



医学に活かされる流体力学

——生体系の計測——

清水研究室

制御工学科

制御工学科・清水優史助教授は、学科内でたいへん人気が高い。その要因には、先生自身のユーモアのセンスもさることながら、その独特の研究内容が挙げられるであろう。今回、取材班は、その魅力あふれる研究を探るため、清水先生の研究室を訪れた。取材は、先生の御協力により終始スムーズに進み、また、たいへん興味深いお話を聞かせていただいた。



清水優史助教授



清水先生登場

血圧と血流量の計測——制御工学科の清水優史助教授が、現在取り組まれている研究課題である。清水先生は、元々は熱伝達や流体力学を専門とされていたが、現在はそれらを生体の計測へと応用されており、その内容は医学分野との関わり合いも深い。血液の流れに関する研究も、まさにその一つである。

医師の立場から今一番望まれていることは、患者の身体に傷をつけずに診断することである。しかし、その場合、実際に身体に傷をつける診断と比較すると、それほど正確にはいかない。例えば、現在一般に使用されている血圧計も、血管に針を刺して直接血圧を測る方法と比較すると、かなりの差が現れる。高血圧で

はないにもかかわらず高血圧と診断され、圧力降下剤を飲まされ続けたという例も報告されている。これらの診断をより正確なものにするためにも、生体のメカニズムを解明するのは重要な問題である。



血管からの不思議な音が研究のきっかけだった

清水先生の研究のきっかけは、東大の助手としてNASAで生体工学関係の仕事をされていたころ、血管の出す不思議な音に興味をひかれたことであつた。血管の外から圧力を

かけ一旦血流を止め、その下流側に聴診器を当てる。次第に圧力を下げていくと血流が再開し、ちょうど机をたたいたような硬い音がするが、圧力を下げ続けるとやがて聞こえな

くなる。この音の聞こえ始めと聞こえ終わりの圧力から、血圧の最高と最低を計測するのが、現在の血圧計の原理である。アメリカで自分の血管から発する音を聞かれた清水先生は、柔らかい血管からなぜそのような硬い音がするのか疑問を持たれ、日本に帰国されてから研究を開始された。

外圧が内圧より高いとつぶれる管を圧平管と呼ぶが、血管もその一種である。心臓から出た血液は、血管の中を圧力波として伝播する。血管のつぶれている部分では圧力波の伝わり方は遅いが、血流の圧力が高くなり血管がふくると圧力波の伝わり方が速くなる。そうすると、後方の血流が前方の血流に追いつこうとする。これは、海岸で起こる波と同じ原理である。海の場合は、重力波の伝わる速度は海の深さによって決まる。後方の重力波は水深が大きいために速く進むが、前方の重力波は水深が小さいために遅く進み、その

結果として、後方の海水が前方の海水を追い越し高波が起こる。だが、血液の場合は細い血管の中を進むため、後方の血流は前方の血流を追い越すことができない。そのために、不連続的に圧力が上がった血流が、大きな音をたてるのである。以上のような原理が、清水先生の実験と解析で明らかになっている。

このように、生体の計測といっても、様々なメカニズムがわからないと何を測っているのかわからないということがある。清水先生は、研究によってこれらを解明しようと試みられている。

