

血管運動系症状と気温や内臓による周波数応答の遷移

Vasomotor symptoms and Frequency response transitions by temperature and internal organs

○魚橋慶子

○Keiko Uohashi

東北学院大学

Tohoku Gakuin University

キーワード：血管運動系症状(vasomotor symptom), 共振(resonance), イナータンス(inertance),
コンプライアンス(compliance), 月経前症状(premenstrual syndrome),
更年期症状(climacteric disturbance, menopausal syndrome)

連絡先：〒984-8588 仙台市若林区清水小路 3-1 東北学院大学工学部機械知能工学科
魚橋慶子, E-mail: uohashi@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

不定愁訴への対策は性別を問わずQOL向上および労働環境改善のために欠かせないと、近年言われている。たとえば更年期、月経前、排卵前に不定愁訴が起こるが、愁訴の発現理由には諸説ある¹⁾²⁾³⁾。そこで本研究では、不定愁訴の一種である血管運動系症状のしくみを、血流の周波数応答の側面から検討する。

性ホルモンにより血管床イナータンス・コンプライアンスが大きく変化する内臓（子宮、腸など）が、消化器（胃、腸など）の血流変化を増幅し、増幅された血流に共振する部位に血管運動系症状が現れる法則を、我々は以前に指摘した⁴⁻¹⁰⁾。本研究では、気温による血管抵抗の変化も加味された血管運動系症状のしくみを表す、血管系の等価電気回路を提案する。

なお性ホルモンが作る物理現象に着目する研究は少ないが、重要性の指摘はある¹¹⁾。

2. 等価電気回路と血管運動系症状

2.1 血管系の等価電気回路

血管系の血流を、等価な電気回路へ置き換えることができる¹²⁻¹⁵⁾。血圧 [mmHg] を電圧 [V] へ、血流 [m^3/s] を電流 [A] へ、血管抵抗 [$\text{mmHg} \cdot \text{s}/\text{m}^3$] を電気抵抗 [Ω] へ、イナータンス（慣性、ポンプ効果） [$\text{mmHg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^3$] をインダクタンス [H] へ、コンプライアンス（血管弾性の逆数、蓄積効果） [m^3/mmHg] をキャパシタンス [F] へ対応させる。（ $[\text{mL}] = [10^{-6} \text{ m}^3]$ を用いる流儀もある。）

なおこれらの量は血管自体の性質の他、血管の周辺組織も含めた血管床の影響を受ける。周辺組織の影響を大きく受ける細い血管を考慮する場合、血管系よりも血管床という語が用いられる。女性ホルモンの場合、エストロゲンが組織を硬くし、プロゲステロンが毛細血管を作るとされる。そして血管床のイナータンスやコンプライアンスが変化すると、我々は考える。

2.2 血管運動系症状の選定

不定愁訴の代表的な症状として、冷え、のぼせ、ホットフラッシュ（急激な温感）、発汗、不眠（寝つきの悪さ、中途覚醒、早朝覚醒）、筋肉痛、関節痛などが挙げられる^{1) 2) 3)}。

通例では冷え、のぼせ、ホットフラッシュは血管運動系症状とみなされる。一方不眠は精神的症状とみなされることが多い。しかし更年期の不眠患者の脳波に異常の無い症例がしばしば見られ、ホットフラッシュとの関連を指摘する研究もある。ゆえに本研究では、不眠症状を血管運動系症状、とりわけ目の周辺組織の血管運動系症状とみなす。

筋肉痛（更年期症状の一つ）は通例、身体的症状に分類される。しかし本研究では、筋肉または関節に近い腱へ血液が急激に流入した場合に起こる痛みを、血管運動系症状とみなす。

