航空機疲労国際会議 (ICAF) の報告*

上 山 忠 夫**

1. はじめに

第 15 回航空機疲労国際会議 (International Committee on Aeronautical Fatigue 略称 ICAF) は 1977 年の 5 月 9 日から 13 日までの 5 日間、西ドイツのフランクフルト市の南方約 20 km の地点にあるダルムスタット市の中央の古城跡に建てられた Justus-Liebig-Hause で開催された。

最初の 2 日間は第 15 回 ICAF 会議で、ICAF 加盟の 11 か国のほか、今回も特別招待を受けた日本とイスラエルを加えた合計 13 か国の代表が 2 年前にスイスのローザンヌで開かれた会議後の各国の航空機疲労に関する研究の進展状況を報告し、これに対する質疑応答が行なわれた。

5 月 11 日～12 日は第 9 回 ICAF シンポジウムで複合材に関する記念講演に引続き運航荷重のもとでの構造の疲れ寿命を主テーマとしたシンポジウムが行なわれた。

最終日の 5 月 13 日には、あらかじめ用意された航空機の疲れに関する最近の問題点を取上げた質問を中心とした討論会が行なわれ会議が終了した。

この間 5 月 9 日の午後には西ドイツにおける航空

第 1 図 ICAF が行なわれた会場 Justus-Liebig-Haus
西ドイツ, Darmstadt 市

機、自動車および鉄道などの交通機関に関する研究の中心である Laboratorium für Betriebsfestigkeit (略称 LBF) の見学が行なわれ、5 月 11 日の夕方には有名なハイデルベルヒの古城の見学後盛大な晩餐会が開催された。

また会議終了後の 5 月 14 日にはローレライで有名なライン河を船で下る遊覧旅行も行なわれ、多くの古城が両岸に点在する昔ながらの風景を満喫するとともに、参加者相互の親交を深めるのにも役立った。

会議の参加者は総計 200 名をこえる盛会で、地元の西ドイツからは全体の 1/3 をこえる参加者があり、西ドイツの航空機とくに疲れに関する関心の深さがうかがわれた。

日本からは前回に引き続き出席した筆者のほか航空宇宙技術研究所の竹内和之機体第一部長、運輸省航空局の福島信正氏および民間輸送機開発協会の平原誠氏の合計 4 名が参加した。

以下 ICAF の会議およびシンポジウムの概要をのべるが、ICAF の申し合わせでは各国の展望の前刷は会議の 2 か月前にお互に送付することが原則となっていたが、出発前に入手できたものはきわめて少なく大部分は当日会場で配布され、なかには講演に間に合わなかったものもあった。またシンポジウムでは前刷は約半分しか配布されず、発表はすべて英語で行なわれたが、スライドを追うに忙しく、内容を十分理解し質問等をする余裕がなかったのは残念であった。したがって前刷を入手できたものについてはその概要をのべるが、その他のものについては、いずれ発行される予定の会議録およびシンポジウムの講演集を待つことにしたい。なお前回の会議録および講演集は ICAF Doc. No. 800¹⁾ および No. 801²⁾ として発行され複製は日本航空宇宙工業会から入手できる。

2. 第 15 回 ICAF 会議での各国の展望

ICAF の幹事であるスウェーデンの L. JARFALL 氏および今回の ICAF を主催した西ドイツの代表 O. BUXBAUM 氏のあいさつの後、各国の代表から最近の航空機の疲れに関する研究の現状の展望が行なわれた。

* 昭和 52 年 7 月 19 日、第 19 回構造強度に関する講演会にて報告、昭和 52 年 7 月 28 日原稿受理 Report on International Committee on Aeronautical Fatigue, 15th Conference and 9th Symposium with Colloquium

