

呼吸曲線および心搏数よりみた圧力変動 の人体におよぼす影響について

自衛隊航空医学実験隊 (隊長 大島正光博士)

三 輪 美 津

(受付 昭和 35 年 4 月 14 日)

A 序 言

大気圧の継続的な、かつ繰返される変動の生体におよぼす影響は、航空機搭乗のパイロットのみならず、シノルケル型潜水艦内の作業員にとつても重大な意味をもつことは明らかである。すでに当隊において、高度 0m~3,000m におよぶ間の急激な圧力変動がウサギの血液学的所見におよぼす影響について実験し、その負荷の影響をみた。今回は人体におよぼす影響について、呼吸曲線および心電図を用いて観察した。

B 実験条件および方法

I 圧力変動の方法について

圧力変動の実験装置として当隊の低圧室を使用した。この低圧室は容積が 27m³ であり真空ポンプの吸引力は 7.8m³/min である。圧力変動は第 1 図に示すようなパターンで行なつた。すなわち 720mm Hg (相当高度 450m) から 543mm Hg (相当高度 2,700m) の間の圧力変動をくりかえし行つた。760mm Hg にまで下降しなかつた理由は室内の換気を行なう必要があるので真空ポンプを作動したままにしたこと、760mm Hg 近くでは加圧速度かきわめて遅くなるためである。

720~543mm Hg までの減圧時間は 75 sec. に調節した。これは一応シノルケル潜水艦の実際の場合に条件を合わせたためである。この減圧および加圧の経過は高度計によつて読みとつたほかに、水銀圧力計にセットした浮子の圧力変動による上下の動きをカイモグラフに記録した。第 1 図がこの方法で記録したものである。

また、720~543 mmHg の中間の圧力は 632mmHg であつて、高度にして 1,500m に相当する。1,500m 以上の高度に要する時間は、減圧時約 38 sec., 下降時約 12sec. で合計 50sec. であり、1,500m 以下の高度に要す

る時間は休止期も含めて約 100sec. である。

このような減圧および加圧を 30min. にわたつて 10 回連続負荷し、ついで 720mm Hg の圧力で 15min. の間をおき、ふたたび 30min. の間かく、10 回の圧力変動を負荷した。したがつて圧力変動の回数は 1 hr. に合計 20 回負荷したことになる。

II 実験期間

8月24日~26日にいたる3日間であり、圧力変動の開始の時刻は毎日 13:00 であつた。

III 被験者

健康な大学生 6 名を被験者とし、生活条件に慣れさせるために、実験開始 3 日前に来隊せしめ、隊内に宿泊させるとともに、被験者はすべて同一の内容の食事を摂取させ、かつ生活の規制をある程度行つた。

IV 低圧室内の条件

低圧室内の温度は 28~29.5°C, 湿度は 69~72%, CO₂ は実験終時の測定値が 0.08% であつた。

V 検査項目および検査方法

被験者 6 名のうち 5 名の心電図および呼吸曲線を 2 現象心電計に同時連続記録した。

呼吸曲線のとり方は、ゴム管内に飽和硫酸亜鉛液をみだし、その両端に亜鉛の短棒をつけ、胸廓の乳房位に固定した。呼吸の際、ゴム管の伸縮の際の両亜鉛棒の距離の変化に応じて生ずる電気抵抗の変化をブリッジ回路の一端に生じさせ、心電計に導いて増巾した。

心電図は実験の前後に標準 3 誘導を採取し、実験期間中は第 2 誘導のみを呼吸曲線と同時に記録した。実験第 1 日においては 3 名 (被験者 E, N および M), 第 2 日においては 2 名 (被験者 S および U), 第 3 日においては 4 名 (被験者 N, M, S および U) を記録したが、記録

の有無にかかわらず、全被験者は3日間にわたって、同時に圧力変動は負荷されている。

VI 実験結果

1 心電図について

心電図所見において被験者1名(S)に期外収縮を認められたほかは異常を認めなかった。期外収縮がどの程度の割合に出ているものかを心搏数に対する割合で示すと第1表のようであった。

