



生物をお手本に——バイオメカニクス

——伊能研究室～機械物理工学科——

伊能研究室の研究課題の一つにバイオメカニクスがある。近年ではバイオというと、本学の生命理工学部のような分子生物学、遺伝子工学といったイメージを思い浮かべる方が多いと思う。

バイオという言葉がつく学問には、バイオケミストリー、バイオロニクス、バイオニクス、バイオメカニクスなどがある。バイオメカニクスもバイオという言葉がついているが、これは機械工学の視点から、生物をとらえていこうとする学問である。

バイオメカニクスという学問は、日本語でいうとどんな言葉になるのだろうか。伊能先生がおっしゃるには「生物機械工学」となるそうである。生物は調べれば調べるほど合理的に作られているという事がわかってくる。生物そのもの・生物がおこす現象について化学的、機械工学的に人間が学ぶべき事柄はたくさんある。生物のもっている機構を機械工学的に研究していくと今までにはな



伊能 教夫 助教授

いような仕組みを開発することができるかもしれない。バイオメカニクスとはそういった生物の性質などを機械工学的に研究し我々の生活に役立てていこうという学問である。いくつかある研究課題のうち、最近活発に研究しておられる顎骨の工学的研究についてまず伺う事にした。



骨ってうまくできている——顎骨の工学的研究

まず、伊能先生が顎骨の研究に取り組むようになったきっかけをはなして下さった。

最近、子供の顎が昔と比べ弱くなってきているという話を耳にする方も多いと思う。また、最近の若い人は顎がしっかりとしていないとも言われている。ところで、我々の食生活を見てみると柔らかい食べ物が多く、固い物をあまり食べていない。そこで、顎の弱い人が増えてきたことと、柔らかい物ばかり食べていることには関連があるのではないかとされている。

しかし、これらの関連性については、まだ医学的、力学的にはっきりと証明されているわけではない。ものを噛んだときの顎骨への力のかかり方に関する研究は、これまで実はあまり行われていなかった。これは、医学と工学の研究者が共同

して研究する機会があまりなかったためである。つまり、医学、歯学者だけでは、詳しい解析を行うことが困難であり、工学者だけでは、実体の伴わない解析を行う危険性があるからである。そういう事情があつてか、数年前に東京医科歯科大の先生から、伊能先生の師匠にあたる、梅谷陽二先生のところに研究を一緒にしないか、というお話があつた。そこで、当時その研究室の助手でおられた伊能先生が、人間の顎に関する研究をはじめることになったのである。最近では昭和大学の歯科の先生と共同でこの研究をなさっている。

人間に限らず、生物の骨というものはうまくできている。骨は外力に対して最小の材料で最大の強度を得ているという説があり、これを、骨の最小材料最大強度説という。つまり骨は、無駄なく

