

機械工学から生体工学へ

福井 智 宏*
fukui@kit.ac.jp

1 はじめに

機械工学課程に進学すると必ず修得すべき専門科目があります。いわゆる、四力と呼ばれる科目であり、熱力学、流体力学、材料力学、機械力学がそれに当たります。この4つの力学を学ぶことにより、「ものづくり」に欠かすことのできない重要な知識や考え方を身につけることができます。まさに、ものづくり大国である日本の大黒柱とも言うべき学問領域です。さらに、この四力から得られる考え方を応用することにより、様々な発展的な研究領域が展開されます。そのうちの一つに「生体工学」があります。機械工学課程なのに生体工学？と驚かれるかもしれません。機械工学から連想される研究分野と言えば、ロボット工学や宇宙航空系をイメージされるかもしれません。実際、私が大学に入学したときも、そのような研究分野があることさえ知りませんでした。大学で学ぶ過程でその存在を知り、そしてその魅力と可能性に惹かれ、今では自分の専門である流体力学を駆使して生体工学の研究を行っています。それでは、生体工学の紹介を少しだけしてみたいと思います。

2 生体工学とは

生体工学とは、生体の構造(かたち)と機能(はたらき)を力学的(工学的)に考察する分野であり、バイオメカニクスやバイオエンジニアリングとも呼ばれています。生体に備わっている能力や性質には、機能的適応、再構築、恒常性があります。すなわち、生体は単体であれ細胞レベルであれ、周りの力学的な環境や刺激に機能的に適応し、自らの形態や性質を変化させる(再構築する)ことにより、機能を発揮・維持させ

る能力が備わっています。この点が、機械的な人工物との決定的な違いであると言えます。

2.1 身近なバイオメカニクス

それでは身近なところでのバイオメカニクスを見てみましょう。みなさんは筋肉トレーニングを行ったことはありますか？おそらく、スポーツに携わっている方なら誰もが経験したことがあるのではと思います。いわゆる、ダンベルや鉄アレー等を使って、筋肉を増強させるためのトレーニングです。ここで重要なことは、筋肉に負荷をかけることによって筋細胞は一度破壊されてしまいますが、超回復を経て、「結果的に筋肉が強くなる」ということです。この一連の変化をバイオメカニクスの観点から考えると次のようになります。筋細胞は負荷(力学的刺激)によって破壊されてしまいますが、次に同等の負荷がかかったときに耐えうるような(機能的適応)、太くて強い筋肉に生まれ変わろう(再構築)とするわけです。まさに、生体の有する能力を逆手に取ったトレーニングであると言えます。

2.2 宇宙飛行士の骨密度

また宇宙飛行士の骨密度に関して何か聞いたことはありませんか？宇宙飛行士の骨密度は、宇宙空間において低くなりやすく、骨粗鬆症のような症状にまで発展してしまうようなケースもあります。これもバイオメカニクスの観点から見てみましょう。ヒトの骨は、新しい骨を作る細胞(骨芽細胞)と、古い骨を壊す細胞(破骨細胞)とがバランスよく作用することにより、常に良い状態を維持させよう(恒常性)としています。ここで骨細胞をバランスよく作用させるカギが重力(力学的刺激)です。重力により骨細胞は力学的な負荷を受け続けています。この負荷に耐え

* 機械システム工学部門 助教

うるために必要な強度を、できる限り少ない材料(骨組織)で達成させようとしています。ところが一度宇宙空間に飛び出すと、この重力という力学的な環境から解放されてしまいます。すると必要とされる骨の強度が下がるため、破骨細胞(骨を壊す細胞)の方が優位に働き、骨密度が徐々に低くなってしまいます。

このように、生体は常に周りの力学的な環境を感知し、それに適した構造と機能を自ら作り出すことにより順応していることが分かります。一方で、宇宙飛行士の例のように、周りの力学環境に適応するがために、疾患を誘発してしまうような場合もあります。

