

# 呼吸制限によるトレーニング (ハイポキシク・トレーニング) の効果

東京大学 小林 寛 伊  
(共同研究者) 同 釘 宮 豊 城  
同 宮 下 充 正  
同 武 藤 芳 照

## Effect of the training with breath-control

by

Hiroyoshi Kobayashi\*, Toyoki Kugimiya\*\*,  
Mitsumasa Miyashita\*\* and Yoshiteru Muto

\* *Faculty of Medicine, University of Tokyo*

\*\* *Faculty of Education, University of Tokyo*

### ABSTRACT

Responses towards breath-hold exercise repeated on bicycle ergometer were studied. Interval exercise with continuous breathing, inspiratory breath-holding or expiratory breath-holding was investigated in six young males. In breath-holding exercise  $\text{PaO}_2$  decreased and  $\text{PaCO}_2$  increased significantly with no difference in heart rate between breath-holding and continuous breathing. Oxygen removal increased with inspiratory breath-holding and mean arterial pressure increased with expiratory breath-holding compared with others. pH became higher with repeating exercise and this response is apparent in breath-holding. Decreases of base excess of extracellular fluid and increases of blood lactic acid concentration were observed, however no significant difference was recognized between those three types of breathing.

## 要 旨

呼吸制限による練習の効果を究明するために自転車エルゴメータを用いて、くり返し運動負荷による検討をおこなった。連続的に呼吸する場合を対照とし、吸気位制限呼吸と呼気位制限呼吸とを比較した。結果は、制限呼吸において、動脈血酸素分圧の低下、動脈血炭酸ガス分圧の上昇が著明であり、吸気位制限呼吸では酸素摂取率の上昇が、呼気位制限呼吸では平均動脈圧の上昇が明白であった。水素指数は、くり返し負荷により低下し、その程度は制限呼吸で強く、また、細胞外液の過剰塩基の低下、血中乳酸濃度の増加する傾向が存したが、呼吸法の異なる3者間に有意差は認められなかった。

## 緒 言

水泳練習における呼吸制限の効果が世界的にも認められているが、その練習効果に関する理論的裏付けには確たるものがなく、また、実験的検討もほとんど見当たらない。

呼吸制限が水泳の記録向上に効果があるとすれば、他の運動においてもその効果は認められるはずである。一方、本練習方法は、広く高校生や中学生の水泳練習に採用されており、誤っておこなえば危険を招来する可能性もある。

このような見地から、自転車エルゴメータを用いて、呼吸制限によって生ずる生理学的状態の検討をおこなった。

## 実験方法

被験者は健常な男子体育学専攻学生6名で、年齢、身長、体重の平均と範囲は、それぞれ23.5歳、22~26歳、169.0 cm、161.0~181.0 cm、62.6 kg、54.0~72.0 kgであった。

運動負荷は、自転車エルゴメータ (Monark社) により 3.5 kp、60 r.p.m. (210 watt) でおこ

ない、30秒間の運動を30秒間の休息をはさんで10回くり返す負荷を1単位とした。運動時の呼吸は、呼気、吸気を各1秒ごとに続ける“連続呼吸”、1秒間の吸気の後には息こらえ4秒、呼気1秒の6秒をくり返す“吸気位制限呼吸”、1秒間の呼気の後には息こらえ4秒、吸気1秒の6秒をくり返す“呼気位制限呼吸”の3種で、各1単位ずつ計3単位を10分間の回復期間をはさんで、各被験者にひき続きおこなわせた。3種類の呼吸の順序は6名共異なったものとした。

被験者にはマスクを着用させ、各単位の奇数回目の運動時と休息時の各30秒間、呼気をダグラスバッグに採取し、自動呼気ガス分析器 (1H21A, 三栄測器社) により酸素濃度、炭酸ガス濃度を計測、乾式ガスメータ (Max-Planck社) により換気量を計測し、換気量、酸素摂取率、酸素摂取量を求めた。

