

寒冷ストレスに対する水クラスター マイナスイオンの影響

スポーツ・健康科学部 スポーツ科学科 琉子 友男、朴 美香、
只隈 伸也、佐藤真太郎、
稲垣 裕太、田中 博史

Effect of exposure to hydro-cluster negative air ions on acute stress in healthy young males.

Tomoo RYUSHI, Mihyang PARK,
Shinya TADAKUMA, Shintaro SATO,
Yuta INAGAKI, and Hiroshi TANAKA

Abstract

The present study investigated whether artificial negative air ions with hydro-cluster (NAI) confers any protective effect against acute stress. Subjects comprised 12 healthy young males. Two experiments were performed. In Experiment 1, subjects rested for 60 min in an environment exposed to artificially produced NAI (2500 - 4000 ions/cc), then underwent ice stress (3×2 min periods), recovery 1 (15 min), and recovery 2 (15 min) in the same environment. Experiment 2 was performed 1 week after experiment 1, and comprised the same protocol in the absence of artificial NAI (300-500 ions/cc). Measurements in all subjects were taken according to the same time schedule in both experiments, to account for circadian variations in heart rate and blood pressure. Compared to Experiment 2, parasympathetic nervous activity tended to increase and sympathetic nervous activity after recovery 2 was significantly lower in Experiment 1 ($p<0.05$). Systolic blood pressure after recovery 2 was significantly lower in Experiment 1 than in Experiment 2 ($p<0.05$). In addition, sodium concentration ($p<0.01$) and hematocrit ($p<0.05$) were significantly lower after recovery in Experiment 1 than in Experiment 2. As NAI include H₂O molecules, the plasma component of blood may be increased and blood viscosity decreased by exposure to NAI. These results suggest that NAI might act in a similar manner to relaxation, affecting responses to acute stress through the autonomic nervous system and plasma components of blood. Further studies are required to identify the mechanisms by which NAI act on living bodies.

Key words: *acute stress, negative air ions with hydro-cluster (NAI), autonomic nervous system, and hematocrit*

キーワード：急性ストレス，水破碎式マイナスイオン，自律神経系，ヘマトクリット

緒言

自然に恵まれた環境下では，空気マイナスイオンが大気1ccあたり2,000～3,000個/cc存在する。また，瀧などの周辺では20,000個/ccにも及ぶと言われている。大気イオン濃度は天候によっても変化し，降雨時の室内は非降雨時よりも高いマイナスイオン濃度を示す。さらに台風時や雷雨時には通常の何倍ものマイナスイオンが測定されているが，電磁波を出す電子機器の多い場所や交通量の多い交差点ではマイナスイオンは少なく，むしろプラスイオンの方が多いことが報告されている¹⁾。人工的なマイナスイオン発生装置としてはコロナ放電式，レナード効果を応用した水破碎式が知られている。

コロナ放電式では，大量のマイナスイオンを産生することが可能である。しかしながら，副産物としてオゾンが発生しやすく産生されたイオンは消滅しやすいと言われている。一方，水破碎式マイナスイオンの構造は $O_2^-(H_2O)_n$ であり^{2,3)}，この微小なイオンは無味無臭で肺胞まで達すると言われ⁴⁾，その発生方式は瀧におけるものと同様であるため自然環境中のマイナスイオンとほぼ同じと考えられている。先行研究では，マイナスイオンには副交感神経亢進あるいは交感神経抑制による心拍数や血圧の低下，平滑筋の弛緩，気管上皮繊毛運動の促進，創傷ややけどの治癒，感染予防効果，及び鎮痛剤や麻酔薬の使用量の軽減といった様々な作用があることが報告されている^{5,6)}。

