

運動負荷に対する心肺機能の変化

— 健常者, 閉塞性障害者, 拘束性障害者 —

千住 秀明¹⁾ 浦田 秀子²⁾ 勝野久美子²⁾ 西山久美子²⁾
長尾 哲男³⁾ 井口 茂¹⁾ 鶴崎 俊哉¹⁾ 中野 裕之¹⁾

要 旨 本研究の目的は呼吸不全患者の運動負荷に対する心肺機能の変化を知ることである。対象者は、健常者 11 名と閉塞性障害者、拘束性障害者各 1 名で、計 13 名であった。方法は、多段階運動負荷試験を行い、運動前・中・後の一回換気量 (TV)・分時換気量 (VE)・呼吸数 (RR)・酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2})・二酸化炭素排出量 (\dot{V}_{CO_2})・METS・酸素摂取量/体重 (\dot{V}_{O_2}/W)・呼吸商 (RQ)・心拍数 (HR)・酸素脈 (\dot{V}_{O_2}/HR)・酸素飽和度 (SaO₂)・ALL-OUT TIME を測定し、負荷に対する経時の変化と、最大一回換気量、最大分時換気量、最大呼吸数、最大酸素摂取量、最大二酸化炭素排出量、最高 METS、最大酸素摂取量/体重、最大心拍数、最大酸素脈、ALL-OUT 時の呼吸商、ALL-OUT 時の呼吸効率を求めた。その結果は、呼吸不全患者が運動負荷に対する耐用能を著しく低下させていた。その原因は、換気機能とガス代謝の低下によるものと思われた。しかし、心機能は、活動を中止するほど低下していなかった。

長大医短紀要 1: 57-65, 1987

Key Words: 閉塞性肺疾患, 拘束性肺疾患, 運動負荷試験, ガス分析

1. 目 的

理学療法士の役割は、障害者に基本的動作能力を獲得させることである¹⁾が、神経筋疾患や骨関節疾患と呼吸・循環器疾患ではその様相が異なる。前者は、動作そのものの困難性が原因であり、後者は、動作に伴う心肺機能不全が原因で起こる²⁾。特に呼吸不全患者のリハビリテーションを行う上では、動作時の息切れが障害となる³⁾。本研究の主たる目的は、呼吸不全患者が運動時においてどのような影響を受けているかを心肺機能の面から換

気機能・ガス代謝・心機能を健常者と比較検討することで、運動時の呼吸不全の心肺機能の変化を捉えることである。

2. 対 象

対象者は、心肺機能に異常のない長崎大学医療短期大学の学生、職員（健常者群）の男性 3 例、女性 8 例、計 11 例である。年齢、身長および体重は、平均で 22 才、164 cm、53.5 kg であった。（表 1）

呼吸不全者は、長崎大学医学部附属病院で理学療法を受けている、62 才の女性 (T. T)

1) 理学療法学科, 2) 看護学科, 3) 作業療法学科: 長崎大学医療技術短期大学部

表1. 対象者

氏名	性別	年齢	身長	体重	疾患名
U. M	F	19	158.5	50	健康
U. Y	F	19	160	50	健康
E. M	F	19	160	48.5	健康
S. N	F	19	142	40	健康
O. T	F	18	159	48	健康
H. M	F	28	161	51	健康
M. T	M	19	176	71	健康
I. I	F	21	148	56.5	健康
Y. Y	M	22	167	65	健康
T. T	F	20	164	53	健康
K. K	M	39	173	55	健康
T. T	F	62	148	55	び慢性汎細 気管支炎
S. M	M	50	167	51	肺切除

と45才の男性(S. M)である。身長、体重は、それぞれ148 cm, 55 kgと167 cm, 51 kgである。前者の診断名は、びまん性汎細気管支炎であった。肺機能検査は、肺活量(VC): 1.07 L, %肺活量(%VC): 47.9%, 一秒量(FEV_{1.0}): 0.56 L, 一秒率(FEV_{1.0%}): 52.3%で閉塞性障害の患者である。後者の診断名は、Malignant fibrous histiocytoma

