

生体信号計測技術の開発*

長岡 俊治¹⁾ 宮本 晃¹⁾ 清水 盛生¹⁾ 渡邊 悟²⁾ 金子 さゆみ²⁾
鈴木 啓之²⁾ 臼井 支朗³⁾ 神山 齊己³⁾ 平田 豊³⁾ 小嶋 悌亮⁴⁾
中山 純子⁴⁾ 大山 勝⁵⁾ 石倉 精三⁵⁾

宇宙開発事業団、宇宙実験グループ¹⁾、名古屋大学環境医学研究所²⁾

豊橋技術科学大学、工学部³⁾、榑東レリサーチセンター⁴⁾

(財)宇宙環境利用推進センター⁵⁾

1. はじめに

宇宙は特殊環境の一つであり、地球という重力環境に生まれ育った人間がこの特殊環境に滞在・生活するためには、解決しなければならない課題が多く存在する。中でも微小重力環境によって引き起こされる生理的問題の多くは、現在の知見をもってしても、いまだ未解決な部分が多く、宇宙においても重力レベルを維持しなければならないか、また生体がどこまで微小環境に順応可能かを研究することは非常に重要なことである。このような微小重力環境の短期間曝露では生体が順応できることについて、ソ連や米国の宇宙飛行経験から証明されているが、1年以上の長期滞在については、ほとんど未知の分野である。日本においても今後の課題として独自の有人宇宙開発を始めるにあたり、有人宇宙技術についての基礎的な知識の集積と経験の積み重ねが不可欠である。

地上で微小重力下の生体変化を研究する手段として用いられる方法には、航空機のパラボリックフライトによる短時間の低重力の実現や、プール水浸法、頭部を下げたベッド上の臥床等の機能的なシミュレーションがある。これらの方法にはそれぞれの適用限界があり、短時間であっても宇宙における微小重力状態に最も近い環境を模擬するのがパラボリックフライトである。このパラボリックフライトの特性を活かした医学研究としては、応答の早い生体変化、例えば循環系、呼吸系、前庭神経系に関する実験がかなり行なわれており、最近では自律神経応答の研究が注目されている。

日本が参加することとなっている宇宙ステーションの実験には、多くの医学・生理学実験が提案されようとしているが、このような環境での生理計測自体にはさまざまな問題があり、地上の実験室のように容易には行かない。例えば、宇宙ステーション内での生理計測の難しさは、被験者が宇宙飛行士(クルー)自身であり、計測に与えられる時間や適用可能な方法、装置等の測定環境に大きな制限がある。一方、生体計測データは、得られればかなり多量のデータとなり、それを編集して地上に伝送した

* この報告は宇宙開発事業団の平成2年度委託業務『共通実験技術の開発(その4) -生体信号計測技術の開発-』で実施された航空機実験の成果の一部をまとめたものである。

り、必要に応じて軌道上で解析・処理することも要求されるであろう。

これらのことより、軌道上でのリアルタイム生体計測、即時データ処理、ダウンリンク情報の圧縮、地上でのデータ処理、統一的な計測情報の管理等が不可欠になってくる。

『生体信号計測技術』はこのような、軌道上での生体計測と地上でのデータ処理・解析および管理を有機的に行なうための基礎技術である。生体信号計測技術はライフサイエンス分野の多くの研究者が希望している宇宙医学、基礎生物学実験を支援する基礎的技術であるだけでなく、有人サポート技術の基盤となるものである。

2. 実験方法

2.1 飛行条件

実験飛行はダイヤモンドエアーサービス (DAS) の小型リアジェット、MU-300を用いて行なわれた。飛行空域はあらかじめ設定された、遠州灘沖空域 (K空域) あるいは、北陸沖周辺空域 (G空域) において約一時間実施され、全飛行時間は実験空域への往復も含め、約2時間を要した。

計測は離陸前から開始し、着陸後まで連続して行なった。パラボリックフライトに関する飛行プロファイルは通常のパターンに加え、低重力状態に入る前の過重力を1.2~1.3gに抑えたプロファイル (図1) も毎回の飛行で部分的に実施した。通常のフライトプロファイルでの低重力維持時間は約20秒であったが、低過重力プロファイルでは約15秒と5秒前後短くなった。飛行中のキャビン内圧は0.9気圧 (±0.1) に保たれ、パラボリック飛行中急激な変化はなかった。実験中のキャビン温度は25℃ (±2℃) であったが、飛行前の準備は格納庫内で行われたため、気温が低いことからかなり低温 (3~7℃) になった。