** 運輸省航空事故調査委員会委員 Tadao KAMIYAMA

過去2年間の研究では、とくにアメリカ、イギリスおよび西ドイツにおける研究は活発であり、その他の各国もお互に連絡を密にして研究を分担推進しており、地理的にやや孤立しているわが国としては、世界の現状、問題点ならびに将来の動向を知るには、もっとも良い機会が与えられたものと思われる。

2.1 アメリカの展望 NASA の H. F. HARDRATH 氏が ASTM, NASA, 軍の研究機関, 航空局および航空機製造会社などから出された資料をまとめたものを報告したが、航空機の疲れに関する研究はますます盛んでこの2年間に130件以上の文献が発表されている。ASTM では1975~1976年の間に疲れに関するつぎの特別出版物 STP が発行されている。

STP 569 Fatigue of Composite Material, 1975.

STP 588 Manual on Statistical Planning and Analysis of Fatigue Experiment, 1975.

STP 595 Fatigue Crack Growth under Spectrum Load, 1976.

STP 612 Thermal Fatigue, 1976.

STP 613 Computers in Fatigue Laboratory, 1976.

また1976年に行なわれた ASTM のシンポジウム、疲れき裂進展への繰返し応力-ひずみと塑性変形、フィラメント複合材の疲れおよび腐食疲れ等の STP も出版準備中であるとの報告があった。

NASA のラングレー研究所では最近新しい複合材を用いた構造の疲れと破壊の研究に重点がおかれているが、SST 用のチタン合金材の熱シミュレーション疲れ試験、3次元物体の応力場係数の計算法、き裂を有する延性材料の残留強さ、疲れき裂の進展、円孔板のき裂発生への応力比の影響、しまりばめボルトの疲れ寿命等の研究成果が報告された。

ついで NASA ルイス研究所での熱疲労およびクリープ疲れに関する研究および空軍飛行力学研究所、材料研究所等における疲れに関する研究、とくに損傷許容設計、新しい複合材料の疲れ特性、荷重および疲れき裂のモニタ法、飛行中のひずみ記録などについての研究報告が行なわれた。

連邦航空局 (FAA) においては輸送機の疲れ規定を改正する会議が1977年3月15日~17日開催され、新規設計機の耐空性証明には損傷許容の要求を推奨する新しい規定が取り入れられる。損傷許容設計はフェール・セーフ設計よりも広範で、検出できる損傷によって検査期間内に致命的な破壊が発生しないようにすることを要求し、これが適用できない場合のみ、セーフ・ライフの設計が許される。またフェール・セーフ荷重は制限荷重に等しくすると改正されたことなどが報告された。

つぎに各航空機製造会社の研究では、ボーイング社の Fatigue Damage Indicator (FDI) と呼ぶ、切欠付のひずみゲージのき裂の進展から、それをはった構造部材の荷重を測定する方法、ゼネラル・ダイナミックス社の多層接着のアルミ合金板のき裂進展の研究、ロックヒード社の高張力鋼へのショット・ピーニングの疲れ寿命への影響、マクドネル社の Contact Stress Model (ASTM STP 595) を用いた疲れき裂の進展遅れの計算法など興味ある研究の成果が発表された。

