最大運動直前の炭酸ガス吸入が血中乳酸 および身体パフォーマンスに及ぼす影響

宮村 実晴¹⁾, 石田 浩司¹⁾, 蛭田 秀一¹⁾, 空子 耕一¹⁾, 大桑 哲男²⁾, 金尾 洋治³⁾

1) 名古屋大学総合保健体育科学センター

2) 名古屋工業大学

3) 愛知県立看護短期大学

Effects of Carbon Dioxide Inhalation Prior to Maximal Exercise on Blood Lactate and Physical Performance

Miharu MIYAMURA¹⁾, Koji ISHIDA¹⁾, Shuichi HIRUTA¹⁾,
Koichi MOKUSHI¹⁾, Tetsuo OHKUWA²⁾ and Yoji KANAO³⁾

1) Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan

2) Department of Physical Education, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466, Japan

3) Aichi Prefecture Junior College of Nursing, Nagoya 463, Japan

In order to examine the effect of acute respiratory acidosis induced by CO₂ inhalation prior to maximal exercise on blood lactate and physical performance, double determinations were carried out for each subject on separate days; one day, after CO₂ inhalation and other day, after inhalation of room air. It was observed that in the untrained subjects the CO₂ inhalation prior to maximal treadmill exercise does not affect endurance time and maximum aerobic power, whereas blood lactate during recovery was lower in CO₂ breathing than that in room air. In addition, no significant difference of 200m sprint time in the athletes was noticed between CO₂ and room air while blood lactate after 200m sprint running was significantly lower in the CO₂ than that in room air. From these results, it was suggested that the effect of CO₂ inhalation prior to maximal exercise as applied here appeared to be mediate through metabolic rather than oxygen transport mechanism, but not related to physical performance.

Key words: CO₂ inhalation, Physical performance, Blood lactate, Maximum oxygen uptake

これまで、炭酸ガス(CO₂)吸入や塩化アンモン投与による呼吸性および代謝性アシドーシスにした状態で運動を行わせた場合には、運動中の乳酸生成は抑制されることが明らかにされている(Graham et al., 1986; Hirche et al., 1975; Sutton et al., 1981). そして近年になり CO₂吸入による呼吸性アシドーシスの効果に関する興味ある報告がなされている。すなわち、Grahamら(1980)や Ehlersら(1982)によれば、被検者に運動中4~5%のCO₂を吸入させながら最大および最大下の自転車駆動運動を行わせたところ、ほとんど

の被検者がCO₂を吸入しながら運動した時の方が外気吸入と比べ脚筋の疲労感が少なかったという。これは呼吸性アシドーシスによる乳酸生成の抑制と関係するかもしれない。つまり、最大運動直前にCO₂を吸入させた場合には、身体パフォーマンスが向上することも考えられる。これまで運動中に連続的にCO₂を吸入させた研究が行われてきたが、本運動の直前にCO₂を吸入させ、その後再び外気を吸入させて最大運動を行わせ、CO₂吸入による急性の呼吸性アシドーシスが身体パフォーマンスに及ぼす効果について検討した報告

は見当たらない。

本研究では最大運動直前の CO_2 吸入が身体パフォーマンスや血中乳酸濃度に及ぼす影響について明らかにしようとした。

方 法

健康な男子大学生16名(表1)を対象に、日を変えて2回トレッドミル最大運動を行わせた。すなわち、室温 25°C 、湿度60%の人工気候室において傾斜5度のトレッドミルを用い、外気を吸入させ、ウォーミングアップを3分間(速度120m/分)行わせ、その1分後よりあらかじめダグラスバッグに準備した室内空気または CO_2 を含む混合ガス約200lを各々約4～5分間吸入させた。さらに、この4～5分間の Room air (以下 Room air 吸入と呼ぶ)あるいは CO_2 を含む混合ガス吸入(以下 CO_2 吸入と呼ぶ)終了から Room air の場

合には1分、 CO_2 吸入の場合には1分30秒後に再び外気を吸入させスピード漸増法により被検者がおよそ4～8分で疲労困憊に至るようなオールアウト走を行わせた。なお、16名中8名の被検者(Aグループ)に対し Room air と CO_2 6%の混合ガス(CO_2 6%+ O_2 21%+ N_2 73%;以下6% CO_2 吸入と呼ぶ)を、残りの8名の被検者(Bグループ)に対し CO_2 4.5%(CO_2 4.5%+ O_2 21%+ N_2 74.5%;以下4.5% CO_2 吸入と呼ぶ)を各々4～5分間吸入させた。また、Room air 吸入と CO_2 吸入の実験手順はランダムとした。

