

NAL TR-1461

ISSN 1347-4588  
UDC 620.165.7  
629.7.02

独立行政法人

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1461

YS-11型機胴体構造の落下衝撃試験（その1）

峯岸正勝・岩崎和夫・熊倉郁夫・少路宏和  
吉本周生・寺田博之・指熊裕史・磯江暁  
山岡俊洋・片山範明・林徹・赤楚哲也

2003年6月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

# YS-11 型機胴体構造の落下衝撃試験（その 1）<sup>\*1</sup>

峯岸 正勝<sup>\*2</sup>・岩崎 和夫<sup>\*2</sup>・熊倉 郁夫<sup>\*2</sup>・少路 宏和<sup>\*2</sup>・  
吉本 周生<sup>\*2</sup>・寺田 博之<sup>\*3</sup>・指熊 裕史<sup>\*4</sup>・磯江 暁<sup>\*4</sup>・  
山岡 俊洋<sup>\*4</sup>・片山 範明<sup>\*4</sup>・林 徹<sup>\*4</sup>・赤楚 哲也<sup>\*4</sup>

## Vertical drop test of a YS-11 fuselage section

Masakatsu MINEGISHI<sup>\*2</sup>, Kazuo IWASAKI<sup>\*2</sup>, Ikuo KUMAKURA<sup>\*2</sup>, Hirokazu SHOJI<sup>\*2</sup>,  
Norio YOSHIMOTO<sup>\*2</sup>, Hiroyuki TERADA<sup>\*3</sup>, Hirofumi SASHIKUMA<sup>\*4</sup>, Akira ISOE<sup>\*4</sup>,  
Toshihiro YAMAOKA<sup>\*4</sup>, Noriaki KATAYAMA<sup>\*4</sup>, Toru HAYASHI<sup>\*4</sup>, Tetsuya AKASO<sup>\*4</sup>

### ABSTRACT

The Structures and Materials Research Center of the National Aerospace Laboratory of Japan (NAL) and Kawasaki Heavy Industries, Ltd. (KHI) conducted a vertical drop test of a fuselage section cut from a NAMC YS-11 transport airplane at the NAL vertical drop test facility in December 2001.

The main objectives of this testing program were to obtain background data for aircraft cabin safety via a drop test of a full-scale fuselage section, and develop a computational method for crash simulation. The test object including seats and anthropomorphic test dummies was dropped onto a rigid impact surface at a velocity of 6.1 m/s (20 ft/s). Comparing the pelvic loads of the test dummies and limitations of the load defined in the Federal Airworthiness Regulations for emergency landings, we found the drop test conditions (impact velocity) of the test object to be severe, but survivable for passengers. A finite element model of this test object was also developed using the explicit nonlinear transient-dynamic analysis code, LS-DYNA 3 D. An outline of the analytical method and comparative analysis using drop test data are presented in this paper.

**Keywords:** crashworthiness, vertical drop test, fuselage section, YS-11, crash simulation

### 1. 概 要

航空機は、その設計技術や運航安全技術の進歩に伴い航空輸送の安全性が著しく改善され、今日では極めて安全な交通手段となっている。しかしながら、世界の商用輸送機の平均事故発生率（出発回数に対する機体全損事故件数）は 1970 年代後半以降殆ど改善の傾向が見られない。航空輸送量は年々増加の一途を辿っており、事故率

のこのような傾向が続くとすれば、将来事故発生件数の絶対数が増加することが懸念される。事故発生率の改善には人的要因が重要であることから従来に比べ格段の努力が必要とされ、米国を始め世界的に事故発生率の低減に向け新たな目標の下に取り組みが行われている。

一方、事故時の搭乗者の安全確保対策も重要な課題と位置付けられている。クラッシュ（衝突等により機体構造が破壊する）時の客室安全性に係わる課題の一つは、

---

\* 平成 15 年 1 月 7 日受付 (received 7 January, 2003)  
\* 2 構造材料研究センター (Structures and Materials Research Center)  
\* 3 業務部 (Operations and External Relations Division)  
\* 4 川崎重工業株式会社 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

衝撃荷重に起因する搭乗者の被害の低減である。過去、衝撃吸収型シート（座席）構造の開発を中心に改善が進められ、1988年にシート構造の強度基準強化が実施されたが、クラッシュ時の搭乗者及び搭載物に及ぼす衝撃荷重の緩和に関する構造設計基準は殆どない。現在でも、客室内の衝撃環境の実態把握のために、米国の航空宇宙局（NASA）や連邦航空局（FAA）では実機機体を用いた衝撃実験を実施して客室の衝撃データの蓄積を行っている。また、衝撃解析手法の研究も計算機の進歩に対応して進められている。最近では、欧州連合（EU）の研究機関でも衝撃特性に関する研究が本格化している。事故の社会的影響の大きさ、技術基準への適合性証明方法の困難さ、新素材導入による軽量化設計等を考慮すると、機体構造の衝撃試験による安全性評価や解析的手法の確立は、客室安全性向上に必要な対策と新たな機体設計手法開発に向けて極めて重要な課題と位置付けられる。

本落下衝撃試験の目的としては、事故時の耐衝撃安全性向上を機体構造の側面から検討するため、

- ①実機の機体構造の落下衝撃データの蓄積と衝撃環境の評価技術の確立。
  - ②有限要素法による構造衝撃解析モデルの開発と衝撃吸収に効果的な構造開発への活用。
  - ③実機構造の落下衝撃試験手法の開発。
- 等である。

落下試験にあたっては、米国のFAAテクニカルセンターや国内航空機関連機関と連携し、確認や落下試験目的の試験条件の設定を行った。本報告は、主に目的の①について詳述する。

落下衝撃試験は、当所の航空安全・環境適合性技術研究（ASET）の一環としての航空機耐衝撃性の研究に関連して、川崎重工業株式会社との共同研究として構造材料研究センターで2001年12月20日に実施したものである。試験は、国産輸送機YS-11型機の後部胴体区間3360mmの部分構造に2人掛けシート4脚と乗客ダミー8体及び2掛けシート及び乗客ダミー2体分に相当するダミーウエイト2個を搭載した全装備重量約1510kgの供試体を高さ約1.9mに懸吊し、切り離し、衝撃速度（接地速度）約6.1m/s（20ft/s）でコンクリート面に水平姿勢で垂直自由落下させた。本落下衝撃試験は、固定翼機としては国内初の試験であり、試験法についても基準がないため米国のNASAやFAAが従前から多くの実物機体の衝撃試験を実施している方法等を参考として独自の試験条件を設定した。本落下衝撃試験では、客室容積の減少状況やシートとその取付部構造または装備品の破壊等に伴う搭乗者の非常脱出への障害発生の有無の確認等も行った。

試験においては、加速度77点、人体ダミー腰椎部荷重3点及びひずみ30点の合計110点を計測点とし、3系統の

デジタル記録計でデータ収録を行った。また、データ記録開始のトリガ動作の確実性を高めるためトリガ信号源は多重系とした。供試体の変形過程の確認や衝撃接地速度及び最大変形の計測には、解像度512×384画素、最高記録速度2000Frame/sのRedlake MASD CO.製CR Imager 2000型等3台を用いた。試験の結果は4項で詳細に述べるが、人体ダミーのCFC 1000処理による最大上下方向加速度は約21G、腰椎の最大圧縮荷重は5.7kN以下であった。この値はFAR Part 25の現行25.562基準で規定する骨盤部での荷重限度6.7kN（1500Lbs）を下回っており、今回の試験条件では、搭乗者に致命的な損傷は生じなかったであろうと判断できる。最大ひずみ量は、FSTA+2760左ストラット下部のフレーム内側で11000 $\mu\epsilon$ となり、この部分では崩壊が確認されたが、シート脚柱及び前・後方チューブでは最大3000 $\mu\epsilon$ 以下であり、曲げ変形が認められなかった。また、ひずみ速度は、FSTA+2780のフロアビーム中央の下面で、4.20/sであったが主応答波では0.02/s以下であった。高速度カメラでは、4.2項及び4.3項に示す衝撃接地速度及び最大変形について高精度な解析を行うことができた。

また、共同研究で進めている衝撃解析手法は研究初年度で解析モデル構築に着手した。本報告では、解析モデルの概要と初期の構造モデルによる衝撃応答と試験結果との比較例の紹介に留めた。今後本試験データをもとに人体モデルとの結合等についても詳細な開発を進めていく計画である。

## 2. 研究背景

### 2.1 耐衝撃性に関する研究開発の推移

航空機クラッシュ時の耐衝撃性対策の検討は1942年頃に米国コーネル大学のH.De Havenが衝撃傷害研究計画（Crash Injury Research Project）において、過去のクラッシュ事故の実態調査に基づき小型固定翼機の耐衝撃性設計に関して提言したのが最初とされる。その設計概念に基づいて設計された小型農業機のクラッシュ時の死亡事故率は従来型機の1/5に激減したという<sup>1)</sup>。当時既に、彼らは航空機の事故調査や人体の耐衝撃データに基づき現在に通じる10項目以上の改善提案を行っている。

その後、主に米国のNACA（NASAの前身）や米軍が1950年代から実機を用いた衝撃試験を種々の機種及び衝撃条件について実施し、衝撃データを蓄積すると共に人体の耐衝撃性に関する検討も進めた。1950年代にNACAはクラッシュ衝撃に対する生存性（crash-impact survival）の観点で、実物機体（固定翼機）のクラッシュテストによって、平坦地への接地角度や接地速度と破壊状況の関連を調べている。これらの実験は機体を地上走行させ5°

～50°の傾斜角を持たせた土手へ衝突させる方法により頭下げ状態の落下事故を模擬したものである<sup>2)</sup>。更に、米国のFAAは、より大型の輸送機で同様の実機クラッシュテストを実施している<sup>3)</sup>。

当時は衝撃解析手法が限られ機体の耐衝撃性の一般的な予測等は困難であったが、1970年代からは計算機の発達や有限要素法に基づく非線形解析ソフトの開発が進められ、航空機の耐衝撃性の研究に解析手段の適用が試みられ始めた。特にNASAとFAAの共同研究として1984年に米国エドワード空軍基地で実施されたBoeing 720型機の滑走路への遠隔操縦クラッシュ試験（Controlled Impact Demonstration, 略称CID）は、実機のクラッシュ事故を模擬した実験として知られる。新しい衝撃吸収型シート、機体構造の簡易解析ソフトKRASHの適用、燃料タンク破壊時の難飛沫性燃料（anti-misting kerosene, 略称AMK）の効果、等の検証を行った<sup>4)</sup>。これらの成果をもとにシート等の安全基準が改訂された。更に、自動車の衝突安全性に関して進められた非線形衝撃解析手法の適用及び自動車搭乗者の衝突安全基準や人体ダミーの耐空性証明への準用も進められた。なお、航空機の耐空性技術基準においてクラッシュ事故の衝撃環境と乗客の生存率に関わる規定は、非常着陸時のシートとその取付部構造及び装備品の強度に関するものがある。その他非常脱出、燃料系統の着火防止、客室装備の耐火性等の関連規定がある。

## 2.2 最近の試験研究の状況

実機の全機または部分構造による衝撃試験や衝撃解析は、これまで主に米国やEUを中心に実績が多い<sup>5)</sup>。FAAでは既にBoeing 737型機<sup>6)</sup>、コピューター機（Beechcraft 1900 C<sup>7)</sup>、Shorts 330<sup>8)</sup>、Metro III<sup>9)</sup>、その他）等、幾つかの機体全体または胴体部分構造について落下衝撃試験を実施しており逐次報告書が発行されている。

NASAにおいては、NASAの重点研究課題の一つである航空安全分野に関係して搭乗者生存性計画（Human Survivability Project）において、耐衝撃安全性（Crashworthiness）、非常脱出、搭乗者保護（火災、有害ガス対策）等の順に優先順位を付して多額の資金投資を提案している。Crashworthinessについては、有効なクラッシュ解析手法の確立、新構造様式及び新材料の開発、キャビン内装備品（シートを含む）の安全設計、人体の耐衝撃安全基準を検討対象としている。

日本においては衝撃吸収型シート構造の開発の他、ヘリコプタ構造の落下衝撃試験と解析の例があるが、固定翼輸送機については実機構造の落下衝撃試験と衝撃解析の例はない。

実機による衝撃試験には大別して以下の目的がある。

1) 航空機の非常着陸時の耐衝撃性に関する基準の提案や

改訂の根拠となるデータの取得。例えば、米国FAAは主にこの目的の試験を多く実施しており、米国連邦航空規則（Federal Aviation Regulation, 略称FAR）で制定される航空機の耐衝撃性に関わる強度基準の改訂案や耐空性の証明方法の指針に反映される。

- 2) 開発機体の耐衝撃性基準に対応する証明。特に、耐衝撃性の規定が比較的整っている回転翼機の開発では全機形態の落下衝撃試験が実施されることがある。大型固定翼機で重要なものにシート構造の静的及び動的強度基準があるが、耐衝撃性に関して全機衝撃試験が要求される要件は未だ無い。
- 3) クラッシュ時の機体の衝撃挙動を予測する衝撃解析手段を開発するための検証用データの取得。特に、小型の模型レベルでは、模擬や予知が困難な実機レベルの衝撃データ取得並び変形過程と破壊モードの把握が中心となる。

航空機の構造衝撃解析技術に関しては、1970年代後半より米国のNASA, FAA及び航空機メーカーを中心に独自の手法が開発され（KRASH, DYCAST, SOM-LA等）、また、計算機の性能向上により、最近では自動車等で使われている汎用の非線形有限要素法構造解析ソフト（LS-DYNA 3D, PAM-CRASH, MSC-DYTRAN, RADIOSS, ABAQUS, 等）を適用する例が増えてきた。例えばNASAとFAAの共同研究ではBoeing 737型機の衝撃解析にMSC-DYTRANを適用している<sup>10)</sup>。EU関係では英国のCranfield Impact Center Ltd.を中心に解析モデルの開発やエアバスA320の胴体構造等によるコンポーネントの衝撃試験が実施されているが、いずれも航空機の衝撃解析法の選択や適切なモデル化は自動車に比べてまだ開発段階にある<sup>11)</sup>。

客室の床下部構造について、通常はクラッシュ時の衝撃吸収を設計条件とした設計はなされていない。現在の機体構造はクラッシュ時にある程度の耐衝撃性は有すると考えられるが、今後機体の大型化や客室構造の多層化等の世界的動向を考慮すると従来以上に効果的な耐衝撃性構造を検討すべきである。

## 3. 落下衝撃試験

### 3.1 試験設備

胴体構造懸吊用タワーとしては、当研究所構造材料研究センターC1号館実機強度実験場に設置されたロケット振動試験用縦型試験台を利用した。試験台は外形6.7 m × 5.5 m × 13.25 mの鉄骨構造で、内部にエレベータ式移動作業台を設備しており、屋上階に懸吊荷重29.4 kNの手動式ウインチ2基を設備している。衝撃負荷面はコンクリ



ート床面上に敷いた厚さ 150 mm のコンクリート製プラットフォームである。図 1 に胴体構造懸吊用タワーの外観を示す。分離装置はヘリコプタの荷物運搬と空中投下等に

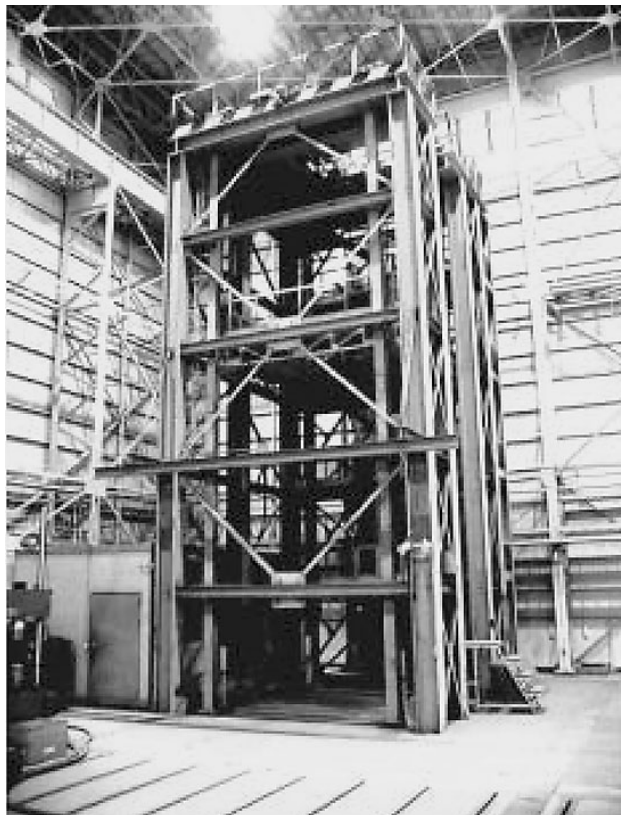


図 1 胴体構造懸吊用タワーの外観

使用されている EASTERN ROTORCRAFT CO. 製 A-45 LT 型カーゴフック（最大運用重量：2040 kg（4500 Lbs））を懸吊装置に組み込んだものである。図 2 に分離装置の外観を示す。分離装置は、落下試験で想定する胴体構造懸垂重量の約 2 倍に相当する荷重（29.4 kN）を試験前に引張試験機で負荷し保持能力を確認した。また、供試体重量と同等の 1500 kg と 240 kg 及び 15 kg の小重量のダミーウェイトを個別に懸吊して手動による分離試験を実施し、動作と操作上の安全性を確保した。高速度カメラを用いて分離時に供試体に加わる回転や水平姿勢の変動を目視検査したが、供試体に与える影響は無視できる程度であることがわかった。試験準備中及び分離操作直前までの懸吊作業中は、分離装置保持機構の万一の故障に対する安全対策として分離装置上部と供試体間に強固なワイヤロープを最短にして取り付けした。

### 3.2 供試体

図 3-A, B に YS-11 型機の外観及び三面図を示す。試験に用いた胴体構造は、図 4 に示す比較的一様な構造位置より乗客シート 3 列分を確保する 2 体を切り出した。前方部分は主翼前方の胴体ステーション FSTA-8080 より FSTA-4950 までの長さ 3130 mm の区間で、床下部分に荷物室とその扉が設置されている。また、後方部分は主翼後方の FSTA+1800 より FSTA+5160 までの長さ 3360 mm の区間で、全長にわたってフレーム、外板、ストリング

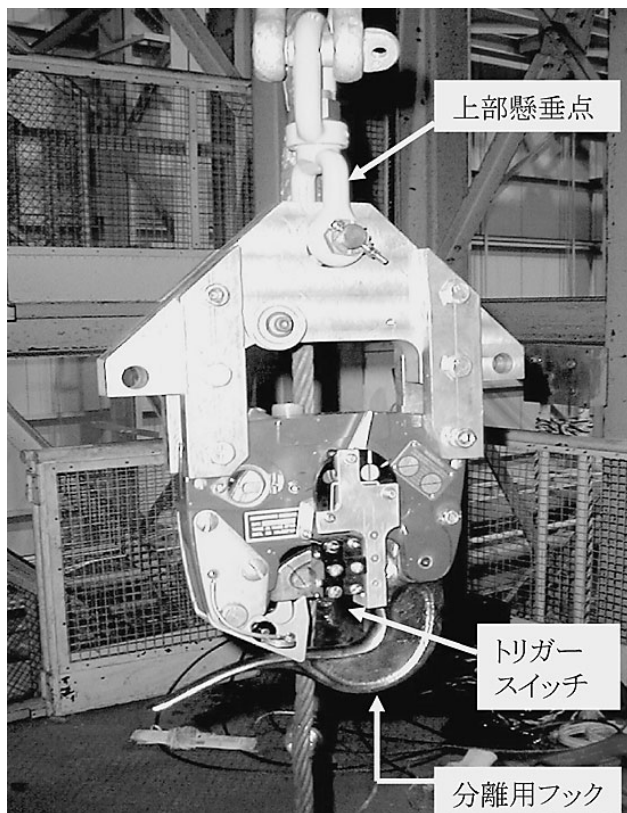
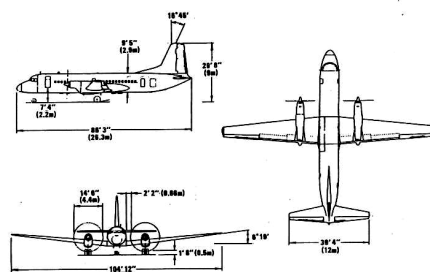


図 2 分離装置の外観



図 3-A YS-11 型機の外観



YS-11 の主な仕様

直径：	2.88 m
最大離陸重量：	24.5 tons
座席数：	最大 64
全幅：	32.0 m
全長：	26.3 m
全高：	9.0 m
巡航速度：	450 km/h

図 3-B YS-11 型機三面図

一、フロアビーム及びストラット等の基本部材で構成された比較的整然とした構造である。ここで、胴体ステーション番号（FSTA）は胴体断面の機軸方向の位置を表す。その原点（FSTA 0）は 89 % MAC（平均空力弦長）位置に相当し、これより前方を（-），後方を（+）として mm

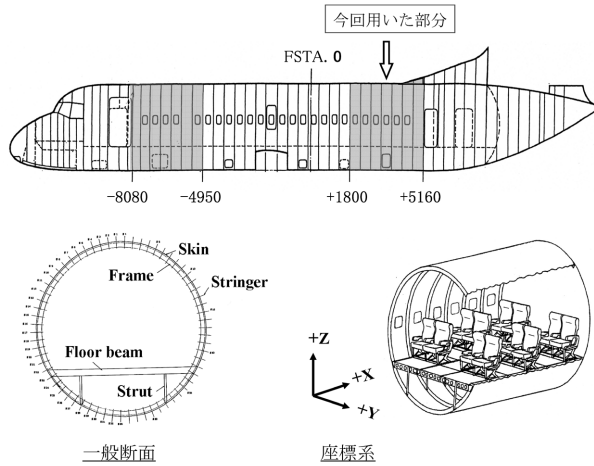


図4. 供試体切り出し位置と座標系



FSTA+1800 断面



FSTA+5160 断面

図5 改修前の供試体の状況

単位で原点からの位置を示す。今回の試験では、後方部分の胴体区間を用いた（以後、「供試体」と呼ぶ）。試験実施前に供試体の翼胴フェアリングの後縁部分、空調用ダクト、油圧配管及び電気配線類等、主構造の強度に無関係と考えられる部材（重量 78.3 kg）を撤去した。図5、図6及び図7に改修前後の供試体床下部分の状況と撤去したパーツの一例を示す。また、本試験では、供試体の切断面に特別の補強等は実施しないこととした。改修後に実測した供試体の胴体構造重量（シートなし）は 470 kg であった。供試体重心は、図8に示すように供試体を2点で吊り、それぞれの吊り上げ重量値から算出し、機軸方向のほぼ中央位置 FSTA+3404 にあった。また、供試体は胴体断面がほぼ真円、左右対称であるので胴体の幅方向の重心を中央（BP. 0）と見做した。高速度カメラ画像による動画解析のためのターゲットとして、直径約 30 mm の反射マークを FSTA+1800 フレーム及び FSTA+1800 フロアビームの代表位置に貼付した。図9に反射マークの貼付位置を示す。

乗客用シートは、1988年にシート構造の強度基準強化が実施される以前の静的強度基準である前方 9 G、下方 7.65 G 等の終極荷重（3秒間以上破壊することなく耐えること）等の要求条件に合格した YS-11 型機の2人掛け用のオリジナルシート（天龍工業株式会社製 PASSENGER SEAT Model 740）3脚とシート構造の強度基準強化に合わせて開発された前方 16 G 等の要求条件にも適合するエアバス A 340-300 型用の2人掛け用シート（小糸工業株式会社製 PASSENGER SEAT Model ARS-643）1脚を用いた。また、2人掛けシート及び人体ダミー2体分の総重量（約 170 kg）を模擬したダミーウエイト2個を上記シートと同



図6 改修後の供試体の状況





翼胴フェアリングの後縁



外気取入口



空調用ダクト類



コード類

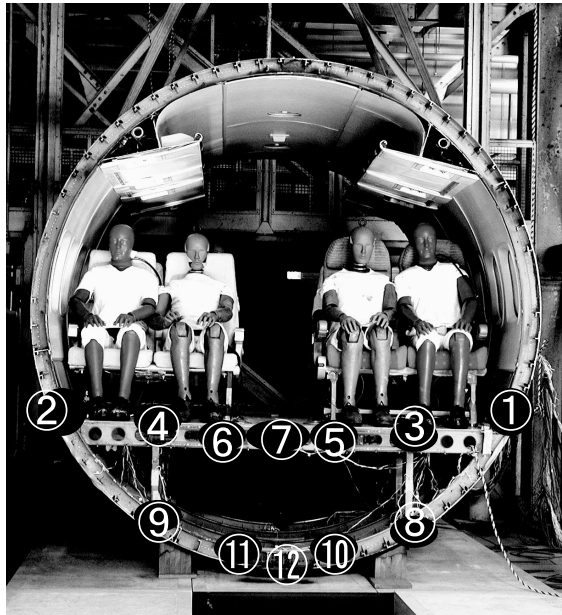
図7. 改修時に撤去したパーツの一例



図8 供試体重心計測の状況

様に前後脚各2点でシートレールに固定した。図10にシート及びダミーウエイトの配置（客室フロア面を上方より見た図）を示す。シートは1列目左側を#1Lシート（16G対応型）、1列目右側を#1Rシート（オリジナルシート）、2列目の左右をそれぞれ#2L、#2Rシート（オリジナルシート）と呼称した。ダミーウエイトは3列目の左右に設置し、各ウエイトの乗客位置に相当する部分を左側で#3Aと#3B、右側で#3Cと#3Dと呼称した。シートの重量は、オリジナルシートで15.17 kg/脚、16G対応シートで32.59 kg/脚であった。

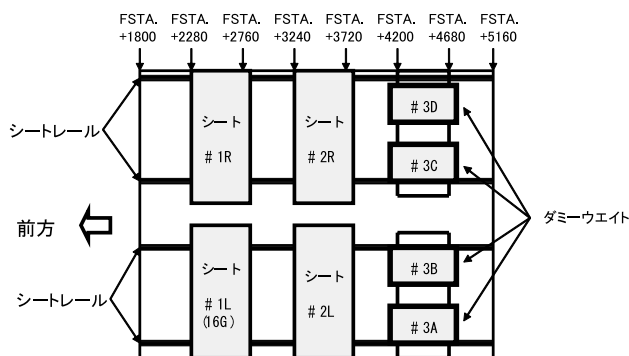
人体ダミーは自動車や航空機等のクラッシュ事故による搭乗者の傷害評価を行う衝突試験等で搭乗者の代用として幅広く用いられ、人体の力学的特性をかなり忠実に模擬したものである。組み込まれたセンサにより頭部加速度、胸部変位、胸部加速度、腰部加速度等が計測できる。航空機の衝撃試験用の人体ダミーとして、耐空性審査要領では試験法 CFR 49 Part 572-B に準じて米国成人男性の平均的体格である ATD Hybrid-II 50 th (50 th パーセン



記号と貼付位置

- ①;フロアビーム/フレーム左接合部
- ②;フロアビーム/フレーム右接合部
- ③;フロアビーム/左ストラットの上部
- ④;フロアビーム/右ストラットの上部
- ⑤;フロアビーム/左シートレール通路側
- ⑥;フロアビーム/右シートレール通路側
- ⑦;フロアビーム中央部
- ⑧;フレーム/左ストラットの下部
- ⑨;フレーム/右ストラットの下部
- ⑩;フレーム/ガセットプレート左端部
- ⑪;フレーム/ガセットプレート右端部
- ⑫;フレーム最底部(中央)

図9 反射マーカの貼付位置

図10 シート及びダミーウエイトの配置  
(客室フロア面を上方より見た図)図11 人体ダミーの外観  
(向かって左側: ATD Hybrid-II 50 th,  
右側: ATD Hybrid-III 50 th)

大腿部、スネ荷重等の測定項目を追加したダミーである。自動車の関連試験では、ATD Hybrid-IIIの使用を規定しており、航空機用シートの衝撃試験等においても ATD Hybrid-IIIを用いる方向に向かいつつある。本落下衝撃試験では、ATD Hybrid-IIのセンサ付ダミー3体とセンサ無しダミー5体の計8体を用いた。ここで、センサ無しダミーとは、装着すべき各種計測センサを取り付けていないダミーであり、ATD Hybrid-II 50 th 2体と ATD Hybrid-III 50 th 3体である。また、本試験では、供試体を設定した高さから水平姿勢で垂直下方に自由落下させるため、上下方向成分の加速度が卓越することと、計測系のチャンネル数の制約から計装化ダミーについても、3軸加速度センサの上下方向成分のみを計測することとした。更に、胸部変位の測定を省略し、代わりに腰椎圧縮荷重を計測項目に追加した。試験に用いたダミーの重量は、計装の状態に関係なく76 kg/人(実測)であった。計装化ダミー3体の配置はATD #1を#1Lシートの窓側、ATD #2を#1Rシートの窓側、ATD #3を#2Lシートの通路側とした。他のシートには計装なしATD Hybrid-II 50 th及びATD Hybrid-III 50 thダミーを着座させた。

### 3.3 試験条件

試験は、胴体区間長さ3360 mmの胴体構造に2人用シート4脚と乗客ダミー8体及びダミーウエイト2個を搭載した全装備重量約1510 kgの供試体を高さ約1.9 mに懸吊した後、衝撃速度(接地速度)約6.1 m/s (20 ft/s) でコ

タイル)型を用いることが規定されている。図11に試験で用いた人体ダミーの外観を示す。向かって左側がATD Hybrid-II 50 th, 右側がATD Hybrid-III 50 thである。ここで、ATD Hybrid-IIIは、ATD Hybrid-IIの測定項目に首上下、



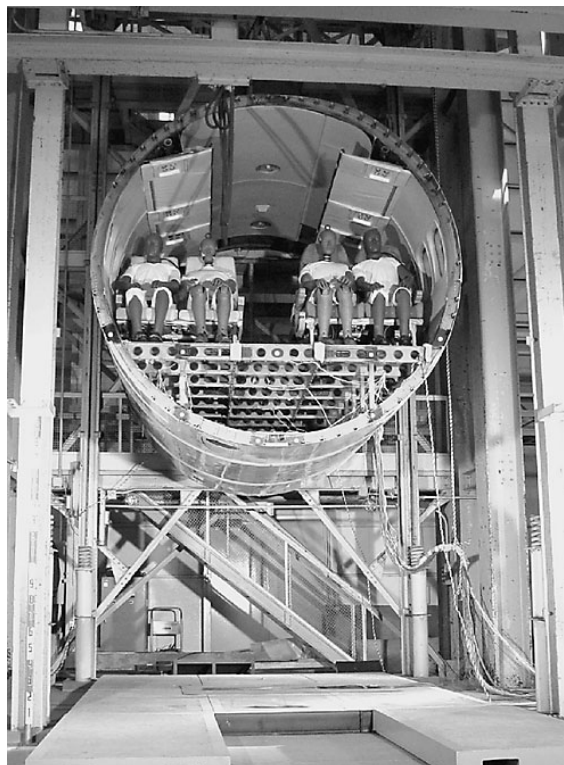


図 12 試験直前の供試体懸吊状況

表 1 供試体の重量構成

構成品の名称	単体重量 (kg)	数量	小計 (kg)
胴体構造	470	1 体	470
従来型(YS-11オリジナル)シート	15.2	3 脚	45.6
16G対応型シート	32.6	1 脚	32.6
ダミーウエイト	169.4	2 式	338.8
人体ダミー	76	8 体	608
計測用ケーブル等	15	1 式	15
全装備品搭載時重量	—	—	1510

ンクリート製プラットフォーム（剛な平面）に水平姿勢で垂直に自由落下させた。<sup>12,13)</sup> 図 12 に試験直前の供試体懸吊状況、表 1 に供試体の重量構成を示す。

### 3.4 計測システム

計測システムは胴体構造及び人体ダミー等に取り付けた加速度計、荷重計及びひずみゲージ等のセンサとこれらの前置増幅器、デジタル記録計及び高速度カメラ装置より構成した。図 13 に計測システムの概要を示す。

センサは、落下衝撃試験時に検出が予測される加速度 (G)、荷重 (kN) 及びひずみ ( $10^{-6}\epsilon$ ) 量の最大値と応答周波数を考慮した製品を選定した。加速度センサは、ひずみ変換型の高応答小型加速度計 Kyowa AS-200 HA 型と小型衝撃用圧電型 B&K 4393 型及び小型振動用 EMIC 541 A 型を用いた。荷重センサは、人体ダミー内装用の

Kyowa LUK-2 TBS 型 ( $\pm 20$  kN)、ひずみセンサは、測定点の材料線膨張係数とほぼ適合する 2014-T 4 アルミ用 ( $23.4 \times 10^{-6}/C$ )、ゲージパターン単軸、ゲージ長 5 mm、抵抗値 120  $\Omega$  の一般応力測定用箔ゲージ Kyowa KFG-5-120 C 1-23-L 20 M 2 R 型を用いた。

前置増幅器は、ひずみ変換型加速度センサ用とひずみゲージ用及び圧電型加速度センサ用を用いた。ひずみ変換型用前置増幅器には、デジタル記録計でもある Kyowa DIS-2000 A 車載型衝突試験計測システムに内蔵された DIS-208 A 型シグナルコンディショナを用い、AS-200 HA 型加速度センサの定格 ( $\pm 200$  G) に対して出力値を 150 % ( $\pm 300$  G) まで許容できるように設定した。また、LUK-2 TBS 型荷重センサに対しても定格  $\pm 20$  kN の 150 % ( $\pm 30$  kN) まで出力許容できるように設定した。ひずみゲージ用前置増幅器には、Kyowa CDV-700 A 型動歪計を用い、ひずみ入力  $\pm 5,000 \times 10^{-6}\epsilon/V$  と設定して本器の最大出力電圧  $\pm 10$  V で 1000 % ( $\pm 50,000 \times 10^{-6}\epsilon$ ) まで計測可能とした。圧電型加速度計用前置増幅器には、B&K 製 4 チャンネルチャージアンプ (B&K 2692-A-OS 4) 3 台を結合した 12 ch NEXUS コンディショニングアンプとチャージアンプ B&K 2635 型を用いた。ここでは、圧電型加速度センサ (BK 4393 型及び EMIC 541 A 型) のチャージ感度に対応するレンジと増幅度を  $\pm 316$  G/V と設定した。本器の最大出力電圧  $\pm 8$  V で 800 % (約  $\pm 2500$  G/8 V) まで計測可能とした。また、各前置増幅器には、入力信号の前段でセンサの出力信号に 3 kHz のアナログ・ローパスフィルタ ( $-24$  dB/oct) を挿入した。

デジタル記録計としては、YOKOGAWA 製デジタルメモリ、Sony 製 PCM (Pulse Code Modulation) 式デジタルデータレコーダ及び Kyowa 製衝突試験計測システムを用いた。YOKOGAWA 製デジタルメモリは、モジュール化された測定器、制御器、A/D 変換器内蔵のメモリ装置が多チャンネルに結合できる計測ステーションである。ここでは、最高サンプリング速度  $1 \mu$  秒のデジタルイザモジュールを 48 ch 結合した。各チャンネルはアナログ電圧入力であるので、上記の圧電型加速度計用前置増幅器とひずみゲージ用前置増幅器の出力から供給した。ここでは、記録間隔を 10 kHz サンプリングと設定して収録した。Sony 製データレコーダは、上記 YOKOGAWA 製デジタルメモリに記録した計測点の一部を分岐して記録するバックアップ計測器として用いた。本器は記録帯域幅 DC  $\sim$  5 kHz であるため、ここでは、記録間隔を設定可能な 4 kHz サンプリングとして収録した。Kyowa 製衝突試験計測システムは、上記で記述したように、ひずみ変換型用とひずみゲージ用の前置増幅器を内蔵しており、これらの出力をチャンネル間同期した A/D 変換を介して内蔵するメモリに記録する装置である。ここでは、記録

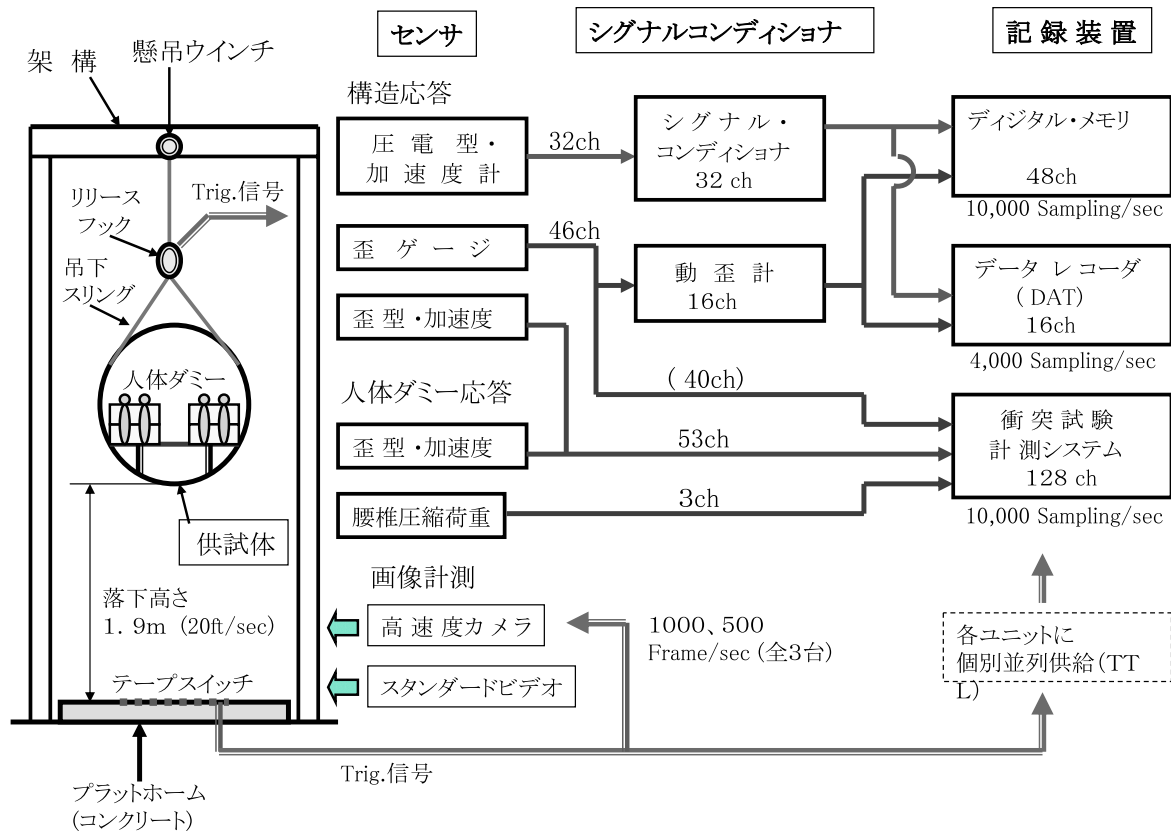


図13 計測システムの概要

間隔を 10 kHz サンプリングと設定してデータ収録した。本計測システムの記録装置としての主記録計と位置づけた。また、3 機種 of デジタル記録計によるデータ記録形式は異なっているため、試験後にそれぞれのデータをテキスト・ファイル形式に統一して再格納した。