2.2 イギリスの展望 R. A. E の W. T. KIRKBY 氏が RAE および大学、会社等で行なわれた研究をまとめて報告した。

(1) 疲れ挙動の研究: ファスナの疲れ、疲れ寿命へのしまりばめの影響、荷重スペクトル、フレッティング疲れなど基礎的な疲れ挙動に関する研究成果が報告された。

(2) き裂進展と残留強さ: 応力場係数の求め方、 K の限界値、荷重停止の影響、疲れき裂のばらつき等の研究成果の報告があった。また

(3) 材料の処理と工作法の疲れ寿命への影響

(4) 熱の疲れ特性への影響

(5) 音響疲労

(6) 疲れ寿命、荷重と管理

(7) 設計用データ・シート

等について報告し、以上の研究に関連する54件の文献があげられた。

2.3 西ドイツの展望 LBF の O. BUXBAUM 氏が LBF, DFVR, 大学および航空機製造会社での研究をまとめて報告した。内容は

(1) 運航荷重の測定と解析

(2) 切欠付試料と継手の疲れ挙動

(3) 疲れ寿命の予測、繰返し応力ひずみ挙動と低サイクル疲れ

(4) き裂の進展、破壊力学と残留強さ

(5) 複合材料の疲れ特性

(6) 実機試験、大形部材の試験と運航中の疲れ破壊

等について研究成果を報告し、前回提案した輸送機および戦闘機の標準スペクトルによる試験結果の情報交換については、参加各国の協力によりデータを集めつつあり、近く報告しうることなどがのべられた。

2.4 日本の展望 わが国の展望では、筆者が前回の会議⁹⁾後 ICAF の活動に協力するため日本学術振興会の第129金属材料の強さと疲労の委員会の第6航空疲労の分科会を再編成し、活動を活発化し、日本における航空疲労に関係ある英文論文を集め、すでに19件を ICAF 各国に送付したことおよび国内の航空事

故中疲れが原因と思われる事故が1975年に4件、1976年に2件発生したことを報告した。これに引続き竹内氏が航空宇宙技術研究所、防衛庁第3研究所および各航空機製造会社で行なわれた研究の報告をした。

(1) 航空宇宙技術研究所

(i) 突風データの収集 最近のエア・バス等の大形機に搭載されているデジタル飛行記録装置 (DFDR) を利用して、わが国上空における突風のデータを収集解析した結果を報告した。

(ii) 疲れ荷重と試験方法 小形電子計算機を用いてランダム荷重を発生させる装置を作成し、ICAF で提案されている輸送機の標準荷重との比較検討および今後の実験計画についての報告。

(iii) 疲れ寿命のばらつきと $S-N$ 曲線の関係 理論的応力集中係数 2.54 および 8.25 の切欠付試料の恒温、恒湿状態での試験結果から寿命のばらつきと $S-N$ 曲線との関係についてのべた。

(iv) ワイブル分布のパラメータの推定 わが国で行なった輸送機の構造部材の疲れ試験結果を解析し、3パラメータのワイブル分布を当てはめ、位置のパラメータを推定した結果についてのべた。

(v) その他 カーボン繊維の CFRP の曲げ疲れ試験結果および金属接着構造の音響疲労試験について報告した。

(2) 防衛庁第3研究所

(i) C-1 輸送機的全機疲れ試験 C-1 輸送機的全機疲れ試験の報告をもとにし、主脚取付部の金具の疲れ損傷とその改善対策についてのべた。

(ii) PS-1 飛行艇 PS-1 飛行艇の全機疲れ試験の方法と水陸両用への改造機の着陸装置の疲れ試験についてのべた。

(3) 富士重工業株式会社 富士重工業とアメリカのロックウェル社とが共同して開発した、双発小型機的全機疲れ試験の現状を報告した。

(4) 三菱重工業株式会社 三菱重工業において行なわれた疲れ寿命の推定法の改良、鍛造材の欠陥の評価、電子顕微鏡による破面観察、構造部材の疲れ強さ、き裂の進展、メッキの影響、溶接部の疲れ強さ等の研究について報告した。

(5) 川崎重工業株式会社 GFRP の疲れ強さおよび与圧室構造に対する予荷重の影響についての研究成果などについて報告した。

2.5 その他の各国の展望

(1) オーストラリア G.S. JOST 氏が軍用機および民間機の疲れ事故の調査結果、材料および構造部材の疲れ特性、疲れ寿命のモニタ、評価および荷重データの収集などの報告を行なった。

(2) ベルギー A. MAENHAUT 氏が運航中発生したボーイング 707 の前脚および主脚の疲れ破壊の事故調査ならびに大学等における基礎的な疲れ研究について報告した。

