

777 用耐力腐食割れに優れたストリングスの開発

Development of Taper/Rolled Stringers with High Resistance to Stress Corrosion Cracking for 777

名古屋航空宇宙システム製作所

広田 和 弘^{*1}佐藤 正 五^{*2}伊原木 幹 成^{*3}木村 隆 嗣^{*4}中 村 康 一^{*4}

近年、経年航空機において一次構造材である 7075-T 62 製ストリングスの応力腐食割れ不具合が発見され、当社で製造中のテーパロールストリングスに対しても耐 SCC 性向上が緊急に必要となった。大幅なコストアップの見込まれる新材料・新製造法を適用せず、現用プロセスを基本に加熱処理を一段階加えるだけの開発で、現用の約 40% 増加に当たる SCC しきい応力値 35 ksi (24.5 kgf/mm²) 以上を達成した。本熱処理法は今年から製造する 777 用テーパロールストリングスに採用中である。

Stress Corrosion Cracking (SCC) has recently occurred in the stringers, 7075-T 62 aluminum alloy, of older commercial aircraft. A similar problem might occur with the taper rolled stringers made by MHI in future. One of the general methods to improve SCC characteristics is to apply advanced materials and new manufacturing process, but this approach costs four times as much as the current manufacturing process. To reduce costs, the current manufacturing process has been modified by adding one heat treatment step. As a result, SCC threshold stress reached more than 35 ksi (24.5 kgf/mm²). This manufacturing process has been applied to taper rolled stringers.

1. はじめに

航空機の構造は図 1 に示すように、ストリングスとフレームで組まれた骨格に外板を取付けた構造になっている。また、これらの部材は他の構造物に比べて非常に薄く、例えばストリングスの板厚は、最大でも 3 mm 程度しかない。

世界中で就航している大型旅客機の半数近くに採用されているストリングスは、ここで取上げるテーパロールストリングスと呼ばれるタイプであり、高力アルミニウム合金 7075 コイルシート材を所定の板厚に圧延した後、熱処理及び板金成形加工により製造されている。ところが、最近、経年航空機のストリングスにおいて

応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, 以下 SCC と称す) による不具合がエアラインから報告されたことを受けて、当社も今後製造するテーパロールストリングスに対して耐 SCC 性向上を図ることになった。

SCC は、腐食環境と持続的な表面引張応力が同時に存在するときに発生し、それぞれが単独で作用するときよりも容易に脆性破壊を生じる現象⁽¹⁾である。一般に材料の強度が高いほど SCC 感受性が著しいので、高力アルミニウム合金では極めて重要な問題である⁽²⁾。この SCC 対策には主に以下の二つの手法がある。

(1) 材料の改良⁽³⁾

(2) 製造プロセスの改良

(1) については、7075 材に Zr を添加して耐 SCC 特性を向上させた 7150 材を用いる方法がある。特許の関係でユーザでの熱処理ができず、材料メーカーでしか熱処理できない。また T 77511 状態で購入することになるため、機械加工でストリングスに加工しなければならず、材料素材費及び加工費が高い。当社の試算によれば現用テーパロールストリングスタイプに対して 4 倍のコストが必要になる。

(2) については、現在製造中のテーパロールストリングスは素材の状態から製品まで当社で製造していることから、現在の製造プロセスを工夫して組織制御することが可能だと考えられる。そこで本報では、新しい熱処理プロセスの開発と新プロセスによる実機部品の耐 SCC 性向上確認試験について述べる。

2. 現用製造プロセスの解析

2.1 耐 SCC 性に優れたマイクロ組織の検討

アルミニウム合金の SCC のクラック進展形態は粒界割れであり、粒界に沿ったクラック進展を抑止するためには、クラック進展方向に対して結晶粒界が垂直に並んでいるのが望ましい。すなわち、図 2(a) に示すように引張応力の方向に対して平行な方向に細長い結晶粒が並ぶことが有効であり、このような粒界構造で

