

水を吸い嚙み込む場合の消化管内圧変化

(3) 吸引運動時の口腔内圧変化

昭和35年11月29日 受付

信州大学医学部第二生理学教室

宮 川 清

Intraluminal Pressure Changes During Sucking Followed by Swallowing

(3) Intraoral Pressure Changes During Sucking Act

Kiyoshi Miyakawa

The 2nd Department of Physiology, Faculty of Medicine,
University of Shinshu

緒 言

嚙下運動と吸水運動とは明らかに別個の運動である。吸水運動とは純粹の随意運動であり、その運動の様相は随意的に千差万別に変化せしめ得られる。そのような生理学的意味とは離れて、ともかく卓上のコップの水を硝子管で吸い込み嚙下する場合、コップの水が胃まで移動するわけである。この移動の力学的背景を追跡しようとするのが著者の意図である。先ずコップの水が口まで移動する力学的背景が問題になる。さきに概要の所で、吸水時に於ける口腔内での陰圧の発生範囲、並びに発生の仕方について報告を行った^①。今回はこの口腔内の陰圧発生と、吸引される水の量的関係に關しての実験成績について発表する。なお吸引運動に依つて、口腔内に何の程度の陰圧が発生するかについても実験を行ったので、その結果を述べるとともに、その解析を試みた。

(1) 吸水時の口腔内圧変化と吸水量との関係

実験方法

原理：卓上のコップの水を吸引する場合、水と云う液体が重力に抗し、また硝子管中を通るために生ずる抵抗に抗して上昇し、口腔内に移動してくるわけである。これは口腔内の舌表面と硬口蓋との間に発生して、硝子管の口腔端にかゝる圧とコップ内の水面との圧差に従つて、水の側からすれば全く受動的に移動してくるわけである。従つて吸引に使用している長さ20 cm、内径5 mmの硝子管の両端に生ずる圧勾配と流入して来る水との間に、何等かの量的な関係が見出されるに相違ない。管のなかの流れと、その両端の圧との関係を示すものとしては、Poiseuilleの法則があ

る。Poiseuilleの法則は次のように現わされる。

$$V = \frac{\pi (P_1 - P_2) a^4}{8 \ell \eta}$$

a との管の半径、 P_1 、 P_2 とは管の両端の圧で、 P_1 はコップ中の硝子管の端の圧、 P_2 は口腔端の圧である。 ℓ とは管の長さ、 η は液体の粘性係数、 V はその管を流れる液体の量である。

この Poiseuille の法則が成立するためには一定の条件を具備しなければならない。この場合、乱流が発生することも考えられるので、その条件の範囲を或る程度踏み越える可能性も考慮して置かねばならぬ。

水が口腔中に移動するにつれて、コップの水面は下がる。そのために P_1 は時間とともに変化する。即ち時間の函数である。 P_2 は口腔内圧の記録から明らかのように、これもまた時間の函数になつている。

従つて $P_1 = f_1(t)$ 、 $P_2 = f_2(t)$ である。

(第4図A参照)

吸引開始の時刻を t_1 、吸入終了時間を t_2 とする。この2時点間に吸引された水の量は次のように現わされる。

$$\int_{t_1}^{t_2} V dt = \frac{\pi a^4}{8 \ell \eta} \int_{t_1}^{t_2} [f_1(t) - f_2(t)] dt$$

このように Poiseuille の法則がわれわれの場合に適用出来るものとすれば、コップ内の水面の圧を示す曲線と、口腔内圧を示す曲線とが包む面積が吸入される水の量に比例するわけである。ともかく上に述べた面積と吸入される水の量との関係を調べてみる必要がある。

