

重力変化における右心機能の非侵襲測定

神山 健太・野口 将平・磯前 穂奈美・秋元 俊成・寺田 信幸

Non-invasive measurements of the right heart function during the gravity changes

Kenta KAMIYAMA, Masahira NOGUCHI, Honami ISOMAE,
Toshinari AKIMOTO, Nobuyuki TERADA

Abstract

We have developed device for the measurement of pressure in the ear canal to understand the jugular venous pressure without invasion. This device is effective diagnostic equipment for right heart function. It is necessary to clarify the physiological significance of pressure in the ear canal for the development of our device. The vein is affected to change in gravity with extensibility itself. In this study, the pressure in the ear canal verify in corresponding to changing gravity at parabolic flight. In the experiments, the pressure in the ear canal increased with microgravity condition. On the other hand, the volume of the lower limbs was decreased with microgravity condition. The pressure in the ear canal showed venous hemodynamics corresponding to the gravity changing. The measurement pressure in the ear canal indicates the potential to become a new method for right heart functional diagnosis.

Keyword(s): parabolic flight, venous pressure, ear canal, right atrium, circulatory function

1. はじめに

現在、左心機能については多くの指標が存在しているが、右心機能を評価する方法は少ない。しかし、三尖弁狭窄症、右室肥大、右心不全、肺高血圧症、三尖弁閉鎖不全症、心不全などの診断、治療には右心機能の的確な把握が必要である。右心機能の的確な把握は、右心カテーテル法や心エコーで行われる。右心カテーテル法は直接圧計測を行うことから、精度良い診断が可能である。しかしながら、観血的手法であることから生体への侵襲は避けられず、多くのリスクを伴う。右心機能を非侵襲かつ簡便に診断することができる装置を開発することの意義は大きい。

我々は、外耳道を経由して検知される微弱な体振動から右心機能を非観血、非侵襲的に診断する手法を考案した。耳栓により閉塞した外耳道空間の振動を低周波領域に特性を有する差圧センサにより計測する。この外耳道空間で検知される体振動は、様々な成因により生じる振動の複合と考えられるが、中心的なものに頸静脈圧変動がある。頸静脈圧変動は右房の拍動に関連する。そこで、外耳道内圧が重力変化に対応した変動を示すかを検証す

ることとした。

本研究では、パラボリックフライトによって引き起こる加重力・微小重力において、外耳道内圧が重力変化に対応した変動を計測可能か検証する。加重力・微小重力下における静脈血行動態を非侵襲に測定した例はなく、宇宙環境における健康管理指標としての有意性を示すことができる。また、地上実験における体位変換実験データとの比較検証を行うことで、外耳道内圧の生理学的意義を明らかにし、右心機能の非侵襲測定の新たな診断指標として確立する。

2. 実験方法

2.1 外耳道内圧測定装置

外耳道内圧波形は頸静脈波と非常に類似している。開発した外耳道内圧測定装置は耳栓をするような形で外耳道を密閉し、内圧の変化を計測する。高感度の差圧センサにより外耳道内の微弱な体振動を捉える。外耳道に隣接する血管が静脈であることから、振動の中心的なものは頸静脈圧変動であると考えられる。頸静脈圧変動は右房の拍動に関連することから、右心機能の有用な診断装

1 東洋大学理工学部生体医工学科 〒350-0815 埼玉県川越市鯨井 2100
Department of Biomedical Engineering, Undergraduate Faculty of Sciences and Engineering, Toyo University 2100
Kuzirai, Kawagoe, Saitama 350-0815 Japan(E-mail: k07otdw035@gmail.com)

置となる。

本実験では、航空機内の騒音対策としてヘッドホンの内部にセンサを装着することでエンジン音の高周波を遮断する。また、ヘルメットに装置を固定することで装置のずれや外部からの振動を抑えている。