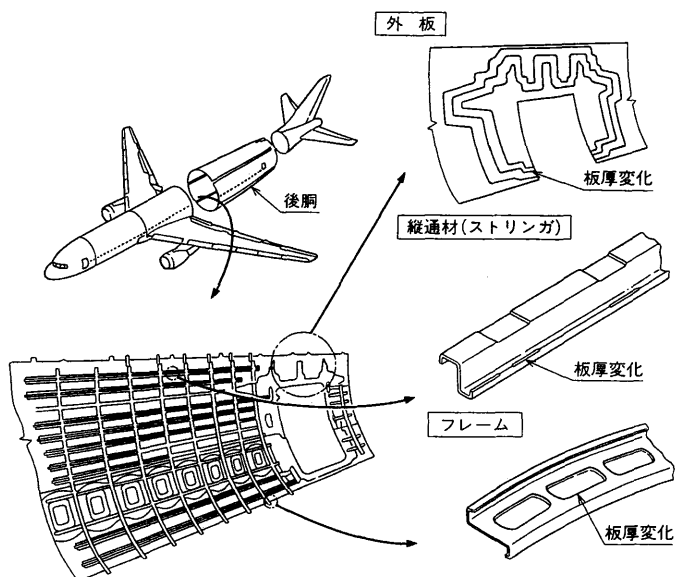


図 1 航空機の構造 大型民間輸送機の構造の透視図。ストリングスは航空機の背骨に当たる。
Structure of commercial aircraft

*1 航空機技術部主査 *3 研究部材料研究課主務
*2 大江工作部生産技術課 *4 研究部材料研究課

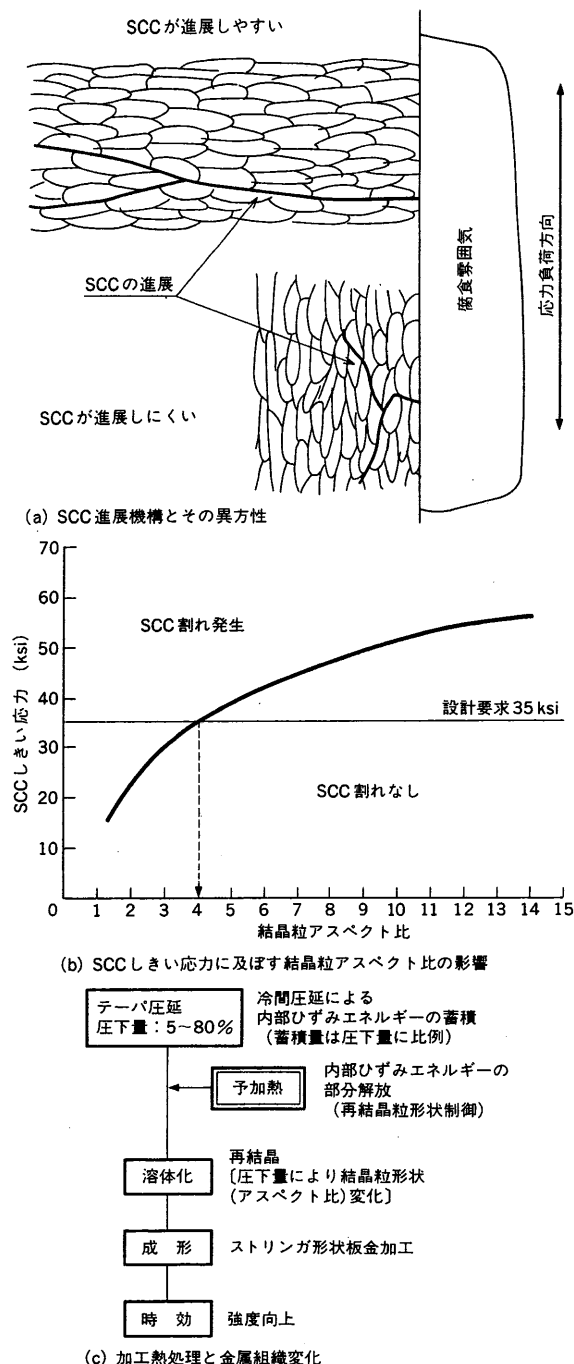


図2 SCC進展機構と現用プロセスの組織解析
 SCCは結晶粒界に沿って進展するため、クラックの進展しにくい方向にアスペクト比の大きい結晶を並べる。
 Mechanism of SCC and structural change of 7075 aluminum alloy in current manufacturing process