P_1 、 P_2 の記録方法： P_1 は strain gauge manometer の受圧部への導管の開口部をコップ中の水に

つけて置けばよい。 P_2 の記録には吸水に使用する管の口腔端にもう一つの受圧部への導管の開口部を固定する。この際流れによる圧の影響をのぞき、純粋に側圧を記録するため導管の開口部の方向に注意しなければならない。即ち管内から流れ出て来る流れの予想される流線に対して垂直方向に開くようにしてある。このようにして P_1 並びに P_2 を 2 現象 Braun 管 oscilloscope に導いて、両現象を同一増巾度を以て重ね合せて撮影を行つた。

吸入された水の量は次のようにして測定を行つた。吸水前のコップ（水の入つたまゝ）を物理天秤で測定し、この値から同様にして計測した吸水後のコップ（水の入つたまゝ）値を差し引いて吸水量を出した。

上に述べた P_1 並びに P_2 両曲線の包囲する面積は同速度、即ち秒速 5cm で oscillograph を動かした資料について planimeter を以て測定を行つた。

普通の状態で硝子管で水を吸う場合には管内に空気が入っている。従つてその空気が容易に体積変化を行うために、陰圧の記録の下降脚部分に overshooting が現われて来る。この空気に与えられた陰圧の効果は何れ液体の移動に対して費されることになるが、全部がそうなるわけではない。そこでこの現象による誤差を防ぐため、予め管を充たすだけ水を吸い上げて置くようにした。

実験成績

吸水時のコップ内の水面の圧と、吸水硝子管の口腔端の圧記録の一例を第 1 図に示す。

幅の小さな線はコップ内の水面の圧を示す。幅の太い線は吸水硝子管の口腔端の圧を示す。二つの線が分離するに先だつて一致しているのは次の理由による。

硝子管内の空気を除去する目的で硝子管内を満たすだけの水を吸い上げる。従つてその口腔端にある P_2 記録用の導管の開口部がその水でひたされる。一致しているのはそのためである。そのような状況にあつては吸引硝子管と口腔とは一つの盲管系を形成して居り、そこを傾している液体は、コップ内の液体の圧、即ち水面の大気圧と等しくなつて居るわけである。

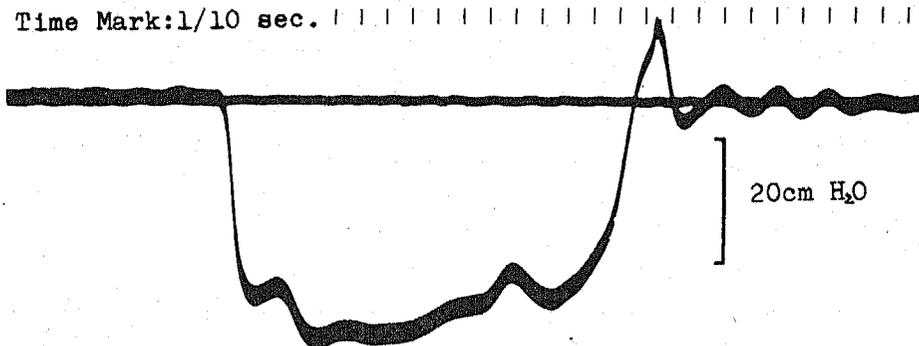
吸引運動の開始と同時に、硝子管の口腔端はコップの水面の圧よりも下がる。この圧差に依つて水はコップから口腔内へ移動して来る。吸水運動の停止とともに、吸水管の口腔端は舌の先端でふさがれるが、それが圧記録のうえで上方へ向けての overshooting になつて現われている。

記録に際しては oscillograph を送る速度を常に秒速 5cm とし、一実験中は一定の増巾度を以て行つた。かゝる記録に於てコップ内の水面の圧と口腔内圧の包囲する面積を planimeter を以て計測し、平方糎で表わす。一方吸水前の水ぐるみのコップの重量から吸水後の水ぐるみのコップの重量を差し引いて吸上げた水の量を測定し瓦で表わした。この二つの series 実験の成績を第 2 図、第 3 図に示す。この図は吸水量と、上に説明した面積との相関々係を示している。両者の関係は相当に散在してはいるが、直線的な関係のあることが観取される。