(3) カナダ A. V. RUGIENIUS 氏が DHC-7 STOL 機の開発における構造上の問題、荷重測定およびジェット練習機 CL-41 の全機疲れ試験結果などの報告を行なった。

(4) イタリア L. LOCATI 氏が補強材付きのパネルのき裂進展、音響疲労、各種材料の疲れ特性等についての研究の報告をした。

(5) スウェーデン L. JARFALL 氏がボルトおよび継手金具の疲れ特性、冷間加工、表面処理の疲れ寿命への影響等に関し報告した。

(6) スイス H. RHOMBERG 氏が、疲れき裂の検出器の開発、Mirage III 形戦闘機の標準荷重スペクトルによる試験結果などについて報告した。

(7) イスラエル A. BERKOVITS 氏が、ランダム荷重試験、しまりばめボルトの疲れ寿命、破面観察、荷重測定などについての研究成果ならびに Westword 1124 機的全機疲れ試験結果についての報告を行った。

3. 第9回 ICAF シンポジウム

5月11日～12日の2日間にわたり第9回の ICAF シンポジウムが開催された。まず ICAF の創設者オランダの故 PLANTEMA 博士を記念する講演が行なわれた。

3.1 特別講演 新しい複合材料構造とその将来

H. F. HARDRATH, アメリカ

アメリカにおける複合材料を用いた航空機構造の研究の現状についてのべたもので、NASA では第1表の各機種について主として二次構造に複合材構造を試作採用し、飛行実験および地上環境試験を実施中で、現在 10^6 時間の飛行実績を得ているが、1981年までに 2×10^6 時間の試験を完了する計画を進行中である。

これら複合材の使用により、従来の金属製の場合に比べて 20～35% の重量軽減がはかられており、現在は二次構造に部分的に使用しているだけなので航空機全体としての重量軽減は 1～2% にすぎないが、一次

第1表 NASA の複合材構造試験計画

機種	試作構造部分	使用複合材料
CH-54B	テール・コーン	ボロン・エポキシ
L-1011	ファリング・パネル	ケルバ
B-737	スポイラ	グラファイト・エポキシ
C-130	中央翼箱げた	ボロン・エポキシ
DC-10	後方パイロン外板	ボロン・アルミ合金
DC-10	方向舵上後方部	グラファイト・エポキシ

の主要構造にまで用いられると、全体として 20% 以上の重量軽減が期待されるとのべている。

なお地上環境試験は B-737 のスポイラと DC-10 の方向舵を用い、世界的に 7 個所の地点を選び実施中で、含有湿度の経年変化が調査されつつある。また複合材の疲れでは繊維の方向が破壊モードおよび疲れ特性に大きな影響があり、電子顕微鏡等を利用して繊維マトリックスの破壊状況を局部的に詳しく調べる研究が進められつつあることなどが報告された。

特別講演に引き続き、今回のシンポジュームの主テーマである“運航荷重のもとでの構造の疲れ寿命”について、つぎの 4 セッションに分けて合計 18 論文が発表された。

3.2 運航荷重、測定と評価方法

(i) AIDS 記録装置のデータを用いた運用荷重の測定

J. B. JONGE and D. J. SPIEKHOUT オランダ
オランダ航空研究所 NLR で行なわれた、KLM, SAS, SWISS-AIR などの B-747 にとう載されたデジタル飛行記録装置 (AIDS) のデータを収集したものを解析した報告。

(ii) 戦闘機の荷重スペクトルの調査

C. K. RIDER, B. E. ANDERSON & J. G. SPARROW
オーストラリヤ

(iii) 個々の航空機をモニタすることの価値と困難

A. J. EMMERSON, オーストラリヤ

3.3 実験および理論による疲れ寿命の予測

(i) 電算機を利用した代表的構造部材の累積損傷疲れ寿命の推定

D. HANSCHMAN & H. NOWACK, 西ドイツ

(ii) 航空機構造の上面板の疲れ強さ

D. SCHÜTZ & H. LOWOCK, 西ドイツ

統計によると航空機主翼の疲れ破壊は下面板が 53%, けたのウェブ, フラップおよび前縁等が 18% で、上面板から破壊するものが 29% もある。これは残留応力とファスナから生ずるき裂によるもので、マイナの法則は上面板には不安全側になり使用できないことなどをのべている。