で昭和62年9月3日に全左肺切除を受けた患者である。肺機能検査(10月2日)は、肺活量(VC): 1.92 L, %肺活量(%VC): 52.1%, 一秒量(FEV_{1.0}): 1.70 L, 一秒率(FEV_{1.0%}): 90.4%で拘束性障害の患者である。

3. 方法

1) 測定項目

一回換気量(TV)・分時換気量(VE)・呼吸数(RR)・酸素摂取量(\dot{V}_{O_2})・二酸化炭素排出量(\dot{V}_{CO_2})・METS・酸素摂取量/体重(\dot{V}_{O_2}/W)・呼吸商(RQ)・心拍数(HR)・酸素脈(\dot{V}_{O_2}/HR)・酸素飽和度(SaO₂)・ALL-OUT TIME

2) 測定機器

心拍数は、フクダエム・イー製心電図テレメータで、酸素飽和度は、ミノルタ製酸素飽和度モニターで計測した。それ以外の一回換気量・分時換気量・呼吸数・酸素摂取量・二酸化炭素排出量・呼吸商等は、ジルコニア酸素電極と熱線流量系によるミナト医科学製レスピロモニター RM-200をもちいて Breath-by-Breath で計測した。

表2. 運動負荷法

負荷方法	ステップ番号	角度(%)	スピード(mile/h)	歩行距離(mile)	時間(min)
SHEFFIELD AND REEVES	1	0	1.7	0.09	3
	2	5	1.7	0.09	3
	3	10	1.7	0.09	3
	4	12	2.5	0.12	3
	5	14	3.4	0.17	3
	6	16	4.2	0.21	3
	7	18	5.0	0.25	3
	8	20	5.5	0.28	3
NAUGHTON	1	0	1	0.05	3
	2	0	1.5	0.08	3
	3	0	2	0.10	3
	4	3	2	0.10	3
	5	5	3	0.15	3
	6	7	3	0.15	3
	7	8	3	0.15	3
	8	10	3	0.15	3

運動負荷に対する心肺機能の変化

3) 運動負荷法

健常者には、Sheffield and Reeves 法を、慢性呼吸不全者には、Naughton 法によりトレッドミルによる多段階運動負荷を、それぞれ

ALL-OUT するまで与えた。(表 2)

4) 解析方法

上記の測定機器より PC-9801vm コンピュータでリアルタイムで十秒毎に取り込み、上記の測定項目を記録し、負荷に対する経時的変化と、最大一回換気量、最大分時換気量、最

排出量、最高 METS、最大酸素摂取量/体重、最大心拍数、最大酸素脈 ALL-OUT 時の呼吸商、ALL-OUT 時の呼吸効率を解析した。

4. 結 果:

1) ALL-OUT TIME

健常者の平均は、17.50 ± 3.31 分、閉塞性障害者 (T・T) は、7.00 分、拘束性障害者 (S・M) は、13.00 分であった。

2) 健常者の換気機能・ガス代謝・心拍数の結果 (表 3)