第1表 被験者Sの実験期間中における期外収縮発生率

区分日	圧力変動 負荷前	圧力変動	
		上昇中	下降中
対照日	2.2%		
実験第2日	11.1%	21.5%	18.0%
実験第3日	30.0%	22.2%	18.2%

被験者Sにおいては対照日においても、わずかながら期外収縮が認められている。対照としたものは実験終了後2日目の8月28日午後1時から、低圧室内において、真空ポンプを動作させることなく心電図および呼吸曲線をとつたものである。

第1表にみられるように対照日に比して、実験第2日、第3日ともに圧力変動の負荷前にすでに期外収縮がみられ、しかも実験第2日より第3日の方が高率に出

ている。圧力変動の減圧中と加圧中にわけてみたところでは、実験第2日、第3日ともに加圧中の方が期外収縮が少なくなっている。このような、かなりの頻度の期外収縮にもかかわらず自覚的な症状は訴えられなかった。

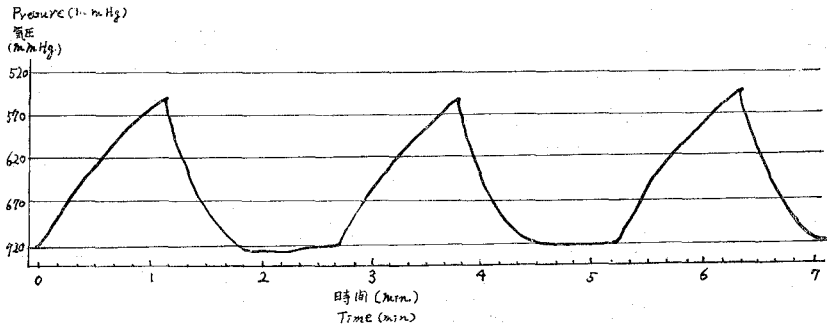
2 呼吸曲線について

呼吸曲線は正常人の安静時においても、つねに正常な曲線のみがみられるものではないが、対照日においても、異常型の出現率はかなり高く、そのうえ最低0%~最高66%にわたり、個人差が著明である。異常型の主なものは、(a) 吸気から呼気にうつる相の延長化による曲線の扁平化、(b) 吸気または呼気の短縮または延長、(c) 全体の小型化または大型化、(d) 多峯化、および(e) 全く不規則な曲線を示すものなどである。このような異常型の総出現率の変動を第2表にあげた。

第2表に示すように、異常型の出現率は飛行前にもつとも少なく、圧力変動期間中に増加し、飛行後ふたたび減少する。また下降時は上昇に比較して、異常型の出現率がいずれの例についても高くなっている。

負荷による異常型の種類の変化には一定の法則は認められないが、下降開始にともなつて呼吸曲線の変化が著明に出現する例が多く、呼気相の延長、短かい吸気、急激な呼気などの割合が上昇中に比較して多く認められる傾向がある。

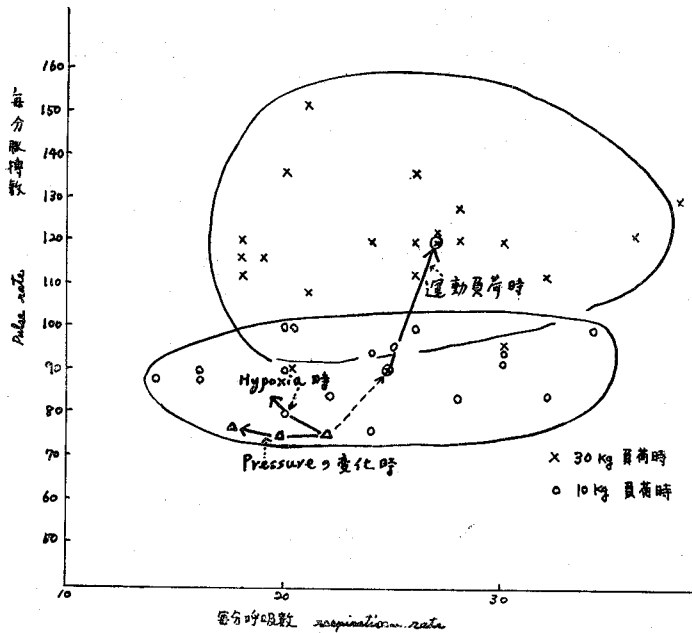
被験者Sにおいては、実験日の進むにつれて、吸気から呼気に移行する呼吸曲線の頂点部の扁平化および呼吸曲線の大型化の割合が多くなり、被験者Mにおいては第