Goldstein (1992)⁷⁾は，空気イオンの少ない環境で飼育したマウスやラットでは視床下部および脳下垂体に異常が生ずることを病理学的に明らかにし，動物の寿命に空気イオンが大きく関与していることを報告した。一方，Ryushiら(1998)⁸⁾は，自転車漕ぎ運動後のマイナスイオン曝露がドーパミンやセロトニンなどの神経伝達物質の増加を押さえ，交感神経活動を抑制することによってストレスからの回復を早めると報告している。さらに，Iwamaら(2004)⁹⁾は，マイナスイオンが健康成人の赤血球における変形能を改善することで有酸素代謝を高め，血中乳酸値の低下やpHの上昇を促すことを報告している。動物実験においてSuzukiら¹⁰⁾は，麻酔下のラットの鼻腔へマイナスイオンを直接曝露した時の生理学的反応と脳内の神経活動をc-Fos遺伝子発現を指標に調査し，通常の空気曝露群に比較してマイナスイオン曝露群ではストレスに反応して自律神経系や内分泌系の変化を引き起こす視床下部室傍核のc-Fos陽性神経が統計的に有意に少ないことを明らかにした。また，交感神経緊張やストレス行動を惹起する延髄の青斑核においてもc-Fos陽性神経が減少し，一方，副交感神経亢進に関与する延髄の疑核では増加していることが報告されている。この結果は，マイナスイオンが3つの神経核の活動を変化させることで交感神経抑制や副交感神経亢進の生理反応を起こすことを示唆する。この研究では，ラットの生理反応も同時に観察しているが，

マイナスイオン曝露群は通常の空気曝露群に比較して、血圧、心拍数、および呼吸数が減少し、心電図 R-R 間隔のスペクトル解析からみた副交感神経系の活動が亢進したことを明らかにしている。さらに、この研究では、同様の実験を気管から中枢へ情報を伝達する迷走神経を切除して行っている。その結果、血圧、心拍数、呼吸数、副交感神経系は変化しなくなった。また、迷走神経から入力を受ける疑核や孤束核は賦活しなくなり、室傍核や青斑核の反応が変化したことを明らかにしている。この結果は、空気マイナスイオンが気管で感知され迷走神経を介して孤束核や疑核に伝えられ、室傍核や青斑核の反応を変化させることを意味し、マイナスイオンが気管の感覚上皮体で感知され迷走神経を介して中枢へ影響を及ぼすとした Kavet の神経内分泌細胞仮説¹⁹⁾を支持するものである。

一方、Krueger と Smith²⁰⁾は、マイナスイオン曝露下でモルモットを飼育し、セロトニンの代謝産物である尿中の 5-ヒドロキシインドール酢酸 (5-HIAA) を測定した結果、通常的环境下で飼育したモルモットに比較して 5-HIAA が増加していたこと、そして同時に、気管に存在するセロトニンが減少していたことを報告している。その後、Krueger²¹⁾は、マイナスイオンがセロトニン、ノルエピネフリン、ドーパミンなどモノアミン系の神経伝達物質の代謝経路において重要な役割を担っているモノアミン酸化酵素 (Monoamine oxidase: MAO) に影響を及ぼすことで生物学的作用を起こしていると報告した。また、Diamond ら²²⁾は、マイナスイオン下で生後 6 日目から 20 日間、遊具と共に飼育した仔ラットの脳皮質におけるセロトニン濃度を測定した結果、通常的环境下で飼育した仔ラットよりも 61% 低いセロトニン濃度が得られたことを明らかにし、マイナスイオンが情動問題を解決する可能性があることを報告している。Ryushi ら (1998)⁸⁾が成人男子を対象に 60 分間の自転車漕ぎ運動 (運動ストレス負荷) を行わせ、回復過程の血中セロトニン濃度をマイナスイオン环境下と非曝露的环境下で比較した研究では、マイナスイオン环境下の方が非曝露的环境下に比較してセロトニン濃度が有意に低いという結果が得られた。この研究では、セロトニン以外にドーパミン、カテコールアミン、自律神経系、血圧なども測定されたが、カテコールアミン以外のすべてのパラメーターが影響を受けたことが報告されている。これらの結果は、Krueger²¹⁾の指摘のとおりマイナスイオンがセロトニンを中心とした神経伝達物質濃度に何らかの影響を及ぼすことを示唆している。

しかし、現段階で水破碎式のマイナスイオンが運動ストレス以外の急性ストレスに対する緩和効果を生理・生化学的に調査した研究は少ない。そこで本研究の目的は、ヒトの自律神経系および末梢血の生化学的変化を指標とし、水破碎式マイナスイオンのストレス緩和効果を調査することであった。

方法

I. 被験者

被験者は健康な成人男性 12 名であり、平均年齢は 21.2 ± 1.3 歳、平均身長は 169.8 ± 4.4 cm、平均

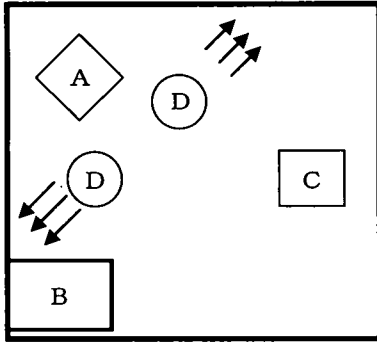


図1. 測定環境

- A : 被験者
- B : 測定機器
- C : イオンテスター
- D : マイナスイオン発生機 (矢印は風の向き)

