航空機の腐食と防食

稲川 哲雄*

* 富士重工業株式会社航空宇宙技術本部

Corrosion Behavior and its Control of the Aircrafts

Tetsuo Inagawa*

* Aerospace Engineering Division, Fuji Heavy Industries, Ltd.

Corrosion problems of the parts of the large scale aircrafts have been become important in the maintenance of the materials performance. Several corrosion phenomena; pitting, stress corrosion cracking, grain intergranular corrosion and galvanic corrosion were discussed in relation with the special atmosphere, the effect of geometrical factor of the parts and the combination of the component materials. It is also shown how the materials are protected from corrosion attack whereas heavily coatings and the labour work in regular repair are seemed to cost much.

Key words: corrosion of the parts, aircraft, high strength, aluminum alloy, pitting, SCC, intergranular corrosion, galvanic corrosion, chemical conversion coating

1. はじめに

航空機の機体はこの半世紀、高力アルミニウム合金を主要構造材料として発達してきた。銀翼という言葉が表すように、近代航空機の材料と言えばこの高力アルミニウム合金が連想される。戦後、機体の大型化、高性能化に伴って機体各部に生ずる応力が大きくなり、また構造的にも外板の内側に桁・小骨・縦通材を合理的に配置したセミモノコック構造は、高力アルミニウム合金とよくマッチして構造重量軽減に効果を上げたのである。しかし、機体構造用高力アルミニウム合金として現在広く使用されている 2024 合金、7075 合金は、約半世紀にわたり主要構造材料であり続け、この間に何の問題もなかったと言うわけではない。航空機の使用環境の変化、材料の適用形状、材料相互の組合せ方等により、予想し難い腐食現象（孔食、粒界腐食、剝離腐食、応力腐食割れ、異種金属接触腐食、糸状腐食等）が発生している。これらの各種の腐食に対する補修には莫大な時間と費用がかけられている。そこで、航空機の機体構造部材に発生する代表的な腐食現象と製造時における腐食の防止策について紹介する。

2. 航空機部品の腐食対策

最近の航空機は、機体の大型化・高性能化に伴って機体各部に使用される構造材料にも金属材料だけでなく、樹脂系複合材料が適用されるようになった。特に、軍用機関係の機体では、複合材料 (CFRP) を構造材への適用が多くなりつつある。図 1 に代表的な大型航空機であるボーイング社の 747 型機に使用されている材料を示した。

2.1 腐食形態

航空機の機体材料に多用されている高力アルミニウム合金は、強度の向上を図るために Cu, Zn, Mg 等の金属元素を少量加えて時効硬化特性をもたせている。その結果、アルミニウム本来の耐食性の良さが減退し、腐食に対する感受性が高くなっている。そこで、腐食に対する欠点を補うために、耐食性の優れたアルミニウムとの合わせ板（図 2）、表面処理および塗装等で対処しているが、現実的には腐食発生の問題は解決できない状況にある。これまでに、高力アルミニウム合金で経験した主要な腐食形態の概要について以下に紹介する。

2.1.1 全面腐食

最も一般的な腐食であり、アルミニウム合金を大気暴露した場合、孔食の発生と同時に全面的な腐食も発生す

* 〒320 宇都宮市陽南 1-1-11 (1-1-11 Yonan, Utsunomiya-city, Tochigi, 320 Japan)

図1 ボーイング747機に使用されている材料

図2 2024 クラッド材 (合わせ板)

図4 全面腐食断面

図3 全面腐食外観

で早期対応が図れる (図3, 図4)。

2.1.2 孔食

アルミニウム合金及びマグネシウム合金に発生する最も一般的な腐食で、表面のある限定された部分のみ腐食が進行して孔状あるいは溝状の凹部を生じる。この腐食は、金属表面に白色または灰色の粉末状の析出物が付着していることによって発見される。特に、クラッド層を貫通した孔食に対しては、腐食の進行速度が早いので注意を要する (図5, 図6)。

2.1.3 粒界腐食

粒界腐食は、金属の結晶粒界に沿って発生する腐食である。アルミニウム合金は多数の結晶粒子から構成されて、それぞれの結晶粒子は明確な境界を持ち、その結晶粒子の中心部と境界部とは、成分的に異なっている。多くの場合、結晶粒子の境界物質は結晶粒子の母体に対して陽極性であり、このような場合に電解質と接触すれば、