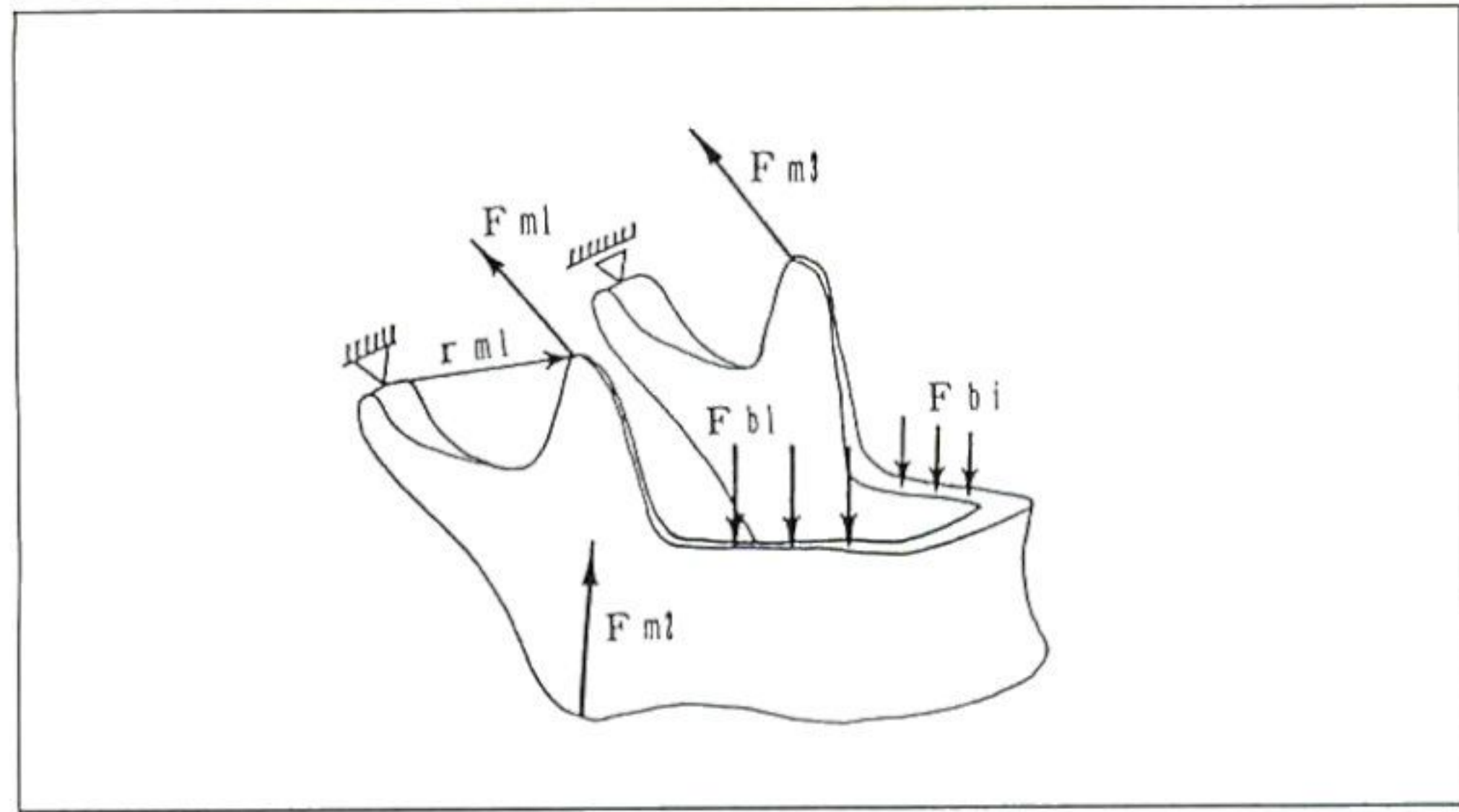


図1 実際の力学設定

強くできている。先程述べたように、骨の研究は医学や生物学の領域であった。よって、工学の立場から、この最小材料最大強度説の検証をしようという試みは、あまり行われていなかった。現在伊能先生は、下顎骨（下アゴの骨）の形状を探るため、ものを噛んだときの顎への力のかかり方を研究なさっている。

この研究のように力学的な解析を行う場合に、実際の骨やプラスチック等の模型を使って実験的に各部にかかる力を測定する方法の他に、次のような方法が取られる。まずコンピュータのデータ上に仮想的な顎のモデルを考える。そこに力学的な設定（どこで固定している、どこから力が働く等）を行って力のかかる状態を計算する。つまり計算のみで力学的なデータを得るという方法である。伊能先生の研究でも、旋盤などを使って模型を作ることなく、仮想的なモデルでのコンピュータによる計算から、顎への力のかかり方のデータを出している。

まず、より精密な顎のモデルを設定にするために、生身の人間の顎の形状を、知らなければならない。そこで、CTスキャンで人の下顎の断層写真を何層か撮る。次に、それらを積み重ねて三次元的なモデルを作りあげていった。いろいろな状況を比較するために、一人の人間だけでなく、下顎の骨の形が左右対称である人と、非対称である人を選んでいる。

この実験ではまず、この二人の人に感圧シートという、力が加わると力の大きさに応じて発色するシートを噛んでもらう。このシートで得られる力の分布をもとに、下顎全体での力のかかり方を、コンピュータで計算して、導き出している。

それぞれのモデルで、まず、左右両側の歯で噛みしめたと仮定して計算してみた結果、対称形、

非対称形のどちらも、ほぼ全体の部分に均等に力がかかることがわかった。しかし、他の部分より若干強い力がかかる部分が、いくつか見られた。この、力が強くかかっているところが、対称形の人は対称に、非対称な人は非対称に分布していたのである。

次に、食物を噛むときは、両側よりも片側で噛む場合が多いので、片側噛みしめで同様な計算を行った。その結果、噛んでいる部分では当然大きな力がかかっているが、噛んでいない側でもかなり大きな力がかかっていることもわかった。

