

IIII 航空機を用いた学生無重力実験コンテスト IIII
(原著論文)

パラボリックフライトによる微小重力曝露が換気効率及び自律神経活動
に及ぼす影響

平山 佑介¹・前沢 寿亨¹・田中 雅侑¹
傳 秋光²・藤野 英己¹

**Effects of Microgravity Induced by Parabolic Flight on Ventilation Efficiency and
Autonomic Nervous Activity**

Yusuke HIRAYAMA¹, Toshiyuki MAEZAWA¹, Masayuki TANAKA¹,
Akimitsu TSUTOU² and Hidemi FUJINO¹

Abstract

To clarify the relationship between ventilation efficiency and autonomic nervous activity under microgravity condition induced by parabolic flight, ventilation efficiency, the ratio of abdominal-to-thoracic motion (Vabd/Vrib), the duration of expiratory phase of respiration (T_E/T_{Tot}) and sympathetic nervous activity were measured in human subjects. Microgravity resulted in a reduction of the ventilation efficiency and increase of sympathetic nervous activity. Furthermore, Vabd/Vrib increased and T_E/T_{Tot} decreased during microgravity. In addition, we observed using a video-recorder that subject's trunk was extended during microgravity exposure. These results suggest that the change of subject's posture might decrease abdominal motion and expiratory phase, and induce increase in sympathetic nervous activity. Thus, autonomic nervous activity does not always play key role to regulate ventilation efficiency in case of exposure to microgravity. Moreover, it is suggested that subject's posture affects autonomic nervous activity under microgravity condition.

Keyword(s): Ventilation Efficiency, Autonomic nervous activity, Microgravity

Received 10 Oct. 2014, accepted 13 Nov. 2014, published 31 Jan. 2015

1. はじめに

微小重力は肺換気血流比やガス交換，換気量，機能的残気量を変化させ，呼吸機能に影響を及ぼすことが知られている¹⁻⁴。呼吸は組織に酸素を供給して，細胞内呼吸により産生された二酸化炭素を排出する役割をもち，生命活動を維持するために重要である。一方，宇宙飛行による微小重力曝露においては，換気量の低下，肺内の換気血流比の減少によるガス交換効率を低下させることが報告されている⁵。また，パラボリックフライトによる先行研究においても，微小重力曝露で機能的残気量や換気量が低下することが報告されているが⁶⁻⁸，呼吸機能に関連する換気効率について，これまで報告がみられない。さらに，呼吸機能は姿勢の変化にも影響されるが⁹，

Paiva らによる先行研究⁹では，被験者を座席に固定し，一定の姿勢を保たせている。微小重力は姿勢にも影響を及ぼすと考えられるため，姿勢の変化を制限しない条件下で検討する必要がある。

また，呼吸機能は自律神経活動と関連していることが知られている。パラボリックフライトによる先行研究では，微小重力曝露は交感神経活動を低下させることが報告¹⁰されているため，呼吸機能の低下は交感神経活動の低下と関連していると考えられる。一方，微小重力下における自律神経活動と換気効率の関連性は不明瞭である。そこで，本研究ではパラボリックフライトによる微小重力曝露が換気効率，自律神経活動及び姿勢変化に及ぼす影響と関連性について検証した。

1 神戸大学大学院保健学研究科 リハビリテーション科学領域 〒654-0142 兵庫県神戸市須磨区友が丘7丁目10-2
Kobe University Graduate School of Health Sciences, Department of Rehabilitation Science, Tomogaoka7-10-2, Suma-ku,
Kobe, Hyogo 654-0142, Japan.
2 神戸大学医学部保健学科 〒654-0142 兵庫県神戸市須磨区友が丘7丁目10-2
Kobe University School of Medicine Faculty of Health Sciences, Tomogaoka7-10-2, Suma-ku, Kobe, Hyogo 654-0142, Japan.
(Email: y.hirayama1228@hotmail.co.jp)

2. 実験方法

2.1 被験者

健康成人男性 2 名を被験者として選定した (年齢: 23 ± 0 歳, 身長: 181.8 ± 1.8 cm, 体重: 66.0 ± 5.0 kg). 被験者には書面と口頭にて実験に関する説明を行い, 実験参加への同意を得た. また, 実験に参加する前日からアルコールやカフェインの摂取, 激しい運動を制限し, 実験参加の 4 時間前から摂食と飲水を制限した.

2.2 測定項目と測定方法

本実験ではストレスマーカー, 呼吸代謝, 呼吸運動, 自律神経活動及び姿勢変化を測定した. 測定に使用する機器はすべて航空機搭乗直前に標準時に調整することで同期した. また, 本実験において使用する心拍センサーに内蔵される三軸加速度センサーで重力変動を同時に記録し, 記録された重力変動のデータを基に, 一度のパラボリックフライトを Phase I~V に分割し (Fig. 1), 呼吸機能及び, 自律神経活動の変化を観察した. また, 航空機内の気圧は 0.808 ± 0.008 気圧でほぼ一定であった.

