

[一般演題]

静的運動負荷における酸素摂取量

早 川 準* 磨 田 裕* 沼 田 克 雄*

緒 言

CPAP や IMV 回路によっては、吸呼気弁の開閉時に患者は呼吸努力を強いられることがある。これは、換気力学的手法による圧量曲線の面積から求められる換気仕事量にはそれほど影響しない。しかし、患者にとっては大きな負荷がかかっていると感じられる。この負荷は、外に対して大して物理的な仕事をしていない、にもかかわらず、筋肉に力を入れて運動努力をしている状態、すなわち静的運動、あるいは、等尺性運動に近いものである。そこでわれわれは、この等尺性運動時に酸素摂取量がどうなるのかを測定してみた。この時の炭酸ガス排出量、分時換気量、血圧、心拍数の変化などの測定値をも示し、考察を加え報告する。

方 法

7名の健康成人男子を対象とした。年齢 26~35 歳、身長 160~177 cm、体重 54~78 kg であった。実験は被験者を坐位として、日本コーリン社製 BP-203 血圧計を装着、また熱線流量計を用いたミナト医科学社製レスピロモニター RM-200 にマウスピースとノーズクリップにて接続、始め 10 分以上の安静をたもたせ、安定状態となったところで両手にそれぞれ 2.5 kg ずつ総重量 5 kg の重りを持たせ 10 分間その状態を維持させた。その後 10 分以上の安静をたもたせ、前値レベルにもどったことを確認したうえで、次に両手にそれぞれ 5 kg づつ総重量 10 kg の重りを持たせ 10 分間の負荷を加えた。その後 10 分間の安静をたもたせた。重りを持つ時および保持中は被験者にその位置を移動することを禁じた。以上の間の酸

素摂取量（以下 \dot{V}_{O_2} ）、炭酸ガス排出量（以下 \dot{V}_{CO_2} ）、分時換気量（以下 \dot{V}_E ）、血圧、心拍数について経時的に測定を行った。これら測定値について t-検定にて統計学的処理を加えた。

結 果

今回の実験において、被験者は自覚的に疲労を訴えたがそのために負荷を中断しなければならなかつた者はなかつた。

血圧、心拍数の変化は表 1 に示すごとくで、収縮期圧、拡張期圧、平均血圧、心拍数とも、負荷を加えることすみやかに増加し、負荷中は一定の状態をたもち、負荷後にすみやかに回復した。また、5 kg 負荷時よりも 10 kg 負荷時の増加が大きかつた。

\dot{V}_E 、 \dot{V}_{O_2} 、 \dot{V}_{CO_2} の変化は表 2 および図 1a, b, c に示すごとくで、いずれも負荷によつてすみやかに増加し、負荷中は一定の状態をたもち、負荷後に減少し負荷後 5 分で前値レベルにもどる経過を示している。また、5 kg 負荷と 10 kg 負荷での値を比べると、負荷 1 分での \dot{V}_{CO_2} をのぞき \dot{V}_E 、 \dot{V}_{O_2} 、 \dot{V}_{CO_2} ともに 10 kg 負荷の値が有意に大きかつた。

図 2 はそれぞれの負荷量における \dot{V}_E と \dot{V}_{O_2} の増加率をグラフにしたものである。5 kg 負荷時と 10 kg 負荷時との増加率をくらべると、 \dot{V}_E では点線のように約 3 倍を示したのに対して、 \dot{V}_{O_2} では実線のように約 2 倍を示した。

考 案

等尺性運動における循環系の変化は、負荷によるすみやかな収縮期圧、拡張期圧、心拍数の増加と、負荷後のすみやかな前値への回復が見られる^{1)~9)}。この時、心拍出量の増加^{1)~4)9)}（その多くは心拍数の増加による。）と、全末梢血管抵抗の