運動中の心拍数は胸部双極誘導により連続的に記録した。呼気ガスは被検者がオールアウトに至るまで1分毎にダグラスバッグに採取し、湿式ガスメーター(品川製作所、1回転10l)を用いて毎分換気量を求め、呼気ガスの O_2 および CO_2 濃度は、瞬時 O_2 分析器(Morgan社、Model S-3A型)および赤外線 CO_2 分析器(Godart社、カプノグラフ)を用いて分析し、酸素摂取量、炭酸ガス排泄量、呼吸商を算出した。さらに、運動終了後、3分、5分、7.5分および10分目に肘窩静脈より採血し、酵素法により血中乳酸濃度を測定した(図1参照)。さらにN大学陸上部に所属する19～24才の男子短距離選手11名を対象に200m全力疾走を行わせた。すなわち、各選手に対し同一日に約1時間30分の間隔ではあるが、先のトレッドミルの実験とほぼ同

Table 1 Physical characteristics of subjects.

Group	n	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	Inspired CO_2 concentration (%)
A	8	19.1 ± 1.0	173.7 ± 7.3	62.1 ± 5.1	6.0
B	8	19.2 ± 0.4	168.2 ± 2.6	60.3 ± 6.4	4.5

Fig. 1 Schematic diagram of experimental procedures.

Table 2 Average value and standard deviations of cardiorespiratory parameters for room air and CO₂ breathing prior to exercise.

	A Group		B Group	
	Room Air	6.0% CO ₂	Room Air	4.5% CO ₂
Endurance Time (min)	5.84±0.98	6.02±1.08	6.90±1.33	6.63±1.31
HR max (beats/min)	197±7	194±9	195±6	194±5
$\dot{V}_E$ max (l/min)	122.0±12.6	121.0±14.9	125.7±23.3	131.0±24.0
$\dot{V}_{O_2}$ max (l/min)	3.30±0.31	3.30±0.40	3.24±0.59	3.26±0.54
$\dot{V}_{O_2}$ max/BW (ml/kg/min)	52.4±4.4	52.4±5.7	53.5±5.0	54.0±5.1
RQ	1.14±0.07	1.13±0.07	1.15±0.06	1.19±0.05*

Endurance Time; treadmill exhaustion time, HR max; maximum heart rate, $\dot{V}_E$ max; maximum pulmonary ventilation, $\dot{V}_{O_2}$ max; maximum oxygen uptake, $\dot{V}_{O_2}$ max/BW; maximum oxygen uptake per kilogram of body weight, RQ; respiratory quotient

*p<0.05

様の手順であらかじめ200lのダグラスバッグに準備しておいた屋外空気あるいは約8%のCO₂を含む混合ガス(CO₂8%+O₂20%+N₂72%;以下8%CO₂吸入と呼ぶ)を吸入させ、2分後に400mのトラックで200m全力疾走を行わせ、ストップウォッチで疾走時間を測定した。そして疾走後、3分、5分、7.5分および10分目に肘窩静脈より採血し、血中乳酸濃度を測定した。なお、屋外空気吸入と8%CO₂吸入の順序はランダムとした。

結 果

表2はトレッドミル最大運動を行う前にRoom airまたはCO₂吸入し、再び外気を吸入させながらトレッドミル最大運動を行わせた時の両グループにおけるトレッドミル持久走時間、最高心拍数(HRmax)、最大毎分換気量($\dot{V}_E$ max)、最大酸素摂取量($\dot{V}_{O_2}$ max)、体重当たりの最大酸素摂取量($\dot{V}_{O_2}$ max/BW)、および呼吸商(RQ)を示したものである。Aグループにおけるトレッドミル持走時間の平均値と標準偏差は、Room air吸入で5.84±0.98分、6%CO₂吸入で6.02±1.08分あり、Bグループのそれは、6.90±1.33分および6.63±1.31分であった。Aグループでは8名中6名の持久走時間はCO₂吸入の方が長く、逆にBグループでは8名中6名の持久走時間はRoom air吸入の方が長かったが、いずれもRoom airとCO₂吸入における

持久走時間には統計的に有意な差は認められなかった。また両グループにおける最高心拍数、最大毎分換気量、最大酸素摂取量もRoom air吸入とCO₂吸入はほぼ同じであり両者の間に有意の差は認められなかった。なおAグループにおける呼吸商は有意の差は認められなかったが、Bグループにおける呼吸商は4.5%CO₂吸入の方がRoom air吸入のそれと比べ有意に(p<0.05)高かった(表2)。