高速度カメラは、解像度  $512 \times 384$  画素、記録速度 2000 Frame/s の Redlake MASD CO. 製 CR Imager 2000 型及び解像度  $256 \times 256$  画素、記録速度 4500 Frame/s の PHOTRON 製 FASTCAM-Ultima-RGB 型デジタル記録方式と水平解像度 300 本以上、記録速度 500 Frame/s のナック製 HVS-500 C 3 型の 3 台を用いた。

これらの計測装置の記録開始信号（トリガ信号）は分離装置の解除動作に連動するスイッチとプラットフォームの上面に設置した感圧式テープスイッチ（長さ 1 m）による接触信号の Off-On の立ち上がり信号を用いた。ここではスイッチ機構の動作の確実性を高めるためトリガ信号源を多重に設置した。

計測点はフロアビーム、床下構造、シート及び乗客に見立てた人体ダミーに生じた上下の加速度及び圧縮荷重等を計測し、衝撃速度に対する応答を総合的に評価することと、衝撃解析のモデルの開発に有用なデータを提供することを目的として決定した。フレーム、ストラット等の構造部分に加速度 64 点、人体ダミーの頭部、胸部、

腰部及びダミーウエイトに加速度 13 点と腰椎部荷重 3 点の合計 80 点及びフレーム、ストラット、フロアビーム及びシートの脚等の曲げ変形ひずみ計測 30 点の合計 110 点とした。今回の試験では、試験経費の制限等から本試験と平行して開発を進める衝撃解析のモデル化の精度検証として、データ取得が不可欠となるフレーム最底部、シートレール上面、シート脚柱上部、シート脚柱間を結合するチューブ等の 1 部の代表加速度計測点 8 点とひずみ計測点 16 点の合計 24 点をバックアップ計測点とした。更に、試験直前より計測記録の状況を確認できるデータレコーダにも加速度計測点 16 点を分岐して多重計測を行った。特に、本試験のように瞬時の計測タイミングで短時間の衝撃応答データ収集するためのデータ記録を確保、保証するためには、万全な計測準備、記録開始トリガ信号の多重化や計測装置の予備数を十分確保する等、システムを多重系とすることが重要である。

表 2 に計測点の位置と座標及び計測レンジを示す。ここでは、上記に示したバックアップ計測点及びデータレコーダによる分岐計測点の番号等は、4.5 節で示す、ひずみ計測のバックアップ計測点データの不検出なものや同一計測データ等による混乱を防止するため、あらかじめ設定した 110 点以外の計測点は記載を削除した。図 14 に加速度計及びひずみゲージの取付状況を示す。記号 A は、

表2 計測点の位置と座標及び計測レンジ -1/3

計測点 記号	測定項目 (検出方向)	センサ取付位置	計測点座標 (mm)			センサ型式	計測 レンジ
			x	y	z		
ACC-01	加速度(Z)	FSTA+1800左シートレール-窓側	1800	1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-02	加速度(Z)	FSTA+1800左シートレール-通路側	1800	315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-03	加速度(Z)	FSTA+1800右シートレール-通路側	1800	-315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-04	加速度(Z)	FSTA+1800右シートレール-窓側	1800	-1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-05	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム 最頂部-外面	1800	0	1440	AS-200HA	±200G
ACC-06	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム左上側面-外面	1800	1143	876	AS-200HA	±200G
ACC-07	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム左ストラット下部-内面	1800	740	-1254	AS-200HA	±200G
ACC-08	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム最底部-内面	1800	0	-1440	AS-200HA	±200G
ACC-09	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム右ストラット下部-内面	1800	-740	-1254	AS-200HA	±200G
ACC-10	加速度(Z)	FSTA+1800フレーム右上側面-外面	1800	-1143	876	AS-200HA	±200G
ACC-11	加速度(Z)	FSTA+2280左シートレール-窓側	2280	1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-12	加速度(Z)	FSTA+2280左シートレール-通路側	2280	315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-13	加速度(Z)	FSTA+2280右シートレール-通路側	2280	-315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-14	加速度(Z)	FSTA+2280右シートレール-窓側	2280	-1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-15	加速度(Z)	FSTA+3240左シートレール-窓側	3240	1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-16	加速度(Z)	FSTA+3240左シートレール-通路側	3240	315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-17	加速度(Z)	FSTA+3240右シートレール-通路側	3240	-315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-18	加速度(Z)	FSTA+3240右シートレール-窓側	3240	-1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-19	加速度(Z)	FSTA+3720左シートレール-窓側	3720	1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-20	加速度(Z)	FSTA+3720左シートレール-通路側	3720	315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-21	加速度(Z)	FSTA+3720右シートレール-通路側	3720	-315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-22	加速度(Z)	FSTA+3240右シートレール-窓側	3720	-1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-23	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム 最頂部-外面	3720	0	1440	AS-200HA	±200G
ACC-24	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム左上側面-外面	3720	1143	876	AS-200HA	±200G
ACC-25	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム左ストラット下部-内面	3720	740	-1254	AS-200HA	±200G
ACC-26	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム最底部-内面	3720	0	-1440	AS-200HA	±200G
ACC-27	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム右ストラット下部-内面	3720	-740	-1254	AS-200HA	±200G
ACC-28	加速度(Z)	FSTA+3720フレーム右上側面-外面	3720	-1143	876	AS-200HA	±200G
ACC-29	加速度(Z)	シート人体ダミー#3L-A-重心上面	4440	988	-444	AS-200HA	±200G
ACC-30	加速度(Z)	シート人体ダミー#3L-B-重心上面	4440	488	-444	AS-200HA	±200G
ACC-31	加速度(Z)	シート人体ダミー#3R-C-重心上面	4440	-488	-444	AS-200HA	±200G
ACC-32	加速度(Z)	シート人体ダミー#3R-D-重心上面	4440	-988	-444	AS-200HA	±200G
ACC-33	加速度(Z)	FSTA+4680左シートレール-窓側	4680	1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-34	加速度(Z)	FSTA+4680左シートレール-通路側	4680	315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-35	加速度(Z)	FSTA+4680右シートレール-通路側	4680	-315	-644	AS-200HA	±200G
ACC-36	加速度(Z)	FSTA+4680右シートレール-窓側	4680	-1160	-644	AS-200HA	±200G
ACC-37	加速度(Z)	シート#1L 左前脚柱上部-下面	2280	1160	-342	AS-200HA	±200G
ACC-38	加速度(Z)	シート#1L 右前脚柱上部-下面	2280	315	-342	AS-200HA	±200G
ACC-39	加速度(Z)	シート#1L 前方チューブ中央-下面	2280	738	-342	*EMIC541A	±316G
ACC-40	加速度(Z)	シート#1L 左後脚柱上部-下面	2736	1160	-364	AS-200HA	±200G
ACC-41	加速度(Z)	シート#1L 後方チューブ中央-下面	2736	738	-364	AS-200HA	±200G
ACC-42	加速度(Z)	シート#1L 右後脚柱上部-下面	2736	315	-364	AS-200HA	±200G

表2 計測点の位置と座標及び計測レンジ -2/3

計測点 記 号	測定項目 (検出方向)	セ ン サ 取 付 位 置	計測点座標 (mm)			センサ型式	計測 レンジ
			x	y	z		
ACC-43	加速度(Z)	シート#1R 左前脚柱上部-下面	2280	-315	-364	AS-200HA	±200G
ACC-44	加速度(Z)	シート#1R 右前脚柱上部-下面	2280	-1160	-364	AS-200HA	±200G
ACC-45	加速度(Z)	シート#1R 左後脚柱上部-上面	2736	-315	-354	AS-200HA	±200G
ACC-46	加速度(Z)	シート#1R 後方チューブ1D中央-下面	2736	-988	-404	AS-200HA	±200G
ACC-47	加速度(Z)	シート#1R 右後脚柱上部-上面	2736	-1160	-354	AS-200HA	±200G
ACC-48	加速度(Z)	シート#2L 左前脚柱上部-下面	3240	1160	-364	AS-200HA	±200G
ACC-49	加速度(Z)	シート#2L 右前脚柱上部-下面	3240	315	-364	AS-200HA	±200G
ACC-50	加速度(Z)	シート#2L 左後脚柱上部-上面	3696	1160	-354	AS-200HA	±200G
ACC-51	加速度(Z)	シート#2L 後方チューブ2B中央-下面	3696	488	-404	AS-200HA	±200G
ACC-52	加速度(Z)	シート#2L 右後脚柱上部-上面	3696	315	-354	AS-200HA	±200G
ACC-53	加速度(Z)	人体ダミー#1 頭部	2508	988	505	AS-200TH	±200G
ACC-54	加速度(Z)	人体ダミー#1 胸部	2508	988	180	AS-200TH	±200G
ACC-55	加速度(Z)	人体ダミー#1 腰部	2508	988	-145	AS-200HA	±200G
ACC-56	加速度(Z)	人体ダミー#2 頭部	2508	-988	455	AS-200TH	±200G
ACC-57	加速度(Z)	人体ダミー#2 胸部	2508	-988	130	AS-200TH	±200G
ACC-58	加速度(Z)	人体ダミー#2 腰部	2508	-988	-195	AS-200HA	±200G
ACC-59	加速度(Z)	人体ダミー#3 頭部	3468	488	455	AS-200TH	±200G
ACC-60	加速度(Z)	人体ダミー#3 胸部	3468	488	130	AS-200TH	±200G
ACC-61	加速度(Z)	人体ダミー#3 腰部	3468	488	-195	AS-200HA	±200G
ACC-101	加速度(Z)	FSTA+2760左シートレール 窓側-上面	2760	1160	-644	*BK4393	±316G
ACC-102	加速度(Z)	FSTA+2760左シートレール 通路側-上面	2760	315	-644	*BK4393	±316G
ACC-103	加速度(Z)	FSTA+2760右シートレール 通路側-上面	2760	-315	-644	*BK4393	±316G
ACC-104	加速度(Z)	FSTA+2760右シートレール 窓側-上面	2760	-1160	-644	*BK4393	±316G
ACC-105	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム 最頂部-外面	2760	0	1440	*BK4393	±316G
ACC-106	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム左上側面-外面	2760	1143	876	*BK4393	±316G
ACC-107	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム左ストラット下部-内面	2760	740	-1254	*BK4393	±316G
ACC-108	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム最底部-内面	2760	0	-1440	*EMIC541A	±316G
ACC-109	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム右ストラット下部-内面	2760	-740	-1254	*EMIC541A	±316G
ACC-110	加速度(Z)	FSTA+2760フレーム右上側面-外面	2760	-1143	876	AS-200HA	±200G
ACC-111	加速度(Z)	FSTA+5160左シートレール 窓側-上面	5160	1160	-644	*BK4393	±316G
ACC-112	加速度(Z)	FSTA+5160左シートレール 通路側-上面	5160	315	-644	*BK4393	±316G
ACC-113	加速度(Z)	FSTA+5160右シートレール 通路側-上面	5160	-315	-644	*BK4393	±316G
ACC-114	加速度(Z)	FSTA+5160右シートレール 窓側-上面	5160	-1160	-644	*BK4393	±316G
ACC-115	加速度(Z)	FSTA+5160フレーム 最頂部-外面	5160	0	1440	*EMIC541A	±316G
ACC-116	加速度(Z)	FSTA+5160フレーム左上側面-外面	5160	1143	876	*EMIC541A	±316G
LOAD-01	荷 重(Z)	人体ダミー#1 腰椎部	2508	988	-145	LUK-2TBS	±20kN
LOAD-02	荷 重(Z)	人体ダミー#2 腰椎部	2508	-988	-195	LUK-2TBS	±20kN
LOAD-03	荷 重(Z)	人体ダミー#3 腰椎部	3468	488	-195	LUK-2TBS	±20kN



表2 計測点の位置と座標及び計測レンジ -3/3

計測点 記号	測定項目 (検出方向)	センサ取付位置	計測点座標 (mm)			センサ型式	計測 レンジ
			x	y	z		
STR-01	ひずみ(Z)	FSTA+1800左ストラット 正面-中央	1800	740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-02	ひずみ(Z)	FSTA+1800左ストラット 左側面-中央	1800	740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-03	ひずみ(Z)	FSTA+1800左ストラット 右側面-中央	1800	740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-04	ひずみ(Z)	FSTA+1800右ストラット 正面-中央	1800	-740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-05	ひずみ(Z)	シート#1L 左前脚柱 正面-中央	2280	1160	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-06	ひずみ(Z)	シート#1L 右前脚柱 正面-中央	2280	315	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-07	ひずみ(Z)	シート#1L 左後脚柱 正面-中央	2736	1160	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-08	ひずみ(Z)	シート#1L 右後脚柱 正面-中央	2736	315	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-09	ひずみ(Y)	シート#1L 前方チューブ 中央-下面	2280	738	-358	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-10	ひずみ(Y)	シート#1L 後方チューブ 中央-下面	2736	738	-364	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-11	ひずみ(Z)	シート#1L 左後脚柱 後面-中央	2736	1160	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-12	ひずみ(Z)	シート#1L 右後脚柱 後面-中央	2736	315	-504	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-13	ひずみ(Y)	FSTA+1800床ビーム 中央-上面	1800	0	-644	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-14	ひずみ(Y)	FSTA+1800床ビーム 中央-下面	1800	0	-769	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-15	ひずみ(Y)	FSTA+2760床ビーム 中央-上面	2760	0	-644	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-16	ひずみ(Y)	FSTA+2760床ビーム 中央-下面	2760	0	-769	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-17	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 床左側接合部下-内面	2760	600	-804	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-18	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 床左側接合部下-外面	2760	660	-844	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-19	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 左ストラット下部-内面	2760	720	-1150	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-20	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 左ストラット下部-外面	2760	760	-1230	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-21	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 最底部-内面	2760	0	-1350	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-22	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 最底部-外面	2760	0	-1440	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-23	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 右ストラット下部-内面	2760	-720	-1150	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-24	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 右ストラット下部-外面	2760	-760	-1230	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-25	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 床右側接合部下-内面	2760	-600	-804	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-26	ひずみ(Z)	FSTA+2760フレーム 床右側接合部下-外面	2760	-660	-844	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-27	ひずみ(Z)	FSTA+2760左ストラット 正面-中央	2760	740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-28	ひずみ(Z)	FSTA+2760右ストラット 正面-中央	2760	-740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-29	ひずみ(Z)	FSTA+3720左ストラット 正面-中央	3720	740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$
STR-30	ひずみ(Z)	FSTA+3720右ストラット 正面-中央	3720	-740	-944	KGF-5-120	±5000 $\mu$

加速度計取付点で FSTA+1800 フロアビーム上面の右側シートレール窓側及び通路側位置と FSTA+1800 及び FSTA+2760 フレームの右ストラット下の位置を示す。記号 B 及び C は、ひずみゲージ取付点で、B が FSTA+1800 フレームの右フロアビーム/フレーム接続部直下の内外面位置と右ストラット下の内外面位置、C が FSTA+1800、FSTA+2760 及び FSTA+3720 右ストラットの各長さ中間点の前面位置を示す。ここで、右ストラットや右側シートレール等の表記は供試体の内部より機体前方を見た時の右弦側、ストラットや右シート (1R, #2R, #3R シート) 固定用の窓側部と通路側部を示している。

### 3.5 データ処理

全てのデータチャンネルに関して SAE が推奨する規定 SAE J 211/1<sup>14)</sup> を採用した。推奨は絶対的なものではないが試験での性能、データ処理方法等の統一性を達成することで国際的なデータベース化に対応できる。ここでは、データの測定個所と全体の比較等に関する推奨される方法として、データチャンネルの周波数応答クラス (Channel Frequency Class; CFC) が提案されており、全データ比較には CFC 60 (−40 dB/oct cutoff 100 Hz 相当) のデジタルローパスフィルタ処理、個々の測定個所の応答比較には、人体ダミーの各部で CFC 1000 (1650 Hz LPF 相当)、乗物 (Vehicle) で CFC 600 (1000 Hz LPF 相当) が規定さ

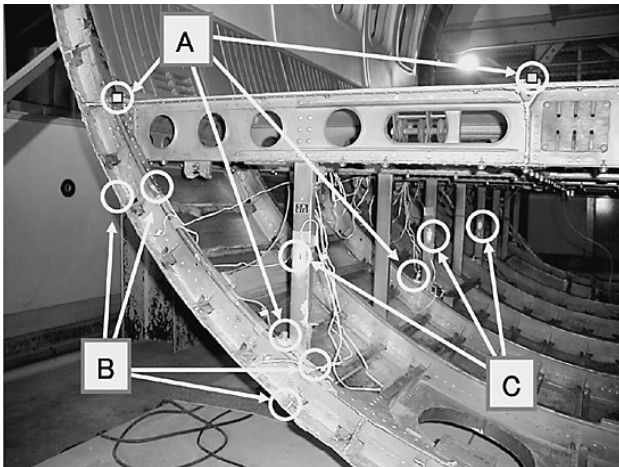


図14 加速度計及びひずみゲージ取付状況  
(Aは加速度計, B及びCはひずみゲージ)

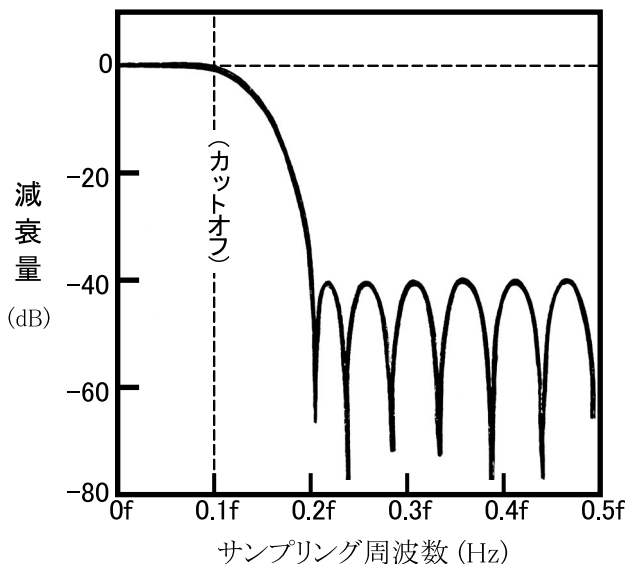


図15 フィルタの周波数特性  
(10 kHz サンプリングデータをカットオフ 10 %  
(1 kHz LPF) とする場合の一例)

れている。また、FAR Part 25 の前方 16 G シートの新基準で腰椎荷重限度 6.7 kN (1500 Lbsf) との比較は CFC 600 を用いることと規定している。フィルタリング処理は当所所有のデジタル記録計である横河電機社の PC ベース計測器 WE-7000 に搭載されたデータ演算機能付加ソフトウェア<sup>15)</sup> を用いて実施した。図 15 にフィルタの周波数特性を示す。図は 10 kHz サンプリングの被処理データをカットオフ 10 % (1 kHz ローパスフィルタ) とする場合の一例である。減衰傾度は -40 dB/oct, 位相特性は設定するカットオフ周波数には関係なく、被処理データのサンプリング周波数の 1/2 周期遅れる。ここで、フィルタ処理後の原波形に対する位相遅れは、サンプリング周波数が 10 kHz (周期 = 0.1 msec) であるから 0.05 msec となる。本データ処理に当たっては、この位相遅れ値を補正して

いない。

幾つかの代表点については、時刻歴応答データの接地時よりリバウンド直前までの範囲について Visual Basic 6.0<sup>16)</sup> を用いた高速フーリエ変換 (FFT) を試みた。

## 4. 試験結果及び考察

### 4.1 高速度カメラ画像

高速度カメラは、デジタル記録方式の PHOTRON 製 FASTCAM-Ultima-RGB 型及び Redlake MASD CO. 製 CR Imager 2000 型の 2 台を供試体の正面前方より胴体全体 (垂直方向で約 3 m) が画像フレームに収まるサイズで、記録速度 1000 Frame/s に設定 (PHOTRON 製 FASTCAM-Ultima-RGB 型の場合は 1125 Frame/s) して撮影した。また、アナログ式ビデオテープ記録方式のナック製 HVS-500 C 3 型 (記録速度 500 Frame/s) は、バックアップ記録用として供試体の約 30 度斜め前方より胴体全体が画像フレームに収まるサイズで、記録速度 500 Frame/s に設定して落下分離操作の約 1 分前より撮影を開始した。記録時間は VHS ビデオカセット (120 分用) を用いた場合、約 7.2 分である。この項では、解像度 512 × 384 画素、記録速度 1000 Frame/s で供試体を正面より撮影した CR Imager 2000 型デジタルカメラによるデータを扱う。供試体の落下開始直後からほぼ静止状態となる約 4 sec (40,000 Frame) の記録画像のうち、供試体の接地 10 ms 前より接地後 205 ms までの 5 ms 間隔毎の画像例を図 16 に示す。ここでは、85 ms の画像の前に最大圧縮時 (84 ms) の画像も挿入した。変形過程の概要としては接地 (0 ms) 直後よりフレーム最底部が上方に変形し始め、30 ~ 40 ms 頃にフレーム最底部のフレーム接合部において補強継手板の剪断等により、フレーム床下中央部で顕著な曲げ崩壊が発生している。50 ms 前後でストラット下部位置がプラットフォームと接し、これ以降はフロアビーム/プラットフォーム間の床下の変形量の増加傾向が小さくなり、フレーム中央部の上方への曲げ変形が顕著に大きくなっている。最大圧縮時 (84 ms) の前後では、フレーム最底部位置がフロアビーム下面に接触または近接している。85 ms 以降では、供試体のリバウンドによりフレーム下部の変形量が若干減少するとともに、フレーム中央部の上方への曲げ変形が逆に減少している様子が確認できる。フレーム毎の垂直方向の画像分解能は、撮影範囲約 3000 mm に対して解像度 384 であるから、3000 mm/384 画素 = 7.8 mm/画素より約 8 mm/画素程度である。

今回の試験においては、記録画像に取込むマーカ形状を指定し、その中心点追尾方式に依り自動的に動画解析を行った。ソフトウェア上の制約から、ターゲットが各画像間で大きく移動した場合やマーカ形状が変形して記





図16 高速度カメラ画像例  
 (接地前 10 msec より, 接地後 205 msec までの 5 msec 間隔毎画像,  
 記録条件: 撮影速度 1000 Frame/sec, 画像解像度 256 × 256 画素) -1/3





図16 高速度カメラ画像例-2/3





図16 高速度カメラ画像例-3/3

録（撮影時の照明角度等に依存する）された場合には、位置精度の誤差や解析不能が生じた。このため人体ダミー等の計測や座屈等が発生した構造位置では画像解析手法が適用できない場合があったが、4.2 項及び4.3 項の衝撃接地速度及び最大変形については高精度な解析が行えた。

#### 4.2 接地速度

接地速度は、解像度  $512 \times 384$  画素、記録速度 1000 Frame/s で供試体を正面より撮影した CR Imager 2000 型デジタルカメラの画像データを動画計測ソフトウェア Move-TR 32/2 D（ライブラリ社）を用いた解析により算定した。図 17 に衝撃接地速度の算定に用いた変位計測を示す。横軸は、供試体がプラットホームと接触した時刻を 0 とした経過時間（msec）で、接地前を（－）として表示した。縦軸は、FSTA+1800 左右フロアビーム/フレーム接続部に貼付けたマーカの中心点とプラットホーム上面までの垂直距離（mm）を示す。ここでは、接地の約 25 ms 前から接地までの垂直移動量を画像フレーム単位（1 ms 毎）に自動追尾して求めた。垂直方向分解能は、撮影画像のフレームサイズ約 3000 mm に対して  $1/384$  画素の解像度であるから、7.8 mm/画素となる。得られた経過時刻に対する両端部の垂直下方向の平均値（破線）を二次曲線で近似し、接地時点における接線方程式から接地速度を 6.08 m/s と算出した。空気抵抗を無視した自由落下速度の理論値は  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $h = 1.9 \text{ m}$  とすれば、接地速度 =  $(2gh)^{-1/2}$  より 6.102 m/s である。画像毎の垂直移動量には変動が認められるが、追尾するマーカの形状は、画像分解能やマーカ貼付面のカメラに対する反射光軸の大きな変化（供試体の座屈や曲げ等による）等によ

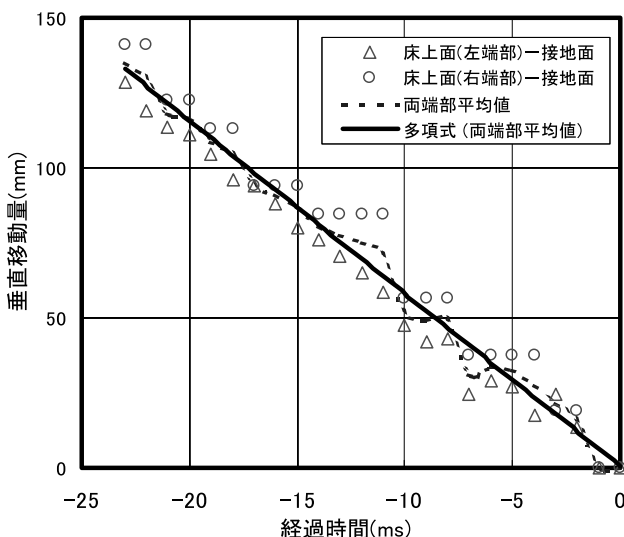


図 17 衝撃接地速度の算定に用いた変位計測（経過時間は、接地前を（－）で示す。）

り、時間的にあたかも変形したように離散的に記録されることがある。その場合、記録されたマーカ形状の中心点をマーカの中心点とみなす演算過程では画像フレーム毎の位置推定に変動が生じる。ここでは、2 次の最小二乗平均曲線をあてはめ非常に良い精度で接地速度が得られた。

#### 4.3 変位量計測

床下部の最大変形量とその接地後の経過時間の関係は、4.2 項と同様に画像解析で求めた。図 18 に床下部の最大変形の算定に用いた変位計測と経過時間を示す。横軸は、供試体がプラットホームと接触した時刻を 0 とした経過時間（msec）、縦軸は、FSTA+1800 左右フロアビーム/フレーム接続部に貼付けたマーカの中心点とプラットホーム上面までの垂直距離（mm）を示す。図では、クラッシュ過程の複雑な破壊形態等に関連し、特に右側部分（○印）で一様な進行とはならず大きな階段状になっているが、結果としては最大変形量 220 mm と接地後の経過時間 84 msec を得た。フロアビーム、ストラット及び床下フレーム最底部の移動量等についても同様な解析を実施したが、マーカ位置で部材に座屈や破損等が発生したため画像解析は不可能であった。また、フロアビームは変形量が小さく、使用した機器の画像解析分解能では計測は不可能であった。フロアビーム及び床下部の変形量については、試験後に全装備品搭載時と人体ダミー、シート、床パネルを撤去した状態（胴体構造単体）について、フレーム位置毎にスケールを用いて計測を行った。ここでは、フロアビーム/フレーム接続部に変形が認められないため FSTA+1800 及び FSTA+5160 の左右シートレールの窓側 4 点を基準点とし、これらを仮想直線で結んだラインより下方向の変形を正として測定した。図 19 及び図 20

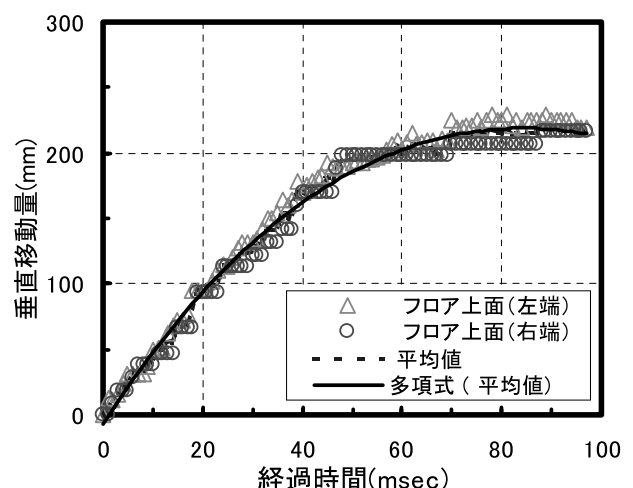


図 18 床下部の最大変形の算定に用いた変位計測と経過時間



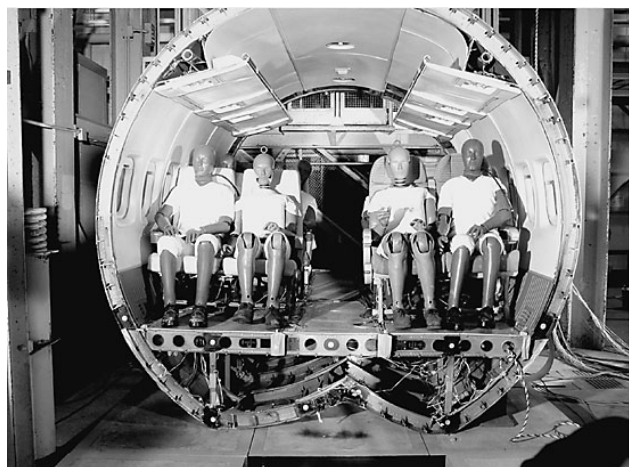


図 19 全装備品搭載時の変形状況

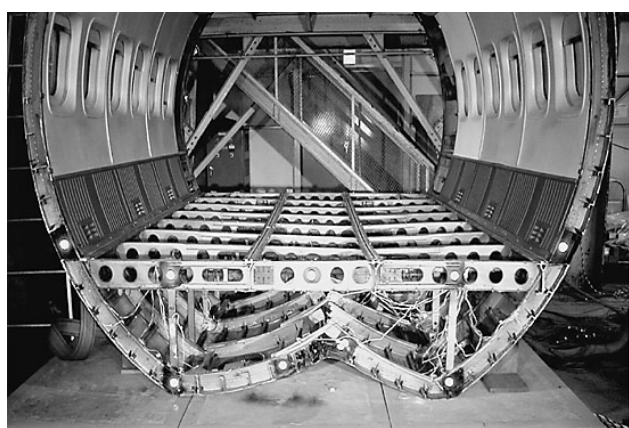


図 20 装備品（シート、人体ダミー及びフロアパネル）撤去時のフロアビームと床下構造の変形状況

に全装備品搭載時の変形状況及び装備品（シート、人体ダミー及びフロアパネル）撤去時のフロアビームと床下構造の変形状況を示し、表 3 にシートレール上面の変形量（mm）を示す。表の数値は、上段が全装備品搭載時（1510 kg）、下段がシート、人体ダミー及びフロアパネル撤去時（438 kg）の変形量である。FSTA+1800 及び FSTA+5160 フロアビームの最大変形は全装備品搭載時で 1 mm、装備品撤去時で 3 mm であった。床面の変形は FSTA+2760 左シートレール通路側で最大 40 mm であったが、左右シートレール窓側では 2 mm 以下と殆ど変形はなかった。表 4 に床下部の変形量を示す。表の数値は、表 3 と同様に上段が全装備品搭載時、下段が装備品撤去時の変形量である。代表的な変形量としては、全装備品搭載時で左右フロアビーム/フレーム接続部の接地面からの高さは健全状態の 800 mm に対して、FSTA+1800 で、それぞれ 587 mm と 610 mm（平均 599 mm）であり、また、中央部の最大凹み量は 199 mm であった。装備品撤去後の同位置の接地面からの高さ及び中央部の最大凹み量は、それぞれ 593 mm 及び 625 mm（平均 609 mm）及び 183 mm であった。表 4 の左右フロアビーム/フレーム接続部及び

表 3 シートレール上面の変形  
(上段：全装備品搭載時、下段：装備品撤去時)

計測点	FSTA.	1800	2280	2760	3240	3760	4200	4680	5160
右シートレール窓側 (フレーム接続部)		0	0	0	0	0	0	0	0
右シートレール通路側		1	18	25	24	20	18	16	0
		3	13	22	20	19	17	13	1
左シートレール通路側		0	25	37	37	34	28	28	0
		0	30	40	37	31	27	21	1
左シートレール窓側 (フレーム接続部)		0	1	2	1	1	0	0	0
		0	1	2	1	1	0	0	0

表 4 床下部の変形  
(上段：全装備品搭載時、下段：装備品撤去時)

計測点	FSTA.	1800	2280	2760	3240	3760	4200	4680	5160
右フレーム床接続部		610	---	---	---	---	---	---	614
		625	625	624	624	623	623	622	622
右ストラット部		605	---	---	---	---	---	---	607
		590	585	574	577	577	582	584	581
右シートレール通路側		600	---	---	---	---	---	---	602
		535	525	505	494	492	506	525	539
フレーム底の最大凹み部		199	---	---	---	---	---	---	198
		183	196	195	182	176	192	198	180
最大凹部位置 * 1)		左 90	---	---	---	---	---	---	左 84
		左 78	左 81	左 92	右 33	右 40	左 23	左 44	左 65
左シートレール通路側		596	---	---	---	---	---	---	593
		490	469	461	472	479	481	484	505
左ストラット部		592	---	---	---	---	---	---	590
		586	568	554	534	534	556	577	581
左フレーム床接続部		587	---	---	---	---	---	---	582
		593	591	589	588	588	587	586	585

左右シートレール通路側は、それぞれフロアビーム上面位置及びシートレール上面と接地面（プラットフォーム上面）までの高さ、左右ストラットはフロアビームのストラット取付位置上面からストラット下部のフレーム取付位置の外板外面までの高さである。また、フレーム中央部の最大凹み量と、その位置は接地面よりフレーム中央部（外板外面）の最大凹み位置までの鉛直方向高さと、胴体幅方向の中心（BP.0）より、最大凹み位置の方向と距離を示した。

#### 4.4 最大加速度と荷重

図 21 に代表位置での時刻歴応答線図を示す。上段より FSTA+1800 フレーム最底部、FSTA+1800 フレーム右ストラット下部、FSTA+1800 左シートレール通路側と窓側及び ATD # 1 の腰部加速度と腰椎荷重である。左列は CFC 600 または CFC 1000 によるフィルタ処理結果（下段 2 つの人体ダミー）であり、右列（B）が CFC 60 処理による結果である。ここで、横軸は、供試体の底部がプラットフォームに接地した時刻を 0 ms とした経過時間、縦軸は上下方向の加速度（G）または荷重（kN）とし、上方向を正とした。CFC 600 処理による FSTA+1800 フレーム最底部の応答では、接触直後の 2.5 ～ 3.5 ms の第 1 次波で約 350 G と高い加速度が発生しているが、30 ms 以降では、フレームが完全に崩壊（補強接手板の剪断）し、加速度が平坦な値となっている。また、125 ms 付近の下方方向の大きなピークは崩壊した構造部材のバックリング等による衝撃信号であると考えられる。FSTA+1800 フレー

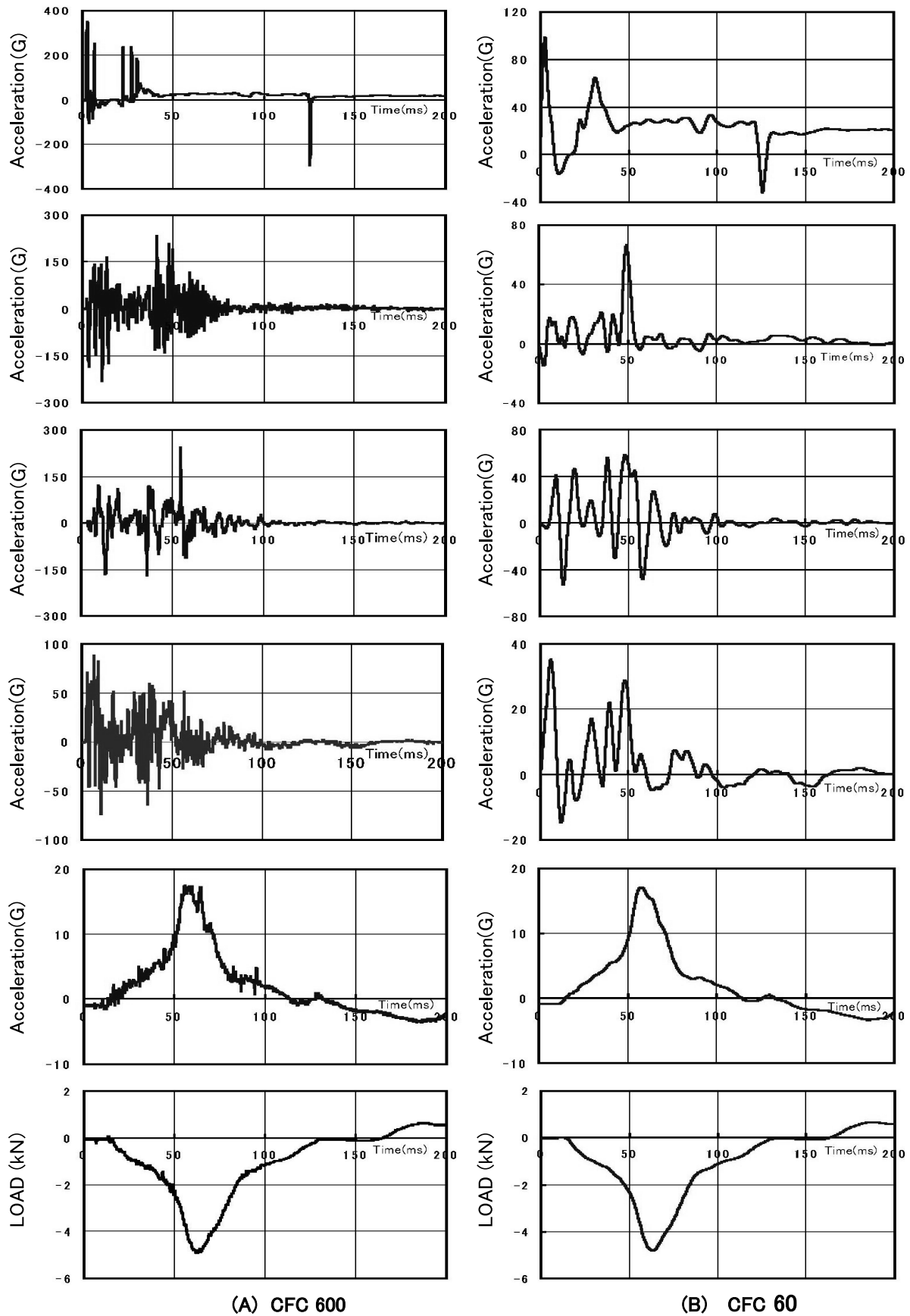


図 21 代表位置での時刻歴応答線図

(上段より FSTA+1800 フレーム最底部, FSTA+1800 フレーム右ストラット下部, FSTA+1800 左シートレール通路側と窓側及び ATD 1 の腰部加速度と腰椎荷重.

