4 閉じた構造に適用できるFSW技術の構築

航空機構造に多く存在するボックス構造(閉じた構造)の内部に治工具を装着せずに摩擦攪拌接合を実施する方法として、T型継手に対する摩擦攪拌接合について研究開発した。

### 2-4-1 ツールの設計・開発および製作

T型継手に適用するツールとして、特に接合特性に大きな影響を及ぼすプローブ長さを中心に、プローブ径、プローブ・ピッチ、ショルダ溝の有無等に関する条件を変更し16種のツールを設計・開発した。

### 2-4-2 接合の加工試験

#### (1) 供試体の形状

航空機構造において、外板とスパーのフランジ部やリブのフランジ部との結合部に見られるT型継手における重ね合せ接合を模して図2-4に示す接合試験を実施した。

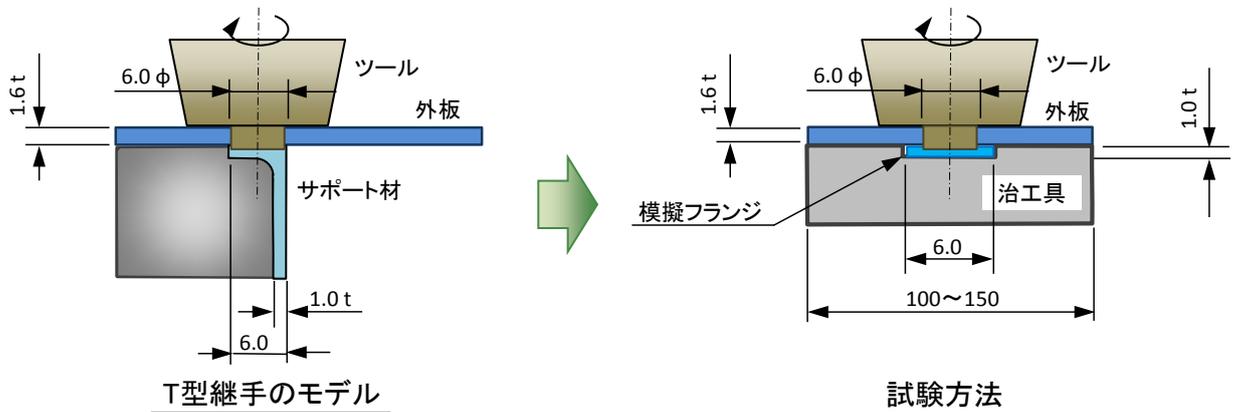


図2-4 T型継手の接合試験片形状の設定

#### (2) 接合試験に用いた装置

部分構造の試作、代表的な航空機構造サンプルの試作、および将来の事業化をにらみ、川並鉄工および野田金型が所有する汎用工作機械(縦型フライス)を使用した。

#### (3) 接合試験結果

ツールについて2-4-1項に示すプローブ長さ(下面板への挿入長さ)、プローブ・ピッチ、切込み量(ショルダの被接合体へ入り込む量)およびショルダ面の溝の有無を変えて接合試験を実施した結果、T型継手の重ね合せ摩擦攪拌接合について実機製品に適用できるレベルの十分良好な接合品質が得られる条件が確立できた。

良好な接合品質が得られた適合領域はプローブ長さ(下面板への挿入深さ)により影響を受けるが、切込み量(ショルダの被接合材への食い込み量)、プローブ・ピッチおよびショルダ面の溝の有無についてはその影響がほとんど無いことが認められた。今後はプローブの最適長さを定量的に設定し、T型継手摩擦攪拌接合の作業確立をしていく必要がある。