3 生体工学の研究領域

生体工学の研究領域はとても幅広く、心臓の収縮・弛緩機能、骨や皮膚などの力学的性質、心臓・血管系や呼吸器系気管内の血液や空気の流れ、また微小血管系における赤血球の挙動解析など、マクロスケールからミクロスケールにまで至ります。これらの成果は、臨床現場における診断支援や計測機器の開発、予防医学、人工臓器の開発、スポーツ機能の高度化などにも大きく貢献しています。また、生体から得られた新しい知見をもとにした最適設計法の創出や工業用ロボットの開発など、工学分野への効果も現れています。今回は、心臓や血管系に生じる様々な疾患を取り上げていきたいと思えます。

3.1 代表的な心血管系疾患

心血管系疾患による死亡率は、悪性新生物(がん)に次いで2番目に高いと言われています。代表的な心血管系疾患には、動脈硬化症、動脈瘤、心筋梗塞、脳梗塞、大動脈弁狭窄症などがあります。この中でも、動脈硬化症は馴染みの深い疾患であるかも知れませんが、その名の通り、動脈が硬くなる病気であると解釈されがちですが、その限りではなく、逆に脆(もろ)くなる場合もあります。動脈硬化症は、脂質(プラーク)の沈着・透過に伴う血管の内膜中膜の肥厚にはじまり、数十年という長い年月をかけて少しずつ成長していきます。その成長の過程において、血管内腔が徐々に狭まり、最終的には完全に閉塞してしまうケース、あるいは、内中膜の不安

定粥腫性プラーク病変が突然破綻してしまうケースなど、その病像も多岐にわたります。いずれにしても、動脈硬化症の発症と成長のメカニズムは未だ不明な点が多く、臨床的にも客観的な重症度の評価は難しいとされています。

3.2 心血管系疾患のバイオメカニクス

このような心血管系疾患をバイオメカニクスの立場から考察してみましよう。まずは血管の力学的な環境を知るために、血管の内腔に働いている力を調べる必要があります。血管の内側には、血液流れによって主に二種類の力が働いています。血管壁面に対して垂直な応力とせん断応力です。壁面に垂直な応力は血圧に相当し、せん断応力は血液の粘性に起因する摩擦力です。これらの力を、血管の内側に存在する内皮細胞が感知しています。内皮細胞は血管の内膜を単層に覆っている細胞であり、主に壁面せん断応力(摩擦力)を感知することにより血管拡張物質を産生し、血管径を能動的に変化させて血流量の局所的な調整を行っています。これまでの研究により、動脈硬化症の発症・成長には、この壁面せん断応力が深く関わっていることが分かってきました。特に、せん断応力が局所的に低い部位において動脈硬化症が発症しやすいという「低張り応力説」が最も有力な仮説の一つです。生理的な条件下において、内皮細胞にかかるせん断応力の値は1~2Pa程度であると考えられています。このように、内皮細胞は血管径を能動的に変化させることにより、せん断応力のある一定の値に調整しています。低張り応力説では、この壁面せん断応力がおおよそ0.5Pa以下になるような局所的な部位において、動脈硬化症の初期症状である内中膜の肥厚が始まるとの報告もあります。すなわち、動脈硬化症は、血管全体にわたって発症するような疾患ではなく、ある特定の部位において生じやすいという「好発部位」が存在します。

実際に、臨床現場における動脈硬化症の発症部位をまとめた研究によると、先述の好発部位が存在すること、そしてその部位は、血管の湾曲部や分岐部に多く見られるとの報告もあります。この血管の湾曲部や分岐部における血液流れを流体力学的に考察すると、流れが剥離しや

すく局所的にせん断応力が低くなりやすい部位であることが分かります。このことから、局所的な血液流れを詳細に調べ、時間的・空間的なせん断応力分布を考察することが、動脈硬化症の発症・成長のメカニズムを解明する上で重要であると言えます。

