

無侵襲的定量的血流測定法による 頸動脈血流の運動処方的研究

東京慈恵会医科大学 池田道明

(共同研究者) 同 古幡博

同 管野亮一

I. はじめに

頸動脈血流の動態を知ることは、脳循環系の運動負荷応答特性の解析に重要であるが、運動による呼吸循環系に関する研究は多くなされているけれども、血流情報による研究は少ない。血流の応答に関しては、非観血的計測法がなく、十分な測定もなされなかった。わずかに、観血的な N_2O 法¹⁾ RI 法²⁾ などで測定されているに過ぎない。しかし、それら観血法は、数分間の平均的な循環時間計測法であるため、脳循環系の比較的早い応答の計測には不適當である。また、原理的に侵襲的計測であるため、健常時の生理的応答とは断じ難い。

我々の研究グループは、既に総頸動脈血流量の無侵襲連続計測の可能な超音波定量的血流量測定装置 (QFM) を開発した³⁾。QFM は、血流量、血流速、血管径の波形および平均、最大、最小値を表示記録するものである。

本研究では QFM を用い、脳循環系入力端の総頸動脈血流量、血流速に関し、運動負荷前後の経時的变化を測定した。また、同時に上腕動脈血圧を測定し、血圧、血流量関係から脳循環抵抗として算出した。これらの測定結果は、運動処方上、運動負荷応答解析の基礎データと考えられるので報告する。

II. 実験方法

頸動脈血流の測定には、超音波定量的血流量測定装置 (QFM) を用いた。この QFM は、超音波パルスエコートラッキング法によって血管径 (D) を、また、超音波改良型ドプラ法によって血流速度 (V) を測定し、 D から血管断面積 ($\pi \cdot D^2/4$) を求め、 V との積から血流量 (Q) を算出する装置である。

出力は、血流量、血流速度、血管径の各拍動波形とその最大、最小、平均値および心拍数で、これらの血流情報がプリントアウトされる。最も信頼性があるとされる電磁流量計と 7% 未満の誤差範囲であるが、より正確に測定するために、QFM は、次の条件を必要とする。

- ① 血管壁エコーが明りょうであること。
- ② 血流ドプラ音が強いこと。
- ③ 血流速パターンが安定なこと。
- ④ ECG が明りょうであること。

これらの条件を満たすためには、超音波ビームが、血管に正確に照射され、さらにプローブの安定な固定が必要となる。運動負荷中、これらの条件が満たされることは困難であるので、負荷前後に仰臥位の状態で測定した。

血圧は、Riva-Rocci の血圧計により上腕動脈で測定し、最高血圧 (BP max)、最低血圧 (BP

min) とした. なお平均血圧 (BP mean) をここでは,

$$BP \text{ mean} = (BP \text{ max} - BP \text{ min}) / 3 + BP \text{ min}$$

として算出した.

運動負荷は, 自転車エルゴメータを用いた. 負荷強度は, 5分間の立位から臥位への姿勢変化, 5分間の50回転/分の 2KP (4.41kg), 同負荷時間と同回転/分の 2.75KP (6.06kg), 3.5KP (7.72 kg) の4段階とした.

測定は, 負荷前のコントロールとして45分間の仰臥位安静後測定とし, 上記負荷を行った後, 再び仰臥位で, 運動直後1分時, 5分時, 10分時, 15分時, 20分時, 25分時, 30分時の7時点とした.

被験者は, 健常な成人男子6名(平均年齢21.8歳)で, 全員正常血圧者である.

検討事項として, QFM の測定と同時に測定した血圧から平均血圧を算出し, 頸動脈系の循環抵抗

抗 (R) を $BP \text{ mean} / Q$ より算出し, 循環抵抗と平均血圧の関係を求めた.

III. 計測結果

1. 血圧値の変化

図1は, 最高血圧, 最低血圧の経時的变化を示したものである.

最高血圧の経時的变化は, 運動負荷後1分時に著しい増加があった. そして, 負荷強度が増加するに伴い, 最高値の増加率は6%, 15%, 30%, 50%であった. その後, 安静時水準まで復帰するのに, 10分以上必要とした.

最低血圧は, 負荷終了後1分時に減少傾向を示し, ほぼ10分後には, 安静時水準に回復する傾向であった. すなわち, 負荷強度に伴って脈圧の増大を認めた.