「私は、元々は流体力学が専門でした。生体に関係した様々な流体には、おもしろくて、しかもわかっていないことがいっぱいあります。それらを、明らかにしていきたい。」

先生の研究次第では、さらに精度の良い計測機器の出現が可能なわけである。



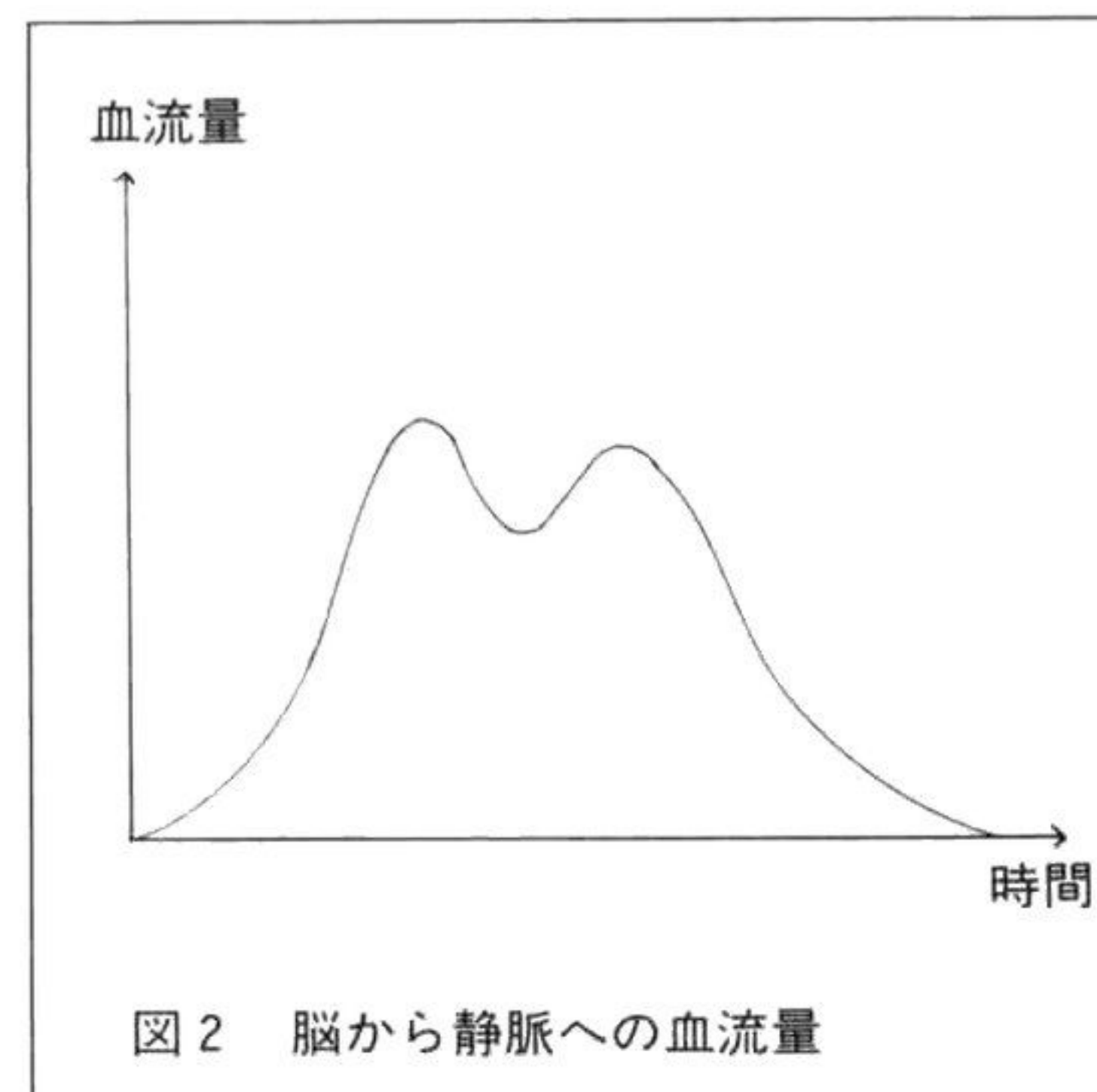
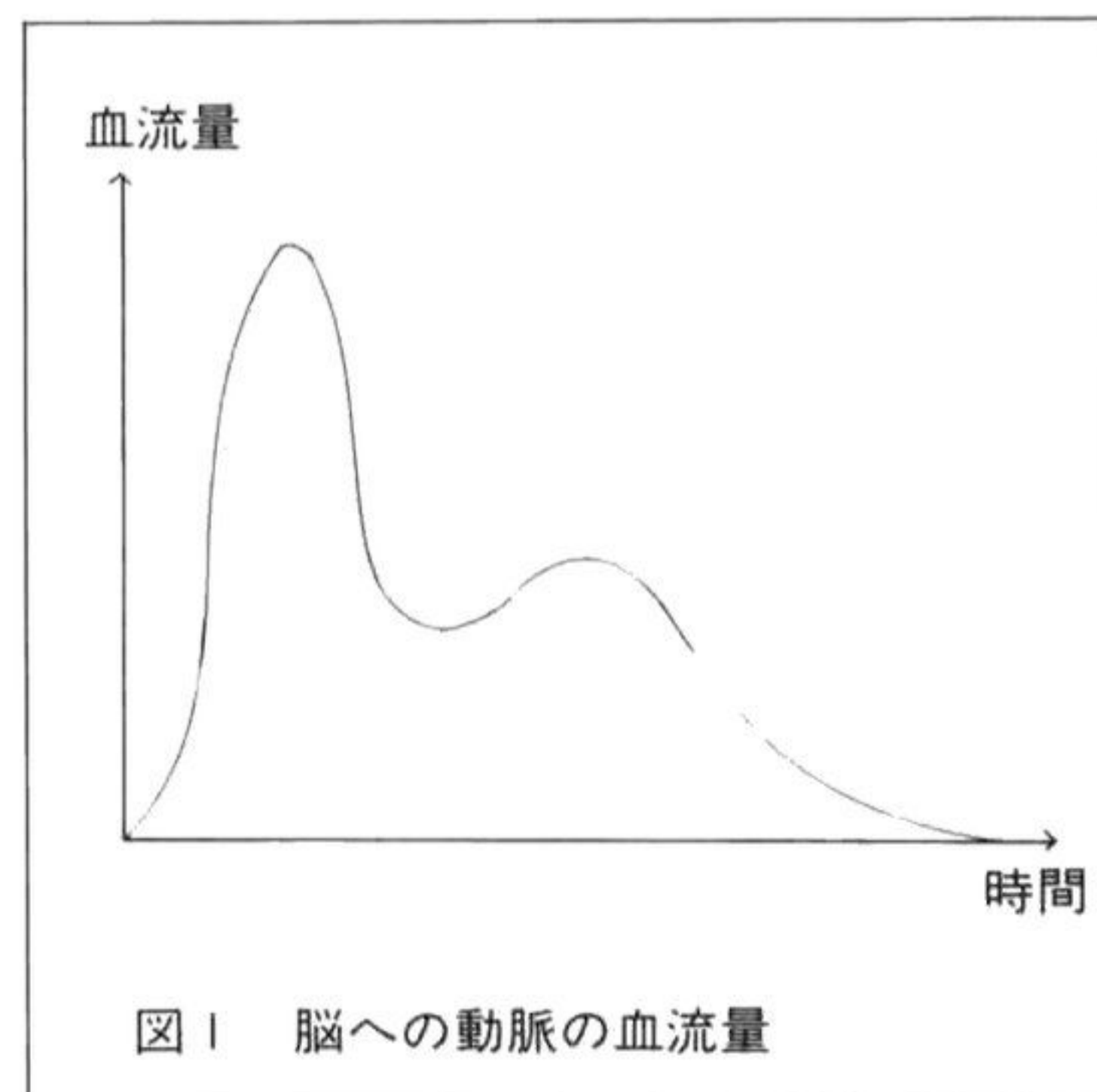
頭の重さの変化から血液の流量がわかる

