

●原 著

高気圧作業用呼吸保護具に関する研究

小林 浩* 梨本一郎*

Studies of respiratory protective equipment for emergency use in compressed air work -with special reference to a semi-closed circuit system-

Respiratory protective equipment (RPEQ) is must be kept in confined construction sites such as tunnels to ensure the safe escape of workers or to go to their rescue in case of a fire, explosion or toxic gas spouting. An open circuit SCBA (self-contained breathing apparatus) system using air or a closed circuit system using pure oxygen is widely utilized at 1ATA. Both systems are, however, strictly limited in compressed air work, because air SCBA allows short breathing time and oxygen SCBA can lead to oxygen poisoning due to the high level of oxygen partial pressures. We have developed and tested a semi-closed circuit SCBA system using nitrogen-oxygen mixtures which can keep sufficient breathing time and prevent oxygen poisoning under high pressure atmospheres. Experiments were carried out using the semi-closed circuit SCBA with 2 to 5 subjects at rest or on exercise at 1-5 ATA in a hyperbaric chamber or compressed air construction sites. During the experiments partial pressure of oxygen and carbon dioxide of inspired gas (P_{iO_2} and P_{iCO_2}), respiratory minute volume (\dot{V}_E), oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) were measured. Maximum P_{iO_2} was 1.71 kg/cm² at rest at 5 ATA, while maximum P_{iCO_2} was 0.006 kg/cm². These values had no fear of oxygen poisoning or carbon dioxide retention. HRs were within normal limits. P_{iO_2} was, however, below 0.21 kg/cm² in case of heavy work ($\dot{V}O_2 = 2.51/\text{min}$) at 1ATA.

はじめに

圧気潜函や圧気シールドなどの高気圧環境の作業中に生じた火災事故、酸欠事故そして有毒ガス発生等の非常の際、安全な場所への避難や、作業室に取り残された作業者の救出のためには呼吸保護具が必要不可欠となる。しかしながら、現在大気圧下で一般的に使用されている携行型呼吸保護具は、圧縮空気呼吸器、循環式酸素呼吸器そして酸素発生形循環式酸素呼吸器など¹⁾であるが、高圧下における使用に際しては、気圧の上昇により使用可能時間の短縮、また酸素分圧の上昇による酸素中毒²⁾の危険性のためにいずれの方式も実用には供せない。こうした欠点を除くため著者らは、高圧下で約1時間以上使用でき、しかも酸素中毒を起こす恐れがない組成の窒素、酸素の混合ガスを呼吸ガスとして用いた半閉鎖循環方式の呼吸保護具の試作を行い、大気圧下と高気圧下において運動負荷に自転車エルゴメータやトレッドミル³⁾⁴⁾を用いた基礎実験を、さらに潜函やシールドの実際の作業場にて試用テストを行い、これらの実験結果から多くの知見を得たので報告する。

実験方法

(装置および測定器)

1. 呼吸保護具：試作を行った半閉鎖循環式呼吸保護具（以下呼吸保護具）は、最高圧力下での安静時の酸素分圧の上昇と、大気圧下での労作時の酸素分圧の低下を考慮して、使用する環境圧の範囲により呼吸ガスを2種類の組成にして2機種試作した。呼吸ガスの組成割合は大気圧から3ATAまでの環境圧においては、(I)60%

*埼玉医科大学衛生学教室

表1 Various experimental conditions of testing the semi-closed breathing apparatus (SCBA).

Experimental condition	Ambient pressure (ATA)	Experimental environment	Type of exercise	Type of SCBA	Subject number
A	1.0	Hyperbaric chamber	Bicycle ergometer (300~600 kpm/min)	(I)	4
B	3.0				5
C	1.0	Hyperbaric chamber	Bicycle ergometer (600 kpm/min)	(II)	3
D	4.0				4
E	5.0				3
F	3.0	Pneumatic caisson	Walking (3.5 km/h)	(I)	2
G	1.0	Indoors	Walking (90 m/min, $\theta=0\sim 8^\circ$)	(I)	2
H	1.0	Compressed air tunnel	Going up and down steps, Walking (6km/h)	(I)	3

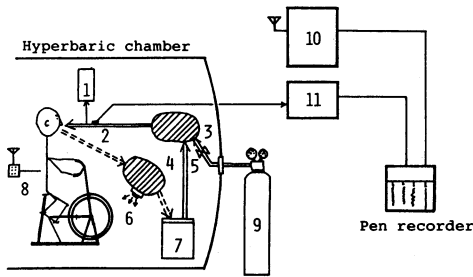


図1 Schematic diagram of the experiment.