* 横浜市立大学医学部麻酔学教室

表 1 等尺性運動負荷における血圧、心拍数変化

		収縮期圧 (mmHg)		拡張期圧 (mmHg)		平均血圧 (mmHg)		心拍数 (beats/min)	
負荷重量		5 kg	10 kg	5 kg	10 kg	5 kg	10 kg	5 kg	10 kg
前 値	Mean S.D.	116.8 10.52		65.4 7.83		82.5 8.67		76.5 9.73	
負 荷 1 分	Mean S.D.	117.5 11.31	125.3 9.63	68.2 9.90	71.8 8.67	84.7 10.09	89.6* 8.53	79.2 10.48	80.3* 8.41
負 荷 5 分	Mean S.D.	124.1* 12.87	128.3** 9.31	70.2 9.22	72.2 10.72	88.4 10.33	90.9* 9.72	79.7* 9.00	80.3* 8.54
負 荷 10 分	Mean S.D.	122.5 12.99	130.4* 11.53	69.5 11.29	74.6* 10.48	87.2 11.77	93.1* 10.48	80.7* 9.01	83.6** 7.59
負荷後 5 分	Mean S.D.	116.1 9.34	117.6 12.57	66.8 9.91	68.3 7.71	83.3 7.39	85.1 9.27	77.7 8.92	75.4 6.02
負荷後 10 分	Mean S.D.	115.2 12.07	119.8 12.49	65.0 6.71	65.1 10.80	81.8 8.22	83.3 11.13	75.7 8.95	74.7 8.15

前値との差 * P<0.05 ** P<0.01

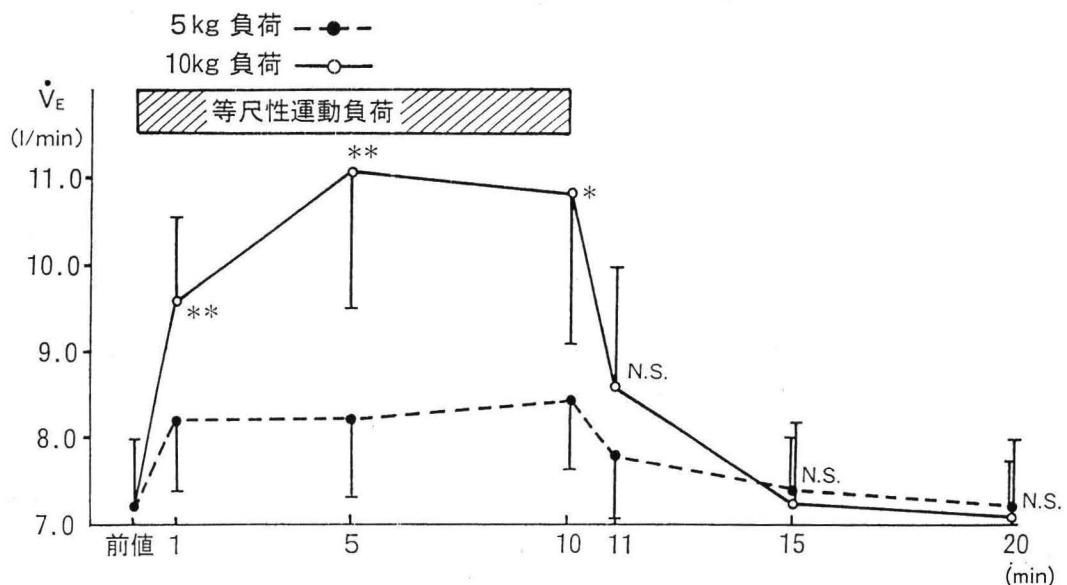
表 2 等尺性運動負荷における $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の変化

			前 値	負荷 1 分	負荷 5 分	負荷 10 分	負荷後 1 分	負荷後 5 分	負荷後 10 分
$\dot{V}E$ (l/min)	5 kg	Mean S.D.	7.18 0.782	8.21** 0.869	8.22*** 0.919	8.43*** 0.828	7.80*** 0.753	7.40 0.623	7.20 0.699
	10 kg	Mean S.D.		9.53** 0.945	11.06** 1.61	10.75** 1.71	8.58** 1.29	7.26 0.810	7.02 0.650
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	5 kg	Mean S.D.	236 29.1	272*** 37.4	271*** 31.6	274*** 31.5	254** 30.5	241 28.6	235 30.8
	10 kg	Mean S.D.		290*** 35.2	313*** 47.5	316*** 46.1	273** 41.0	244 27.2	234 29.9
$\dot{V}CO_2$ (ml/min)	5 kg	Mean S.D.	206 22.7	243** 35.6	239*** 29.9	242** 31.6	227* 33.3	206 30.5	201 23.1
	10 kg	Mean S.D.		264** 36.3	293*** 41.9	289*** 38.6	240*** 33.7	202 23.6	196 21.2