(iii) 荷重スペクトルから低荷重または高荷重の除去と荷重停止の疲れ寿命への影響

F. E. KINDLE & J. DARTS, イギリス

ボルト継手の疲れ試験では低荷重の耐久限近くまで除いても影響は少ないが、最大荷重を除くと寿命がかなり減少すること、リベット継手、切欠付試料および薄板試料に対する荷重の除去と定常荷重の停止の影響の報告。

(iv) 複雑な構造部材の疲れき裂発生寿命の推定法

B. N. LEIS, アメリカ

(v) ランダム荷重のもとでの材料の応答

E. GASSNER, 西ドイツ

材料の疲れ特性に及ぼす荷重の影響、ランダム荷重に対する材料の応答、平均応力、き裂進展、応力集中の影響などについてのべている。

3.4 航空機の疲れ解析

(i) P-3 オリオン機の疲れ寿命の評価

W. A. STAUFFER, J. C. EKVALL, J. E. RHODES
& M. KOVNAT, アメリカ

(ii) ブロック荷重と飛行ごとの荷重との実物大構造の疲れ寿命への影響

N. A. J. HARRY, イギリス

(iii) 運航のパラメトリック・データからの戦闘機疲れ寿命の推定

P. B. HOVELL and J. R. STURGEON, イギリス
航空機の重心付近だけでなく、機体の適当な個所に数個の加速度計を配置し、得られたパラメトリックなデータから、各構造部材の疲れ寿命を推定する方法。

(iv) アメリカ空軍機の損傷許容と耐久性評価法の展望

C. F. TIFFANY, アメリカ

アメリカでは新機種の開発に損傷許容および耐久性評価の新しい方法を用いているが、その内容および従来機をこれにより再評価した結果についての報告。

(v) 損傷許容設計法による安全性

M. STONE, アメリカ

DC-10 の開発に用いた損傷許容設計の方針およびその詳細についてのべ、安全と経済性を見地からの検査期間の定め方についてのべている。

(vi) フレッシング疲れの破壊力学的予測

P. R. EDWARDS, R. J. RYMAN & R. COOK,
イギリス

アルミ合金材に鋼製のパッドを用いて実験した結果から実験と良く合うフレッシング疲れの予測方法を導いた結果を報告した。

3.5 き裂進展の予測

(i) 疲れき裂の進展遅れ、事実となぞ

R. J. STEPHENS, アメリカ

過大引張り応力後に圧縮応力が繰返し加かると、疲れ進展遅れに大きな影響があるので、圧縮応力はその値が小さくても無視できないことを報告した。

(ii) 代表的な戦闘機荷重スペクトルの変化によるき裂の進展挙動

J. M. POTTER, アメリカ

(iii) 航空機疲れ進展解析への“closure”概念の適用

P. B. BELL & H. L. EIDINOFF, アメリカ

- (iv) いくつかの荷重スペクトルによる飛行ごとの荷重によるき裂進展試験といろいろなモデルによる計算方法との比較

K. O. SIPPEL & D. WEISGERBER, 西ドイツ

アルミ合金, チタン合金および鋼材の試料を用いて, FORMAN のき裂進展の式を用い, WHEELER, WILLENBORGおよびHABILIEのき裂進展遅れのモデルを用いた計算と実験結果とを比較した結果, WHEELER および HABILIE のモデルは実験と良く合ったが, WILLENBORG のモデルは不安全側の結果が得られたことが報告された。

