



呼吸器画像を4次元的に理解する 第2回 やまごころでサイエンス

北岡 裕子

株式会社 JSOL エンジニアリング事業部 学術顧問

1. かた・ち・から・くり

日本では、学術用語はすべて漢字で記されるが、日常会話ではやまとことばが用いられている。構造を平たくいうと「かたち」であり、機能は「はたらき」である。そして、「構成要素間の関係が時間的にどのように変化するか」は、「からくり」ということばであらわされる。つまり、「かたち」に「からくり」が加わって、「はたらき」になる。「からくり」に相当する学術用語は「機構, mechanism」である。医学用語としては「機序」が用いられる。

「かたち」という言葉は、「かた」と「ち」に分解される。「かた」の漢字は「型」で、空間を意味する。「ち」の漢字は「霊」で、目に見えない力を意味する。「いのち」「いかずち」「やまたのおろち」の「ち」である。やまとことばの創始者たちは、「かたち」を「変わりうる力を備えた構造」としてとらえていたように思われる。現代物理学の文脈でいうと、エネルギーの空間分布が「かたち」である。アインシュタインの数式 $e=mc^2$ が意味するところである。

「からくり」という言葉も、「から」と「くり」に分解され、「絡」と「繰」という漢字があてられる。これらの漢字の偏が「糸」であることは、構成要素が糸によってつながっており、それが周期的に変化するさまを表現することばであることを示している。からくり人形の機構が、まさしくそれである。「から」は方向や関係を意味する。また、「くり」は周期的な運動を意味する。「くり」と発音するときに舌尖を丸める動きが、物体の回転運動を模していると考えられる。英語の cycle も同じである。物体の回転周期運動は、ヒトが「時間」という概念を形成する

のに不可欠な現象である。「時を刻む」という表現がある。振り子の周期運動によって時間の経過が測られることに由来する表現である。日、月、年、といった時間概念も、地球や月の周期運動に由来する。これらの周期運動を発声器官で模倣したのが「くり」という言葉である。

以上みてきたように、「かたち」と「からくり」を構成する4つのやまとことば、「かた」「ち」「から」「くり」は、それぞれ、物理学の基礎概念である「空間」「エネルギー」「作用」「時間」に対応していることがわかる。さらに、「ち」と「から」を組み合わせると「ちから」になる。解析力学において「力」が「ポテンシャルエネルギーの勾配ベクトル」と定義されていることと、全く同じである。

筆者は日本語と英語以外は漢語とドイツ語を少々知っているだけであるが、物理学の基礎概念とその組み合わせをこれほど簡潔明瞭に表現する言語は、日本語だけではないだろうか。「かたちからくり」を「かたち・からくり」と分離すれば、幾何学と機構学である。「かた・ちから・くり」とすれば、時空における力のありよう、すなわち「力学」である。さらに「かたちの(できる)からくり」とすれば「形態形成」である。これらのことばが人類共有の知になるように、という願いを込めて、アルファベット表記 "CataChiCalaCli" を考案した¹⁾。正式なローマ字表記とは異なるが、「くり」と "cycle" の類似性を考慮して、また、綴りの対称性を考慮して上記の表記とした。略して4Cである。4Dと語呂が合い、なじみやすいと思う。

日本人の中には、科学は西洋からの借り物で、

連絡先：〒460-0002 名古屋市中区丸の内2-18-25
株式会社 JSOL エンジニアリング事業部 学術顧問 北岡 裕子
TEL：052-202-8181 FAX：052-2028172

日常生活とは別の世界で営まれる難解な学問、という思いが強い。また、「日本人は欧米の科学にプラスアルファすることはできても、独自の科学を生み出すことはできない」と考えている研究者も少なくない。しかし、古代の日本人が物理学の主要概念を明確に表現したことを思えば、また、現代の日本人がそれらのことばを日常的に用いていることを思えば、日本の科学に独自の深みと広がりがあることを、筆者は確信している。

2. 折り紙モデリング

第1回の講座で述べたように、筆者は、気道の3Dモデル²⁾を作成した喜びもつかの間、呼吸機能を理解するには4Dに拡張しなければならないことを悟った。気道を通過する気流は、肺実質の膨張収縮運動によって空気が移動することで生じるからである。肺実質とは肺胞壁の集合であるから、肺胞系の4Dモデルを作成しなければならない。すでに作成していた肺細葉の3Dモデル³⁾を土台にして、肺胞系の4Dモデル作成にとりかかり、2004年に完成した。しかし、論文投稿から掲載⁴⁾まで3年間、掲載から学界の認知までさらに5年間を費やした⁵⁾。現在の呼吸器学の根本的な見直しを迫るモデルであったからである。学界の定説に反したことは別に、肺胞4Dモデルが受け入れられ難かったもう一つの理由に、複雑な3次元構造が複雑に変形する様子を論文の紙面やモニタのディスプレイで伝えることの難しさがあった。そこで、日本の伝統工芸である折り紙で、コンピュータモデルと等価なモデルを作成する方法を考案した¹⁾。