前値との差 * P<0.05 ** P<0.01 *** P<0.001

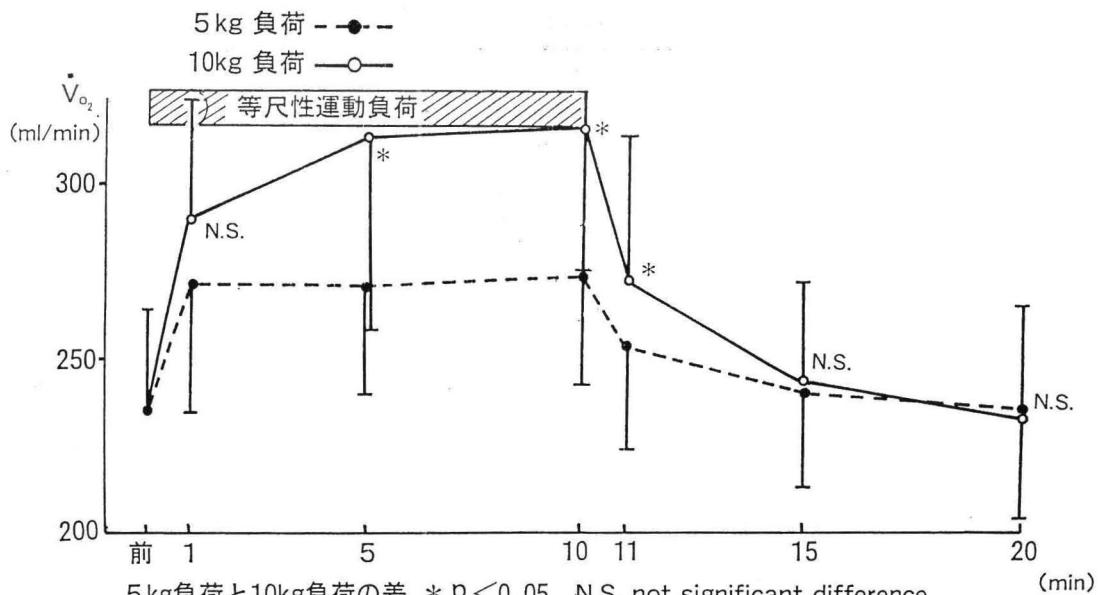
増加^{1)~3)10)}が知られている。さらに、等尺性運動における血圧、心拍数の変化には 2 つの大きな特徴が知られている。その第 1 は、MVC (maximal voluntary contraction) に対する収縮の割合 (%MVC) によって血圧、心拍数の変化が決まることであり、筋の種類や大きさには左右されない¹⁾³⁾⁸⁾。また、複数の筋が同時に収縮している場合、%MVC が最大の筋によって血圧、心拍数の変化

が決まり、その変化の大きさは同じ筋が同じ %MVC で単独収縮しているときに等しい¹⁾³⁾⁸⁾。さらに第 2 の特徴は、%MVC の大きさによって血圧、心拍数の変化の仕方が違うということである。20% MVC 以上では、収縮とともに早い立ち上がりで血圧、心拍数が増加、一定の割合で増加し続け、ある時点で疲労困憊のために収縮を続けられなくなるが、収縮中止とともに血圧、心拍数は



5 kg負荷と10kg負荷の差 * p < 0.05 ** p < 0.01 N.S. not significant difference

図 1-a 等尺性運動負荷における \dot{V}_E の経時的変化 (Mean±S.D)