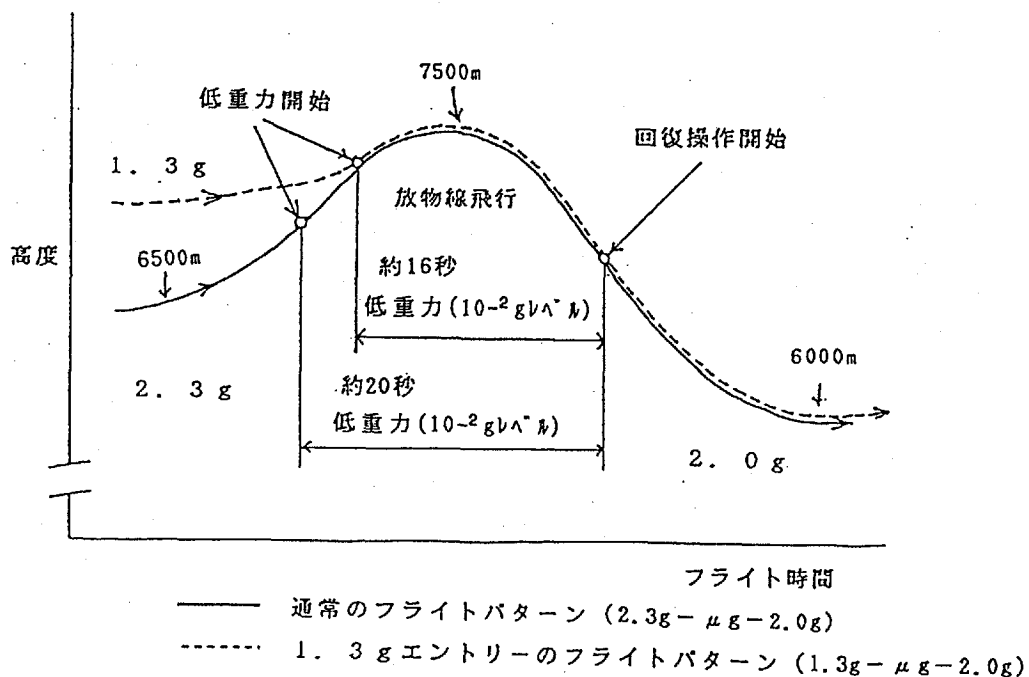


図1. パラボリックフライト (放物線飛行) パターン

2.2 被験者

今回の航空機実験では、1名の健康な成人男子（28才）を用い、全実験期間中同一の項目を繰り返し計測し、計測値・計測システムの信頼性を確認すると共に、同一の被験者による繰り返し加速度変化に対する時間的順応についても知見を得ることをねらった。

2.3 計測項目

被験者からの計測に関しては、以下示したように、合計10項目の基礎的な生理情報を取得した。これらすべての項目の計測に対し電極、センサーの総点数は25カ所以上におよび、これらが相互に干渉しないよう工夫した。図2はこれらの電極・センサー類の装着部位の概要を示す。

心電図は第II誘導とし、左前胸部の電極はインピーダンスカルディオグラムの影響を避けるため電流電極の外側とした。GSR（皮膚電気反射）の記録は被験者右手掌部と右前腕部間で記録した。呼吸曲線は腹部に接着した伸長歪ゲージ（日本電気三栄、45256型）出力をアンプ（同社、1272、1253A型）を介して得た。光電脈波は日本電気三栄製脈波ピックアップセンサー（45261型）を用い右手第2指の第1節腹側から得た。血圧波形は、フィンガーカフを用いた非観血連続自動血圧計（ファイブリス2300型）を使用し、右手第3指にて計測した。垂直眼球運動は被験者右目より、水平眼球運動は両眼よりEOG電極（日本電気三栄、45380型）により誘導し、アンプ（同社、1271、1253A型）を介して計測した。体温は、左腋窩にセンサー（日本電気三栄製45264型）を装着し、ヘッドアンプ（日本電気三栄製1178型）を介して計測した。心拍出量は、インピーダンスカルディオグラム（グッドマン、NCCOM-R-7型）を用いて計測し、記録は2心拍ごととした。経皮酸素・炭酸ガス分圧は、センサーを左鎖骨下部におき、経皮血中ガス分析装置（コントロール、MICROGAS,7640型）を用いて計測した。