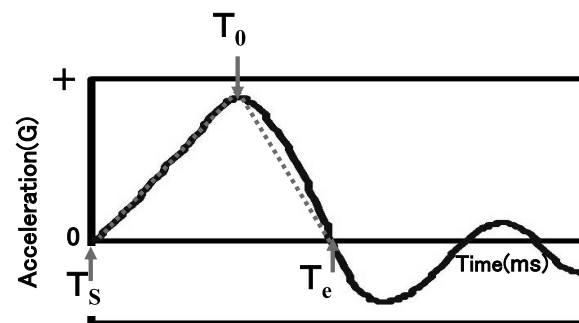
(A) 列は CFC 600 処理または CFC 1000 処理による結果 (下段 2 つの人体ダミー),

(B) 列は CFC 60 処理による結果

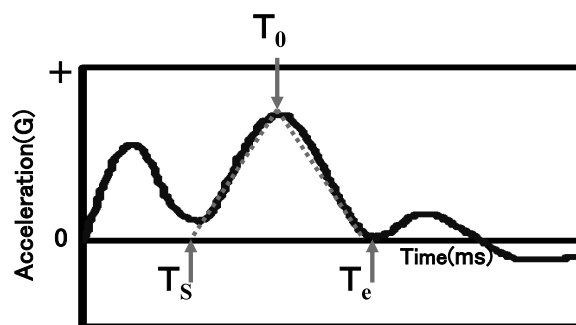


ムの右ストラット下部のピークは、第1次波の11.0 msで-230 G、主応答波の41.1 msで235 Gとなっている。上記と対称側となる左ストラット下部（付録1の4/41図上段）では、第1次波の5.8 msで319 G、10.2 msで-258 Gまでの値は有効に検出しているが、15 ms以降はセンサの剥離と考えられる波形となっている。FSTA+2760左ストラット下部（付録1の30/41図上段）でも15 ms以降同様な波形となっているが、有効な範囲では10.0 msで593 G、9.3 msで-755 Gと他フレームの同位置の2倍以上高い値である。この付近のフレーム間には点検扉が設置されているため強度が高く、フレームが大きく変形または崩壊した位置と比較して衝撃吸収が少なかったためと考えられる。逆に、大きな変形が確認された右側部分（付録1の31/41図上段）では127 G及び88 Gと左側の値の1/5程度であった。この傾向はCFC 60による処理結果でも同様であった。付録1に全計測点のCFC 600またはCFC 1000処理の加速度時刻歴応答及びCFC 1000処理の圧縮荷重時刻歴応答線図を示す。付録2～付録4にCFC 60処理の加速度時刻歴応答線図、CFC 600処理のひずみ時刻歴応答線図及びCFC 60処理のひずみ時刻歴応答線図を示す。これらの処理結果からピーク、ピーク到達時刻及び持続時間は、図22に示すようにピークの形状が単峰の場合（A）と多峰状態の場合（B）について、次のように定義した。ピーク到達時刻 $T_0$ は供試体の接地時を0 msとした経過時間とする。持続時間 $T_d$ はそのピークの発生時刻 $T_s$ から終了時刻 $T_e$ までの時間として $T_d = T_e - T_s$ より算出する。ピークの形状が単峰の場合には、 $T_s$ 及び $T_e$ を波形の極性が変わる時間軸との交点をそれぞれ $T_s$ 、 $T_e$ とし、多峰状態の場合には、個々の顕著なピーク $T_0$ を頂点とする三角波でカーブフィットを行い、時間軸との交点をそれぞれ $T_s$ 、 $T_e$ とした。ピークは0 msより応答がほぼ収束する200 msまでの間の上下方向の各最大値とした。本報告では省略するが各計測点でのエネルギー吸収量等の比較評価には、図22の（B）に代表する極性が同じの複数のピークが1つのグループとなっているような場合（多峰）に、ここで示した1つのピークの応答だけでなく、その前後にある小ピークを含んだグループ全体の継続時間との関係等についての総合的な検討も行う必要が生じると考えられる。

表5に、図21に示した代表点5点の加速度とATD #1、ATD #2及びATD #3の腰椎荷重の上下方向最大値と、そのピーク到達時刻、持続時間及び継続する応答部分の全体継続時間の一覧を示す。各計測点の値は上段がCFC 600（人体ダミーはCFC 1000）、下段がCFC 60処理による結果である。シートレールの加速度は通路側が窓側と比較して2倍程度高い値となっている。表では左側のみ示したが、右側も同様な結果であった。人体ダミーATD #1



(A) 波形形状が単峰の場合



(B) 多峰状態の場合

図22 ピークの到達時刻と持続時間の定義  
(A：波形形状が単峰の場合、B：多峰状態の場合)

の腰部加速度は55.8 msで18 Gと3体のダミーのうち最低であり、ATD #2が最高の22 Gであった（付録1の36/41図上段、37/41図下段、39/41図）。また、腰椎の圧縮荷重の最大（下方向）はATD #1が-4.9 kN、ATD #2が-5.7 kNと最も高く、ATD #3は-4.5 kNと最も低かった。ここで、同一胴体ステーション（FSTA+2508）上にあるATD #1とATD #2との腰椎圧縮荷重の差異についての詳細な検討は、今後、座席単体の試験等を行い検討する必要があるが、ATD #1が着座した16 G対応型シートとATD #2が着座したシート構造の外観を見る限りでは、16 G対応型シートの後脚柱に用いられている弧形の衝撃吸収構造やクッション材の厚さ（従来型の1.5～2倍程度厚い）等による衝撃吸収の効果によるものと考えられる。また、人体ダミーの荷重値はCFC 1000とCFC 60による差異は殆どなかった。前方16 Gシートで骨盤部での安全を保障する荷重限度を1500 Lbsfと規定するFARの現行基準（6.7 kN）との比較では、最大でも-5.7 kNと許容値を下回っていた（付録1の40/41図下段、付録2の40/41図下段）。ピーク到達時刻は腰部加速度と比較して荷重の応答で約5 ms遅れている（付録1の36/41図上段、40/41図上段）。

代表位置の最大加速度を上下の矢印の長さで、また、その発生時刻を図23と図24に示す。ここで示した加速度及び荷重の最大値は応答がほぼ収束する200 msまでの間

表5 代表点の上下方向の加速度及び腰椎圧縮荷重の最大値，そのピーク到達時刻，持続時間及び継続する応答部分の全体継続時間の一覧表

計測点	(+)ピーク 最大値	ピーク 到達時刻 (msec)	持続時間 (msec)	継続全体の 持続時間 (msec)	(-)ピーク 最大値	ピーク 到達時刻 (msec)	持続時間 (msec)	継続全体の 持続時間 (msec)
FSTA. +1800 フレーム最底部加速度	351G 98G	2.7 2.5	1.2 5.5	1.2 5.5	-103G -16G	3.5 10.5	0.6 7.5	0.6 7.5
FSTA. +1800 右ストラット下部加速度	235G 67G	41.1 49.2	1.2 7.4	1.2 7.4	-230G -15G	11.0 2.8	0.8 4.2	0.8 4.2
FSTA. +1800 左シートレール窓側加速度	89G 32G	6.8 6.0	0.6 9.7	0.6 9.7	-73G -15G	10.6 11.9	1.8 5.3	1.8 5.3
FSTA. +1800 左シートレール通路側加速度	244G 58G	54.4 48.2	1.2 7.6	1.2 7.6	-168G -53G	36.0 13.3	1.2 4.2	1.2 4.2
ATD-#1 腰部加速度 (SEAT #1L)	18G 17G	55.8 57.5	40.2 37.0	98.2 72.0	-4G -3G	185.0 185.0	102.0 —	102.0 —
ATD-#1 腰椎荷重 (SEAT #1L)	0.6kN 0.7kN	188.0 187.0	109.0 —	109.0 —	-4.9kN -4.8kN	62.1 62.9	58.9 53.0	112.0 117.3
ATD-#2 腰椎荷重 (SEAT #1R)	0.6kN —	15.9 —	0.4 —	— —	-5.7kN -5.7kN	61.2 61.4	33.0 39.0	58.0 95.5
ATD-#3 腰椎荷重 (SEAT #2L)	0.9kN 0.7kN	172.5 187.0	30.0 —	— —	-4.5kN -4.3kN	74.3 75.5	48.0 72.0	107.1 108.2

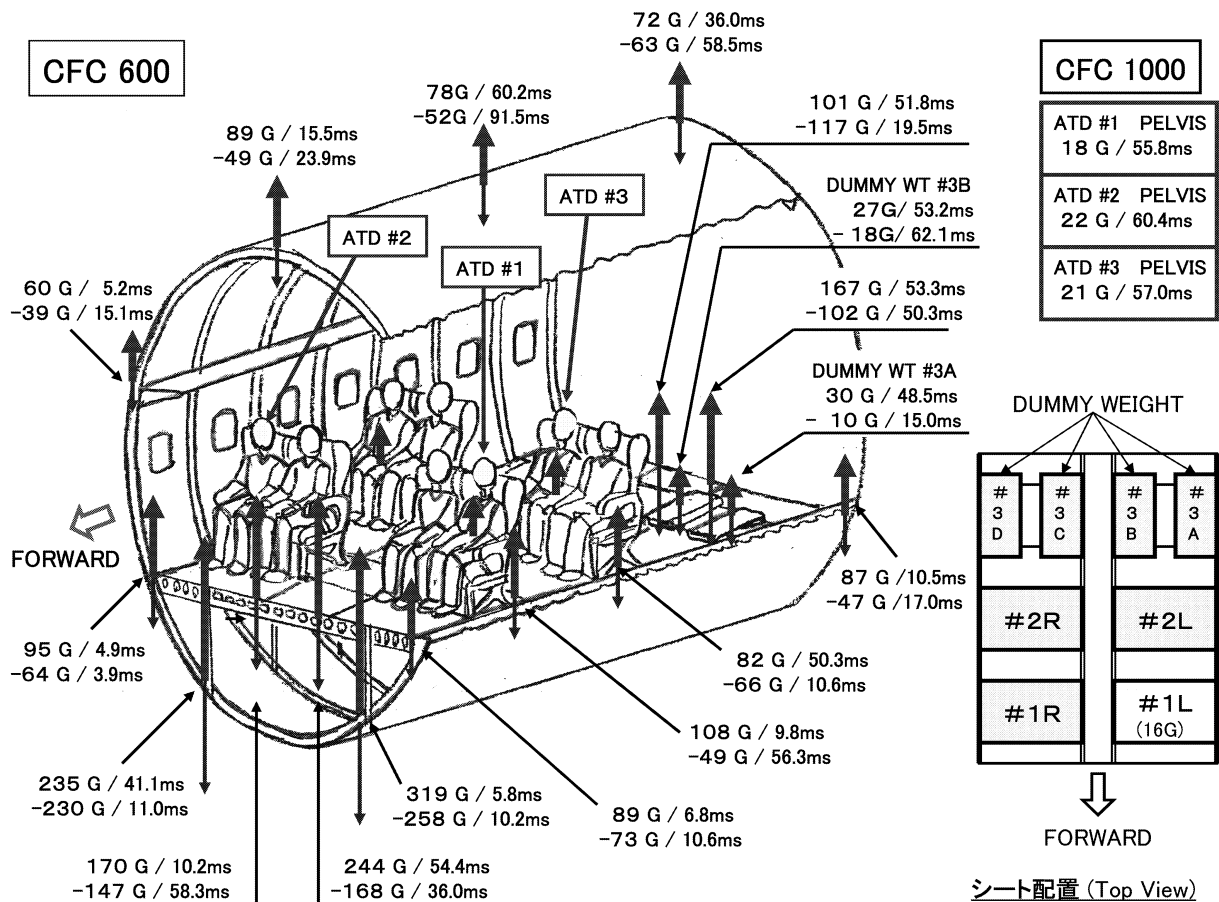


図23 代表位置の最大加速度とピーク到達時刻（CFC 600 処理結果，但し，人体ダミーは CFC 1000 処理結果）

における上下のピーク値とした。図は，供試体フレームの左弦フロア上面部位置より左上側面までの外板を切り取ったイメージでシートと人体ダミー等の配置の概要を示し，最前面フレーム（FSTA+1800）の左右フロア/フレーム接続位置，左右ストラットの下部固定位置，最底部，

右上側面部及最頂部と胴体中央付近の FSTA+3720 フレーム及び後面の FSTA+5160 フレームの左フロア/フレーム接続位置と最頂部及び #1 L シート，#2 L シート後脚柱とシートレール取付部並びにダミーウエイト等で計測した最大加速度値を該当する計測位置に矢印の長さで，供試

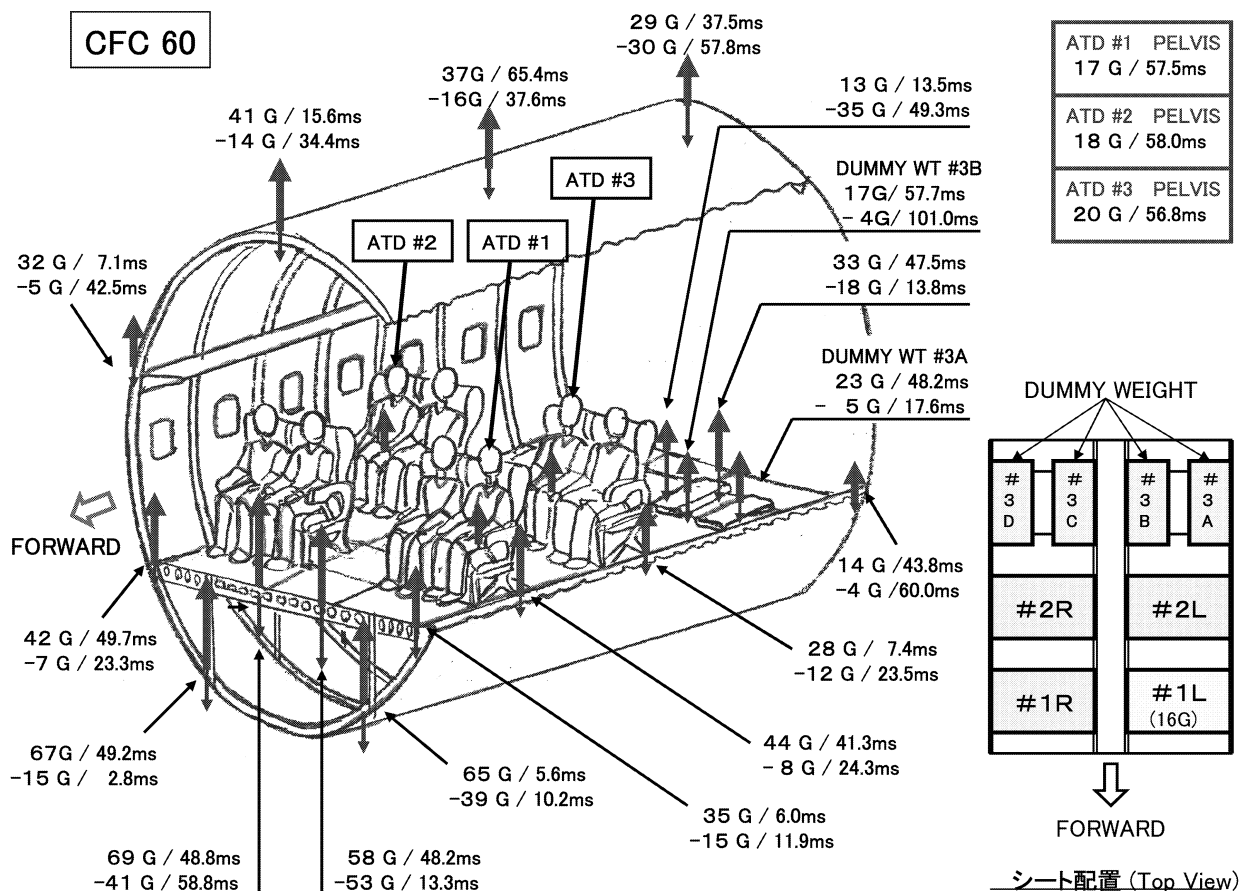


図 24 代表位置の最大加速度とピーク到達時刻 (CFC 60 処理結果)

体全体の加速度の分布を感覚的に比較できるように示したものである。ここで、図 23 は CFC 600 処理による結果であるが、人体ダミーについては CFC 1000 処理によるものである。図 24 は CFC 60 処理による結果である。図では、代表位置を示したが計測したすべての点をまとめると、フレーム最頂部のピークは CFC 600 処理で 64 ~ 90 G と -26 ~ -63 G, CFC 60 処理で 23 ~ 41 G と -7 ~ -30 G, フレーム壁上部 (吊棚付近) 外面のピークは CFC 600 で 44 ~ 90 G と -18 ~ -75 G, CFC 60 で 4 G ~ 32 G と -4 ~ -23 G であった。CFC 600 処理と CFC 60 処理によるピーク値では、CFC 600 による急峻な値で CFC 60 の 2 ~ 10 倍高くなっている。これらフィルタリング処理結果による差異は当然発生するが、今後は、評価対象別の評価方法の詳細な検討が必要と考えられる。また、付録 2 の 3/41 図上段及び 33/41 図下段に示した FSTA+1800 及び FSTA+2760 等のフレーム最頂部では周期約 50 ms の振動が確認されたが静止後に残留変形はなかった。シートレール取付部及びシート前後脚柱の加速度は CFC 60 処理で 40 G 程度であり、チューブ (左右の脚間を結合する部材) の中央部下面位置の加速度 22 ~ 27 G より高い値となっていた。

#### 4.5 最大ひずみ

計測点は各部材の長さの中心位置に設置したため、必ずしも座屈及び曲げ応力の最大位置ではない。図 25 に代表点のひずみ時刻歴応答線図を示す。図の左側 (A) は CFC 600 処理、右側 (B) は CFC 60 処理による結果である。図の横軸は接地時刻を 0 とした経過時間 (ms) であり、加速度応答の記述と同様に 200 ms までを示した。縦軸はひずみ量で  $10^{-6}\epsilon$  単位を ( $\mu$ ) で示した。図は、上段より FSTA+2760 フレーム最底部, FSTA+2760 左ストラット下部, FSTA+2760 右ストラット中央部, #1L シート左前脚柱中央部の正面, #1L シート前方チューブ中央部及び #1L シート後方チューブ中央部のひずみ時刻歴応答を示す。得られた代表点の最大値とその状況としては、FSTA+2760 フレーム最底部では大きく崩壊しているが検出量は内側及び外側とも 1 ~ 数 ms 以内で 1550  $\mu\epsilon$  程度までに達するがこれ以上とはならず、約 9 ms で荷重方向が逆転し小さな値となる。この部分のフレームは接手補強板でリベット結合されており、このリベットの剪断または接手補強板の破断により崩壊が発生しているため、計測点付近のフレームには大きなひずみが生じなかったものと考えられる。FSTA+2760 左ストラット下部のフレーム内側では約 28 ms で、-11000  $\mu\epsilon$  のひずみ値を検出し、



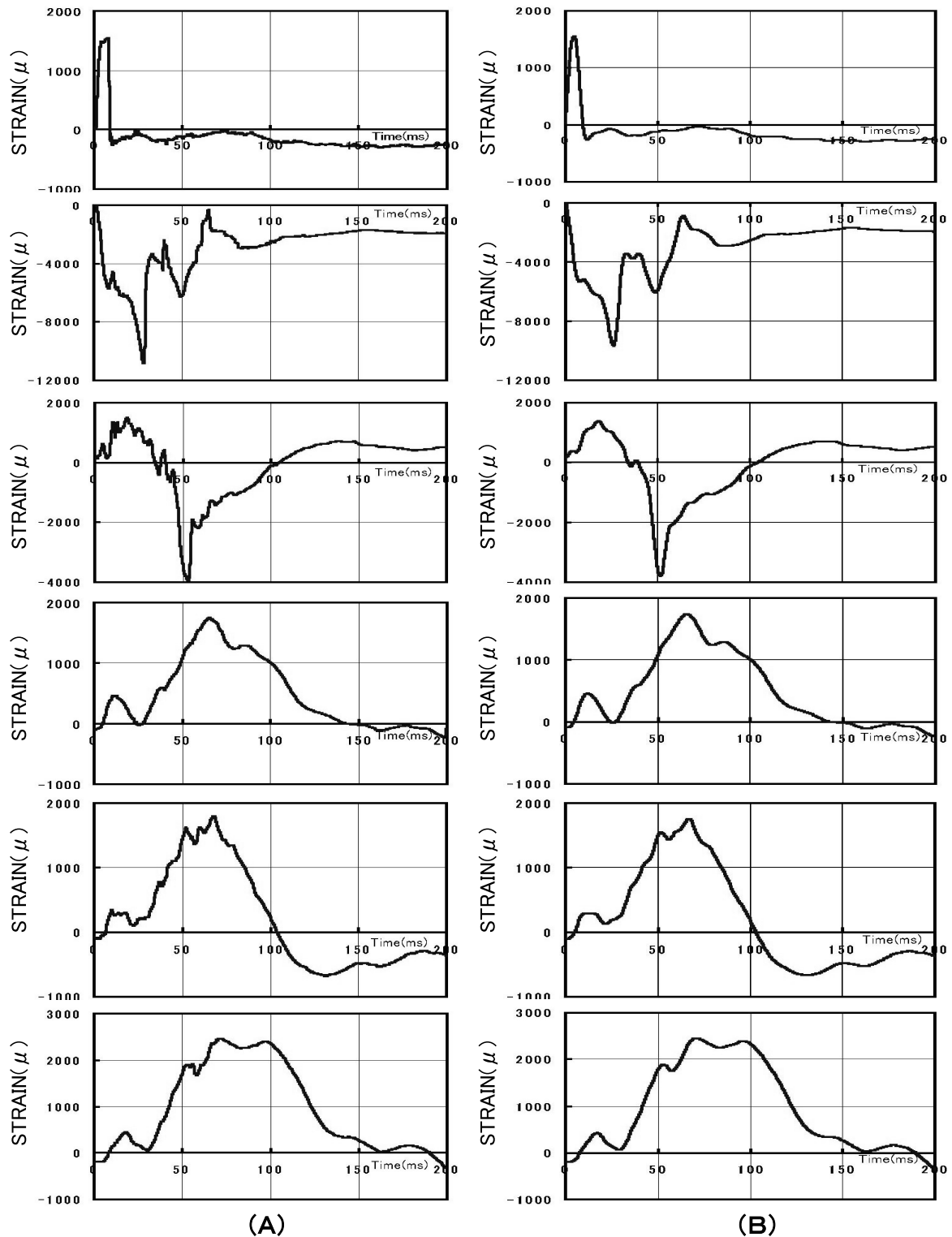


図25 代表位置のひずみ時刻歴応答線図（A：CFC 600 処理結果，B：CFC 60 処理結果）  
 図の説明：上段より，FSTA+2760 フレーム最底部，左ストラット下部，右ストラット中央部，  
 #1L シート左前脚柱中央部の正面， #1L 前方チューブ中央部， #1L 後方チューブ中央部

崩壊している．図26にフレームの崩壊状況を示す．図は，FSTA+2760 フレームの左ストラット下部付近を後方より観測したもので，ひずみゲージ位置近傍で崩壊が発生している様子が確認できる．ストラット単体では，付録3

の図15/15上段に示したCFC 600 処理によるFSTA+3720 左ストラット中央－正面で最大ひずみ7800  $\mu\epsilon$  程度（到達時刻61.3 ms）である．付録3の図1/15上段に示した胴体開口部のFSTA+1800 左ストラット中央－正面では，最大

の圧縮ひずみが $-2400\ \mu\epsilon$ 程度で健全であったが、その他のフレーム位置のストラットは座屈していた。また、図 25 の下 3 段に示すように #1 L シート脚柱及び前・後方チ

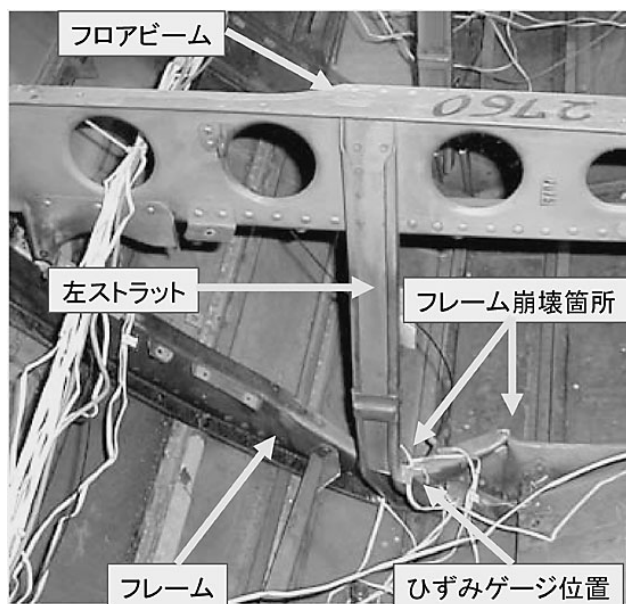
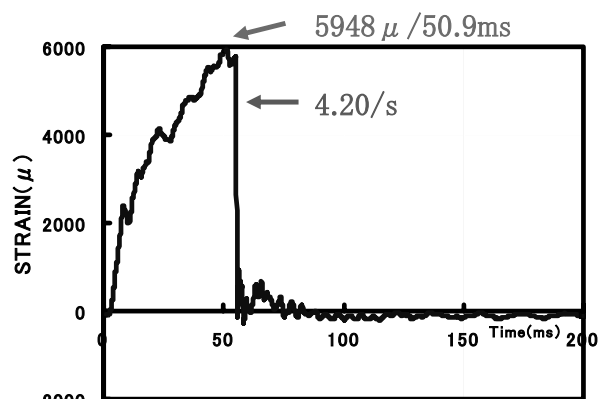


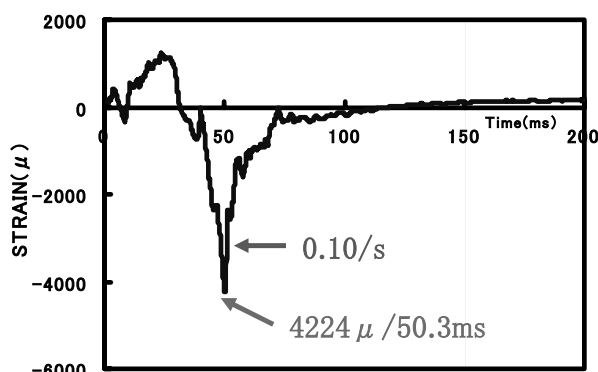
図 26 FSTA+2760 フレームの左ストラット下部の崩壊状況 (供試体の後方より観測)

ューブでは  $3000\ \mu\epsilon$  以下であった。これらの部材は試験後に実施した寸法計測においても、試験前の健全形状の寸法数値と一致、または曲げ変形等が認められなかったことから塑性変形には至らなかったと判断できる。また、ひずみの第 1 次波はフレーム最底部では数 ms に発生するが、シート部では 10 ms 付近にあり、主応答波はフレーム下部及びストラットで約 50 ms、フロアビーム及びシート脚等で約 65 ms ~ 85 ms であった。今回の試験では、FSTA+1800 左ストラット正面-中央の STR-01 計測点と同一計測点のセンサ等で衝撃初期時よりケーブル断線等が発生してデータ不検出なものがあったが、これら計測点がバックアップ計測点であったため、目標の計測点データは全て確保できた。ここでは、計測システムのバックアップ計測の必要性が確認された。

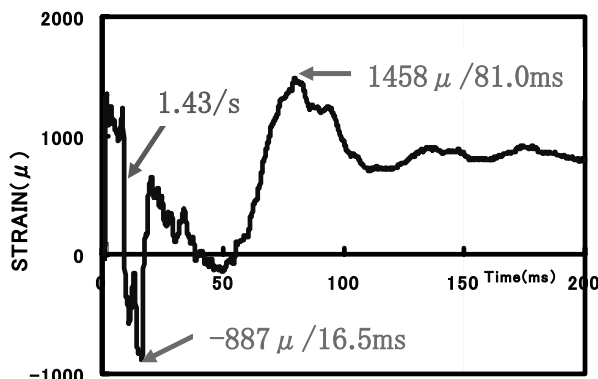
ひずみ速度は、図 27 に CFC-600 処理によるひずみ速度の代表例を示す。上段左図の FSTA+2780 フロアビーム-中央下面において、フロアビームに亀裂が発生したと考えられる 51 ms 付近の時刻で、ひずみ検出量が約  $6000\ \mu\epsilon$  から  $0\ \mu\epsilon$  と一気に下がった瞬間に最高速度の  $4.20/s$  となった。下段左図の FSTA+2780 フレーム最底部-外面においては、約 10 ms 付近の下降で  $1.43/s$ 、下段右図 FSTA+2780 フレーム-左ストラット下部内面では、約



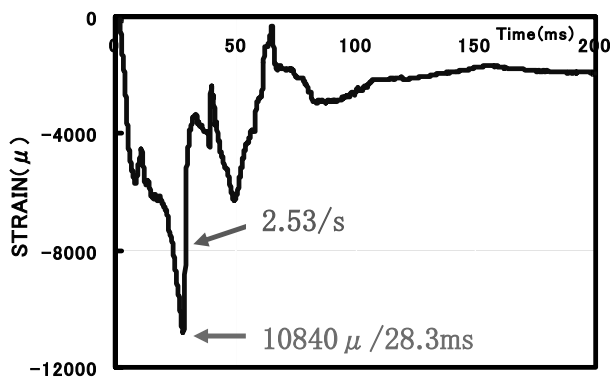
FSTA+2760フロアビーム-中央下面



FSTA+2760左ストラット-中央正面



FSTA+2760フレーム最底部-外面



FSTA+2760フレーム-左ストラット下部内面

図 27 CFC 600 処理のひずみ速度の代表例

30 ms 付近の立ち上がり部では 2.53/s、上段右図の FSTA+2780 左ストラット中央正面では、約 50 ms 付近の立ち上がり部で 0.10/s であった。その他の部分の主応答波では 0.02/s 以下であった。今回の試験で検出したひずみ速度の最高速度は、座屈や曲げ崩壊が発生した位置と検出点が異なるため、局所的な座屈や曲げ崩壊位置の最高速度を解析に反映する場合には、更に検討が必要となる可能性もあるが、当データ上ではアルミニウム合金材の速度依存性は無視できる程度であった。代表点以外のひずみ時刻歴応答線図は、付録3及び付録4に示してある。付録3はCFC 600処理、付録4はCFC 60処理による結果である。

#### 4.6 目視検査結果

試験終了後、構造、内装品について目視検査を実施した結果、床下エリアでは上述のようにフレーム、ストラット及びフロアビームで崩壊、座屈及び亀裂が確認されたが、客室エリアのフレーム、シート及び内装品には変形、脱落等は確認されなかった。図28～図37に代表的な崩壊、座屈及び亀裂状況の例を示す。図28はFSTA+1800フレーム左ストラット下部の崩壊状況を示した写真で、最前面のフレームがFSTA+1800で、縦方向の部材であるストラット下部固定点の内側（胴体中心側）近傍で曲げ崩壊が発生している。ここでは、このフレームの後側になるFSTA+2280フレーム以降も同様な曲げ崩壊が確認できる。図29はFSTA+1800右ストラット下部の崩壊状況を示した写真であるが、図28の曲げ崩壊とは少し異なった状況である。図からも確認できるが、ストラット下部のフレーム間に空調機の外気取入口が設置されている関係から補強部材が追加されている。このために均一なフレームの左側と比較して曲げ崩壊の大きさが少なくなっている。図30より図34はFSTA+1800、FSTA+2280、FSTA+2760、FSTA+3240及びFSTA+3720の床下フレーム中央部の曲げ崩壊（破断）の状況を示す。この部分は、左右からのフレームの結合部であり、補強板でファスナ結合されている。曲げ崩壊は、このフレームと補強板固定用のファスナの剪断による場合とフレームのファスナ孔間に生じた亀裂等が要因でフレームが分断されたことにより発生している。最底部付近では、外板とフレームには隙間が生じたが、外板に亀裂は発生していない。図35、図36及び図37はFSTA+2760、FSTA+3720及びFSTA+4680の左ストラットの座屈状況（供試体の後方より観察）を示したものである。図35は、フレームが後方に傾きながら曲げ崩壊したことに連動して、ストラットも固定部の直上付近で後方に座屈している。図36は、FSTA+3720ストラット取付部近傍のフレームに点検扉が設置されていることにより、フレーム強度が強化されて

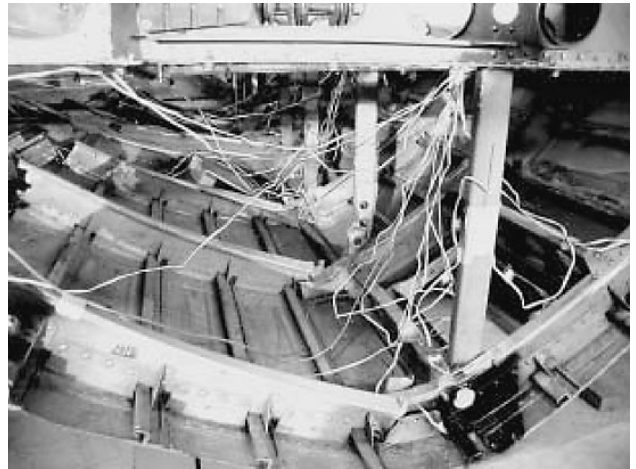


図28 FSTA+1800 フレーム左ストラット下部の崩壊状況

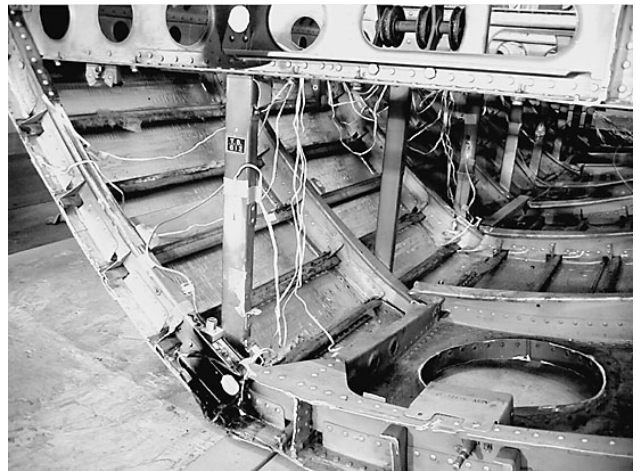


図29 FSTA+1800 フレーム右ストラット下部の崩壊状況



図30 FSTA+1800 床下フレーム中央部の崩壊(破断)状況

いるためフレームの曲がり量が小さかった。ここでは、フレームとフロアビーム間の間隔が減少したことで、ストラットが後方に大きく座屈した。また、図37は、スト





図 31 FSTA+2280 床下フレーム中央部の崩壊(破断)状況



図 34 FSTA+3720 床下フレーム中央部の崩壊(破断)状況



図 32 FSTA+2760 床下フレーム中央部の崩壊(破断)状況



図 35 FSTA+2760 左ストラットの座屈状況 (供試体の後方より観測)

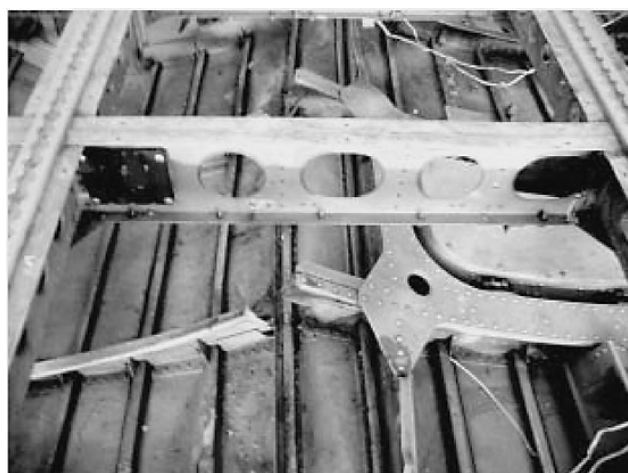


図 33 FSTA+3240 床下フレーム中央部の崩壊(破断)状況

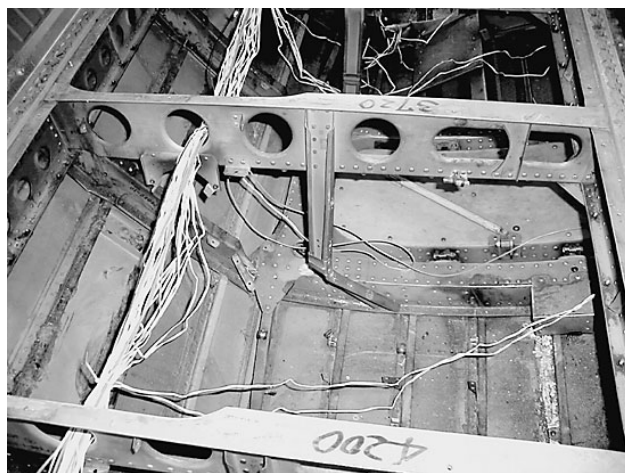


図 36 FSTA+3720 左ストラットの座屈状況 (供試体の後方より観測)