これらの試験結果のうちをプローブ長さによる影響について図2-5に示す。

なお、前述したとおり切込み量単独の影響は無いが、プローブ長さの影響については切込み量も関連することが判明したため、図2-5は切込み量もファクタとしてまとめた。

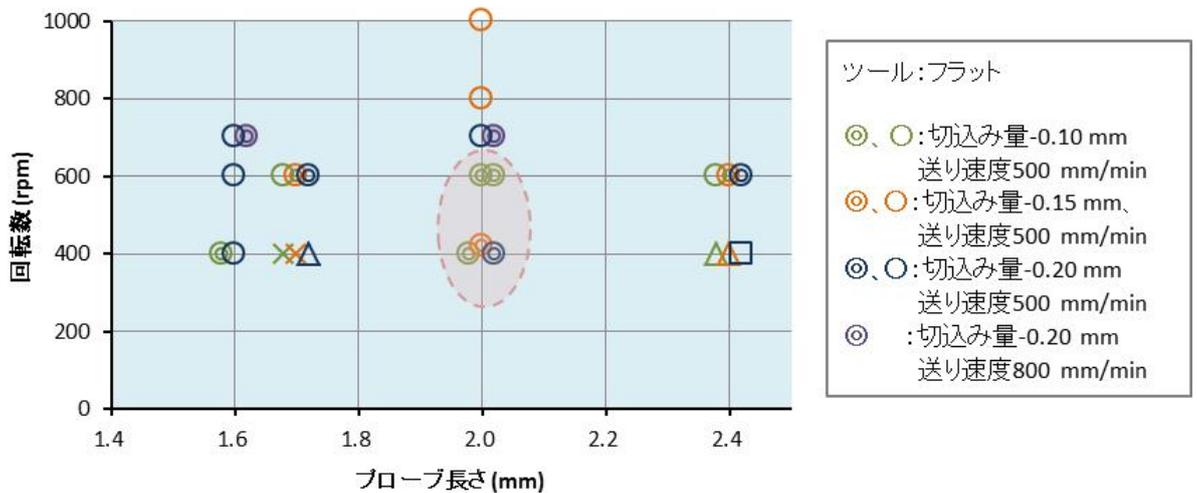


図2-5 プローブ長さによる影響

この図よりプローブ長さが 2.0mm (接合面から下面側への挿入深さ:0.4mm) の場合、回転数 400~600rpm で安定して良好な結果が得られた。また、切込み量が 0.15mm 以上であれば、回転数 600rpm でプローブ長さが 1.7mm~2.4mm の範囲でも良好な結果が得られた。

## 2-5 汎用工作機械に装着可能な FSW ツールの開発

### 2-5-1 ツールの設計・製作

中小のいずれの企業においても摩擦攪拌接合による製品を実践的に製作できるようにするために、縦型フライス盤、マシニングセンター等の汎用工作機械に装着し荷重制御方式の摩擦攪拌接合ができるツールの開発を行った。

開発した荷重制御方式のツールは両面摩擦攪拌接合用および片面摩擦攪拌接合用のふたつであり、これらのツールが汎用工作機械に装着できるよう、装着部は汎用ツールと同等の形状とし、いずれのツールも工作機械への装着部にバネを内蔵した。また摩擦攪拌する先端部に位置するショルダ、プローブについては前述した研究成果を反映した。

製作したツールを図2-6、図2-7 に示す。



図2-6 両面摩擦攪拌接合ツール



図2-7 片面摩擦攪拌接合ツール

## 2-5-2 接合試験によるツール等の評価

製作したツールを評価するために汎用工作機械にこれを装着して接合試験を実施した。

最初にツール製作会社であるエムジェイテック社において製作したツールの妥当性を評価し、その後「部分構造の試作」および「代表的な航空機構造サンプルの試作」を実施する川並鉄工社および野田金型社でそれぞれの会社が所有する汎用工作機械にこのツールを装着し、同等の接合条件で妥当な接合品質が得られることを確認するための接合試験を実施した。

また、これらの接合試験において得られた適合領域を、大阪大学 接合科学研究所で FSW 専用装置を用いて実施した試験による適合領域と比較し、表2-1および表2-2に示す。

表2-1 両面摩擦攪拌接合の適合領域(上側ショルダ:位置制御、下側ショルダ:荷重制御)

	回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	負荷荷重 (kgf)	ショルダ 形状
H23年度 接合試験 (@ 大阪大学 接合研)	800	140~160	200~225	フラット
ツール評価の基礎試験 (@ エムジェイテック)	800	150	200	フラット
汎用機械による評価試験 (@ 川並鉄工)	800~900	150	200	フラット