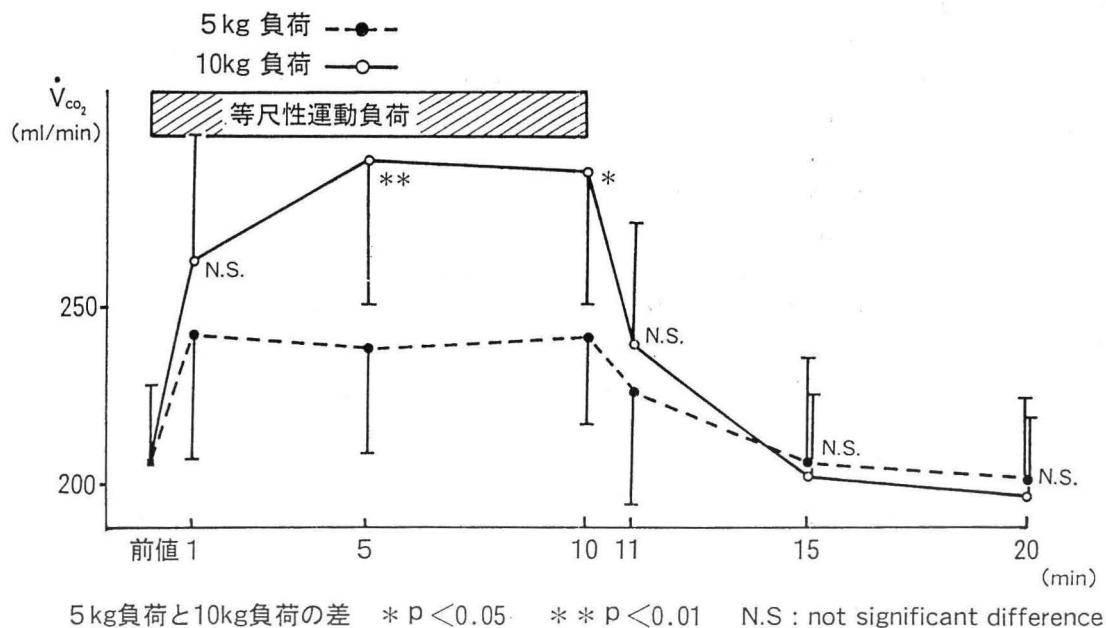


5 kg負荷と10kg負荷の差 * p < 0.05 N.S. not significant difference

図 1-b 等尺性運動負荷における $\dot{V}O_2$ の経時的変化 (Mean±S.D)

すみやかに回復する。そしてこの血圧、心拍数の増加の大きさは %MVC の大きさと比例し、収縮の許容時間は %MVC の大きさと反比例する^{1)~6)}。⁸⁾⁹⁾。これにくらべ、15%までのMVCでは、収縮によって早い立ち上がりで増加した血圧、心拍数が収縮中に一定の状態を続け、疲労困憊することなく収縮を持続することができ、血圧、心拍数の

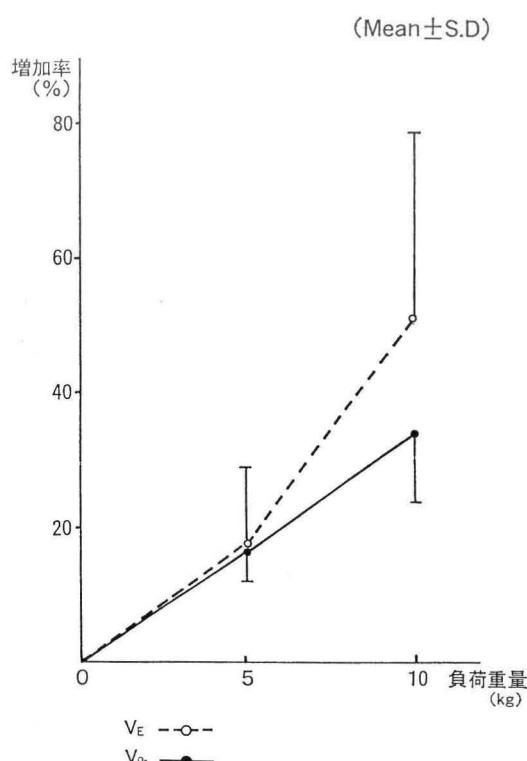
増加の大きさは %MVC により決まり、収縮の持続時間には無関係である¹⁾⁴⁾⁵⁾。前者のような疲労困憊をおこす等尺性運動を、高度（疲労性）等尺性運動、後者のような運動を、軽度（非疲労性）等尺性運動とよんでいる。ただ、最近の報告では、このような変化の違いは、単純に %MVC で決まるのではなく、筋の大きさや強さも関係する¹¹⁾¹²⁾

図 1-c 等尺性運動負荷における \dot{V}_{CO_2} の経時的変化 (Mean±S.D.)