ラット中央より少し上部で前方側に座屈している。図 38 にフロアビームの亀裂位置と状況を示す。フロアビーム

は FSTA+1800 及び FSTA+5160 位置を除く部分で左右のシートレール通路側の内側で、下面より近傍の長円形孔

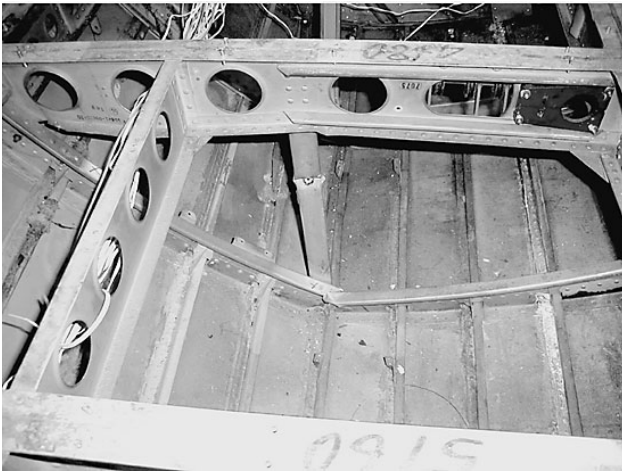


図 37 FSTA+4680 左ストラットの座屈状況（供試体の後方より観測）

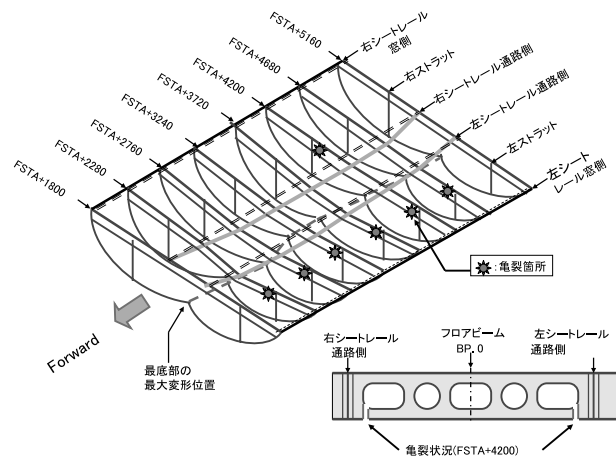


図 38 フロアビームの亀裂位置と状況

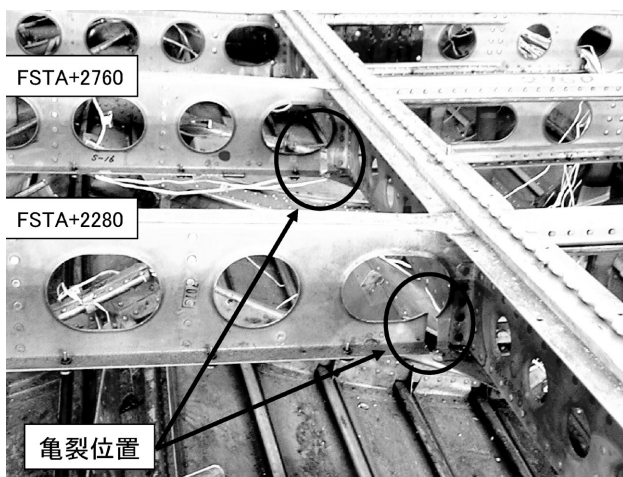


図 39 FSTA+2280 及び FSTA+2760 フロアビームのシートレール左側通路内側の亀裂状況

に向かって直線上に亀裂が貫通していた。図 39 に FSTA+2280 及び FSTA+2760 フロアビームのシートレール左側（L/H）の通路内側部の亀裂状況の一例を示す。

#### 4.7 周波数解析

衝撃試験データはインパクトによる応答のため短時間でその運動が収束してしまうが、構造の変形過程では、フレームの高速度カメラ画像及び時刻歴応答等の一部に低周波の振動成分が含まれている様子が確認されたため構造の固有振動数とピーク波形等との関係を確認した。ここでは、よく知られたアルゴリズムである高速フーリエ変換（FFT）を Visual Basic 6.0 を用いて試みた。

解析は記録データが 10 kHz でサンプリングした離散データであるから最高 5 kHz までの解析が可能であるが、入力信号に 3 kHz のローパスフィルタを挿入してあり、また、1 kHz 以上の高域部分の応答が微小であるため周波数範囲を 1 kHz とした。解析の時間窓には比較的周波数分解能が高い Hanning と Hamming の矩形窓関数を選択して結果を比較してみたが差異は生じなかった。また、入力信号の性質上、低周波数成分が強調される傾向が大きかったが窓関数 Hamming を用いた解析例と加速度時刻歴応答例を図 40 に示す。図は上段（A）より FSTA+3720 フレーム最頂部の加速度時刻歴応答、同位置の FFT 解析結果（B）と FSTA+1800 右シートレール通路側（C）、#1 L シート左前脚柱上部（D）及び後方チューブ中央部（E）の FFT 解析例である。（A）の加速度時刻歴応答では、高次の応答周期の値は判別し難いが、低次では約 46 ms (21.7 Hz) が顕著である。この低次の周波数は、高速度カメラ画像の胴体構造の大きな変形に見られる固有振動数と一致している。（B）の同位置における FFT 解析からは 21.6 Hz に一致した顕著なピークが確認できる。ここでは、高次に対応するものとして 650 Hz から 800 Hz 付近に大きな応答がある。今回の試験では、全機の胴体フープ振動数を確認することはできなかったが、全機胴体の振動数は輪切りの供試体と比較すれば高い筈である。輪切りの胴体落下試験データと比較する場合には支障は発生しないが、全機との比較を行う場合には試験方法（開口部補強等）の検討が必要であると考えられる。（C）のシートレールでは、90 Hz と 225 Hz に顕著なピークがある以外、大きな応答は見あたらない。落下試験前にインパクト加振により計測したフロアビーム中心点での曲げ固有振動数は約 100 Hz であった。試験ではフロアビームの一部に亀裂が発生した部分もあり、この部分の固有振動数が若干低下し 90 Hz 程度となったものと考えられる。（D）のシート脚上部では、フレーム最頂部の主応答波の振動数と一致する 21.6 Hz が最も顕著なピークであり、小さなピークでは 90, 180, 250 及び 370 ～ 450 Hz 等があった。（E）のシート後方チューブでは、（D）と同様にフレーム最頂部の主応答波の振動数と一致する 21.6 Hz のピークと、これより低い 9.5 Hz に、更に顕著なピークが確認された。この振動数は人体ダミーを含むシート全体の固有振動数と考



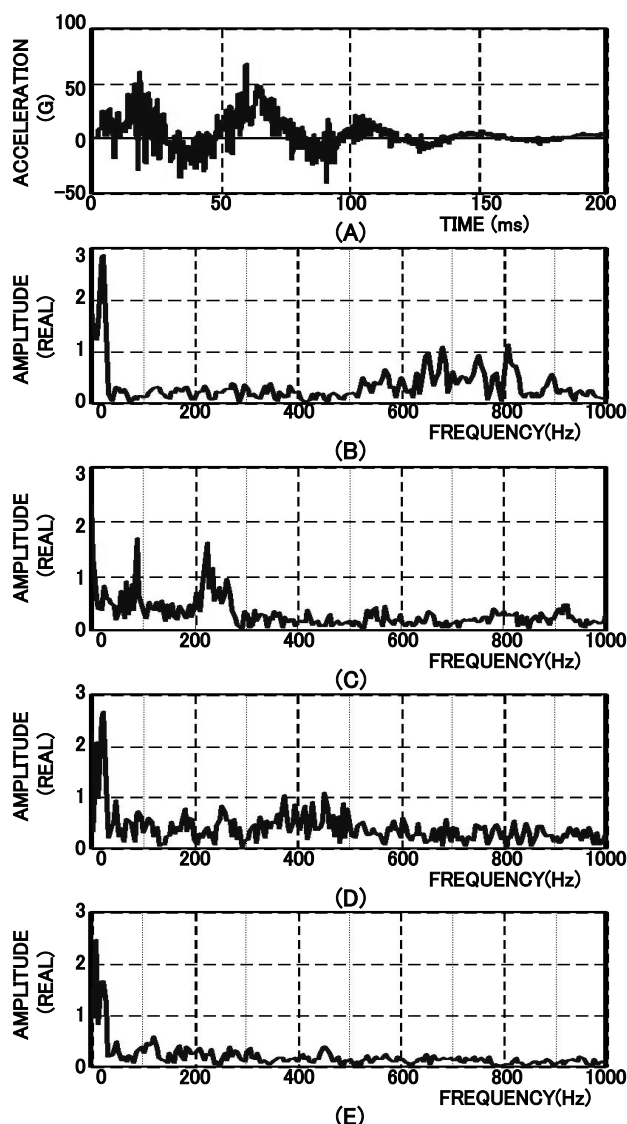


図40 加速度応答線図と代表点のFFT解析例  
(A：FSTA+3720 フレーム最頂部の加速度時刻歴応答，  
B：同位置のFFT解析結果，C：FSTA+1800 右シートレール通路側のFFT解析結果，D：#1Lシート左前脚柱のFFT解析結果，E：#1Lシート後方チューブ中央のFFT解析結果)

えられる。但し，使用したFFTの周波数分解能は約2.4 Hzである。

## 5. 衝撃解析

### 5.1 全般

航空機のクラッシュ事故時の客室安全性研究における重要研究課題の一つには，クラッシュ時の機体応答に関する精度良い解析手法の確立がある。一般に実機レベルの衝撃試験は大規模となり，実施可能な試験条件やその計測コストの面で制限されることが多く，このことが本

分野の研究促進を阻害してきたことは明らかである。もし精度良い解析手法が確立できれば，僅かなコストで様々なクラッシュ条件に関する事故の再構築が可能となり，また設計ツールとして設計初期段階から用いることで，システムチックに客室安全性を確保可能することができる。そこで，航空機のための有限要素法衝撃解析手法確立の基礎を築くことを目的に，YS-11型機の実機胴体構造の落下衝撃試験について乗客／胴体構造連成挙動を含めた衝撃解析を試みた。解析には，自動車衝突問題をはじめ金属加工現象や各種商品の落下衝撃問題等，世界的に幅広く用いられ，近年では乗客ダミーモデルも統合しつつある陽解法有限要素法の非線形動的構造解析コードLS-DYNA 3Dを使用した。

### 5.2 解析モデル

#### 5.2.1 概要

YS-11 胴体断面の解析モデル外観を図41に示す。自動車分野等での有限要素法衝撃解析では，約100 ms程度の解析に日単位の解析時間を要するのが一般的であり，パラメトリックな解析検討等には馴染まない。本解析モデルでは大変形が予想される床下部材の細かい要素分割を確保しつつ解析時間を可能な限り短縮するため，解析モデルの簡素化を進めた。その結果，総要素数約40,000，総節点数約37,000となり，100 msまでの解析がワークステーション上で約10時間程度となったことから，一晩の夜間ジョブで充分解析可能なモデル規模となっている。

#### 5.2.2 胴体構造モデル

胴体構造にシートと搭乗者を搭載した衝撃解析モデルを考える。解析モデルで使用した各要素は，対象部材の特徴（ビーム状か板状か，等）やその予想変形状態に対して適切な精度を得られるように開発されている種々の有限要素タイプの中から選定した。構造外板及びフレーム，シアタイ（相互の構造部材を組立てる結合部品），フロアビーム，ストラットのウェブ部には，部材の大ひずみ変形に対して推定精度の低下が少ないBelytschko-Wong-Chiang シェル要素を，また，これらのフランジ部，ストリンガー，窓フレームにはHughes-Liu ビーム要素（LS-DYNA 3Dのデフォルト要素）を用いた。なお，多くのカットアウト（組立構造にある軽減孔のような比較的小さな開口部分），継手，ファスナ等の細部はモデル化を省略し，解析モデルの簡素化を計っている。

胴体構造の材料モデルは，一般的な金属等方性弾塑性材料モデルの\* MAT\_PIESEWISE\_LINEAR\_PLASTISITY（これは，LS-DYNA 3Dを利用するためにプリプロセッサから与える入力データの固有な定義名。以下同様）を用いた。材料のひずみ速度依存性については，FAAの試験

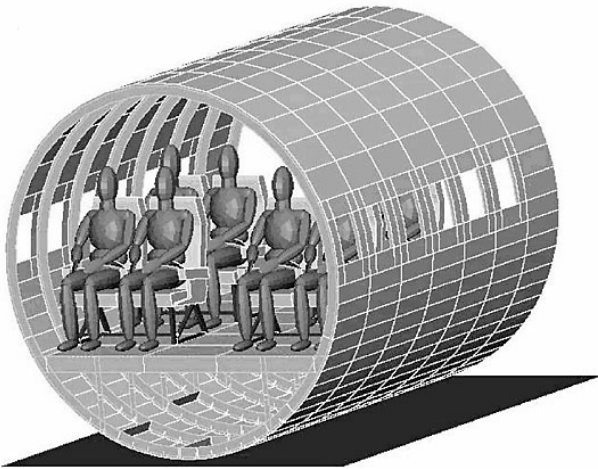


図 41 解析モデルの外観

研究データ<sup>17)</sup>等を参考にLS-DYNA 3Dで使用可能な方法として、アルミニウム合金材強度のひずみ速度に対する増加倍数（応力倍数と呼称する）を関数で定義することで考慮した。本解析に用いたアルミニウム合金のひずみ速度依存性を図 42 に示す。

### 5.2.3 乗客シートモデル

YS-11 用乗客シートの解析モデルを図 43 に示す。シートクッションにはソリッド要素を、背板と底板にはBelytschko-Tsay シェル要素（LS-DYNA 3D のデフォルト要素）を、シートベルトにはBelytschko-Tsay シェル要素と\* ELEMENT\_SEATBELT を用いた。またシート脚部は各棒部材を線形バネ要素でモデル化した。個々の剛性等は、類似シートの実測データ<sup>18)</sup>等を参考に設定した。胴体構造モデルと同様にモデルの簡素化を計った結果、シート単体での総要素数は4,300、総節点数は5,000となっている。

なお本シートモデルは、今後、後に述べる乗客ダミーモデルと共に、YS-11 用シートのスレッド試験（走行する台車を急停止させる方式による衝撃試験）のデータを用いて改良する予定である。

### 5.2.4 乗客ダミーモデル

本解析に用いた乗客ダミーモデルを図 44 に示す。乗客ダミーモデルには、近年LS-DYNA 3D に統合された\* COMPONENT\_GEBOD で自動生成される 50 th パーセントイル米国成人男性の乗客ダミーを模擬した GEBOD ダミーモデル<sup>19)</sup>を用いた。

本ダミーモデルは1970年代に自動車乗員衝突解析用として米国 Calspan Corporation が開発した GOOD (Generator of Occupant Data) プログラムを基に拡張された人体モデルである。本モデルは15個の剛体要素とこれらを結合するバネ・ダンパ要素で構成されるため、マクロな動的挙動解析にしか向かないが、モデルが簡素である故に解析時間等への負担が極めて軽いため本解析に用いることと

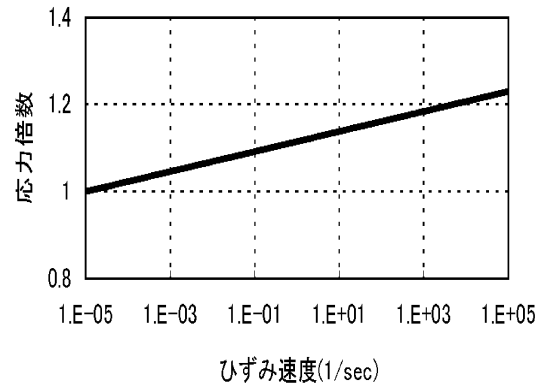


図 42 アルミニウム合金のひずみ速度依存性



図 43 乗客シートの解析モデル

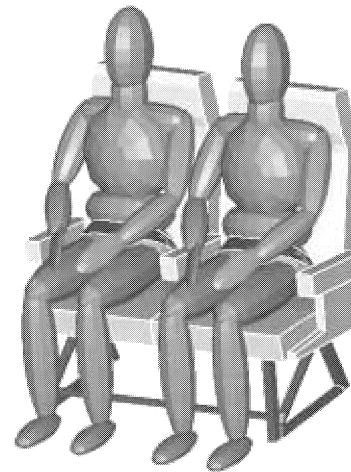


図 44 乗客ダミー・モデル GEBOD

した。

## 5.3 解析条件

衝撃解析モデルには試験形態に合わせて、最前列、中央列のシートに計8体の乗客ダミーモデルを着座させ、最後列のシート取付部には相当ダミーウエイト 350 kg を分散させて配置した。衝突条件を YS-11 型機胴体構造の



落下試験条件にあわせ、本衝撃解析モデルを 6.096 m/s (20 ft/s) の落下衝突速度で剛体平面に自由落下で衝突させた。

#### 5.4 解析結果

解析結果の詳細は別途報告するが、ここではその一例として、破壊モードを紹介する。

YS-11 胴体断面変形の試験と解析との比較を図 45 に示す。両者の破壊モード及び変形量は全般に良く一致している。

### 6. 結 論

今回の落下衝撃試験は、固定翼機としては国内初の試験であり、試験法についても基準がないため米国の

NASA や FAA が従前から多くの実物機体の衝撃試験を実施している方法等を参考として、衝撃解析の開発にも有効なデータを取得することを目的に、試験条件を設定した。結果として前項までに述べたように有効なデータを取得することができた。本試験により以下に示す結果と課題を確認した。

- (1) 人体ダミーの CFC 1000 処理及び CFC 600 処理による上下方向最大加速度は 22 G、腰椎の最大圧縮荷重は 5.7 kN 以下であった。また、CFC 60 処理による結果との差は 0.2 kN 以内であった。この値は FAR Part 25 の現行基準 25.562 で規定する骨盤部での荷重限度 6.7 kN (1500 Lbsf) より下回っており、今回の試験条件は、搭乗者に致命的な損傷は生じなかったであろうと判断できる。また、客室内装部品についても、脱落の発生等がなく搭乗者の非常脱出の妨げとはならなかった。
- (2) シートレールには、供試体全長に対して最大で 40 mm 程度の曲げ撓みが確認されたが、シートの脱落や変形は発生しなかった。
- (3) 加速度応答の全体比較において規定された CFC 60 処理によるデータ解析値と個々の位置での比較に用いた CFC 600 処理による値とでは、2～10 倍の差異が生じる場合があった。今後は、評価対象別の評価方法の詳細検討が必要と考えられる。
- (4) ひずみ速度は、FSTA+2780 フロアビーム中央下面において、この部分に亀裂が発生したと考えられる瞬間に、4.20/s となった。フレーム最底部で 1.43/s、左ストラット下部内面で 2.53/s であった。主応答波では 0.02/s 以下であった。
- (5) 高速度カメラは、解像度 512 × 384 画素、記録速度 1000 Frame/s と設定して記録した。画像解析の分解能は、撮影範囲の画像垂直距離が約 3000 mm であるため、約 7.8 mm/画素となった。試験では左右フロアビーム接続部とプラットホーム上面までの垂直距離の画像解析平均値に近似曲線をあてはめ良い結果が求められた。同様に、最大変形量は 220 mm の解析結果を得たが、最大 4 % 程度の誤差が考えられる。前面 FSTA+1800 フロアビームの変形解析は、実測最大変形量が数 mm 程度と小さかったため不可能であった。今後の画像計測には、撮影範囲を小さくするの局所的部分撮影等の多重撮影を行い、また、より高分解能の機材を利用する等の工夫が必要である。
- (6) 床下構造の衝撃吸収の観点から、衝撃吸収に最適な効果を与える構造設計等を検討するため早期に共同研究で計画している衝撃解析手法を確立することが重要である。
- (7) データ収集では、加速度計測チャンネルの数点が衝

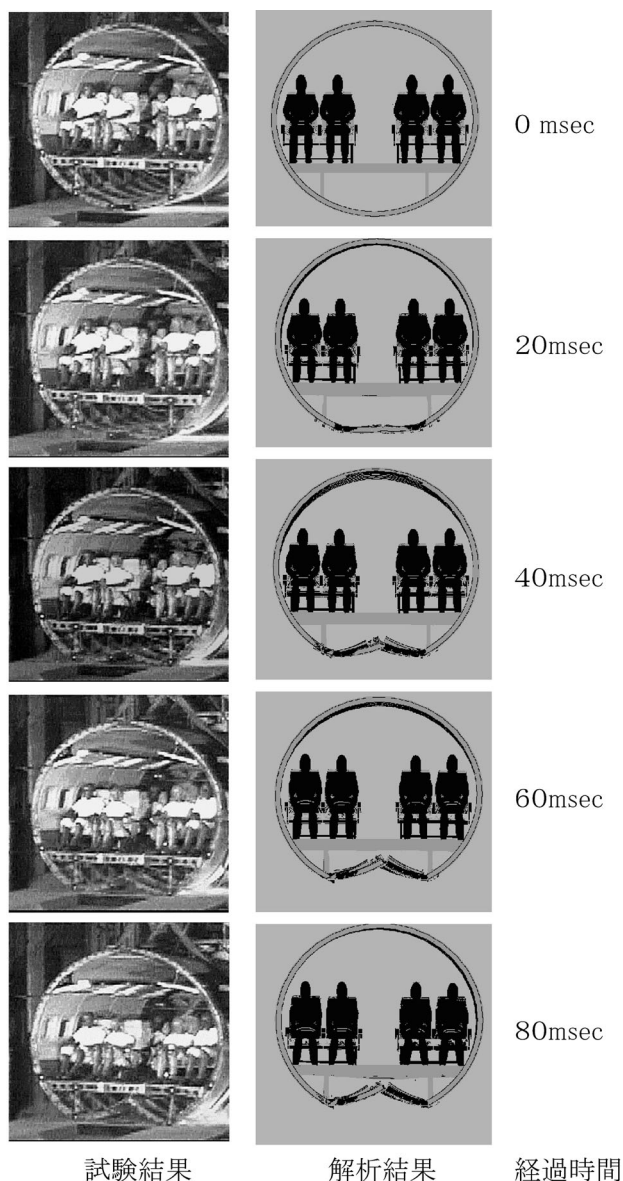


図 45 胴体断面変形の試験と解析の比較

撃負荷の初期段階からデータ不取得となった。また、ひずみ計測は、断線等により一部でデータ不取得となった計測点があったが、バックアップしていた計測点と同一点であったため、計画通りできた。今回の試験では、バックアップ計測を試験経費等の制約から、人体ダミーに関連する計測位置の24チャンネルのみとしたが、大規模な試験においては、データ収集を確保、保証するために計測装置の予備数を十分確保し、更に、計測システムを多重系とすることが重要である。

- (8) 輪切り状供試体の落下衝撃試験では、FFT解析の結果から胴体フレーム最頂部の固有振動数の1つ、21.6 Hzが確認された。同位置の加速度時刻歴応答の大きな周期である約46 ms (21.7 Hz)と一致している。この周波数はフロアビーム、シートレール及びシートにも含まれることがわかった。
- (9) 前方16 G対応型シートと従来型YS-11用シートについて試験結果の差を比較すると、双方のシート構造に永久変形等は生じなかった。また、シート取付部や前脚上部及び人体ダミーの胸部、腰部の上下方向加速度には殆ど差異が見られなかった。しかし、人体ダミーの脊椎部に直接影響を与える後脚柱上部の上下加速度は、16 G対応型シートに対して従来型シートの方が窓側部で2倍、通路側で約30%程度高めであった。また、後脚柱の上部間を結合する後方チューブ中央下面でも同様に従来型シートの方が20%程度高い値を示している。腰椎の圧縮荷重は16 G対応型シートの-4.9 kN（下方向）に対して、従来型シートが-5.7 kNと1 kN程度高い。この差異についての詳細な検討は、今後、座席単体の試験等を行い検討する必要があるが、双方のシート構造の外観を見る限りでは、16 G対応型シートの後脚柱に用いられている弧形の衝撃吸収構造やクッション材の厚さ（従来型の1.5～2倍程度厚い）等による衝撃吸収の効果によるものと考えられる。

## 7. 謝 辞

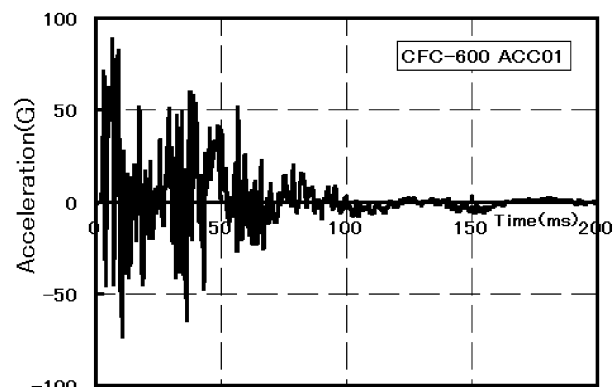
試験実施に当たり、米国FAA Technical Centerの研究協力、国土交通省航空局からの情報提供、エアーニッポン株式会社からの供試体提供、小糸工業株式会社からの16 G対応座席の提供、三菱重工業株式会社及び天龍工業株式会社からの研究支援、株式会社共和電業及び株式会

社日本ローパーの計測支援を戴いた。また、材料特性の取得試験では、先進複合材評価技術開発センターの小笠原俊夫氏、青木卓哉氏、松嶋正道氏に、データ処理には、横河電機株式会社T&M PMK部の大隅雅之氏及び構造材料研究センターの宮木博光研究員にご協力を戴いた。ここに謝意を表します。

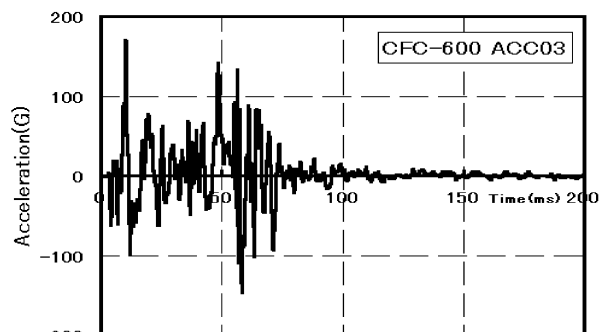
## 参考文献

- 1) H. De Haven: SAE Paper 520016 (1952)
- 2) G. M. Preston, *et al*: NACA-TN 4158 (1958)
- 3) H. C. Spicer, Jr., *et al*: SAE Paper 640316 (1964)
- 4) 例えば R. J. Hayduk: NASA CP 2395 (1986)
- 5) S. J. Soltis: Int. Conf. on Cabin Safety Research (1995)
- 6) A. Abramowitz, *et al*: DOT/FAA/AR-00/56 (2000)
- 7) R. McGuire, *et al*: DOT/FAA/AR-96/119 (1999)
- 8) A. Abramowitz, *et al*: DOT/FAA/AR-99/87 (1999)
- 9) R. McGuire, *et al*: DOT/FAA/CT-93/1 (1993)
- 10) E. L. Fasanella, *et al*: 3rd Int. KRASH User's Seminar (2001)
- 11) C. M. Kindervater: Crashworthiness of Transportation Systems (Elsevir, 1997)
- 12) I. Kumakura, H. Terada: "Research Plan at NAL on Drop Test of Fuselage Structure of YS-11 Turbo-prop Transport Aircraft", The 3rd International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conf. (2001. 10, FAA/JAA/CAB)
- 13) Allan Abramowitz, Timothy G. Smith, Dr. Tong Vu.: "Vertical Drop Test of a Narrow-Body Transport Fuselage Section with a Conformable Auxiliary Fuel Tank Onboard.", DOT/FAA/AR-00/56 (Sep. 2000)
- 14) SAE, The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space., Surface Vehicle Recommended Practice, SAE-J 211/1 Revised March 1995.
- 15) YOKOGAWA Model 707702 演算機能付加ソフトウェア/User's Manual, (Jan. 2001)
- 16) 山住富也他：理系のためのVisual Basic 6.0 実践入門, Aug. 2000
- 17) Donald R. Lesuer: "Experimental Investigations of Material Models for Ti-6 Al-4 V Titanium and 2024-T 3 Aluminum"; DOT/FAA/AR-00/25
- 18) 財団法人航空振興財団：“将来型客室安全設備の試作研究報告書”；1993, 1994
- 19) LS-DYNA 3D Version 950 Keyword User's Manual, 1999

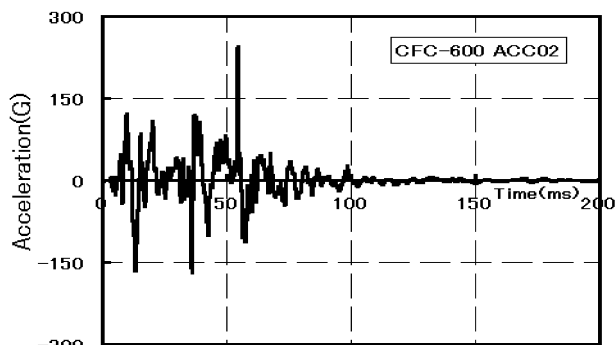
## 付録1 CFC600 処理の加速度時刻歴応答



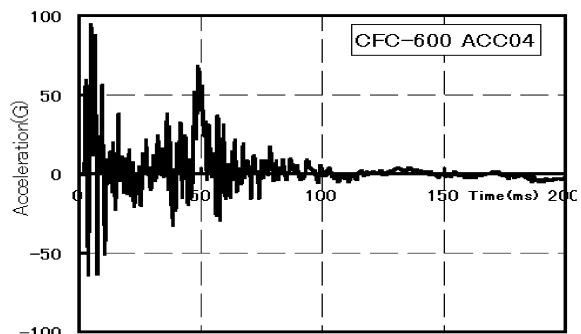
FSTA+1800 左シートレール窓側 (Z方向)



FSTA+1800 右シートレール通路側 (Z方向)



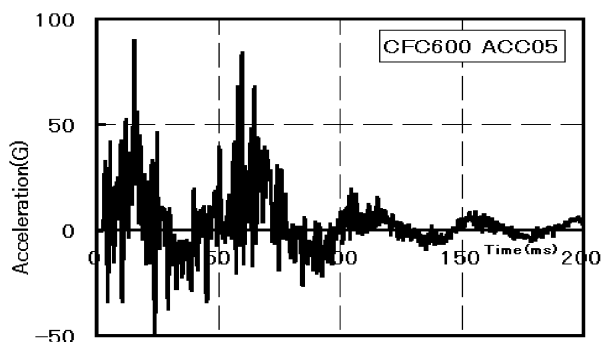
FSTA+1800 左シートレール通路側 (Z方向)



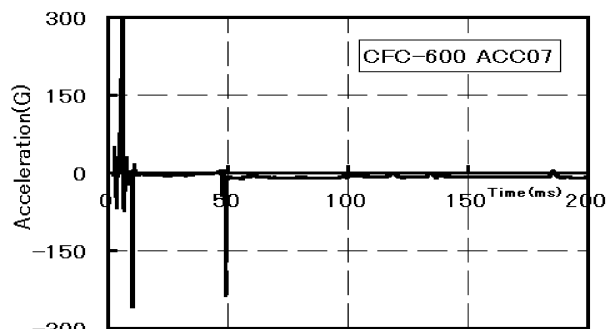
FSTA+1800 右シートレール窓側 (Z方向)

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -1/41

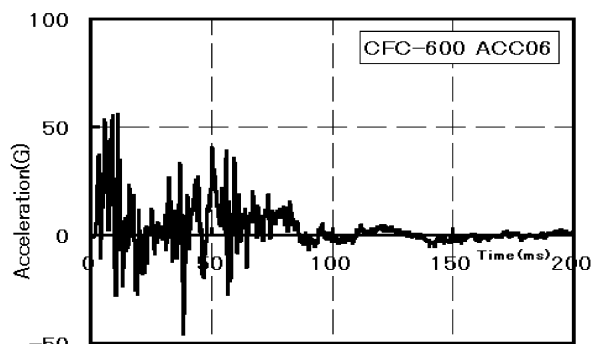
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -2/41



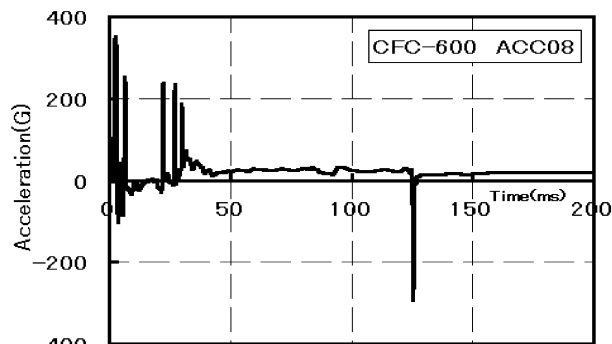
FSTA+1800 フレーム最頂部 (Z方向)



FSTA+1800 フレーム・左ストラット下部 (Z方向)



FSTA+1800 フレーム左上側面 (Z方向)

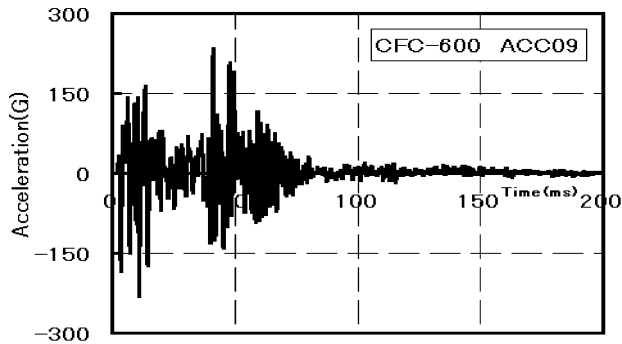


FSTA+1800 フレーム最底部 (Z方向)

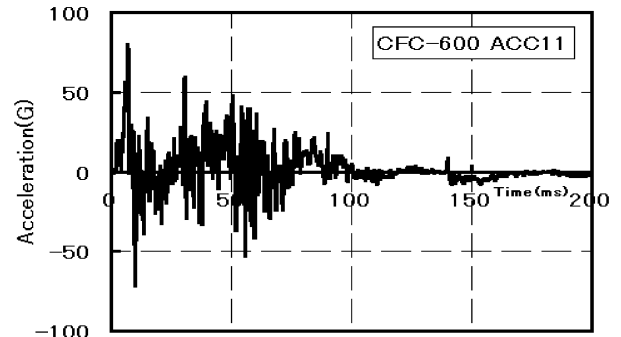
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -3/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -4/41

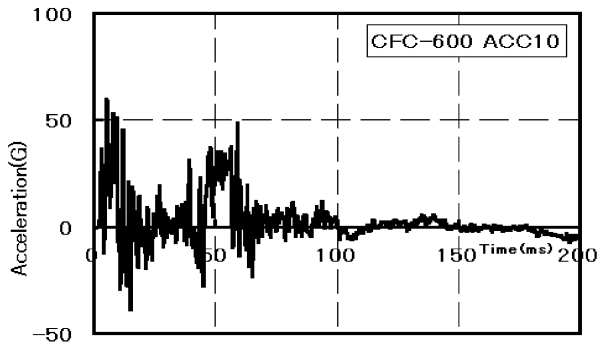




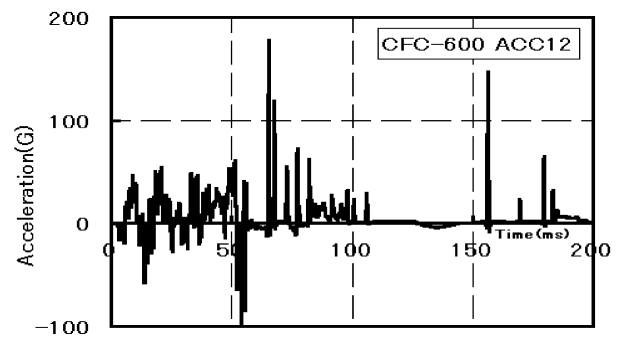
FSTA+1800 フレーム・右ストラット下部 (Z方向)



FSTA+2280 左シートレール窓側 (Z方向)



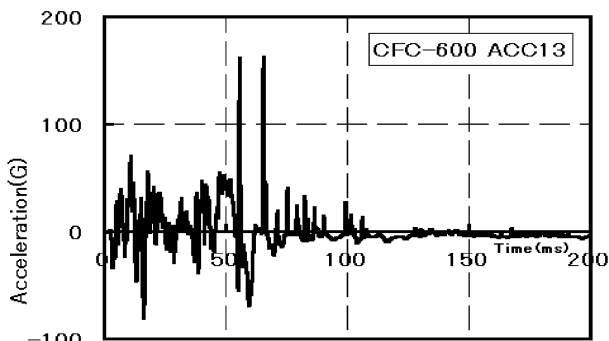
FSTA+1800 フレーム右上側面 (Z方向)



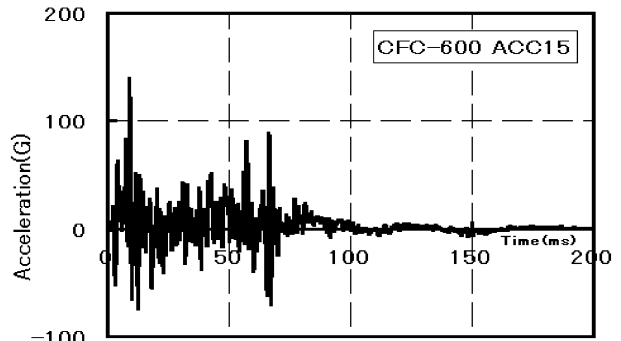
FSTA+2280 左シートレール通路側 (Z方向)

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -5/41

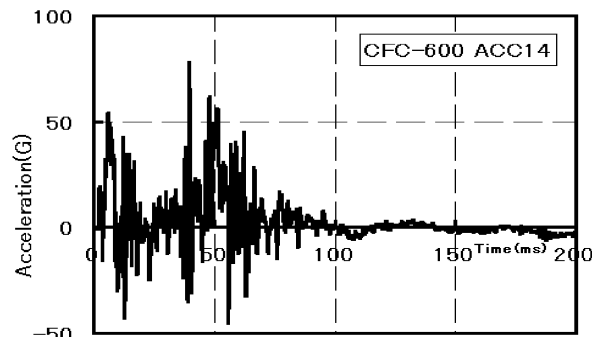
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -6/41



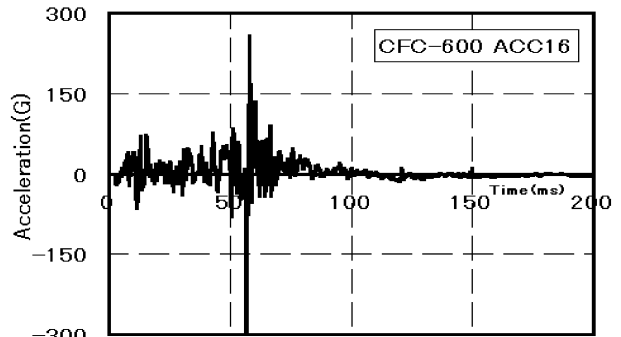
FSTA+2280 右シートレール通路側 (Z方向)



FSTA+3240 左シートレール窓側 (Z方向)



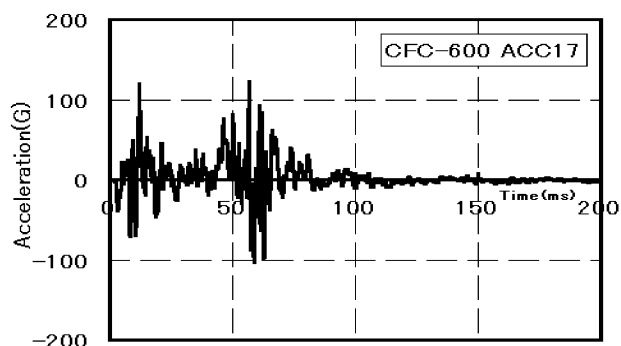
FSTA+2280 右シートレール窓側 (Z方向)



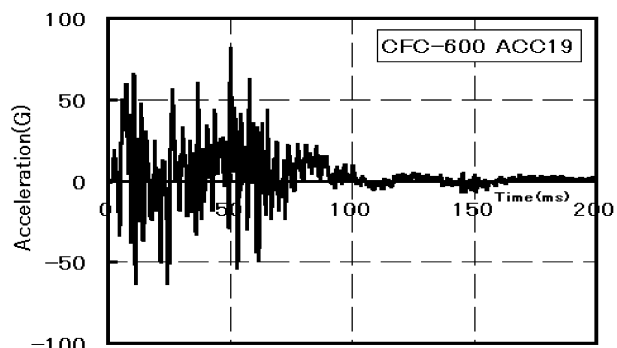
FSTA+3240 左シートレール通路側 (Z方向)