表2-2 片面摩擦攪拌接合の適合領域(荷重制御、重ね合せ)

	スクロ ール	回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	負荷荷重 (kgf)	ショルダ 形状
H23年度 接合試験 (@ 大阪大学 接合研)	無し	1750	300	250~300	火口型
ツール評価の基礎試験 (@ エムジェイテック)		1750	300	350~400	火口型
汎用機械による評価試験 (@ 野田金型)	有り	2000	50	330	火口型
		2000	50~100	330	火口型

これらの表に示すとおり両面摩擦攪拌接合(上面ショルダ:位置制御、下面ショルダ:荷重制御)による突合せ接合はすべての試験においてほぼ同じ適合領域となり、今回開発したバネ内蔵型両面摩擦攪拌接合用のツールは非常に有効であると評価した。

一方、片面摩擦攪拌接合(荷重制御)による重ね合せ接合はスクロール無しのショルダを用いた場合、昨年度大阪大学で実施した試験結果とエムジェイテック社で実施した基礎試験結果が同じ領域となり、スクロール有りのショルダを用いた場合、エムジェイテック社で実施した基礎試験結果と野田金型社で実施した実践的な試験結果がほぼ同じ適合領域となったことより、バネ内蔵型片面摩擦攪拌接合用のツールについても有効であると評価した。

### 2-5-3 スポット FSW

「代表的な航空機構造サンプルの試作」を行うに当たり、負荷荷重の小さな部品の取付け、または通常の FSW を適用する折に部品の仮固定に適用することを目的に、通常の FSW より熱歪がさらに小さいスポット FSW 技術について汎用工作機械に装着できるツールの製作および接合条件の確立を行った。

なお、この研究開発は自主的に追加した項目である。

「代表的な航空機構造サンプルの試作」に用いるアングル材のフランジの幅、ウェブの高さおよびツールのプローブ挿入を考慮し、これらの部材と干渉しない特有なツール形状を設計・製作した。

製作したツールを評価するためエムジェイテック社において製作したツールを用いて妥当な接合品質が得られる接合条件を設定し、その後、野田金型社において同じツールを用いて、同じ接合条件で接合試験を行い、同等の良好な接合品質が得られることを確認した。

両社で行った接合試験で、ともに良好な接合結果が得られことにより、開発したスポット FSW ツールおよび接合条件は妥当であることを確認した。

## 2-6 部分構造の試作

### 2-6-1 部分構造の設計

「FSW 構造に則した航空機構造の策定」、「低圧力の FSW 技術の構築」、「板厚変化に対応できる FSW 技術の構築」および「閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築」で実施したすべての成果を反映して、航空機の代表的な構造物のひとつである動翼について、ビジネスジェット機のエルロンを対象に図2-8に示す部分構造を設計した。

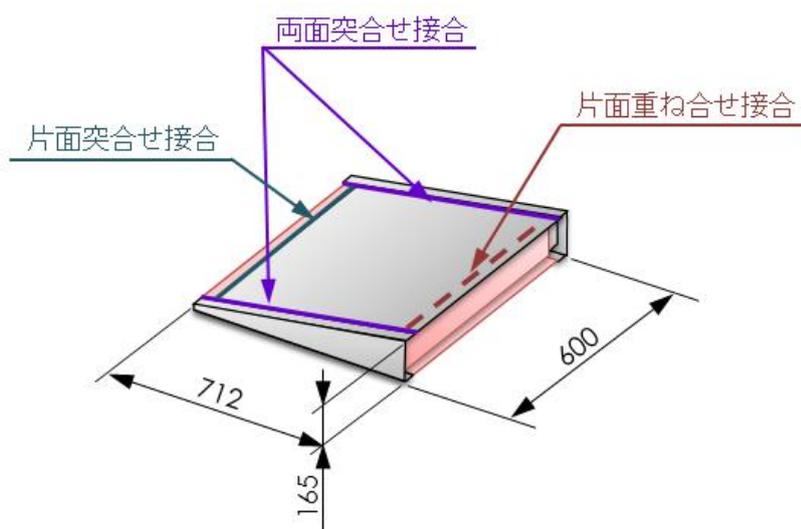


図2-8 試作した部分構造の供試体

### 2-6-2 部分構造の試作

第2-2項～第2-4項の研究開発はすべて大阪大学の接合科学研究所において摩擦攪拌接合の専用装置を使用し、標準板厚を有する平板を用いて進めてきた。「部分構造の試作」

