

## 海女の生理学

高木健太郎\*

かって低気圧環境の実験を行っていた時に酸素の加圧マスクを作ったことがある。この実験は敗戦で途絶したが、加圧した空気を吸入させることにより 10,000 メートルまで上昇させることを企画してマスクや胴着などを作った。理論上は 10,000 メートルならば 25 mmHg 程度に加圧すれば純酸素であれば可能な筈であるが非常に苦しかったり倒れたりする。これは、あとから考えれば何でもないので、肺内圧が高くなるために肺の capillary を圧迫して肺循環が障害されるためであり、例えば顔などを見ているとチアノーゼになってくるというように、循環障害が原因で起ることが判った。

海女もやはり深海へ潜水し肺内圧は上昇するが、その場合は血管内圧も上昇するので、上述の例とは異なるが、肺内圧の上昇に限ればその機序は同一であることが海女の研究に着手した動機であった。そこでこの研究に着手する前に、一般に身体の耐久能力を試すための機能検査のひとつとして使われていた慈恵の故浦本教授が止息力と名づけた概念を、われわれが「息こらえ」(英語では breath-holding) と改称したところ好評で、生理学会でも最近では全部この用語が使われており、その意味では思い出の深い研究のひとつである。息こらえの時には、ご存知のように血液、あるいは生体内の炭酸ガス分圧 ( $PCO_2$ ) が上昇し  $PO_2$  は低下し、肺の  $PO_2$  あるいは  $PCO_2$  にも同様の変化が起るが、息をこらえられなくなる点 (いわゆる breaking point, 私共はダメの点と称している) がどうして起るか私共の最初の興

味の中心となった。これについて理論的な説明を試みるために次のような理論式を考えた。これは私が高等学校で学習した数学を生理学で使った最初の機会、始めて微分方程式を解いた思い出深い式であるが、案外これが息こらえ中の血液ならびに肺胞気の  $PO_2$ ,  $PCO_2$  の経過と非常に良く合致する。このことで逆に循環血液量その他のことが察知できるようになったことから Rahn 等と近づきになり、1965 年、海女のシンポジウムを東京で開催した時にこの話をした。今日は、最初にこの事をお話し、息がこらえられなくなる条件とは何であろうか。そして何故海女が私共より余計もぐっていられるのかをお話してみたい。

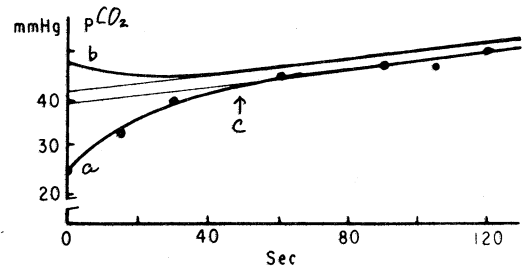


図1. 肺胞気  $PCO_2$  (a), 静脈血  $PCO_2$  (b) の息こらえ中の理論的变化と実測値 (・)  
被験者 H. K. ↑ 55 kg. 酸素を吸入したときの息こらえ。

息をこらえていると(第1図),始めは空気(この図では  $O_2$ )を吸ってからこらえるので,  $PCO_2$  が下がっているが,徐々に高まってゆく(a曲線). 静脈血の  $CO_2$  は mmHg で示すとこれ位(b曲線)ある。これは息をこらえ始めると下り,あ

\* 名古屋市立大学長

るところまで下ると a 曲線と一緒に平行して上ることが実験的には判る。実際いろいろな点で肺胞気をとってみると、こういう経過が見えるわけで、私共の作った実験式と非常に良く合致することから自信を持った次第である。しかし Haldane effect とか、あるいは実際には肺が圧縮されているとか、あるいは循環系にも変化があるわけで、完全に合致はしないが、実験的には十分役に立つ式であると思う。