息切れ（更年期症状の一つ）を、本研究では、呼吸に使用される筋肉または腱へ血液が急激に流入した場合に起こる症状と考え、血管運動系症状とみなす。

頭痛のうち、頭の筋肉または腱へ血液が急激に流入した場合に起こる症状を、本研究では血管運動系症状とみなす（筆者は緊張性頭痛の一原因と考える）。頭痛は若年者から老年者まで症状がみられるが、更年期、月経関連に限定せず研究対象とする。なお月経中（または出産時）に子宮筋へ多量の血液が流入し、下腹部痛に伴う頭痛・吐き気・めまいが起こる場合を、本研究の対象としない。

子供には手掌が湿り皮の剥ける症状が、しばしばある。発汗の多い部位は概ね手掌、脇、頭・額の順に経年変化する。ゆえに手掌、脇の発汗を多汗症へ分類し、更年期症状としない考えがある。しかし本研究では、原因不明の多汗症も血管運動系症状とみなす。

本節の「本研究では・・・みなす」で表される事項は、著者の発案である。通例血管運動系症状とされない症状のうち、どれを血管運動系症状とみなすかは、複数の症状の現れ方を、血管床の周波数応答により統一的に説明できるか否かで判断する。更年期・月経前・排卵前症状の中には、他の時期・年齢層・性別層にも発現する症状が多数ある。よって愁訴の発現時期によらず、統一的に説明できるか否かで、血管運動系症状とみなすかを判断する。

実際の血流を測定し正確な電気回路モデルを同定することは、今後の課題である。しかし本研究は、血流や血管床をどのように調査すれば症状の詳細説明へ繋がるか、検討する指針となる。

2.3 血流（電流）ベースの等価電気回路

血管運動系症状は、血圧よりも血流に着目する方が説明しやすい。以前我々は、血流を増幅する部位と、増幅された血流が流入する部位について、血流の周波数応答モデルを作成した。不定愁訴としての血管運動系症状は、心拍周波数の約 $1[\text{Hz}]$ よりも長周期に対する症状だと考えられる。そのため消化器（胃など）の活動が収まるとき、 $1[\text{rad/s}]$ から $0.1[\text{rad/s}]$ 程度に相当する上限付きランプ関数状の血流を放出すると仮定し、周波数応答を計算した⁸⁾。

今回の研究では、血流源を直流定電流源とする。個々の部位の血流変動（非定常流）は、消化器（胃など）の血管抵抗を可変抵抗で表すこと、ならびに各部位のイナータンス L 、コンプライアンス C から起こるとする。電圧源の表現とは逆に、並列なら等電流、直列なら分配電流となる（Fig.1）。

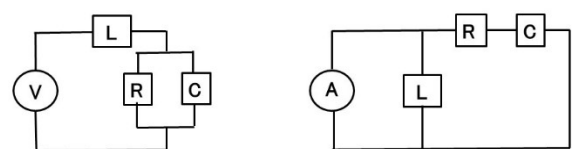


Fig. 1 Examples of electrical analog.

3. 気温による血管抵抗を加味した等価電気回路

気温ならびに筋肉の中央・端（腱）を考慮した血管床の等価電気回路を，Fig.2 の様に提案する．実際の体の部位は多数あるが，血流や症状の傾向を表すための簡素化したモデルとする．

気温の低下に応じて，体の末端の血管抵抗は大きくなる．そこで末端から遠い部位，近い部位の血管抵抗をそれぞれ可変抵抗 R_1, R_2 で表す．気温の高低に対応させるとき， R_2 の値を R_1 の値よりも大きく減少または増加させる．他の部位の血流の日内変動を調べる目的のため， R_1, R_2 は日単位で変動させる想定である． R_1, R_2 を直列に接続する．

2個のRLC回路を直列に接続したものを，可変抵抗 R_1, R_2 それぞれに対し並列接続する．2個のRLC回路は，それぞれ筋肉の中央の血管床 $R_{k1} L_{k1} C_{k1}$ ，筋肉の端（腱）の血管床 $R_{k2} L_{k2} C_{k2}$ ($k=1, 2$) を表す．血流のポンプ効果は，筋