の目的は各企業の工場において汎用の工作機械を用いて、前述の確立したFSW技術を立体の3次元構造に適用するに当たって必要な技術を確認することにある。このため「部分構造の試作」は第2～5項で開発したツールを各企業の汎用工作機械に装着して実施した。

また、今回の「部分構造の試作」では両端のリブと外板の接合はすべて両面摩擦攪拌接合による突合せ接合を採用し、後桁は片面摩擦攪拌接合による突合せ接合、前桁と後縁は片面摩擦攪拌接合による重ね合せ接合を採用した。

両端のリブと外板および前桁の接合試験状況を図2-9、図2-10に示す。



図2-9 リブと外板の突合せ接合試験状況



図2-10 前桁の重ね合せ接合試験状況

その結果、両面摩擦攪拌接合の突合せ接合については、上面、下面とも外観検査で良好な結果が得られたケースは1体の供試体で、かつふたつのリブのうち片側のリブの接合だけとなった。片面摩擦攪拌接合の突合せ接合についてはいずれもクラックが発生したが、そのうち半分は微小なクラックであり外観的にはほぼ良好な接合ができたといえる。

一方、片面摩擦攪拌接合の重ね合せ接合についてはアドバンシング・サイドで直線的に切断するか、または直線状のクラックが発生し、接合はできたが良好な接合品質レベルを得ることはできなかった。

これらの原因は、標準の平板を用いたラボレベルで確立した新規の摩擦攪拌接合技術が、未だ実際の3次元立体構造物に適用できる完全に安定した品質レベルに達していないためと考えられる。具体的には下記の要因が想定される。

- ① 基礎試験で用いた治工具と立体部品に適用する治工具とは大きさや数に違いがあるため、基礎試験と部分構造試験では治工具の熱容量が異なる。したがって摩擦攪拌接合による入熱量は同じでも、被接合体の接合部に投入される入熱量が異なる。
- ② 基礎試験では接合箇所に沿って、その直ぐ両側だけを押えているが、部分構造試験では構造体全体をがっちり固定しているため、接合時の入熱で熱膨張した被接合体の伸びを吸収する余地がなくなる。このため接合部周辺に熱歪が生じツールが若干浮き上がり、攪拌された被接合材の材料が逃げて欠陥発生につながる。

試作した部分構造の最終仕上りの外観を図2-11、図2-12に示す。

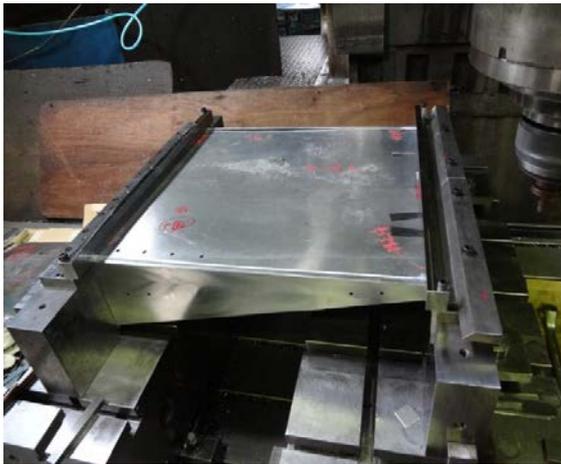


図2-11 部分構造の最終仕上がり



図2-12 製作した部分構造

以上のおり「部分構造の試作」を行った結果、薄板の3次元立体構造を摩擦攪拌接合で組立てる際に注意すべき重要事項が明らかになった。この成果は引き続いて実施する「代表的な航空機構造のサンプルの試作」に反映した。