第1図 圧力変動のパターン

第2表 呼吸曲線の異常頻度(%)

被験者	日	対照日	実験第1日				実験第2日			実験第3日			
			前	上昇中	下降中	後	前	上昇中	下降中	前	上昇中	下降中	
E	0	5	2	21	9								
N	66	10	42	91	20				14	11	53	46	
M	23	23	43	57	14				25	49	78	13	
S	15					8	8	0	0	15	14		
U	5					10	1	62	15	4	31		



第2図 自転車エルゴメーター負荷数の呼吸数と脈搏数との変化

3 実験日にいちぢるしい不規則性がみられた。他の3名の被験者には実験日による大きな差異は認められなかった。

3 呼吸数および心搏数について

今毎分の呼吸数および心搏数についての実験結果を示すと次のようである。

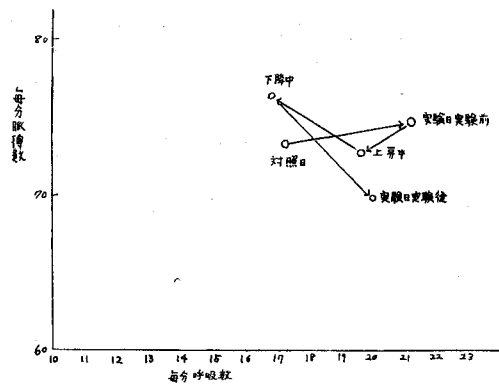
a 対照日と実験日との関係

今呼吸数について対照日と実験日の負荷前値とを比較すると第3表のようである。すなわちいずれも低圧負荷を行っていない状態であるにもかかわらず、対照日はいずれの被験者においても少なく、実験日においては多くなっている。これは実験を行うという予測が心理的に何らかの影響を与えているものと考えられる。

次に毎分心搏数についてみると第IV表のようである。これをみると呼吸数はすべての例において増加しているにもかかわらず、心搏数においては5例中1例において減少し、他の1例においては不変となっており、増加の

第3表 対照日と実験日負荷前値の平均毎分呼吸数との比較

被験者	対 照 日	実験日負荷前値の平均 (9件)	比率 (%)
E	23.0	28.3	124.0
N	9.7	17.8	183.5
M	18.2	19.0	104.4
S	11.8	13.7	116.1
U	23.1	27.3	118.2
平均	17.2	21.2	129.2



第3図 実験条件別の毎分の呼吸数と脈搏数との変化

第4表 対照日と実験日負荷前値の平均毎分脈搏数との比較

被験者	対 照 日	実験日負荷前値の平均 (9件)	比率 (%)
E	80	81	101.4
N	58	58	100.0
M	78	67	85.9
S	70	76	108.9
U	80	90	112.5
平均	73.2	74.4	101.7

度合もまた呼吸数のそれよりは小さい。

b 上昇中と下降中との比較

呼吸数についてみると第5表のようである。すなわち下降中は上昇中と比較して、いずれの被験者についても

第5表 上昇中と下降中の毎分呼吸数の比較

被験者	上昇中	下降中	比率 (%)
E	24.6	22.0	89.4
N	16.5	16.2	98.2
M	21.8	17.9	82.1
S	11.6	10.2	87.9
U	24.2	17.8	73.9
平均	19.7	16.8	86.3

呼吸数が減少している。これに対し心搏数は増加するものが多く、減少するものでもごくわずかである(第6表)。

第6表 毎分心搏数の上昇中と下降中との比較

被験者	上昇中	下降中	比率 (%)
E	78	86	110.3
N	53	54	101.9
M	71	72	101.4
S	79	77	97.4
U	87	93	106.9
平均	72.6	76.4	103.6