Fig.1 外耳道内圧測定装置

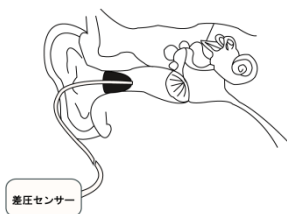


Fig.2 センサ装着位置

2.2 測定項目

本研究における実験では以下の項目を計測した。

- 外耳道内圧

外耳道内圧測定装置を使用し、右心に還流する血流量の変化つまり静脈血行動態を計測。

- 心電図・心拍出量

フィジオフィロー(マナテック社製)を使用し、非侵襲に心拍数、一回拍出量、心拍出量、心電を計測。

- 呼吸変動

ピエゾ式呼吸ピックアップ装置(ADI Instruments 社製)を胸部に巻き、呼吸による胸部周囲の変化から呼吸性変動を計測。

- 下肢容積変化

非観血末梢血行動態計測システム(Hokanson 社製)を用い、重力変化による体液シフトを太ももに巻いたストレンゲージから径の変化率で計測。

- 連続血圧

フィナプレス(FMS 社製)を使用し、指用カフにて非侵襲に連続血圧を計測。

3. 実験

3.1 地上実験

本研究の一環として、体位変換時の血行動態を計測した。体位変換は、受動的に仰臥位の状態から頭部を上げる head-up-tilt(HUT)と頭部を下げる head-down-tilt(HDT)を行った。実験の被験者は、微小重力実験と同一の健康な成人男性 2 名(年齢: 22, 身長: 170.5±3cm, 体重: 55±3kg)を対象とした。測定項目は、外耳道内圧、心電図、心拍出量、呼吸変動、下肢容積変化、連続血圧の測定を行った。併せて、超音波診断装置を用いて右心機能の測定を行った。体位変換実験は、安静仰臥位→HUT30度→安静仰臥位→HUT60度→安静仰臥位→HDT15度→安静仰臥位の順に各体位 5 分間の測定を行

った。また、超音波診断装置では、心窩部アプローチにより短軸 B モードで 30 秒間ずつ下大静脈の撮影を行った。呼気時、吸気時の下大静脈のそれぞれの最大径、最小径の縦横の長さをキャリパで測り、下大静脈横断面積をトレースで求め、呼吸性変動を計算し推定平均中心静脈圧を算出した。

3.2 微小重力実験

本実験では、開発した外耳道内圧測定装置等を用い、パラボリックフライトによって引き起こる重力変化時の外耳道内圧の計測を行った。被験者は航空機の搭乗者が兼任し、2 日間の実験で合計 2 名を対象とし、1 日目と 2 日目で被験者を変更して実施した。実験は座席に座った状態で、通常飛行、 μ G、加重力の各重力ステージの測定を行い、離陸後実験が終了し着陸するまで連続測定を行った。パラボリックフライトは両日とも、1 回のフライトで 11 回実施した。測定したデータは、データ収録システム PowerLab を使用して収録、解析を行った。

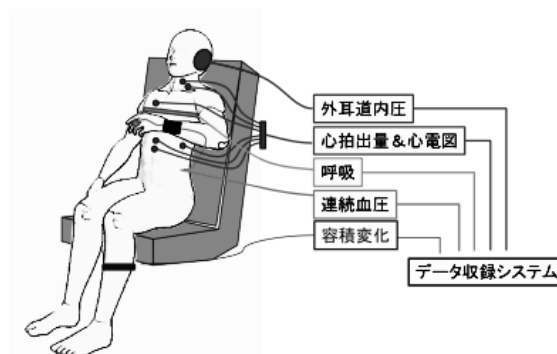


Fig.3 実験時レイアウト

4. 実験結果

4.1 地上実験の結果

地上実験として安静仰臥位、HUT60度、HDT15度の体位変換実験を行った際の、被験者 2 名(微小重力実験と同一)における外耳道内圧波形の各角度 10 拍分の平均値を Fig.4, Fig.5 の棒グラフに示した。HUT では重力により体液が下肢にシフトしたため静脈還流量が減少し、外耳道内圧は減少し下肢容積は増加した。HDT では体液が上半身にシフトしたため外耳道内圧は増大し、下肢容積は減少する結果となった。また、各角度における標準偏差を求め、t 検定を行ったところ、体位変換における外耳道内圧の変動に有意な差が認められた。地上実験の結果を Table1 に示した。