体重は $61.1 \pm 4.9 \text{ kg}$ であった。測定は被験者全員から informed consent を得て行われ、測定後、被験者全員に報酬を支払った。実験中の被験者には生理学的パラメーターの測定精度を高めるために椅座位安静姿勢を維持させた。

II. 測定方法

$2.7 \times 2.2 \times 2.5 \text{ m}$ の環境制御室内 (室容積 14.85 m^3) にイオン発生機 (イオンコンディショナー, F-B04G2, National) を2台設置した。なお、イオン発生機は被験者に直接風が当たらないよう配置した。マイナスイオン非曝露時の測定には水音のみでイオンが発生しない装置を使用した (図1)。

冷水負荷は左足のみを対象とし、2分×3回、負荷間に各2min ずつの休憩を入れるという方法を採用した。マイナスイオン曝露中は常時マイナスイオン発生機を運転した。その際の環境制御室内の室温、湿度、およびマイナスイオン濃度はそれぞれ、 $24.5 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $48.4 \pm 2.0 \%$ 、 $2,000 \sim 4,000 \text{ 個/cc}$ であった。一方、マイナスイオン非曝露の測定では常時水音のみの装置を運転させた。その際の環境制御室内の室温、湿度、およびマイナスイオン濃度はそれぞれ、 $24.4 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $46.5 \pm 4.1 \%$ 、 $300 \sim 400 \text{ 個/cc}$ であった。実験中のマイナスイオン濃度は、イオンテスター (KST-900, 神戸電波) を用いて測定した。ただし、イオンテスターはイオン濃度が被験者に見えない位置に配置した。

被験者の生理学的機能の概日リズムの観点から、1回目と2回目の測定は一週間の間隔をあげ、同時刻に行うようにした。また、測定に対する慣れの影響を防ぐため、12人のうちランダムに選出された6人が実験1回目に、残りの6人が2回目にイオン曝露的环境下で測定を行った。

III. 実験手順

被験者は測定当日の体調などのアンケート調査に答え、短パンのみに着替えて環境制御室内に入室した。その後、測定に必要な器具等を装着し安静椅座位姿勢を維持した。測定は安静：60min、冷水負荷：2min×3回 (冷水負荷間に休憩2min ずつ、計10min)、回復1：15min、回復2：15min という手順で行った。

IV. 測定項目

1. 心電図

胸部双極誘導によって導出した心電図は Multi Telemeter System (NIHON KOHDEN) を用いて測定された。測定時間内のすべての心電図は CASSETTE DATA RECORDER (XR-50, TEAC CORPORATION) に保存され、その後の心電図 R-R 間隔のスペクトル解析には心拍変動解析ソフト (PowerLab/s v 3.6, 株 DKH) が用いられた。R-R 間隔のスペクトルデータから低周波帯 (0.04

～0.15Hz) のパワー値を交感神経と副交感神経両方の活動指標 (LF), 高周波帯 (0.15～0.40Hz) のパワー値を副交感神経の活動指標 (HF), また, 低周波帯と高周波帯の比を交感神経の活動指標 (LF / HF) とした¹¹⁾。さらに, 副交感神経の活動指標である R-R 間隔の変動係数 (CV_{R-R}) は標準偏差を平均 R-R 間隔で除して 100 をかけて算出した。

2. 血圧

収縮期および拡張期血圧は, 電子非観血式血圧計 (TM-2421, 楸エー・アンド・デイ) を用い, 安静時, 冷水負荷 1 回目, 2 回目, 3 回目, 回復期 1, 回復期 2 の計 6 回測定した。すべての測定はマンシェットを左上腕に常時装着した状態で行った。

3. 生化学的検査

末梢静脈血の生化学的検査には i-STAT (i-STAT corporation, USA) を用いた。アイスタット・カートリッジは EG6⁺ (扶桑薬品, 大阪) を用いナトリウム濃度 (Na) およびヘマトクリット値 (Hct) を測定対象とした。なお, Na の測定にはイオン選択性電極法, Hct には伝導度電極法が採用されている。採血は左手の中指突端から FEATHER Blood Lancet (フェザー株式会社) を用いて安静時, 冷水負荷終了時, および回復 2 の計 3 回行った。