る。これは大気中の腐食性物質によってアルミニウム表面の緻密な酸化皮膜の生成が遅くなったことによる。航空機においては、規定の防食処理をしっかりと施し、更に運航後の手入れを行うことによって防止できる。また、定期点検作業である程度腐食の進行状況が確認できるの

図5 孔食の外観

図6 孔食の断面

図7 鋼製ファスナーとの接触部における粒界腐食²⁾ (許諾をえて転載)

図8 粒界腐食断面 (2024 C)

結晶粒子境界に急激にかつ集中的な腐食が発生する。航空機の機体に外板を鋼製のファスナーで取り付けただけの場合に発生する粒界腐食現象を図7、図8に示した。

2.1.4 剥離腐食

剥離腐食は、粒界腐食の1つの形態であって、表面のすぐ下の結晶粒子境界に生じた腐食生成物の膨張力によ

図9 剥離腐食断面 (2024 C)

って金属の表面粒子を浮き上がらせることによって起こる。この浮き上がり又は膨張が粒界腐食の証拠であり、押し出し成形品にしばしば見受けられる (図9)。

2.1.5 応力腐食割れ

応力腐食割れは、引張応力と腐食の相乗作用によって起きる。応力は、内部応力である場合もあり、また外部からの負荷応力もある。アルミニウム合金の割れ感受性は、合金の種類および熱処理状態によって著しく異なり、更に、材料の種類や結晶粒の方向によっても異なる。マグネシウム合金は、湿気の多い空気中で応力腐食割れを起こすことがある。応力腐食割れは、腐食環境を取り除くために保護皮膜を作るか、腐食抑制剤を使用するか又は環境を管理する方法と次の様に機体材料への引張り応力の負荷を軽減することで防止できる。

- 応力腐食割れ感受性の低い材料を使用する。
- ショットピーニング等により表面に圧縮残留応力を付加する。
- 応力除去材を使用する。
- 組立作業時に発生する引張残留応力を防止する。

応力腐食割れ感受性の低い材料としては、表1に示したように 2024-T₃ あるいは 7075-T₇₃ 等が使用されているが、前者は靱性の低下、後者は強度が低下するといった欠点を有する。航空機の安全性の面で応力腐食割れの防止は非常に重要な項目である。

2.1.6 異種金属接触腐食

異種金属を接触させ、そこに湿気分等の電解質が存在すれば、異種金属間に電流が流れて腐食が起こる。これを異種金属接触腐食といい、機体を組み立てる作業時には、十分注意する必要がある。表2に於いて同一グループに入っている金属間では、異種金属接触を生ずる傾向はほとんどなく、接触させて使用しても比較的安全である。異なるグループに入っている金属同志を組み合わせると陽極性金属の方が腐食を加速されることになる。図10にグループIに属するマグネシウム合金をグループIIIに属する鋼製のファスナーで取り付けただけ時に発生する異種金属接触腐食現象を示した。また、表3にアルミニウム合金及び主要な金属の腐食電位を示したが、お互

表 1 高力アルミニウム合金の耐応力腐食割れ性の比較¹⁾ (許諾をえて転載)

合金及び熱処理状態	グレイン方向	厚板	自由鍛造品
2024-T3, T4	L	35	—
	LT	20	—
	ST	8	—
2024-T8	L	50	43
	LT	50	43
	ST	30	15
7075-T6	L	50	35
	LT	45	25
	ST	8	8
7075-T73	L	50	50
	LT	48	48
	ST	43	43
7075-T76	L	49	—
	LT	49	—
	ST	25	—

単位 (ksi) (1 ksi=0.7kg/mm²)

表 2 金属および合金類の分類

グループ I	マグネシウム, マグネシウム合金, 錫 アルミニウム合金 (5052, 5056, 5356, 6061, 6063)
グループ II	全てのアルミニウム, 亜鉛, カドミウム, 錫, 半田 (鉛・鉛)
グループ III	亜鉛, カドミウム, 銅, 鉛, 錫, ニッケル, ニッケル合金, 半田 (鉛・鉛), チタニウム
グループ IV	銅, 銅合金, ニッケル, ニッケル合金, クローム, ステンレス鋼, 金, 銀, チタニウム