1. CO₂ analyzer, 2. Oxygen sensor, 3. Inspiration bag, 4. Expiration bag, 5. Orifice, 6. Relief valve, 7. CO₂ removal canister, 8. HR monitor transmitter, 9. O₂-N₂ compressed premixed gas, 10. HR monitor receiving unit, 11. Oxygen monitor.

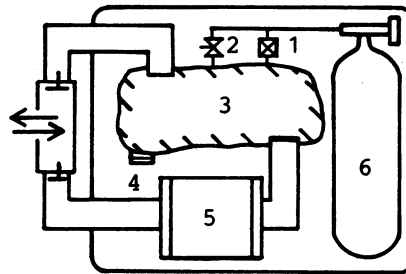


図2 Circuit diagram of the semi-closed breathing apparatus.

1. Orifice, 2. Bypass valve, 3. Breathing bag, 4. Relief valve, 5. CO₂ removal canister, 6. O₂-N₂.
 SCBA-I : 60%O₂-40%N₂, 4 l/min.
 SCBA-II : 40%O₂-60%N₂, 8 l/min.

酸素-40%窒素, 大気圧から5ATAにおいては, (II) 40%酸素-60%窒素の混合ガスとし, オリフィスにより環境圧力の変化にかかわらず一定の量が呼吸バッグに送気され, その流量は (I) の呼吸ガスにあっては毎分4 l, (II) では毎分8 lとした。呼吸保護具の構造は, 図1, 2に示すように炭酸ガス吸収剤(ソーダライム)により炭酸ガスを除去した呼気の一部を, ポンベからの新鮮ガスに加え, これを吸気として用

いることにより供給ガスの消費の節約をはかり, 呼吸バッグ内の過剰なガスはリリース弁(排気圧2-4cm H₂O)から排気される仕組みとなっている。初期の実験では図1のように呼吸バッグを, 呼気と吸気の2つのバッグに分けていたが, 最終的には図2のように呼気と吸気を一緒にした呼吸バッグの方式にして実験を行った。

2. 自転車エルゴメータ (Monark 社製)
3. トレッドミル (西川鉄工所製)
4. 酸素分圧分析計: ガルバノ式酸素濃度計 (バイオマリーン社製 OA-202R 型)
5. 炭酸ガス分析計: 赤外式炭酸ガス分析計 (理

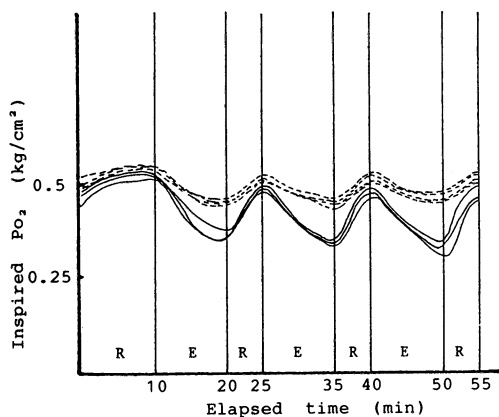


図3 Changes in inspired PO_2 of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-I) during rest and exercise at 1 ATA.

--- Rest and exercise (300 kpm/min)
— Rest and exercise (600 kpm/min)
R : Rest, E : Exercise.

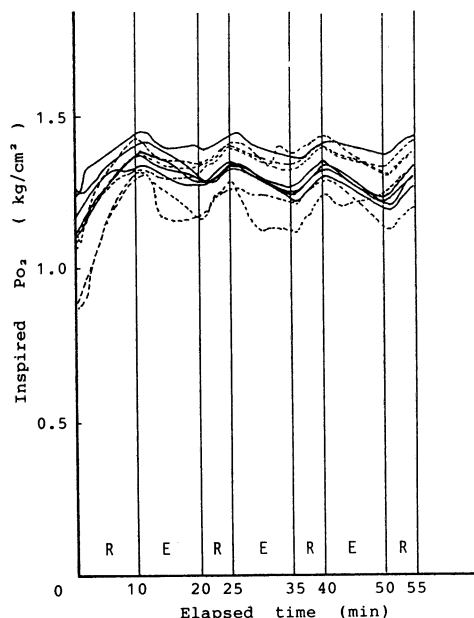


図4 Changes in inspired PO_2 of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-I) during rest and exercise at 3 ATA.