先生がもうひとつ現在進められている研究が、血液の流量の問題である。血流量は、循環器にとって、血圧と同様に重要なものである。いくら血圧が高くても、血液がなければ酸素や栄養素を体中へ送ることは不可能である。また、血流量を計測することによって、動脈硬化などの疾患の兆しを早期に察知することが可能であり、健康管理という面で大きな効果を現すことができる。

それでは、現在どのようにして血流量は計測されているのだろうか。最もよく利用されているのは、超音波による計測法である。超音波を血管に向けて送ると、血液内の赤血球によって反射される。そのとき、赤血球は動いているため、ドップラー効果によって超音波の周波数は変化しており、その変化量を測定するこ

とによって血液の流速がわかる。そして、同じく超音波によって測定された血管の断面積と合わせて、血流量を計測することができるわけである。しかし、この場合、血流の速度分布を解析する必要があり、かなり難しい問題を残している。そこで、清水先生は、体の各部位の重量の変化から血流量を計測しようと研究されている。

人間の体中の血管は、自動的に伸縮することにより、血流量を調整することができる。しかし、唯一脳に関しては血流量を調整する機能がなく、ほとんど受動的に流れる量が決まってしまう。そこで、脳の入口には血圧を感知する機能が備わっており、人間の体は脳の入口の動脈の圧力を一定にするようにできている。清水先生は、現在、頭の重量の変化