はクラックは進展したい方向に対して大きく迂回（うかい）しなくてはならない上に、枝分かれしやすくなって大きな割れに結びつき難い。

このことは、現在テーパロールストリングに使用されている7075-T62材の金属組織と耐SCC特性の間には図2(b)に示すような関係があることから裏付けられる。この図の縦軸はSCCが発生する最小応力を意味するSCCしきい応力を示し、横軸は結晶粒形状を表す結晶粒アスペクト比を示す。ここで、結晶粒アスペクト比は結晶粒の長手方向の長さ D_L と板厚方向の長さ D_T との比で定義した。図2(b)から、結晶粒アスペクト比が大きいほ

ど、SCCしきい応力が高くなっていることが分かる。したがって先に述べたように結晶粒アスペクト比を大きくすることが、耐SCC性向上に有効である。本報では、SCCしきい応力が35 ksi (24.5 kgf/mm²)以上という設計上の要求があることを考慮し、結晶粒アスペクト比が4以上を目標値として設定した。幸い、テーパロールストリングは長手方向と圧延方向が一致しており、引張応力に対して垂直な方向に細長い形状の結晶粒が並んでいる。したがって、圧延と熱処理を利用した組織制御が可能であると考えられる。

2.2 現用製造プロセスにおける組織変化の問題点

まず7075-Oコイルシート材を、図面寸法に従って必要な板厚にするため、冷間でテーパ圧延すると、焼きなまされて欠陥のない結晶粒が押しつぶされて材料内部に加工ひずみによるひずみエネルギーが蓄積される。この内部ひずみエネルギーは冷間圧延での圧下量に比例して蓄積される。すなわち、圧下量が多いほど蓄積されるひずみエネルギーも大きくなる。次に480℃、45 minで溶体化処理されるが、そのとき加熱による熱エネルギーの助けを借りて、冷間圧延によって内部に蓄積されたひずみエネルギーを駆動力にして機械的に押しつぶされた結晶粒が、再び欠陥のない結晶粒に再生する。この現象を再結晶と呼ぶ。再結晶は、転位の再配列・結晶の再配列（回復）・再結晶粒の核生成（一次再結晶）と、その後起こる結晶粒成長・粗大化（二次再結晶）という一連の現象が起こることがよく知られている^{(4)~(6)}。また、再結晶粒の核生成が起こる割合は、蓄積された加工ひずみエネルギーに依存する。

加工ひずみエネルギーの蓄積が比較的少ない、圧下量が20%前後の部分では、再結晶粒の核生成量は少ないが、少数の再結晶粒が優先的に粒成長して、結晶粒の粗大化が起こる。これに対し、加工ひずみエネルギーの蓄積が多い、圧下量の高い部分については、再結晶粒の核生成が多く、互いの粒成長を抑制するために逆に結晶が微細化すると考えられる。

アスペクト化の大きい結晶粒、すなわちストリングの長手方向に細長い結晶粒を得るためには、現用製造プロセスにおいて圧下量の高い部分で起こっている結晶粒の微細化を抑制する必要がある。そこで図2(c)に示すように、圧延時に蓄積されたひずみエネルギーを溶体化前にあらかじめ部分解放させることによって、溶体化時に起こる再結晶を調整することを狙い、現用製造プロセスの圧延と溶体化処理の間に中間焼きなまし（以下、予加熱処理）を加えることを考えた。

3. 新製造プロセスの開発

3.1 新熱処理条件の設定

3.1.1 ストリング

以下の試験には、実機ストリングの板厚分布を模擬した圧延板を供試体とした。その板の板厚分布を図3に示す。

3.1.2 示差熱分析

図4に圧下量70%の試料の示差熱分析結果を示す。反応エネルギーの正・負符号はそれぞれ発熱・吸熱を示している。90℃、240℃、343℃にピークを持つ発熱反応と497℃にピークを持つ吸熱反応が確認された。それぞれ図中に示す回復・再結晶現象による反応^{(5)~(6)}であり、497℃の鋭い吸熱ピークは共晶熔融と考えられる⁽¹⁾。ここで、圧下量30%、50%の試料でも90℃、240℃、497℃におけるピークは認められたが、圧下量70%の試料においてのみ330~375℃にわたる発熱反応が認められた。この発熱反