--- Rest and exercise (300 kpm/min)
— Rest and exercise (450 kpm/min)
R : Rest, E : Exercise.

研計器製 R1-550 型), 北川式検知管

- 心拍数測定器: 医用テレメータ (三栄測器 276 型), 携帯型心拍メモリ (VINE 社製)
- 酸素消費量計: Autoaerobics R-1500S (アーマ社製), オキシログ (Morgan 社製)

(方法)

実験は, 表 1 に示す条件下において下記に記す実験方法で行った。

(実験 1)

高圧タンクにおける実験 (表 1: 実験条件 A ~ E) は, 呼吸保護具が大気圧, 高気圧の両条件下における安静時と労作時でも酸素不足, 酸素中毒, 炭酸ガス中毒の危険を惹起する恐れがないかを調べるために吸気ガスの酸素分圧の面からテストを行った。実験を行った環境圧力の条件は, (I) の呼吸ガスの呼吸保護具では大気圧から 3 ATA, (II) の呼吸ガスの呼吸保護具では大気圧から 5ATA であった。被験者 (健康成人男子: 総計 7 名) に対する運動負荷としては, 自転車エルゴメータを用いて行った。負荷のパターンは, 坐位での安静状態で 10 分間経過した後に 300, 450 もしくは 600kpm/min のいずれかの運動負荷量で 10 分間, 続いて 5 分間の安静の繰り返しを 3 回行い合計 55 分間にわたり行った。しかしながら, 5ATA

では減圧症の危険を回避するために 10 分間の安静のみとして実験を行った。この時に, 呼吸保護具の循環回路中の吸気側に, 酸素分圧を測定するための酸素センサと, 炭酸ガス分圧を測定するためのガス吸引管を取り付けて, それぞれの測定を行った。さらに被験者の状態を監視するために, 医用テレメータにより心拍数を測定した。

(実験 2)

高圧タンクでの実験 1 で得られた実験結果が, 実際の潜函作業場における労作状態でも同様な結果となるかを調べるために, 環境圧 3ATA の圧気潜函 (表 1: 実験条件 F) にて, 被験者が呼吸保護具 (I) を装着して歩行するフィールドテストを行った。面積が約 20m × 20m の潜函作業室内で, 被験者は 10 分間坐位安静の後に時速約 3.5km の歩行速度で 10 分間の歩行, 続いて 5 分間の安静を繰り返すパターンを 2 回, 合計 40 分間にわたり呼吸保護具の吸気酸素分圧の測定を行った。測定は呼吸保護具の吸気側に酸素センサを取り付け,

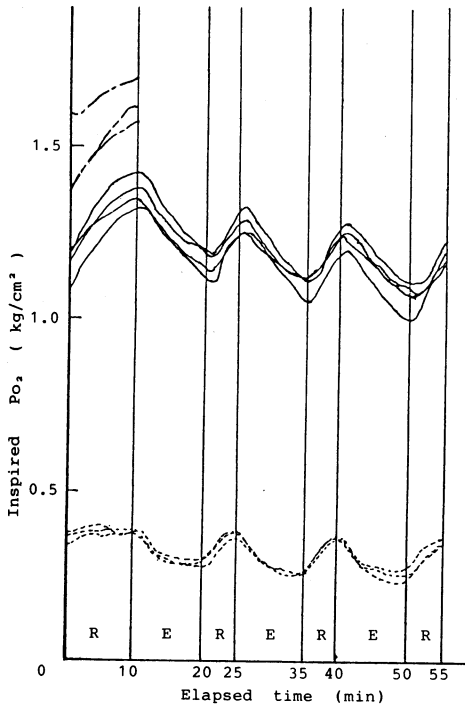


図5 Changes in inspired PO_2 of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-II) during rest and exercise at 1-5ATA in a hyperbaric chamber.
 Rest and exercise at 1 ATA.
 —— Rest and exercise at 4 ATA.
 --- Rest at 5 ATA.
 R : Rest, E : Exercise (600 kpm/min).