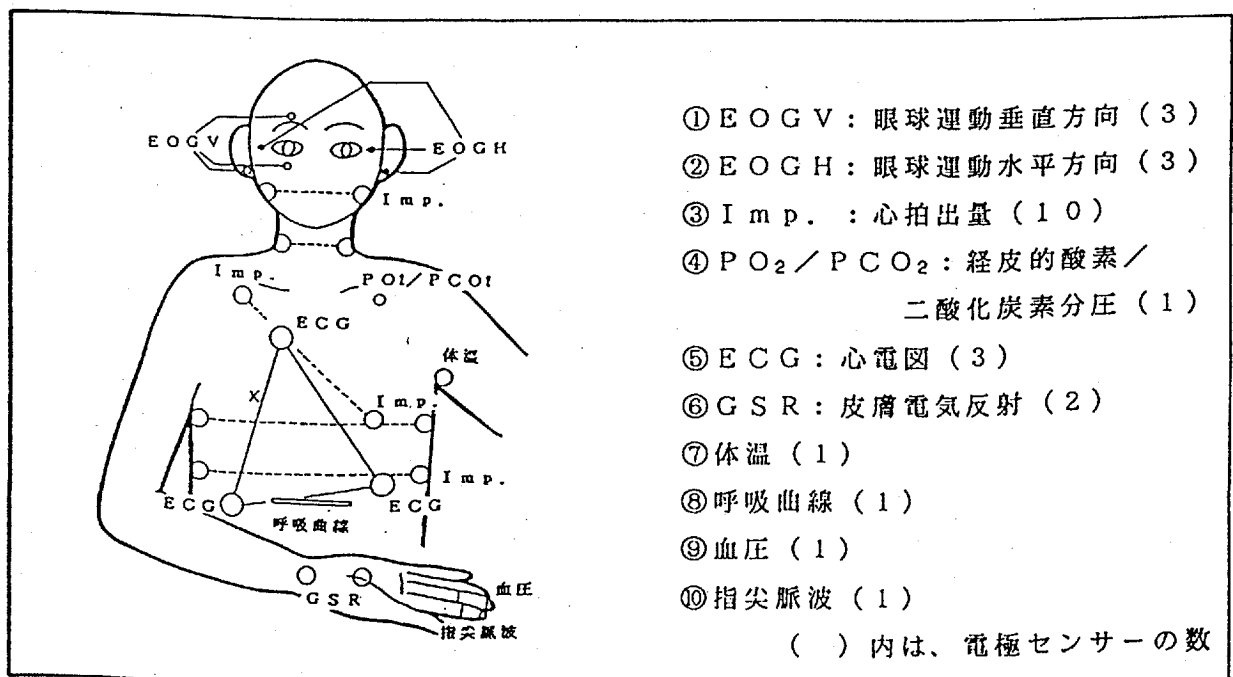


図2. 計測項目と計測部位

2.4 実験装置

使用した実験装置は標準ユーザーラックに図3で示すように搭載した。生体計測用のヘッドアンプボックスは被験者座席の背面に固定し、信号は実験システム用ラック(#4)を経由して機体最後尾のシステムラックおよびユーザーラック内の2台のデータレコーダによって記録した。2台のデータレコーダの同期は双方にタイムコードジェネレータからの信号を入力する事により行った。インピーダンスカルディオグラムからのデジタル出力は、搭載したノートブックパソコンへ取り込み、飛行終了後フロッピーディスクへ出力した。実験に使用した搭載装置の仕様および個数のリストを表2に示す。ユーザーラック部の搭載状態を写真1において示す。