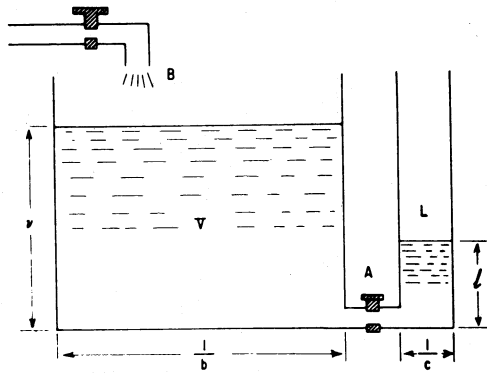


図2. 息こらえ中の CO<sub>2</sub> 模型  
この模型から微分方程式を立て、式(1)(2)を導き出した。

第2図の  $v$  は静脈血の量、 $1/b$  は body tissue を合せた静脈の容量、 $v$  は全体の炭酸ガスの量であって、これが PCO<sub>2</sub> に相当する。身体の中で CO<sub>2</sub> がどんどん出来るというのは、B が上から入っていると考えると、この PCO<sub>2</sub> は段々に上ってゆく。一方、 $L$  と  $1/c$  は肺静脈血と肺の容量で、 $l$  が PCO<sub>2</sub> になる。A が肺と動脈血の間のひとつの関門になっていて、一種の transfer coefficient と云って良いと思う。Circulation が悪くなるとこの口がせまくなるということになる。こういうことを仮定しておいて微分方程式をたててみると ((1), (2)式),

$$v = v_0 + \frac{bcB}{b+c} t - b \left( \frac{v_0 - l_0}{b+c} - \frac{bB}{a(b+c)^2} \right) (1 - e^{-a(b+c)t}) \quad (1)$$

$$l = l_0 + \frac{bcB}{b+c} t + c \left( \frac{v_0 - l_0}{b+c} - \frac{bB}{a(b+c)^2} \right) (1 - e^{-a(b+c)t}) \quad (2)$$

式は面倒だが、前半はひとつの直線の部があって、後半には exponential の部分がある。 $l$  が肺胞気の PCO<sub>2</sub>  $v$  が静脈血の PCO<sub>2</sub> だが大体同じ型をしている。 $v$  ではマイナスになっており、 $l$  ではプラスになっているので、先程のよう

に  $v$  は上から下ってきて、 $l$  は下から上ってゆく型になり、ある程度時間が経って、 $t$  が大きくなってゆくと結局直線の式になる。

そうすると先程のように一方では徐々に上って行って、第1図のCのへんまで時間が経つとあとは平行して上昇し、この間にいくらかの差があるだろうということになる。

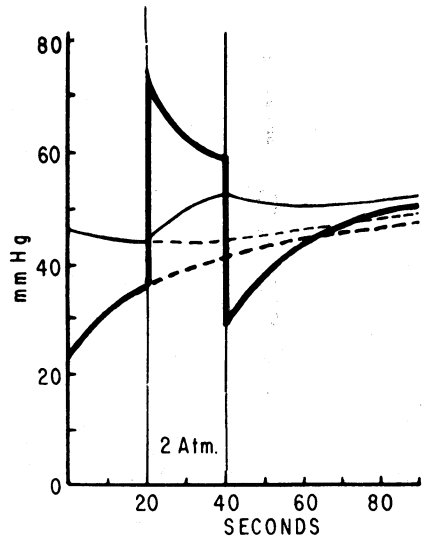


図3. 息こらえ中および急に2気圧のところへ20秒間潜水したときの肺胞-動脈 CO<sub>2</sub> 圧と組織静脈 CO<sub>2</sub> 圧の理論的变化。太線は肺胞-動脈 CO<sub>2</sub> 圧、細線は組織-静脈 CO<sub>2</sub> 圧。破線は潜水しなかったときの变化。

海中に潜った時には圧力が高まるが、その状況を理論式で出すと第3図のような PCO<sub>2</sub> 曲線が得られる。実際に測定された Lanphier とか Rahn の文献を見ると丁度同じ様な図が得られているので、この式はある程度正しいのだと自信を持てた。

そこで息こらえがどこで駄目になるかという事だが、最初誰でもが考えるのは PO<sub>2</sub> が下る、あるいは hypoxia になるということで、それが呼吸中枢を刺戟し意志の力では抑えておけない程の強い impulse が大脳へゆき、それとの competition によって breaking point が来るということ、即ち hypoxia あるいは PO<sub>2</sub> の decrease であるということであろう。もうひとつは PCO<sub>2</sub> の上昇で、そのために呼吸の drive が強くなっ