とするものもある。今回の実験と同様に重りを持たせる負荷においても、Lind⁷⁾ らは上述と同じ特徴を示している。いずれにせよ等尺性運動における血圧、心拍数の増加は、交感神経亢進あるいは迷走神経抑制によりおこると考えられ¹³⁾¹⁴⁾、その機序は、筋の収縮によりおこる血液還流量の増大によるとの考え方や¹⁰⁾、収縮筋における代謝産物が筋の化学受容体を刺激⁵⁾、あるいは収縮筋の伸展受容体の刺激が³⁾、高位中枢を介してか直接に自律神経中枢に作用³⁾⁵⁾するのではないかと考えられているが、まだ明らかではない。

今回の実験においては、表 1 で示すように収縮期圧、拡張期圧、平均血圧、心拍数のすみやかな増加と、負荷中の一定状態の持続、負荷後のすみやかな前値への回復がみられ、これらの増加の大きさが負荷量に依存した。これらは、軽度等尺性運動における血圧、心拍数の変化の過去の報告と一致するものであり、今回の負荷が軽度等尺性運動であることを示している。

等尺性運動中の \dot{V}_E について（その報告の多くは高度等尺性運動によるものであるが）、最近の研究³⁾⁴⁾⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾¹⁵⁾によると増加することが認められている。しかし、血圧、心拍数の変化ほどはっきり

図 2 等尺性運動負荷量と \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} 増加率

りした傾向は認められていない。また、運動後の変化についても一定の傾向がない。 \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} の等尺性運動における変化についても同様、増加はあるが一定の傾向がない³⁾⁴⁾⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾¹⁶⁾。

われわれの実験では(表2, 図1a~cのごとく), \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} ともに等尺性運動負荷開始とともにすみやかに増加、負荷中は一定の状態をたもち、負荷後は減少し、早い時間に前値に回復する経過をとった。また、10kg負荷での増加が5kg負荷の増加よりも有意に大きく、 \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} とも負荷の強さに依存した増加を示し、負荷の持続時間には依存しないことを示している。これらの結果は、軽度等尺性運動における血圧、心拍数と同様の経時的变化であり、負荷量依存性の増加が \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} でもみられることを示している。

ところで、図2のごとく、 \dot{V}_E の10kg負荷での増加率が5kg負荷での増加率の約3倍を示したのに対して、 \dot{V}_{O_2} でのそれは約2倍であった。これは、10kg負荷において \dot{V}_E の増加が \dot{V}_{O_2} の増加を大きく上まわっていることを意味している。これに対して、動的運動中では、 \dot{V}_E の増加率と \dot{V}_{O_2} の増加率の比は最大運動能の80%まで一定であることが報告されており¹⁶⁾¹⁷⁾、このことから考へるならば、 \dot{V}_E が \dot{V}_{O_2} よりも大きく増加することが等尺性運動時の呼吸応答の特徴ではないかと考えられる。すなわち、等尺性運動中の \dot{V}_{O_2} は収縮筋の代謝性需要によって増加するが、 \dot{V}_E の増加はこれと別の機序によりおこることを示すものである。現在、等尺性運動中の \dot{V}_E の増加機序について、収縮筋内の化学受容体を介するもの⁹⁾、収縮筋の伸展受容体を介するもの⁶⁾など、考へられているが、詳細は明らかでない。

いずれにしても、Campbellら¹⁸⁾の報告によれば、正常人では \dot{V}_E が70l/min以内では、換気量1lの増加に対する \dot{V}_{O_2} 増加は0.5mlを越えることはなく、これを適用して考へるならば、今回の実験での \dot{V}_{O_2} 増加はほとんどが \dot{V}_E 増加以外の因子で起っているともいえる。