先程の対称形、非対称形の二つのモデルでは、形状を個々人の顎に近づけたのだが、材料的な面も考慮に入れる必要がある。というのは、人間の骨の強さは均等に分布しているわけではないからである。例えば緻密骨と呼ばれる外側の骨も一様な強さではなく、ばらつきがある。そこで先のモデルのもととなった二人の人の、下顎骨の強い部分、弱い部分の分布を調べることにした。これには次のような方法を使っている。骨の強さは、その部分のカルシウム密度の大きさに関係がある。一般にカルシウム密度が大きいほど骨は強いのである。つまりカルシウムの密度分布を調べれば、骨の強弱の分布がわかるのである。カルシウムの

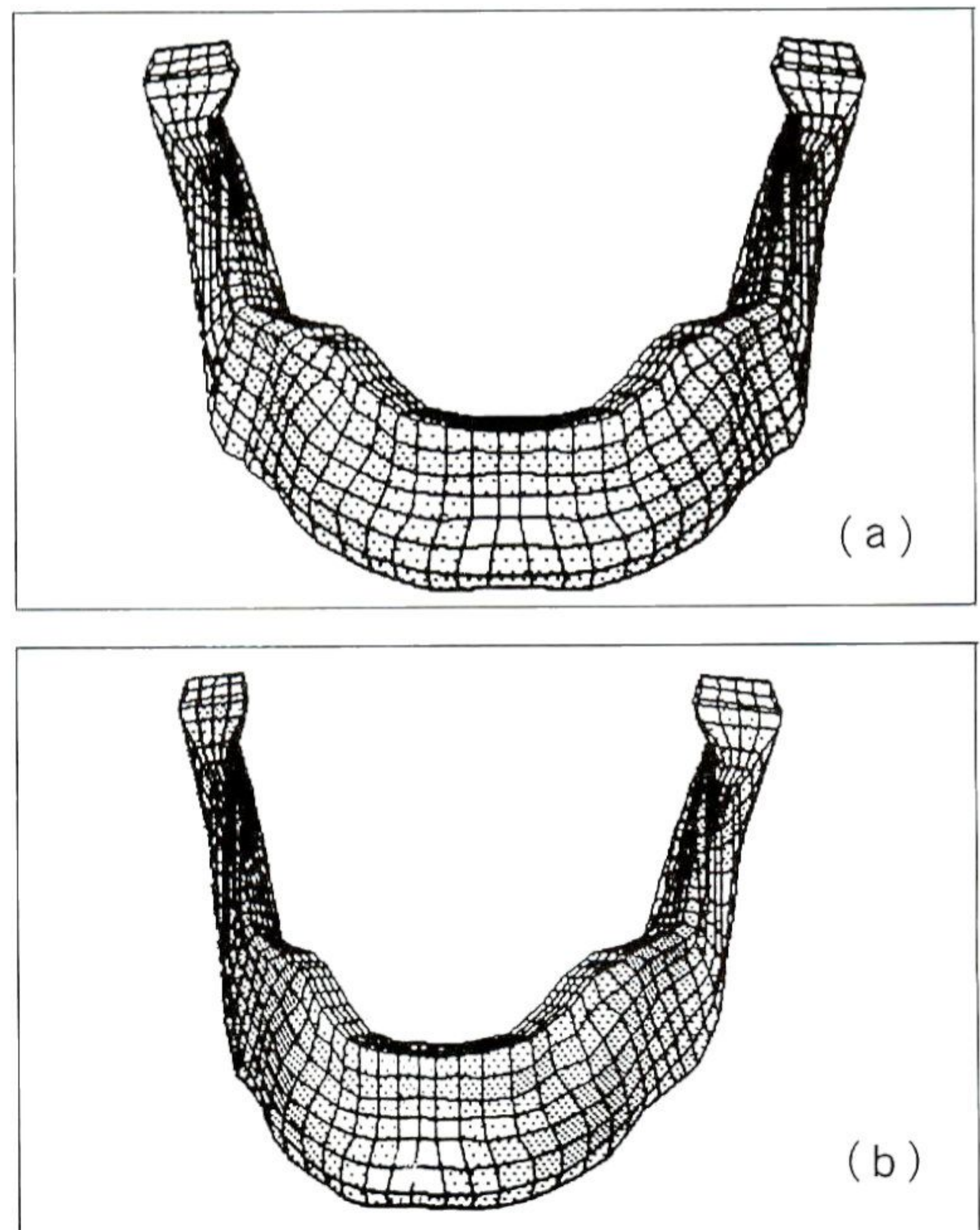


図2 コンピュータによる (a) 左右対称と (b) 非対称な人の顎の解析結果。色が濃いほど力が強くかかっている。

密度を調べるために、共同研究を行っている昭和大学歯学部福原達郎先生の研究室では、CTスキャンで撮影する際に、骨塩ファントムというカルシウム密度の試料を、比較用に用いている。つまり、密度の違う何本かの試料と一緒に、断層写真を撮り、各部の濃淡画像を試料と比較すれば、カルシウム密度分布が決定できるのである。そこでモデルの形状を割り出すのと同じようにして、これらの結果を積み重ねていった。すると、力が強くかかっているところと、カルシウムの密度が高くなっているところがよく一致したのである。このことにより骨は、形状の面だけでなく、材料の面でも、力を支えやすい構造になっていることがわかった。

これらの解析結果から、骨の形状が非対称形な人も、力が強くかかるところは丈夫に作られていることがわかった。つまり、個々人の噛み方に応じた顎になっているわけである。



叩いて直して叩いて直して——生長変形法