これを抑えられない。この両方が考えられる。実際は第4図のように時間と共にPCO<sub>2</sub>が上昇してゆく。fが大體肺胞気CO<sub>2</sub>が6%, 50とか60 mm Hg以下で大體駄目になる。もちろんhypoxiaもひびくが、hypoxiaのひびきというより、苦しさは実はCO<sub>2</sub>濃度の方が主で、hypoxiaの方は意識はなくなるが苦しさの方には余り関係していないので、breaking pointを決めるものはPCO<sub>2</sub>の方であろうと最初は考えていた。ところが実際に高い炭酸ガスを吸わせてその時のbreaking pointを見ると、高いところでやってみると30秒位でbreakingする(第4図)。その時の炭酸ガスは第4図aのように高いのであって、もしCO<sub>2</sub>の濃度だけがbreaking

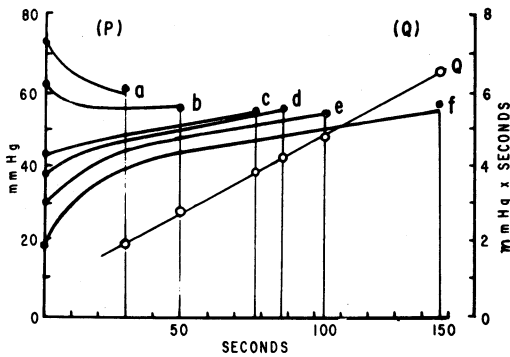


図4. 理論的肺胞CO<sub>2</sub>圧の変化とだめの点のCO<sub>2</sub>圧測定値および種々の濃度のCO<sub>2</sub>を吸入して息こらえをしたときのQ-T曲線、吸入CO<sub>2</sub>濃度はそれぞれa:16%, b:12.8%, c:6.7%, d:5.5%, e:3.2%, f:0%.

pointをきめるのであればすぐ駄目になりそうなものだが、とにかくこれが下って来るまでは保っているということでbreakingが来ない。種々の濃度のCO<sub>2</sub>を吸わせて息こらえをさせるとそれぞれa, b, …… fの点が得られる。そして理論曲線の上にそれらはのる。これを見ると必ずしもPCO<sub>2</sub>の高さそのものがbreaking pointを決めるものではない事がわかる。またこれらの点を結んで見ると双曲線になっている。今度はこれを積分して面積を求め時間軸にプロットすると殆んど直線上にのるわけで、右縦軸にmm Hgと時間をかけたquantity, あるいはPCO<sub>2</sub>と時間との積をおくと、ある

PCO<sub>2</sub>がある時間働いた量が縦軸へ出て来る。PCO<sub>2</sub>が非常に濃い時には時間が非常に短いわけで、PCO<sub>2</sub>が低くければ時間は長くなる。丁度、刺激における電流と時間との関係がi-t曲線と云われているが、そのi-t曲線がa-fとすると、直線がQ-Tになる。Q-Tが直線であるということはbreaking pointに時間に関与することを意味する。PCO<sub>2</sub>の刺激の強さだけでなく、それに時間をかけたものが苦しさに耐えられないintoleranceの時期を表わすのである。従って濃いものであれば時間が短いし、うすければ時間は長くなる。これだけのCO<sub>2</sub>が働いていれば時間がこれだけだとなるわけで、私はtime factorが非常に大きいと思う。これは一般的な法則とはならないが、ここには始めから苦しいのだが、ある苦しさまでは保つという、それが強い時には一方だけしか保たないが、苦しさが弱ければここまで保つとお考えになっても良いわけで、苦しさにはtime factorがあるということになる。