表 3 健常者の換気機能・ガス代謝・心拍数

	U. M	U. Y	E. M	S. N	O. T	H. M	M. T	I. I	Y. Y	T. T	K. K	MEAN	±SD
最大一回換気量 (ml)	1820	1690	1070	1080	1360	1940	2200	2030	2780	1590	2370	1812	581
最大分時換気量 (l/m)	86	110	88	55	76	82	138	86	128	84	141	97.6	27.7
最大呼吸数 (n/)	47	69	75	51	56	43	63	42	46	53	60	55	11
最大O ₂ 摂取量 (ml/m)	2180	2550	1890	1840	2080	2100	3600	2540	4010	2250	3550	2599	761
最大CO ₂ 排出量 (ml/m)	2560	2870	1900	1790	2200	2260	4070	2770	4600	2510	4100	2875	954
最高METS	12.5	14.6	11.1	13.1	12.4	11.8	14.5	10.3	17.6	12.1	18.4	13.5	2.6
最大O ₂ 摂取量/体重 (ml/kg)	43.6	51.0	39.0	46.0	4303	41.1	50.7	45.0	61.7	42.5	64.5	48.0	8.3
最大心拍数 (beat/m)	186	191	197	195	184	189	196	188	190	194	175	190	6.4
最大酸素脈	11.8	13.4	9.6	9.4	11.3	11.1	18.2	13.6	21.1	11.6	20.3	13.8	4.2
ALL OUT時の呼吸商	1.16	1.11	1.00	0.97	1.05	1.07	1.13	1.09	1.14	1.11	1.15	1.09	0.06
ALL OUT時の呼吸効率(ml/l)	31.0	28.5	28.6	40.7	33.1	31.3	31.7	35.7	38.7	32.7	30.7	33.0	3.9

平均で最大一回換気量 1812 ± 581ml, 最大分時換気量 97.6 ± 27.71/m, 最大呼吸数 55 ± 11n/m, 最大酸素摂取量 2599 ± 761ml/m, 最大二酸化炭素排出量 2875 ± 954ml/m, 最高 METS13.5 ± 2.6, 最大酸素摂取量/体重 48 ± 8.3ml/kg, 最大心拍数 190 ± 6.4beat/m, 最大酸素脈 13.8 ± 4.2, ALL-OUT 時の呼吸商 1.09 ± 0.06, ALL-OUT 時の呼吸効率 33.0 ± 3.9ml/l であった。

3) 呼吸不全患者の換気機能・ガス代謝・心拍数の結果 (表 4)

閉塞性障害者は、最大一回換気量 690ml, 最大分時換気量 25.1/m, 最大呼吸数 36n/m, 最大酸素摂取量 820ml/m, 最大二酸化炭素

排出量 640ml/m, 最高 METS3.3, 最大酸素摂取量/大酸素摂取量 820ml/m, 最大二酸化炭素排出量 640ml/m, 最高 METS3.3, 最大酸素摂取量/体重 11.5ml/kg, 最大心拍数 123 beat/m最大酸素脈 6.62, ALL-OUT 時の呼吸商 0.77, ALL-OUT 時の呼吸効率 31.0ml/l であった。

拘束性障害者は、最大一回換気量 1050ml, 最大分時換気量 46l/m, 最大呼吸数 44n/m, 最大酸素摂取量 1090ml/m, 最大二酸化炭素排出量 970ml/m, 最高 METS6.1, 最大酸素摂取量/体重 21.4ml/kg, 最大心拍数 113 beat/m最大酸素脈 9.65, ALL-OUT 時の呼吸商 0.88, ALL-OUT 時の呼吸効率 28.50 ml/l

表4 呼吸不全患者の換気機能・ガス代謝・心拍数の結果

	T. T	S. M
最大一回換気量 (ml)	690	1050
最大分時換気量 (l/m)	25	46
最大呼吸数 (n/m)	36	44
最大O ₂ 摂取量 (ml/m)	820	1090
最大CO ₂ 排出量 (ml/m)	640	970
最高METS	3.3	6.1
最大O ₂ 摂取量/体重 (ml/kg)	11.5	21.4
最大心拍数 (beat/m)	123	113
最大酸素脈	6.62	9.65
ALL OUT時の呼吸商	0.77	0.88
ALL OUT時の呼吸効率 (ml/l)	31.0	28.5