その信号と被験者の心拍数を携帯型カセットデータレコーダに記録する方法で行い、実験後再生して解析を行った。

(実験3)

歩行の際の呼吸保護具装着時の荷重負荷による酸素摂取量の増加傾向と、高い酸素摂取量 (2l/min) が呼吸保護具の吸気酸素分圧の変動にどの程度影響するかを調べるために、大気圧下においてトレッドミルを用いて非装着時と装着時の酸素摂取量の測定および酸素摂取量 2l/min 時の吸気酸素分圧の測定を行って比較検討した (表1: 実験条件G)。はじめに、被験者 (2名) の無負荷重の状態の酸素摂取量を測定するために、呼吸保護具を装着せずにトレッドミルの走行速度を90m/

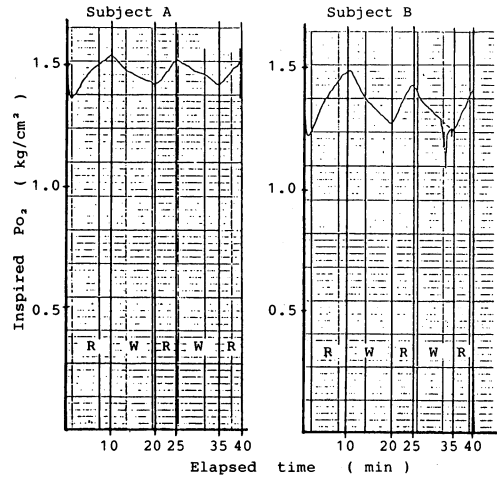


図6 Changes in inspired PO_2 of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-I) during rest and walk at 3 ATA in a pneumatic caisson. R : Rest, W : Walk.

minと一定にして斜度を3分間ごとに2°ずつ傾斜させて運動負荷量を増加させて12~15分間、次に呼吸保護具 (重量 16kg) を装着し同様の方法により酸素摂取量の測定を行った。この時に被験者は、フルフェースマスクにより呼気のみを酸素摂取量測定器を導入し測定を行い、同時に医用テレメータにより心拍数を測定した。次に呼吸ガス (I) の呼吸保護具により呼吸を行い、さきに求められた酸素摂取量 2l/min の条件をトレッドミルに設定して、被験者をトレッドミル上で立位安静後走行させて呼吸保護具の吸気酸素分圧と被験者の心拍数を16~19分間測定した。

(実験4)

実際の作業場の階段昇降や歩行などの労作時の酸素摂取量が、実験3で得られた実験結果と比較して差異があるかを調べるためにシールド作業場において実験 (表1: 実験条件H) を行った。作業場 (大気圧) は、斜めの階段を設置した深さ 29m の立抗と直径 10m の水平トンネルからなっている。実験はこの立抗の上部より階段を降下、トンネルの 456m 地点で折り返して元の地点まで上昇するという条件で行った。被験者 (3名) は、重量 16kg の呼吸保護具を荷重負荷として背負い携行型の酸素消費量計のマスクを介して空気呼吸を

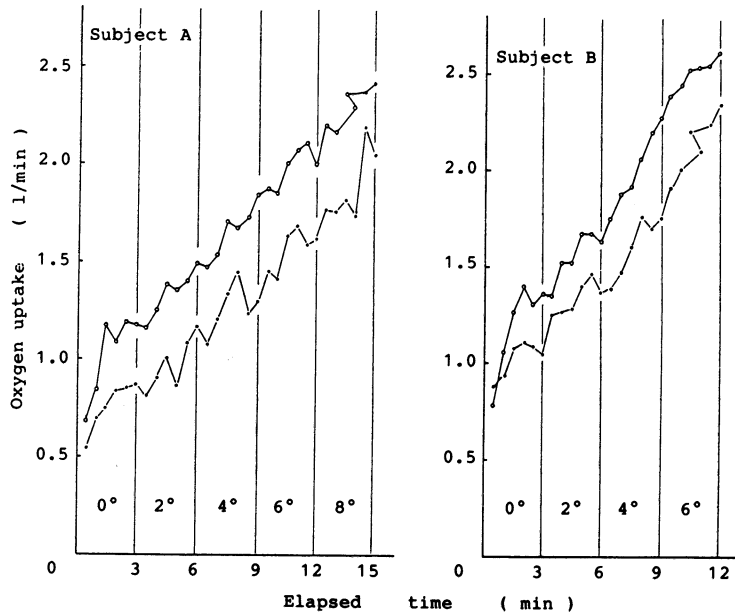


図7 Changes in increase of oxygen uptake in relation to the intensity of exercise (walking).
 —○ : Wearing breathing apparatus on subject's back,
 —● : Control.