4 研究事例の紹介

4.1 動脈硬化症の成長シミュレーション

それでは、動脈硬化症の成長シミュレーションの一例を示したいと思います。先ほどの低ずり応力説を数値的にモデル化し、内中膜の肥厚を進展させることにより動脈硬化症の成長を再現します。ただし真っ直ぐな円管では、理論上、壁面せん断応力は一様となるため、血管内腔に微小な凹凸を初期条件として血管中央部に与えています。今回は、動脈硬化症の成長アルゴリズムを3パターン考えてみました。図1に動脈硬化症の成長シミュレーションの結果および軸方向速度分布を示します。血液は左から右に向かって流れており、血管壁を黒色で表示しています。 n の値は計算サイクル数であり、実際の現象としては、数年のオーダーであると考えています。図1より、動脈硬化症の初期症状である内中膜の肥厚は、主に血管の半径方向に成長していくパターンや、血管の軸方向に進展するパターンなど、その性状は様々であることが分かります。これは、せん断応力を感知した内皮細胞の応答が及ぶ範囲や程度の違い、発症する血管の部位、個体差などにも関係してくるかと考えています。今後は、臨床データや他の文献との比較により数値モデルの検証を行うと共に、せん断応力と内中膜肥厚との関連性をより詳しく調べていきたいと考えています。

4.2 大動脈弁のバイオメカニクス

次に、心臓弁の一つである大動脈弁に注目してみましょう。心臓は全身に血液を送るための重要な臓器であり、左心室から拍出される血液流量は成人男性で毎分約5リットルにも及びます。このように心臓が効率の良いポンプとして働き続けるためには、各心臓弁の機能的な作用が必要不可欠です。大動脈弁は左心室と大動脈の間に位置する弁であり、主に、左心室圧と大