上のような例からもわかるように骨は外力などに適応して最適な形状に変化し、また、力のかかり具合に応じて材料の密度を変化させていく。骨というのは構造材として非常に興味深いものである。そこで、このような性質を取り入れた、構造材の設計が出来ないかという考えが浮かぶ。

そのひとつが伊能先生らが行っている生長変形法である。伊能先生はこの研究を、学部生の時に梅谷先生のところにいらした頃一度なさっていて、

これはおもしろい事を示している。左右非対称な顎の人は、生まれたときからそうなるように決定されているのだろうか。たぶんそうではないと伊能先生は考えておられる。形状が非対称になったのは、虫歯や歯のふぞろいのため、偏った噛み方を続けたためと推測できる。したがって、生まれたときにはだれも対称的であったが、後天的な要因によって変化していったと考えられる。骨が後天的に、形状と、その材料の強さの分布を状態にあったように変化させていく機能を、骨の適応的機能と呼んでいる。つまり骨は荷重のかかり方に変化がおきると、形状、材質ともに、それに適応して変化していくのである。最近では、宇宙飛行士が無重力状態で長時間いると、骨に荷重がかからないため、骨が弱くなってしまうということがニュースになった事があり、ご存知の方も多いと思う。これもやはり骨の適応現象である。

この方法を命名なさったのは梅谷先生である。

骨のように、外力に対し適応しながら変化する材料があるとする。その材料に力学的な設定が施される。するとその材料は、自分にかかった力のかかり具合に応じて、形状を変形させ、材料の密度を変化させ、与えられた力学的な設定に対し、最適な形に近づこうとする。これをずっと続けていけば、最終的には、形状、材質の面で、理想的なものへと変化していく、という発想である。