## 2-7 代表的な航空機構造サンプルの試作

### 2-7-1 航空機構造サンプルの設計

試作した代表的な航空機構造のサンプルはビジネスジェット機のエルロンを対象とした。

「FSW 構造に則した航空機構造の策定」において設定した構造様式をベースに「低圧力の FSW 技術の構築」、「板厚変化に対応できる FSW 技術の構築」、「閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築」および「部分構造の試作」の成果を反映した。(図2-1参照)

また、大きさは各社所有の製造設備、治工具の規模等を勘案し、設計したエルロン(図2-1)の約70%のスケールモデルとした。

### 2-7-2 航空機構造サンプルの試作

航空機構造サンプルとしてエルロンを製作した結果を図2-13に示す。

この図に示すとおり両面摩擦攪拌接合によるリブと外板パネルの突合せ接合において巣状の欠陥が出き、また未接合箇所が発生する等、すべての接合部において十分良好な接合品質を得るには至らなかった。全く同じ接合条件で実施したにも拘わらず接合品質に良否が表れるバラツキが出たということは、3次元立体構造では接合条件以外にもコントロールすべきファクタが存在するということが明らかになったといえる。

特に、被接合部材のセット方法および治工具における部品固縛の工夫がこのような3次元立体構造を安定的に接合するためには非常に重要であることも、このサンプル試作によって得られた成果である。

また、試作途中でツールが破断したために製品も破断部で不具合となる事象が発生した。こ

のような不具合、また局部的に不具合(巣や亀裂)が発生した場合、製品すべてが不具合品になっては採算が取れなくなる。このサンプル試作において不具合や局部的に品質の低い個所が出たことは残念な結果であるが、一方これにより、今後、具体的な事業化を目指すに当ってはこのような箇所に対する修理法の確立も必須であることが明確になった。

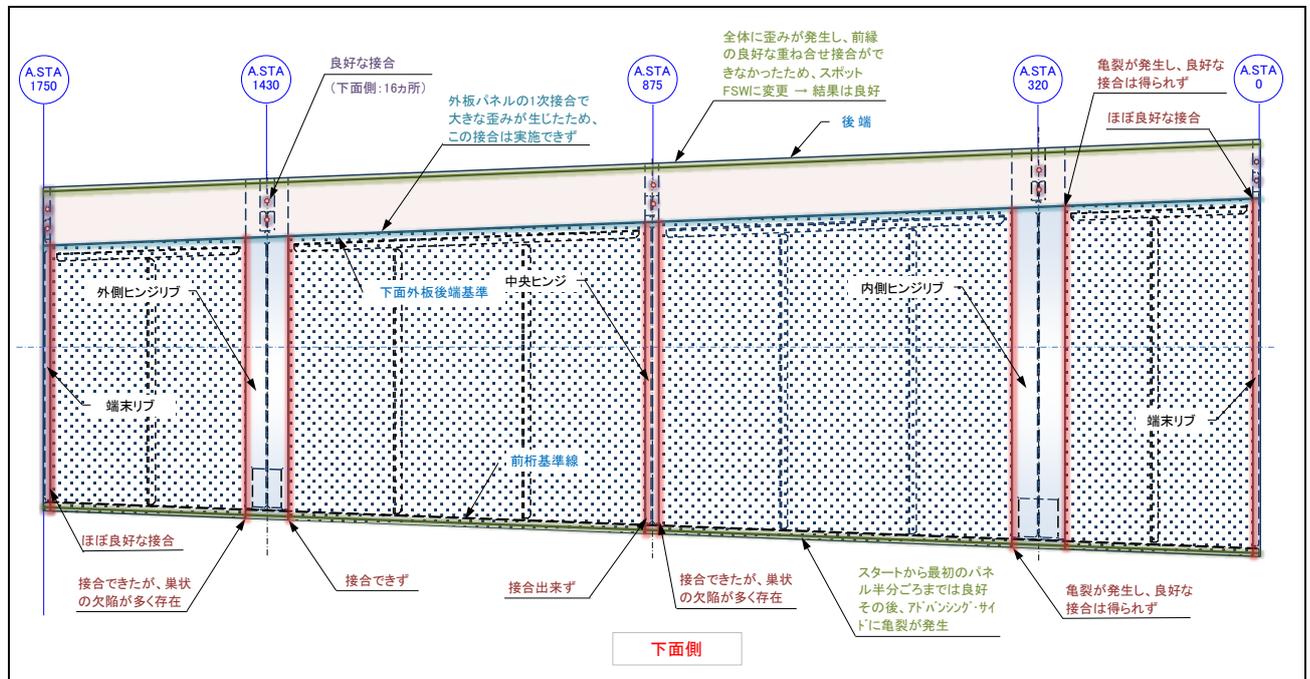


図2-13 エルロン組立の接合部の外観検査結果 ( 下面側 )