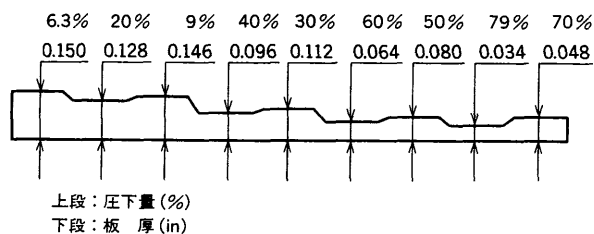


図3 サンプルストリングの形状 実機と同様、一枚のシートから圧下量を変化させて板厚を制御して製造する。
Sample stringer

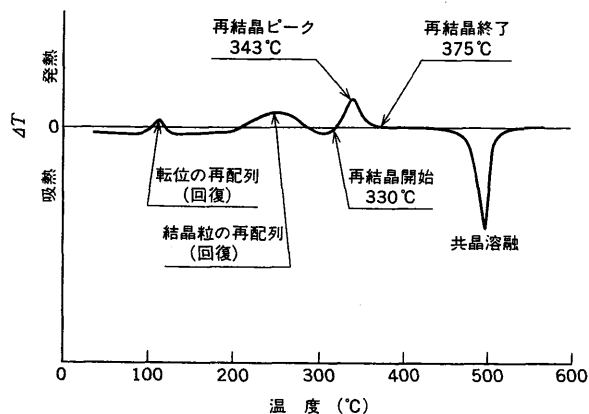


図4 示差熱分析結果 7075 圧延材 (圧下量 70%) の各温度における発熱・吸熱反応を示す。
Result of differential thermal analysis

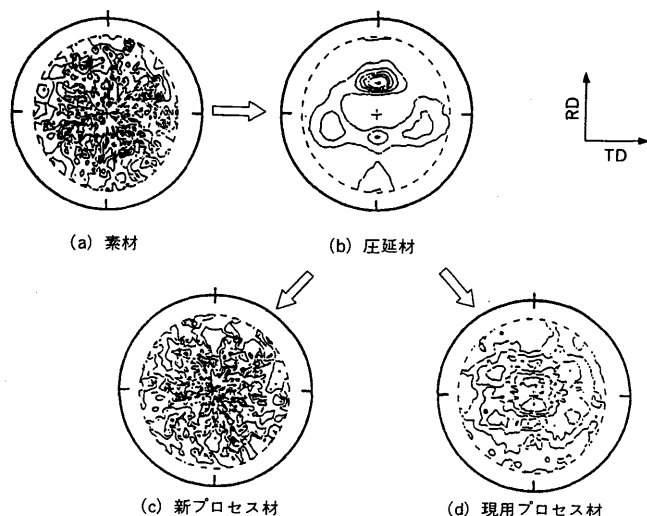


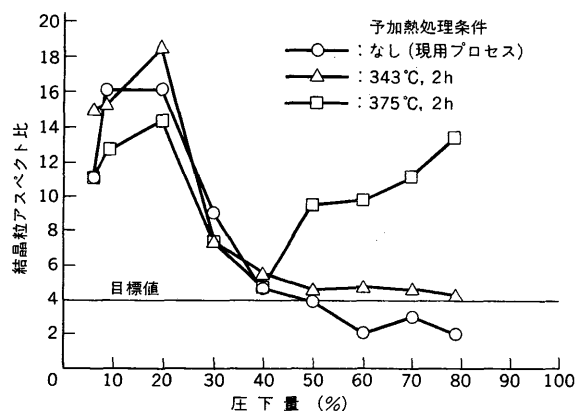
図5 新旧製造プロセスの集合組織変化 予加熱処理によって、結晶方位はランダムに戻る。
Texture change of 7075 aluminum alloy before and after heat treatments

応が再結晶粒の核生成量に大いに関与していると考え、再結晶粒の核生成エネルギーの部分解放を促すために、ピーク温度 (343°C) と最高温度 (375°C) を予加熱温度とした。