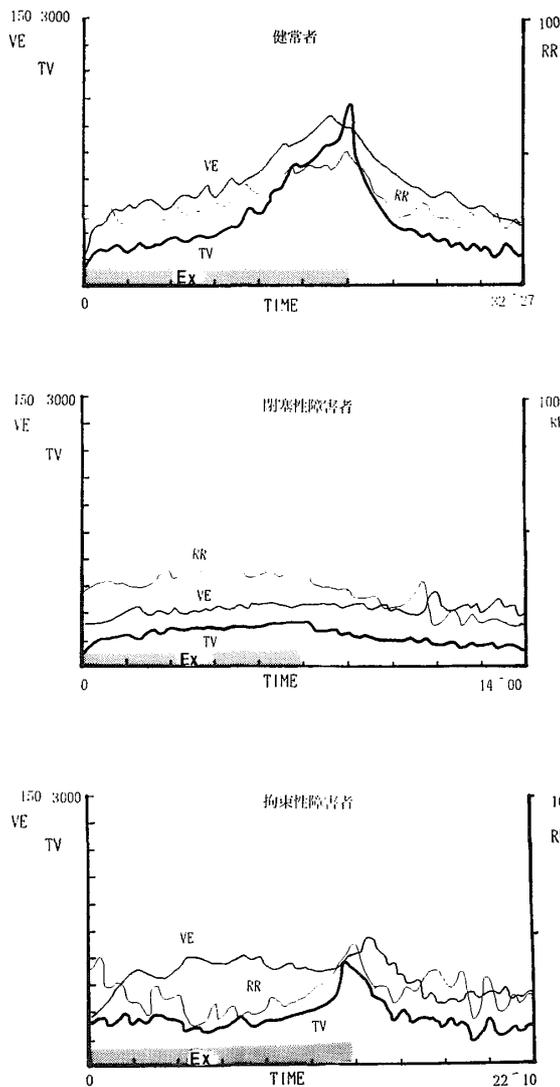


図1 TV・VE・RR-TIME 曲線

であった。

4) 健常者と呼吸不全患者の運動に対するTV, VEおよびRRの経時変化(図1)

健常者は、運動の負荷に応じて、呼吸数と一回換気量を増加させることにより分時換気量を増したが、運動負荷が強くなれば主に関換気量が増加していく。運動中止後は、呼吸数も一回換気量も急速に運動前の状態に回復した。

閉塞障害者では、呼吸数が運動初期から多く、負荷の増加による変化はほとんど観られなかった。一回換気量は、運動により僅かに増加するものの、運動による分時換気量の変化は殆んどなく、換気量を呼吸数で補っていた。

拘束性障害者は、運動に対する換気の動態が健常者に近いパターンであったが、一回換気量、呼吸数、分時換気量何れにおいても健常者に比べ低位であった。

5) 健常者と呼吸不全患者の運動に対する \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} および \dot{V}_{O_2}/\dot{V}_E の経時変化(図2)