2.2.1 ストレスマーカー

本実験における, パラボリックフライトが被験者に与えるストレスの指標として, 唾液アミラーゼモニター (CM-2.1, ニプロ, 大阪) で唾液 α -アミラーゼ濃度を航空機搭乗前とパラボリックフライトの前後の 3 回測定した.

2.2.2 酸素飽和度

酸素飽和度はパルスオキシメーター (PULSOX Me-300, 帝人ファーマ, 東京) を用いて, 経皮的酸素飽和度 (saturation of pulse oximetry oxygen : SpO₂) を測定することで評価した.

2.2.3 換気効率

換気効率は呼吸代謝測定器 (VO2000, エスアンドエムイー, 東京) を用いて, 分時換気量/酸素摂取量 (minute ventilation/oxygen consumption : $\dot{V}E/\dot{V}O_2$) 及び分時換気量/二酸化炭素排出量 (minute ventilation/carbon dioxide production : $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) を測定して評価した.

2.2.4 呼吸運動

呼吸運動は呼吸ピックアップセンサを用いて測定した.

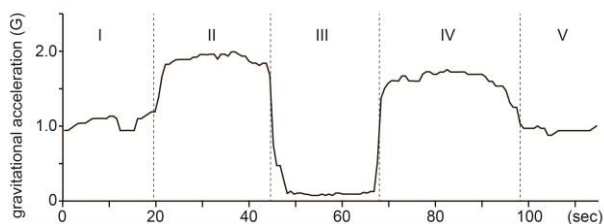


Fig. 1 Time course change in gravitational acceleration by parabolic flight.

剣状突起と臍部の高さで歪ゲージ (TR-753T, 日本光電, 東京) を水平に装着し, 呼吸運動による胸郭および腹部周囲径の変化 (Vrib, Vabd) を測定した. それぞれの呼吸運動は電圧に変換し, データロガー (ZR-RX25A, オムロン, 東京) に記録した. 記録したデータを基に, 腹部運動の比率 (Vabd/Vrib) を算出した. また, 呼吸運動から呼吸あたりの呼気時間 (T_E/T_{Tot}) を算出した.

2.2.5 自律神経活動

自律神経活動は心拍センサー (My beat, ユニオンツール, 東京) を左胸部に貼付し, 得られた心拍変動からゆらぎ解析を実施した. 低周波成分 (Low frequency : LF) と高周波成分 (High frequency : HF) の比 (LF/HF) を算出し, 交感神経活動の指標とした.

2.2.6 被験者観察

ビデオレコーダを設置し, 被験者の姿勢変化を記録した. 記録した動画から通常重力時と微小重力曝露時の静止画を切り出し, 被験者の頸切痕とみずおち, みずおちと臍を結んだ二本の直線がなす角度から姿勢の変化を観察した.

2.3 解析方法

被験者 A, B はそれぞれ 11 回分及び, 12 回分のパラボリックフライトにより重力変化に曝露された. 各パラボリックフライトにより得られたデータを平均し, それぞれの被験者の測定値とした. 各被験者の測定値を用いて平均値と標準誤差を算出し, 各 Phase 間で比較した.

2.4 倫理的配慮

本実験は, 神戸大学, 及び宇宙航空研究開発機構の倫理委員会から承認を得たうえで実施した.

3. 実験結果

3.1 被験者に与えるストレス

航空機搭乗前と, パラボリックフライト実施直前, パラボリックフライト終了直後に唾液 α -アミラーゼ濃度を測定した. 両被験者はともに, パラボリックフライト後の唾液 α -アミラーゼ濃度が航空機搭乗前及び, パラボリックフライト前と比較して上昇しなかった (Table 1).

Table 1 the concentration of salivary α -amylase at ground, pre- and post-parabolic flight (KU/L).

	Ground	Pre	Post
Subject A	46	50	37
Subject B	39	41	39

3.2 酸素飽和度

SpO₂はPhase IVの初期から低下が観察され、正常値の範囲内で、酸素飽和度の低下を認めた。また、Phase IVの後半からPhase Vにかけて上昇が確認された (Fig 2)。

3.3 換気効率

VE/V_{O₂}、及びVE/V_{CO₂}はPhase IIIにおいて高値を示し、微小重力曝露による換気効率の低下を認めた (Fig 3A,B)。

3.4 呼吸運動

V_{abd}/V_{rib}はPhase IIIにおいて低値を示し、微小重力曝露により腹式呼吸から胸式呼吸に変化したことが観察された (Fig 3C)。また、T_E/T_{Tot}はPhase IIIにおいて低値を示し、微小重力期間中に呼気時間の短縮を認めた (Fig 3D)。