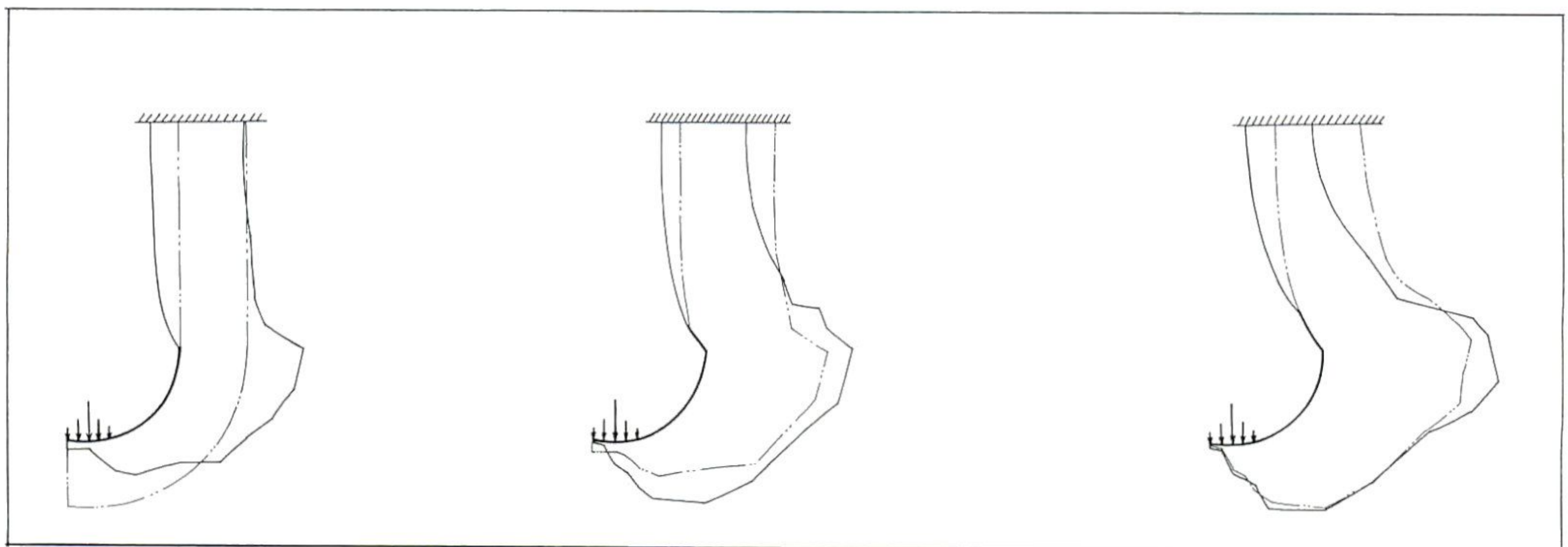


図3 生長変形法の例。これは先生が学部生の頃に行ったもの。J字形のかぎばりを生長変形法により力学的設定（上の部分で固定し、カギの部分に力がかかる）に対し一番左の素原形から一番右の最適な形へと変形していく様子を示している。

実際にはこのように自分から変化していく材料は、残念ながら今のところ存在しないので、コンピュータにより計算していくのである。

生長変形法により作られた構造材は形状がかな

り特異であるので量産には向いていない。しかし宇宙空間のように、無駄な材料を省きたいような環境で、将来利用されるだろうと先生は考えておられる。



これからの研究課題と研究施設について

取材の最後に実際の研究の風景を見せていただいた。伊能研は機械物理工学科であるが、機械らしいものはおいていない。今まで見てきたようにこの研究室の研究はコンピュータによる力学的な解析が今のところ中心になっているからである。したがって、研究室には何台かコンピュータが置いてあるのみである。そこでは研究室の人々が、顎骨の研究を始めとするデータなどを計算させていた。最初にも触れたように下顎骨の研究は昭和大学との共同研究であるので、人間の顎の形や、骨材の密度分布などのデータはそこから、コンピュータで解析しやすいデータの形で送られてきている。こちらの研究室では、そのデータをもとに解析を行っている。

最後に伊能先生がこれからはなさっていきたいと思っている研究について触れていきたいと思う。まず下顎骨から頭蓋骨全体へと力学的な解析の規模を広げていきたいということ。生長変形法の研究対象を三次元的なもっと複雑な形にして、骨の研究のときのように骨材を適度に抜いて強弱をもたせたものへと広げていきたいということ。

さらにはバイオホロニクスについても研究していきたいということである。バイオホロニクスとは生物がどのようにして自分の形を作っていくかということを物理的に理解していくという学問である。先生はこれをとおして骨の空洞で作る網目構造の作り方を研究していきたいのだそうだ。骨というのは空洞になっているところがある。骨が空洞になっている所を見ても、実は完全な空

洞ではなくて力が伝達するところのみ骨材が残っている網の目のような構造になっている。ちょうど軽石のようになっていると思っていただくと都合がよい。この構造の作り方を研究することにより、これまで人工物では、あまりお目にかかれなかったような生物的な形をした三次元構造物を自動的にデザインする機械が生まれるかもしれないのである。