健常者は、負荷の増加に伴い酸素摂取量も二酸化炭素排出量も増加する。運動量が軽度であれば酸素摂取量が二酸化炭素排出量より

運動負荷に対する心肺機能の変化

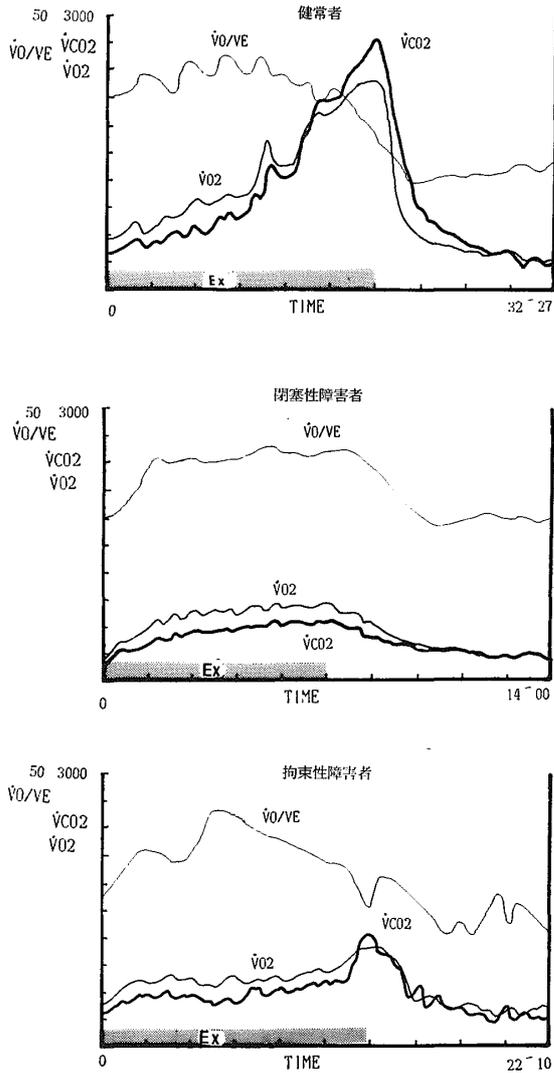


図2 $\dot{V}_{CO_2} \cdot \dot{V}_{O_2} \cdot \dot{V}_{O_2}/\dot{V}_E$ -TIME 曲線

多いが、運動が増加するに従って、二酸化炭素排出量が多くなり ALL-OUT となった。運動中止直後は、二酸化炭素排出量は酸素摂取量より多いが、徐々に同じレベルへ近づいた。呼吸効率は、運動開始直後は、40~35ml/l であったが、負荷の増加と共に徐々に低下した。

閉塞障害者は、酸素摂取量も二酸化炭素排出量も少なく、しかも二酸化炭素排出量は酸素摂取量を越えることはなかった。呼吸効率は、運動前後において 40~30ml/l と高かった。

拘束性障害者では、酸素摂取量、二酸化炭素排出量が共に低位であったが、ALL-OUT

直前には急増して健常者に近いパターンをとった。

呼吸効率は、健常者とほぼ同様であった。

6) 健常者と呼吸不全患者の運動に対する HR, \dot{V}_{O_2}/HR の経時的变化 (図3)