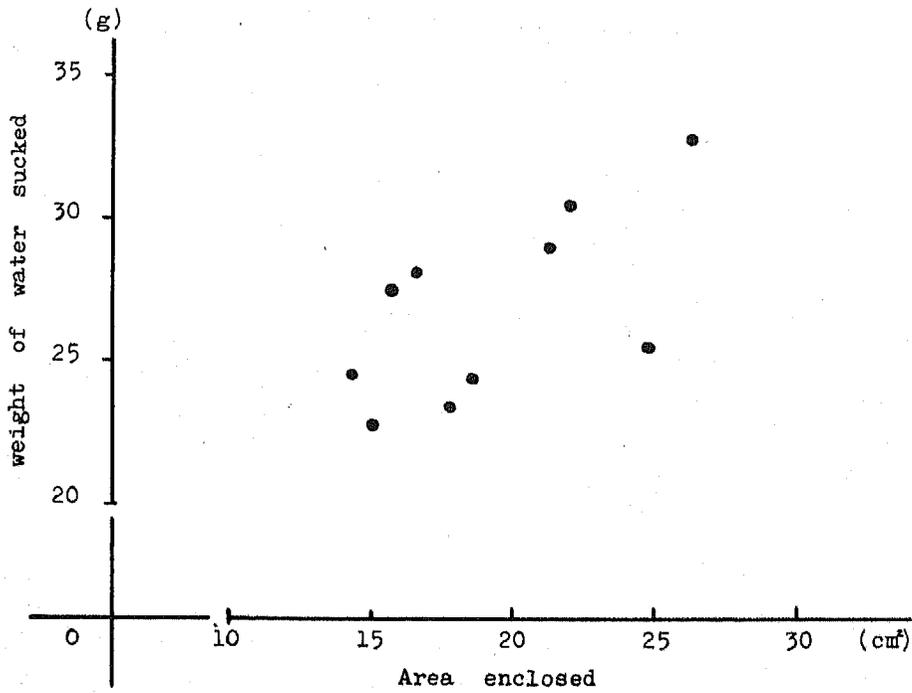
(2) 最大努力を以て吸引する時の口腔内圧

実験方法並びに実験成績：

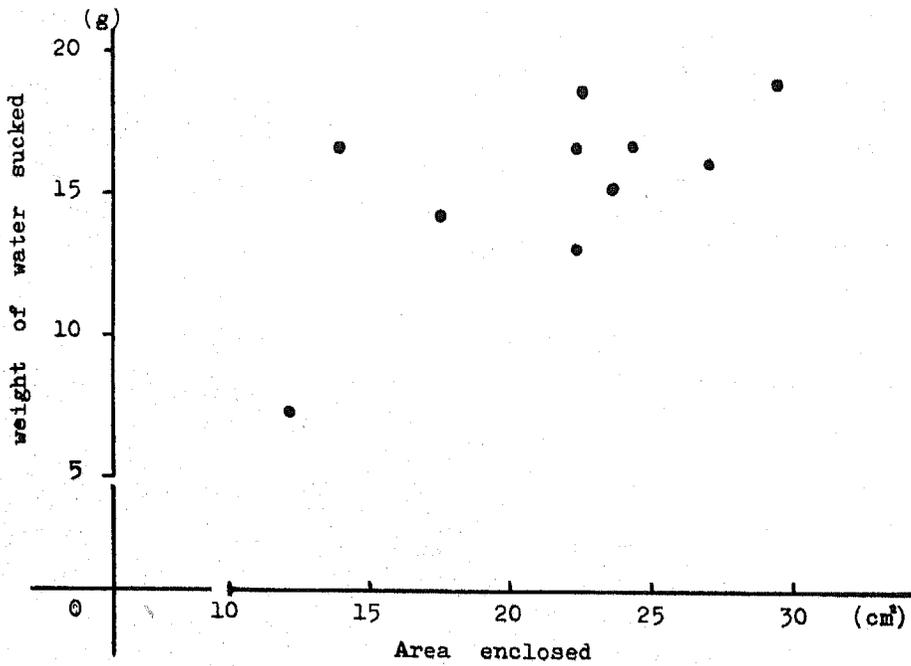
吸引運動によつて何の位の陰圧が口腔内に生ずるかについて検討を行つたが、その実験方法について述べる。著者は 1956 年から 1958 年の留学中 Tennessee 大学医学部生理学教室に於て strain gauge manometer