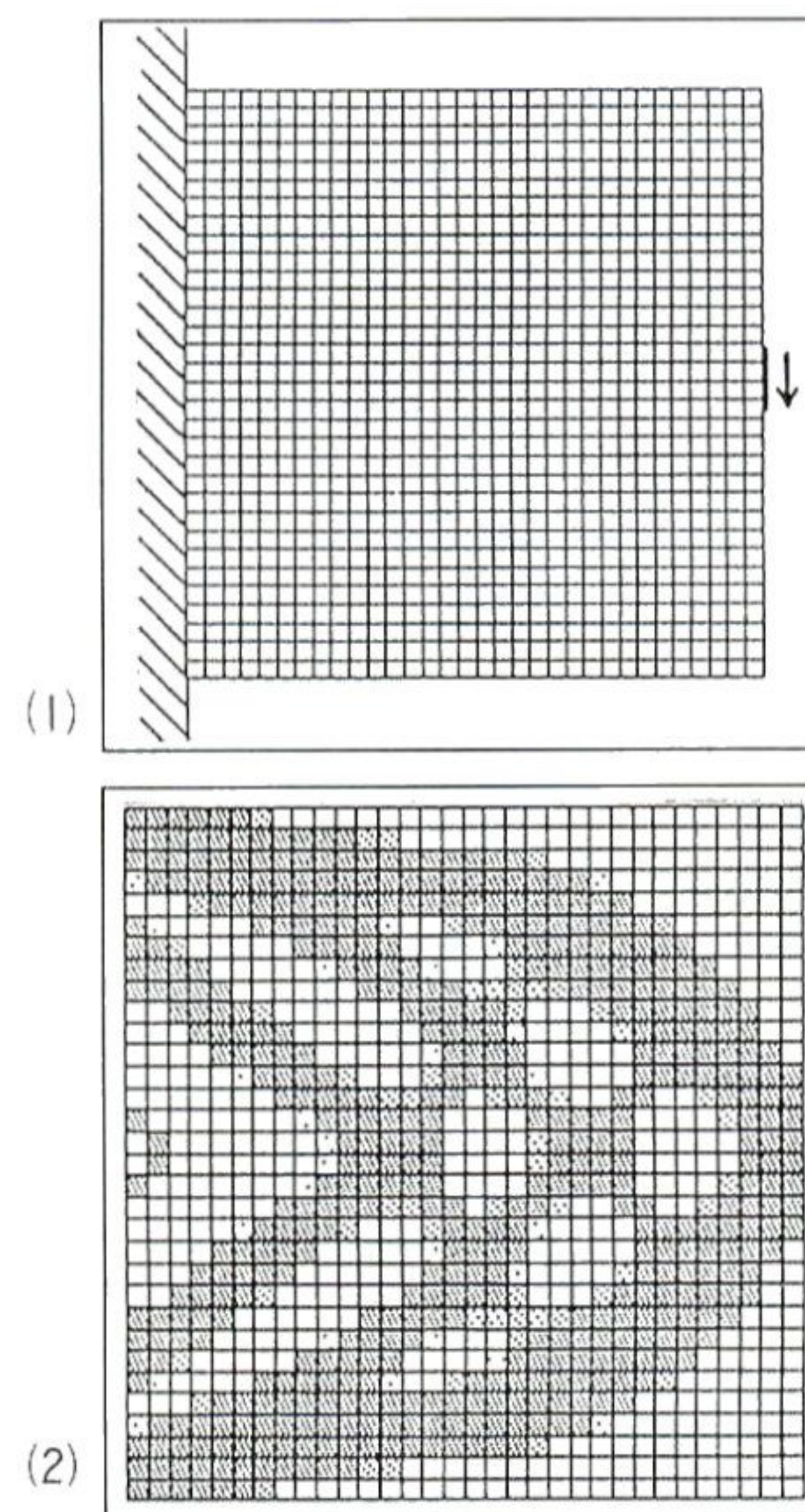


図4 バイオホロニクスの実験の一例

- (1)正方形の部材の端に矢印の力がかかっている。
- (2)上の設定で生長変形法を用いると無駄な材料が省かれ、必要な箇所が出てくる（一例）

伊能先生が御自身の研究分野を説明なさる前におもしろいお話をしておられた。魚の尾びれの断面の形とジェット機の尾翼の断面の形とがほぼ一致しているという話である。尾びれは自然が、垂直尾翼は人間が、形状を外界の状況に対して適応させていき、結果として両者は一致していたのだそうだ。

今回の取材をするにあたり、一番驚いたのは、機械系の研究室でありながら、機械類の一切ない研究室というものがあるということであった。

今回の取材にあたり、ご迷惑をおかけした人々にお詫びをするとともに、お世話になった各方面の人々に感謝したい。

（菊地）