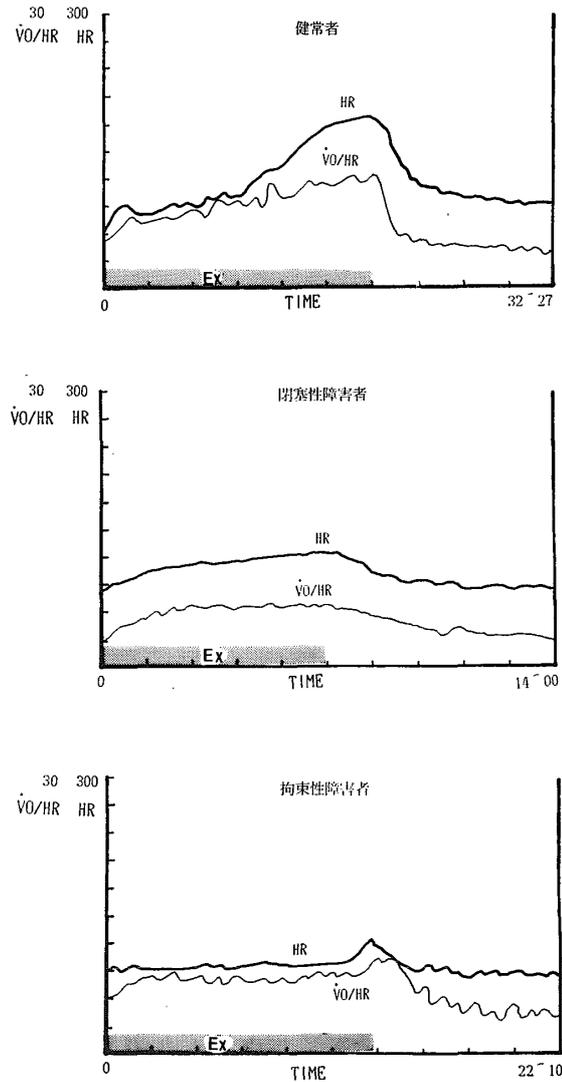
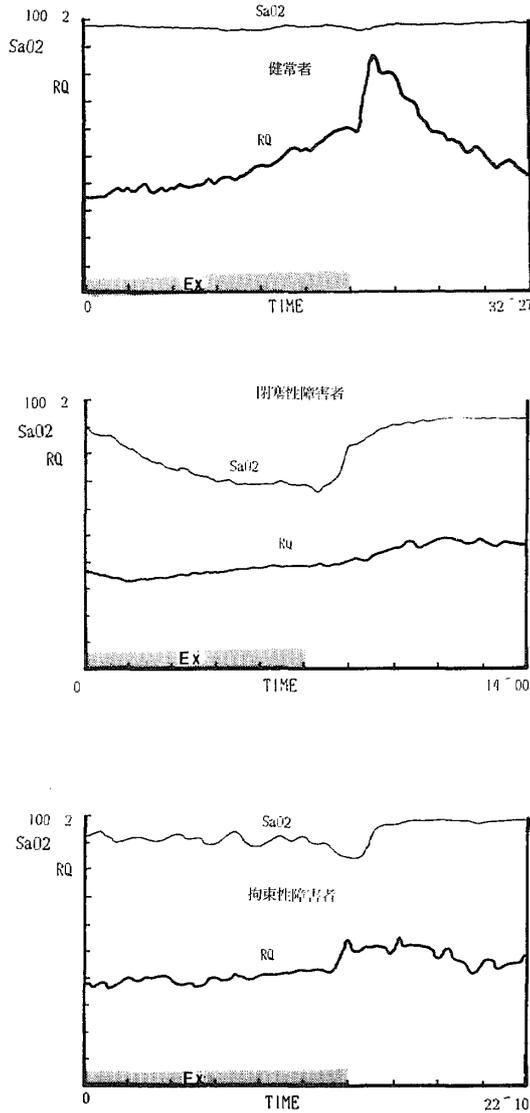


図3 HR・ \dot{V}_{O_2}/HR -TIME 曲線

健常者に比べて、閉塞性も拘束性障害者も運動に対する増加は僅かで ALL-OUT を迎えた。閉塞障害者には、健常者に観られる運動負荷時の心拍数の増加は少なかった。

7) 健常者と呼吸不全患者の運動に対する SaO₂, RQ の経時的变化 (図4)

図4 SaO₂・RQ-TIME 曲線

健常者は、運動負荷による酸素飽和度の変化は殆どなかったが、呼吸商は約0.7から徐々に高くなり、ALL-OUT時には、約1に達し、運動終了直後に1.8まで急速に上昇した。

閉塞性障害者では、運動負荷と共に酸素飽和度が徐々に低下しALL-OUT時には約70%まで低下した。運動中止後徐々に回復して、酸素飽和度は運動前より高くなったが、その回復には、約3分を要した。呼吸商は、運動と共に高くなったが、1を越えることなくALL-OUTを迎え、運動中止後も1に近づいた。

拘束性障害者は、ALL-OUT直前まで比較

的に安定して低下を示さなかったが、ALL-OUT時には85%まで低下した。運動中止後は、2分で回復し、その後運動前より高い飽和度を示した。呼吸商は、0.88でALL-OUTを迎え、運動中止後も1に近づいた。

5. 考 察

日常生活でもスポーツ活動でも有酸素状態では、筋活動の増進にともない物質代謝は亢進する。特に運動に関与する筋においては化学変化が促進され、酸素の消費も炭酸ガスの生産量も増加するために、生体は呼吸循環機能を強めて運動状態に応ずる。⁴⁾⁶⁾⁷⁾しかし、呼吸不全患者は、呼吸器の障害が原因で運動に対応できる幅がせまくなり、日常生活が制限されその活動を中止せざるを得なくなる。⁸⁾