結 語

以上の結果より、本実験設定のごとき、呼吸筋

運動以外の動的運動のない軽度等尺性運動において分時換気量、酸素摂取量、炭酸ガス排出量は、運動開始とともにすみやかに増加し、運動中は一定の状態をたもち、運動終了とともに減少し、その増加の程度は運動の強度に依存し、持続時間とは無関係であった。この経時的变化と運動量依存性の増加は、軽度等尺性運動の血圧、心拍数の変化と同様である。これらの所見は、われわれが日常、ICUなどで管理している患者が外的に運動(動的運動)をしなくとも、静的な運動(等尺性運動)においてかなりの侵襲が加わり、エネルギーを消費し得ることを意味するものである。とくにディマンド・バルブを使ったCPAPやIMV回路の抵抗を考える際に重要であり、換気力学的手法による圧量曲線の面積から得られる換気仕事量がイコール患者の負荷でないことを示すものである。

文 献

- 1) Mitchell JH, Wildenthal K : Static (isometric) exercise and the heart: Physiological and clinical consideration. Annu Rev Physiol 39 : 369-381, 1974
- 2) Mcdermott DJ, Stekiel WJ, Barboriak JJ, et al : Effect of age on hemodynamic and metabolic response to static exercise. J Appl Physiol 37 : 923-926, 1974
- 3) Asmussen E : Similarities and dissimilarities between static and dynamic exercise. Circ Res 48 : Suppl : I-3~I-10, 1981
- 4) Kilbom A, Persson J : Leg blood flow during static exercise. Eur J Physiol 48 : 367-377, 1982
- 5) Lind AR, McNicol GW : Local and central circulatory responses to sustained contractions and the effect of free or restricted arterial inflow on post-exercise hyperemia. J Physiol 192 : 575-593, 1967
- 6) Wiley RL, Lind AR : Respiratory responses to sustained static muscular contractions in human. Clin Sci 40 : 221-234, 1971
- 7) Lind AR, McNicol GW : Cardiovascular responses to holding and carrying weights by hand and by shoulder harness. J Appl Physiol

- 25 : 261-267, 1968
- 8) Lind AR, McNicol GW : Circulatory responses to sustained handgrip contraction performed during other exercise, both rhythmic and static. *J Physiol* 192 : 595-607, 1967
- 9) Myhre K, Lange Anderson K : Respiratory responses to static muscular work. *Resp Physiol* 12 : 77-89, 1971
- 10) Schrijen F, Ravez P, Candina-Villar R : Respiratory and circulatory adaptation to isometric and dynamic exercise in chronic lung disease. *Clin Physiol* 4 : 371-378, 1984
- 11) Kilbom A, Persson J : Circulatory response to static muscle contractions in three different muscle groups. *Clin Physiol* 1 : 215-225, 1981
- 12) Mitchell JH, Payne FC, Saltin B, et al : The role of muscle mass in the cardiovascular response to static contraction. *J Physiol* 309 : 45-54, 1984
- 13) Hollander AP, Bouman LN : Cardiac acceleration in man elicited by a muscle-heart reflex. *J Appl Physiol* 38 : 272-278, 1975
- 14) Martin CE, Schaver JA, Leon DF, et al : Autonomic mechanisms in hemodynamic responses to isometric exercise. *J Clin Invest* 54 : 104-115, 1974
- 15) Bosisio E, Arosio A, Mandelli V, et al : Ventilatory and pressor response to isometric exercise in normal subjects. *Resp* 40 : 337-343, 1980
- 16) Karlsson J, Astrand PO, Ekblom B : Training of the oxygen transport system in man. *J Appl Physiol* 22 : 1061-1065, 1967
- 17) Sipple JH, Gilbert R : Influence of proprioceptor activity in the ventilatory response to exercise. *J Appl Physiol* 21 : 143-146, 1966
- 18) Campbell EJM, Westlake EK, Cherniack RM : Simple methods of estimating oxygen consumption and efficiency of the muscles of breathing. *J Appl Physiol* 11 : 303, 1957