折り紙は、2Dのシートから4D構造を生み出す。折り紙は彫刻のような剛体ではなく、折り目の角度を変えることで運動を表現することができる。生物が2Dの細胞シートから4D構造を形成するのと同じである。折り紙にも、生物と同様に、折り方の手順、すなわち、形態形成のルールがあり、幾何学と力学に法った構造と機能を持つ。実際、折り鶴やヤッコさんなど、最もポピュラーな折り紙は、生物を模倣したものである。そして何よりも、折り紙はその気になれば誰でも作成できる。折り紙モデルのおかげで、筆者らの肺胞4Dモデルを支持する研究者が急増した。なお、筆者らは、肺気腫にお

ける気管虚脱のメカニズムも、気管の折り紙モデルを用いて説明している。各論で詳述する。

3. 百見は一作に如かず

第1回講座で、人間は紙やコンピュータディスプレイのような2D媒体で情報を伝達する、と述べた。しかし、映像技術が発明される以前、さらには文字言語が発明される以前の人類は、音声を含む自らの身体で情報を伝達していたはずである。身体という4D媒体である。2D画像(文字も画像の一種である)を認識する際には、視機能だけで事足りるが、対象が3次元以上の構造体であると、表面観察だけでは不十分で、視点を変えたり、対象を動かしたり、分解したりと、現代人であっても、古代人と同様、自らの身体を動員しなければならない。日本語の「まなぶ」は、「まねぶ」「まねる」が語源である。「まねる」とは、対象のもつ4次元特性を自らの身体を用いて再現すること、つまり、運動系を用いて空間の広がりと時間の流れを再構成することを意味する。4次元時空を師匠と共有することで伝授される「職人芸」は、「まなび」の典型である。

「百聞は一見に如かず」ということわざがある。約二千年前、言語システムは確立していたものの、写生以外には画像情報伝達システムがなかった時代の中国の諺である。現代は、画像情報が氾濫している。しかし、画像情報が必ずしも事実でないことは、昨今話題の論文捏造の手段が画像操作であることから明らかである。また、悪意の有無にかかわらず、ヒトは「見たいものを見る」動物であるから、画像撮影において恣意性を排除することは容易ではない。画像情報だけでは、文字通り、表面的な理解に終わるか、もしくは、誤った理解に陥る危険がある。

現代に必要なことわざは、見るだけでなく作ること、「百見は一作に如かず」であると筆者は思う。英語だと Making is convincing である。believe が主観的であるのに対して、convince には自他を納得させる客観性がある。「つくることで理解する」という認識手法は、構成論的(constructive, もしくは synthetic)アプローチと呼ばれる。対象を観察し分析する、といった従来の科学研究の手法に加えて、工学的な技術を用いて対象を再構成する手法である。ロボット研究や細胞工学など、日本が世界を主

導している分野で用いられている。日本のものづくりも、「つくることで理解する」という哲学によって支えられていると思われる。19世紀の写真の発明が近代西洋科学にもたらした功績は多大である。しかし同時に、人間の認識過程を4次元から2次元に縮退させたことを看過してはならないと、筆者は思う。

4. 魂は横隔膜に宿る

古代ギリシャでは、魂は横隔膜に宿ると考えられていた。しかし、その考えは、近代西洋医学ではSchizophreniaという学術用語にその痕跡を留めるだけである。一方、アジア諸国では、古来より呼吸法の重要性が伝えられており、ヨガ(インド)や気功(中国)、丹田呼吸(日本)など、腹式呼吸を基本にした心身鍛錬法が今なお続いている。最近、筆者らは、言語と横隔膜の関係に関してきわめて興味深い知見を得た⁶⁾。そして、古代人は、現代人が想像するよりもはるかに深く横隔膜の機能を理解し、その知がアジアで息づいていると、考えるに至った。以下に紹介する。

