

提 案

動脈圧波動の物理的機序に対する新しい提案

横山 博俊* 元塚 朗子* 岸植 進次郎*
山本 健** 村上 誠一**

要 旨

動脈圧波動は従来より、圧波の反射説によって説明されてきた¹⁾。これに対し、著者らは動脈圧波動は血管弾性の非線形性による非線形波動であると考えている²⁾。非線形波動とは非線形の媒質を伝播する波動である。血管とは、血管軸方向と円周方向の2方向の非線形バネからなると考えることができる³⁾。非線形バネの性質は、steepening 現象と peaking 現象の説明に必要であると著者らは提案する。

はじめに

動脈圧波は一般に、末梢側へ伝播するにつれて、収縮期圧は上昇し (peaking 現象)、立ち上がりは急峻になる (steepening 現象) 特徴を有する。著者らは、動脈圧波動の物理的機序の説明として、血管弾性の非線形性による非線形波動説を提唱してきた²⁾。血管は、その弾性の性質を非線形バネに例えることができる。

1. 線形バネと非線形バネ

図1は坂西らが犬の大動脈を用いて得たデータである³⁾。血管の弾性をバネに例えた場合、血管軸方向と円周方向の2種類のバネからなると考えることができる。バネには接線応力が加わる。線形バネでは、加わる力に比例してバネの長さが長くなるフックの法則が成立する。

$$F=kx \text{ (the law of Hooke)}$$

F : 加えられた力

k : バネ定数 x : 伸びた長さ

これに対して、フックの法則が成立しないバネを非線形バネと呼ぶ。非線形バネでは、応力と変化した長さの間に比例関係がない。フックの法則が成り立たないバネは皆、非線形バネということになるが、ここでは伸びた長さが長くなるにつれて、バネの持つ応力が大きくなる場合に限定する。例えば、以下の式のようなものである。

$$F=k(a^x-1)$$

フックの法則が成立する線形バネを引っ張って離すと、バネは振動する。バネに摩擦がなく、エネルギーが他へ逃げなければ、バネは一定の周期と振幅で振動を続ける。この周期をバネの固有周

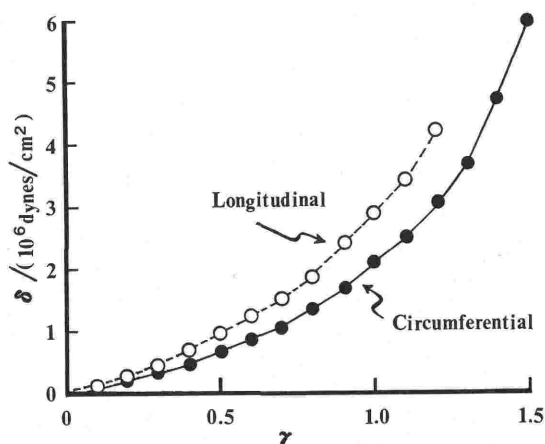


図1 イヌ胸部大動脈の血管壁における応力(δ)—ひずみ(γ)曲線
白丸は血管軸方向、黒丸は円周方向の実験値 (文献3)より引用、許可済み)

*国立金沢病院麻酔科
**金沢大学麻酔・蘇生学教室

期という。また、フックの法則の成立するバネの振動において、少しづつエネルギーが失われ、振動が減衰していく場合、振幅が小さくなくても、振動の周期は変わらない。つまり、線形バネでは振幅のいかんに関わらず、固有周期は保たれる。

非線形バネでは、エネルギーが外部に散逸すれば、振幅は次第に小さくなっていく。このとき、振幅の変化にともなってバネの周期も変化していく⁴⁾。非線形バネでは、伸びが大きい場合は復元力が強く、元の長さにもどる時間(周期)が短い。伸びが小さい場合は復元力が弱く、元の長さに戻る時間は長くなる。従って、非線形バネに固有周波数はない。