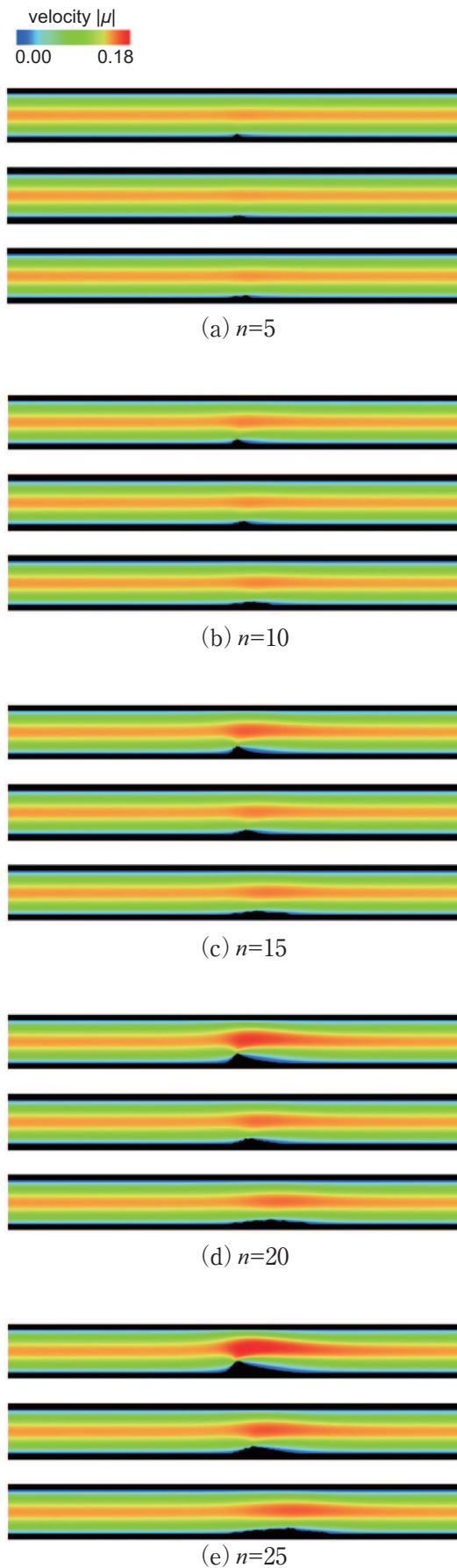


図1 動脈硬化症の成長シミュレーション

動脈圧との差圧によって開閉運動を行っています。弁開放時には血流による抵抗は非常に小さく、また、弁の閉鎖は迅速で逆流も検知できないほど微量です。大動脈弁の開閉運動、特に閉鎖時におけるメカニズムはとても複雑であり、弁のまわりに発生する渦の存在が大きく関わっていることが報告されています。大動脈弁まわりにはバルサルバ洞と呼ばれる膨らみがあり、この空間が大動脈弁まわりに発生する渦の流体力学的特徴に大きく関与していると考えられています。このように、大動脈弁は血液流れによって生じる流体力学的な作用を効果的に利用することによりスムーズな開閉運動を可能

にしています。大動脈弁の機能不全を伴う疾患の一つに大動脈弁狭窄症があります。大動脈弁狭窄症を患うと、心収縮期における弁の開口面積が十分に確保できなくなり、左心室からの血液拍出流量が著しく減少してしまいます。このような疾患の重症度を客観的に評価するためにも、大動脈弁まわりの流動現象を詳しく調べる必要があります。

それでは、この渦の様子を数値シミュレーションにより可視化してみましょう。図2に心周期における大動脈弁の開閉運動ならびに渦度分布を示します。比較のため、中央の膨らみ(バルサルバ洞)の軸方向長さが異なる2つのモデル