4. 討 論 会

5月13日には, あらかじめ主催者側で用意し, 事前に配布された最近の航空機疲労に関する問題に対し提出された意見をもとにした討論会が開催された。討論会は半日の予定で, つぎの13の質問が出されていたが, アメリカのHARDRATH氏が座長となり, 質問を適当にグループ分けし, 提出された意見とこれに対する活発な討論が行われたのちICAFの全日程を終了した。

なお用意された質問はつぎのとおりであった。

- (1) 複合材料は主要構造にどの範囲まで用いられるか, またその時期は何時ごろになるか。
- (2) 複合材料を使用するに当たり, もっとも緊急に解決しなければならない問題は何か。
- (3) 複合材料で疲れで問題となる荷重と, これに対して詳細設計はどうするか。
- (4) 複合材料に適した結合方法とその研究の方向はどうか。
- (5) 損傷許容の予測に当たり破壊じん性, き裂進展データ等のばらつきはどう考慮するか。
- (6) MIL-83444の損傷許容構造では, き裂発生寿命を支配する有効な尺度として何を用いるか。
- (7) 構造材料および部材の疲れき裂進展および疲れ破壊特性の向上のためどんな研究を行ったか。
- (8) ファスナ孔の小さなき裂の検出方法とその信頼度は。
- (9) 過大リーマにより疲れ寿命はどの程度向上しうるか。
- (10) NEUBERのcontrol試験とcompanion試料の試験とについての意見は。
- (11) 疲れ設計で損傷許容とフェール・セーフの考え方との関係はどうか。
- (12) 局所の応力ひずみ解析法はどこに用いれば良いか。

- (13) 荷重伝達とバイパス荷重はボルト結合の寿命にどう影響するか, JAFALLの1967年の考えは今でも使えるか。

5. む す び

コメット機の事故以来航空機の疲れは構造上の重要な問題として注目され今日に至ったが, そのごの疲れあるいは材料の欠陥による航空事故の発生と, ICAFはじめ各国における疲れ研究の進歩につれ, 従来の疲れ設計方法の再検討が要望される気運にある。すなわち従来の公称応力をもとにし, $S-N$ 曲線とMINERの簡単な仮説を用いる設計方法に代わり, 応力集中部の局所の応力ひずみ関係に着目したき裂の発生, 破壊力学の理論を取り入れ応力場係数を用いるき裂の進展の計算および非破壊試験法の精度向上に伴い, 新しい損傷許容設計が取り入れられる傾向にある。

このため荷重スペクトルの標準化, 解析モデルと電子計算機のプログラムの開発, これに必要な材料の破壊じん性値およびき裂進展率などの統計的な資料が集められつつある。

以上の現状⁹⁾のもとで今回のICAFにおける各国の展望およびシンポジウムならびに討論会では, この方面の研究に対してきわめて有益な情報が得られたものと思われる。

わが国においては機械, 材料関係の諸学会で疲れに関する非常に多くの研究成果が発表されており, 中には諸外国の文献に引用されたすぐれた論文もかなりあるが, 国際的な協力をさらに進めるためには, できるだけ外国で読まれるよう外国語で発表することが望まれる。

なお次回のICAFの会議ならびにシンポジウムは1979年の春, ベルギーのブラッセルで開催されることが予定されているが, わが国からもすぐれた論文をシンポジウムに提出するとともに, 次回には航空機製造会社ならびに運航会社の技術者を含めて, さらに多くの方々が, この会議に出席されることを望む次第である。

参 考 文 献

- 1) ICAF Doc. No. 800 Minutes of the 14th Conference of the International Committee on Aeronautical Fatigue.
- 2) ICAF Doc. No. 801 Problems with Fatigue in Aircraft, Proceedings of the 8th ICAF Symposium.
- 3) 上山忠夫: 航空機疲労国際会議に出席して, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 23, No. 261, pp. 30~35, 1975, 10月号。
- 4) 上山忠夫: 航空機構造の疲れ設計の現状, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 25, No. 276, pp. 1~9, 1977, 1月号。