また、被験者は、橈骨動脈にカテーテル (22G, Argyle Medicut, Sherwood社) を留置し、運動前、奇数回目の運動と休息および10回目の運動の各終了時に採血をおこなって、分析までの5~10分間は水冷保存した。動脈血分析は、水素指数、酸素分圧、炭酸ガス分圧を全自動血液ガス分析装置 (IL system 1303, Instrumental Laboratory社) で、酸素飽和度を co-oxymeter (IL 282, Instrumental Laboratory社) で測定した。ヘモグロビン 5.0g/dl における細胞外液の過剰塩基として、Siggaard-Andersen の alignment nomogram<sup>1)</sup> を用いた。運動終了時の動脈血は、乳酸濃度測定をおこなったが、その測定は、乳酸分析用キット (Lactate-UV-Test, Boehringer社)、分光光度計 (Model 100-60, 日立社) によった。

動脈圧測定は、橈骨動脈カテーテルに接続した血圧トランスデューサ (Bentley Trantec Model 800, Datascope社) を介して、モニター (Data-scope, Datascope社) につなぐと共に、データレ

コーダ (R-210A TEAC 社) に収録した。更に収録した圧曲線より、奇数回目の運動と休息および10回目の運動における20~25秒に関し、積分器 (RFJ-5, 日本光電社) を用いて平均動脈圧を求めると共に、心拍数の平均値を算出した。

奇数回目の運動前後の動脈血酸素分圧、動脈血炭酸ガス分圧それぞれの平均値を、その回の運動中の平均動脈血酸素分圧、平均動脈血炭酸ガス分圧として、Davis ら<sup>2)</sup> の式、Bohr の式より平均肺胞気酸素分圧を計算した。

統計処理は、水素指数は Mann-Whitney 検定、他は分散分析により、連続呼吸、吸気位制限呼吸、呼気位制限呼吸の3者間の有意差検定 (p=0.05) をおこなった。

### 実験結果

結果は表1, 2のとおりであり、6名の平均値を示したが、換気量は、運動中は当然のことながら連続呼吸で多く、吸気位制限呼吸より呼気位制限呼吸で大きいもの (Exercise 3, 9) も認められたが、休息時には、逆に制限呼吸で高い値を示した。

酸素摂取量は、運動中は連続呼吸で多く、休息

時には制限呼吸で多く、酸素摂取率は、運動時、吸気位制限呼吸で最も高値を示し、次いで呼気位制限呼吸となっているが、休息時にも吸気位呼吸制限が高値を示していた。各奇数回の運動時と休息時との平均においては、3者間に有意差を認めなかった。

心拍数には有意差が認められず、平均動脈圧は、運動時、呼気位制限呼吸で他の2者より高値を示し、休息時には、1回目を除いて有意差が認められなかった。

動脈血酸素分圧は、運動中において、連続呼吸、吸気位制限呼吸、呼気位制限呼吸の順に低くなり、休息時には逆に、後2者の方が高値を示す傾向がうかがえた。

動脈血酸素飽和度は、運動時、動脈血酸素分圧と同様、連続呼吸が最も高く、続いて吸気位呼吸制限、呼気位呼吸制限の順であり、休息時は、5回目を除いて有意差を認めなかった。

動脈血炭酸ガス分圧は、運動時、制限呼吸2者に比べ、連続呼吸で低値を示し、休息時には有意差が存せず、連続呼吸においては、休息時よりむしろ運動時の方が低値を示す傾向があった。

水素指数は、運動中、連続呼吸で高く、休息時

表1 連続呼吸と制限呼吸の比較-I (平均値)

Item	Breathing	1		3		5		7		9		10
		E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E
換気量 $\dot{V}_E$ (l/min)	Continuous	30.4	27.1	41.9	33.2	43.3	33.5	43.5	37.3	45.2	36.2	
	Inspi. Holding	16.8	31.0	20.8	41.6	21.8	25.1	25.1	46.4	22.7	44.8	
	Expi. Holding	19.8	28.0	25.1	45.0	25.0	50.1	26.0	51.2	25.0	51.5	
酸素摂取量 $\dot{V}_{O_2}$ (l/min)	Continuous	1.01	1.36	1.77	1.64	1.84	1.71	1.82	1.85	1.92	1.77	
	Inspi. Holding	0.65	1.82	1.14	2.31	1.18	2.36	1.43	2.42	1.30	2.37	
	Expi. Holding	0.70	1.67	1.29	2.20	1.25	2.32	1.31	2.47	1.24	2.38	
酸素摂取率 $O_2rem.$ (%)	Continuous	3.32	5.12	4.26	5.01	4.27	5.16	4.22	5.00	4.31	4.96	
	Inspi. Holding	3.39	5.89	5.54	5.55	5.49	5.33	5.68	5.25	5.81	5.33	
	Expi. Holding	3.58	6.00	5.19	4.93	5.09	4.67	5.09	4.88	4.94	4.73	
心拍数 HR (beats/min)	Continuous	130	120	134	129	135	131	141	137	145	138	144
	Inspi. Holding	132	123	138	133	145	138	149	140	151	144	153
	Expi. Holding	137	126	139	137	148	143	152	147	152	148	155
平均動脈圧 MAP (mm Hg)	Continuous	99	81	108	88	112	99	108	96	117	95	109
	Inspi. Holding	97	99	116	106	120	103	119	99	115	105	124
	Expi. Holding	114	98	136	107	138	113	138	115	147	113	145