第 1 図 桌上のコップから水を硝子管で吸い上げる時の口腔内圧変化並びにコップの水面の変化 説明は本文参照



第 2 図 吸引された水の重量と両曲線に囲まれた面積との相関図



第 3 図 吸引された水の重量と両曲線に囲まれた面積との相関図

を用いてこの問題の研究を行った。水銀柱にして-600 mm 前後の値を得た。帰国後信州大学に於てこの問題を別の方法で検討したので、その結果を報告すると同時に解析を試みた。

内径 3mm 長さ 1 m の硝子管を以て、床の上に置いた容器内の水銀を吸い上げることの可能な高さまで吸い上げる。吸い上げた最高の高さに於て暫らく口腔内圧に接せさせたのち、管内の水銀面と容器内の水銀面との垂直距離を計測した。この値の最高が著者で 61.9 cm であった。

この値に関連した数値として当時の気圧は Fortin の気圧計で 701.2 mmHg であった。ちなみに信州大学医学部は海拔 620m 程のところにある。

この場合、硝子管内の水銀面上にある稀薄化された空気は唾液にうるおされた口腔粘膜に接している。従つて 37°C の唾液と接していると考えられる。37°C の水の蒸気圧は 47.13 mmHg であり、この蒸気によつて、水銀面上にある空気は飽和されていると考えてよい。事実この実験中、泡立つた唾液が硝子管の内壁をうるおすのがしばしば認められた。このような実験方法ではこの唾液にもとづく蒸気圧を除去することは出来ないわけである。たとえ真空にまで空気を稀薄化する能力が舌の筋肉にあるとしても、せいぜい $701.2 - 47.1 = 654.1$ mmHg の値までにしかならない。この点を考慮すると、上にあげた 619 mmHg と云う値はこの条件下での最大真空値の 94.6% に相当する値であるとなる。口腔と云うものが如何に優れた真空ポンプであるかがわかる。

論 議

(1) 吸水時口腔内圧変化と吸水量との関係

以上の実験成績から吸入される水の量と、吸入硝子管の両端の圧差の結ぶ 2 つの曲線の包囲する面積との間に直線的な関係が観取される。従つてわれわれが卓上コップから水を吸い上げるとき、その吸い上げられる水の量的な関係は Poiseuille の法則の支配下にあると考えてよい。然しながら少からず値が散在しているが、その理由とされる可き点について考察を行う。

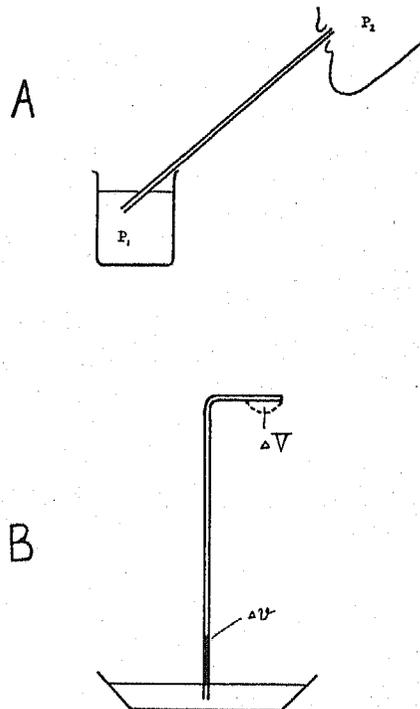
先ず第一に、目下検討を行つている流れが Poiseuille の流れを逸脱している可能性についてである。先ず比較的急速に吸水を行う場合には乱流になることが考えられる。このような場合には数値の散在する一つの原因になり得る。次は受圧装置の振動特性の問題であつて、この口腔内の圧記録の忠実性についてである。然しこの場合の圧変化は比較的緩慢であつて、このことが問題になることは先ず考えられない。もう一