図2は最大運動後におけるAグループ(上段)とBグループ(下段)の血中乳酸濃度を示したものである。両グループともRoom air吸入と比べCO₂吸入の方が回復期における血中乳酸濃度は低かったが、統計的に有意の差は認められなかった。さらに図3で示したようにRoom airとCO₂における乳酸濃度の差(Δ Blood lactate)は統計的に有意の差は認められなかったが、Aグループの Δ blood lactateの方がBグループのそれより大きかった。

図4は200m全力疾走直前に屋外空気あるいは8%のCO₂を含む混合ガスを吸入させたときの疾走後の血中乳酸濃度を示したものである。図4で示すように、200m疾走後における血中乳酸濃度は8%CO₂吸入の方が外気吸入のそれと比べ有意(p<0.05-0.01)に低かった。また、11名中5名の選手はCO₂吸入後の方が疾走中脚が楽だったまたは走行後も楽であったと述べていたが、200m疾走の記録の平均値と標準偏差は、屋

Fig. 2 Blood lactate after maximal treadmill exercise when the subjects inhaled room air or CO₂ prior to exercise. Symbols: ○·····○; room air, ●·····●; CO₂

外空気で 24.46 ± 1.33 秒, 8%CO₂吸入で 24.56 ± 1.32 秒と両者の間に統計的な有意の差は認められなかった。

考 察

激しい運動中では乳酸の生成が増大する。筋中の乳酸が増大すると、細胞内の水素イオン濃度は増大し、細胞内はアシドーシスに傾く。アシドーシスでは細胞外液のK⁺イオンが増大し、アクチン-ミオシン活性は低下することから、筋の収縮力は低下する(Edwards, 1986)。筋疲労は50~100Hzの高頻度刺激あるいは10~20Hzの低頻度刺激に対する筋収縮によって、高頻度疲労と低頻度疲労に区別することがあるが、MetzgerとFitts(1987)は、highおよびlow frequency刺

Fig. 3 Delta blood lactate expressed as a difference of air and CO₂ breathing values.

Fig. 4 Blood lactate after 200m sprint run in the athletes. The open bars represent room air value and the hatched bars represent CO₂ value, respectively.

激による疲労は少なくとも細胞内アシドーシスが興奮収縮連関に有害な影響を及ぼしていることによるものであろうと述べている。したがって、短時間の激しい運動における身体パフォーマンスは、一つには細胞内pHの低下と密接に関係するといえる。

ところでからだをアルカローシスにした場合には必ずしも身体パフォーマンスは向上するとは限らないという報告(Katz et al., 1984)もあるが、特に代謝性アルカローシスにした場合、身体パフォーマンスは増大するという報告が多い。例えば、Wilkesら(1983)は陸上競技選手を対象に、800m疾走2時間前に体重当たり300mgの炭酸ナトリウム(NaHCO₃:重曹)を投与した結果、コントロールと比べ2.9秒(p<0.05)も記録が良くなったと報告している。Costillら(1984)は、1分間の全力自転車ペダリング運動を5回行わせる1時間前に体重当たり200mgのNaHCO₃を摂取させた方がパフォーマンスは向上することを観察している。

さらに最近では、Goldfinchら(1988)も1時間前に NaHCO_3 を与え、400m全力疾走を行わせたところ、コントロールと比べ有意に400mの記録が向上したと述べている。そしてCostillらは(1984)はこれらアルカローシスによるパフォーマンスの増大は、 NaHCO_3 摂取により細胞外液の緩衝能が高まり、筋からの水素イオンの流出を促進し、作業筋の水素イオン濃度の増加を防いだことによるものであろうと推察している。

一方、 CO_2 吸入または息こらえによる呼吸性アシドーシスや塩化アンモン(NH_4Cl)投与による代謝性アシドーシスにした状態で運動を行わせた場合、運動後の血中乳酸濃度は正常あるいはアルカローシスのそれと比べ明らかに低いことが多くの研究者によって報告されている(Ehrsam et al., 1981; Fujitsuka et al., 1980; Graham et al., 1986; Hirche et al., 1975; Sutton et al., 1981)。このアシドーシスにおける乳酸濃度の低下は、おそらく乳酸酸化の促進、解糖の抑制および筋中からの乳酸放出の低下によるものであろうと考えられている(Graham et al., 1986)。前にも述べたように、Grahamら(1980)やEhrsamら(1982)は被検者に連続的に CO_2 を吸入させながら運動を行わせたところ、ほとんどの被検者が外気吸入のそれと比べベダリングが軽く感じたあるいは脚筋の疲労感が少なかったと述べたという非常に興味ある報告をしている。これらアシドーシスにおける脚筋の疲労感の減少は乳酸生成の抑制と密接に関係するかもしれない。