V. 統計

平均値 (Mean), 標準誤差 (SE) および標準偏差 (SD) の算出には標準的な統計法が用いられた。また, 各平均値間の差の検定には Unweighted-mean ANOVAs を用い, その後の多重比較には LSD 法を採用した。

<結果>

1. 自律神経系

マイナスイオン曝露時の HF (副交感神経の指標) は, 統計的に有意ではないが非曝露時に比較して冷水負荷 1 回目, 2 回目, および回復期 2 で高い値を示す傾向が認められた (図 2)。一方回復

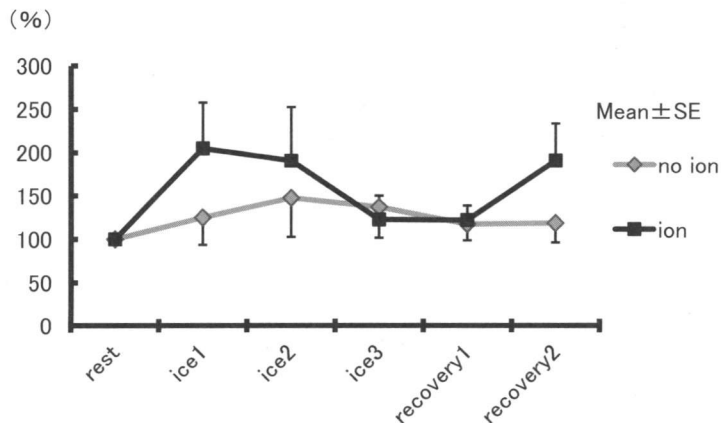


図 2. 副交感神経系 (HF) の変動

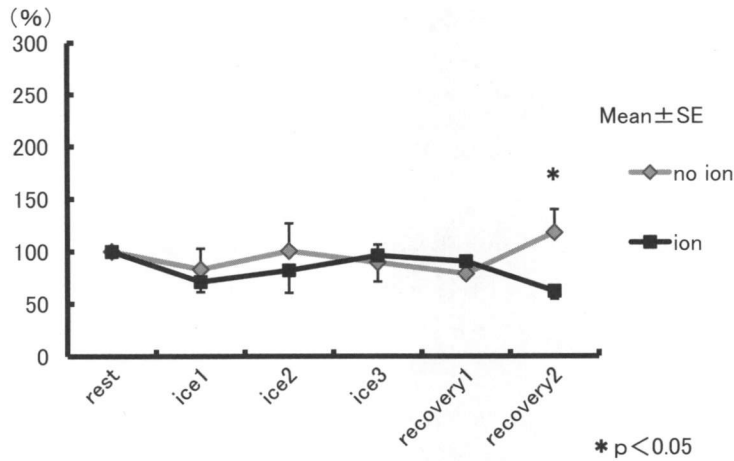


図3. 交感神経系 (LF/HF) の変動

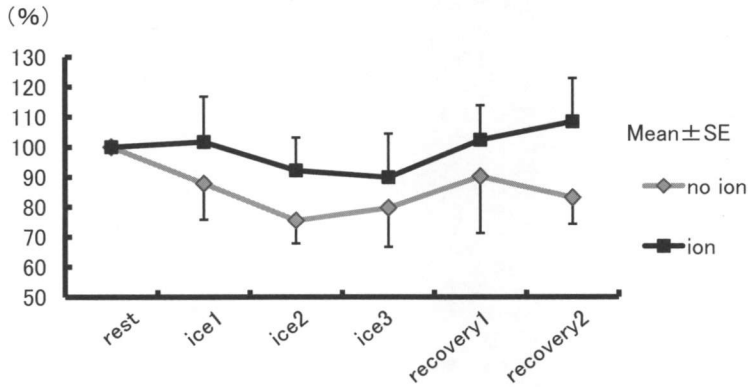


図4. 副交感神経系 (CV_{R-R}) の変動

期2におけるマイナスイオン曝露時のLF/HF(交感神経の指標)は非曝露時に比較して有意に小さな値を示した(p<0.05, 図3)。

CV_{R-R}(副交感神経の指標)はすべての段階においてマイナスイオン曝露時の方が非曝露時に比較して高い値を示す傾向が認められた。また、両環境共に冷水負荷ストレスがCV_{R-R}を減少させる傾向を示したが、その減少傾向はマイナスイオン曝露時の方が小さかった。さらに、その後の回復期においてCV_{R-R}は上昇するが、マイナスイオン曝露時の方が安静値に戻るのが早い傾向を示した。それに対して非曝露時のCV_{R-R}は安静時の約80%にとどまっていた。しかし、両者間に統計的に有意差は認められなかった(図4)。