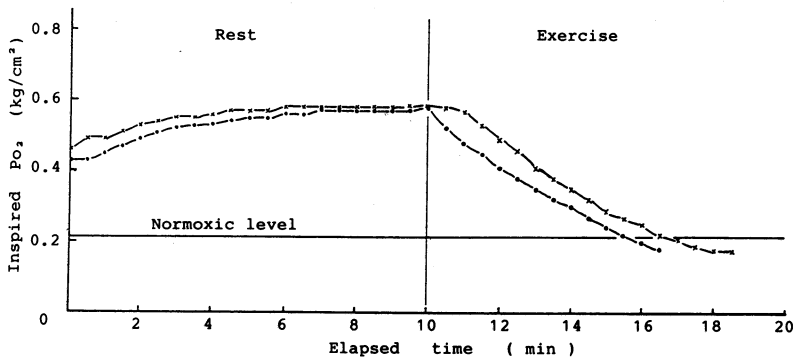


図8 A decrease of inspired PO_2 of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-I) during exercise ($\dot{V}O_2=2$ l/min).
 —x— : Subject A, —● : Subject B.

行い、酸素摂取量と分時換気量の測定と同時に心拍計メモリにより心拍数の計測を行いながら、さきのコースを歩行した。次に、被験者の呼吸を呼吸保護具 (I) を用いた混合ガス呼吸に変えて、同一条件下のコースを歩行して吸気側に取り付け

た酸素センサにより吸気酸素分圧の変化を測定した。それぞれの測定器により得られたデータは、小型デジタルデータメモリに記憶させて、実験後パーソナルコンピュータに転送して解析を行った。

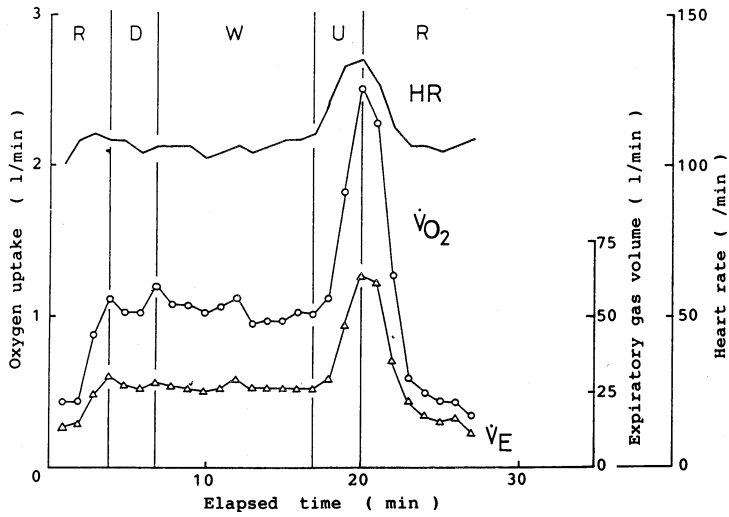


図9 Changes in oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), expiratory gas volume (\dot{V}_E) and heart rate (HR) during rest and exercise at 1 ATA.
 R : Rest, D : Going down steps, W : Walk, U : Going up steps.