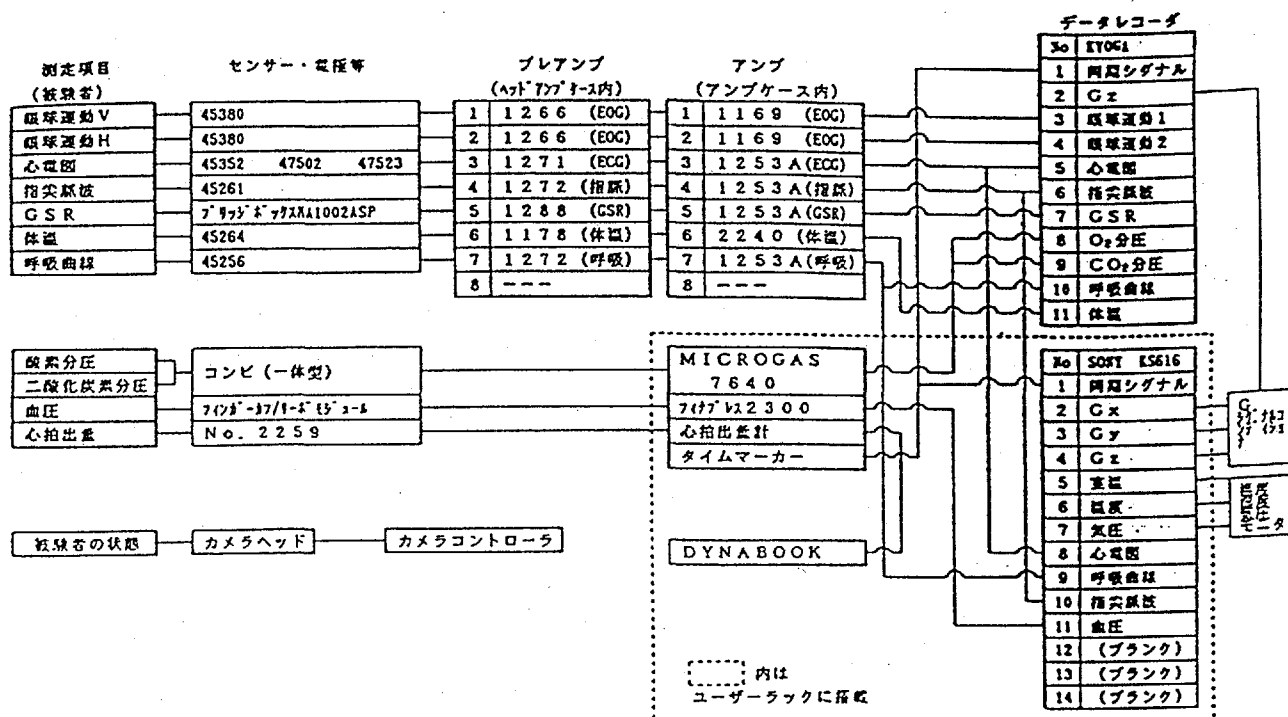


図3. 実験装置のシステム構成図

表1. 実験装置と計測項目

計測項目	名称	個数	備考
経皮的血中酸素／分圧	経皮的血中酸素分析装置 非観血連続自動血圧計	1	コントロ MICROGAS 7640 81シリーズ
血圧	非観血連続自動血圧計	1	日本電気三栄 ファイブレス2300
心拍出量	心拍出量計	1	グッドマン NCCOM R-7
眼球運動（垂直／水平）	生体電極アンプ	2 2	日本電気三栄 45380 1266 1189
心電図	生体電極アンプ	3 1	日本電気三栄 45352 1271 1253A
指尖脈波	脈波ピックアップ	1 1	日本電気三栄 45261 1272 1253A
GSR（皮膚電気反射）	生体電極アンプ	2 1 1	日本電気三栄 45352 MA1002ASP 1288 1253A
体温	ピックアップ	1 1	日本電気三栄 45264 1178 2240
呼吸曲線	センサアンプ	1 1	日本電気三栄 45256 1272 1253A
	タイムマーカー	1	ホーマイオンラボラトリー TM-200
	データレコーダ1	1	KYOWA
	データレコーダ2	1	ソニー KS-616
	DYNABOOK	1	東芝 J3100SS001

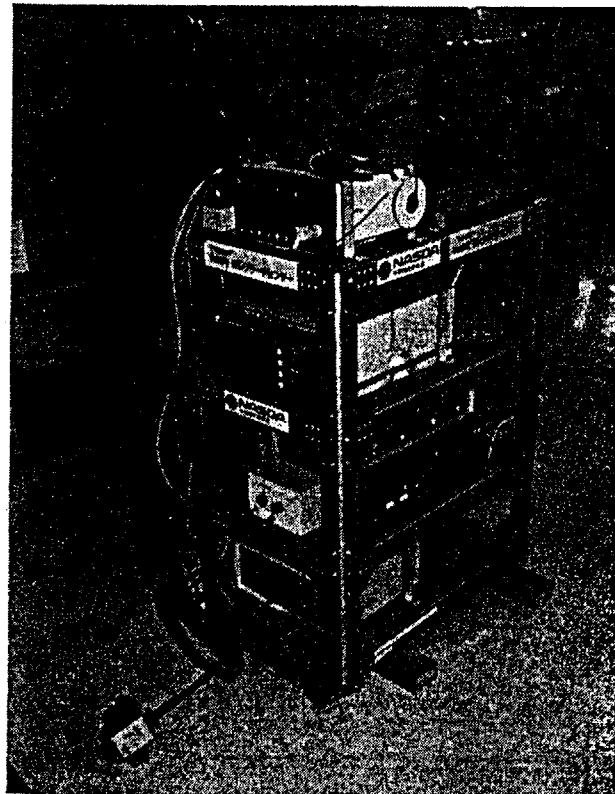


写真1. 実験装置（ユーザーラック部）

2.4 実験条件・手順

2.4.1 データ収録シーケンス

この実験では生体計測データの収録は、出来るだけ多くの情報を収集するため、全飛行時間にわたり連続して行なった。フライト直前に機内で装置キャリブレーションデータおよびフライト前地上対照データを10分間取得した。その後空域到着まで飛行中1gデータを取得、空域に到着後データレコーダのテープを交換し、パラボリックフライト時のデータを連続して収録した。パラボリックフライト終了後テープを交換し、実験空域から離脱し空港へ帰着するまで飛行中1gデータ、フライト後地上対照データは着陸後5分間まで収録を行なった。

2.4.2 フライト時のプロトコール

①フライト直前に機内でフライト中と同内容のデータを5分間（イスの角度90度、45度）収録した。

②フライト中の被験者の姿勢

イスの角度90に座った状態で 毎フライト 3 回

イスを45度傾けた状態で 毎フライト 3 回

③パラボリックフライト以降のgパターン：1. 3gからエントリーするパターンをイスの角度90度に座った姿勢で数回計測を実施した。

④着陸後直ちにそのままの状態です5分間（イスの角度90度、45度）データを収録した。

⑤被験者の状態：

上記の条件の他に次の条件を負荷して実験を行った。

ア) 開眼固視

イ) ア)+呼吸統制(20回/1min)

ウ) 暗視野(遮光ゴーグル着用)

各フライト、各パラボリックフライト毎の飛行条件、被験者の状態をまとめ表2に示す。

表 2. 各フライトごとの実験条件

パラメトリック フライト	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 (2/26)	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 45°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	—	—
2 (2/27)	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	—
3 (3/1)	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	—
4 (3/2) *	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 45°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	2.3g 90°
5 (3/4)	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 45°	2.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	—
6 (3/5)**	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 90°	2.3g 45°	2.3g 45°	1.3g 90°	1.3g 90°	1.3g 90°	2.3g 90°	—	—