健常者は、運動の増進によって一回換気量と呼吸数を増加して分時換気量を増す。一回換気量は、最大一回換気量の 1812 ± 581 mlまで、呼吸数は、最大呼吸数 55 ± 11 n/mまで、それぞれ通常の約3~4倍に増加する。換気量の増加は、運動負荷に応じて一回換気量の増加が呼吸数の増加より多くなる。閉塞性障害者(T. T)では、1秒量の低下で、一回換気量が健常者の約38%しか増加できないために、呼吸数(最大呼吸数は健常者の約65%)を増加して応ずるようになる。また拘束性障害者(S. M)においても、最大一回換気量、最大呼吸数が健常者のそれぞれ58%、80%であり、閉塞性および拘束性障害者は、最大一回換気量が強く障害を受けやすく、換気量の増加を呼吸数を多くして換気量の増加に応じると考えられる。沖本は、⁹⁾同じ負荷量であれば換気障害の程度が増せば増すほど分時換気量が増加すると述べているが、これは、一回換気量の低下で死腔の占める割合が増加し、これを呼吸数の増加で代償するために過剰換気が生じると考えられる。

酸素摂取量は、運動による筋活動と共に増加し、筋活動に伴う代謝によって二酸化炭素

排出量も増加する。両者は運動負荷とある程度まで比例し、訓練によって増強する。しかし運動負荷が強くなるとやがて酸素摂取量が増加できなくなり（最大酸素摂取量）ALL-OUTを迎える。健常者群では、最大酸素摂取量が体重当り 48.0ml（一般人：40～50・君原：78・益田：72.7ml/kg・min）である。閉塞性障害者は 11.5ml、拘束性障害者では 21.4ml で、健常者と比べ、それぞれの 24% と 45% しかない。これは、ほぼ ALL-OUT TIME と作業強度の指標である最大 METS と一致する。このことは、呼吸不全患者は、患者の生産できるエネルギーが小さいことを表している。¹⁰⁾ このことより、運動処方にあたっては、患者のエネルギー生産量に応じた運動量の処方が必要であることを意味している。

健常人においては、運動の増進によって二酸化炭素排出量が、酸素摂取量より多くなるのは、エネルギーの産出が、脂肪から炭水化物へとエネルギーの供給源が変わったためである。これは、ALL-OUT の呼吸商が平均で 1.09 ± 0.06 になることでも予測される。呼吸商が、運動終了直後に急上昇をしめすのは酸素負債による過剰換気が原因である。

呼吸不全者では、呼吸商が、0.77, 0.88 と低い。この原因は、主として低換気が原因で二酸化炭素の排出困難が反映されたためであり、エネルギー源の種類の違いによるものではない。その理由は、呼吸効率が高率のままであり、そして二酸化炭素排出量が酸素摂取量より増加しないことになる。

呼吸不全患者の場合、心拍数は Astrant の予測最大心拍数まで達しなかった。このことは、直江¹¹⁾ や Jones¹²⁾ らが述べているように呼吸不全患者の運動制限因子に心機能は考えないでよいと思われる。しかし、最大酸素脈は、健常者群は、 13.8 ± 4.2 で、閉塞性障害者は 6.62 拘束性障害者は 9.65ml/beat であり、明らかに心機能は低下している。

酸素飽和度は、健常者においては運動負荷が強くても 90% を割ることはない。しかし、呼吸不全患者では、安静時では、90% 以上でも、運動によって急速に低下する症例が多い。酸素療法を処方する場合、安静時と運動時の二種類の酸素量の処方が必要なことを述べてきた理由はここにある。¹³⁾