C 考 察

圧力変動が呼吸および循環機能にどのような変化をもたらすのであるかという点については従来文献があまり多くない。大島¹⁾はウサギについて急激な減圧および復圧のおよぼす影響について研究している。すなわち相当高度0m~10,000mに達するのに約8sec.の条件を、そして復圧には約4sec.を要する条件で実験を行い、次の結果を得ている。

1 Hypoxiaの影響をあらかじめ除く意味で60~80%の酸素吸入を行つた後、急減圧をすると、肺内ガス膨脹のために胸囲は増大した位置で呼吸が停止し、ついで陰性相を経て元の位置にもどる。その間E.C.G.では棘波の縮小が認められる。心搏数は多くの場合に不変である。

2 酸素吸入時10,000m相当高度から0mに急激に復圧すると、胸囲の位相は縮小した位置で呼吸が停止し、陰性相を経て元の位置にもどる。復圧開始直後に胸囲は一時増大するものが多い。また大島、嶋谷²⁾は低圧状態における呼吸状態を観察して、(a)呼吸数は、4,000m相当高度においてはやや増加すること。(b)呼吸深度は著変なく、むしろ低下を示していること。(c)分時呼吸量は4,000m相当高度においては著変なく、低下を示すものもあり、5,000m相当高度においてはチェーンストー

クス型呼吸を示すものがあることなどを報告している。また佐藤³⁾は急速減圧復圧を9,000m相当の低圧に1時間滞圧させた後、続いて高度13,700m相当の低圧(110mm Hg)まで急速減圧復圧をくりかえし(3分間で1回減圧復圧を行う)たウサギについて副腎アドレナリン含有量をみて、正常のウサギよりも非常に減少していることをみている。これは連続急速減圧復圧によつてアドレナリン分泌量が著しく増加した結果、アドレナリン分泌が著しく増加し、そのためアドレナリンの分泌が追いつかなくなったためであろうとしている。

また玉手⁴⁾は常圧下で低酸素状態における血圧および呼吸数の変動をウサギについて実験し、(a)高度6,000m相当の場合に(9.4~10.0%の酸素)吸入直後反射的に呼吸数が増加し、5分後を山として、25~30分後までは一時減少するけれども、それ以後はほとんど変化がなくそのままであること。高度8,000m相当の場合(7.3~7.7%の酸素)には吸入直後の反射的呼吸数増加は高度相当の場合よりも強く、その後一時呼吸数が減少することは高度6,000m相当の場合と同じであるが、30分後から漸次呼吸数が増加するのが異なるなどである。また福田⁵⁾らは求心性刺激が加わつた場合に刺激頻度が少ない場合と多い場合とで異なり、前者ではまず呼吸停止が起り、ついで小振幅頻度の呼吸が再来し、刺激中止後は振幅は恢復するが、頻度はしばらくは十分に旧には復せず、頻度呼吸が持続する傾向が強く、刺激頻度が大きい場合には、呼吸頻度が小となり、振幅はあまり変化はないが、一般に呼吸停止の傾向がみえる。刺激中緩徐となつていた呼吸は、刺激中止後すみやかに刺激前の状態にたちかえると報告している。また高木⁶⁾は低圧における呼吸運動の変化について実験し、マウスおよびモルモットの減圧時の呼吸変化は一般に人において観察された成績と一致し、呼吸数はあまり変化なく、振幅が大となり7,000~8,000m附近から呼吸は小さく速くなり、遂に吸息性の停止をきたすと述べている。また同じく高木⁷⁾は低圧における呼吸中枢の興奮性について実験し、呼吸中枢の反射興奮性は高度2,000~3,000mにおいては正常より高く、高度6,000~7,000mでは正常に近く、これより高度が増すといちぢるしく興奮性は減弱することをみている。