このサンプル試作では十分な接合品質を得るには至らなかったが、座屈し易い薄板で構成される航空機構造に摩擦攪拌接合を適用する目的、さらには、公差、歪みを有する3次元立体構造に摩擦攪拌接合を適用した製品を、各企業が自社所有の汎用工作機械で製作する目的が果たしたことは大きな成果といえる。

製作したリブと外板パネルのサブ組立、完成したエルロン組立の写真を図2-14、図2-15に示す。

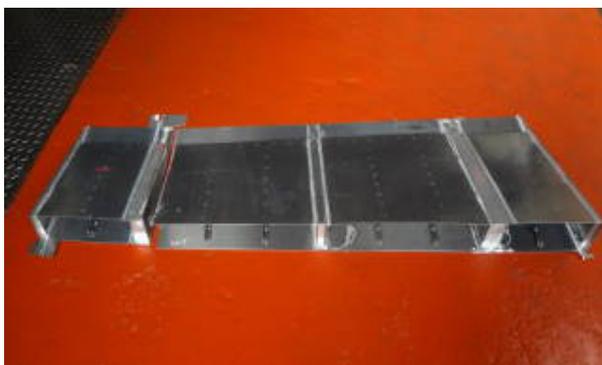


図2-14 リブと外板パネルのサブ組立



図2-15 摩擦攪拌接合で組立てた航空機のエルロン(完成品)

### 3 全体総括

3年間に互って実施した研究開発内容を総括した所見をまとめるとともに、将来へ向けた事業展開について考えを述べる。

#### (1) FSW 構造に則した航空機構造の策定

一般に新しい加工法が導入される場合、構造設計に関わるリスクを避けるために、当初は従来から実績のある構造様式を用いるケースが多い。

近年の航空機構造における大きな技術革新であった複合材料も、当初および一部では未だ従来の板金構造を踏襲し、材料だけを複合材料に置き換えたケースが見られるが、これでは新規加工技術が持つ特有の優れた機能・性能を十分に発揮させることは出来ない。

今回の「摩擦攪拌接合を適用した航空機部品の製作」の研究開発においては、「よりFSWに適した構造様式の設定」を狙い接合シーケンスと相互関係を持たせて検討を進めた。

このため3年間に互って実施したそれぞれの「FSW技術の構築」における接合試験の成果も反映し、当初から新しい構造様式の設定に努め、これを構築できたことは大きな成果であり、また構築した航空機構造は新しい技術トレンドになるとの確信を持った。

#### (2) 低圧力の FSW 技術の構築

薄板を用いた中空の3次元構造では摩擦攪拌接合時に必要な大きな力を負荷できないが、本研究によって低圧力で接合できる FSW 技術を構築する見通しを得たと言える。

一般に 7075 材は、従来法の溶接が可能な6061材や5052材等のアルミニウム合金に比較して妥当な接合条件領域はかなり狭いといえる。この材料を低圧力で接合する場合には、上下ショルダ間の距離、塑性流動された材料の掻き出しを防ぐ方法、入熱量のコントロールなど、接合条件に関わるファクタがさらに増えるため最適領域はより狭くなっていると感じられる。

接合品質について安定度はまだ実機適用レベルに達しておらず、接合箇所疲労強度、損傷許容性等の強度特性を確認する必要もあり、今後、さらなる研究開発を継続的に実施する必要があると考えている。この接合品質をさらに向上・安定させるために、具体的には最適接合条件の領域を絞り込むこと、低圧力の摩擦攪拌接合に適したツールを研究開発することが求められる。