ヒトの言語中枢はほとんどの例で左大脳半球に存在するが、その理由を説明する仮説は、筆者の知る限り、いまだ提唱されていない。ヒトの口唇や、舌、声帯のような音源器官は完全に左右対称で、脳機能の局在を発声器官で説明することはできない。しかし、発声はこれらの音源器官だけでなく、気流を生み出す呼吸器系も大きな役割を果たす。ヒトの発声は、特殊な場合を除き、呼気時になされ、沈黙時とは異なる呼吸様式になる。安静沈黙時には、吸気時に収縮した吸息筋(外肋間筋と横隔膜)が弛緩することによって、呼気流が生じる。しかし、発声時には、主要呼息筋である腹筋群が随意的に収縮して横隔膜の変位を制御する。これにより呼気流量が制御され、短い間を挟んだ意味のある発話が可能になる。肺は左が2肺葉、右が3肺葉に分かれているが、総容積は左右ほぼ等しい。呼吸器系および呼吸筋群にも左右差はない。しかし、横隔膜の下に位置する腹腔内臓器は左右で大きく異なる。人体最大の充実性臓器である肝臓が右に位置し、人体最大の管腔臓器である胃が左方に位置している。腹筋群の生み出す腹圧の変化に対して、肝臓はほとんど変形しないが、胃は高度の弾性変

形をきたしうる。つまり、右横隔膜の拳上は腹筋の収縮と同期するが、左横隔膜の場合は同期しない場合もありうる。横隔膜の位置情報は迷走神経知覚枝を介して対側の脳半球に伝えられる。右横隔膜の位置情報が優先的に採用されることが言語中枢が左半球に局在する理由であろうと、筆者は考えた。

この仮説を検証するために、健常ボランティア(右利き)の2D-ダイナミックMR画像を撮像した⁶⁾。沈黙安静時には、左右の横隔膜の運動は完全に同期していたが、歌唱中は左横隔膜が発声開始直後に時々奇異的な動きを示した。腹筋の収縮によって生じた力が、右側では肝臓を介して忠実に横隔膜に伝達されるのに対して、左側では、胃の変形によって伝達が修飾されるためである。また、沈黙安静呼吸中には左右差が認められないのは、沈黙安静時は腹筋の収縮が起こらないためである。

ヒトの直立歩行の起源としては、(1)上肢を自由にして運搬や道具の使用に用いる、(2)眼球を高位に保つことで視界を拡大する、などの仮説が提案されているが、いまだ定説はない。筆者らは、立位によって横隔膜の法線方向が重力と一致することに注目して、「歌を上手に歌うため」という仮説を提案している⁷⁾。鳥、蛙、テナガザルなど、歌を歌う動物は、いずれも上体を直立させて鳴く。上体を直立させると呼気流発生器官(気囊、のど袋、横隔膜)の運動が重力方向に一致し、精密な制御が可能になる。このことが、歌う動物が直立する理由と考えられる。ヒトは哺乳類の中で最も歌が上手であり(発話も歌の1種である)、かつ、移動中でも上手に歌うことができる。移動中の情報交換は、狩猟などの集団行動の精度を向上させる。道具の使用や視界の拡大も重要であるが、情報を共有する手段があつてこそ、道具の使用技術や視覚情報を集団として保持し、次世代に継承できる。横隔膜を水平にして移動することで、精妙な発声と緊密な情報交換を進化させ、ついには集団に固有の言語体系を構築したと考えられるのである。

このようにみえてくると、古代ギリシャ人が横隔膜を魂の住処と考えたことが納得できる。彼らは、発声の際の腹筋と横隔膜の運動を理解していたのではないだろうか。ギリシャ語のPneumaは、空気を意味するとともに魂を意味する。英語のspiritも

同様である。それではなぜ、古代ギリシャの知が西洋社会で継承されなかったのか？ 筆者が調べた限りでは、アラビア医学にも呼吸法に関する記述はないようである。以下に私見を述べる。そもそも哺乳類の呼吸運動は、自らの呼吸筋を用いて胸腔に陰圧をつくり、大気を引き込む「陰圧呼吸」である。当然ながら、その主役は横隔膜である。多神教社会では、自然界に偏在する「Pneuma」が体内に入り、横隔膜に宿ると解釈されたであろう。一方、ユダヤ・イスラム・キリスト教圏では、唯一神が被造物に spirit を与える「陽圧呼吸」と解釈されたため、横隔膜が表舞台から姿を消したのではないだろうか。

5. 「丈夫で長持ち」がキモ

ヒトが所属する哺乳類は、哺乳による発育で定義されている。しかし、哺乳するのは誕生後のごく短い期間だけであり、代替栄養物が与えられたならば仔は発育する。一般に、グループの定義はメンバーがもつ属性でなされる。(1) すべてのメンバーがもち、(2) メンバーだけがもち、(3) その属性なしではメンバーが存在しえない、といった属性で定義されるのが望ましい。果たして、3つの条件を満たす属性、もしくは器官が哺乳類にあるのだろうか。ある。横隔膜である⁷⁾。卵生のカモノハシにも横隔膜がある。ワニ(爬虫類)の中には、横隔膜に類似の膜を持つものがあるが、胸腔と腹腔を分離するものではない。体腔を二分する横隔膜を持つのは哺乳類だけである。横隔膜による体腔の分割は、脊椎動物の進化における位相幾何学的転換であり、これにより、哺乳類は肺胞肺という精妙な呼吸器官を作りあげた。胎生も、横隔膜なくしては実現しない再生産様式であるが、卵生哺乳類や有袋類が存在することは、胎生が横隔膜の主産物ではなく副産物であることを示している。