GrahamやEhrsamの研究では運動中に CO_2 を連続的に吸入させながら運動を行わせたが、もし運動直前に CO_2 を吸入させた後に外気を吸入させ最大運動を行わせた場合にも乳酸生成は抑制され、身体パフォーマンスが向上する可能性も考えられたことから、本実験を行った。まず被検者が約6分間程度で疲労困憊に至るようなトレッドミル最大運動では、表1で示したように、 CO_2 吸入とRoom air吸入におけるトレッドミル持久走時間には有意の差は認められなかった。また、最高心拍数、最大毎分換気量および最大酸素摂取量も CO_2 吸入とRoom air吸入ではほぼ同じ値であった。さらに100~400m全力疾走といった短時間の超最大運動におけるエネルギー供給は主に乳酸性機構と密接に関係することから、N大学陸上競技部に所属する男子短距離選手11名を対象に200m全力疾走における CO_2 吸入の影響について検討した。その結

果、11名中5名の選手は CO_2 吸入後の方が走行中脚が楽だったまたは走行後も楽であったと述べていたが、200m疾走の記録の平均値と標準偏差は、屋外空気では 24.46 ± 1.33 秒、8% CO_2 吸入では 24.56 ± 1.32 秒と両者の間に統計的な有意の差は認められなかった。しかしながら200m疾走後における血中乳酸濃度は8% CO_2 吸入の方が外気吸入のそれと比べ有意($p < 0.05 - 0.01$)に低かった(図4)。

以上述べてきたように、本実験では6分前後でall outに至るようなトレッドミル最大運動および200m全力疾走直前に CO_2 を吸入した場合、身体パフォーマンスに有意の変化は認められなかった。しかしながら、トレッドミル最大運動後における血中乳酸濃度は、統計的に有意の差は認められなかったが、 CO_2 吸入の方がRoom airと比べ低い値であった(図2)。さらに、図4で示したように、8% CO_2 吸入の方が屋外空気吸入時のそれと比べ200m全力疾走後の血中乳酸濃度は有意に低かった。したがって、最大運動直前に4.5~8%の CO_2 を含む混合ガス200lの吸入によっても本質的には運動中に CO_2 を吸入させたときと同様の効果があることが明らかとなった。そしてこの血中乳酸濃度の低下の理由としては、 CO_2 吸入により呼吸中枢が刺激され CO_2 排泄量は増大するが、 O_2 と比べ CO_2 の貯蔵量ははるかに大きいことから(Dejours, 1983)、運動開始直前では CO_2 吸入の方がRoom air吸入よりもよりアシドーシスに傾いていたためであると考えられる。Room airと CO_2 吸入の血中乳酸濃度の差(Δ Blood lactate)は吸入 CO_2 濃度の高い(6%)方が低い(4.5%)それと比べ大きかった(図3)。そして8% CO_2 吸入と屋外空気吸入時の回復期乳酸濃度の差はさらに大きい(図4)。これらの結果は、吸入 CO_2 濃度が高い方がより呼吸性アシドーシスとなり、乳酸の生成を抑制することを示唆するものである。しかしながら、本実験では動脈血pHを測定することができなかったため、運動開始および運動終了後にどの程度アシドーシスになっていたかは明らかでない。また、トレッドミル最大運動および200m全力疾走を行わせる2分前に CO_2 あるいは外気を吸入させたが、トレッドミルとトラックでは運動時間が異なる。いいかえれば、吸入 CO_2 濃度の違いと効力持続時間あるいは運動持続時間との関係についても不明であることから、必ずしも吸入 CO_2 濃度が高い方がより乳酸生成を抑制す

るとはいえないかもしれない。したがって、運動直前の急性の呼吸性アシドーシスの程度と運動中の乳酸抑制の程度との関係、 CO_2 吸入による脚筋疲労感の減少の原因、さらには各種スポーツ場面における CO_2 吸入の応用などについては今後さらに検討しなければならないだろう。特に CO_2 吸入による呼吸性アシドーシスとスポーツにおけるパフォーマンスとの関係については、今回の実験では CO_2 吸入により血中乳酸濃度は低下したが、身体パフォーマンスにはいわゆるプラスの効果は認められなかった。しかし、30秒以内の anaerobic 運動におけるエネルギーは、主として乳酸性機構に依存することはよく知られていることから、 CO_2 吸入や息こらえによって短時間の超最大運動、例えばスキージャンプ、走幅跳、重量挙げ、器械体操といったパフォーマンスを向上させる可能性は残されているものと考えられる。