肉の中央の方が端（腱）よりも高い．よって $L_{k1} > L_{k2}$ ($k=1, 2$) とし，共振周波数も筋肉の中央で高くなるように設定する．なお Fig.2 において，インダクタンス（血流イナータンス），キャパシタンス（血流コンプライアンス）を，ラプラス変換により表している．

性ホルモンにより血流の共振周波数が大きく変動する内臓（子宮，腸など）の血管床を， $R_0 L_0 C_0$ で表す， L_0 と C_0 の値は日単位で可変とするが，数日，数週間，年単位でも可変とする． $R_0 L_0 C_0$ を，前述の「末端から遠い血管床」へ直列接続する．

日内で血流が大きく変動する消化器（胃，腸など）の血管抵抗を，可変抵抗 r_0 とする．秒単位，分単位，時間単位で変動する想定とする．前段落の回路の， $R_0 L_0 C_0$ の側へ直列接続する．

心拍の定常流を表すため，上述の回路へ直流定電流源を接続する．回路の末端には，抵抗 R を接続し，血管運動系症状に影響の少ない部位の血管抵抗とする．

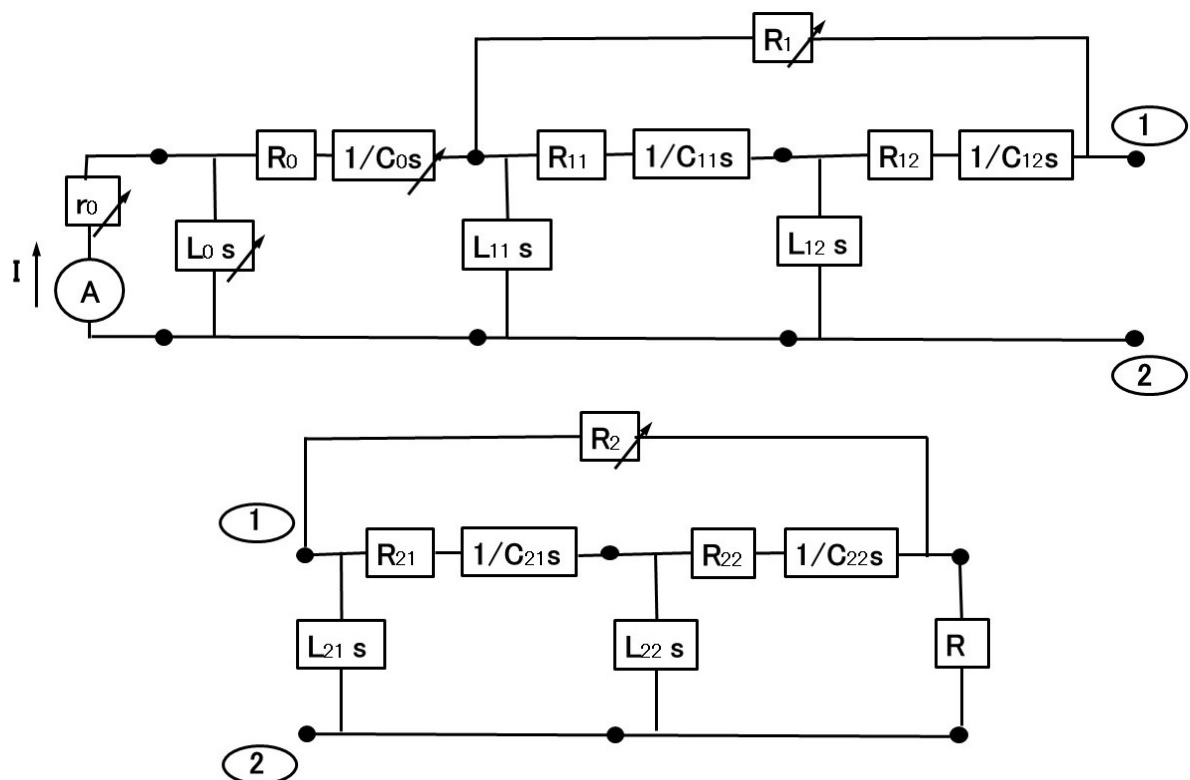


Fig. 2 The new electrical analog. (Two “Point 1”s are connected, and so two “Point 2”s.)