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -7/41

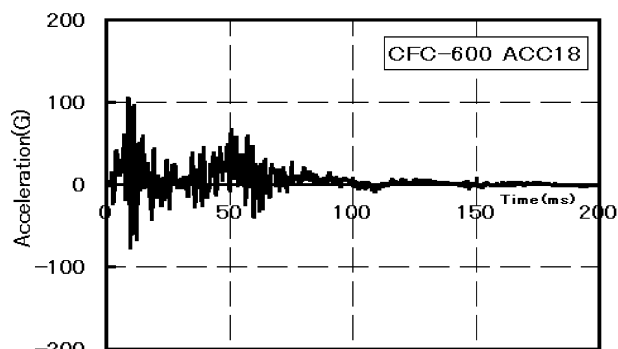
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -8/41



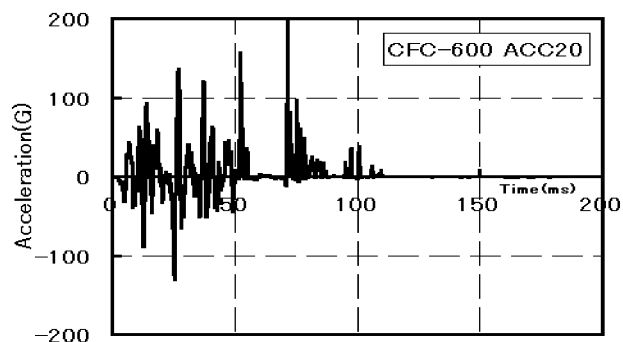
FSTA+3240 右シートレール通路側 (Z方向)



FSTA+3720 左シートレール窓側 (Z方向)



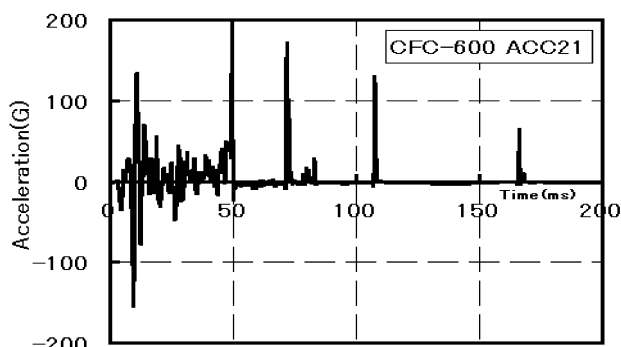
FSTA+3240 右シートレール窓側 (Z方向)



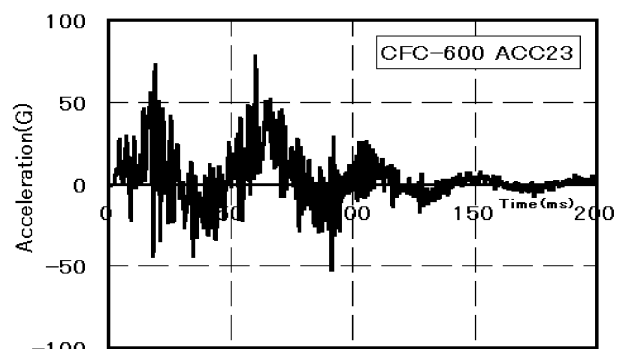
FSTA+3720 左シートレール通路側 (Z方向)

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -9/41

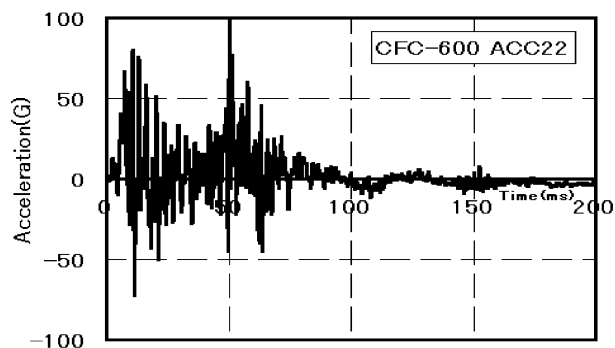
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -10/41



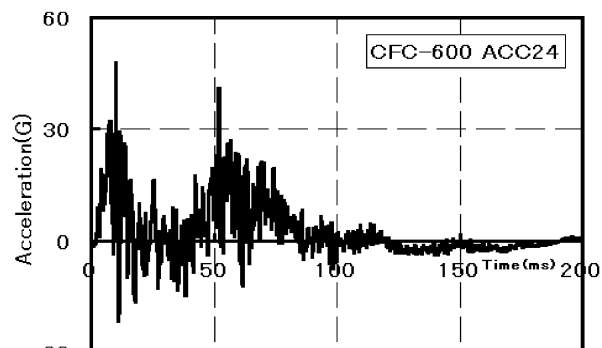
FSTA+3720 右シートレール通路側 (Z方向)



FSTA+3720 フレーム最頂側 (Z方向)



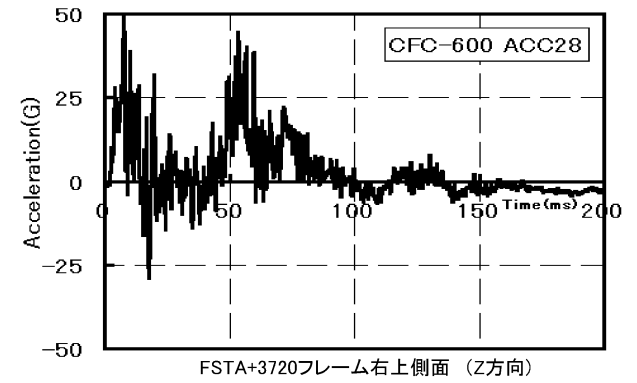
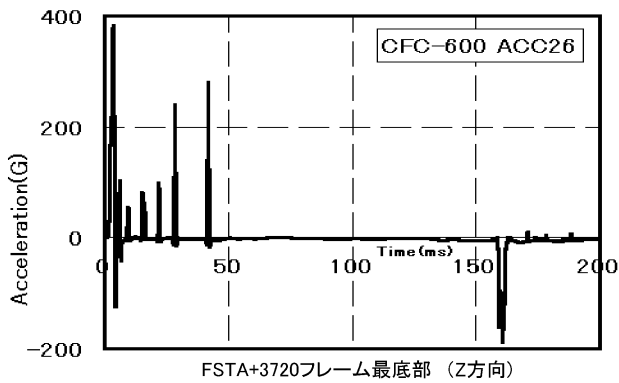
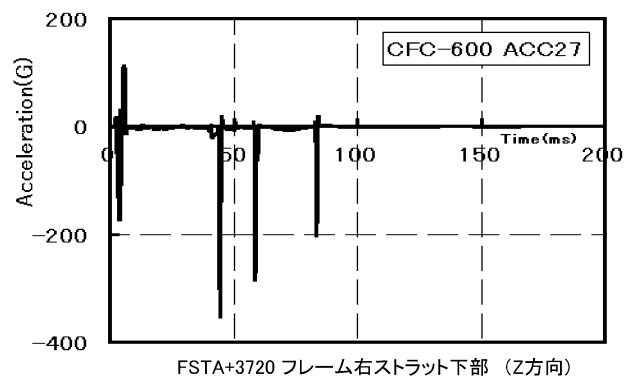
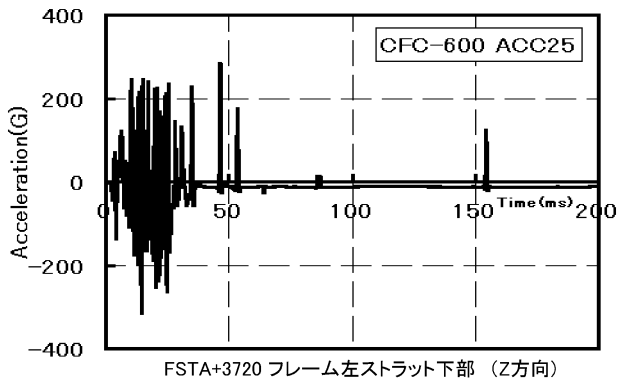
FSTA+3720 右シートレール窓側 (Z方向)



FSTA+3720 フレーム左上側面 (Z方向)

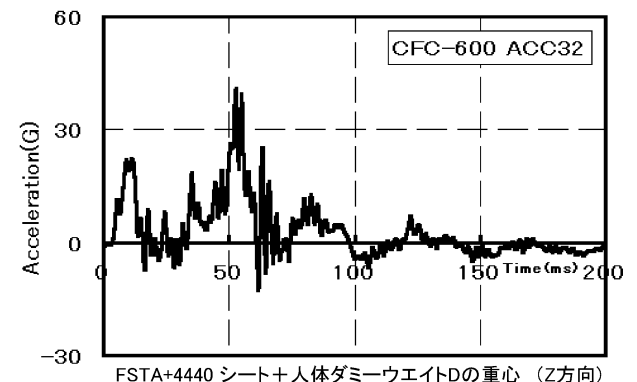
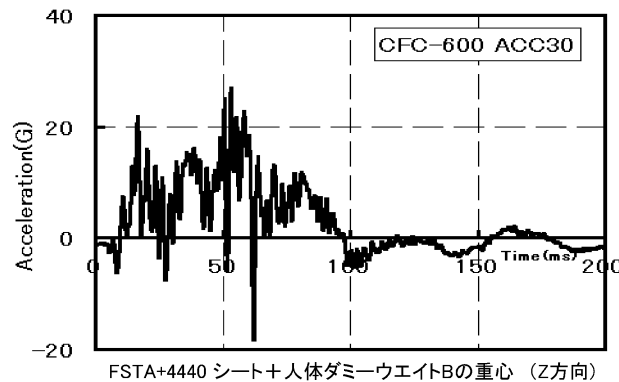
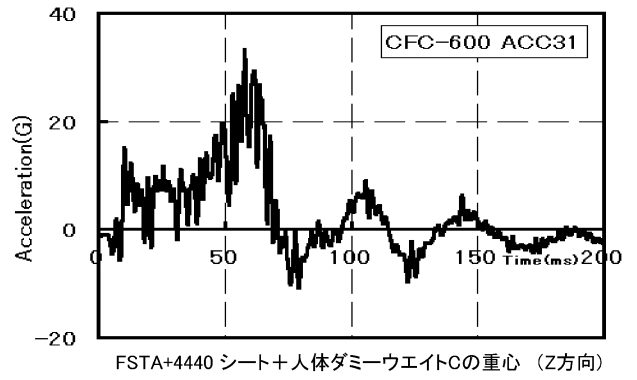
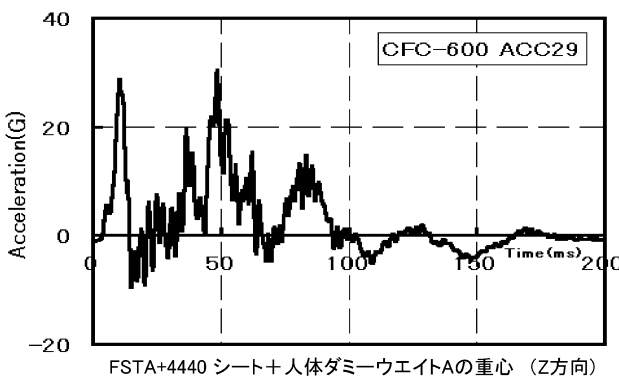
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -11/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -12/41



付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -13/41

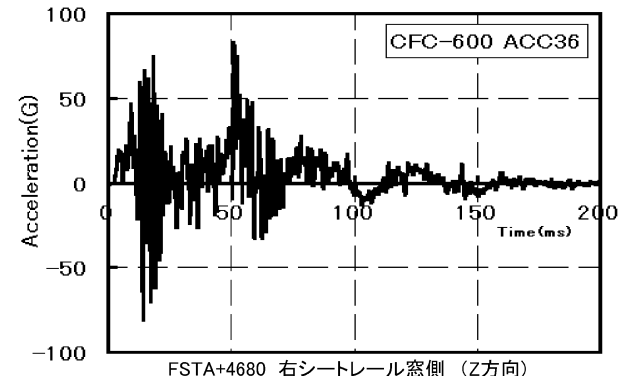
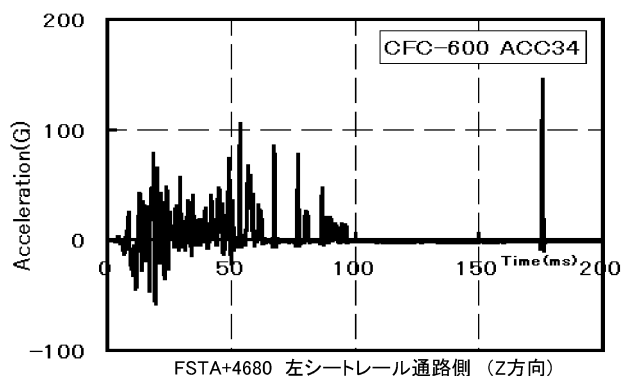
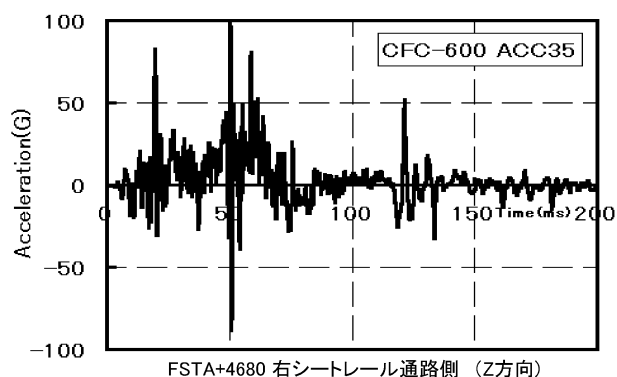
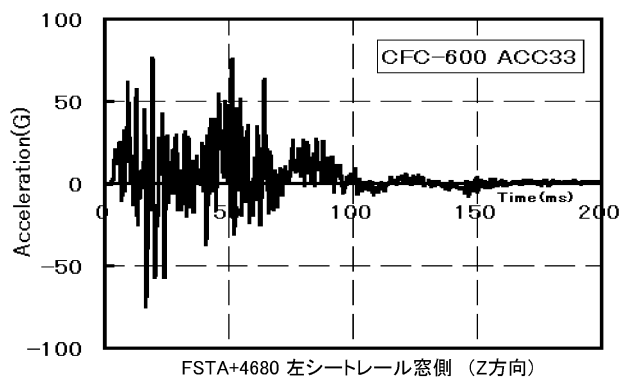
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -14/41



付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -15/41

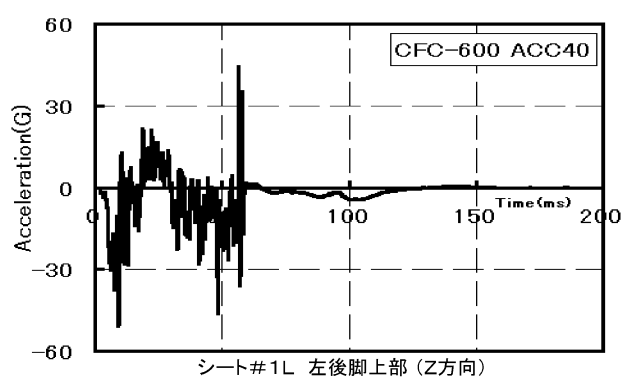
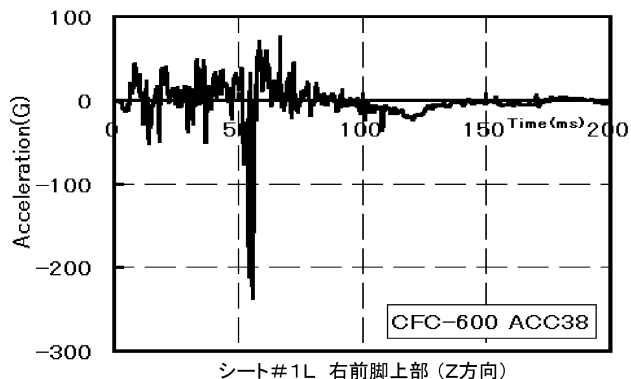
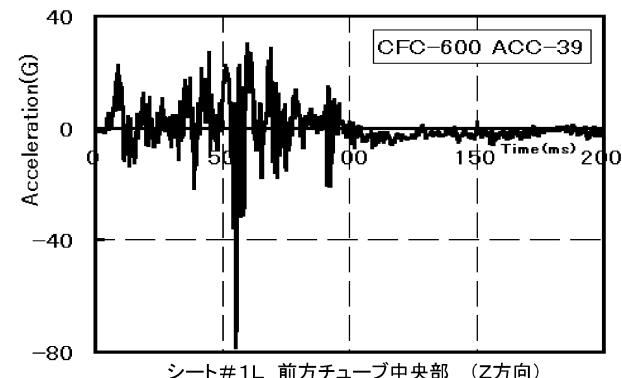
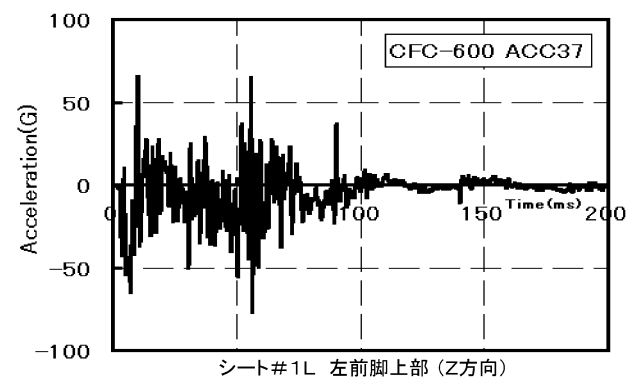
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -16/41





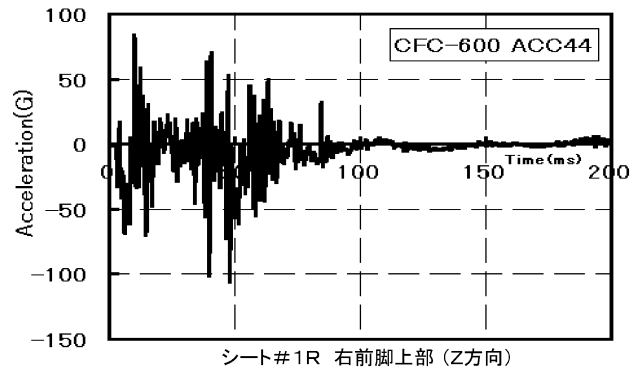
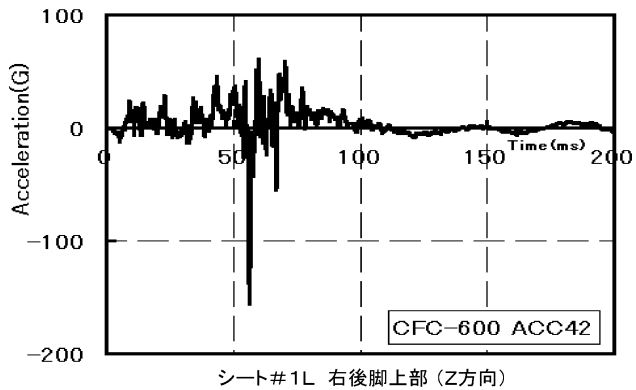
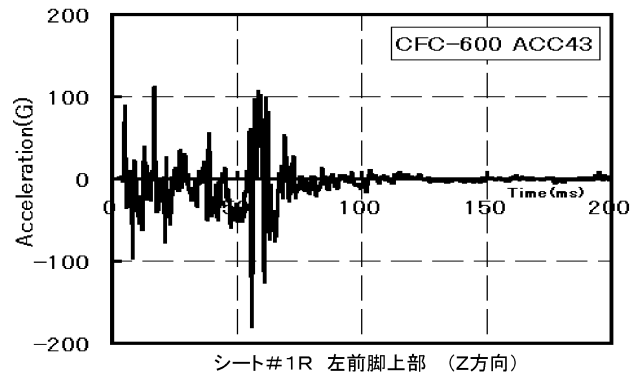
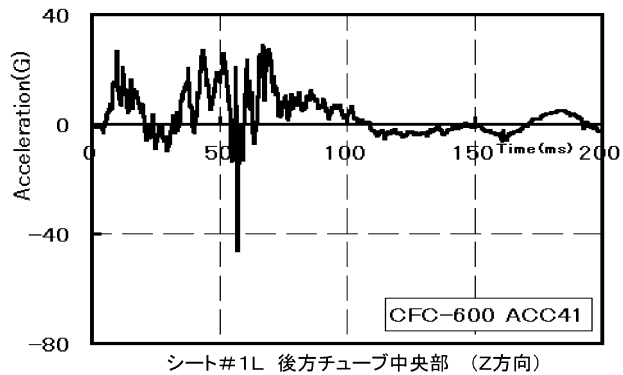
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -17/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -18/41



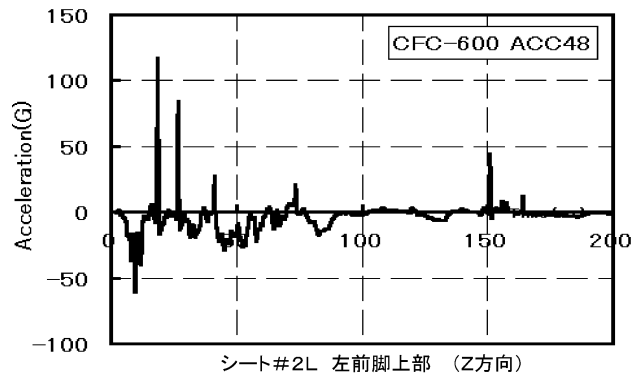
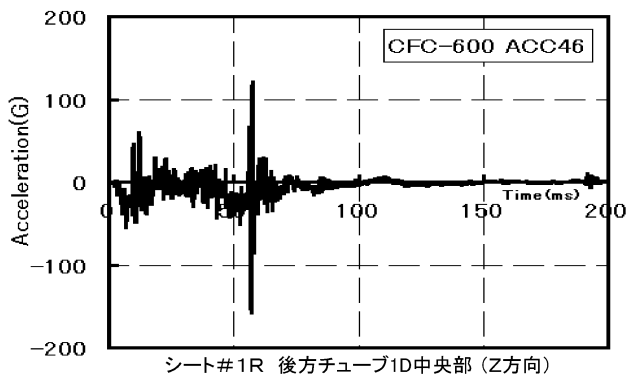
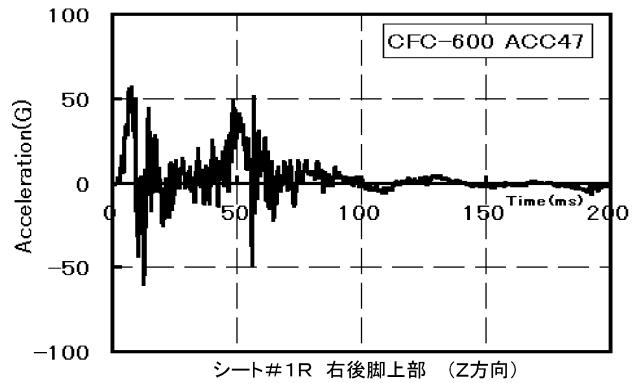
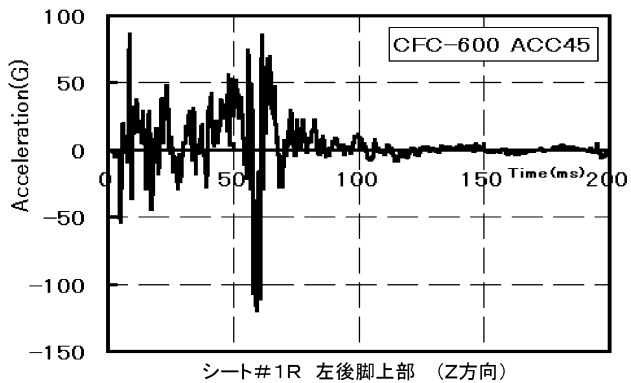
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -19/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -20/41



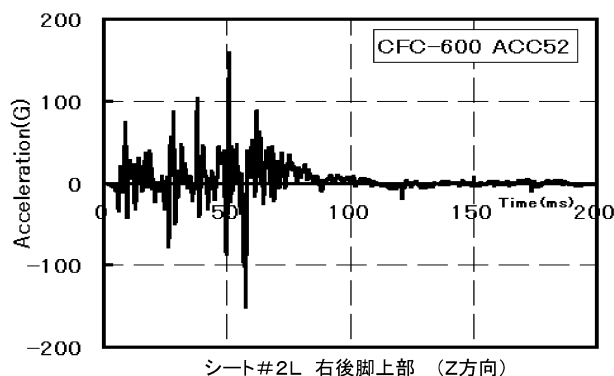
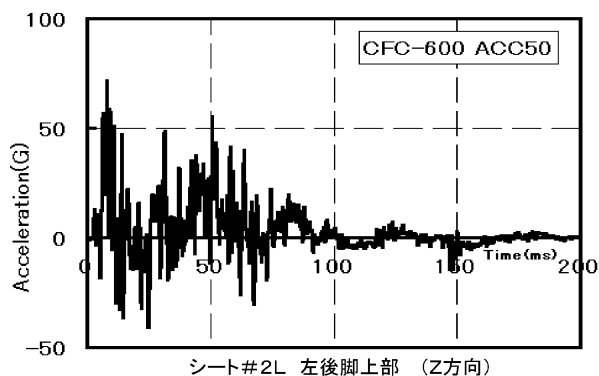
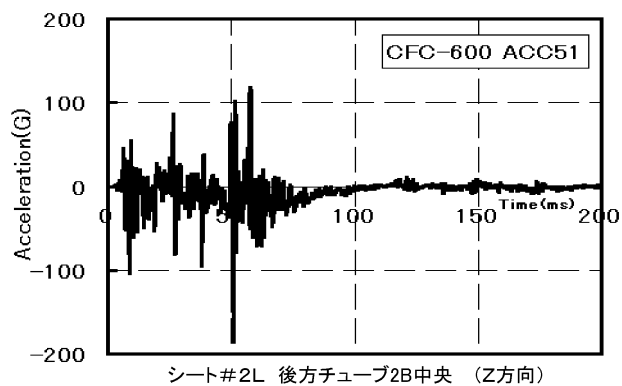
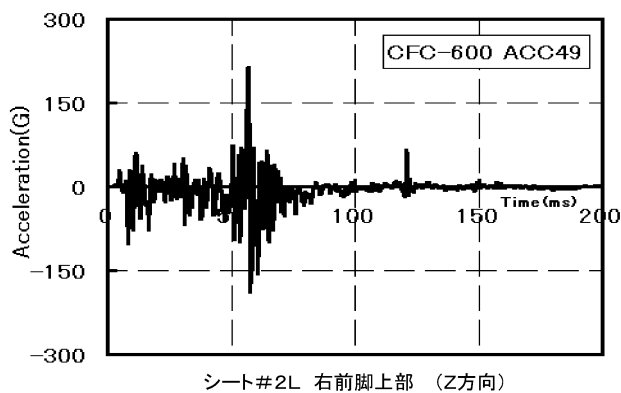
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -21/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -22/41



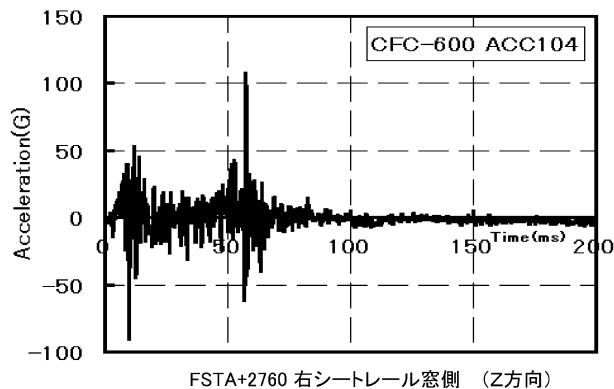
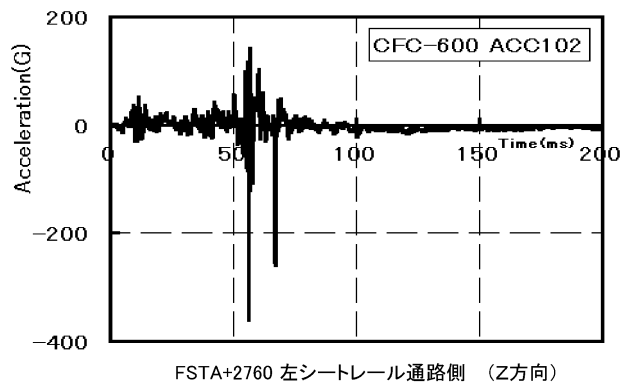
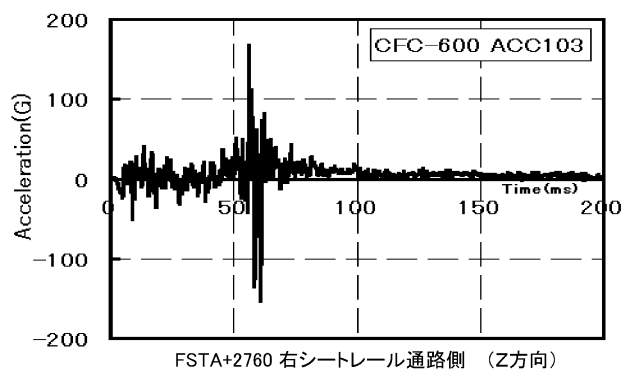
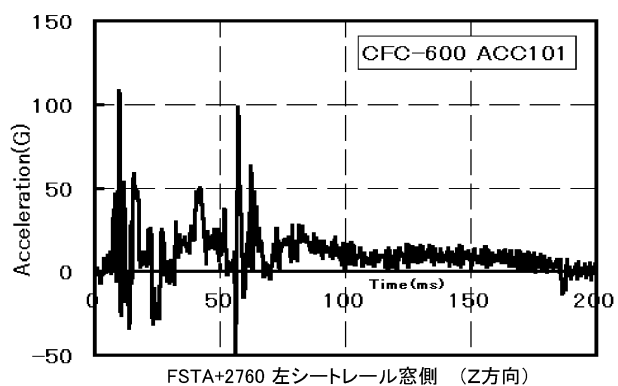
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -23/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -24/41



付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -25/41

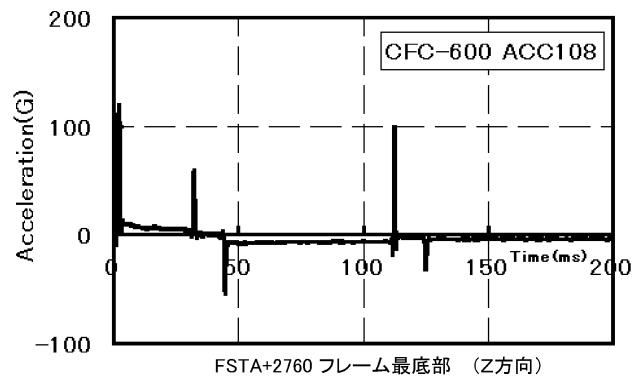
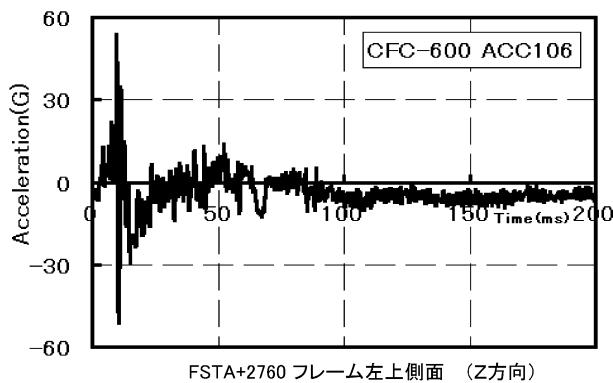
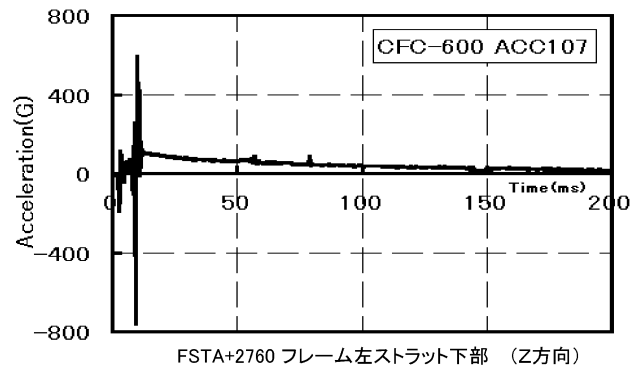
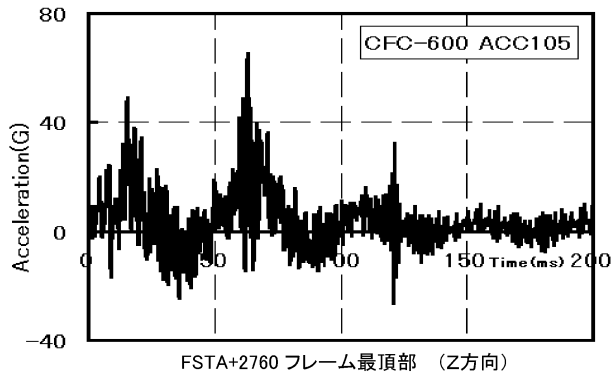
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -26/41



付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -27/41

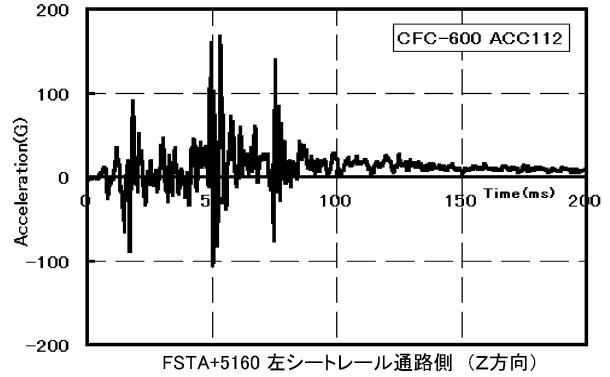
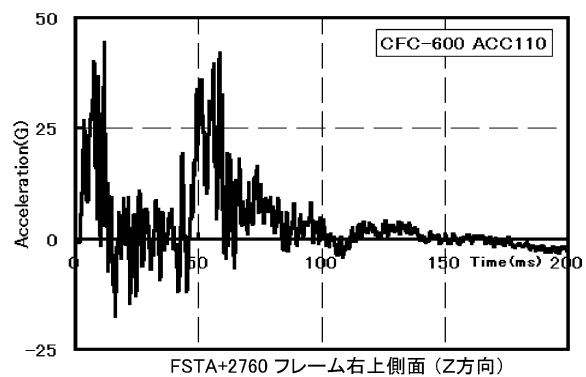
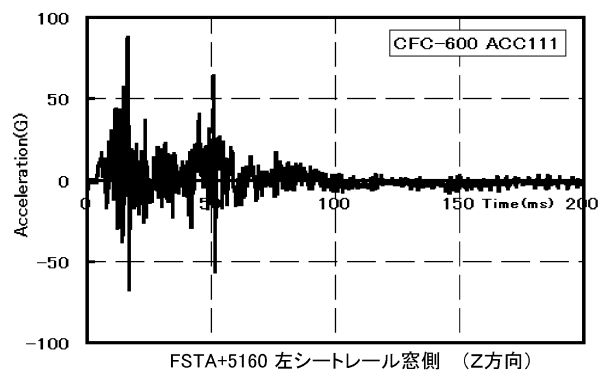
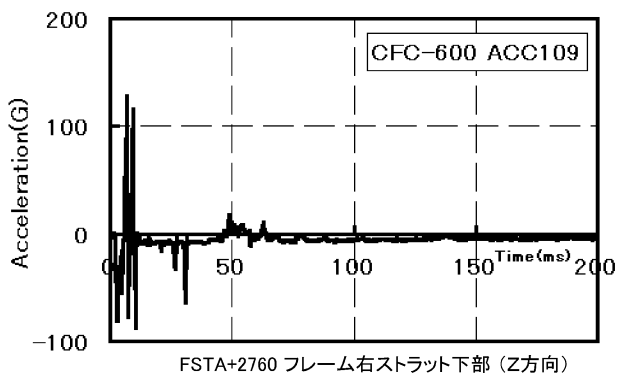
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -28/41





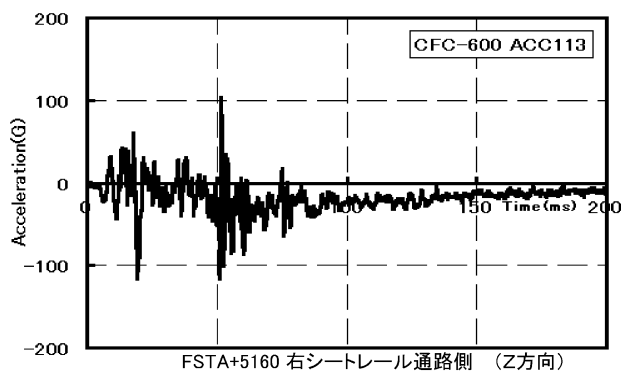
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -29/41

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -30/41

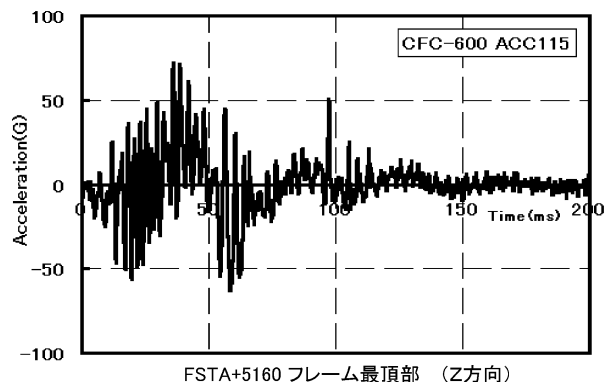


付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -31/41

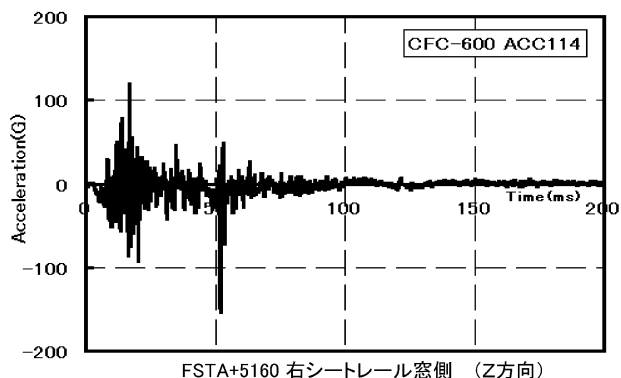
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -32/41