また中、山田⁸⁾は低圧時における脈搏動変動について検討を加え、高度3,000mおよび4,000mに5~10時間滞留の場合に、脈搏周期の平均値および標準偏差は地上での値と大差ないが、脈搏周期の律動的に出る小変動波、すなわち脈搏周期変動波の振幅および周期(一つの波を構成する脈数で示す)の平均値および標準偏差は滞留高度ならびに時間に依つてその値が大きくなつてことを認め、また第2次脈搏周期変動波すなわち大きな脈搏周期の変動波は高度3,000mでは地上と大差なく、

第VII表 圧力変動の呼吸運動におよぼす影響

a	上昇時肺内圧亢進	$\left\{ \begin{array}{l} \text{吸息—抑制—時間が長くなる} \\ \text{呼息—促進—時間が短くなる} \end{array} \right\}$	→呼吸リズムに対する影響—毎分呼吸数増加
			+低圧により毎分呼吸数減少 毎分呼吸数軽度減少
b	下降時肺内圧減少	$\left\{ \begin{array}{l} \text{吸息—促進—時間が短くなる} \\ \text{呼息—抑制—時間が長くなる} \end{array} \right\}$	→呼吸リズムに対する影響—毎分呼吸数減少
			+低圧による毎分呼吸数の減少 毎分呼吸数の減少

高度4,000m 滞留5時間で著明に出現しているという。

呼吸と心搏数との関係について

呼吸と心搏数とが圧力変動によつてどのように変化するかについて考察する前に、負荷する条件によつて呼吸と心搏数とがどのように変化するかを少しく概観してみたい。

a 筋労作負荷時の変化について

大島によれば筋労作負荷時には脈搏数の増加をきたし、呼吸数もわずか増加することが示されている。もちろん吸気量の増加が大きく、それに反して呼吸数の増加はわずかである。

b Hypoxia 時の変化について

大島によれば hypoxia 作用数には脈搏数は増加するが、呼吸数は3km 相当高度までは減少し tidal volume もそれに従つて減少しているが、4km 以上では tidal volume の増加に従つて、呼吸数がわずか減少することがうかがえる。

今回の実験の際の圧力変化数の変化をみると、脈搏数の変化はきわめてわずかであるは対して、呼吸数の減少は割合著明である。平均値についてそれを示すと第2, 3図のようである。従来低圧の呼吸におよぼす影響については、ガス交換の問題が主として重要視されて肺内圧の変化についてはあまり重要視されなかつたきらいがある。呼吸生理において、肺迷走神経が機械的に刺激を受け、それが呼吸運動の発現に一役をかつていることが Hering-Breuer の反射として知られている。今、割合急激な圧加変動があつた場合に、正常の呼吸運動の場合の肺内圧の変動が変化をうけることは当然のことである。このための肺内圧の変動が呼吸のリズムにどのような影響をうけるものであるかを分析してみることにする。この実験の場合の圧力変動は、圧力変動速度が一様であるとした場合に上昇が毎秒2.13mm Hg、下降が毎秒3.91mm Hg に相当する。このような圧力変動が急激の場合には、前に大島が家兎について実験した成績のように、上昇時には吸息位で呼吸が停止し、下降時には呼息位で呼吸が停止する。今回の実験の場合にはそれと比較して、それ程急激な圧力変動ではないが、上昇時には氣道抵抗のために外氣と比較して肺内圧の亢進をきたし、下降時には外氣と比較して肺内圧の低下をきたすことが考え

られる。このような肺内圧の増加および低下は、Hering-Breuer の反射に影響をおよぼして表VIIに示すような結果となる。すなわち上昇時には肺内圧の亢進をきたし、これは吸時に生ずる肺内圧の陰圧の程度を減少させ、吸息はそれを補償するために吸息時間の延長をもつて対処し、これに反して呼息時に生ずる肺内陰圧の程度を増大させ呼息はそれを補償するために呼息時間の延長をもつて対処する。一般に人体の呼吸運動の吸息時間よりも呼息時間の方が長いために、圧力変動の影響も呼息時間の延長の方が吸息時間の短縮よりも影響が大きく、そのために呼吸リズムに対する影響は毎分呼吸数の増加となつてあらわれる。ところが前に大島らの実験にもあるように軽度の低圧負荷によつて、毎分呼吸数は減少することをみている。この条件を考慮すると、結果的に出ている毎分の呼吸数の軽度の減少はこの圧力変動と低圧そのものの2つの条件の加味されたものと考えられることができる。