Fig. 2の回路で説明できること、数値実験で
きることを述べる。

気温によらず、可変抵抗 r_o の日内変動は不変
であるとする。気温が低く末端の抵抗 R_2 の値
が大きいときは、 r_o の血流の日内変動が大き
くなる。この場合、高周波寄りの部位である筋肉
中央や体の末端の血流変動が大きくなることを
示すことができる。

愁訴が無ければ気温の高い時期に発汗する部
位に、気温が低いにも関わらず発汗が現れる症
例がある。夏でも、若い頃に発汗量が多かった
部位と比べ、体の末端から遠い部位に発汗量の
増える傾向がある。これらの現象は、子宮、腸
などを表す R_0 L_0 C_0 回路の共振周波数が下がり、
筋肉の端、体の末端から遠い部位の血流変動が
大きくなることで説明できる。

4. まとめ

気温による血管抵抗の変化も加味された血
管運動系症状のしくみを表す、血管系の等価電
気回路を提案した。実際の血流変動や血管運
動系症状に即したモデルの作成は、今後の課題
である。

参考文献

- 1) 日本女性医学学会(編): 女性医学ガイドブ
ック 思春期・性成熟期編 2016年度版, 金
原出版(2016)
- 2) 日本女性医学学会(編): 女性医学ガイドブック
更年期医療編 2014年度版, 金原出版 (2014)
- 3) K. Heinemann, F. Saad: Sweating attacks:

Key symptom in menopausal transition only for
women?, *European Urology*, **44**, 583/587 (2003)

- 4) 魚橋慶子: 血管運動神経系障害と呼ばれる症状
に、血管自体の性質を原因とするものが珍し
くないという考察, *日本女性医学学会雑誌*, **25**,
147/147 (2017)
- 5) 魚橋慶子: 血管運動神経系障害と皮膚温につい
ての考察, 計測自動制御学会東北支部第307回
研究集会資料**307-5** (2017)
- 6) 魚橋慶子: 血管運動系症状(血管運動神経系障
害とされる症状)および不眠パターンのしくみ
を血管・周辺組織の共振現象から説明する, *日
本女性医学学会雑誌*, **27**, 180/180 (2019)
- 7) 魚橋慶子: 血流の周波数応答と血管運動系症状,
計測自動制御学会東北支部55周年記念学術講演
会予稿集, 60/63 (2019)
- 8) K. Uohashi: Mechanism of vasomotor symptoms
based on frequency responses and ramp responses of
blood flow, *Proceedings of the SICE Annual
Conference 2020, Chiang Mai, Thailand*, 1707/1712
(2020)
- 9) K. Uohashi: Transfer function model of how sex
hormones imbalance changes resonance frequencies of
vascular beds and surrounding tissues, *Proceedings of
Life Engineering Symposium 2021 (LE2021)*, 31/33
(2021)
- 10) K. Uohashi: The cause of vasomotor symptoms:
Resonance phenomena in the vascular bed, *Journal of
Mid-life Health*, **13**, 15/17 (2022)
- 11) S. Kalra: A neuro-vasculo-endocrine approach to
menopause, *Journal of Mid-life Health*, **13**, 18/19
(2022)
- 12) A.P. Avolio: Multi-branched model of the human
arterial system, *Medical & Biological
Engineering & Computing*, **18**, 709/718 (1980)
- 13) L.R. John: Forward electrical transmission line
model of the human arterial system, *Medical &
Biological Engineering & Computing*, **42**,
312/321 (2004)
- 14) 小野功一, 魚住超: 心臓と血管の調節—制御工
学序説—, 学術図書出版社 (1993)
- 15) 林紘三郎: バイオメカニクス入門, コロナ社
(2013)