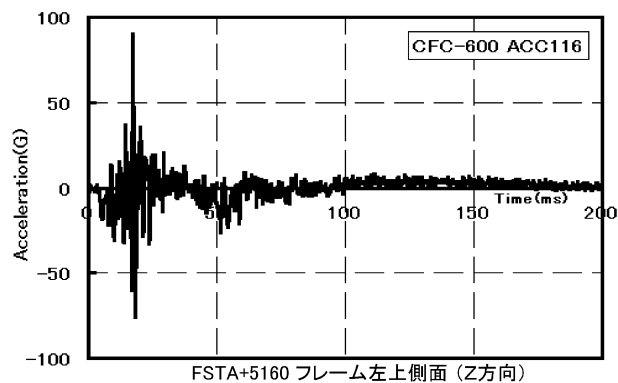
FSTA+5160 右シートレール通路側 (Z方向)



FSTA+5160 フレーム最頂部 (Z方向)



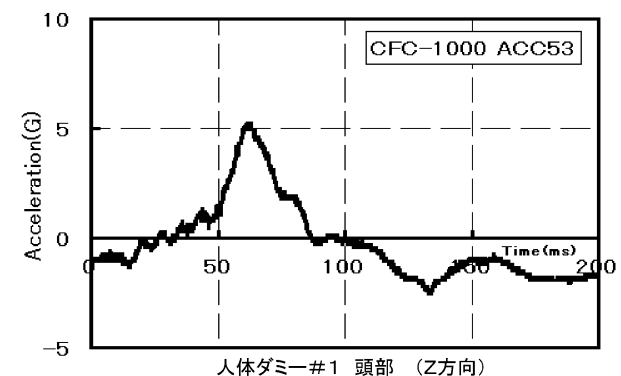
FSTA+5160 右シートレール窓側 (Z方向)



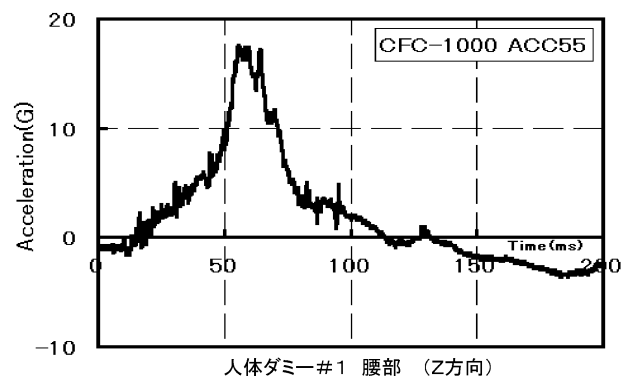
FSTA+5160 フレーム左上側面 (Z方向)

付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -33/41

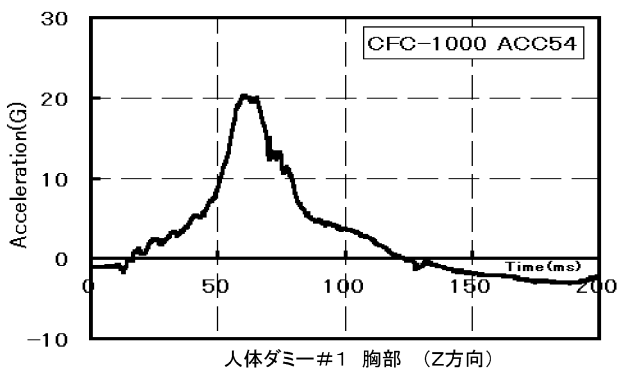
付録1 CFC 600 処理の加速度時刻歴応答 -34/41



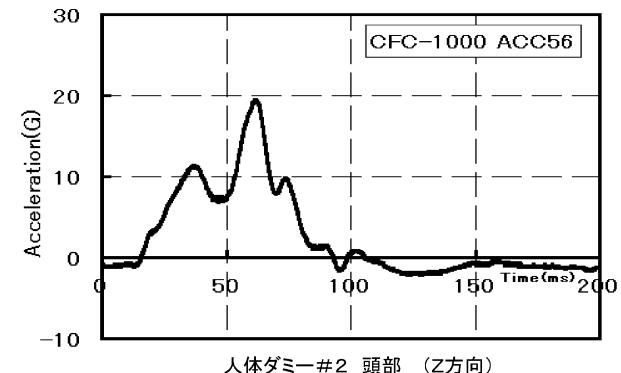
人体ダミー#1 頭部 (Z方向)



人体ダミー#1 腰部 (Z方向)



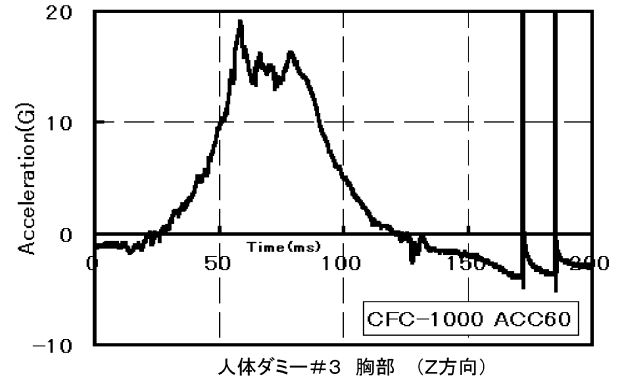
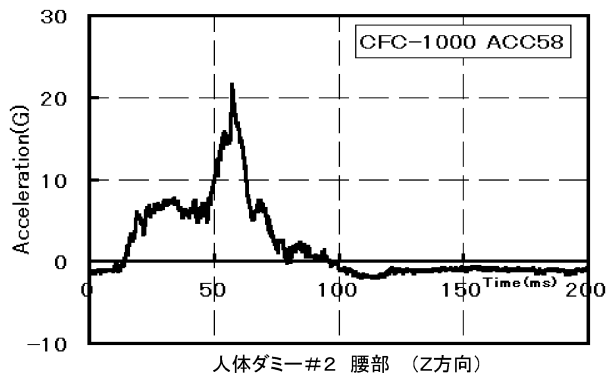
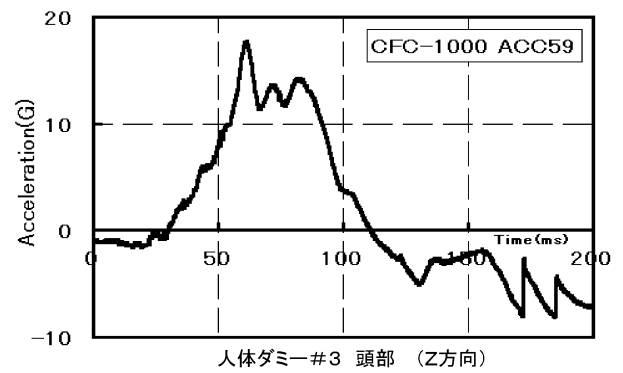
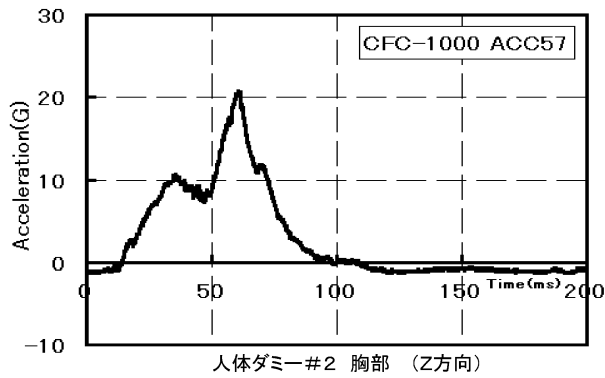
人体ダミー#1 胸部 (Z方向)



人体ダミー#2 頭部 (Z方向)

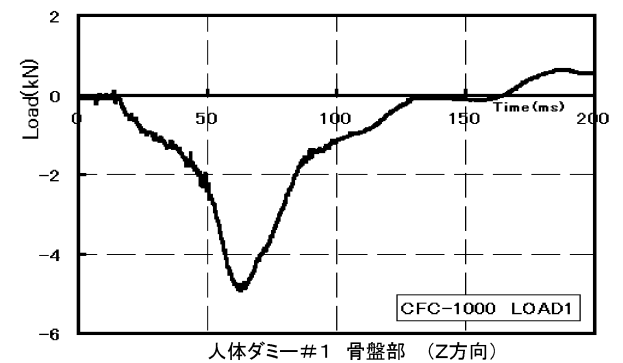
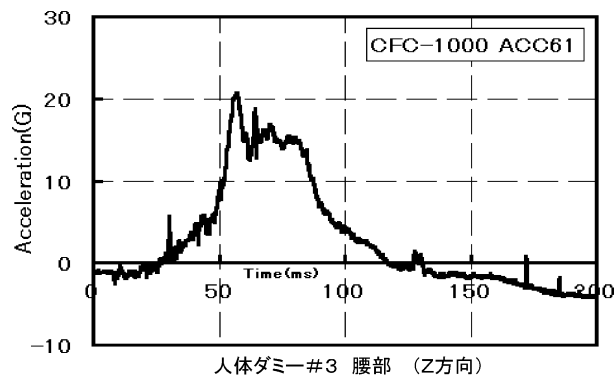
付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -35/41

付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -36/41

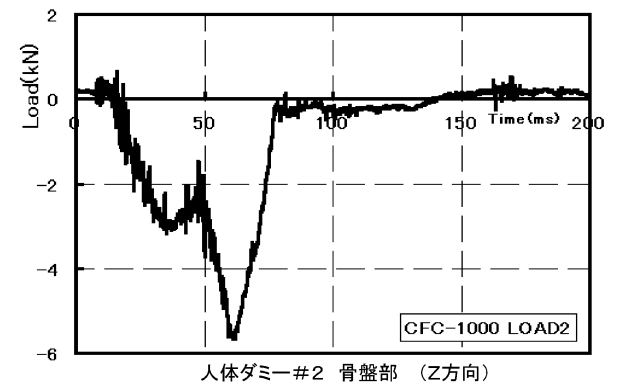
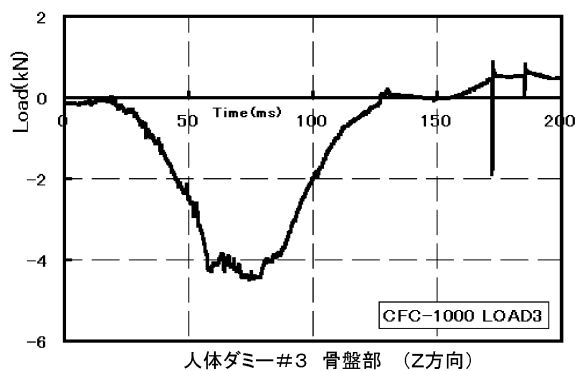


付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -37/41

付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -38/41



付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -39/41

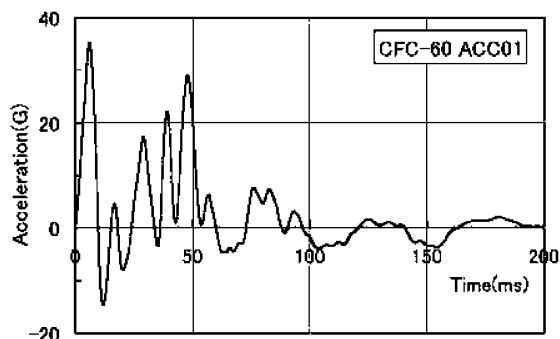


付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -41/41

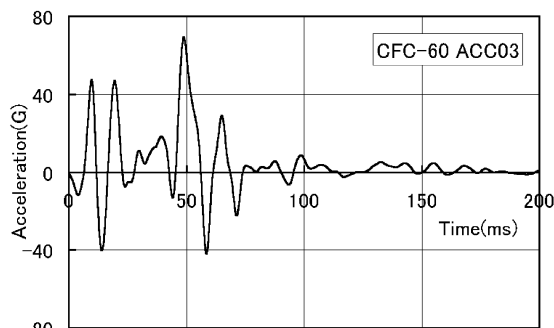
付録1 CFC 1000 処理の加速度時刻歴応答 -40/41



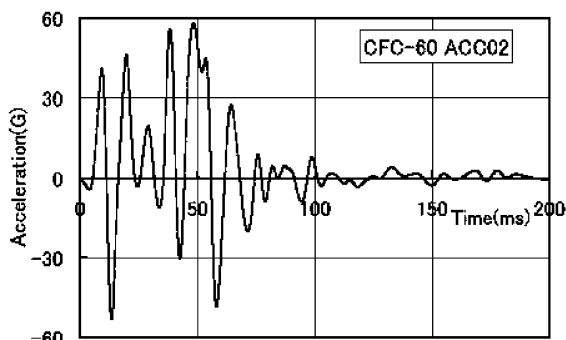
## 付録2 CFC60 処理の加速度時刻歴応答



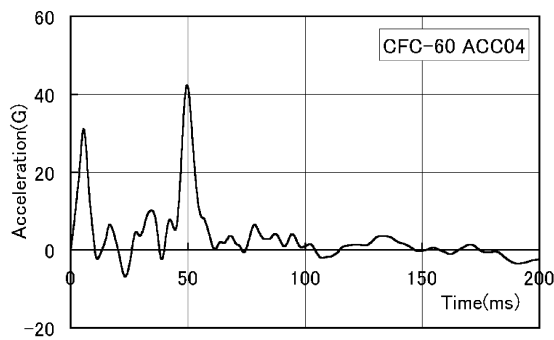
FSTA+1800 左シートレール窓側 (Z方向)



FSTA+1800 右シートレール通路側 (Z方向)



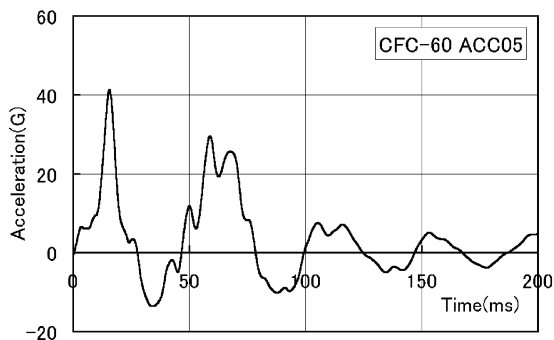
FSTA+1800 左シートレール通路側 (Z方向)



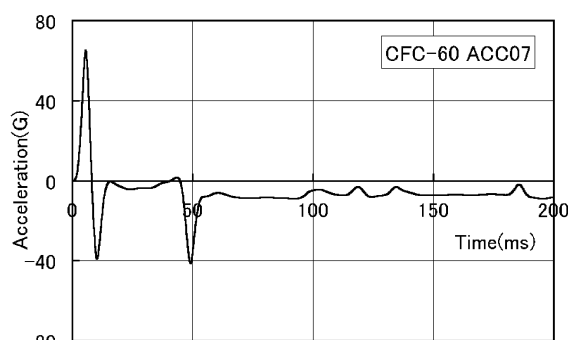
FSTA+1800 右シートレール窓側 (Z方向)

## 付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -1/41

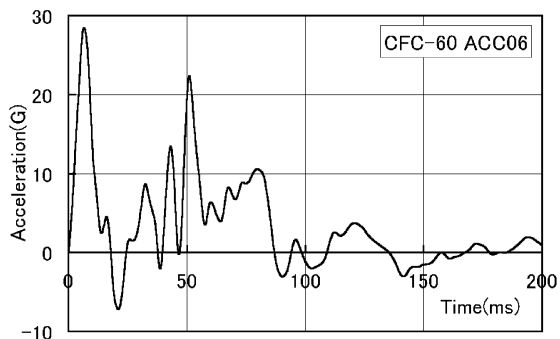
## 付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -2/41



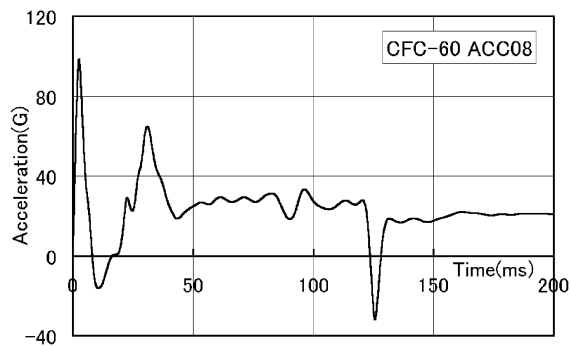
FSTA+1800 フレーム最頂部 (Z方向)



FSTA+1800 フレーム・左ストラット下部 (Z方向)



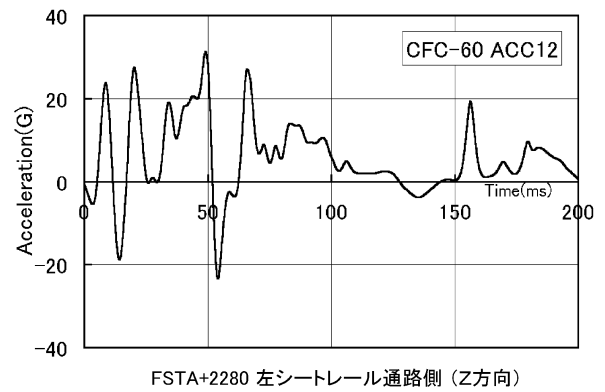
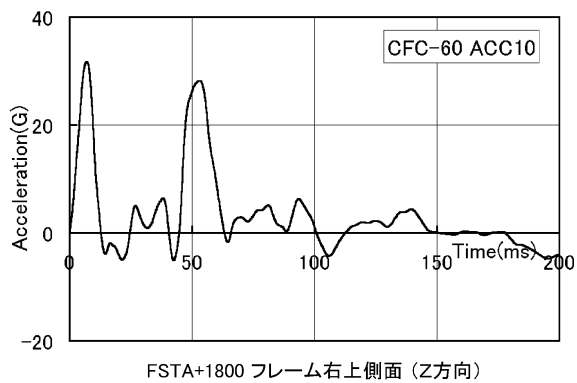
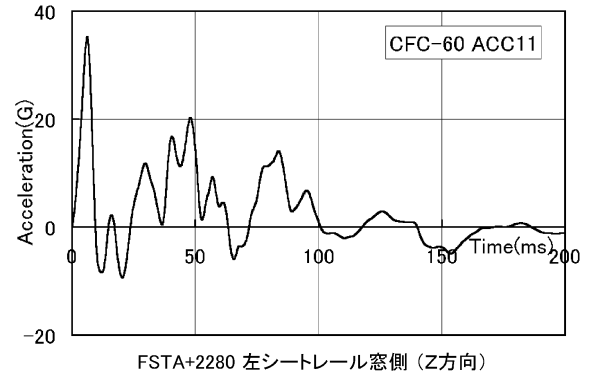
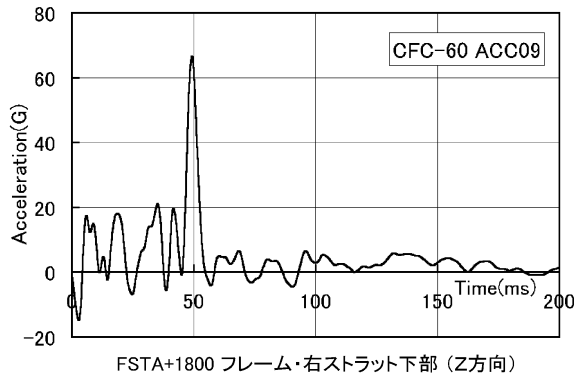
FSTA+1800 フレーム左上側面 (Z方向)



FSTA+1800 フレーム最底部 (Z方向)

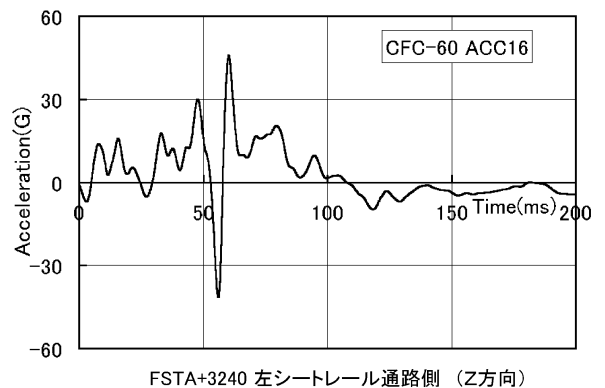
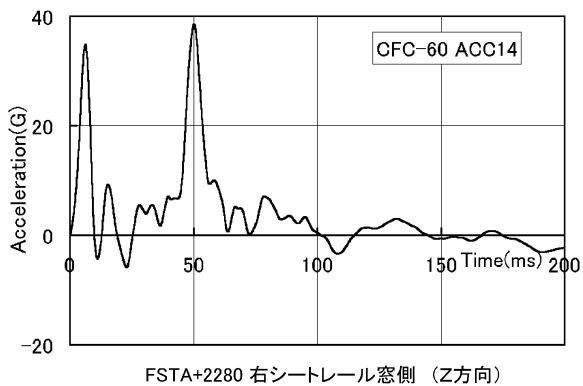
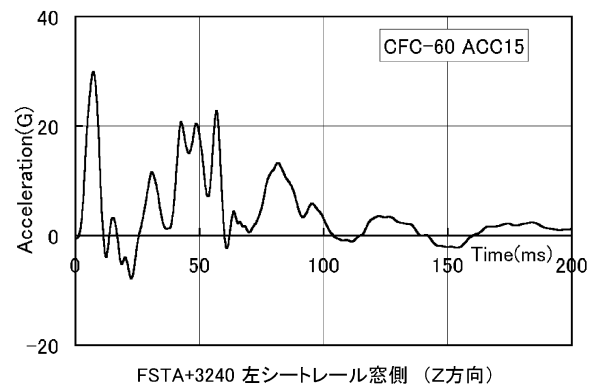
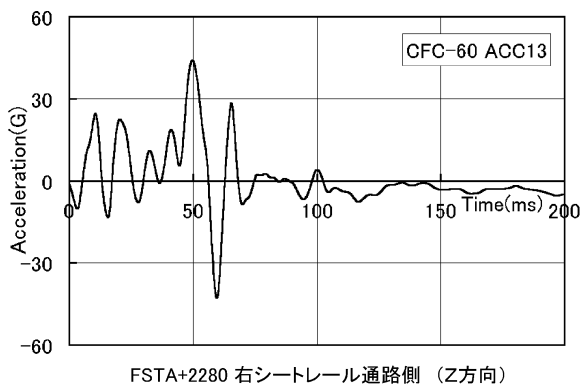
## 付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -3/41

## 付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -4/41



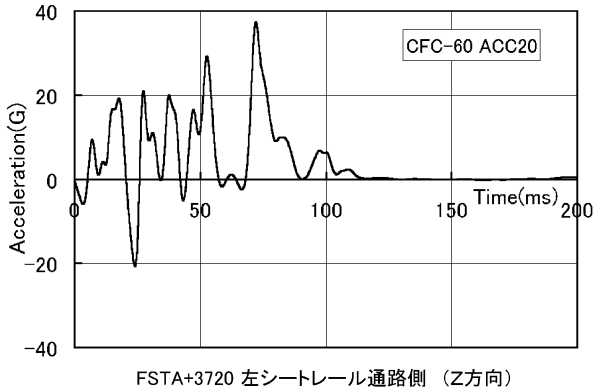
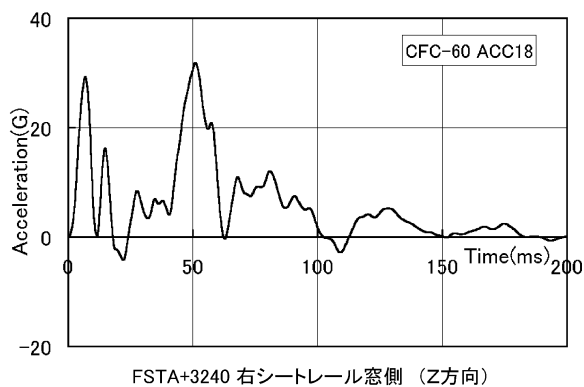
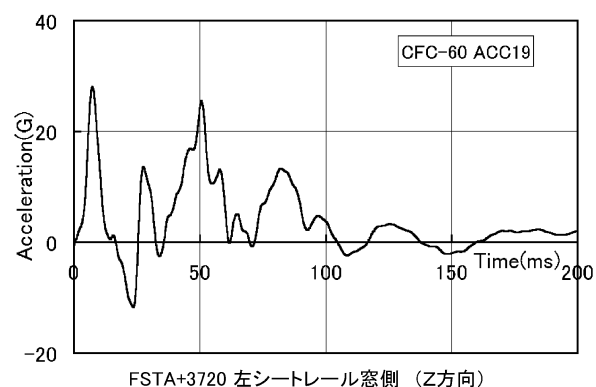
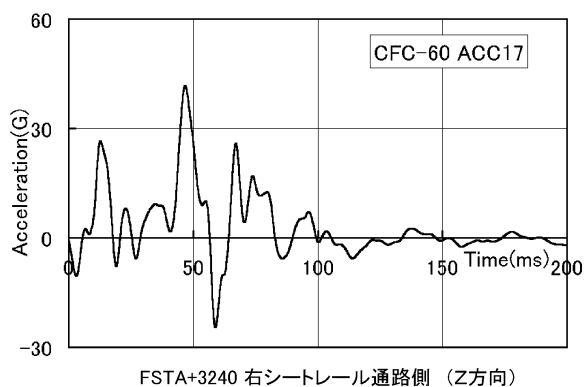
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -5/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -6/41



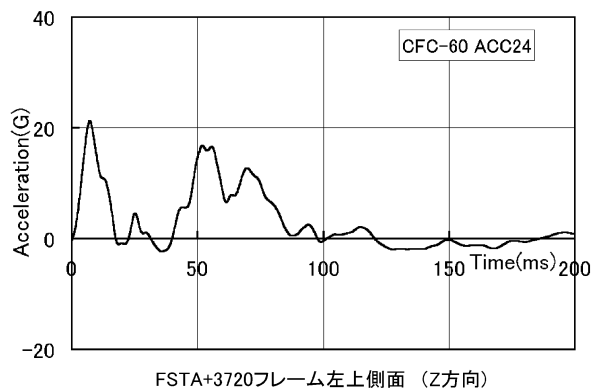
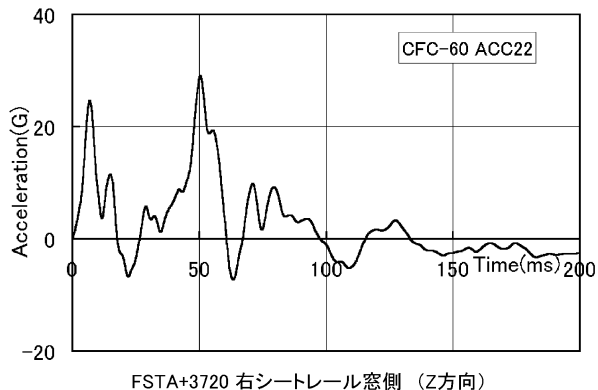
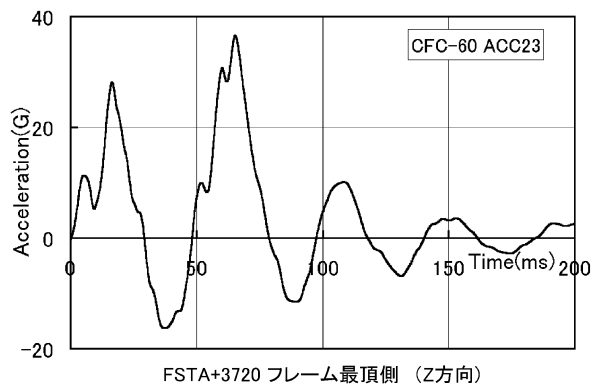
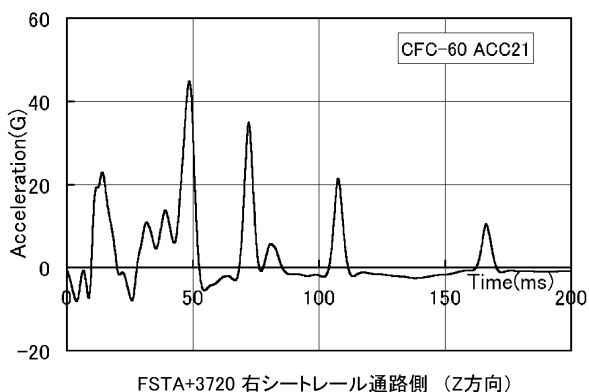
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -7/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -8/41



付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -9/41

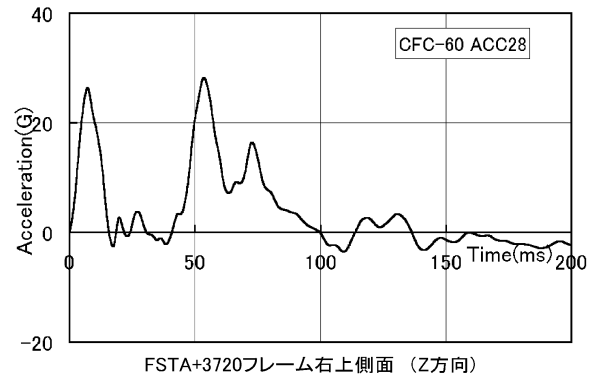
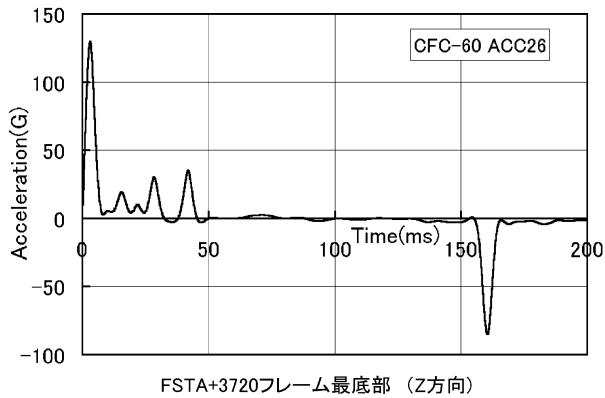
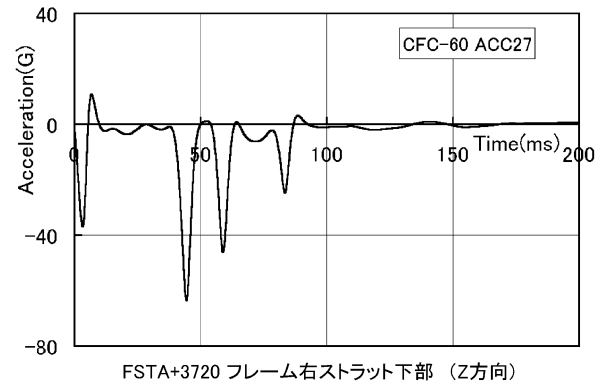
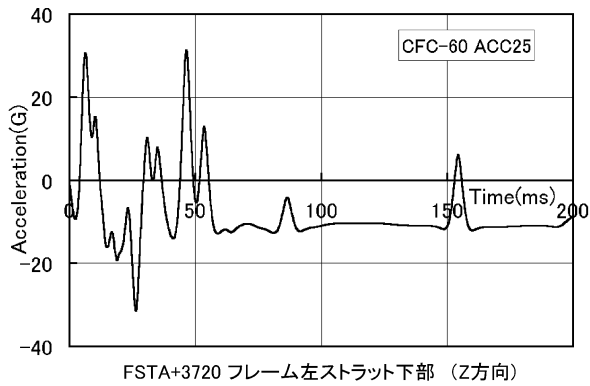
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -10/41



付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -11/41

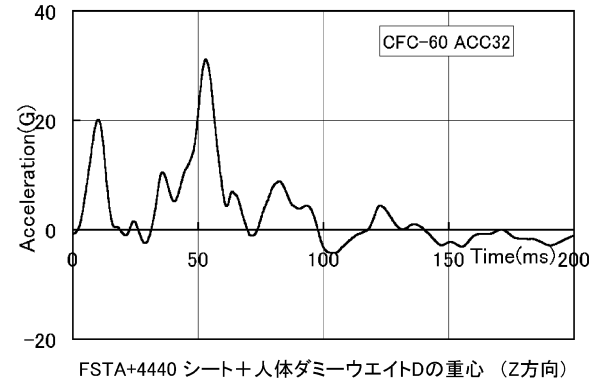
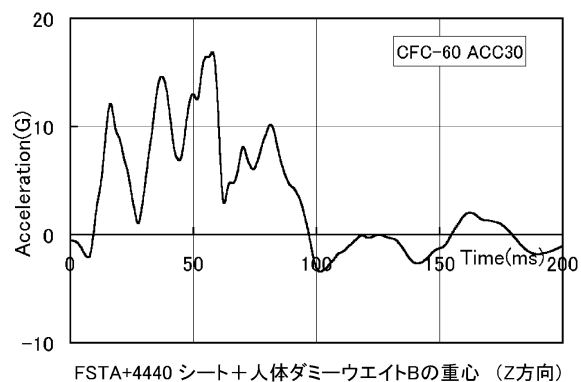
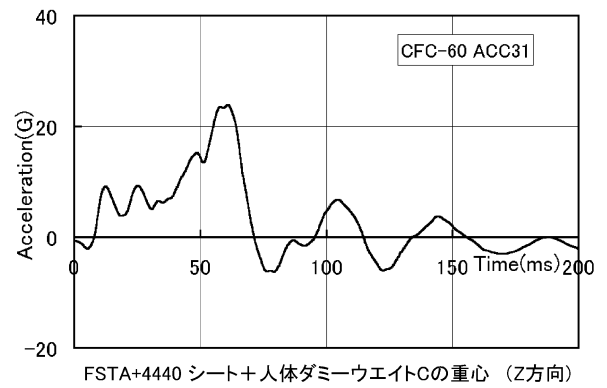
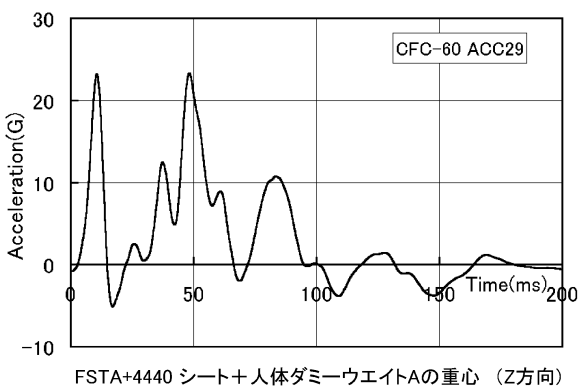
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -12/41





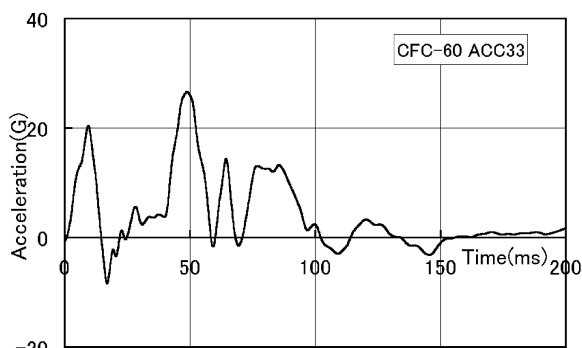
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -13/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -14/41

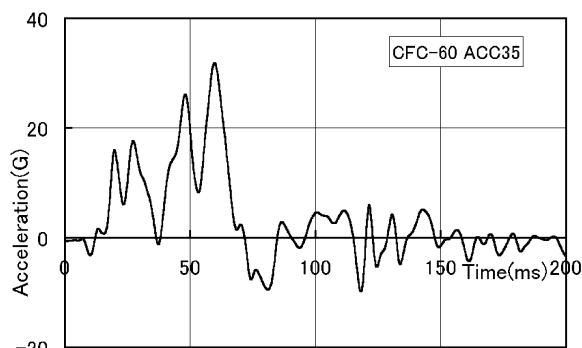


付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -15/41

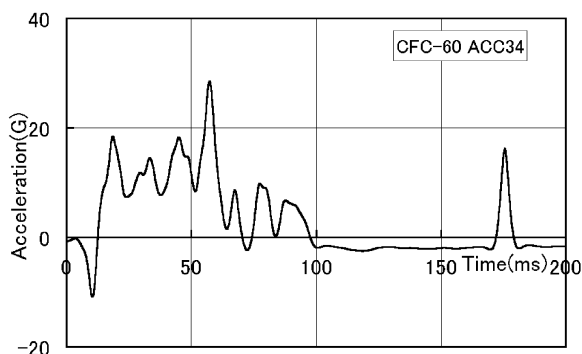
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -16/41



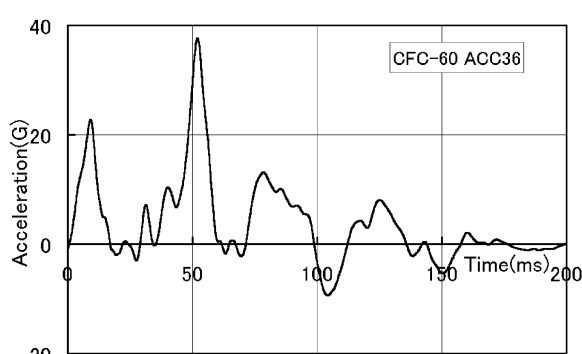
FSTA+4680 左シートレール窓側 (Z方向)



FSTA+4680 右シートレール通路側 (Z方向)



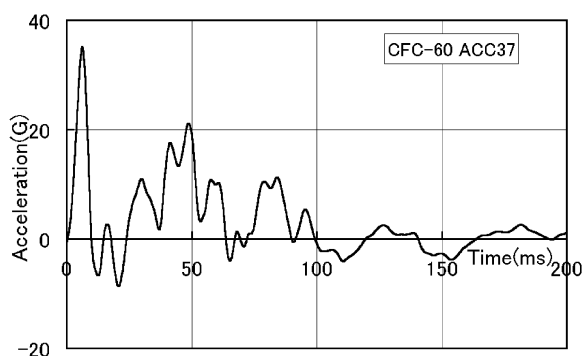
FSTA+4680 左シートレール通路側 (Z方向)



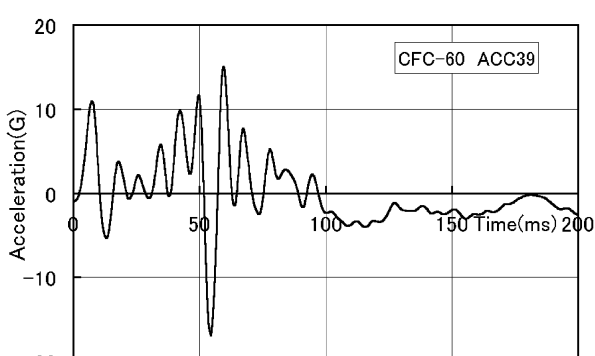
FSTA+4680 右シートレール窓側 (Z方向)