また、3次曲面が多く、構造剛性が低く、かつ絶対位置が不安定な航空機の実機構造への適用を考えると、1/10mm 以下の上下ショルダ間の距離のコントロールが必要な「位置制御方式」より「荷重制御方式」による低圧力摩擦攪拌接合が適していることも明らかになった。

#### (3) 板厚変化に対応できる FSW 技術の構築

航空機構造に多い板厚変化に対して対応できる FSW 技術は基本的に「荷重制御方式による低圧力接合試験」が適しており、この制御方式の接合技術を確立することが、この研究開発全般の成否を左右するともいえる。

今回の研究開発では片面が位置制御、他面が荷重制御による両面摩擦攪拌接合技術について、外観検査で良好な接合品質を得るレベルに達することができた。

しかし、板厚が変化する場合、良好な外観であっても一定板厚の場合に比べて外観の評価は低く、断面観察ではボイドも確認され、引張強度試験では十分な強度も得られなかった。

この原因のひとつとして攪拌により塑性流動した材料が柔らかくなるため、負荷荷重を大きくすると被接合材料が潰れてしまい上下のショルダが閉じて接合できなくなることが挙げられる。

この問題解決ため荷重を大きくしてショルダが閉じ出しても、上下ショルダがある寸度以下になると荷重制御から位置制御に変わるハイブリッド制御方式の両面摩擦攪拌接合を検討し、ツール開発を含めてその技術を確立し得たことは大きな成果といえる。

#### (4) 閉じた構造に適用できる FSW 技術の構築

実施した T 型継手に対する摩擦攪拌接合について、適合領域およびこの接合に適するツール等を確立することができた。しかし、外観検査が良好な供試体で、かつ引張剪断強度も充分妥当な値であったものは全体の一部であった。この原因は、内部にボイドが存在しているためであることが断面観察によって判明したが、ボイドが生じた原因は明らかにできなかった。

今後実機構造に適用していくには、さらなる試験を重ねてこの原因を明らかにし、安定して良好な接合品質が得られる条件を確立する必要がある。

#### (5) 部分構造の試作

標準の平板を用いラボレベルで確立した新規の摩擦攪拌接合技術を、薄板による3次元立体構造物に適用し実際の航空機の動翼の部分構造を試作したが、安定した接合品質レベルを得ることはできなかった。

しかし、この試作により薄板の3次元立体構造を摩擦攪拌接合で組立てる際に注意すべき多くの重要な事項が明らかになり、実践的な構造物へ摩擦攪拌接合を適用するための技術レベルが大きく向上したといえる。

#### (6) 代表的な航空機構造サンプルの試作

代表的な航空機構造のサンプルとしてビジネスジェット機のエルロンを試作し得たことは、今後、航空機構造に摩擦攪拌接合を適用していくに当たって技術上の大きな飛躍になった。

また、これにより当初立案した、技術目標の達成だけでなく、性能目標、原価目標を達成できる見通しも確信できた。

さらに近年発表されたアルミリチウム合金と摩擦攪拌接合技術を組み合わせることで板金構造の約 25%の重量軽減の達成も見通せ、これは複合材料に十分対抗できる性能である。

この技術成果は航空機構造における「ジュラルミン適用による第1次の構造革新」、「複合材料適用による第2次の構造革新」に続く「第3次の構造革新」をもたらすことが期待される。これは航空機産業界からの熱望のみならず、ひいては工業会全体における摩擦攪拌接合技術を適用した製品の実用化に向けて大きな貢献をもたらすといえる。

#### (7) 汎用工作機械に装着可能な FSW ツールの開発

摩擦攪拌接合を適用した実践的な製品を作るには部品の公差、歪み等に対応できる荷重

制御による摩擦攪拌接合技術の確立が必須といえる。

大阪大学が所有する摩擦攪拌接合の専用装置を用いれば荷重制御は容易に可能であるが、汎用工作機械を利用した摩擦攪拌接合では工作機械の特性上、荷重制御は不可能であり、実際に運用するには位置制御しか対応できない。

この研究開発で考案・製作したツールは荷重制御が出来る両面摩擦攪拌接合用および片面摩擦攪拌接合用のふたつであり、いずれも汎用の工作機械へ装着ができる画期的なツールといえる。