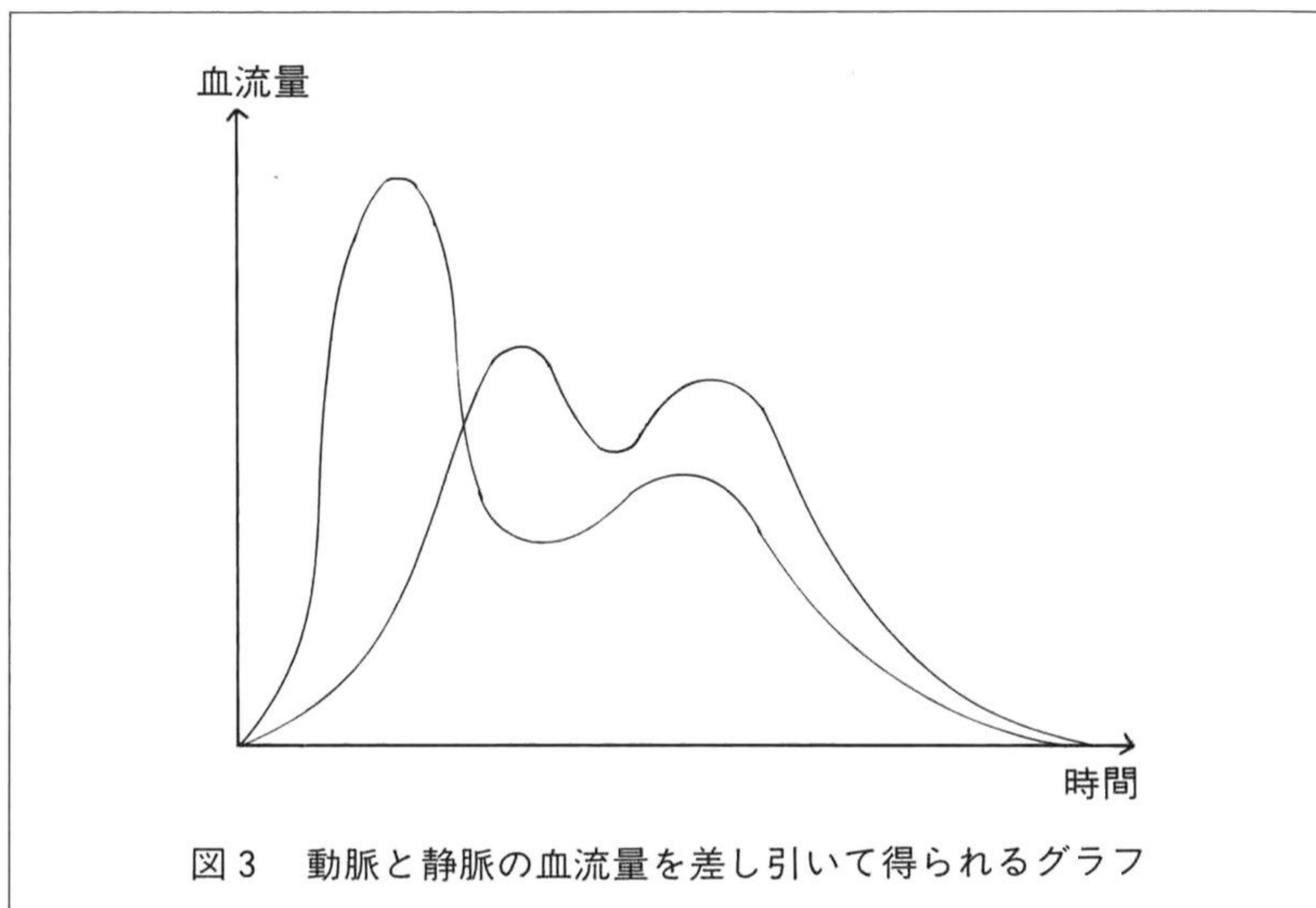


からその部分の血流量を計測しようとされている。脳への入口の動脈と静脈の血流量はそれぞれ図1、2のグラフのようになっており、脳に入る血液の流量と出る血液の流量の波形は一致していない。つまり、これらを差し引くことによって得られるグラフ（図3）の積分量が、頭の重量になるわけである。逆に、頭の重量を正確に計測し得られたグラフを微分すれば、動脈と静脈の血流量の差し引き分のグラフがわかるわけである。これを利用して、動脈と静脈のそれぞれの血流量も計測することができる。静脈は皮膚に非常に近い所を走っているため、少し押しただけで簡単に流れが止まってしまう。そうすると、頭には血液が入るだけで出ることがないため、頭の重量の変化から動脈の血流量がわかる。また、これらの差から、静脈だけの血流量もわかるわけである。