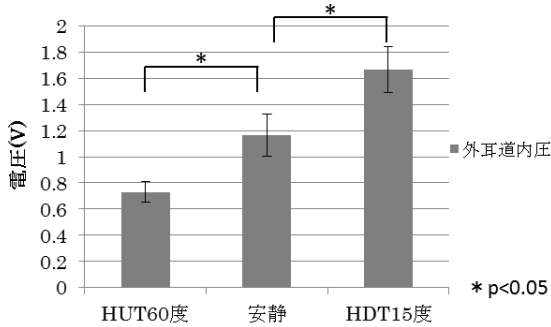


Fig.4 被験者 1 外耳道内圧平均値

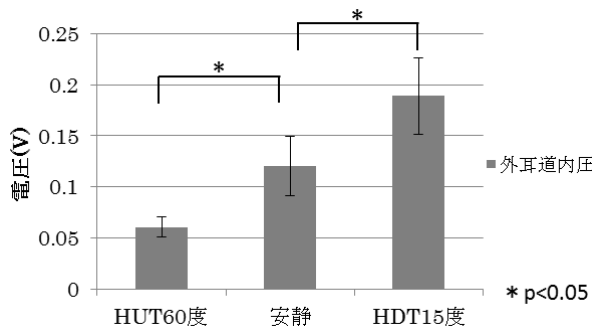


Fig.5 被験者 2 外耳道内圧平均値

Table1 地上実験結果まとめ

| 項目 | HUT30度 | 安静仰臥位 | HUT60度 | 安静仰臥位 | HDT15度 |
|------------|---------|-------|--------|-------|--------|
| 外耳道内圧 | ↘ | — | ↘ | — | ↗ |
| 心電図 | 大きな変化なし | | | | |
| 一回拍出量(SV) | ↘ | — | ↘ | — | ↗ |
| 心拍数 | ↗ | — | ↗ | — | ↘ |
| 下肢容積 | ↗ | — | ↗ | — | ↘ |
| 血圧 | ↗ | — | ↗ | — | ↘ |
| 下大静脈の呼吸性変動 | ↘ | — | ↘ | — | ↗ |

また, 体位変換時の下大静脈径の面積の変化を被験者 1 名における平均値で Fig.6 に示した. HUT・HDT では体液シフトによる血管内ボリュームの増減に伴う静脈環流量や中心静脈圧の変動が下大静脈径や呼吸性変動に反映された. また, 呼吸性変動において体位変換による体液シフトを鋭敏に捉えた. これは平均右房圧の推定は下大静脈径の大きさよりも呼吸性変動の程度が重要であることは知られている 3). このことから, 外耳道内圧は重力変化に対応した静脈血行動態を示していると考えられた.