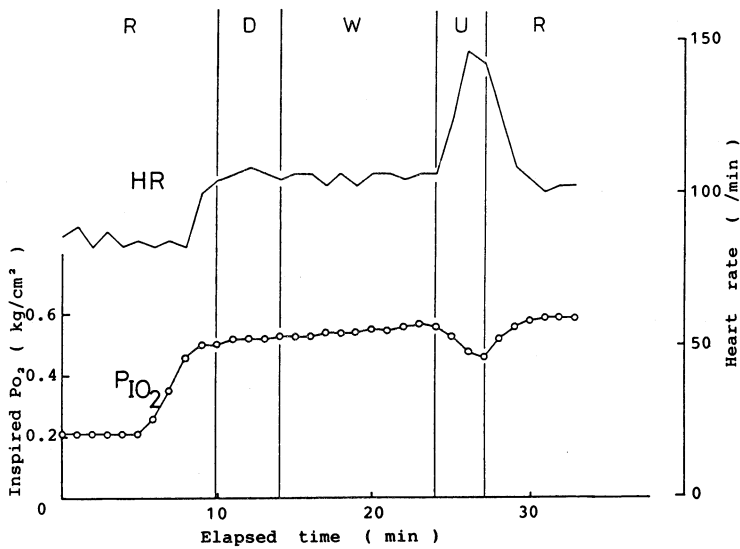


図10 Changes in inspired PO_2 and heart rate of the semi-closed breathing apparatus (SCBA-1) during rest and exercise at 1 ATA.
 R : Rest, D : Going down steps, W : Walk, U : Going up steps.

表2 Maximum and minimum P_{IO_2} , and maximum P_{ICO_2} during the use of the semi-closed breathing apparatus (SCBA) at various ambient pressures.

Experimental condition	Ambient pressure (ATA)	Maximum P_{IO_2} (kg/cm ²)	Minimum P_{IO_2} (kg/cm ²)	Maximum P_{ICO_2} (kg/cm ²)
A	1.0	0.56	0.3	0
B	3.0	1.44	1.12	0.006
C	1.0	0.39	0.22	0.002
D	4.0	1.42	1.00	0.0015
E	5.0	1.71	—	0
F	3.0	1.53	1.25	—
G	1.0	0.58	0.21	—
H	1.0	0.58	0.46	—

結 果

(実験1)

高圧タンクにおいて、環境圧が大気圧と3ATA(表1:実験条件A, B)での吸気酸素分圧の測定結果は図3, 4に示すごとくであった。大気圧下での運動負荷時(600kpm/min)に測定された最低吸気酸素分圧は0.3kg/cm²、安静時に測定された最大吸気酸素分圧は1.4kg/cm²であった。また吸気の炭酸ガス分圧は、両条件ともに0kg/cm²であった。次に、環境圧が大気圧、4ATAおよび5ATA(表1:実験条件C, D, E)での吸気酸素分圧の測定結果を図5に示す。大気圧下での最低吸気酸素分圧は0.22kg/cm²、最大吸気酸素分圧は5ATAの時に1.71kg/cm²であり、吸気炭酸ガス分圧は最大0.002kg/cm²であった。

(実験2)

3ATAの圧気潜函作業室内での安静時と、歩行運動時の呼吸保護具の吸気酸素分圧の推移の測定結果を図6に示す。この時の運動負荷量は、自転車エルゴメータに換算すると約300kpm/minに相当し、測定された吸気酸素分圧の値は最大1.53kg/cm²であった。

(実験3)

酸素摂取量は図7に示すようにトレッドミルの斜度の上昇に伴って上昇し、荷重負荷時の酸素摂取量が、約2l/minになる斜度が被験者Aでは6°

被験者Bでは4°であった。

荷重負荷の有無により酸素摂取量にして約0.3l/minの差がみとめられた。また荷重負荷時における心拍数は、最大192/min(被験者B)であった。次に行った呼吸保護具の吸気酸素分圧の推移は、図8に示すように立位安静時には酸素分圧が上昇をたどり走行とともに下降し、約6~7分間に大気圧レベル(0.21kg/cm²)以下に減少することが被験者A, B両者ともに認められた。この時の心拍数は最大181/minとなり、さらに吸気温度に関しては体温をはるかに越える45℃が観測された。

(実験4)