2. 心拍数の変化

図2は, 心拍数の経時的变化を示したものであ

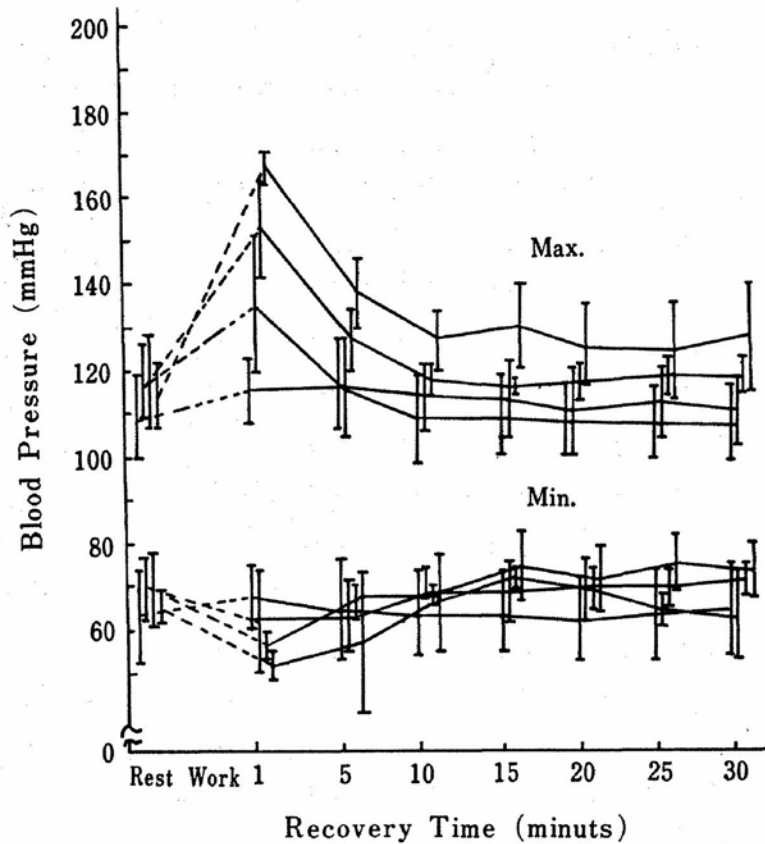


図1 Blood Pressure during Recovery from Supine and Bicycle Exercise

る。

安静値と1分値について、姿勢変化では61.8±8.9拍/分からあまり変化せず、2KP 負荷は63.5±7.9拍/分から74.2±19.8拍/分、2.75KP 負荷

は54.5±10拍/分から101.7±27.8拍/分、3.5KP は57.8±9.6拍/分から119±31.7拍/分へと増加した。負荷量増加に伴い、顕著な増加傾向にあった。

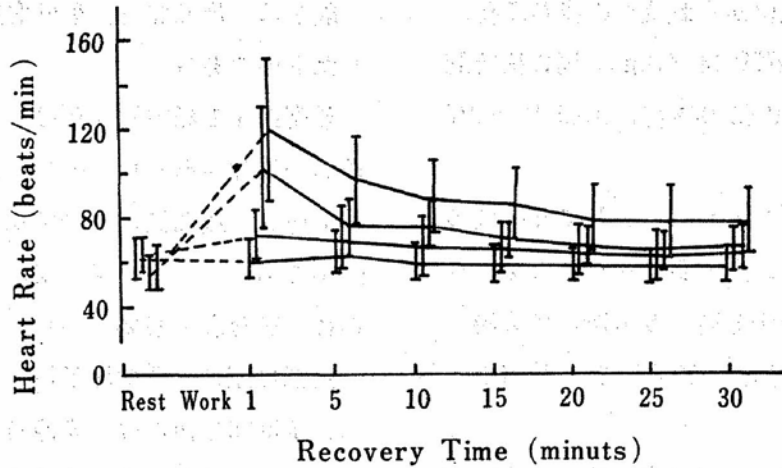


図2 Heart Rate during Recovery from Supine and Bicycle Exercise

表1 負荷別の最高, 最低, 平均血流速の変化

(単位: cm/sec)