E: Exercise R: Rest ) : p<0.05 Inspi. Holding: 吸気位制限 Expi. Holding: 呼気位制限

表2 連続呼吸と制限呼吸の比較—II (平均値)

Item	Breathing	1		3		5		7		9		10
		E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	
動脈血酸素分圧 PaO <sub>2</sub> (mm Hg)	Continuous	113.1	88.1	107.1	100.9	107.6	97.0	105.2	98.6	103.7	99.2	106.8
	Inspi. Holding	95.7	87.9	90.8	100.6	88.3	103.2	87.4	104.5	85.6	101.6	81.4
	Expi. Holding	75.5	89.3	68.4	104.3	68.1	106.2	71.4	102.2	67.1	102.9	64.3
動脈血酸素飽和度 SaO <sub>2</sub> (%)	Continuous	96.6	95.7	96.6	96.5	96.8	96.1	96.6	96.1	96.4	96.4	96.7
	Inspi. Holding	95.0	95.6	95.5	96.5	95.1	96.6	95.1	96.7	94.6	96.6	94.0
	Expi. Holding	93.3	95.6	91.2	96.5	90.4	96.7	88.8	96.6	89.6	96.5	87.7
動脈血炭酸ガス分圧 PaCO <sub>2</sub> (mm Hg)	Continuous	36.5	43.0	38.3	42.7	37.7	42.5	38.1	41.1	37.3	40.7	36.3
	Inspi. Holding	40.5	43.4	45.7	43.5	46.1	42.1	45.6	41.6	45.1	41.6	45.9
	Expi. Holding	42.0	42.4	48.0	41.5	48.8	41.2	48.7	41.3	49.7	41.1	49.9
水素指数 pH	Continuous	7.42	7.35	7.37	7.33	7.37	7.32	7.36	7.32	7.35	7.33	7.36
	Inspi. Holding	7.37	7.34	7.31	7.32	7.30	7.32	7.30	7.32	7.30	7.31	7.29
	Expi. Holding	7.38	7.34	7.30	7.33	7.28	7.32	7.27	7.31	7.26	7.31	7.26
細胞外液の過剰塩基 Ecf-BE (mEq/l)	Continuous	-1.2	-1.5	-2.8	-3.3	-3.6	-3.8	-3.8	-4.0	-4.4	-4.0	-4.4
	Inspi. Holding	-1.9	-2.1	-2.4	-3.1	-3.9	-3.4	-3.4	-4.3	-3.7	-4.7	-3.7
	Expi. Holding	-0.5	-2.2	-3.7	-2.9	-4.2	-4.2	-3.7	-4.7	-3.6	-5.1	-3.6
血中乳酸濃度 LA (mmol/l)	Continuous	1.41		1.29		1.48		1.86		2.01		2.03
	Inspi. Holding	1.20		1.62		2.03		2.19		2.06		2.10
	Expi. Holding	1.41		1.66		1.98		2.15		2.37		2.46
肺胞酸素分圧 PAO <sub>2</sub> (mm Hg)	Continuous	116.2		109.9		110.7		111.8		111.3		
	Inspi. Holding	106.7		102.7		103.4		103.4		103.6		
	Expi. Holding	105.0		97.5		100.0		101.4		99.8		
平均肺胞- 動脈血酸素較差 A-aDO <sub>2</sub> (mm Hg)	Continuous	7.7		12.2		6.4		10.6		10.1		
	Inspi. Holding	6.8		13.3		9.0		8.1		8.4		
	Expi. Holding	15.2		19.4		13.8		12.6		15.1		