2. 血圧

マイナスイオン曝露時および非曝露時の両環境とも、収縮期と拡張期血圧は冷水負荷によって上昇し、回復期では安静時の値に近づく傾向が認められたが、マイナスイオン曝露時の収縮期血圧の方が回復期2において非曝露時よりも有意に早く回復した(p<0.05, 図5)。

寒冷ストレスに対する水クラスターマイナスイオンの影響

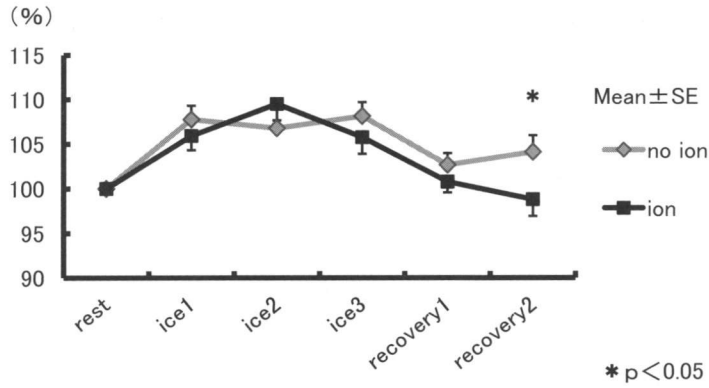


図5. 収縮期血圧の変動

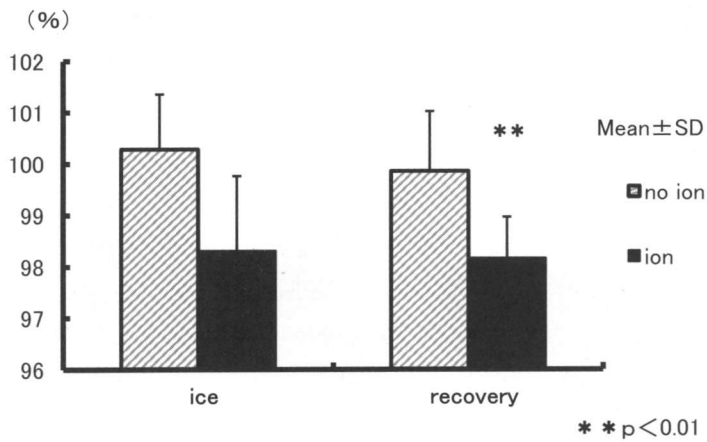


図6. イオン曝露時と非曝露時のNa濃度の比較

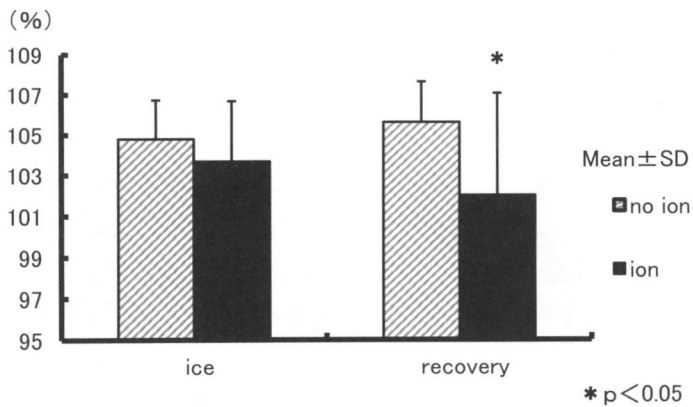


図7. イオン曝露時と非曝露時のヘマトクリット比較

3. 生化学的検査

非曝露時のNa濃度は冷水負荷によって変動しなかったが、マイナスイオン曝露時の回復期2では有意に低い値を示した ($p < 0.01$, 図6)。一方、ヘマトクリット値はマイナスイオン曝露時、非