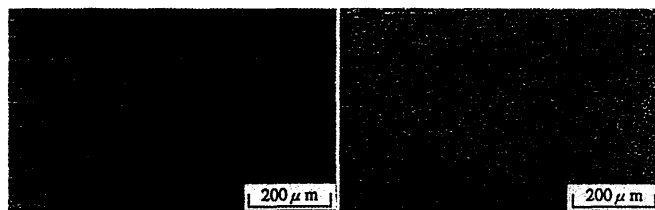
3.1.3 集合組織

予加熱処理による再結晶現象を把握するため、結晶方位分布状態 (集合組織) を解析できる X 線回折試験を行った。

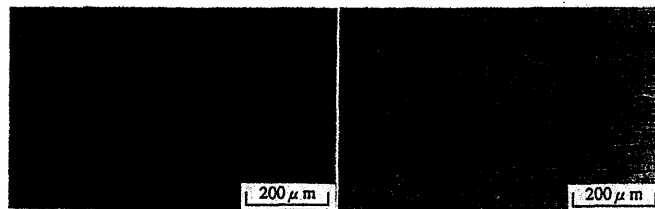
図5に X 線回折試験による {111} 面正極点図を示す。(a) は素材 (焼きなまし状態)、(b) は圧延後、(c) は 343°C、2h の予加熱を加えた新プロセス材 (溶体化後)、(d) は現用プロセス材 (溶体化後) をそれぞれ示している。また、縦軸に圧延方向



(a) 各圧下量における結晶粒アスペクト比



(1) 圧延材 (2) 現用プロセス材



(3) 343°C 加熱材 (4) 375°C 加熱材
(b) 現用プロセス材と新プロセス材の金属組織 (圧下量 70% 部分)

図6 予加熱処理による各圧下量における結晶粒アスペクト比 予加熱処理によって、現用プロセスにおいて溶体化時に起こる再結晶粒の微細化は制御される。
Comparison of grain aspect ratio of 7075 aluminum alloy between current manufacturing process and new manufacturing process

(RD), 横軸に板幅方向 (TD) を示す。

素材は結晶粒の配向に異方性は全くランダムな組織であった。次に圧延を加えると、{111} 面は圧延方向に対して約 45°傾いた方位に配向しており、いわゆる圧延集合組織⁽⁷⁾を示していた。その後 343°C、2h の予加熱処理を加えると、圧延集合組織は再配列され、ほぼ完全なランダムな組織に戻っていた。これに対し、現用プロセスに従って圧延後に溶体化処理を行った試料は、溶体化を施した後も圧延集合組織が残っていた。この結果から圧延後の予加熱によって結晶粒の再配列が起きていることが確認できた。

3.1.4 結晶粒アスペクト比

図6(a)に現用プロセス材、343°C予加熱材、375°C予加熱材の3種類の熱処理材 (溶体化後) の各圧下量での結晶粒アスペクト比分布を示す。また、各熱処理材における圧下量 70% 部分のミクロ組織を図6(b)に示す。まず、現用プロセス材では、圧下量が低い 0~30% 域では結晶粒アスペクト比は 10 以上と大きかったが、圧下量が 40% 以上の域では結晶粒アスペクト比は急激に小さくなる傾向を示した。圧下量が 50% 以上の高圧下域では、設計要求値である結晶粒アスペクト比 4 以上を満足しなかった。これに対し、343°C予加熱材の結晶粒アスペクト比分布は現用プロセス材と同様な傾向を示しているが、すべての圧下量にわたっ

表1 SCC試験条件
Conditions of SCC test

溶 液 条 件	NaCl 濃度	3.5±0.1 wt %
	pH	6.4~7.2
	温度	27℃±3℃
大 気 条 件	温度	27℃±1℃
	湿度	45±6 %
サ イ ク ル	大気中	50 min
	溶液中	10 min

て設計要求の結晶粒アスペクト比4以上を満足することができた。さらに375℃予加熱材では圧下量の低い0~30%域では他の2種類の供試材と同様の傾向を示したが、圧下量40%を境に再び結晶粒アスペクト比が大きくなる傾向が認められた。このことは、図6(b)からも分かる。以上のこのことから、再結晶による高圧下量域での結晶粒微細化の抑制に対して、予加熱処理が大いに効果があることが分かった。