E : Exercise R : Rest ) : p < 0.05 Inspi. Holding : 吸気位制限 Expi. Holding : 呼気位制限

には有意差を認められなかった。しかし、細胞外液の過剰塩基とみなす値においては、運動時、休息時共に有意差が存在しなかった。

血中乳酸濃度は、運動中のみに関して測定したが、いずれも3者間に有意差を認めなかった。

肺胞酸素分圧は、運動時、連続呼吸で最も高く、次いで吸気位制限呼吸が高く、呼気位制限呼吸では低値を示した。平均肺胞—動脈血酸素較差は、運動時、呼気位制限呼吸で高値を示す傾向がうかがえるが、全体として、今回の範囲内では確たる差異が存在しなかった。

### 考 察

Holmer ら<sup>3)</sup> は、水泳中の制限呼吸における低換気と酸素摂取量の減少を報告しているが、Dicker ら<sup>4)</sup> は、同様に低換気は認めながらも、酸素摂取量は不変であったと述べている。

本研究においては、換気量は制限呼吸2者において少なく、休息時には代償的に増大し、酸素摂取量は、運動中、制限呼吸2者で低値を示したが、各回の運動時と休息時との平均では3者間に有意差が認められず、制限呼吸における休息時の代償的換気増大により全体としてはほぼ同量の酸素が消費されたことを意味している。

吸気位呼吸制限と呼気位呼吸制限との比較では、後者の肺容量減少状態での運動負荷が動脈血ガス分析の結果にあらわれているが、連続呼吸における動脈血炭酸ガス分圧が、休息時より運動時に低値を示す傾向が存したのは、1秒ずつの呼吸、吸気、つまり30回/分の呼吸が、やや過呼吸状態を招来したものと考えられる。

今回の運動負荷強度においては、心拍数は、130~150/分であり、中等度の負荷であり、更に高度の負荷における検討が望まれるが、中等度の

負荷により、吸気位呼吸制限では酸素摂取率の増大が特に1単位の後半に強く認められ、また、呼気位呼吸制限においては、心拍数は他の2者と差異を認めないままに、平均動脈圧の上昇が著明であった。

血中乳酸濃度は、全体に、1単位の負荷の経過に伴って増大してゆく傾向が存するが、連続呼吸と制限呼吸との間には、今回の負荷の程度では有意差を認めることができなかつた。水素指数に関しては、運動時、その経過と共に低下する傾向があり、連続呼吸に比べて制限呼吸において動脈血炭酸ガス濃度上昇に起因する水素指数の低下が明白であった。細胞外液の過剰塩基は、運動負荷のくり返しと共に減少している傾向が認められるが、呼吸の差による3者間の有意差は認められなかつた。

#### 総 括

自転車エルゴメータによる中等度の運動負荷くり返しにより、連続呼吸、吸気位制限呼吸、呼気位制限呼吸の3者による差異を検討した。

連続呼吸に比較し、制限呼吸では、動脈血酸素分圧低下、動脈血炭酸ガス分圧上昇が明らかであり、これらに起因する諸種の変化が認められたが、心拍数、細胞外液の過剰塩基血中乳酸濃度で

は、今回の範囲では、統計学的有意差が全く認められなかつた。

呼吸制限による水泳練習の効果については、まだ確たる理論的裏付けがなされていないが、今回の研究を更に拡大、継続することにより、呼吸制限の運動生理を明確にしてゆくことがこれからの課題である。

一方、呼吸制限による運動負荷が招来する生理学的反応を十分理解して実際の練習に活用することも重要な課題である。

#### 文 献

- 1) Siggaard-Andersen, O.; Blood acid-base alignment nomogram, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **15**: 211—217 (1963)
- 2) Davis, J.A. et al.; The relation of ventilation to metabolic rate during moderate exercise in man, *Europ. J. Appl. Physiol.*, **44**: 97—108 (1980)
- 3) Holmer, I. et al.; Physiological responses to swimming with a controlled frequency of breathing, *Scand. J. Sports Sci.*, **2**(1): 1—6 (1980)
- 4) Dicker, S.G. et al.; Respiratory and heart rate responses to tethered controlled frequency breathing Swimming, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **12**(1): 20—23 (1980)