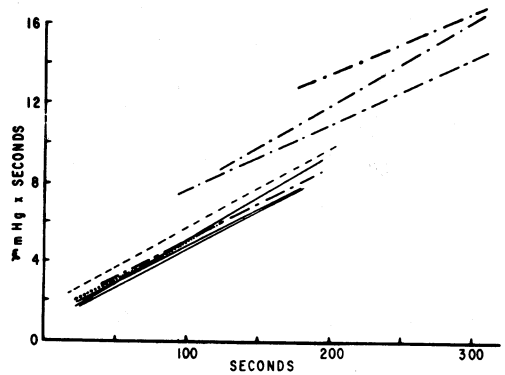


図5. Q-T曲線の個人差

鎖線は繰返しにより息こらえ時間の延長するときのQ-T曲線。黒線:27才♂, 破線:39才♂, 点線:30才♀, 鎖線:22才♀(小林による)

ところで色々な人々のtime factor, 即ちこのQ-T直線を見てみると(第5図), 息を長くこらえられる人の直線は上の方, 短かくしかこらえられない人のは下の方になるが、例外は別としても両者のスロープは殆んど同じである。では、このスロープは何を意味するかというと、

刺激の法則からするとこれは rheobase に相当するものである。すなわちこの  $\tan\theta$  が rheobase に相当する。こらえられる人も、こらえられない人も rheobase は同じであるということで、この rheobase を計算してみるとこの時の  $P_{CO_2}$  は大体 39 mmHg になる。ということは normal な呼吸の時の肺胞気は、大体、 $PaCO_2$  が 40 mmHg であり、これは 40 mm Hg に非常に近いが少し低だけである。要するに普通の normal な肺胞気の濃度というものは我々がこれから苦しくなるぞという点を与えている。それが rheobase であって、息をこらえるとすぐ苦しさが始まってゆき、これが段々に高くなることを意味するので非常に面白い事実である。息を余計こらえる人は、この曲線が上へ上っているというだけで、その人の努力の力によるものであることが大体わかる。だから、長くこらえられる人も、短くしかこらえられない人もその rheobase は一定していて、それは正常の肺胞の  $P_{CO_2}$  である。そして長くこらえられる人は何かある time factor に耐え得る力を持っていると考えれば良いと思う。それでは海女は非常に努力して水に潜っているのかということが問題になる。

海女は長く水に潜り得ると一般に考えられ勝ちだが、実際の千葉県御宿のデータでは平均 39 秒(これは陸上で息をこらえた時である)、近所の一般の農夫では 37.1 秒で有意差は無い。また、徳島市の阿武の男のアマでは平均 59.6 秒、女は 47.6 秒、普通人では 59.9 秒と 46.2 秒とで両者の差はない。海女は、私達が考える程長い間潜っているわけではないことが判る。普通人に 1 週間練習させると、始めは 30 秒だったのが 2 分はこらえられるようになる。深呼吸してこらえると 3~4 分、もっと強い人になると 5 分までこらえられる。韓国の海女は深呼吸して潜るが後述の理由でこれは非常に危険である。大体普通人は 1 週間の練習で 2 分位息こらえ可能となるが海女は実際にはそんなにはならない。そこで息こらえ時の横隔膜の動きを見てみると面白いことに 30~40 秒すると誰でもびくびくけいれんをし次第に大きくなる。この時期までを第 1 相とすると、第 1 相は  $PCO_2$  がある

程度上昇し呼吸中枢の drive が意志の力で抑制し切れなくなって来るまでである。この第 1 相は練習をしても全然延びない。従って練習で延びるのはこの横隔膜のびくつきが始まってからの時期を努力で延ばすことを意味している。海女の holding time は大体この第 1 相をやっているのだらうと思われ、海女に練習させれば努力によりもっと止めることが出来るのではないかと思う。time factor というのは結局は、努力の方に問題はかかっていると思う。

ところで、実はもうひとつの苦しきがある。普通に息をした状態で 50~100 cc の種々の容量の風船を口につけ自分の呼吸を吐きこませてふくらませる(第 6 図)。即ち、肺と等容量の空