6. ま と め

健常者 11 例と閉塞性及び拘束性障害の各 1 例の呼吸不全患者を対象として運動負荷に対する呼吸・循環機能を比較検討した。

その結果は、

- ① 呼吸不全患者の運動負荷に対する耐用能が低下していたが、その原因は、運動に対する換気量の増加、特に一回換気量の増加が少ないこと、そして最大酸素摂取量および最大二酸化炭素排出量が少ないことであった。
- ② 心機能は、やや低下しているが運動を中止するほどの障害ではなかった。

御指導、御校閲を頂いた長崎大学教養部田原教授、長崎大学医療技術短期大学部池田教授、中村教授にお礼申し上げます。

7. 文 献

- 1) 社団法人日本理学療法士協会：理学療法士の業務。理学療法白書，1985，p 18～26。
- 2) 諏訪邦夫：呼吸不全の定義と分類，球急医学，11 (10)，p 1291-1284，1987
- 3) 千住秀明：呼吸不全患者の ADL 能力，第 23 回近畿理学療法士学会学会誌，14：p 56～58，1983，
- 4) 朝比奈一男，中川功哉：運動生理学，大修館書店，p 13～49，1979
- 5) 山路啓司：心拍数の科学，大修館書店，p 15～84，1979
- 6) 山路啓司：最大及び最大下作業時の非鍛錬者と鍛錬者の生理的反応の相違 (I)

- ～呼吸機能について～, 東京大学教育部紀要, 13: p 245-252, 1973b.
- 7) 山路啓司: 最大及び最大下作業時の非鍛錬者と鍛錬者の生理的反応の相違 (I I) ～呼吸機能について～, 東京大学教育部紀要, 13: p 253-259, 1973c
- 8) 本間日臣偏: 呼吸器病学, 医学書院 p 167-171, 1980
- 9) 沖本二郎, 呼吸器疾患患者における運動性限因子に関する一特に運動負荷時の肺機能と血中乳酸血の変動について一, 日胸疾会誌 20(1)p 59-68, 1982
- 10) 諏訪邦夫: 患者の体力と酸素運搬能, 呼と循, 27: p 1156, 1979
- 11) 直江弘明, 副島林造, 小林武彦, 松島敏春, 入江淑美, 坂梨朱美, 福田芳美: 正常人および換気障害患者における運動機能制限因子について, 日胸疾会誌 16: p 693, 1982
- 12) Jones, N. L., Jones, G, & Edward, R. H. T.: Exercise tolerance in chronic airway obstruction. Amer. Rev. Rrsp. Dis., 103, p 477, 1971.
- 13) 千住秀明: 呼吸リハビリテーションの存在理由, ナースステーション, 16p 33-38, 1986

(1987年12月28日受理)

Effect of Exercise Load on Cardiopulmonary Functions in Normal Subjects and Patients with Respiratory Diseases

Hideaki SENJYU,¹⁾ Hideko URATA,²⁾ Kumiko KATSUNO,²⁾ Kumiko NISHIYAMA,²⁾
Tetsuo NAGAO,³⁾ Shigeru INOKUCHI,¹⁾ Toshiya TURUSAKI¹⁾ and Hiroyuki NAKANO¹⁾

- 1) Department of physical Therapy
 - 2) Department of Nursiny
 - 3) Department of Occupational Therapy
- The School of Allied Medical Sciences
Nagasaki University.

Abstract This study was undertaken to investigate the effect of exercise load on the cardiopulmonary functions in 11 normal subjects, one patient with obstructive lung disease and one patient with restrictive lung disease. The cardiopulmonary functions included the following: all-out time, TV, VE, RR, \dot{V}_{O_2} , METS, \dot{V}_{O_2}/W , RQ, HR, \dot{V}_{O_2}/HR and SaO₂.

The patient with obstructive or restrictive lung disease showed a decreased tolerance for exercise load as compared with normal subjects. These results appeared to depend on the dysfunction in ventilation and gas metabolism. However, the cardiac functions in these patients were not disturbed to the level to stop the exercise load.

Bull. Sch. Allied Med. Sci., Nagasaki Univ. 1 : 57-65, 1987