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -17/41

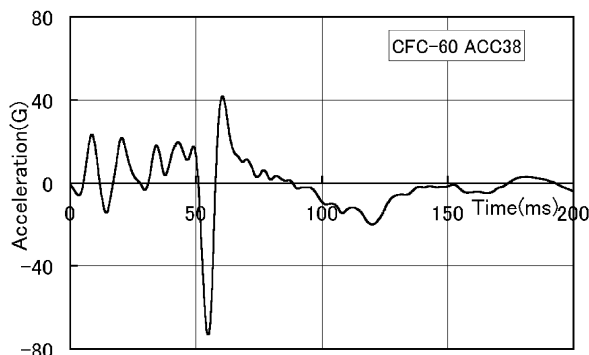
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -18/41



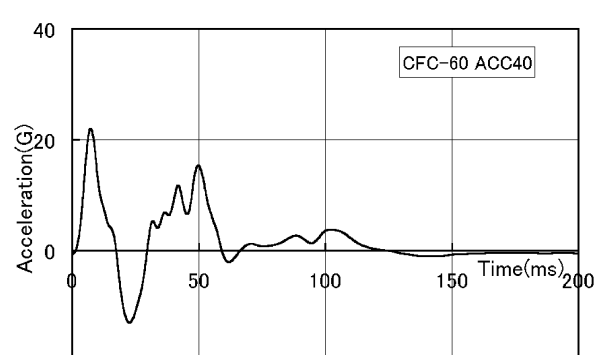
シート#1L 左前脚上部 (Z方向)



シート#1L 前方チューブ中央部 (Z方向)



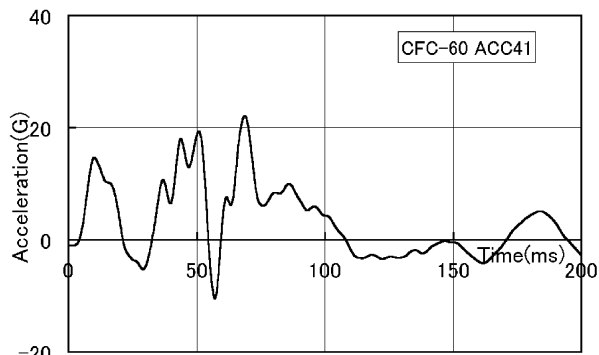
シート#1L 右前脚上部 (Z方向)



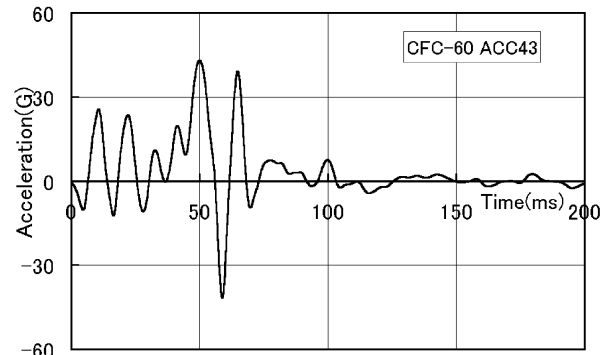
シート#1L 左後脚上部 (Z方向)

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -19/41

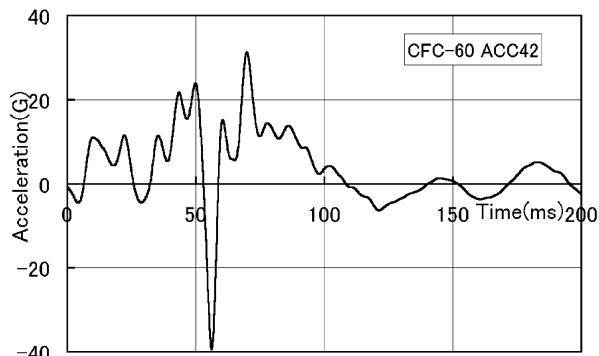
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -20/41



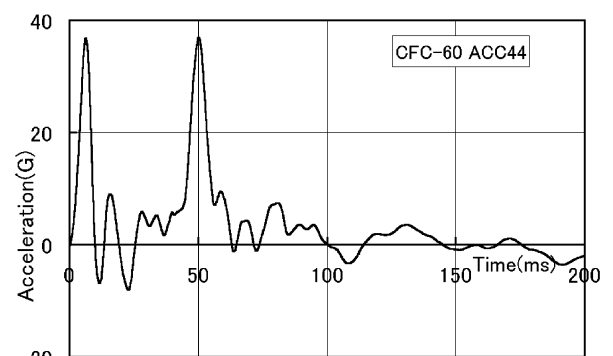
シート#1L 後方チューブ中央部 (Z方向)



シート#1R 左前脚上部 (Z方向)



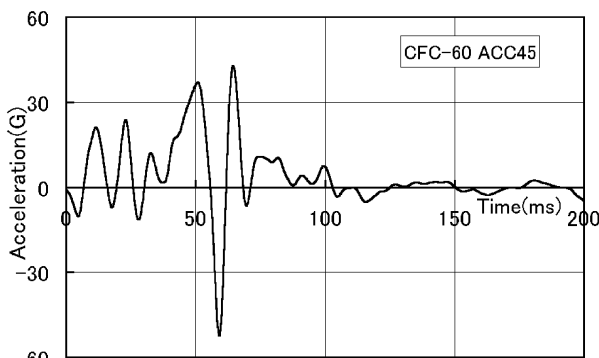
シート#1L 右後脚上部 (Z方向)



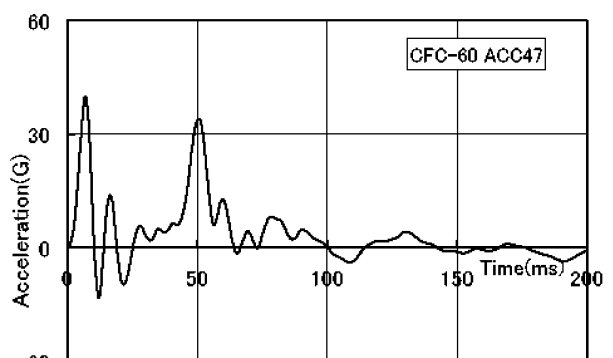
シート#1R 右前脚上部 (Z方向)

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -21/41

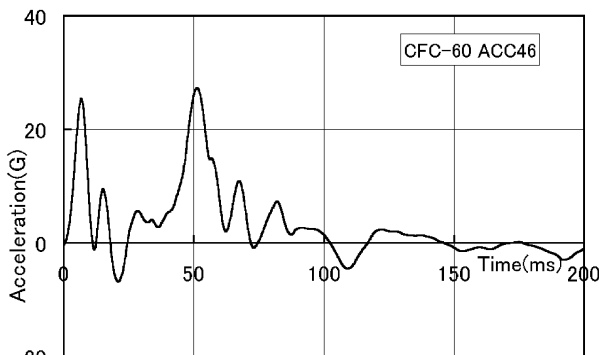
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -22/41



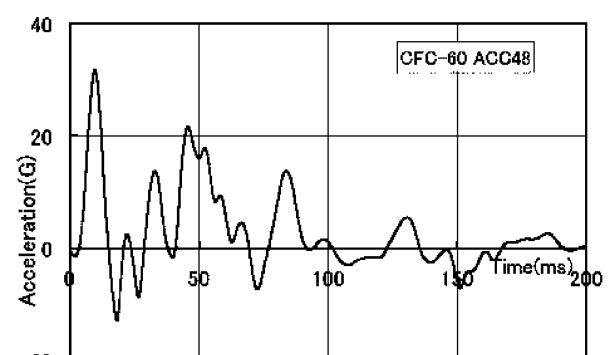
シート#1R 左後脚上部 (Z方向)



シート#1R 右後脚上部 (Z方向)



シート#1R 後方チューブ1D中央部 (Z方向)

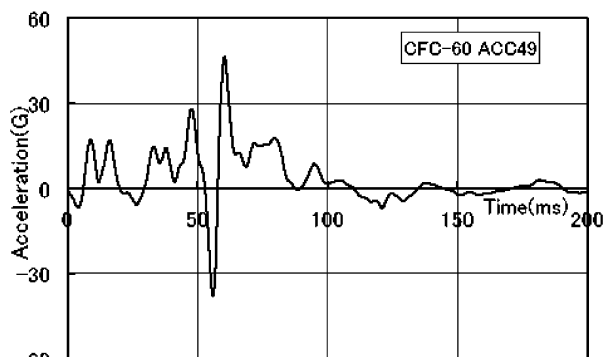


シート#2L 左前脚上部 (Z方向)

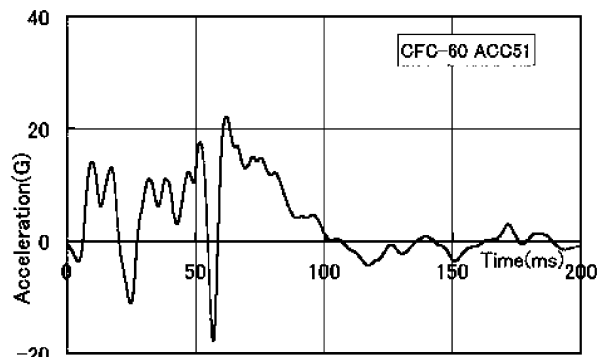
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -23/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -24/41

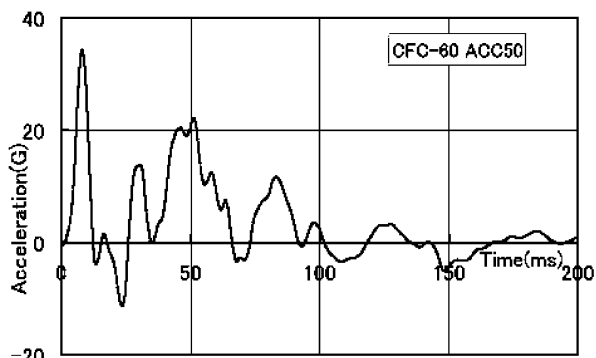




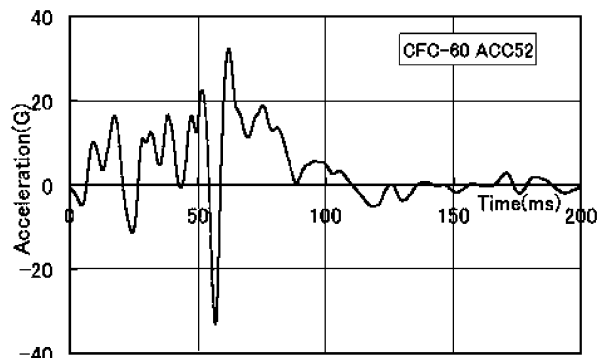
シート#2L 右前脚上部 (Z方向)



シート#2L 後方チューブ2B中央 (Z方向)



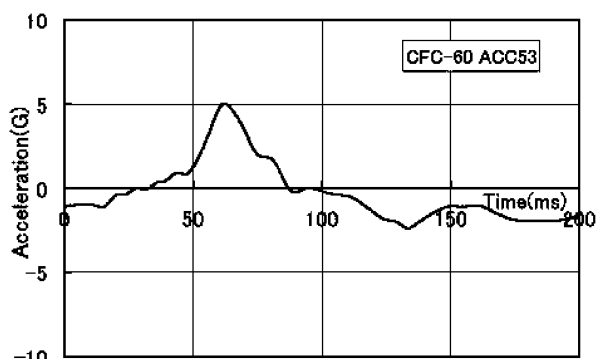
シート#2L 左後脚上部 (Z方向)



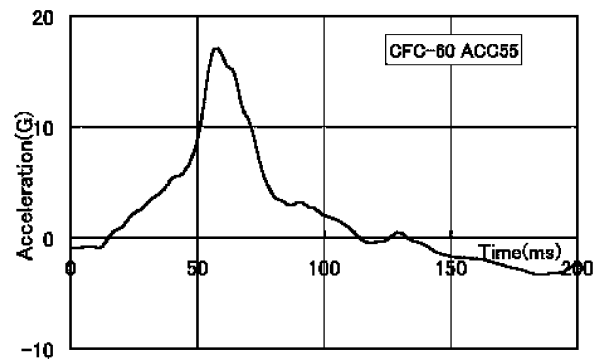
シート#2L 右後脚上部 (Z方向)

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -25/41

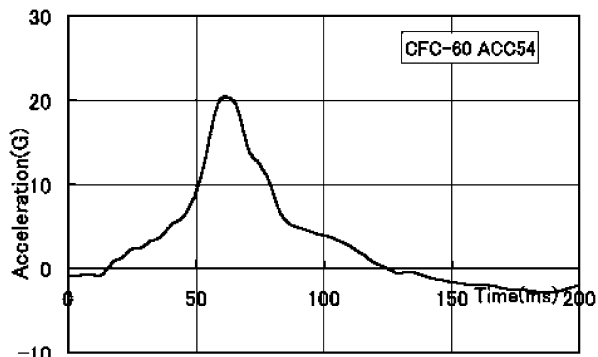
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -26/41



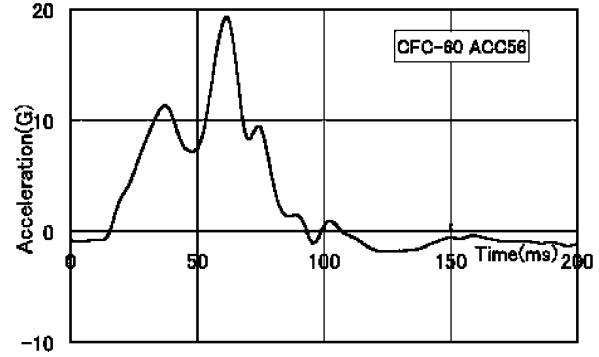
人体ダミー#1 頭部 (Z方向)



人体ダミー#1 腰部 (Z方向)



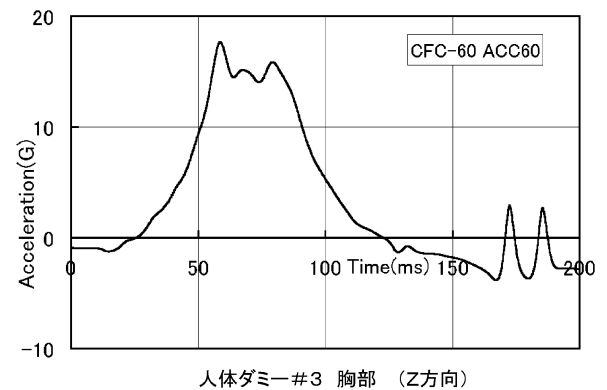
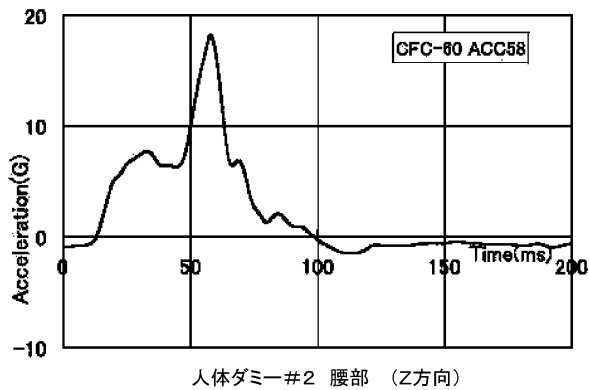
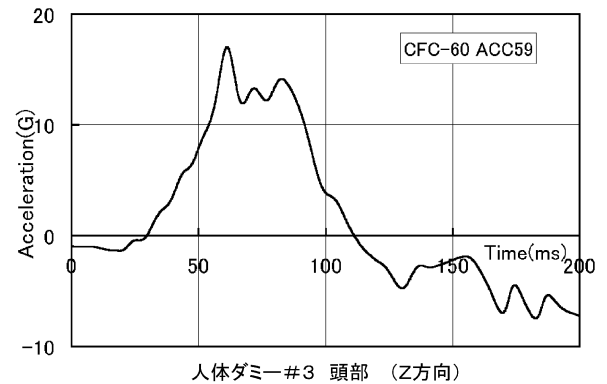
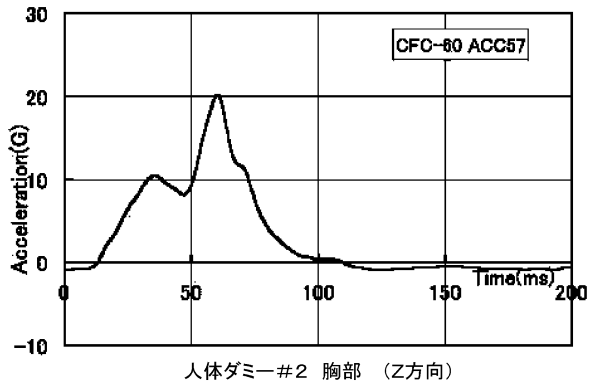
人体ダミー#1 胸部 (Z方向)



人体ダミー#2 頭部 (Z方向)

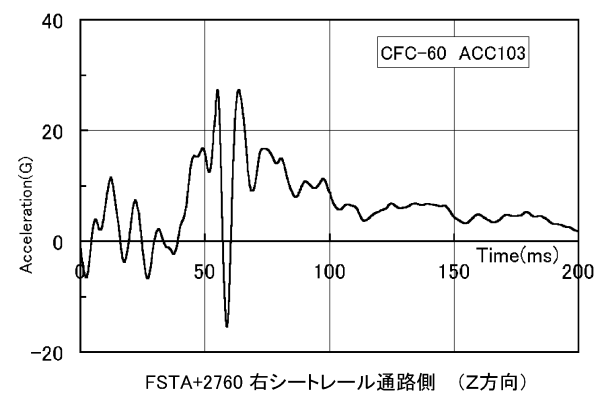
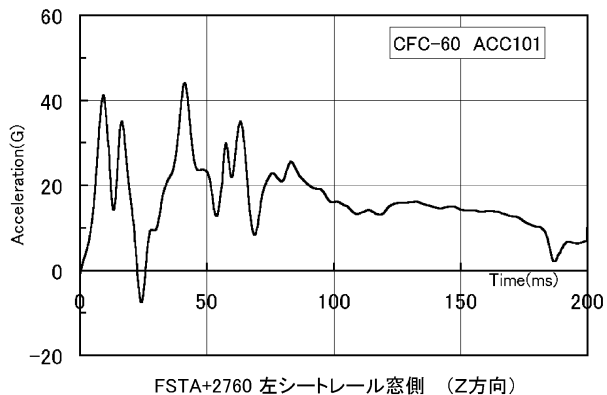
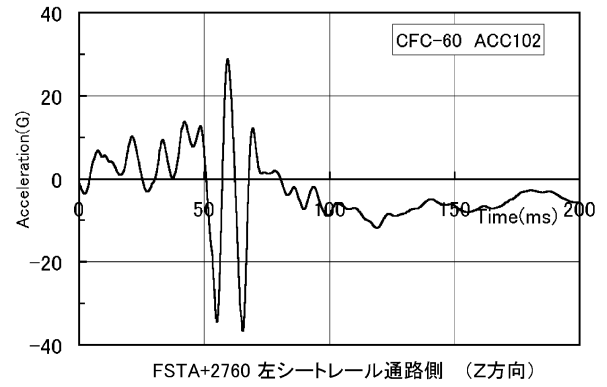
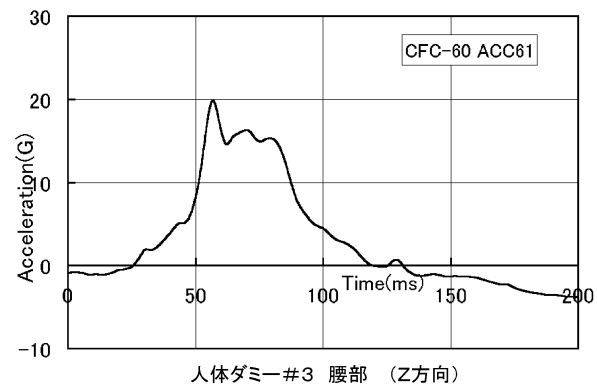
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -27/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -28/41



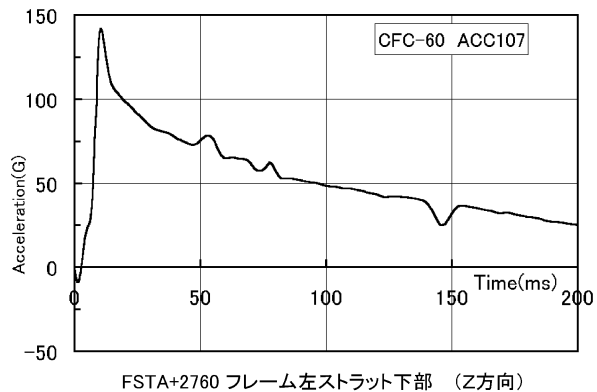
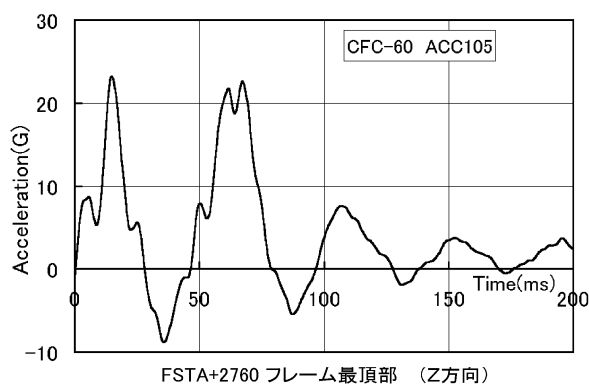
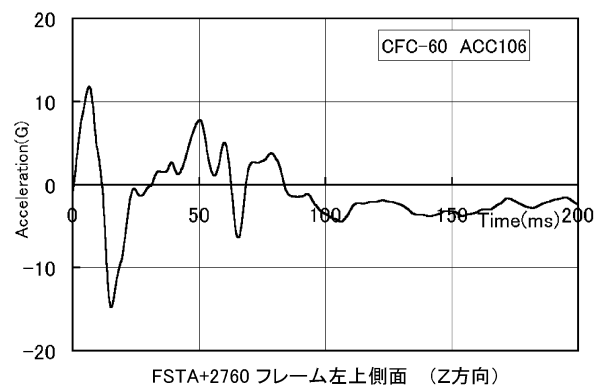
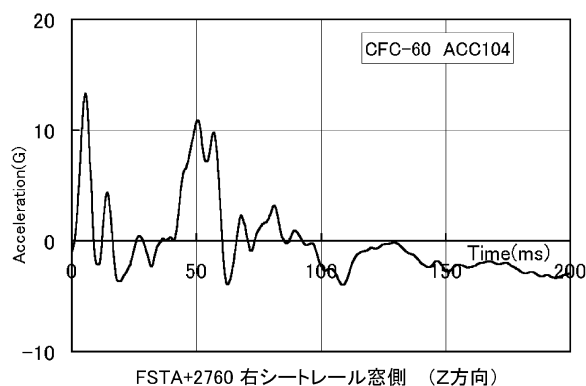
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -29/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -30/41



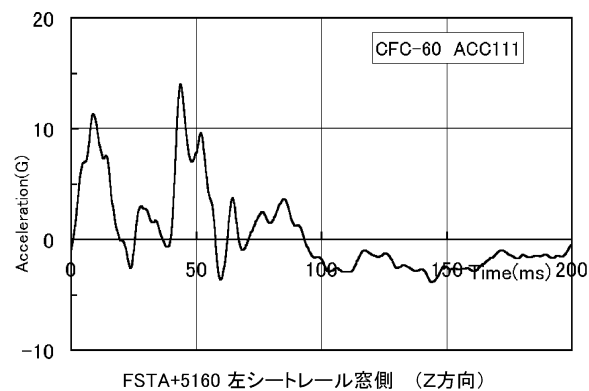
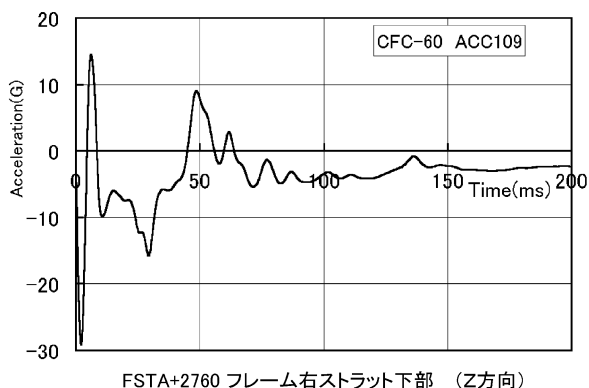
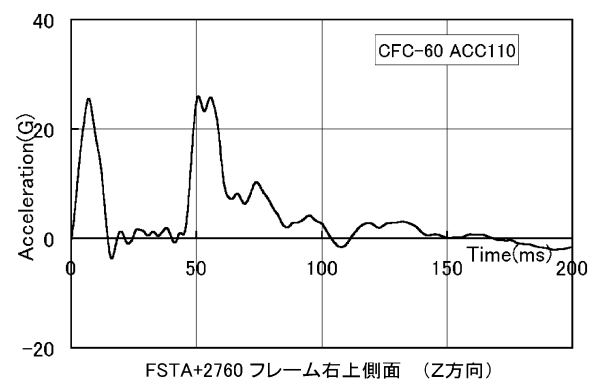
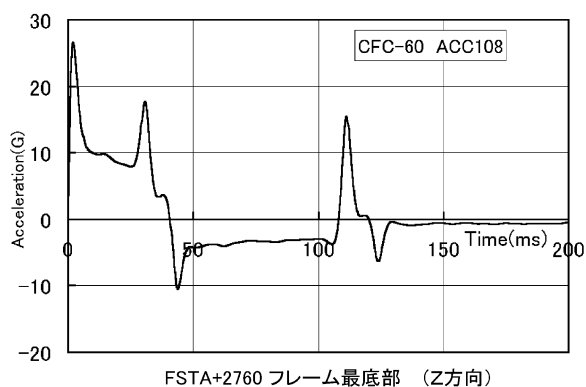
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -31/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -32/41



付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -33/41

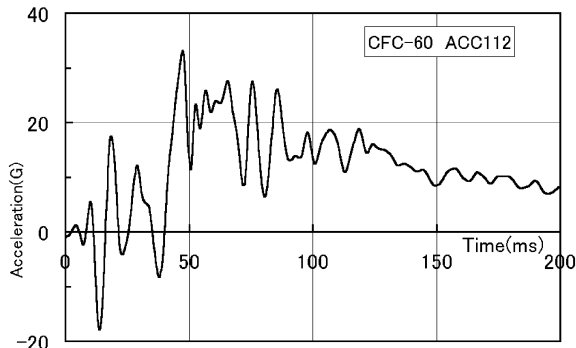
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -34/41



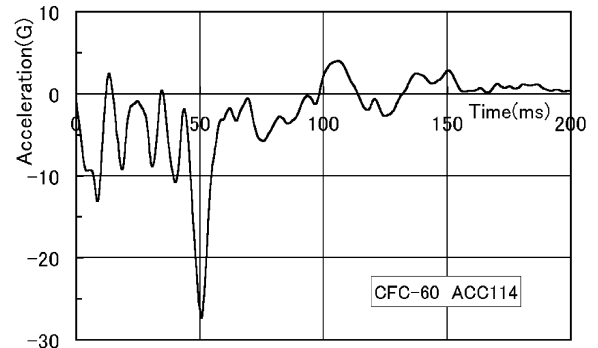
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -35/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -36/41

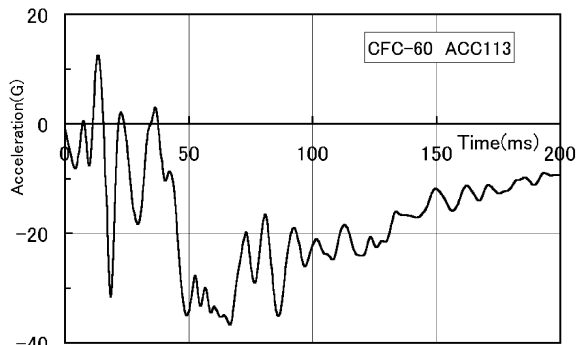




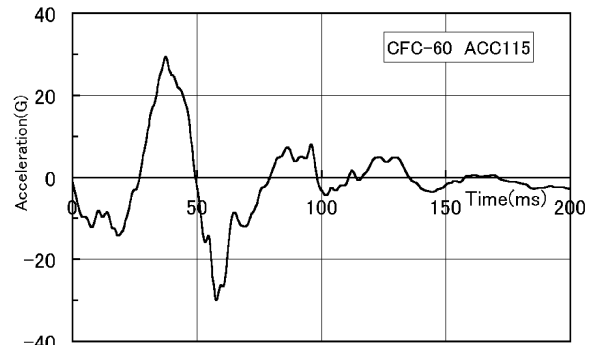
FSTA+5160 左シートレール通路側 (Z方向)



FSTA+5160 右シートレール窓側 (Z方向)



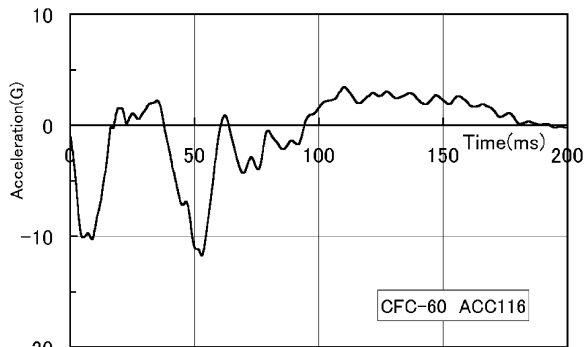
FSTA+5160 右シートレール通路側 (Z方向)



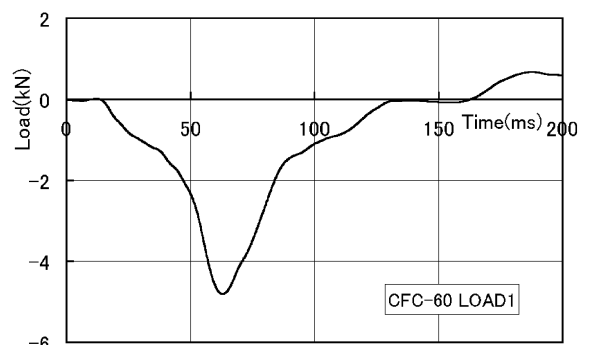
FSTA+5160 フレーム最頂部 (Z方向)

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -37/41

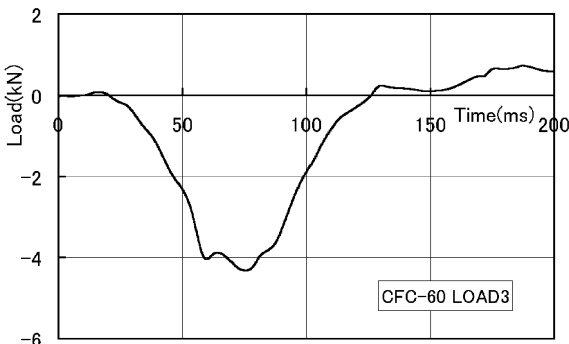
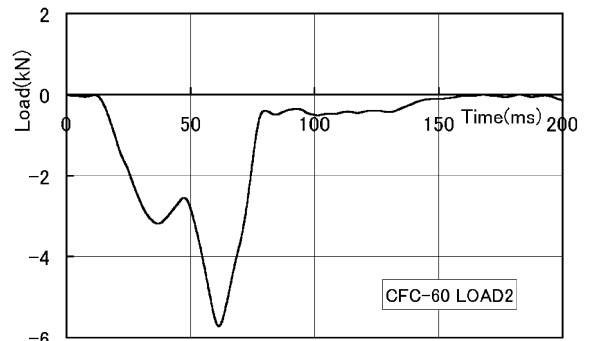
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -38/41



FSTA+5160 フレーム左上側面 (Z方向)

人体ダミー#1 骨盤部 (Z方向)  
CFC-60処理

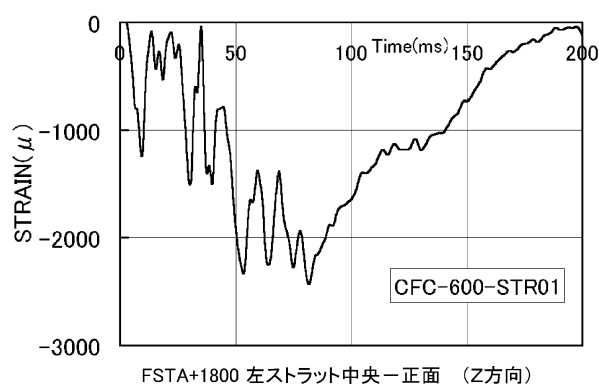
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -39/41

人体ダミー#3 骨盤部 (Z方向)  
CFC-60処理人体ダミー#2 骨盤部 (Z方向)  
CFC-60処理

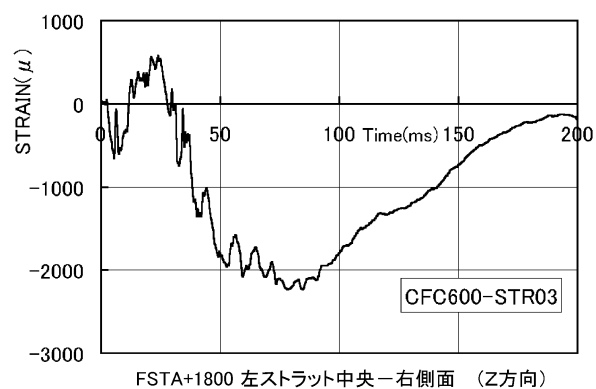
付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -41/41

付録2 CFC 60 処理の加速度時刻歴応答 -40/41

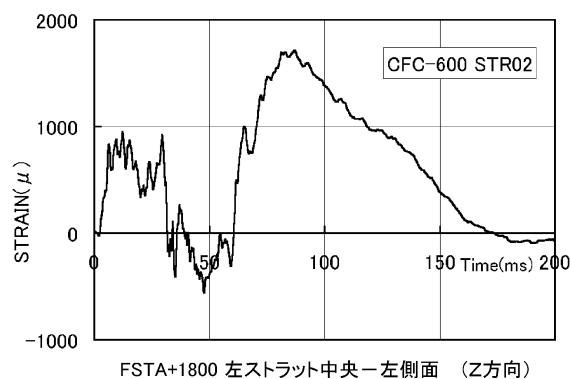
## 付録3 CFC600 処理のひずみ時刻歴応答



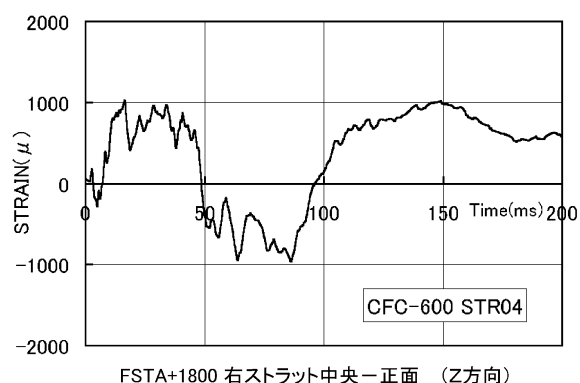
FSTA+1800 左ストラット中央-正面 (Z方向)



FSTA+1800 左ストラット中央-右側面 (Z方向)



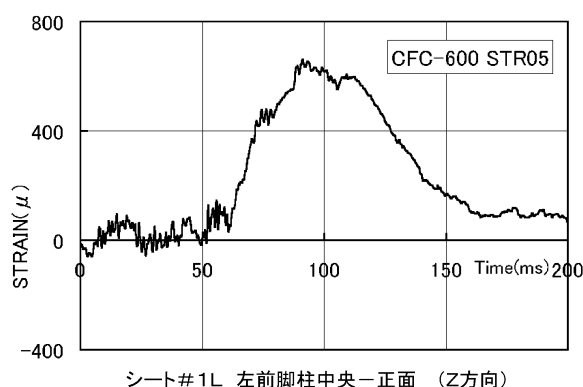
FSTA+1800 左ストラット中央-左側面 (Z方向)



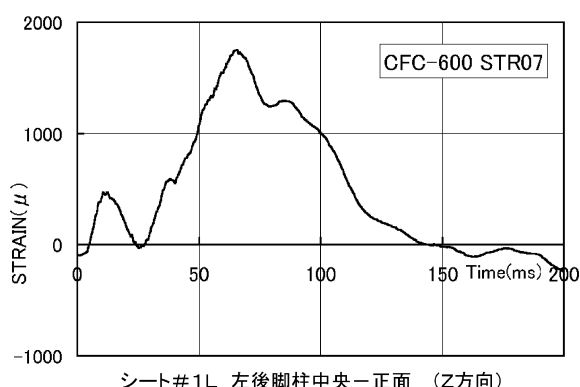
FSTA+1800 右ストラット中央-正面 (Z方向)

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -1/15

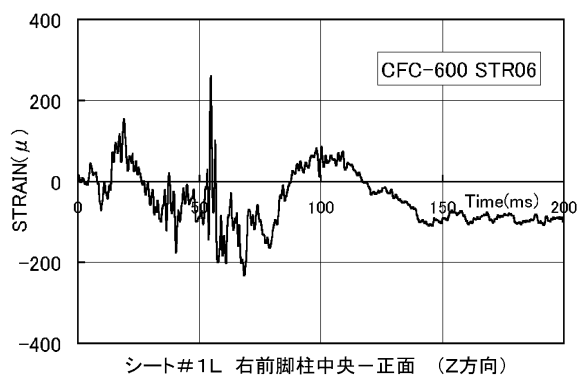
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -2/15



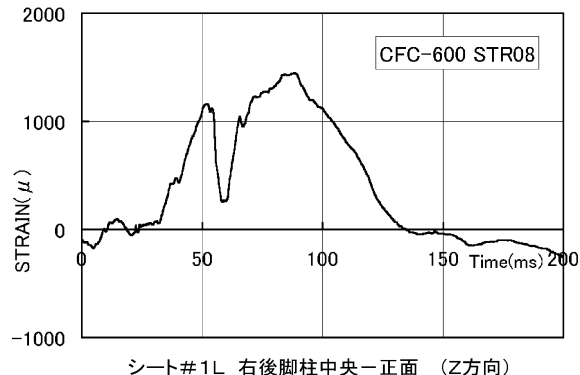
シート#1L 左前脚柱中央-正面 (Z方向)



シート#1L 左後脚柱中央-正面 (Z方向)



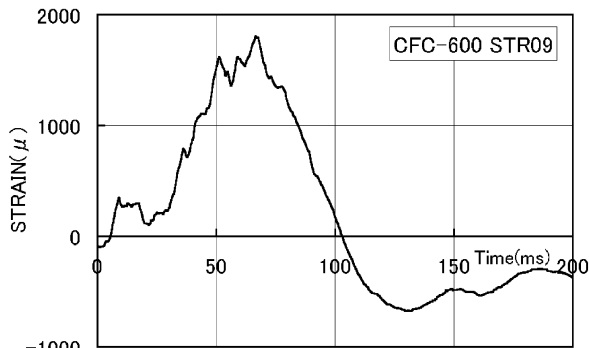
シート#1L 右前脚柱中央-正面 (Z方向)