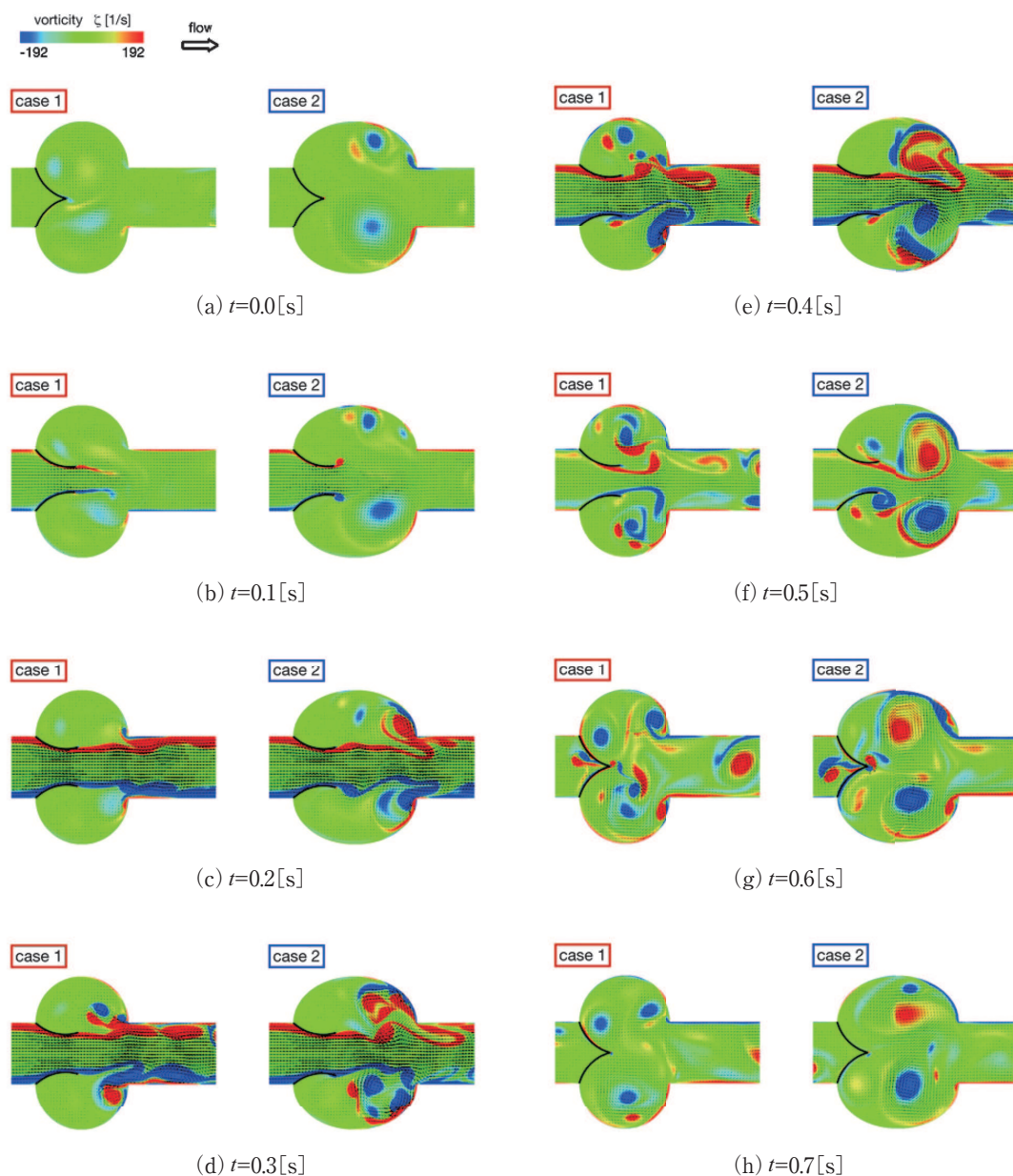


図2 大動脈弁の開閉運動ならびに渦度分布

ルを使用しました。大動脈弁を2つの円弧で表現し、大動脈弁の左側を左心室、右側を大動脈に設定しています。左心室圧が大動脈圧を越えると大動脈弁が開き始め、勢いよく血液が流れ始めます。大動脈弁の先端から複数の渦が放出され、バルサルバ洞内に広がっていく様子を確認することができます。このとき、バルサルバ洞の大きなモデル(case 2)の方が、渦が大きく成長していることが分かります。弁の閉鎖は大動脈圧が左心室圧を上回ると始まり、洞内の渦がそれを助けていることを確認することができました。また、図には示していませんが、大動脈弁に生じるせん断応力は時間的・空間的に変化しており、各時間におけるせん断応力の最大値は、縮流の発生しやすい弁の中央付近に集中していることが分かりました。このような局所的なせん断応力の時間的・空間的分布を調べることで、大動脈弁狭窄症の発症メカニズムを考察することが可能となり、また、機能的な人工弁を作製する際に欠かすことのできない重要な情報を得ることができます。

4.3 脈波伝播解析による非侵襲的血管病診断

最後に、非侵襲的な血管病診断に関する研究を紹介したいと思います。この「非侵襲的」という用語は、生体工学においてとても重要な意味を持ちます。心血管系疾患は全て生体内において発症するため、体の外側(表面)からその性状を知ることができません。すなわち、心血管系疾患を診断するためには、体の内部を調べる必要があります。さて、それではどのように体の内部を調べましょうか？まさか、「お腹が少し痛いです」と訴える患者さんに対して、「じゃあ、ちょっと見てみましょう」と言って、いきなりメスを取り出すようなお医者さんはいないでしょう。おそらく、触診あるいは聴診器を使って、体の外側から体の内部の様子を調べようとするのではないのでしょうか。このような方法が先ほどの「非侵襲的」に相当します。読んで字のごとく、侵襲的でないという意味です。同じような用語に「非観血的」という言葉もあります。こちらの方がイメージしやすいかもしれませんね。血を観ることなくという意味です。このように、心血管系疾患における診断は体を傷

つけることなく、非侵襲的かつ精度良く行うことが理想的です。

4.3.1 非侵襲的な計測例

身近なところでも、例えば、血圧測定を例に挙げてみましょう。健康診断等でも少なくとも年に1回は測定するのではないのでしょうか。おそらく上腕部にカフを巻き、圧迫することにより計測する方法が主流だと思います。これも非侵襲的計測方法の一つです。もし、「侵襲的」にしか計測することができないのであれば、多大なる負担がかかることでしょうか。実際に、圧力トランスデューサ等を動脈に挿入しないといけない訳ですから。健康診断の度に血管に穴を開けていては体が持たないでしょう。このように、非侵襲的な計測は、生体の性状を知る上でとても重要です。