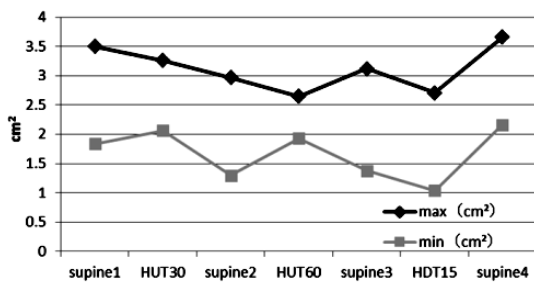


Fig.6 下大静脈面積

4.2 微小重力実験の結果

航空機実験において被験者 2 名のデータ取得に成功した. 被験者 1 名における, 各測定項目の典型例を Fig.7 に示した. 実験データは, 上から外耳道内圧, 心電図, 一回拍出量, 下肢容積, 心拍数, 連続血圧, 重力加速度データを表している. 外耳道内圧波形は, 被験者 2 名共に μG において全てのパラボリックフライトで振幅が増大した. それに対して下肢の体液が上半身にシフトしたため下肢容積は減少した. 加重力では, 被験者 2 名共に体動の影響が大きく外耳道内圧は十分に取得できなかったが, 数回のパラボリックフライトにおいて外耳道内圧の振幅が減少を示した. また, 下肢容積は体液が下肢にシフトしたため増大した. 微小重力実験の結果を Table2 に示した.

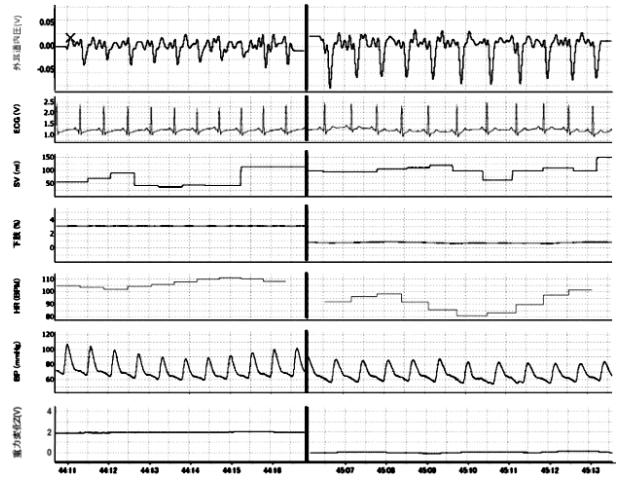


Fig.7 実験データ典型例

Table2 微小重力実験結果まとめ

| 項目 | 1 G | 2 G | μG | 2 G | 1 G |
|-----------|----------------|-------------------|---------------|-------------------|-----|
| 外耳道内圧 | — | 体動の影響が大きく計測できなかった | ↗ | 体動の影響が大きく計測できなかった | — |
| 心電図 | 大きな変化なし | | | | |
| 一回拍出量(SV) | — | ↘ | ↗ | ↘ | — |
| 心拍数 | — | ↗ | ↘ | ↗ | — |
| 呼吸変動 | 被験者によって変動にばらつき | | | | |
| 下肢容積 | — | ↗ | ↘ | ↗ | — |
| 血圧 | — | ↗ | ↘ | ↗ | — |

パラボリックフライト各 5 回分の外耳道内圧と下肢容積のデータ 10 拍分の変動を比較した成績を, 被験者ごとに Fig.8 と Fig.9 に示した. 外耳道内圧は最大値と最小値の差で示し, 下肢容積は平均値で示している. 各データから通常飛行と μG における被験者ごとの平均値と標準偏差を求め, t 検定を行った. 外耳道内圧は μG 中に有意な増加を示し, 下肢容積においても有意な減少を示したことから, 被験者ごとのそれぞれの変動に有意な差を認める結果となった.