この計測法の問題点は、頭の重量

の変化をいかにして正確に測定するかにある。頭の重量の変化の波形をフーリエ変換することによっていくつかの正弦波と余弦波で表現すると、最高12～13ヘルツの高調波までが含まれる。ゆえに頭の重量なども考慮するとかかなり硬いバネが必要である。だが、そうすると、数グラムの重量の

変化を測定するのは不可能である。実際、血流による重量の変化は微少なもので、このままの方法ではほとんど測ることはできない。このように、体の各部位の重量の変化から血流量を計測するには、このように難しい問題が残されている。



「キリンの呼吸系の研究を将来やってみたい。」

「私がいつかやってみようと思っていることに、キリンの首の研究があります。」と言われる清水先生に、たいへん興味深いお話をしていただいた。

よく知られているように、キリンは、高い木の実などを食べるためにその進化の過程で首が長くなったと言われている。ここで問題となるのは、いくら首の長いキリンでも、酸素と二酸化炭素を交換できるのは肺だけであるという点である。気管のように呼吸に全く関与していない器官をデッド・スペースと呼ぶが、キリンの場合はそれが非常に長く、ほぼ3メートルもある。呼吸によって吸われた空気は肺に入らないと意味がないが、キリンの場合はそれが非常に困難なことになる。従って、キリンの呼吸は限界の線で行われていると、一般的に言われている。人間

でいえば、常に深呼吸をしているような状態である。そのため、キリンを少し高い所につれていくと、息が苦しくなるであろうと予想されている。ところが、清水先生によれば、この説はかなりあやしいものであるという。確かに、キリンも長時間走ることができることを考えると、その矛盾は明らかである。

これと同じ様な例が、他の動物の場合にも見られる。犬や鳥には汗せんがなく、走って熱くなると呼吸は短く速くなる。そのときの一回当りの呼吸量はとても少なくなり、空気は肺まで直接届かなくなる。だが、実際には大気と肺の内部の空気は、しっかりと交換されている。同じ様な現象が、手術のときに利用されている。人間の口にスピーカーを近づけると、空気が送られてくる。そこで、手術の際に患者が呼吸をすると

手術が困難になるため、患者の呼吸を止め、人工的に空気を送るわけである。この場合、空気が気管に送られるだけで、ガス交換が行なわれることになる。

清水先生は、専門の流体力学を駆使し、将来この謎を解明しようとされている。

「流体力学の普通の考え方からすれば絶対死んでしまうような呼吸なのに、酸素と二酸化炭素が非常によく交換されている。そこに、何か流体の秘密があるに違いない。」

原因の1つとして考えられることは、一様ではない空気の流れが呼吸系内で存在するということである。このような流れ方は、流体力学でも認識されている。粘性のある流体がパイプの中を流れると、その速度分布は図4のような放物線になる。もし、流体の進行方向に対して一様な圧力をかけて流れを止めようとする、その一瞬に流体はどのような動き方をするか。速度の速い流れの中心部では圧力に対抗して流れ続けようとするが、速度の遅い周辺部では圧力に負けて逆方向に流れる。この原理をキリンの呼吸系にあてはめてみよう。キリンの気管は、気管分岐で2本の気管支に分かれている。空気を吸ったとき、気管分岐の周辺では図5のような速度分布で空気が流れる。逆に、空気をはいたときは、図6のような流れ方をする。気管支からの空気が気管分岐で合流することによって、流れの中心部の速度が遅くなるわけである。これらの空気の速度を平均すると、図7の様な二

次流れになる。肺の中の二酸化炭素は徐々に上に向かい、大気からの酸素は徐々に下に向かう。すなわち、深呼吸をしなくても、空気はキリンの長い気管を通じて自動的に入れ換わるわけである。

以上のようなことが、はたしてキリンの呼吸の謎を解く鍵であるのかは、まだ明らかではない。しかし、キリンの呼吸の原理が清水先生の研究によって解明されるのは、それほど遠い先のことではないだろう。