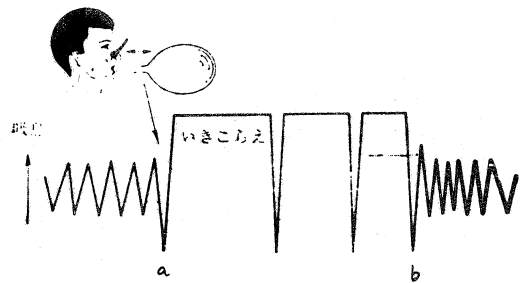


図 6. ふくろをつけたときの息こらえ呼吸曲線。  
(小林による)

気が入っていると考え、その状態で息をこらえさせる。ここである breaking point へ来て息を吐き出す時にこの中へ吐き出させる。するともういっぺんこらえることが出来る。また苦しくなって吐き出すと、またこの空気を吸うとこらえることが出来る。即ち、この場合はこの曲線に乗ったよりも volume は大きくなっているが、非常に高いところの  $PCO_2$  までこらえることが出来る。

即ち a から b までの時間が非常に長くなるわけで、そういう事が出来るということは  $PCO_2$  だけではなく、それには肺を一定の容量に保っておくということが苦しきのひとつの原因である。

それは恐らく肺からの迷走神経の求心性の衝撃が呼吸中枢へ働いてそのために非常に苦しいのではないかと思われる。従って第 6 図の様な袋があるという事はその苦しきを取除いてくれ

ることになる。

実際に海女のマスクを見ると、第7図aが普通のゴーグルで、bでは袋がついてこれがふくれて水圧で目がとび出さないようになっているが、最近使われているのはdの形式が多く、鼻まで一諸に入れている。しかもこれには小さい袋のようなものがついている。これはわずか20 cc位の容量だが、海女は息が苦しくなると口を開けてはいられないので鼻から肺へ空気が出入する。その圧力がこの袋へ及びマスクが縮んだり膨らんだりして先程申しあげたと同じ理屈で海女はかなり長く耐えられることになると思われる。第7図は Rahn の図から取ったのだが、

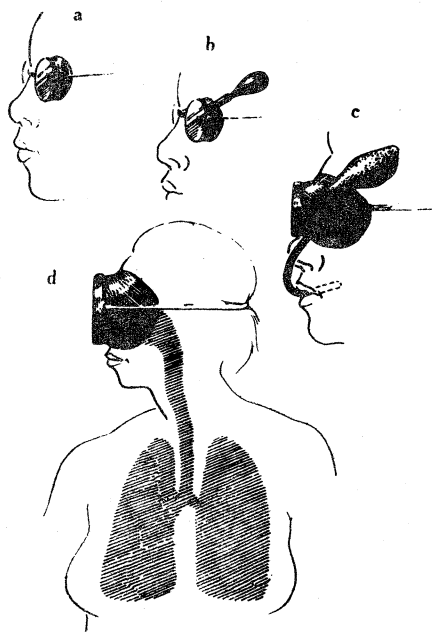


図7. 潜水めがねのいろいろ (Rahn 1965)

- a: 圧平衡用のふくろなしの2つめがね (沖縄糸満など)。
- b: 圧平衡用のふくろつきの2つめがね (石川県触島など)。
- c: 圧平衡ふくろと口管つきの1つめがね (九州地方)。
- d: 鼻入れ1つめがね (志摩房総など)