フライトは平成3年2月26日から3月5日にかけて行われた。

a) 2.3g、1.3gは、それぞれ2.3gエントリー、1.3gエントリーを示す。

b) 90°、45°はイスの角度を示す。

c) * : 呼吸統制1分間に20回

d)** : ゴーグル使用

3. 実験結果

全飛行期間中6回の飛行実験を実施することができ、毎回の飛行では、9～11回のパラボリックフライトを行うことができた。また、全飛行において、ほぼすべての計測項目のデータを取得することができた。

以下に得られたデータの簡単な解析結果を示す。

①自律神経機能

生体现象は時定数の長い現象が多く、過重力の影響が低重力で生ずる生理的現象にかなりの割合でおよんでいることが予想される。今回の航空機実験では、過重力-低重力-過重力の3つの相からなる飛行と、わずかの過重力（これは殆ど生理現象に影響しない1.1～1.3g程度）の影響を無視できるものとみなし、低重力-過重力の2つの相からなる飛行で比較することができる。この場合はむしろ過重力の生体を与える影響を見ており、後者が低重力効果を見ていることになる。生体现象の記録は自律神経機能のパラメーターとして心電図、血圧、指尖脈波、GSR、呼吸、体温、末梢血酸素分圧の各項目について行っている。これら自律機能に関しては、特に飛行中の交換神経系の緊張の変化を調べる目的で心電図のR-R間隔にみられる「Mayer律動」の変化、呼吸性変動、血圧変動との関係に注目して調べた。自律神経系の緊張は精神的なものとの結びつきも大きく、ことに放物線飛行にはいる前に、コックピットから「今から放物線飛行に入る」とのアナウンスが入ると、被験者には手のひらの発汗が始まり、GSRに顕著な変化（図4,*1,*2）を観測することができるし、それと同期した指尖脈波の動揺（図4,*3,*4）を見ることことができる。このような精神的緊張は自律神経にも影響をおよぼし、交換神経の緊張を引き起こす。これは、過重力期と重なり合って、R-R間隔の分析を複雑にしているが、ポリグラフ的解析から精神緊張の存在とその経時変化が明らかとなった。重力変化の物理的な影響は体液変動という形でも自律神経に変化を与える。被験者が精神的緊張を大きく表わす場合には、物理的影響による自律神経緊張の変化はあいまいであるが、今回の6飛行では、同一被験者で繰り返し計測を行なう方法を採用したことにより、過重力変化に対する慣れ効果を観測することができた。ことにR-R間隔分析では低重力下の心拍変動に明らかな慣れ効果を認めることができた。

②眼球運動

眼球運動の解析では、従来の報告にみられた低重力下での眼振発現が、本実験でも確認できた。これは急激な前庭耳石入力の脱落が、眼振を発現させ得るか否かは議論のあるところである。今回の被験者（前庭神経系の正常）では、低重力突入直後から明らかな垂直性眼振の発現（図4*5）を認めることができた。しかし、垂直性眼振の発現は、90度座位のみでみられ45度座位では観察されないことから、 G_x の影響も考慮しなければならない。

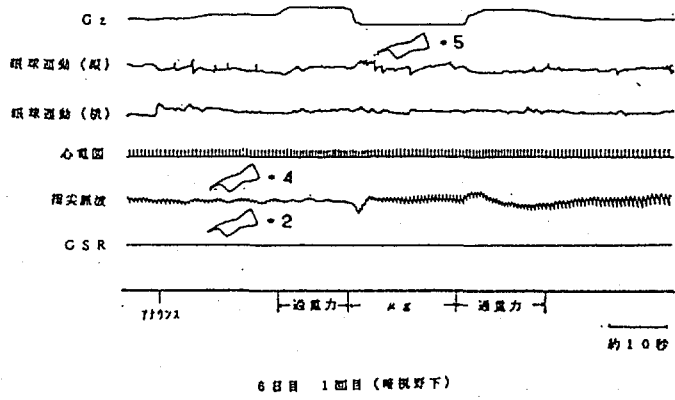
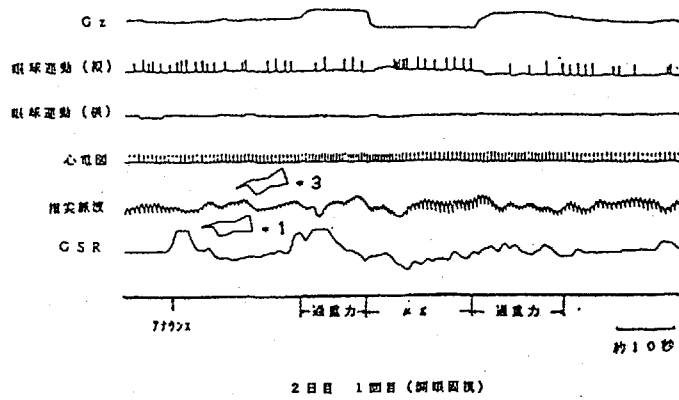