シールド作業場での3名の被験者の酸素摂取量、換気量および心拍数の各測定値は階段上昇時、歩行時ともに差異は少なく最大 $\dot{V}O_2=1.2$ l/min, $\dot{V}E=28$ l/min, HR=118/minであった。しかしながら階段上昇時には酸素摂取量、換気量ともに降下、歩行時の2倍以上に増加して最大値は $\dot{V}O_2=2.5$ l/min, $\dot{V}E=63$ l/minとなった。またこの時の心拍数は174/minであった。これらの各測定値の推移の代表的な例を図9(被験者A)に示す。次に、同じ条件下での同一被験者の呼吸保護具の吸気酸素分圧、心拍数の推移を図10に示す。この時の呼吸保護具の吸気酸素分圧の最低値は階段上昇時に認められ0.46kg/cm²であった。心拍数は同様に階段上昇時に、146/minであった。

以上の4種類の実験結果を表2に示す。

考 察

高圧タンクにおける1ATAから5ATAまでの各環境圧力下での実験の結果、吸気酸素分圧の各測定値は、酸素中毒の閾値²⁾とされる値 $P_{iO_2} = 2\text{kg/cm}^2$ よりも低い値が観測されたので、中等度 ($\dot{V}O_2 = 1.5\text{l/min}$) の運動負荷での本呼吸保護具の使用は酸素中毒の危険性が少ないことが確認され、さらに、大気圧下での吸気酸素分圧の測定値においては、酸素不足にならずに使用可能なことが知られた。しかしながら、大気圧下でトレッドミル法により酸素摂取量が 2l/min 以上と、運動負荷量の高い条件では、吸気の酸素分圧が運動開始後、数分で 0.21kg/cm^2 以下に低下してしまったので、酸素不足を回避するために、送気流量を増加せしめ、酸素摂取量が増大しても対応できるように対策を講じなければならないことが知られた。

一方、吸気の炭酸ガス分圧の測定値は、各実験で最大 0.006kg/cm^2 であったので炭酸ガス中毒の危険なく1時間程度の使用が可能であることが知られたが、吸収剤は機能上、炭酸ガスの吸収過程で発熱するために、運動負荷量の増加により呼吸数が増えるとともに温度が上昇して呼吸が困難となる傾向があり、炭酸ガス吸収キャニスターの改良が必要であることが認められた。

トレッドミル法は、自転車エルゴメータを用いた実験方法よりも高い酸素摂取量が得られ⁵⁾ さらに後者では測定不可能な荷重負荷の影響を知ることが可能であるので、実験を行ったが、呼吸保護具の装着の有無により酸素摂取量にして約 0.3l/min の差がみられた。

そこで、呼吸保護具自体の重量は、いたずらに重くせず、装着者の酸素摂取量を減少させる目的で軽量化を図る必要が知られた。

以上の実験結果から、圧気シールドでの半閉鎖循環式呼吸保護具の使用に関しては危険はないが、労作が大となるような作業における酸素摂取量が高い ($\dot{V}O_2 = 2\text{kg/cm}^2$ 以上) 状態での使用条件では、多少の危険が懸念された。

さらに、呼吸保護具自体の構造が複雑なために、メンテナンスを怠り、炭酸ガス吸収剤の交換をせずに使用したり、呼吸ガスの種類を誤ったりした場合には重大な事故の招来が予想される。

謝 辞

呼吸保護具の試作に際して、快く引き受けて頂いた銚旭潜研社長佐藤賢俊氏、技術面で終始ご協力して下さいました同社技術部河野道茂、平野昭夫両氏に深謝いたします。また混合ガスを提供して下さいました、テイサン銚石黒信雄、本山雄策両氏、実験に際してトレッドミルを借用、実験に協力していただいた東京大学数養学部福永哲夫助教授にも感謝いたします。さらに、作業場の実験に際して場所を提供していただいた鹿島建設、協和電設両社にも感謝いたします。

〔参 考 文 献〕

- 1) 房村信雄：酸素呼吸器・空気呼吸器，新労働衛生ハンドブック(三浦豊彦編著)，P.391-396，労働科学研究所，川崎，1974。
- 2) Shilling, C.W. et al: Man in the Ocean Environment; Physiological Factors, The Underwater Handbook, Plenum Press, New York, 1976.
- 3) Astrand, P.O. and Rodahl, K.: Textbook of Work Physiology, McGraw-Hill, New York, 1970.
- 4) 鵜飼道夫編著：身体運動の生理学，杏林書院，東京，1973。
- 5) 宮村実晴：呼吸と運動，臨床呼吸生理学(本田良行編集)，P.105-130，真興交易医書出版部，東京，1972。