要 約

1. 健康な男子大学生16名を対象に被検者が4～8分で疲労困憊に至るようなトレッドミル最大運動を行わせた。
2. 運動開始直前に室内空気と4.5%の CO_2 あるいは室内空気と6.0%の CO_2 を含む混合ガス200lを吸入させた後、再び外気を吸入させオールアウト走を行わせた。
3. CO_2 吸入と Room air 吸入におけるトレッドミル持久走時間、最高心拍数、最大毎分換気量および最大酸素摂取量には有意の差は認められなかった。
4. 大学陸上部に所属する男子短距離選手11名を対象に、200m 全力疾走直前に屋外空気あるいは8%の CO_2 を含む混合ガス200lを吸入させた時、200mの記録に有意差は認められなかった。
5. トレッドミル最大運動および200m 全力疾走後における血中乳酸濃度は CO_2 吸入の方が外気吸入よりも低かった。また吸入 CO_2 濃度が高い方が低い方のそれと比べ血中乳酸濃度の減少の割合は大きかった。

以上の結果から、本実験のような最大運動直前の CO_2 吸入による急性の呼吸性アシドーシスは、身体パフォーマンスや酸素運搬系よりむしろ解糖系に影響することが示唆された。

本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究(C)

63580092) によって行われた。また、本研究に御協力していただきました愛知県立看護短期大学 山下直美、遠藤小夜子、中村静、鎌倉やよいの各先生方に対し心から感謝致します。

文 献

- Costill, D. L., F. Verstappen, H. Kuipers, E. Janssen and W. Fink, 1984: Acid-base balance during repeated bouts of exercise: Influence of HCO_3^- . *Int. J. Sports Med.* 5: 228-231.
- Dejours, P., 1983: Principles of comparative respiratory physiology. 呼吸生理学の基礎, 落合威彦, 榎泰義, 本田良行共訳. 真興交易医学出版部, p109-113.
- Edwards, R. H. T., 1986: Interaction of chemical with electromechanical factors in human skeletal muscle fatigue. *Acta Physiol. Scand.* (Suppl. 556): 149-155.
- Ehrlsam, R. E., G. J. F. Heigenhauser and N. L. Jones, 1981: The effect of respiratory acidosis on metabolism in exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 13: 85.
- Ehrlsam, R. E., G. J. F. Heigenhauser and N. L. Jones, 1982: Effect of respiratory acidosis on metabolism in exercise. *J. Appl. Physiol.* 53: 63-69.
- Fujitsuka, N., T. Ohkuwa and M. Miyamura, 1980: Blood lactate after strenuous exercise with and without breath-holding. *Jpn. J. Physiol.* 30: 309-312.
- Goldfinch, J., L. M. Naughton and P. Davies, 1988: Induced metabolic alkalosis and its effects on 400m racing time. *Eur. J. Appl. Physiol.* 57: 45-48.
- Graham, T., B. A. Wilson, M. Sample, J. van Dijk and A. Bonen, 1980: The effects of hypercapnia on metabolic responses to progressive exhaustive work. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12: 278-284.
- Graham, T. E., J. K. Barclay and B. A. Wilson, 1986: Skeletal muscle lactate release and glycolytic intermediates during hypercapnia. *J. Appl. Physiol.* 60: 568-575.
- Hirche, H., V. Hombach, H. D. Langohr, U. Wacker

- and J. Busse, 1975 : Lactic acid permeation rate in working gastrocnemii of dogs during metabolic alkalosis and acidosis. *Pflugers Arch.* 356 : 209-222.
- Katz, A., D. L. Costill, D. S. King, M. Hargreaves and W. J. Fink, 1984 : Maximal exercise tolerance after induced alkalosis. *Int. J. Sports Med.* 5 : 107-110.
- Metzger, J. M. and R. H. Fitts, 1987 : Role of intracellular pH in muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.* 62 : 1392-1397.
- Sutton, J. R., N. L. Jones and C. J. Toews, 1981 : Effect of pH on muscle glycolysis during exercise. *Clin. Sci.* 61 : 331-338.
- Wilkes, D., N. Gledhill and R. Smyth, 1984 : Effect of acute induced metabolic alkalosis on 800-m racing time. *Med. Sci. Sports Exerc.* 15 : 277-280.

(1988年11月30日受付)