図4 μg 下における生体信号データの特徴

③呼吸機能

パラボリックフライトによって得られる、低重力状態における循環動態の計測は、無侵襲かつ連続測定のできる適当な装置がこれまでなかったため、ほとんど試みられていない。今回の実験で血圧と心拍出量の変化を十分に記録できた意義は大きく、得られたデータから生理学的な変化を解析することはもちろん重要であるが、それ以上に将来における無重力状態での循環動態計測装置開発にも十分に役立つと考えられる。実際に得られたデータは、心拍数が低重力状態で減少し、低重力状態前後における過重力状態で増加した。血圧は、収縮期・拡張期圧ともに低重力状態で低下し、分時心拍出量の変化は顕著でなかったが、1回心拍出量は、低重力状態で増加を認めた。

④データ解析システムによる処理

実験で得られた時系列データは、データレコーダに記録された膨大な量（約360 Mbyte）のアナログデータであり、その確認、切り出し、編集、データベース化といった多大な作業を要した。さらに今回の実験のように目的は決まっても、これまでの基礎データが十分に整備されていない場合は、解析は自ずから試行錯誤的な作業とならざるを得ない。このような大容量データ解析にはまず、データを分割、表示、加算、平均、相関等の基本的な処理により、多量のデータ群から有意な変化を見出すことが重要である。さらに詳細な解析は、生理工学的アプローチにより行うことが望ましい。すなわち、低重力実験で得られたデータを、生体信号に特有な非線形・非定常・非正規信号を扱う数学理論やデジタル信号処理技術、あるいは、数理モデルを用いたシミュレーション等の工学的手法により、様々な角度から解析していく。こうした解析には、研究者のインスピレーションを活かした試行錯誤的な試みが重要であり、それを実現するためには、高速かつ大容量データを扱えるデータ解析支援環境が不可欠である。

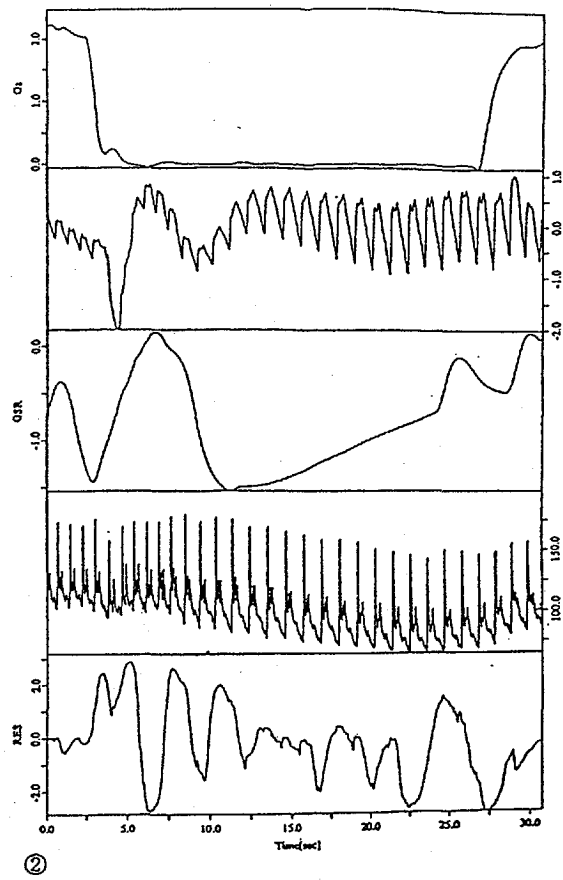
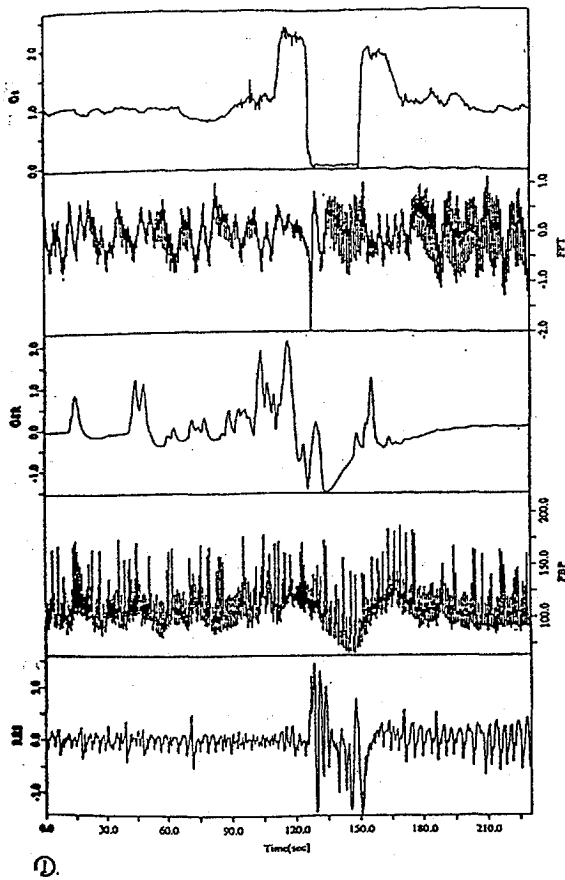
今回の実験データはまだ十分な詳細解析を終えていないが、図5は豊橋技術科学大学で筆者らがデータ解析に利用しているシステム（SATELLITE）による出力例を示す。