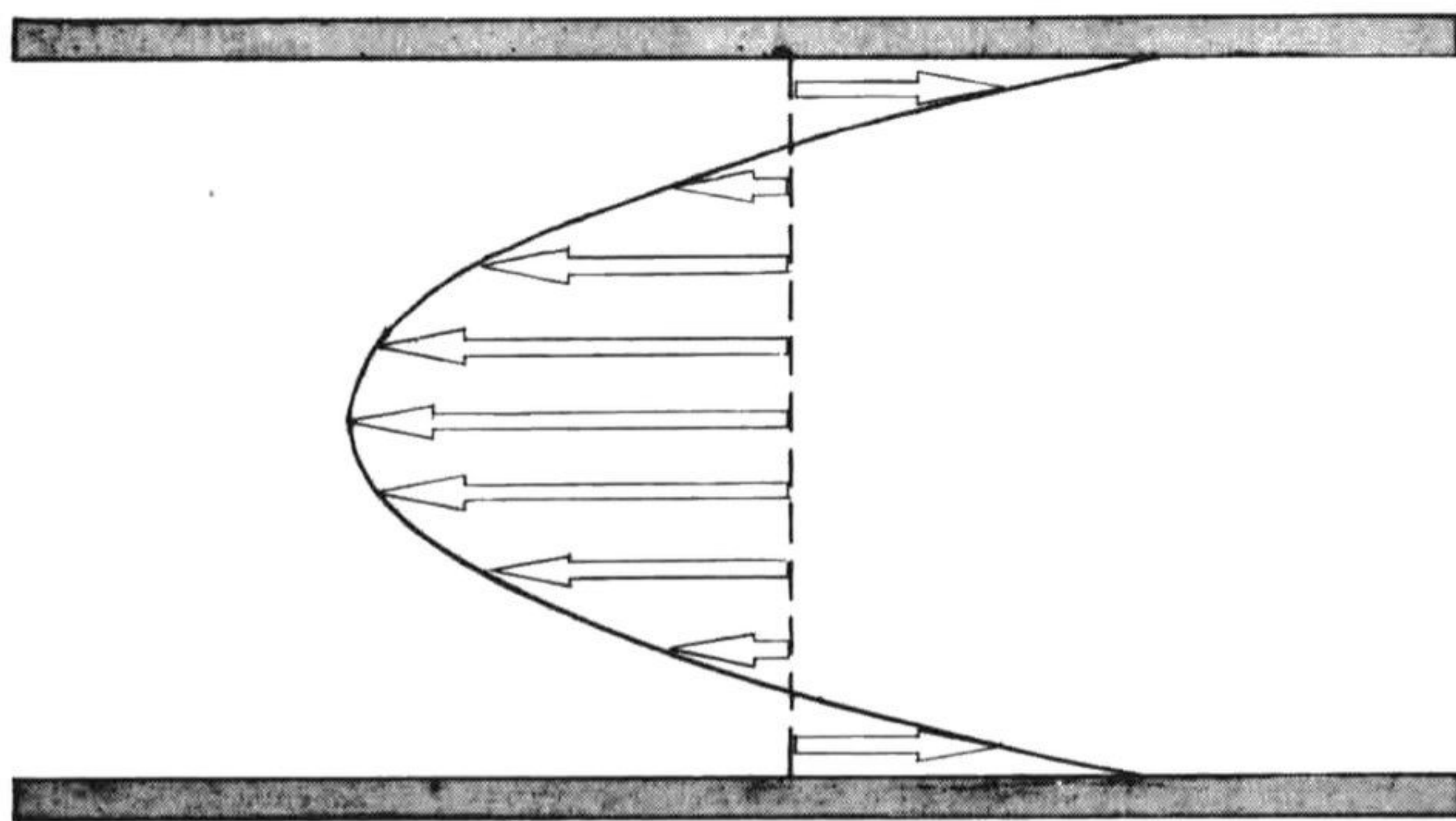


図4 粘性流体がパイプの中を流れる時の速度分布

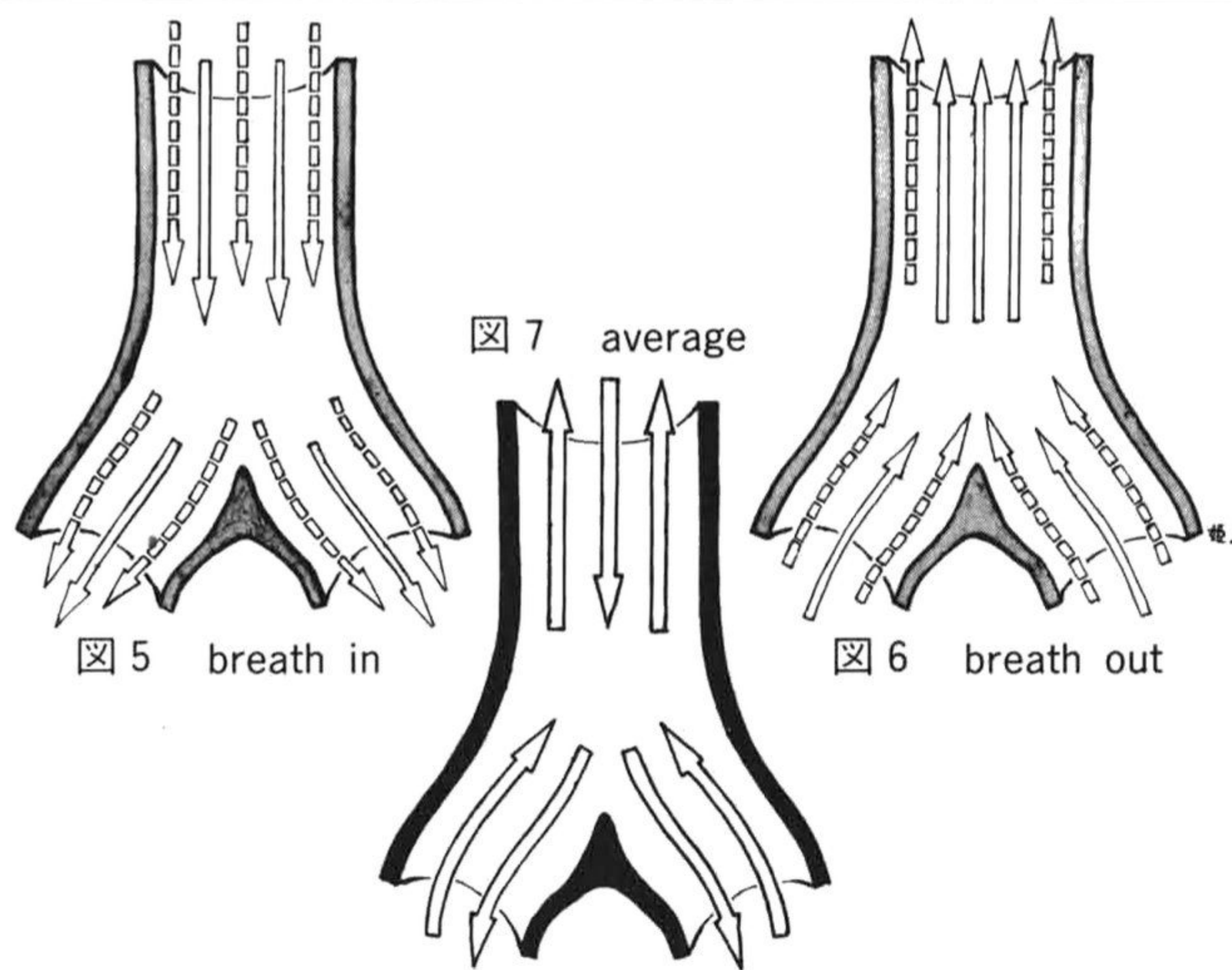


図5 breath in

図6 breath out

図7 average



医学と工学——望まれる研究協力体制の実現

清水先生の研究内容は、医学との関わりが深い。しかし、清水先生御自身は医学関係者との交友はあるものの、研究協力はされていない。その根底には、医学者と工学者の考え方の違いがある。医師にとっては常

に患者が対象であり、その疾病を治療することが最終的な問題である。そのため、疾病に対して効果的な診断法があれば、多少原理が未解明であっても、実用に移すことを希望する。しかし、エンジニアにとっては

その原理が興味を中心であり、それが解明されるまで研究が必要である
と考える。そこで、清水先生は、現在、医学関係者とは別に独自に研究

をされている。そして、将来はそれが医学関係者の興味をひき、実用に移されることを望んでおられる。



研究に対する好奇心が新しい発想を生む

これまでに述べてきたように、清水先生の研究にはたいへんユニークなものが多い。それでは、このような研究に清水先生を駆り立てるものは、いったい何であろうか。この質問に対し、清水先生は次のように語られた。