1. 同一グループに分類された金属は, 相互に類似しているものとする。
2. 異なったグループに分類された金属は, 相互に類似していないものとする。
3. その他については, MIL-STD-889 を参照する。

表 3 アルミニウム合金および他金属の腐食電位²⁾ (許諾をえて転載)

金属または合金 ^{a)}	電 位 (V) (0.1 N カロメル電極基準) ^{b)}
マグネシウム	−1.73
亜 鉛	−1.10
7072, 3003 合わせ板, 7075 合わせ板	−0.96
7075-T3	−0.84
1100, 3003	−0.83
2014 合わせ板, 2024 合わせ板	−0.83
カドミウム	−0.82
7075-T6	−0.81〜−0.85 ^{c)}
2024-T81	−0.80
2014-T6	−0.78
2014-T4, 2017-T4, 2024-T13, -T4	−0.68〜−0.70 ^{c)}
ステンレス鋼 (300 シリーズ, 430)	−0.09
ニッケル	−0.07
クロム	−0.40〜+0.18

注 ^{a)} 調質のないものは, 調質によらない。
^{b)} 53 g/l NaCl+3 g/l H₂ O₂ 液中, 25°C で測定。
^{c)} 焼入速度による。

図10 鋼製ファスナーに接するマグネシウム合金の異種金属接触腐食²⁾（許諾をえて転載）

いの電位差を少なくすることによって、異種金属接触腐食を防止することができる。従って、鉄鋼のようなグループ III の金属にカドミウム又は亜鉛等のグループ II の金属をめっきすることにより、各種アルミニウム合金との異種金属接触腐食を減少することができる。異種金属接触がどうしても避けられない状態にある場合には、結合部の両方の部分を塗装・シーラント等により常に保護するようにする。

2.1.7 糸状腐食

有機質皮膜で被覆した金属は、皮膜の下に多数の繊維状の腐食生成物を生ずる型式の腐食が現れやすい。これは、皮膜を通じて酸素と水が拡散することによって起こる。水による拡散に大きな抵抗力を持つ皮膜を使用することによって、腐食の進展を著しく減少することができる。通常、ファスナーの頭などでペイント皮膜が破れて金属表面が直接外気にさらされた場合、そこが起点となり、腐食は金属表面を糸状に伸びて行く。

2.2 部品への防食処理

航空機部品に対する防食処理は、製造工程中における仮保護（防錆油等）と完成部品としての最終仕上げ処理に分類される。特に指示がない場合、各々の金属材料に適した表面処理を実施し、その後に規定された塗装を施して腐食を防止している。

2.2.1 アルミニウム部品の表面処理

一般に、すべてのアルミニウム合金部品（クラッド材を含む）は、特別の指示がない限り、MIL-C-5541 の規定に適合する皮膜を生成する化成皮膜処理か、MIL-A-8625 の規定に適合する皮膜を生成する陽極酸化処理のいずれかの表面処理が施される。但し、摩耗・エロージョン及び過酷な腐食条件を受ける部品に対しては、MIL-A-8625 のタイプ I（クロム酸アノダイズ処理）又はタイ

プ II（硫酸アノダイズ処理）のいずれかの規定に適合する陽極酸化処理を施さなければならない。また、作業中に損傷又は除去された化成皮膜、陽極酸化処理皮膜面に対しては、MIL-C-81706 のクラス 1A に適合する材料を使用して、刷毛塗り又はスポンジ等によって補修しなければならない。

2.2.2 マグネシウム部品の表面処理

マグネシウム合金は、実用金属中で最も軽い金属で比強度が大きい。航空機では特に軽量铸件として使用されている。しかし、マグネシウム合金は耐食性の点で劣るために、合金元素等により耐食性の向上を図っているが十分ではない。従って、すべてのマグネシウム合金部品は MIL-M-3171 の規定に適合する化成皮膜処理するか、MIL-M-45202 の規定に適合する陽極酸化処理をしなければならない。但し、摩耗やエロージョンを受ける部品に対しては、MIL-M-45202 による陽極酸化処理を施す。また、製造工程中において化成皮膜、陽極酸化処理皮膜が損傷又は除去されたすべての表面には、MIL-M-3171 のタイプ 1 又はタイプ VI のいずれかを使用し補修する。