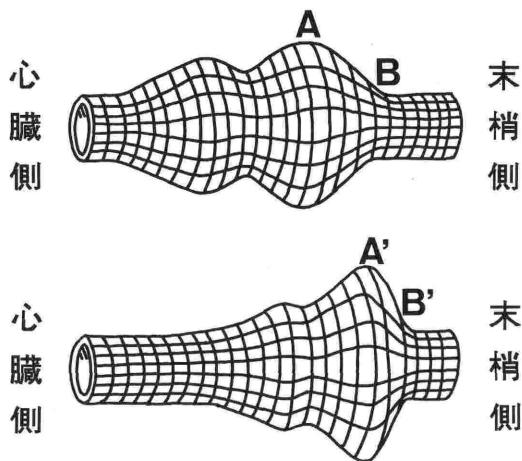


図2 動脈圧波の伝播現象の図式化
A点の非線形バネはB点のバネより伸展されているので、復元力が強く、速く伝播するため、A'はB'に追いつくように変形する。

2. 動脈圧波の物理的特徴の説明

図2に、動脈圧波が心臓から末梢へ伝播する過程で波形の変化する様子を模式的に示す。動脈圧波の収縮期は血管が最も伸展している部分である。伸びの大きな部分は復元力が強く、速く伝播するため、振幅の大きな部分が前方の振幅の小さな部分に追いつくように波形は変化する。このため、動脈圧波は末梢へ伝播するにつれ、立ち上がりが急峻になるように変化する (steepening 現象)。

また、動脈圧波には、末梢へ行けば行くほど収縮期圧が上昇する現象が認められる (peaking 現象)。これは、末梢に行くほど、血管弾性の非線形性が増し、動脈圧波のエネルギーが進行方向に向かって集中するためである。収縮期圧が末梢へ伝播すると高くなる効果は、血管弾性の非線形性が末梢になるほど強くなることによってもたらされる。血管弾性の非線形性の増加にともない、動脈圧波の伝播速度は末梢へいくにつれて増す。

3. 圧波の反射説と非線形波動説

従来より、動脈圧波の物理学的説明としては反射説がある。反射説は、動脈圧波が2方向の成分の合成からなるとするものである。中枢側の心臓から順行性に伝播する圧波成分と、末梢から反射して逆行性に血管を進行する圧波成分の合成からなると説明する。波形の反射や合成を物理的に説明するために、動脈圧波を線形波動として

表1 反射波説と非線形波動説の比較

	反射波説 (線形波動説)	非線形波動説
概念	動脈圧波は末梢からの反射波と順行性に伝播する圧波が合成されたもの (線形性)。	血管弾性の非線形性による波動。圧波はひとかたまりのエネルギーとなり、伝播する。
運動方程式	?	血管弾性の非線形格子モデル (非線形偏微分方程式)
波高が高くなる原因の部位	圧波測定部位よりも末梢側。	圧波測定部位よりも中枢側。圧波伝播速度に比例して、収縮期圧は高くなる。
波形の構成要素	順行性に伝播する圧波と逆行性に伝播する圧波の合成 (線形成)。	順行性に伝播する圧波のみ。
反射部位	血管の分岐部。	—
フーリエ解析	動脈圧波形を構成する周波数成分は変化しない。	末梢へ行くにつれ高周波数成分を増すように変形する。
拡張期圧の決定部位	?	動脈圧測定部位よりも末梢側 (細動脈)。

説明しなくてはならない(表1).

非線形波動説は、動脈圧波は一方向にのみ伝播する圧波動である、という考え方である。動脈圧波動が非線形波動であるということは物理学的に、動脈圧波形が本質的にいろいろな周波数成分の波の合成として説明できないことである。線形波動ではないから、周波数成分毎にエネルギーが独立に保存されることはない。実際の動脈圧波動では、末梢へ行くにしたがい増加する血管弾性の非線形性のために、次第に高周波数成分を増すように変化すると考えられる。

おわりに

以上より、非線形バネの性質は、動脈圧波動の

steepening 現象と peaking 現象の説明に必要であると提案する。

(本論文の要旨は第12回日本循環制御医学会総会(東京都)において発表した。)

文 献

- 1) W. R. Milnor: HEMODYNAMICS, 2nd Edition. Williams & Wilkins Co, Balitimore. 1989.
- 2) 横山博俊, 元塚朗子, 岸植進次郎ほか: 動脈圧波形のフーリエ解析による検討. 循環制御 11(3): 353-358, 1990.
- 3) 坂西明郎, 長谷川正光: 動脈脈波のソリトン模型. 物性研究 42: 437-442, 1984.
- 4) 野村昭一郎ほか: 振動・波動入門. 東京, コロナ社, p. 72-87, 1977.