4.3.2 心血管系疾患の診断に向けて

ところで、心血管系疾患による死亡率が高いという事実を前に述べましたが、これには大きな理由があると考えています。それは、ほとんどの場合において、「自覚症状が無い」ということです。つまり、心血管系疾患は痛みを伴わない場合が多いのです。このため発見が遅れてしまい、適切な治療を受けること無く重篤な症状にまで悪化させてしまうことが多いのです。いわゆる、「手遅れ」という状態です。実際に心血管系疾患の多くは、他の検査の際に、偶発的に見つかることが多いと言われています。このことから、「早期発見」につながるような非侵襲的血管病診断法の確立が求められています。そこで、私たちの研究グループでは脈波伝播現象に着目しました。

4.3.3 脈波伝播現象とは

心臓の左心室から拍出された血液は、大動脈を拡張させ血管壁を振動させます。この血管壁の振動(脈波)は血流と共に血管の末梢側へと伝播します。これを脈波伝播現象と呼び、脈波伝播現象を理解することは血液循環系を知る上で重要であると考えられています。一般的に、動脈は体の深部を走っている血管であるため、体表から脈波を感知することは不可能です。ただ

し、頸動脈や橈骨動脈(手首の動脈)等は、例外的に体の表面近くを走っているため、軽く手を触れるだけでも脈波を感じることができます。まさに、「脈をとる」ことに適した血管に当たります。この脈をとる動作は、まさに脈波伝播現象を利用しています。脈波が血管壁を伝播する速度は、ヒトの血管の場合おおよそ 10 m/s と非常に速いことが知られています。そのため、心臓から 30 cm 程度しか離れていない頸動脈では、心臓の拍動との時間差はわずか 0.03 s しかなく、ほぼ心臓と同期しているように感じるかもしれません。それでは、この脈波伝播現象をどのように非侵襲血管病診断に活用するのかを説明したいと思います。

4.3.4 脈波波形のバイオメカニクス

計測される脈波波形は、血管の末梢側へ向かう入射波と末梢側から戻ってくる複数の反射波とが重なり合うことにより形成されています。このとき、反射波には様々な情報が含まれています。波の反射は、その性質上、音響インピーダンスが局所的に変化する部位で生じます。すなわち、幾何学的あるいは力学的に不連続な点において反射波は発生するのです。代表的な心血管系疾患である、動脈硬化症と動脈瘤に注目してみましょう。動脈硬化症は、内中膜の肥厚から始まり血管狭窄に至ると同時に、その病変部位の硬さ(力学特性)も変化します。すなわち、動脈硬化症の病変部位は、局所的に幾何学的にも力学的にも不連続であることが分かります。動脈瘤も同様です。ただし、動脈硬化症は狭窄(血管内腔が狭くなる)を伴いますが、動脈瘤では逆に血管内腔が広がります。

4.3.5 血管病変部位における脈波伝播

それでは、動脈硬化症ならびに動脈瘤の病変部位において発生する反射波にはどのような特徴があるのか調べてみましょう。計算モデルは 3次元軸対象モデルとし、計算コードはアルテアエンジニアリング社製のソフトウェア RADIOSS ver. 4.6 を使用しました。また、各種病変部位において発生する反射波の理解を容易にするため、入口からは単一の矩形波のみを与えました。図 3 に動脈硬化症を模した狭窄血

管モデルと動脈瘤モデルにおける、中心線を通る断面の軸方向速度分布を示します。計算モデルの左端から単一の矩形波を与えることにより圧縮波を発生させ、脈波を生じさせます。図 3 において、時間の経過と共に末梢側(右側)へと伝播する高速度領域(赤色)が脈波に相当します。脈波が中央の病変部位に到達すると、前進する透過波と後退する反射波とに分離します。ここ