2.2.3 鉄鋼部品の表面処理

鉄鋼部品（耐食鋼を除く）には、特に指定されない限り、腐食防止の目的でカドミウム、チタン-カドミウム、クロム及びニッケル等のめっきが施される。例えば、表 4 に示したようにカドミウムめっきは、めっき膜が厚いほど防食上有効であるが、寸法精度からクラス 1, 2, 3 を選択してめっきを実施し、その後、特に指定がない限り後処理としてクロメート仕上げを実施しなければならない。クロメート仕上げ（タイプ II）の主目的は、種々の腐食環境にさらされた場合、白色腐食生成物の生成を遅延又は阻止することと塗装下地処理である。リン酸塩仕上げ（タイプ III）の主目的は、塗装下地を作ることである。

3. 航空機の腐食対策

航空機は、一般に腐食防止・装飾等の目的から表面処理に加えてほとんど塗装が施される。塗装による腐食保護要求は、機体の内部と外部及びその航空機が使用される環境によって、次の 2 つのタイプに分類される。

タイプ I: 過酷な環境条件のもとでの使用に対する

表 4 カドミウムめっきの分類 (QQ-P-416)

クラス	膜 厚	タイプ	処理の内容
	最小 μm (インチ)		
1	12.7 (0.0005)	I	めっきのまま
2	7.6 (0.0003)	II	クロメート処理
3	5.1 (0.0002)	III	りん酸塩処理

表 5 有機保護仕上げ要求事項

項 目	材 料	保護仕上げ方式 ⁽¹⁾			
		タイプⅠ		タイプⅡ	
		外 面	内 面	外 面	内 面
1	すべての 1000・3000・5000・6000 シリーズのアルミニウム合金及びすべての 2000・7000 シリーズのアルミニウム合金製クラッド材。ただし、フロントの内面、艇体の底部の内面及び後縁操縦翼面の後縁の内部は、8 を適用する。	C	E	C	F
2	すべての 2000・7000 シリーズのアルミニウム合金製ベア材、その他の高力アルミニウム合金（鋳物合金を含む。）	B	D	C	E
3	犠牲金属皮膜（例えば、カドミウムめっき、亜鉛めっきなど。）	C	E	C	F
4	チタニウム、チタニウム合金及び 3 に該当しないめっき	H	H	H	H
5	耐食合金	C	E	C	F
6	マグネシウム合金（5.19 参照）	A	D	A	D
7	装甲板―鉄板	C	E	C	E
8	1～7 に該当しないすべての金属材料	B	D	C	E

仕上げ クラス	塗 装 回 数	
	下塗り（プライマ塗装） ⁽¹⁾⁽²⁾	上塗り ⁽²⁾
	TT-P-1757 MIL-P-23377 MIL-P-7962	
A	2	3
B	2	2
C	1	2
D	3	―
E	2	―
F	1	―
G	―	1
H	―	―

注 ⁽¹⁾ 耐食鋼配管と MIL-P-7962 の規定に適合するプライマを適用するすべての金属表面には、MIL-C-8514 の規定に適合するウォッシュプライマを施さなければならない。
⁽²⁾ ペイント型材料の塗膜厚さと塗装技術は、MIL-F-18264 又は MIL-C-22751 の規定に従わなければならない。

保護

タイプⅡ: 普通の劣化条件のもとでの使用に対する保護

表 5 に MIL-F-7179 に規定されているタイプⅠとタイプⅡの保護仕上げ要求事項を示したが、これは容認できる最小のものである。一般に、最大限の耐食性が要求される特別な場合を除き、不必要な質量の増加を防止するため、この最小要求事項を守るようにしなければならない。例えば、普通の環境条件（タイプⅡ）で 사용되는航空機の腐食対策は、外面に対して表面処理後下塗り（1 回）して上塗り（2 回）、内面に対しては使用材料によって下塗り（1 回又は 2 回）の回数異なる。

航空機に於ける腐食形態は、適用材料・使用環境及び結合方法等により発生原因も多種多様で、かつ複雑である。しかし、基本的に腐食現象は局部的に電流が流れて電気化学的プロセスを経て発生・進行する。従って、航

図11 燃料タンクの位置

空機の組立工程ではリベットあるいはボルトにより結合されるので、異種金属接触による腐食防止に細心の注意が払われている。例えば、ファスナーを使用する場合には、エポキシプライマー又はシーラント等を塗布して湿