これにより高価な専用の摩擦攪拌接合装置を購入しなくても中小企業が所有する汎用の工作機械に今回開発したツールを装着するだけで、どの企業でも摩擦攪拌接合を適用した製品を製作することが可能となった。

これは日本の産業界における大きな技術革新といえる。

## (8) 将来の事業化への展開

### ① 接合品質の安定化

事業化に向けて最優先に実施すべきことは接合品質のさらなる向上と安定である。特に3次元立体構造物において安定的な接合品質を得るには、摩擦攪拌接合用の治工具設計におけるノーハウ蓄積等、より高いレベルの技術確立に向けた研究開発を継続的に実施する必要がある。

この実践的な研究開発を継続していくなかで適合条件の絞り込み、および安定した接合品質が得られる作業標準の確立が、事業化に向けた基本条件であるといえる。

### ② 修理方法の確立

前項で述べた安定した接合品質が確立されても、一般の機械加工と同様、不具合がゼロということは産業界ではまず有りえない。

組立接合の最終段階で不具合が出ればすべての部品が廃棄となり、大きな損失が発生し収益の確保ができなくなる。このリスクを低減するため不具合に対する適切な修理法の確立が必須であり、今後この技術確立の研究開発を行う必要がある。

### ③ FAA への対応

航空機部品はすべての航空機構造が FAR (Federal Aviation Regulation) に合致していることが認証されないと絶対に実機には採用されない。さらに航空機の安全を支えている Type Design (型式設計) に合致させることが実機へ適用するための基本である。

この研究チームでは FAA DER を招き自主勉強を重ねたが、中小企業の自主的な活動だけでは規模の大きさ、レベルの高さにおいて限界がある。

実用化、事業化に向けて今後、公的機関からのご支援を強くお願いしたい。

#### 4 専門用語の解説

##### (1) 摩擦攪拌接合 (FSW:Friction Stir Welding)

接合する2つの材料の接合面にφ10～20程度の金属棒(回転ツール)を回転させながら挿入し、これを移動させることで、材料と回転ツールの間に摩擦熱を発生させ、それを利用して接合する手法である。固相状態で接合するため、結晶粒の成長が抑制され、他の接合方法と比較して継手強度が高く、信頼性の高い接合方法である。

回転ツールは通常、幅広のショルダ部と、その先端にあり材用内に挿入される細いピン部から構成されている。通常はショルダ部とピン部は一体である。

##### (2) プローブ

回転ツールは通常、幅広のショルダ部とその先端にあり材料内に挿入される細いピン部から構成されている。この回転ツールの先端「中心」にあり材料内に挿入される細いピン部をいう。

母材に挿入され、塑性流動した母材を攪拌する役割を担っている。

##### (3) ショルダ

前述の回転ツールの外側にあり、接合のための摩擦熱の発生と前項のプローブによって塑性流動した母材を受けバリ抑制の役割を担っている。

##### (4) キッシングボンド

突合せ面の攪拌不足によって、試料裏面側に生じる欠陥。通常の摩擦攪拌接合の場合、片面から施工を行うため、攪拌部下部(裏面)における攪拌が相対的に弱くなる。

##### (5) 7000系アルミニウム合金

熱処理型アルミニウム合金のひとつでAl-Zn-Mg系の合金をいう。

一般には超々ジュラルミンと呼ばれ、優れた強度特性を有するが、従来の溶接接合はできない。代表的な合金として7075、7050、7175等がある。

##### (6) FAA

Federal Aviation Administrationの略でアメリカの連邦航空局をいう。

連邦航空局はアメリカ国内を運行する全ての航空機に対して、設計・開発だけではなく、製造、修理および運行等の全ての業務について承認の権限を有している。

##### (7) DER

Designated Engineering Representativeの略で、FAAに代わり個人資格で航空機の設計・開発における承認権限を有するエンジニアをいう。

専門分野としては構造、動力装備、システム、飛行試験等の9つの分野に分かれており、図面、計算書、報告書、スペック等の承認、試験の立会い、試験データの承認等、FAAから承認を受けたすべての業務を代行することができる。