これに反して下降時には上昇時と反対の影響を呼吸運動に与え、毎分呼吸数の減少の影響が加つて、結果的にはかなりの毎分呼吸数の減少をきたすことになる。今回の実験においても上昇時とくらべて下降時の呼吸数の減少の方が程度が大きいのは、圧力変動と低圧そのものの影響とのいずれもが呼吸数を減少させる方向に働いているのによるものと考えられる。以上のように低圧の呼吸におよぼす影響については、hypoxia, hypocapnia などの条件のほかには圧力変動そのものが肺に機械的な刺激となつて、Hering-Breuer の反射に影響を与え、そのために呼吸リズムに変化がくることがあることを考えなければならない。

なお脈搏数の変化はきわめて軽度であるが、上昇中と比較して下降中は増加を示している。呼吸数の減少を補償するための2次的な変化であろうと考えられる。

D 総 括

今回航空医学実験隊の人体実験用低温低圧タンクを使用し、健康な大学生6名について圧力変動(720mm Hgと543mm Hgとの間)の人体におよぼす影響の実験を行い、上昇時間75~90sec., 下降時間45sec.の変動を5~8回連続して与え、呼吸リズムと脈搏数の変化について検討し、次のような所見を得た。

1 心電図には被験者1名にあらかじめ期外収縮をもつのがいたか、実験日のすすむに従って期外収縮の発生率が増加した。実験第2日には実験前よりも圧力変動中に増加するが、実験第3日には実験前よりも圧力変動中に減少する。その他の被験者には異常が認められなかった。

2 呼吸曲線をみるに種々の異常型の出現する頻度は圧力変動中に多く、しかも期外収縮を示した1例をのぞいて他の被験者はすべて上昇中よりも下降中に異常型の発現が高まっている。

3 呼吸数は対照日より実験日負荷前の方が高く、上昇中は負荷前よりも少なく、上昇中よりは下降中に減少している。

4 呼吸リズムのこのような上昇中、下降中の変化は、圧力変動が肺内圧を変化させ、肺内迷走神経末梢を刺激して呼吸運動を調節するいわゆる Hering-Breuer 反射に影響をおよぼし、そのために生ずるものと思われる。

5 脈搏数は対照日と実験日負荷前とは大差なく、上昇時と下降時とを比較すると、下降時の方が増加している。これは下降時に生ずる毎分呼吸数の減少を補償するための増加であると考えられる。

以上圧力変動そのものが人体、特に呼吸運動に影響することについて述べた。

参考文献

- 1) 大島正光：急激な減圧および復圧の家兎におよぼす影響について、日本航空医学心理学会第3回総会，昭和32年11月17日発表
- 2) 大島正光，鳴谷亮一：低圧環境下における呼吸状態の観察，航空医学 1 10~11 (昭 18)
- 3) 佐藤 照：低圧内滞圧および急速減圧復圧と副腎アドレナリン含有量との関係，航空医学 1 23~24 (昭 18)
- 4) 玉手淳三郎：低酸素状態における血圧および呼吸数の変動について，航空医学 2 9~10 (昭19)
- 5) 福田邦三，石川康，加藤保：呼吸中枢の興奮様式に関する研究，航空医学 2 33~34 (昭 19)
- 6) 高木健太郎：低圧における呼吸運動の電氣的描字装置および呼吸運動の変化，航空医学 2 38~42 (昭 19)
- 7) 高木健太郎：低圧における呼吸中枢の興奮性について，航空医学 2 38~40 (昭 19)
- 8) 中武雄，山田直正：低圧時における脈搏拍節変動について，航空医学 1 24~26 (昭 18)
- 9) 大島正光他：筋労作時の大脳機能の変調について，労働科学 26 4~11 (1950)
- 10) 高木健太郎：呼吸の調節，生理学の進歩 127~197 南条書店 東京 (1949)