曝露時共に冷水負荷ストレスによって増加したが、回復期2ではマイナスイオン曝露時の方が有意に低下した ($p < 0.05$, 図7)。

考察

本研究の結果から、マイナスイオン曝露時の回復期2におけるHFは、非曝露時よりも増加し、逆にLF/HFは低下するという傾向が示された。また、冷水負荷ストレスによって両環境共に CV_{R-R} は低下するが、非曝露時に比較してマイナスイオン曝露時の方がその低下の程度は低いことが明らかとなった。これらの結果は、マイナスイオン曝露時にはストレスのない安静状態においても CV_{R-R} が高い値を示したという報告⁵⁾や運動ストレス後においても交感神経系活動の指標であるPI/Phが減少したという報告^{8,12)}と一致している。また、術前患者を水破砕式マイナスイオン曝露の病室と一般病室に分類し、手術前の緊張の度合いを調査した研究では、明らかにマイナスイオン環境の患者の方が緊張度は低いことが報告されている¹³⁾。

一般に生体がストレスを受けた場合、交感神経系は亢進し副交感神経系は抑制されることが知られている。本研究の結果は、マイナスイオン曝露が冷水負荷によるストレスを軽減し、ストレスからの回復を促進する可能性があることを示唆している。また、血圧が自律神経系の影響を受けることは周知の事実である。本研究の結果においても、交感神経系の結果と同様、回復期の収縮期血圧がマイナスイオン曝露によって安静値に早く戻ることが示されている。この結果は、ストレス後の回復過程においてマイナスイオンを曝露すると非曝露時に比較して血圧が低下したという報告^{5,6,8)}と符合するものである。

ヘマトクリット値は血液の液体成分(血漿層)と固形成分(血球層)との容積比を示し、その値の増加は血漿層の減少を意味している。一般に血漿成分が減少するということは末梢血管において血液粘度が上昇し、血流の状態が悪くなっていることを示す。本研究におけるヘマトクリット値は、両環境共に冷水負荷ストレスによって増加するが、回復期ではマイナスイオン曝露時の方が非曝露時に比較して有意に低下するという結果が得られた。この結果は水破砕式マイナスイオンがヘマトクリット値をストレス負荷以前の状態に早く回復させることを示唆している。我々の知る限り、マイナスイオン曝露によって何故血漿層が増加するのか、そのメカニズムを調査した研究は少なく、現段階では推測の域を脱し得ない。しかし、マイナスイオンの化学構造を調査した研究では、自然環境中のそれが窒素や硝酸分子に数個の水分子が付着した $\text{NO}_3^- (\text{HNO}_3)_m (\text{H}_2\text{O})_n$ であり、水破砕のそれは酸素分子に水分子が数個から数十個付着した $\text{O}_2^- (\text{H}_2\text{O})_n$ であることが報告されている¹⁴⁾。このように空気イオンには必ず数個から数十個の水分子が付着している。また、放射性同位元素を用いた研究によれば、水破砕式マイナスイオンは肺胞深部まで達することが明らかされている^{4,16)}。このことはマイナスイオンに付着した水分子が肺胞から赤血球を介して血液へと浸透する可能性を示すものである。また、水破砕式マイナスイオンの粒径は3から6nmと報告されているが²⁾、この程度の大きさの分子なら鼻腔や気道から侵入する可能性も否定できない^{5,14)}。以上

のことが血液の液体成分である血漿層の割合を増加させた原因ではないかと考える。

一般に血漿蛋白および正常な赤血球は陰性電荷を持ち、お互いに反発し合って血液中を流れているが、何らかのストレスが生体にかかるると陰性電荷は弱まり、赤血球が集合し血液の流れを抑制すると言われている¹⁶⁾。一方、マイナスイオンを吸入すると肺胞で陰性電荷が赤血球に移行し、赤血球膜の陰性電荷を強め赤血球集合を抑制するという報告がある¹⁷⁾。また、水破碎式マイナスイオンが赤血球の変形能を高め毛細血管内の走行をスムーズにし、有酸素代謝を向上させたという報告もある⁹⁾。さらに、水素平衡移動や塩素イオン移動による細胞内の陰イオン数の増加は浸透圧を上昇させ、細胞と血漿の間で水の再分配をおこしヘマトクリット値を高めることが知られている¹⁸⁾。また、本研究では、回復期のナトリウム濃度に関してもマイナスイオン曝露時の方が非曝露時よりも有意に低い値を示した。この結果は、上述した血漿層の割合が増加したことに起因するものである。また、血中ナトリウム濃度の低下により血圧も低下することが知られているが、本研究の結果においてもマイナスイオン曝露時の回復期における収縮期血圧とナトリウム濃度との間には一致した低下傾向が認められた。