3.5 自律神経活動

LF/HFはPhase III以降において高値を示し、微小重力曝露による交感神経活動の亢進が観察された (Fig 3E)。

3.6 姿勢の変化

被験者の姿勢は通常重力時では体幹が屈曲していた。一方、微小重力曝露時には体幹が伸展していることが観察された (Fig 4)。

4. 考察

パラボリックフライトと測定機器の装着による被験者に与える精神的ストレスを評価するため、唾液中のα-アミラーゼ濃度を測定した。精神的ストレスは唾液α-アミラーゼ濃度を上昇させることが知られている¹¹⁾。本研究では同一被験者がパラボリックフライト実施直前と比べて終了直後における唾液α-アミラーゼ濃度が上昇していないことから本研究におけるストレスの影響は最小限に抑えられていたと考えられる。

血中の酸素飽和度に関して、SpO₂は正常値の範囲内ではあるが、Phase IVから低下が観察された。パルスオキシメーターを用いて、SpO₂を示指で測定した場合、急性的な低酸素状態から約20秒間の遅れが生じることが報告されている¹²⁾。そのため、肺から出た血液が示指に環流するまでに約20秒要すると考えられる。微小重力下であるPhase IIIは約20秒であることから、SpO₂の低下は微小重力曝露による影響であると考えられる。

換気効率に関して、パラボリックフライトによる先行研究では、微小重力曝露により機能的残気量が低下することが報告されている⁶⁾。機能的残気量の低下は肺血流量に対する換気量を低下させ、換気効率を低下させる。また、微小重力曝露によるSpO₂の低下を考慮しても、換気効率の低下を支持していると考えられる。

一方、自律神経活動と呼吸様式及び、呼吸リズムに関して、先行研究においては、パラボリックフライトによる微小重力曝露により、交感神経活動が低下すること^{10, 13)}、

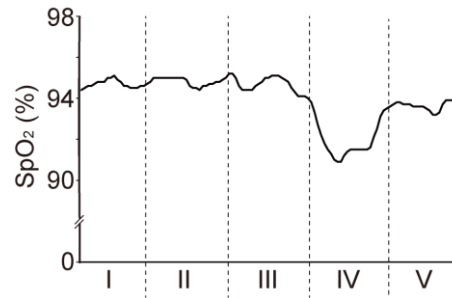


Fig 2 Time course change in SpO₂.

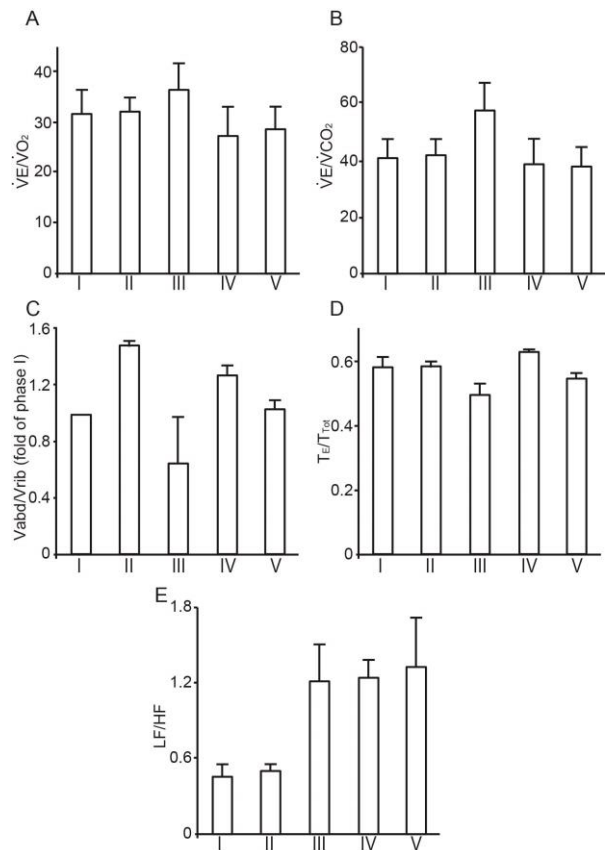


Fig. 3 Changes in ventilation efficiency, respiratory function and sympathetic nervous activity.



Fig. 4 The effect of microgravity on subject's posture.