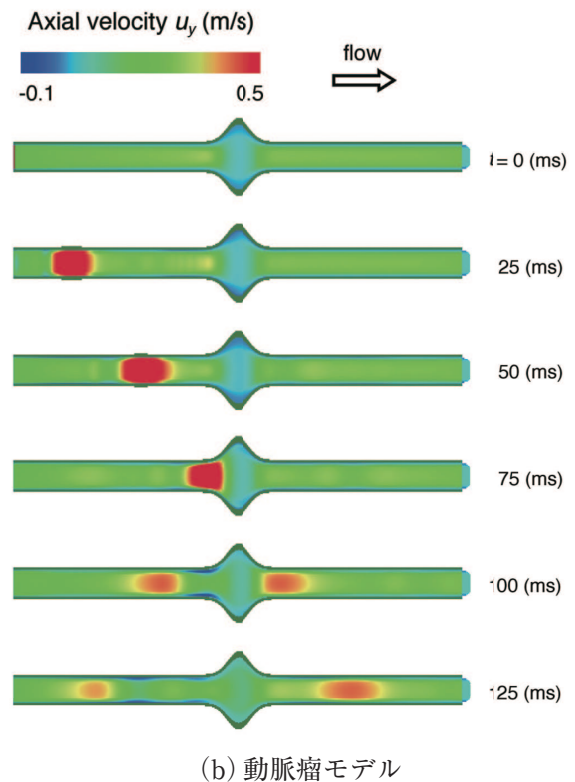
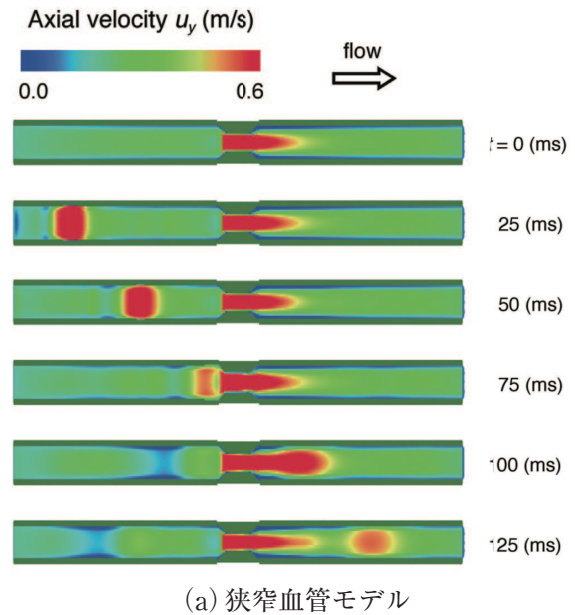
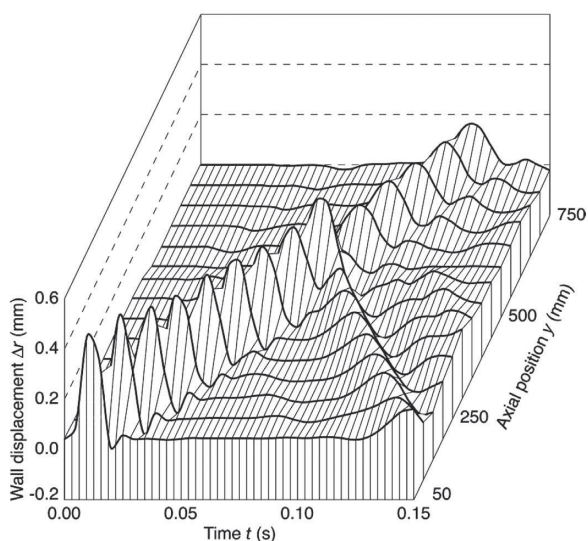