表6 アルミニウム合金の防食処理例

該当部位	材 料	表面 処理	塗 装 シ ス テ ム
機体内部	裸 材	陽極酸化処理 (MIL-A-8625)	エポキシ系プライマー (MIL-P-23377)
	合せ板	化成皮膜処理 (MIL-C-5541)	
機体外部	裸 材	陽極酸化処理 (MIL-A-8625)	エポキシ系プライマー (MIL-P-23377) + ウレタン系エナメル (MIL-C-83286)
	合せ板	化成皮膜処理 (MIL-C-5541)	
燃料タンク内部	——	陽極酸化処理 (MIL-A-8625)	ウレタン系燃料タンクプライマー (MIL-C-27725)

った状態で取り付けられる。また、最近の航空機には複合材料が多用されているが、特にカーボン複合材とアルミニウム合金を接触させる場合には、カーボン複合材の表面にガラス複合材を一層張り合わせて更に塗装を施し、かつアルミニウム合金にも塗装を行って腐食防止を図っている。更に、合わせ面には合わせ面シール及び端末にフィレットシールをすることが必要である。また、防食処理が困難又は制限された部位に対しては、MIL-C-11796又はMIL-C-16173に適合する防錆油を塗布している。

航空機の燃料タンク内面に対しては、微生物による腐食及び燃料漏れを防止する必要がある。そのために、アルミニウム合金製タンクの内面は、MIL-A-8625又はMIL-C-5541の規定に適合する表面処理後にMIL-C-27725の規定に合致するポリウレタン系の塗料を使用してコーティングがされる。図11に大型航空機における燃料タンクの位置を示した。また、表6に通常アルミニウム合金に実施されている各部位の代表的な防食処理を示した。

4. あとがき

航空機の機体に発生する代表的な腐食形態について簡単に紹介したが、航空機の場合は、何よりも優先して安全運航に大きなインパクトを与える腐食（応力腐食割れ等）を防止するために、材料面での改善、更に表面処理・塗装及び組み立て等で技術・作業工程の両面から細心の注意を払っている。航空機の製造は、本稿の中でも随所に見られるように米国規格を基本として作業を実施している。従って、航空機に適用される材料規格、防食対策および定期点検等についても詳細に規定されている。

紙数の都合上、物足りないところもあろうかと思われるが、航空機における腐食と対策という面を理解する上で一助となれば幸いである。

(1990年8月25日受理)

文 献

- 1) アルミニウム技術便覧，軽金属協会。
- 2) 航空機およびミサイルの防食法，J.T.O. 1-1-2。

参 考 文 献

- 1) TT-P-1757 Primer Coatings, Zinc Chromate, Low-Moisture-Sensitivity
- 2) MIL-M-3171 Magnesium Alloy; Processes for Pretreatment and Prevention of Corrosion on
- 3) MIL-C-5541 Chemicals, Films, and Chemical Film Materials for Aluminum and Aluminum Alloys
- 4) MIL-F-7179 Finishes and Coatings, General Specification For Protection of Aircraft and Aircraft Parts
- 5) MIL-P-7962 Primer Coating, Cellulose-Nitrate Modified Alkyd Type, Corrosion-Inhibiting, Fast-Drying (for Spray Application over Pretreatment Coating)
- 6) MIL-C-8514 Coating Compound, Metal Pretreatment, Resin-Asid
- 7) MIL-A-8625 Anodic Coatings, For Aluminum and Aluminum Alloys
- 8) MIL-C-11796 Corrosion Preventive Compound, Petrolatum, Hot Application
- 9) MIL-C-16173 Corrosion Preventive Compound, Solvent Cutback, Cold-Application
- 10) MIL-F-18264 Finishes: Organic, Weapons System, Application and Control of
- 11) MIL-P-23377 Primer Coatings, Epoxy Polyamide, Chemical and Solvent Resistant
- 12) MIL-C-27725 Coatings, Corrosion Preventive, for Aircraft Integral Fuel Tanks
- 13) MIL-M-45202 Magnesium Alloys, Anodic Treatment of
- 14) MIL-C-81706 Chemical Conversion Materials For Coating Aluminum and Aluminum Alloys
- 15) MIL-C-83286 Coating, Urethane, Aliphatic, Isocyanate, for Aerospace Application
- 16) QQ-P-416 Plating, Cadmium(Electrodeposited)
- 17) MIL-STD-889 Dissimilar Metals