日本製でもここに袋が付いていたり、あるいは全体マスクがかなりの程度の capacity を持っていて横隔膜がピクピクする時に少し位はこの中

に吐き出せるという事になる。これが横隔膜からの強い drive を抑制する、あるいは drive に耐え得るひとつの要因になっていると考えられる。

次にいまひとつの事について述べる。実際、深呼吸を何回もくり返してから潜ればより長く過剰換気を行うと確かに延長する。それは酸素は増加し炭酸ガスは非常に減っているからである。初めに過剰換気をしておくと  $PCO_2$  は非常に減っているの、 $O_2$  が非常に減るところまでは、即ち  $PO_2$  が非常に低くなるころまでは息こらえが出来る。通常、 $PO_2$  が 30 mm Hg になるともうろうとし、弱い人はそこで意識を失う。いま、水深 10 m の所へ潜ると大気圧を加え 2 気圧になる。水蒸気圧が 47 mm Hg とすると酸素濃度は 4 %、分圧で 50 mm Hg 位になるので、ギリギリのところまでは意識はあるものと思われる。ところが、水面へ上って来ると大気圧は 760 mm Hg、水蒸気圧は 47 mm Hg ですから  $PO_2$  は 29 mm Hg 位に計算上はなる。こうなると丁度 30 mm Hg ギリギリのところ、意識を失うともうろうとした状態になる。つまり過剰換気をするると長くは潜れるが、このような状態になり、水中では意識があるつもりでも浮上するまでの 3 秒、5 秒、あるいは 10 秒、15 秒かかる間にもうろうとしてしまうことになり、息をこらえるという意志が働かなくなり水を飲んでおぼれてしまう。非常な危険が伴うので、通常は過剰換気は事前にやらないことになっている。先程、梨本先生から磯笛というものを聞いたが、浮上すると急激に肺内圧が減るので、その場合には口を細くしてゆっくりと吐いてやると急激な decompression にならない。肺の中で泡沫が出来るかどうか私には判らないが、肺循環におこる急激な変化を防ぐ意味で磯笛というものを吹くのではないと思われる。もし過剰換気で水に潜った場合には、上に上って来た時には逆に強く努責をした方が意識を失わないですむのではないかと思う。このような理由で海女は磯笛を吹いたり、マスクに袋をつけていたりするのではないかと考える。

海女が水に潜ると胸廓が圧迫され、肺容積も非常に小さくなる。10 m の水深では大ざっぱに

計算しても肺容積は $\frac{1}{2}$ になる。そうするとはじめの volume は減ってしまう。実際に陸の上で機能残気量程度で息をこらえさせると、息こらえの時間は普通の時の40%くらいになり、深く息を吐いてからこらえたと holding time は24%くらいになる。だから2分間こらえられる人でも、大体15秒から20秒くらいしかこらえられない事になり、2分こらえられる人でも機能換気量を $\frac{1}{2}$ くらいにすると半分以下の40秒くらいになるので、海女でも40秒から50秒こらえて海に潜るのは非常に長いということになる。

このように長くなる理由は先程も述べたがここに予備ブクロがついている事のほかに、もうひとつの理由は炭酸ガスに対する慣れがある。これはある  $PCO_2$ 、例えば 1 mmHg の  $PaCO_2$  の増加に対する換気量の増加を示した(第8図)。普通人に息こらえを何回か練習させた場合

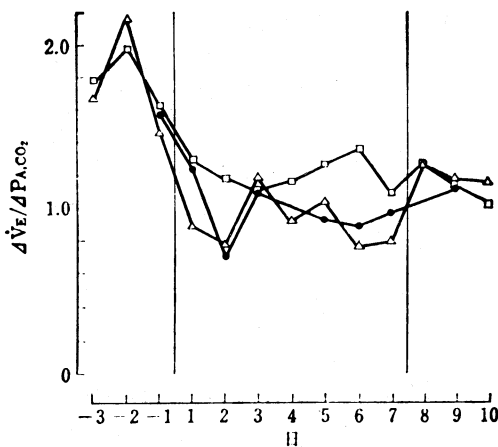


図8. 運動負荷息こらえのくり返しによる  $CO_2$  感受性の変化(五十嵐による)。2本の縦線の間が負荷期間

で、炭酸ガスに対する感度が上の方ほど良いという風にお考えいただきたい。これを3日間位練習させるとだんだん下降し、ついには感度ははじめのときの $\frac{1}{2}$ になってしまい、いわゆる  $PCO_2$  に対する呼吸中枢の興奮性のレベルが下がったことになる。同じ事は海女にも見られ、漁期にはこれと同様に下ってしまい、休漁期にはこれが上って来る。

だから海女の場合には、普通の時から一般の

人達よりも低いし、漁期に入り何回も潜っている間にさらに下ってくる事になる。これがどこの adaptation, あるいは適応によるのかははっきりしないが、そう長く続くことではないとすると酸素系の作用ではなく、何か reflex のような作用ではないかと考えられる。