「科学者が研究をするのは、様々な動機があります。最先端だからという理由で研究対象を選ぶ人もいますが、私の場合は、常に自らが興味を抱けるものを研究しています。当然、そういった最先端のものと自分の興味が一致すれば、研究しますけど。」

清水先生は、学生時代、飛行機のジェットエンジンにたいへんな興味を示されており、それが熱伝達や流体力学を専攻されるきっかけとなっている。また、生体計測の研究も、元は先生御自身の好奇心から来たものである。このように、清水先生の

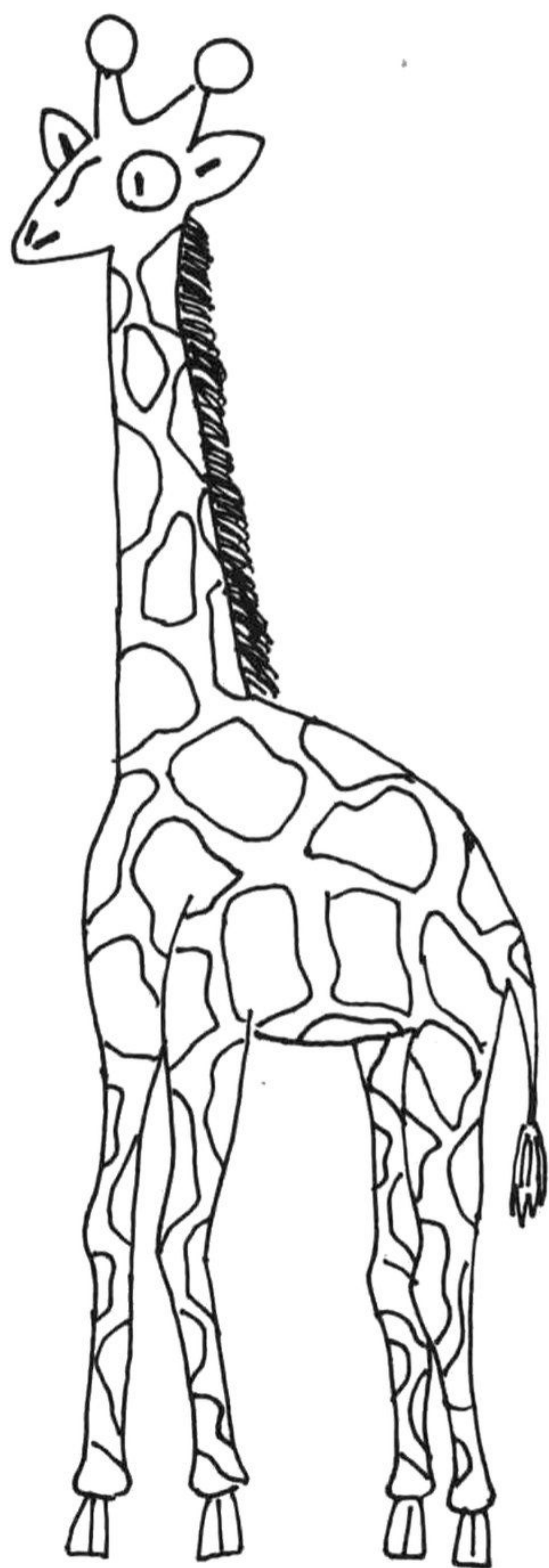
研究の根底には、常に先生御自身の興味がある。ここで肝心なのは、清水先生が、常に自分のやりたいことをはっきりとされているということである。このような姿勢は、東工大生を見られる目にも影響しているようだ。

「東工大生はもっと夢を持った方がいい。今は、少し夢がないように思える。もし自分にやりたいことがなかったら、勉強は強要されたものになってしまうし、授業も一方通行になってしまう。」

さらに、制御工学に関する質問の際にこう語られた。

「あまり学科の名前に左右されるのは良くありませんね。自分がどの学科にいても、本当にやりたい研究があれば、何とかやる方法はありますから。」

この言葉にも、清水先生らしい考え方が表れている。



清水先生は、制御工学科内でもユニークな先生として知られており、たいへん人気が高い。今回の取材に対しても、たいへん好意的に御協力くださった。特に、東工大生はもっと夢を持つべきだなどの考え方には、

取材陣も大きな感銘を受けた。清水先生の研究に対する姿勢には、科学者のあるべき姿として、東工大生にとってたいへん見習うべき点が多いであろう。

(宮木)