腹式呼吸になることや呼気時間が延長することが報告されている⁶⁾。しかし、本研究は、先行研究とは対照的に、微小重力により交感神経活動が亢進しており、また、腹部運動の比率の低下及び、呼気時間の短縮を認めた。Verheyden らによる先行研究¹⁰⁾では、パラボリックフライトの間、被験者は頭部の位置を一定にしている。また、Paiva らによる先行研究⁶⁾においても、被験者は背中と肘が座席に固定されており、パラボリックフライトを通して、姿勢が一定であったと考えられる。一方、本研究では固定による呼吸運動の制限を取り払うため、腰部のシートベルトのみの固定とした。このため、本研究では微小重力曝露により体幹が伸展し、先行研究と異なる変化が観察されたと考えられる。体幹の屈曲角度は胸郭および腹部運動に影響し、体幹の伸展により胸郭運動の比率が大きく、腹部運動の比率が小さくなることが報告されている⁹⁾。また、一般には腹式呼吸は呼気圧を上昇させ、呼気を延長させるため、胸式呼吸では呼気が短縮すると考えられる。本研究では腹部運動の比率の低下及び、呼気時間の短縮が観察され、姿勢の変化が影響したと考えられる。さらに、自律神経活動は呼吸を調節する因子だけでなく、呼吸も自律神経活動に影響を及ぼし、呼気の延長が副交感神経活動を促進することが報告されている¹⁴⁾。このため、微小重力曝露により交感神経活動が亢進したと考えられる。

本研究では、換気効率が微小重力曝露により低下し、先行研究より立てた仮説と一致したが、自律神経活動に関しては先行研究と異なる結果が観察された。これらのことから微小重力曝露による換気効率の低下は自律神経活動が必ずしも関与しないことを示したものと考えられる。しかし自律神経活動に関して、被験者の固定を最小限にし、自然呼吸の条件下では、微小重力曝露により姿勢が変化し、呼吸運動や呼吸リズムの変化を介して交感神経活動が亢進した可能性を示唆した。

5. おわりに

本研究ではパラボリックフライトによる微小重力曝露により、急性反応として換気効率の低下と腹部の呼吸運動低下、呼気時間の短縮が観察され、交感神経活動の亢進を認めた。また、微小重力曝露時には体幹が伸展することも観察され、腹部の呼吸運動の低下及び、呼気時間の短縮に関与していると考えられる。さらに、微小重力環境下において、換気効率と自律神経活動との関連に関して、必ずしも自律神経活動が換気効率に影響しないこと、姿勢の変化が呼吸運動と呼吸リズムの変化を介して自律神経活動に影響を及ぼすことを明らかにした。そのため、呼吸機能を維持するためには姿勢制御も重要であることを示唆した。

謝辞

本実験は『第 11 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。本実験を実施するにあたり、多大なるご支援を頂きました(独)宇宙航空研究開発機構、(財)日本宇宙フォーラム、(株)ダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) I. Frerichs, T. Dudykevych, J. Hinz, M. Bodenstein, G. Hahn and G. Hellige: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **91** (2001) 39.
- 2) S. B. Liu, T. A. Wilson and K. Schreiner: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **70** (1991) 1506.
- 3) J. B. West and C. T. Dollery: *J. Appl. Physiol.*, **15** (1960) 405.
- 4) J. Milic-Emili, J. A. Henderson, M. B. Dolovich, D. Trop and K. Kaneko: *J. Appl. Physiol.*, **21** (1966) 749.
- 5) G. K. Prisk, A. R. Elliott, H. J. Guy, J. M. Kosonen and J. B. West: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **79** (1995) 1290.
- 6) M. Paiva, M. Estenne and L. A. Engel: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **67** (1989) 1542.
- 7) J. Edyvean, M. Estenne, M. Paiva and L. A. Engel: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **71** (1991) 1956.
- 8) M. Estenne, M. Gorini, A. Van Muylem, V. Ninane and M. Paiva: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **73** (1992) 946.
- 9) D. Paek, K. B. Kelly and F. D. McCool: *J. Appl. Physiol.*, 1985, **68** (1990) 2482.
- 10) B. Verheyden, F. Beckers and A. E. Aubert: *Eur. J. Appl. Physiol.*, **95** (2005) 557.
- 11) N. Takai, M. Yamaguchi, T. Aragaki, K. Eto, K. Uchihashi and Y. Nishikawa: *Archives of Oral Biology*, **49** (2004) 963.
- 12) K. H. Altemeyer, J. Mayer, S. Berg-Seiter and T. Fosel: *Anaesthesist*, **35** (1986) 43.
- 13) Y. Bai, T. Tsunematsu, Q. Jiao, Y. Ohnuki, Y. Mototani, K. Shiozawa, M. Jin, W. Cai, H. L. Jin, T. Fujita, Y. Ichikawa, K. Suita, R. Kurotani, U. Yokoyama, M. Sato, K. Iwatsubo, Y. Ishikawa and S. Okumura: *J. Pharmacol Sci.*, **119** (2012) 381.
- 14) T. Matsumoto, T. Masuda, K. Hotta, R. Shimizu, A. Ishii, T. Kutsuna, K. Yamamoto, M. Hara, N. Takahira and A. Matsunaga: *Respir Physiol Neurobiol*, **178** (2011) 275.