計測時間	血 流 速											
	立位からの姿勢変化			2.0KP			2.75KP			3.5KP		
	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean
Rest	65.4 ±10.5	11.3 ± 4.5	21.3 ± 4.0	60.2 ± 8.4	10.6 ± 3.8	22.9 ± 5.0	60.5 ± 6.6	8.9 ± 0.8	19.5 ± 1.2	61.7 ± 6.4	10.0 ± 0.6	21.2 ± 2.9
1	70.3 ±15.7	9.6 ± 2.4	21.5 ± 3.9	79.7 ±17.9	9.0 ± 2.4	22.5 ± 4.6	85.2 ± 9.3	7.7 ± 3.6	27.3 ± 2.2	85.0 ± 4.1	2.0 ± 0.6	22.1 ± 1.6
5	66.8 ± 5.9	10.7 ± 1.8	20.9 ± 1.2	72.9 ±18.3	8.7 ± 2.0	22.7 ± 0.9	74.6 ± 4.5	9.4 ± 1.1	23.5 ± 2.1	87.0 ±17.2	4.4 ± 3.6	23.7 ± 2.3
10	64.2 ± 9.2	9.2 ± 2.8	22.9 ± 5.3	65.0 ± 9.8	7.8 ± 1.5	21.2 ± 4.1	60.9 ±10.4	9.7 ± 1.4	21.4 ± 2.8	74.1 ± 9.4	4.3 ± 3.6	21.7 ± 2.3
15	62.8 ± 7.6	10.3 ± 2.9	21.5 ± 4.4	60.1 ±10.5	9.7 ± 1.7	20.7 ± 1.7	61.8 ± 1.6	9.2 ± 2.1	20.9 ± 1.3	68.4 ±18.2	7.0 ± 3.6	22.3 ± 6.4
20	60.3 ±12.8	11.7 ± 3.9	21.8 ± 3.4	63.2 ± 8.5	9.4 ± 1.9	22.2 ± 3.6	58.3 ± 4.5	8.7 ± 1.2	20.7 ± 2.8	63.2 ±13.5	8.8 ± 2.2	22.3 ± 3.6
25	62.7 ± 9.0	11.1 ± 3.5	21.4 ± 3.1	62.7 ± 8.7	9.1 ± 1.1	20.7 ± 4.0	64.4 ± 7.8	9.2 ± 2.9	22.2 ± 4.9	64.3 ± 6.4	9.3 ± 0.8	23.1 ± 2.4
30	61.6 ± 7.2	10.5 ± 4.5	21.4 ± 2.8	63.7 ±11.9	9.8 ± 2.7	21.4 ± 2.5	60.7 ± 8.2	9.9 ± 2.3	20.8 ± 4.0	66.9 ± 8.9	9.5 ± 2.9	23.6 ± 3.7

3. 血流速の変化 (表1)

最高血流速は、最高血圧と同様の傾向を示し、負荷終了後1分時の最高値から、10分時には安静値まで回復する傾向にあった。一方、最低血流速は、安静時水準に保たれ、定常状態であった。安静値と1分値との比較では、最高血流速は増加を

し、最低血流速に減少が認められた。

平均血流速は、2.75KP 負荷の安静時と1分時に40%の増加 ($P < 0.005$) があつたのみで、経時的にも、負荷別の比較でも大きな変化がなかつた。

表2 負荷別による血流量の経時的変化

(単位: ml/sec)

計測時間	負荷量	立位からの姿勢変化	2.0KP	2.75KP	3.5KP
Rest		10.0±1.6	10.5±1.7	9.1±0.8	9.8±1.5
1		10.1±2.0	11.9±3.0	13.3±2.6	11.2±1.8
5		10.8±1.9	9.5±1.1	9.7±1.8	11.3±1.8
10		10.3±2.2	9.6±1.4	10.3±1.1	9.4±1.5
15		9.8±1.5	9.8±1.3	10.1±2.4	10.0±2.7
20		10.5±2.0	10.7±1.5	9.1±1.0	9.7±1.5
25		10.4±1.9	9.3±1.2	9.3±2.2	9.8±0.9
30		9.7±1.3	9.9±1.5	9.0±1.5	10.9±1.7

4. 血流量の変化 (表2)

立位から臥位への姿勢変化での経時的変化は、ほとんど一定状態であった。2KP 負荷では負荷後、安静時より13%増加を示した。2.75KP 負荷では、負荷終了1分時に高値を示し、その後、20分時に安静時水準まで復する傾向にあった。2.75KP 負荷の安静時に対する1分時の増加率は、46% ($P < 0.001$) の有意な増加であった。3.5KP も有意な増加が認められた。

IV. 考 察

無侵襲的な超音波定量的血流量測定装置 (QFM) を用い、生理的条件下における総頸動脈血流の運動負荷応答を経時的に計測し、前述の結果を得た。心拍数は負荷量の増大に伴う増大傾向を示し、他の研究者ら^{8,12)} の報告と同傾向であった。

1. 血流量の運動負荷応答

脳血流量の計測には、従来観血的な電磁流量計法、割合侵襲の少ない N_2O 法、RI 法などが用い

られてきた。しかし、脳循環の無侵襲的計測法はなく、本研究で用いた QFM が、脳循環系入力端となる総頸動脈血流に適用し得る唯一の無侵襲的定量的測定法である。もちろん、総頸動脈血流は、内外両頸動脈の影響をうけるため、本研究の応答特性が純粋な脳内循環応答とは言い難い。ここでは、この点を踏まえて、他の観血法による脳内循環特性と比較検討した。

運動負荷による脳血流量の応答については、Samnegard H¹¹⁾ が電磁流量計を内頸動脈に装着し、自転車エルゴによる軽負荷応答を調べ、岩崎⁹⁾ は RI 法で、両下肢屈伸および2段階試験に対する頭部平均循環時間を計測し、脳血流量を算出した。その結果、負荷強度による血流変化の程度は違うが、両者とも脳血流の増加傾向を認め、負荷後しばらくして復帰するとの結論を得ている。