つ考えられる点は、吸入用の硝子管内の空気を除くために水を吸い込むわけであるが、この際幾分か口腔内に入る分も考慮されなければならない。この最後の点が一番考慮に値すると考えられる。

(2) 最大努力を以てする吸引運動時の口腔内圧

口腔の真空ポンプとしての能力は従来あまり注目されていない。これが行われているのは専ら乳児に対してであつて、吸乳能力が問題になる場合であつた。然しながらこれは多くの場合測定法が極めて不完全であつた。

さし当つて硝子管で以て水銀を吸い上げることが物理学的に何のような意味を持つかをこゝに考察する。これによつて吸うと云う動作の物理学的本態が明らかになるものと思われる。第 4 図 B にこの実験の原理を略図にして示す。吸引運動を行う前の口腔と管内の水銀面との間にある空気の量を V としその圧を P とする。一回口腔内に吸引運動が起こつて硬口蓋と舌表面との間に ΔV だけ拡大されたときの状態を考察する。この ΔV の拡大によつて Δv の水銀が管内に上昇して



第 4 図

A: 卓上のコップから水を吸い上げる時の模式図

B: 水銀を硝子管で吸い上げる時の模式図

来たとして、その時の硝子管内の空気の圧を P_1 とする。先ず Boyle の法則から $PV=nRT=K$ と云う関係が成立する。次に一回の吸引運動の状態では次のようになる。 $PV=P_1(V-\Delta v+\Delta V)$ これは次のように書き替えられる。 $(P-P_1)V=P_1(\Delta V-\Delta v)$ ここで $P-P_1>0$ であるので $\Delta V>\Delta v$ となる。硝子管で水銀を吸い上げると云う動作の本態は次のように表現することが出来る。吸うと云う動作の場合硬口蓋と舌の表面との間に空隙が出来てそれが拡大すると云うこと、これが ΔV であり、その容積変化は上昇してくる水銀の量 Δv より大であり、それだけ空気が稀薄化されるわけである。

以上がこの実験の本態であるが、今迄吸引力にこのように大きな値が得られたと云う報告はない。その一つの原因として最大の吸引力をこのような水銀 manometer 乃至多くの乳児で使われている水 manometer で計測する場合に、必然的に伴う疲労と云う問題がある。このような圧力計を動かし、しかも最高値に達せさせるまでには可成りの仕事が必要ならなければならない。この仕事が吸引に与る関係諸筋肉に疲労を起し、この疲労が関係諸筋の最大力出現の妨げになる場合が考えられる。

次にこのようにして硝子管を以て水銀を吸い上げる場合、関係諸筋肉に何の程度の仕事が要求されるかを知らねばならぬ。そのためにはそれらの関係諸筋肉の働きの直接又は間接の結果として、外部に対してなされた仕事について考察する必要がある。外部に対してなされた仕事を知るためには、水銀を吸い上げる前後で外部での物理的事態に起つた変化を見出せばよいわけである。

先ず第一に水銀の管内に於ける上昇がある。水銀が重力に抗して上昇したわけであるから、上昇した水銀の質量を M 瓦、水銀面の上昇を S cm とすれば、このためのエネルギーの消費は $\frac{1}{2} SMg$ (g は重力の加速度) となる。