横隔膜の主産物である肺胞肺は、しかし、鳥類の肺よりも酸素摂取効率が低いことが知られている。鳥類は横隔膜のかわりに複数の空気嚢を「ふいご」として使い、新鮮な吸入気が終始ガス交換部に流入する仕組みになっているので、ガス交換効率が哺乳類よりも高い。それゆえ、哺乳類の肺は、ガス交換装置としては二級品とみなされている。過去に「哺乳類は横隔膜類」と主張した研究者は皆無ではないと推測される。しかし、万物の霊長たるヒトが

所属する哺乳類を二級品で定義することは、学界の構成員の賛同を得られなかったのではないだろうか。鳥類の肺の高い酸素摂取能力は、長時間の飛行や高地での生存を可能にしている。恐竜も鳥類型の肺を持っていたことが化石から推定されており、高い酸素摂取能力が恐竜を巨大化させたと考えられている。しかるに、現在の地上の覇者は哺乳類である。恐竜絶滅後、小型化した子孫である鳥類は何ゆえ空に逃げたのか？

肺の性能は、ガス交換機能だけで測られるべきではない。空気呼吸をする動物は、空中の浮遊粉塵を吸入することは避けられない。大気中の酸素濃度が十分であれば、吸入粉塵の処理能力が生存を左右する大きな要因となる。生体にとって最も無害な処理方法は、体内に沈着させないでそのまま呼吸とともに排出することである。ヒトにおいては、粒径 0.5μ の粉塵の 90% はそのまま呼気中に排出されるが、鳥類では 50% しか排出されないとする実験報告がある⁸⁾。この違いは、気流経路の違いで説明できる。哺乳類型の気流路の最小径は数十 μ で、吸入粉塵の再排出に十分なサイズを保持しているが、内径数 μ の空気毛細管を持つ鳥類型の肺にあっては、空気毛細管に達した粉塵の再排出は困難と考えられる。哺乳類の肺は酸素摂取効率において劣るものの、隕石落下や火山噴火などによる大気中浮遊粉塵に抗して、安定かつ持続可能な酸素摂取システムである。このことが、鳥類に優る繁栄を哺乳類にもたらしたと考えられる。丈夫でながもち、LOHAS (Lungs Of Health And Sustainability) である。恐竜絶滅の原因は、浮遊粉塵が太陽光を遮断して地表温度が低下したため、とする仮説が有力であるが、実は、塵肺症が原因だったかもしれない。現在人類は、自然界にある大気中浮遊粉塵よりもさらに微小な浮遊粒子を人工的に大気中に拡散し続けている。このままでは、人類が第2の恐竜にならないとは限らない。

おわりに

医学研究が、その時代その社会の文化的影響を受けることは避けられない。重要なのは、影響に対して自覚的であることだろう。「かたちからくり」と「ものづくり」にもとづいて、新しい医学を日本から世界に発信したい。

参考文献

1. Kitaoka H. A 4D model generator of the human lung. *Forma* 26:19-24, 2011.
2. Kitaoka H, Takaki R, and Suki B. A three-dimensional model of the human airway tree. *J. Appl. Physiol.* 87: 2207-2217, 1999.
3. Kitaoka H, Tamura S, and Takaki R. A three-dimensional model of the human pulmonary acinus. *J. Appl. Physiol.* 88: 2260-2268, 2000.
4. Kitaoka H, Nieman GF, Fujino Y, Carney D, DiRocco J, Kawase I. A 4-dimensional model of the alveolar structure. *J Physiol. Sci.* 57: 175-185, 2007.
5. Nieman GF. Amelia Earhart, Alveolar Mechanics and other Great Mysteries. *J. Appl. Physiol.* 112:935-936, 2012.
6. Kitaoka, H, Chihara, K. Asymmetry of the diaphragmatic motion during vocalization may cause the laterality of the speech center in the brain. *Forma* 26: 25-7, 2011.
7. Kitaoka H, Chihara K. The diaphragm: a hidden but essential organ for the mammal and the human. *Adv Exp Med Biol*, 669, 167-171, 2010.
8. Heyder, J. Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract and consequences for regional targeting in respiratory drug delivery. *Proc Am Thorac Soc* 1: 315-320, 2004.

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619