このようなことから、マイナスイオンが交感神経活動を抑制すると同時に、マイナスイオンの持つ水分子と陰性電荷がヘマトクリット値の増加や赤血球の集合抑制を通して有酸素代謝を高め、その結果、生体をリラックスした状態へ回復させるのではないかとと思われる。本研究の結果は、マイナスイオンが気道の神経内分泌細胞、視床下部の室傍核、および自律神経系を介して生体へ作用するという Kavet¹⁹⁾の神経内分泌細胞仮説を支持するものであるが、詳細な作用メカニズムに関しては更なる検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 島田洋ら：空気イオン実測。フジタ技術研究所報，28:157-162，1992
- 2) 河村典彦，山内俊幸：マイナスイオンの粒径制御に関する研究。第17回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会，350—351，1999
- 3) Kosenko EA et al: the stimulatory effect of negative air ions and hydrogen peroxide on the activity of superoxide dismutase. FEBS Letter, 410: 309-312, 1997
- 4) Duan H J et al: Light and electron microscopic radio-autographic study on the incorporation of ³H-Tyymidin into the lung by means of a new nebulizer. Arzneim. Forsch. Drug Res. 44(7): 880-883, 1994
- 5) 琉子友男，佐々木久雄編著：空気マイナスイオン応用辞典。Pp.205, pp. 334-348, pp. 349-365, 人間と歴史社，東京，2002
- 6) 大塚吉則：大気イオンと気候療法。静電気学会誌，22(4): 189-192，1998
- 7) Goldstein N, Arshavskaya T V: Is Atmospheric superoxide vitally necessary? Accelerated death of animals in a quasi - neutral electric atmosphere. Z. Naturfors, 52c: 396-404, 1992
- 8) Ryushi T et al: The effect of exposure to negative air ions on the recovery of physiological responses after moderate endurance exercise. Int. J. Biometeorol, 41: 132-136, 1998
- 9) Iwama H: Negative air ions created by water shearing improve erythrocyte deformability and aerobic metabolism. Indoor Air 14: 293-297, 2004
- 10) Suzuki S et al: Effects of negative air ions on activity of neural substrates involved in autonomic regulation in rats. Int. J. Biometeorol. 52: 481-489, 2008
- 11) Akselred D et al: Power spectrum analysis of heart rate function, A quantitative prove of beat-to-beat cardiovascular control. Science, 213: 220-222, 1981
- 12) 琉子友男ら：運動後の疲労回復に対する大気中負イオンの生理学的効果。臨床環境医学，6(1): 34-40，1997

- 13) Iwama H et al: The relaxing effect of negative air ions on ambulatory surgery patients. *Canadian J. Anesthesia*, pp.187-188, 2005
- 14) 長門研吉: 大気イオンの化学組成. *静電気学会誌*, 23(1): 37-43, 1999
- 15) 琉子友男, 佐々木久夫編著: 空気マイナスイオン実用ハンドブック. pp.423-476, 人間と歴史社, 東京, 2003
- 16) Shiga T et al: Erythrocyte rheology. *Crit Rev Oncol Hemat.* 10: 9-48, 1990
- 17) 山田重行, 茅野大介: マイナス空気イオンの赤血球集合抑制作用. *医学と生物学*, 141(3): 79-83, 2002
- 18) Smith EL et al: 生化学. 哺乳類の生化学, 第7版, pp.690-761, 1995
- 19) Kavet R: Hypothetical neural substrates for biological responses to air ions. In: *Air ions: Physical and biological aspects*, ed. Charry J and Kavet R. CRC press, pp.161-180, 1987
- 20) Krueger AP, Smith RF: The biological mechanisms of air ion action: Negative air ion effects on the concentration and metabolism of 5-hydroxytryptamine in the mammalian respiratory tract. *J. Gen. Physiol.* 44: 269-276, 1960.
- 21) Krueger AP et al: Small air ions: Their effect on blood levels of serotonin in terms of modern physical theory. *Int. J. Biometeorol.* 12: 225-239, 1968.
- 22) Diamond MC et al: Environmental influence on serotonin and cyclic nucleotides in rat cerebral cortex. *Science* 210: 652-654, 1980.