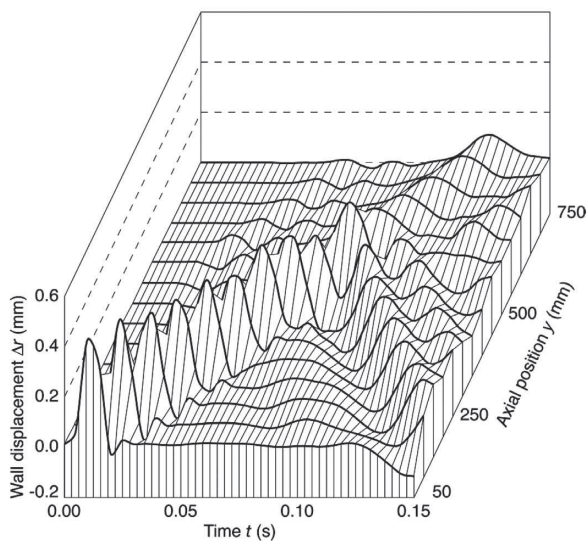
図 3 血管病変部位における脈波伝播

で反射波に注目してみましょう。狭窄血管の場合、時間の経過とともに後退する反射波は定常流よりも遅いため、速度領域が青色であることが分かります。一方で動脈瘤の場合は、反射波の速度領域は赤色であることが分かります。この違いを脈波波形から見てみましょう。

図4に狭窄血管モデルと動脈瘤モデルから得られた脈波波形を示します。それぞれ横軸が時間を、奥行きが軸方向位置を表しています。病変部位(軸方向位置 $y=500$ mm のあたり)において発生した反射波の位相を比較すると、両者は互いに180度ずれている(反転している)こと



(a) 狭窄血管モデル



(b) 動脈瘤モデル

図4 血管病変部位における脈波波形

が分かります。これは、伝播する波が持つ性質に起因していると考えられます。波の性質上、前進圧縮波と後退膨張波は流れを加速させ、一方で、前進膨張波と後退圧縮波は流れを減速させます。このことから、狭窄部位ならびに瘤部位において発生した反射波は、それぞれ後退圧縮波と後退膨張波であると考えられ、両者は互いに異なる性質を有することを確認することができました。実際の脈波波形は先述した通り、複数の波形から形成されていますが、これらを一つ一つの波形に分離するような研究も進んでおり、反射波のみを取り出して考察することも可能となってきています。このような研究を組み込むことによって、脈波波形のさらなる生体工学的な考察が可能になればと期待しています。

4.3.6 心血管系疾患の早期発見に向けて

このようなアイデアが、心血管系疾患の「早期発見」へとつながるためには、まず、脈波波形の計測・解析が簡便であることが重要です。毎日の体調管理として、誰もが簡単に扱えるような「手軽さ」が求められます。しかし、このような手軽さの中で、病変部位の位置や重症度を精度良く計測することは、おそらく不可能でしょう。このことから、私たちの研究グループでは、「早期発見」と「精密検査」とを分離することが重要であると考えています。まずは、あまり精度が良くなくても、心血管系疾患の有無の確認を手軽に行い、もしも異変が認められた時には、大きな病院でしっかりと診てもらう。このように段階を経てチェックを重ねることによって、自覚症状の無い心血管系疾患の「早期発見」ならびに「適切な治療」へとつながるのではないかと考えています。

5 おわりに

まだまだ生体工学のほんの一部の紹介に過ぎませんが、いかがでしたでしょうか。意外にも身近なところにバイオメカニクスがたくさん潜んでいるものです。今この瞬間にも、みなさんの体の中では一つ一つの細胞が周りの力学環境に適応すべく、自らの再構築を行っていることでしょう。生体の持つ能力や機能には本当に驚

かされます。今後の高齢化社会に向け、ますます生体工学の活躍する場面は増えてくることと思います。これを機に、少しでも生体工学に興味を持っていただければ幸いです。

参考文献

- [1] 林紘三郎ら, バイオメカニクス数値シミュレーション, コロナ社, 1999.
- [2] 林紘三郎ら, 生体機械工学, 日本機械学会, 1997.
- [3] 林紘三郎, バイオメカニクス, コロナ社, 2000.
- [4] 菅原基晃ら, 血液のレオロジーと血流, コロナ社, 2003.
- [5] 松岡光明ら, Arterial Stiffness の臨床 動脈壁硬化とPWV, メディカルレビュー社, 2002.