4. 航空機による生体計測の技術的検討

4.1 航空機実験での問題

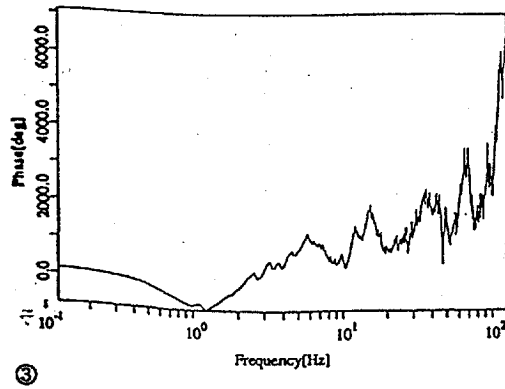
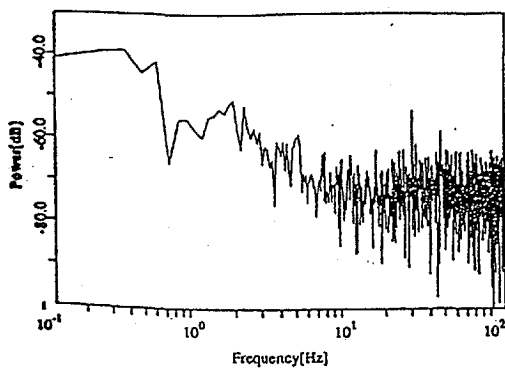
今回の航空機実験では次のような問題点が抽出された。今後これらの問題点を改善することにより、より確実なデータ取得・処理が実現され则认为る。

- ・センサー特性の問題（過重力・低重力時や被験者の動作の影響を受け易い）。
- ・前後の過重力が低重力の生体信号データに影響を及ぼす。
- ・多点数計測のデータ収録が困難である。
- ・機体の制約から被験者の自由度に制限がある。
- ・キャリブレーションシグナルが取得しにくく、工学値変換が行えない。



①

②



③

図5 サテライトによる低重力データの出力
 (5日目1パラボリックフライト目のデータ)
 ①パラボリックフライト前後(230秒)の測定波形
 上からGz、指尖脈波、GSR、
 血圧、呼吸曲線
 ②低重力部分の拡大波形(上)
 ③低重力中央部Gz(10秒間)の
 パワースペクトルと位相(下)

4.2 飛行後取得データの処理方法

- ①収録データから解析に必要と考えられるタイムドメインを抽出する。
- ②毎回のフライトに対し、以下の4種類のデータ群に編集した。
 - ・ キャリブレーションデータ・・・60秒
 - ・ 飛行前1gデータ・・・120秒
 - ・ 低重力データ・・・230秒
 - ・ 飛行後1gデータ・・・120秒
- ③低重力データは、低重力に入る2分30秒前から収録を開始し、低重力終了後1分間まで収録するため、飛行中の1gデータも収録される。
- ④重力変化に対し応答の早い(詳細なデータ解析を必要とする)下記の計測項目を優先的にデータ処理を行う。

Gzデータ、 眼球運動(垂直)、 眼球運動(水平)、
 心電図、 指尖脈波、 GSR(皮膚電気反射)
 呼吸曲線、 タイムマーク、 血圧

- ⑤データ処理の手順を図6に示す。データ解析システムSPIRASを用い、上記のデータの工学値変換を行った。さらに別プログラムによって、それぞれの計測項目のチャンネル分割を実施し、フロッピーディスクに納めた。その結果、28本のデータテープを258枚のフロッピーディスク(860ファイル)に変換することができた。

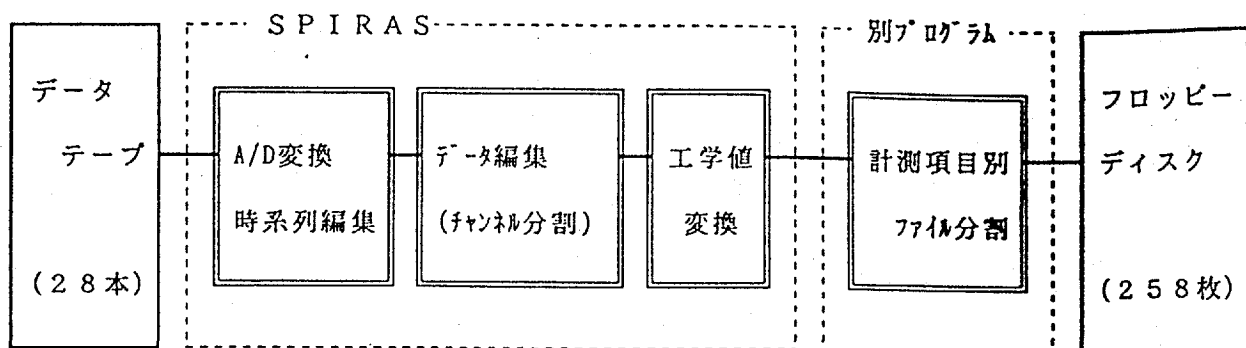


図6. データ処理の手順

4.3 データの整理・管理

大容量・多項目のデータを用いて解析を行なう場合、利用者が全体のデータから、解析の対象としたい計測項目や実験条件に合致する部分を迅速、かつ容易に検索することが必要となる。将来さらに多量のデータが蓄積されることを配慮に入れると、このような大容量実験データを効率的、かつ統一的に管理することは実務上重要な技術である。