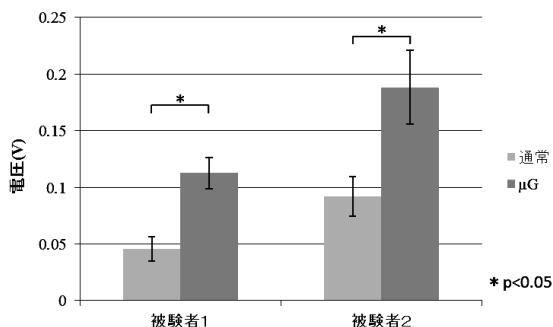


Fig.8 外耳道内圧各被験者 5 例分の平均値の比較

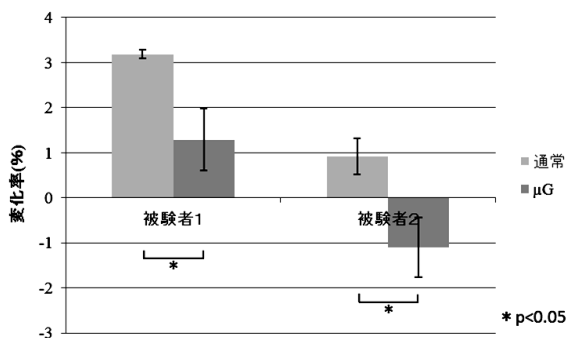


Fig.9 下肢容積各被験者 5 例分の平均値の比較

5. 考察

本実験の結果から、外耳道内圧測定装置によって取得するデータが静脈血行動態を捉えている可能性が示された。μG 中は、一回拍出量が増加していることから、静脈還流量の増加が読み取れる。また、下肢容積の減少は、下肢の体液が上肢にシフトしたことを示している。このため、静脈圧に変化が起これ外耳道内圧の振幅が増大したと考えられる。

加重力では、外耳道内圧は機体の揺れから、被験者の体動の影響が大きくなったため十分なデータを取得できなかった。しかし、一部測定に成功したデータにおいて外耳道内圧の低下が観察された。これは、下肢容積の増大からも分かるように、重力により体液が下肢にシフトしたためと考えられる。

HDT は、微小重力と同様の影響を人体に与えるとされている。我々の実験においても、μG における測定データと HDT のデータを比較したところ、地上実験における外耳道内圧と下肢容積及び、超音波診断装置の測定データは、μG 中の外耳道内圧及び下肢容積の変動と酷似していた。これは、我々の作製した装置によって μG 環境下において静脈血行動態を非侵襲に測定できていたと考えられる。

また、現在、右心機能を測定する方法は、心臓カテーテル法や超音波法、目視法が一般的とされている。しかし、心臓カテーテル法は精度が良い反面、生体への侵襲を避けられず多くのリスクを伴う。超音波法は非侵襲に

測定可能だが、血流変化等の形態情報が中心であるため圧変動を捉える事はできない。目視法は、内頸静脈の拍動や怒張を目視で視診するため経験と技術が必要とされ診断が困難である。しかし、開心術後、急性期の心機能障害において右心機能の関与は知られており、心臓手術後の右心機能の診断は重要とされている。

カテーテルを挿入すること無く、非観血的、非侵襲に頸静脈圧変動を計測し、右心機能を常時連続モニターできることの意義は大きい。

6. おわりに

今回、重力変化に対応した静脈血行動態を外耳道内圧測定装置により観察することに成功した。また、航空機実験において懸念された騒音に対する防音も良好で、測定に影響なく行うことができた。これより、将来的に宇宙環境や日常生活における健康管理指標としての有意性を示すと共に、右心機能の非侵襲測定の新たな指標としての可能性を示す結果となった。

今後も外耳道内圧波形と心臓機能の関連性を検討していく必要がある。このため、超音波診断装置を用い、心臓や三尖弁等の撮影を行い、外耳道内圧波形と比較検証をすることで、外耳道内圧の生理学的意義を明確にしていきたいと考えている。

また、今回の実験では被験者 2 名を対象としたが、データの精度と有意性の向上を示すために、被験者の数を増やす必要がある。このため、次回の学生無重力実験コンテストに参加することで、実験例数の増加を目指す。

謝辞

本実験は宇宙航空研究開発機構、日本宇宙フォーラムの援助を受け「第 10 回航空機による学生無重力実験コンテスト」の一環として実施されました。航空機実験の実施にあたり、多大なご支援を賜った(財)日本宇宙フォーラム、ダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) N.Terada and T.Takeuchi : Am J Physiol, 264(1993)H21-5.
- 2) 河合康明 : 信州医誌, 47 (1999) 279.
- 3) 楠瀬賢也, 山田博胤, 西尾進 : 右房を知る下大静脈の見方 エコーVol1,10No,10(2009) 966