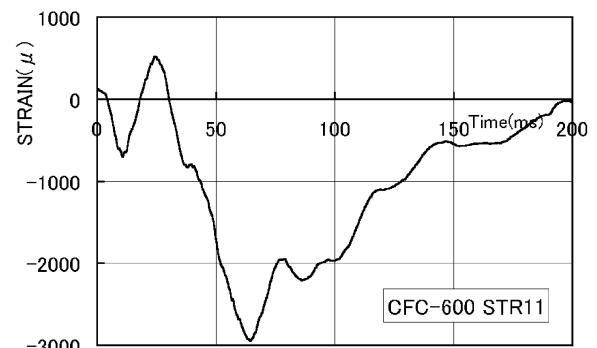
シート#1L 右後脚柱中央-正面 (Z方向)

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -3/15

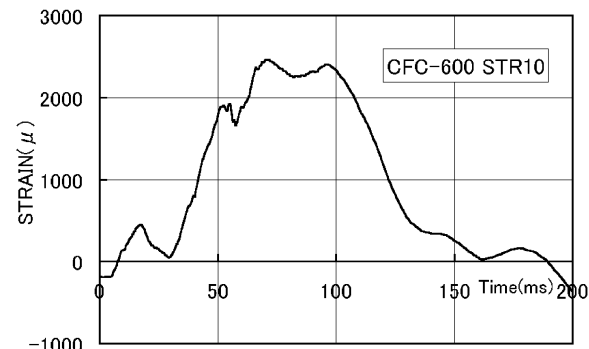
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -4/15



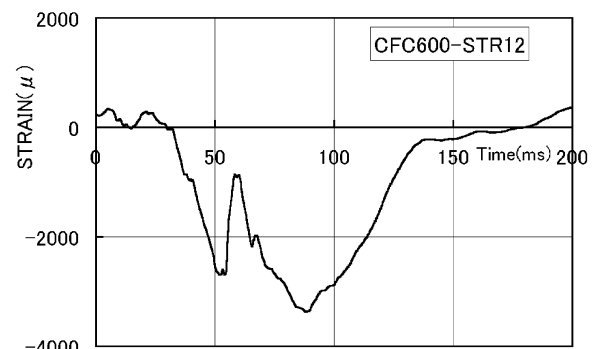
シート# 1L 前方チューブ中央-下面 (Z方向)



シート# 1L 左後脚柱中央-後面 (Z方向)



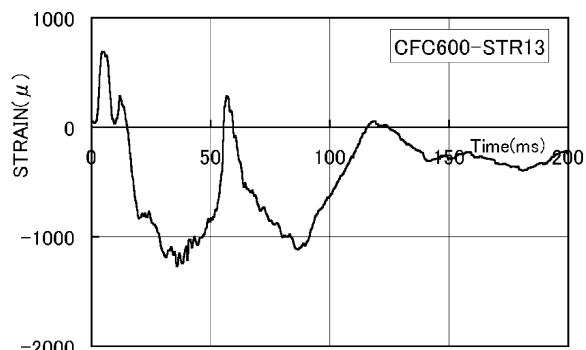
シート# 1L 後方チューブ中央-下面 (Z方向)



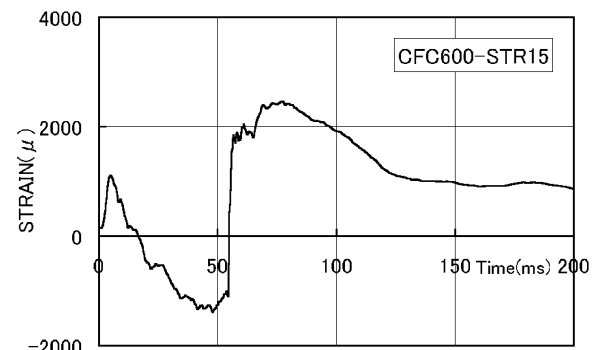
シート# 1L 右後脚柱中央-後面 (Z方向)

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -5/15

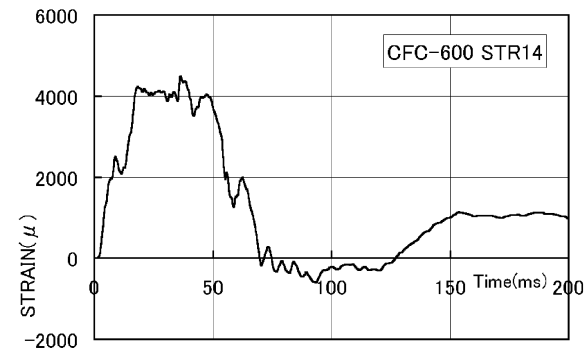
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -6/15



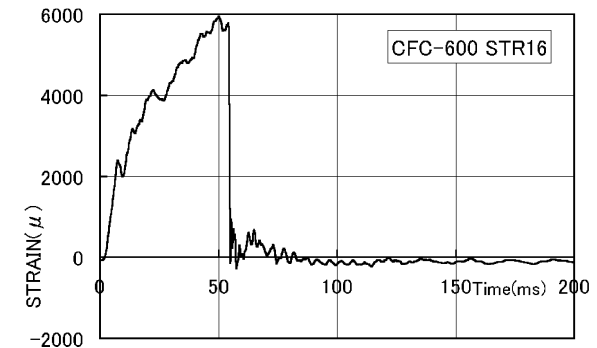
FSTA+1800 フロアビーム中央-上面 (Z方向)



FSTA+2760 フロアビーム中央-上面 (Z方向)



FSTA+1800 フロアビーム中央-下面 (Z方向)

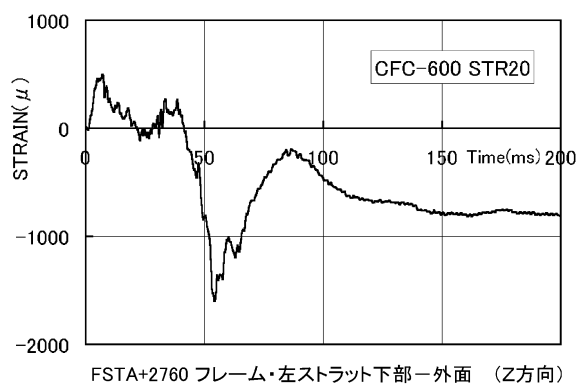
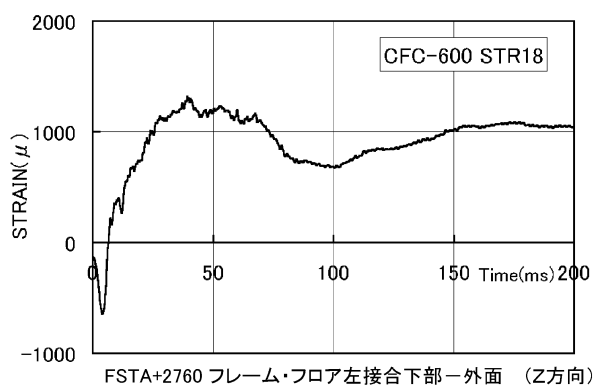
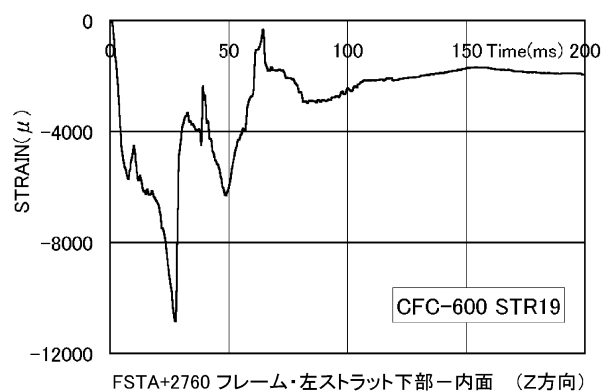
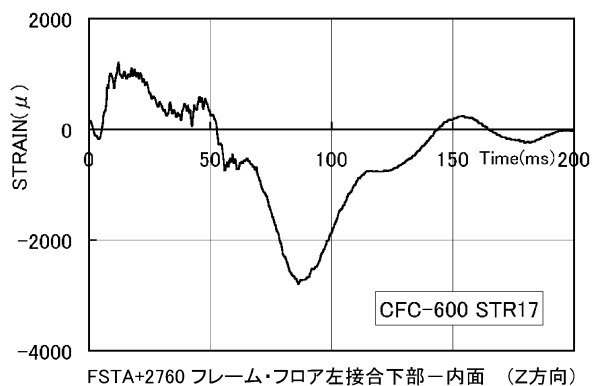


FSTA+2760 フロアビーム中央-下面 (Z方向)

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -7/15

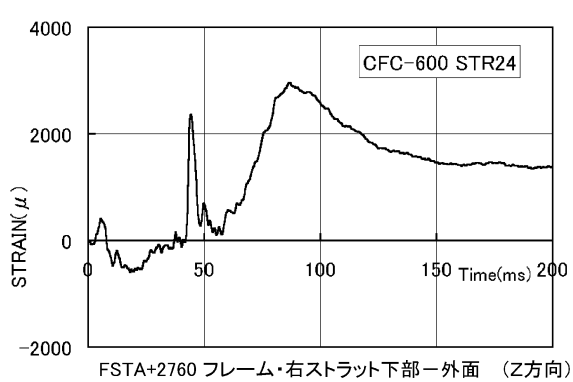
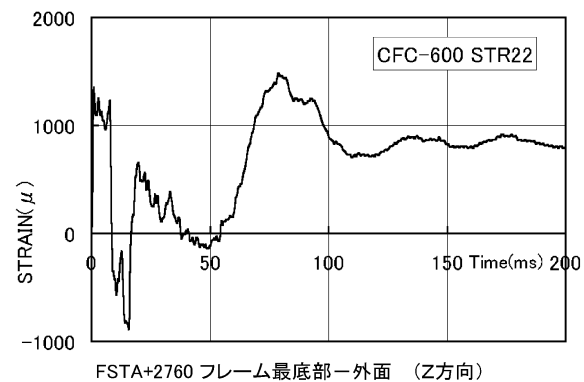
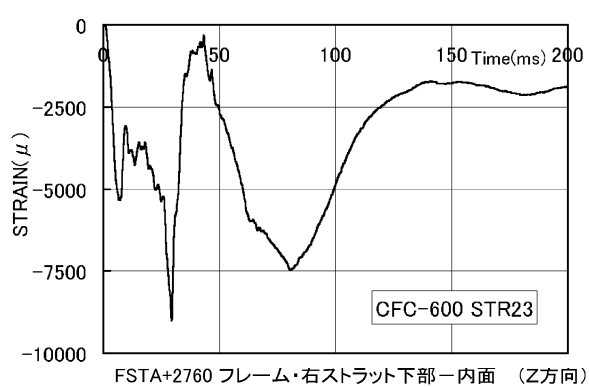
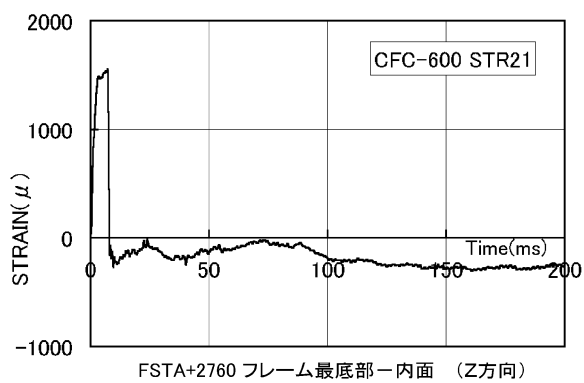
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -8/15





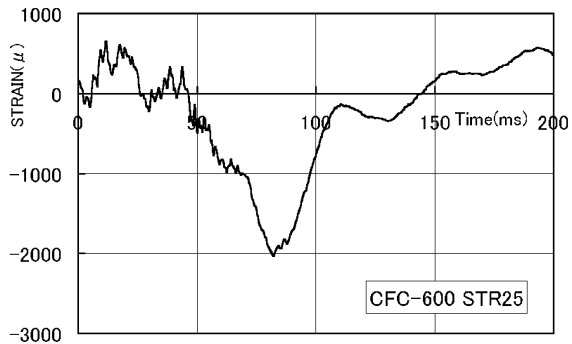
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -9/15

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -10/15

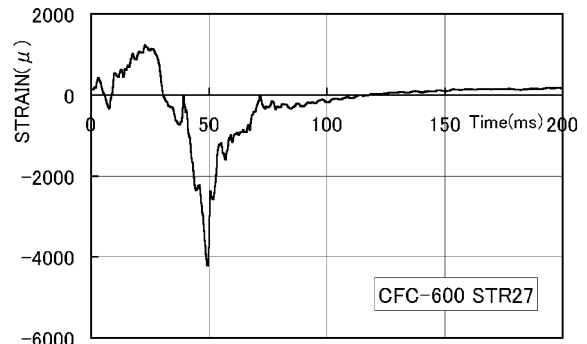


付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -11/15

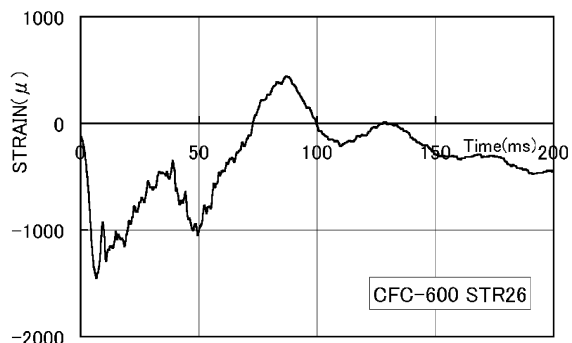
付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -12/15



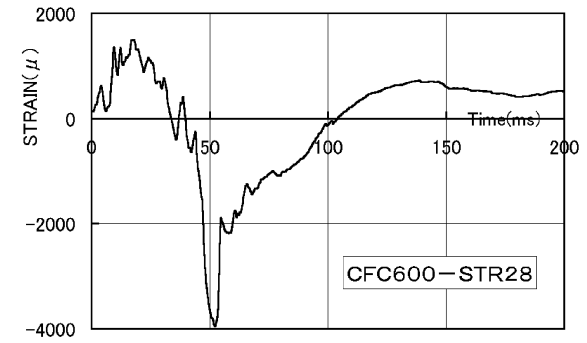
FSTA+2760 フレーム・フロア右接合下部－内面（Z方向）



FSTA+2760 左ストラット中央－正面（Z方向）



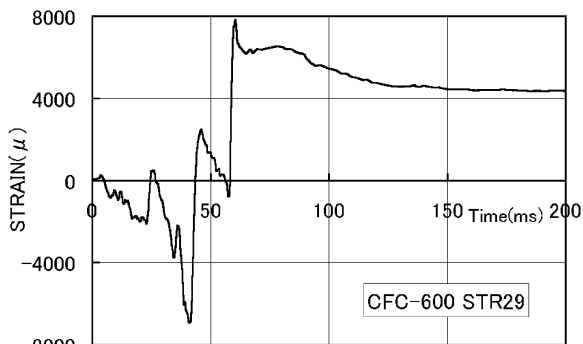
FSTA+2760 フレーム・フロア右接合下部－外面（Z方向）



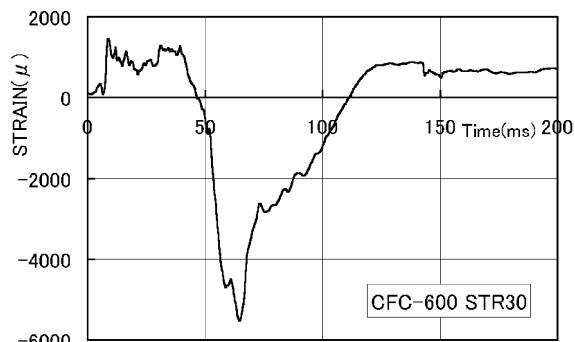
FSTA+2760 右ストラット中央－正面（Z方向）

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -13/15

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -14/15



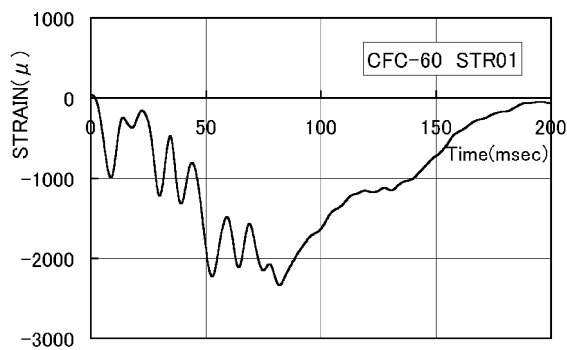
FSTA+3720 左ストラット中央－正面（Z方向）



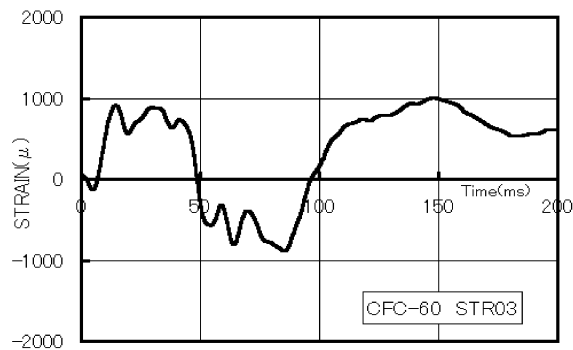
FSTA+3720 右ストラット中央－正面（Z方向）

付録3 CFC 600 処理のひずみ時刻歴応答 -15/15

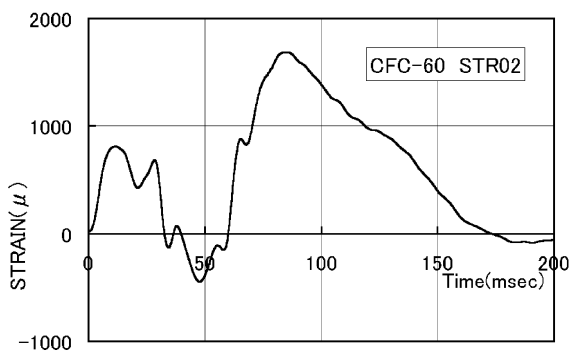
## 付録4 CFC60 処理のひずみ時刻歴応答



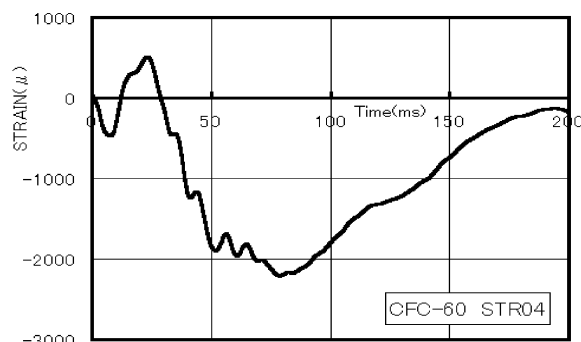
FSTA+1800 左ストラット中央-正面 (Z方向)



FSTA+1800 左ストラット中央-右側面 (Z方向)



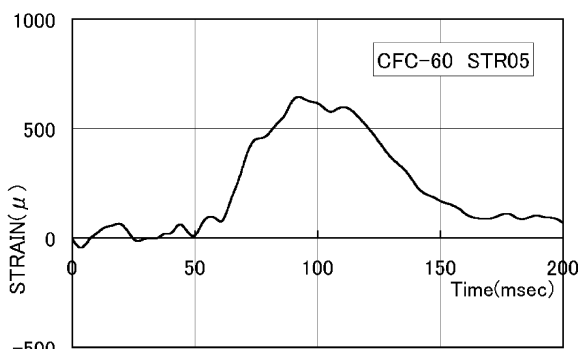
FSTA+1800 左ストラット中央-左側面 (Z方向)



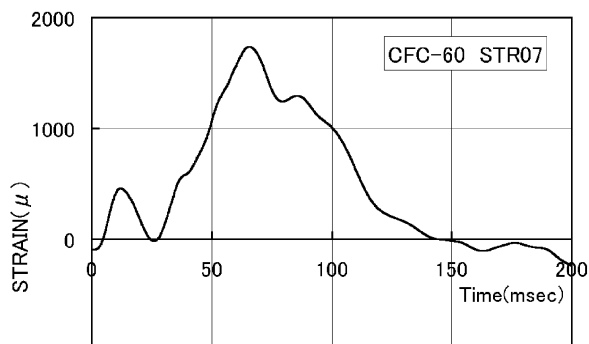
FSTA+1800 右ストラット中央-正面 (Z方向)

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -1/15

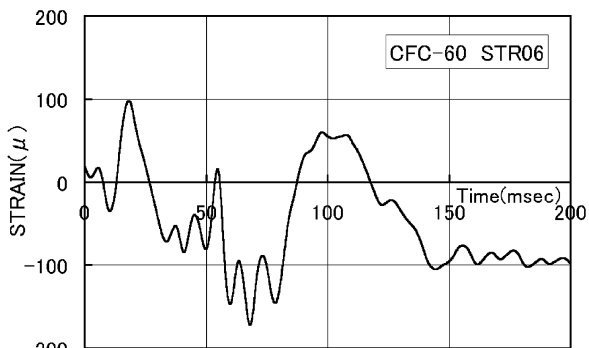
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -2/15



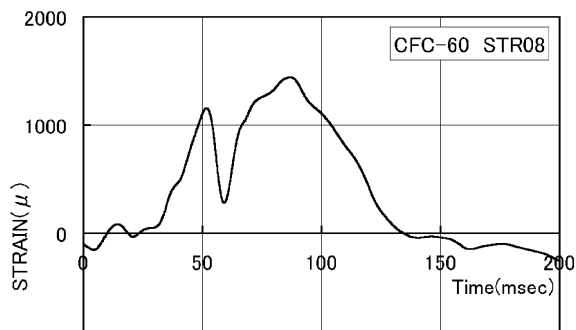
シート#1L 左前脚柱中央-正面 (Z方向)



シート#1L 左後脚柱中央-正面 (Z方向)



シート#1L 右前脚柱中央-正面 (Z方向)

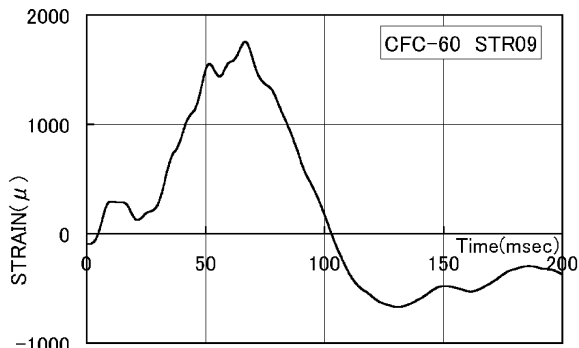


シート#1L 右後脚柱中央-正面 (Z方向)

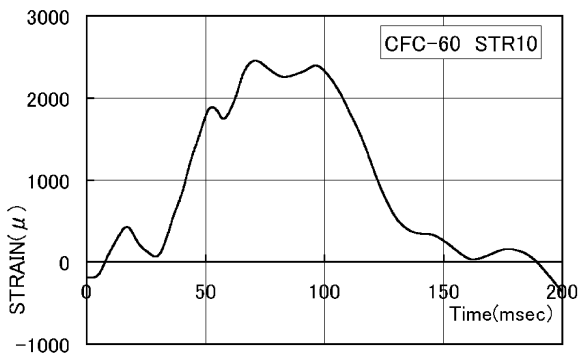
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -3/15

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -4/15



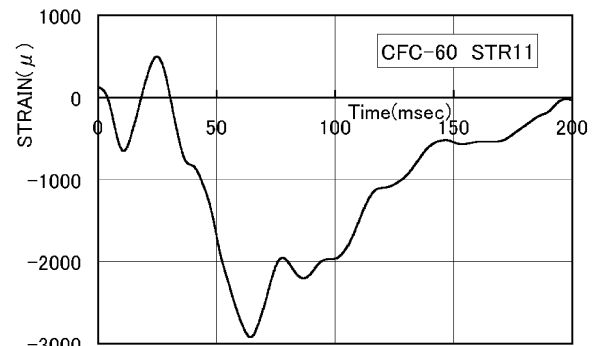


シート#1L 前方チューブ中央-下面 (Z方向)

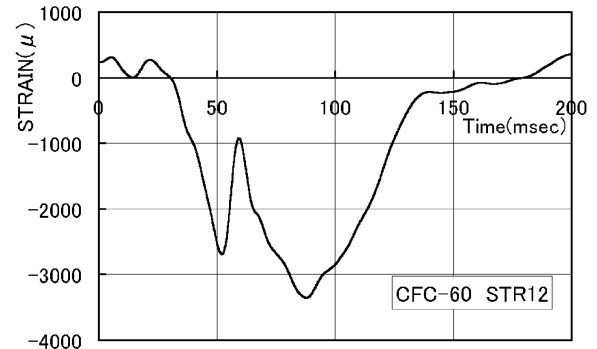


シート#1L 後方チューブ中央-下面 (Z方向)

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -5/15

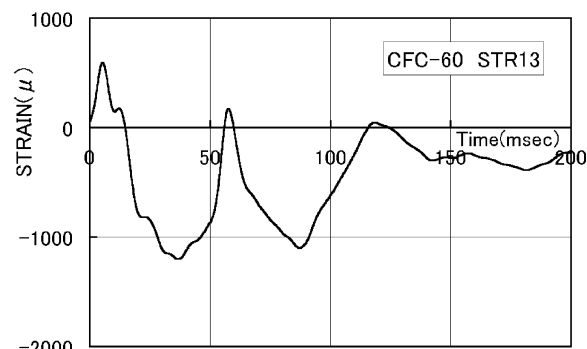


シート#1L 左後脚柱中央-後面 (Z方向)

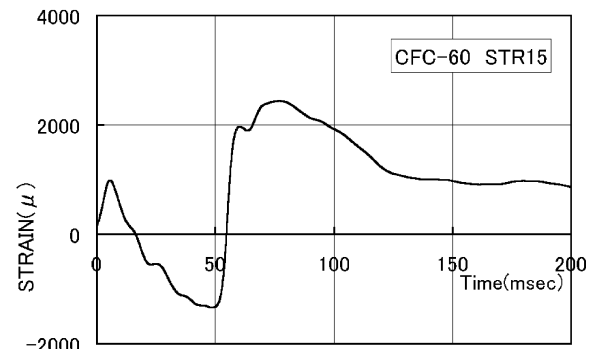


シート#1L 右後脚柱中央-後面 (Z方向)

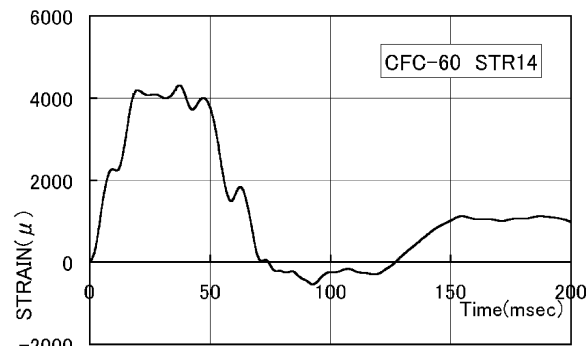
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -6/15



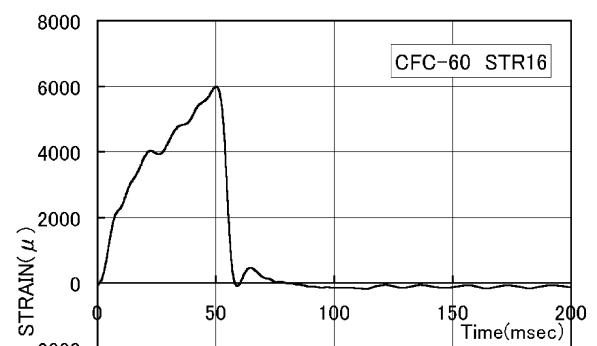
FSTA+1800 フロアビーム中央-上面 (Z方向)



FSTA+2760 フロアビーム中央-上面 (Z方向)



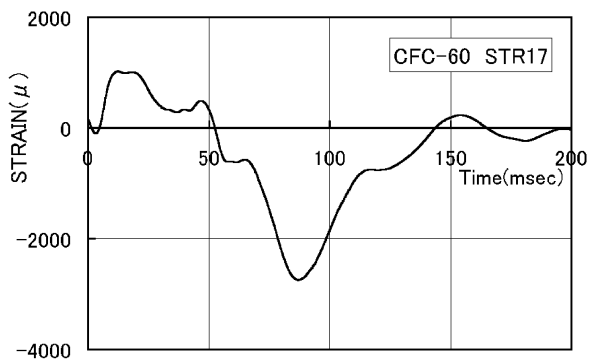
FSTA+1800 フロアビーム中央-下面 (Z方向)



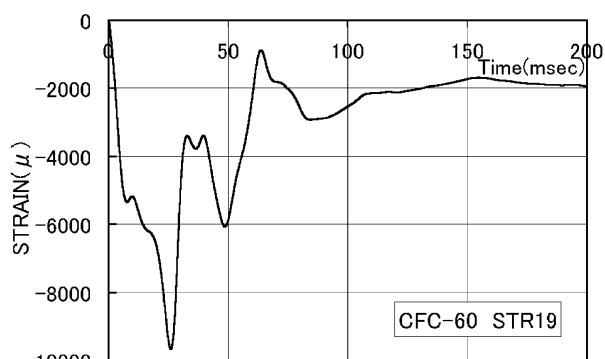
FSTA+2760 フロアビーム中央-下面 (Z方向)

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -7/15

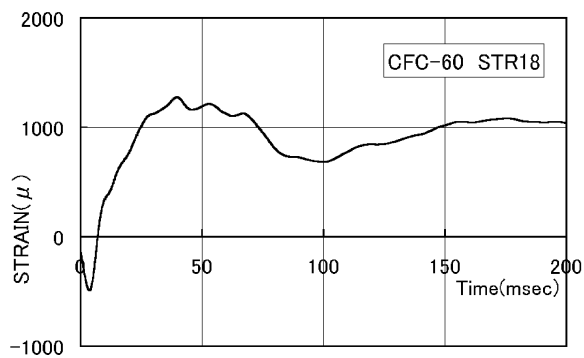
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -8/15



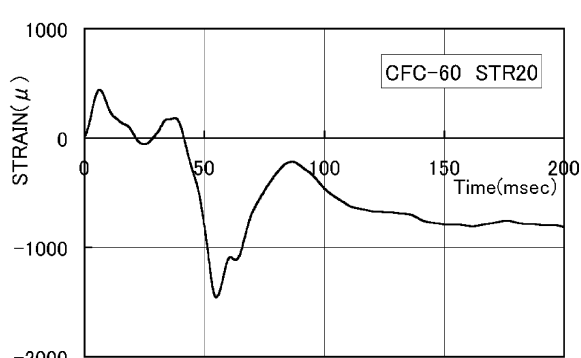
FSTA+2760 フレーム・フロア左接合下部-内面 (Z方向)



FSTA+2760 フレーム・左ストラット下部-内面 (Z方向)



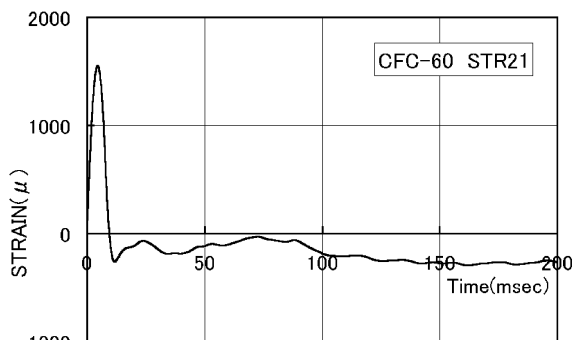
FSTA+2760 フレーム・フロア左接合下部-外面 (Z方向)



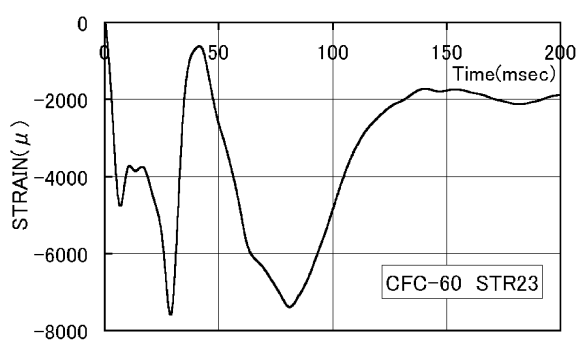
FSTA+2760 フレーム・左ストラット下部-外面 (Z方向)

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -9/15

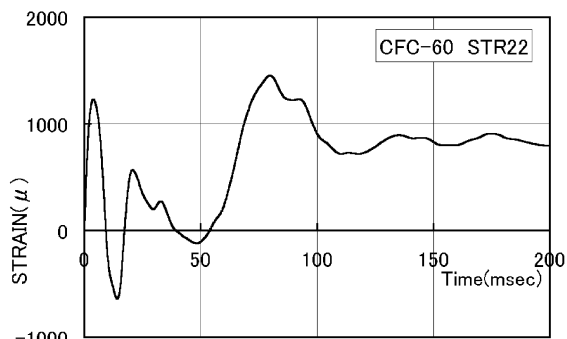
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -10/15



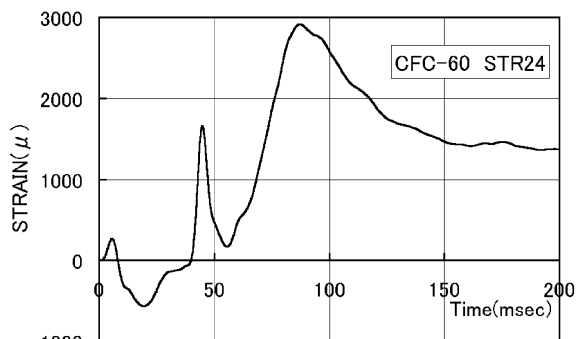
FSTA+2760 フレーム最底部-内面 (Z方向)



FSTA+2760 フレーム・右ストラット下部-内面 (Z方向)



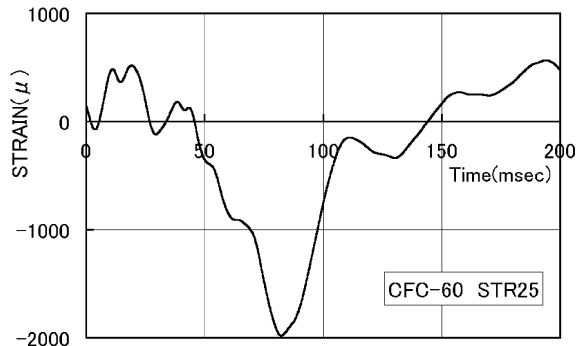
FSTA+2760 フレーム最底部-外面 (Z方向)



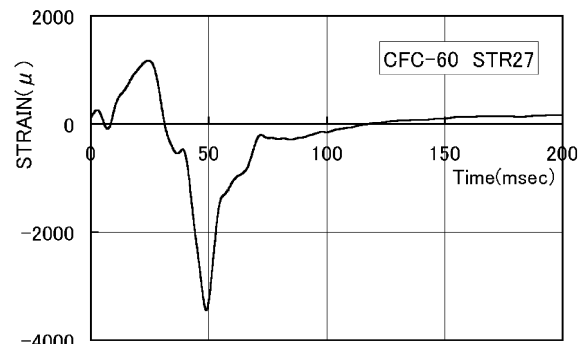
FSTA+2760 フレーム・右ストラット下部-外面 (Z方向)

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -11/15

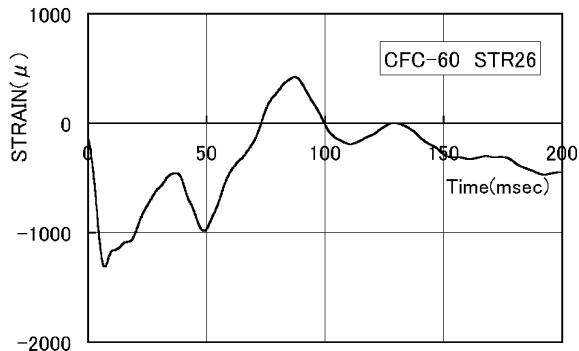
付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -12/15



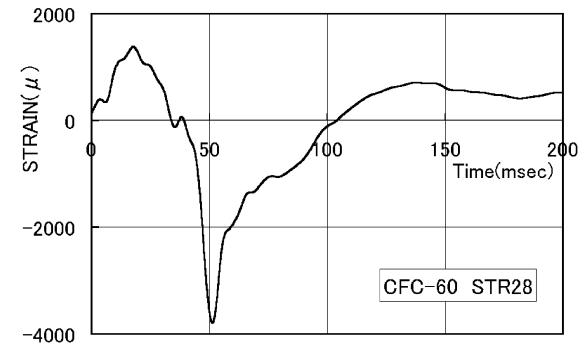
FSTA+2760 フレーム・フロア右接合下部－内面（Z方向）



FSTA+2760 左ストラット中央－正面（Z方向）



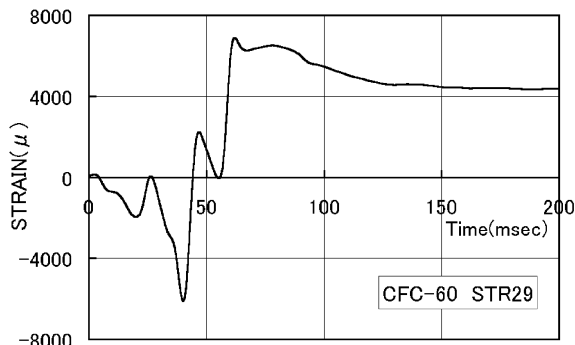
FSTA+2760 フレーム・フロア右接合下部－外面（Z方向）



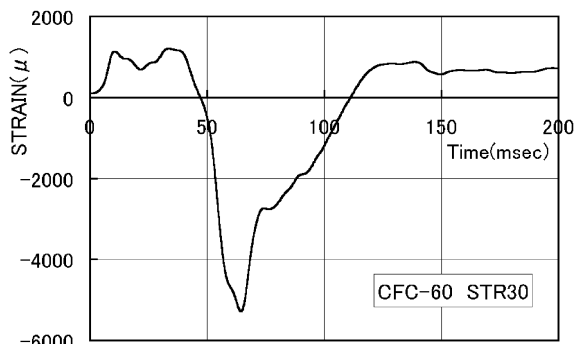
FSTA+2760 右ストラット中央－正面（Z方向）

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -13/15

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -14/15



FSTA+3720 左ストラット中央－正面（Z方向）



FSTA+3720 右ストラット中央－正面（Z方向）

付録4 CFC 60 処理のひずみ時刻歴応答 -15/15

---

## 独立行政法人 航空宇宙技術研究所報告1461号

平成 15 年 6 月 発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町 7-44-1  
電話 (0422) 40-3935 〒182-8522  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---

© 2003 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

※本書（誌）の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で  
複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。  
※本書（誌）からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料  
係にご連絡下さい。  
※本書（誌）中、本文については再生紙を使用しております。





Printed in Japan