今回の航空機実験から得られたデータは前述のように、一定の形式で、バラボリックフライトや計測チャンネル毎に分割し、ファイル化を行った。さらに個々のデータファイルの情報に、解析に必要な実験情報や属性を付加し、全体をデータベース化し、問い合わせ、検索、出力等が可能なようにデータベースのアプリケーションプログラ

ム（フライト実験データ検索プログラム）もあわせて開発した。このデータベースプログラムは小型のDBMSであるR:BASEを利用し作成し、個々のデータファイルに関し、計測内容、実験条件、フライト条件、キャリブレーション情報、同時計測項目、被験者情報、時間情報など34項目にわたり整理し、最大6条件までの多重検索や出力などが簡単な索引メニュー方式で行えるようになっている。図7はこのデータベースプログラムのメニュー画面例を示す。

— フライト実験データ検索プログラム (1) —

- (1) フライト毎のタイムドメイン一覧
- (2) フライト毎の計測項目一覧
- (3) 計測項目別データファイル検索
- (4) フライト別データファイル検索
- (5) 年月日によるデータファイル検索
- (6) 条件別データファイル検索
- (7) データー一覧の印刷
- (8) 終了

(6) 条件別データファイル検索

g パターン (ノーマル/1.3/*) . . . _____

姿勢 (45/90) は . . . _____

視覚条件 (開/閉/暗) . . . _____

呼吸条件 (普通/統制) . . . _____

図7. データ検索メニュー

4.4 データ解析とシステム解析支援環境

生体システムに関する研究は、データ計測から、信号解析、モデリング、シミュレーション、評価という一連のサイクルの下で、様々な解析手法を試行錯誤的に適用することにより進められる。特に、生体のもつ非線形・非定常に代表される複雑な構造・機能解明が進むに従い、新たな解析手法の開発・導入も必要となってくる。そうした研究・解析を支援するためには、『直感』や『経験』など解析者側の創造的発想と、理論・手法を実際の処理に活かす計算機とを直結し、利用者のニーズに迅速、柔軟に対応可能なソフトウェア支援環境が必要不可欠である。

このような分野で必要な解析には、デジタル信号処理論、シミュレーション技法を基礎とし、グラフィック表示を主体とした、利用者にとって使いやすい、システム解析支援環境技術の開発が必要となる。そこには脳波・心電図などの時系列生体信号解析、連続系シミュレーション、イオン電流特性に基づいた大規模神経ネットワークシミュレーションなど、幅広いシステム解析分野の手法が含まれる。

従来、計測された信号から特徴の抽出や動特性の解析を行うための相関分析、多変量解析に代表される統計解析やスペクトル推定を核とする周波数解析など多くの理論が体系化されている。しかし、低重力環境での生体応答や機構を解明するには、これまでに確立されている線形・定常を中心とした理論だけではなく、場合によっては『

非線形・非定常・非正規・非平衡』性などを考慮した新しい理論の適用も必要となってくる。また、多チャンネル計測された信号から、情報の流れや動態を可視化する多次元処理手法の確立も必要とされる。

さらに、こうした分析的手法とは別に、対象に関するこれまでの知見に基づきモデルを作成、シミュレーションを実行してメカニズムを明かにする合成的手法も重要である。このような手法は計算機上においても実験が可能で、生体・生理実験だけでは得られない知見を得ることも可能となる。生体システムは、現存する最も複雑なシステムであり、ここから得られたデータを確実に処理するためには、要求される解析手法をなるべく網羅するような、支援環境の実現が不可欠である。

5. おわりに

今回の航空機実験によって、低重力環境での生体信号計測の技術的検討ならびに基礎的な生体信号データをかなり広範囲で取得することができた。さらに得られた膨大な実験データから必要な部分を抽出し、利用者が解析に供し易いように工学値変換や計測項目ごとのファイル化などの処理を行い、データを提供することが可能となった。これらの大容量データを統一的に管理するとともにデータを利用する研究者に対し、容易にデータに関する情報が検索可能なデータベース化技術を開発した。さらに実験を通じて本技術の開発上の課題を数多く把握することができた。今後は、新しい計測項目・実験条件を加え、より広範囲のデータが低重力環境においても確実に計測できるよう改善を重ねる。また、軌道上、地上双方でこれらのデータを解析するためのソフトウェア支援環境等については、今後の重要な開発課題の一つであるが、今回得られた成果をもとにさらに検討を行う。

なお、本実験を行うにあたり、日本電気三栄株式会社、コントロールインストゥルメント株式会社、株式会社グッドマンのご協力を得たことに感謝の意を表します。