3.2 新製造プロセス材の性能評価—SCC試験—

3.2.1 試験方法

試験片はST方向に応力を負荷することは形状的にできないため、次善の方法として試験片の長手方向と供試材の圧延方向が垂直になるようにした。試験方法はASTM G 39に準じた3点曲げ試験で、試験環境は表1に示すようにASTM G 44に準じた条件で1か月間行った。また、試験片のたわみの計算はASTM G 39に準じて行った。

ここで、結晶粒アスペクト比を変えたものの比較を行うために、予加熱処理を変えてあらかじめ結晶粒アスペクト比が、2, 3, 4, 5, 6, 8, 10のものを用意した。負荷応力は一つの結晶粒アスペクト比に対し4段階に設定し、結晶粒アスペクト比との組合せから合計28通りの条件で実施した。

3.2.2 試験結果

図7にSCC試験結果を示す。

●は光顕写真によりクラックの確認できた箇所を、○はクラックの確認できなかった箇所を示す。また、図中の曲線は本試験を基にしたSCCしきい応力曲線を示している。

この結果からも結晶粒アスペクト比が大きくなるほど、SCCしきい応力は高くなっていくことが分かる。結晶粒アスペクト比が3の試験片において30 ksi (21.1 kgf/mm²)以上の負荷応力でクラックが発生したが、結晶粒アスペクト比が4, 5, 6, 8, 10の試験片では、いずれの試料も35 ksi (24.5 kgf/mm²)の負荷応力までクラックは認められなかった。これより、結晶粒アスペクト比が4以上になる新プロセス材は、設計要求のSCCしきい応力35 ksi (24.5 kgf/mm²)を満足することを確認した。

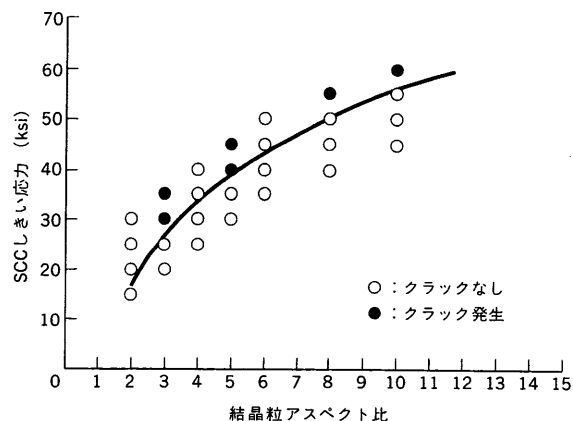


図7 SCC試験結果 新熱処理方法の耐SCC特性を確認した。
Result of SCC test

4. ま と め

7075-T 62材テーパロールストリングの耐SCC性向上を狙った組織制御の開発を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 示差熱分析の結果から343℃において再結晶が起こっていることをつきとめ、この結果からストリングの現用製造プロセスに対し圧延と溶体化の間に343℃、2hの予加熱処理を加えた新しい製造プロセスを開発した。
- (2) SCC試験から、新プロセスによるテーパロールストリングは設計要求のSCCしきい応力35 ksi (24.5 kgf/mm²)を満足した。これより、再結晶を調節することによる組織制御がストリングの耐SCC性向上に有効であることを確認した。
- (3) 本報で開発した新プロセスによるテーパロールストリングは、今年から777に採用されている。これによって、7150-T 77511材適用による耐SCC性向上対策では現用プロセスの4倍のコストが必要であることにに対し、本報による対策は従来どおりの低コストに抑えることができた。

参 考 文 献

- (1) 村上陽太郎ほか、アルミニウム合金の応力腐食割れ、軽金属 Vol.31, No.11 (1981) p.748
- (2) 軽金属学会編、高強度・高靱性アルミニウム合金の諸性質 (1985)
- (3) 大西忠一、応力腐食割れに及ぼす微量元素、軽金属学会研究部会報告書 No.9 (1983) p.69
- (4) Gerald Byrne J., 小原嗣朗訳、回復および再結晶、(1968)
- (5) 伊藤邦夫、アルミニウム合金の再結晶過程、軽金属 Vol.30 No.6 (1980) p.337
- (6) 伊藤邦夫、アルミニウム合金の再結晶、軽金属 Vol.31 No. 7 (1981) p.497
- (7) 日本金属学会編、金属学会セミナー“集合組織”、(1981)