もうひとつ申し述べたいことがある。水禽はすべてそうであるが、水禽が水中へ潜ると bradycardia が起る。water immersion bradycardia と云う。これは息をこらえないで、顔を水につけた場合の脈拍数である。(第9図 immersion) 左は慣れた人、右は慣れない人で、慣れた

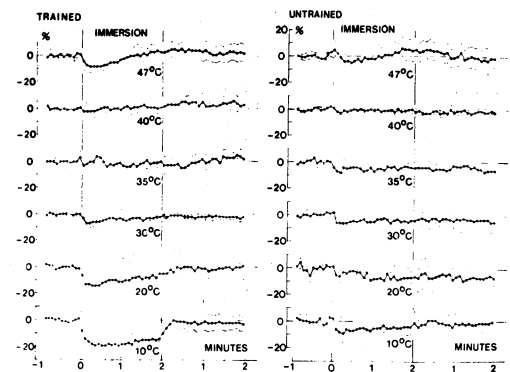


図9. 種々の温度の水に顔をつけたときの平均脈拍数の変化(正常の%で増減が示してある)。薄い曲線は標準偏差。

人では  $40^{\circ}C$  ぐらいの水温、いわゆるヒフ温より少し高い位のところではあまり bradycardia は見られないが、低いところと高いところでは bradycardia が認められる。慣れない人ではあまりはっきりしないが、要するに海女とかそういう人では bradycardia がひどい。水禽などではいわば apnea が来るわけで、ひとりでは apnea がきて bradycardia が来る。アザラシなんかでもみな bradycardia が来るようにできている。こういう bradycardia もたしかに海女と普通人では非常にちがう。こういう bradycardia が来れば circulation が悪くなるので中枢へ行く血液も少なくなり、こらえていられなくなるのではないかと考えられるが、反対に都合の良いこともある。

第10図は息こらえをした場合の下肢の血流

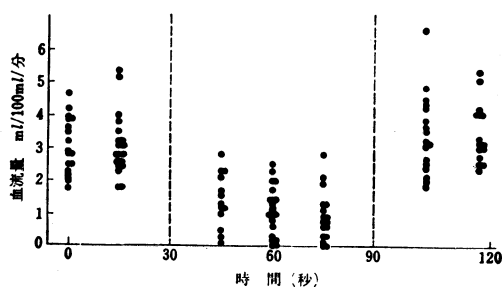


図 10. 息をこらえて顔を水につけたとき(模擬潜水)のヒトの下腿の血流量の減少 (Elsner たち 1965). 2本の破線の間、顔を水につけている。

量を示しているが、顔を水につけて bradycardia が起った時には血流量が非常に減っている。しかし実際に脳波とか脳の血流量を調べてみると脳の血流量には殆んど変化がない。あるいは coronary の血流量にも殆んど変化はない。四肢の血流量だけが非常に減っているものと思われる。この図から目測すると大体 $\frac{1}{2}$ 位になるのではないかと思う。これは水中に潜った時には出来るだけ bradycardia にして少ない血流を全身に送り出し、こう云ってはおかしいが、四肢に対しては血液を非常に少なくしておく。これはアザラシその他潜水動物のすべてに同じような reflex があって、これが海女では非常

に良く発達しているものと思われる。このことが永く水に潜れるひとつの理由になっている。それでは、少ない血流量でどうして筋肉が働けるのかということだが、恐らくその時には anoxia の状態で筋肉が働いているのではないだろうか。またはミオグロビンの酸素の capacity は普通のヘモグロビンより多いわけだから、鯨やアザラシと同じように潜水した時は殆ど anoxic な状態で筋肉は収縮し、ミオグロビンの酸素を使っていると思われる。海女でそのような機能が十分に発達しているかどうかを検査する方法は無いが、少なくとも同じような原理が働いているのではないかと思われる。

この他にも私たちは IBP の一環として human adaptability を研究した。その中で私は海女の体温調整に興味を持ったが、確かにあゝいう冷たい所へ常に入っている人は、発汗とかそういう作用が冷たい水に対し私達よりも adaptation があるということも判ったが、今日は高気圧環境医学に関連した講演で体温調整のことについてのお話をする時間はない。以上はなほ簡単であったが、いくらかでもご参考になれば大変幸せである。