次に考慮しなければならない点は、管内の水銀面と口腔との間に稀薄化された空気が存在することである。この空気の質量は吸引運動前より少なくなっている。ともかく気体に対して熱力学的な仕事が必要である。勿論流体が移動する際にはそれが水銀であれ空気があれ必然的に粘性、ならびに振動にもとづく energy の消費があるが、こゝに用いた程度の管ではこれは僅かである。これらを算出するためには前後の状態の変化のみならず、終末状態に到る過程そのものの情報が必要である。

一回の吸引による熱力学的な仕事は次のように表現

出来る。上に述べた記号に従えば V なる体積の空気が $V+(\Delta V-\Delta v)$ になるためになされる仕事を W とすれば、

$$W = \int_V^{V+(\Delta V-\Delta v)} PdV = \int_V^{V+(\Delta V-\Delta v)} nRT \frac{1}{V} dV \\ = nRT (\log [V+(\Delta V-\Delta v)] - \log V)$$

と表現出来る。

この場合のように数回の吸引運動で最高の高さに到達した場合には、各吸引ごとの体積変化が得られなくても、お凡その見当は次のように与えられる。吸引開始前と数回の吸入運動後の管内の水銀面と口腔との間の空気の量と圧をそれぞれ V_1, P_1 並びに V_f, P_f とすればその仕事 W_R は次のようにして表現される。

$$nRT \int_{V_1}^{P_f V_f} \frac{dV}{V} > W_R > nRT \int_{V_f}^{P_1 V_1} \frac{dV}{V}$$

硝子管内に水銀を吸い上げるときには、以上のような物理的仕事が行われる。従つて当然疲労と云うことが問題になつてくる。換言すれば strain gauge manometer よりもこの種の圧力計を動かすのには仕事が必要で、疲労の問題まで介入してくることになる。

同じ水銀 manometer でも硝子管が太ければ仕事が大きくなる。この点に関しては細い管を使用すれば良い。然し余り細い管を通して水銀を動かす仕事は莫大なものになる。このような意味での圧力計の特性を示す指標として体積弾性率と云う指数がある。これは $\Delta P/\Delta V$ で定義されている。圧力計を動かすための仕事が少ないようにするためには、この体積弾性率が大きくなければならぬ。この点について水銀 manometer と strain gauge manometer を比較してみると、後者の体積弾性率が遙かに大である。従つて関係諸筋に疲労と云うことが問題になる以前に最大値に達することが出来る。以上は manometer の体積弾性率がこれを働かすための仕事に関係を持つていたわけであるが、次の場合にはそれとは違つた意味に於て、一つの問題を持つている。吸引運動時には、陰圧は硬口蓋と舌表面との間に出来る cavity のなかに出来るわけである。この cavity の表面積を A とすると次のような方程式が成立する。外気の圧力を P_0 、cavity 内の圧をば P_1 、関係諸筋によつてこの cavity をさへ又は押し拡げるための力を F とすると $(P_0 - P_1)A = F$ となる。 F は舌にある諸筋によつて齧られるものである以上、一定の限界がある従つて A をなるべく

小さくした方が $(P_0 - P_1)$ は大きくなる。

従つて cavity の容積が小さい程有利になり、この意味に於ても体積弾性率が大きい方が望ましいことにもなる。

また吸引の仕方にも問題が生じてくる。高い陰圧を形成するためには、諸筋肉の収縮にもとづく力を成る可く小さく作つた cavity の表面に集中的に作用させる必要がある。このことは一つの技術の問題である。実際に同様の実験と多数の被検者に対して行つたので

あるが、被検者によつて成績にひらきのみられたのは筋疲労と云うこともあつたが、斯うした技術的な面の問題も大いに関係したと思われる。

本論文の要旨は第37回日本生理学会に於て発表した。なお本研究は昭和35年度文部省科学研究費による助成を受けた。記して謝意を表する。

文 献

- (1) 宮川 清, 信州医誌 9巻, 820, 1960.