筆者らの QFM による総頸動脈血流の応答も、内頸動脈と同様の傾向を認めた。QFM は無侵襲的血流量計測法であり、内外頸動脈の影響を考慮

すれば、今後、より生理的な条件下での運動負荷応答特性の解析をなすものとする。

2. 頸動脈系循環抵抗と運動負荷応答

相沢ら¹⁾の N₂O 法による健康青年安静時の脳血管抵抗 (CVR) を計測した結果は、CVR = 1.40 ± (mmHg/ml/100g 脳/分) であった。

筆者らは、安静時循環抵抗 1.7 (mmHg/ml/100g 脳/分) を得た。この差異は計測法、計測原理、計測部位、侵襲の有無等の原因が総合された結果と考える。今後、より精密な検討が必要と考えられる。

図 3 において、圧上昇に伴う抵抗の増大が認め

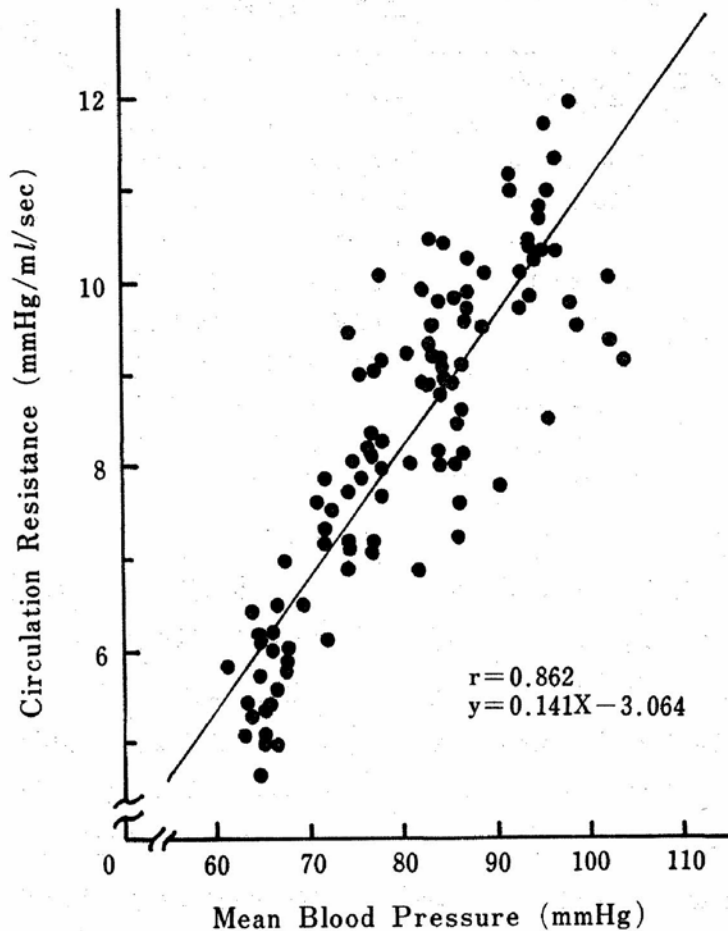


図 3 One Example of the Relation between Cerebral Circulation Resistance and Blood Pressure in All Stage of Exercise

表 3 抵抗値 (CCR) と血圧の相関および回帰式 その時の平均血圧と SD (単位: mmHg)

Subj. No.	Coefficient correlation	Regression line of CCR on BP	Standard error of estimate	BP ± SD mean
1	0.254	$y = 0.05x + 2.85$	±0.78	79.8 ± 3.7
2	0.704	$y = 0.14x - 4.06$	±0.84	80.1 ± 5.9
3	0.458	$y = 0.01x + 9.48$	±1.53	86.8 ± 9.6
4	0.862	$y = 0.14x - 3.06$	±0.81	75.8 ± 7.5
5	0.324	$y = 0.05x + 5.23$	±0.97	79.5 ± 6.2
6	0.249	$y = 0.05x + 3.83$	±1.06	85.0 ± 5.7

られ、表3に、6名全員の圧・抵抗関係の回帰式、相関係数、その血圧範囲を示した。

これは、他の報告⁶⁾と同様であった。しかし血流量は、血圧、 P_{CO_2} ⁷⁾などの因子で大きく影響される。特に運動負荷の場合、 P_{CO_2} の影響は大きいと考えられるので、上記の圧・抵抗関係については、なお今後検討したいと考える。

3. 循環調節機構と運動負荷応答

運動負荷に伴い、心拍数の上昇、脈圧の増大、血流速の増加傾向が認められた。運動によって心拍出量の増大がある^{4,8)}にもかかわらず、それら循環系指標の増大の割には、総頸動脈血流量については、変化量は小さかった。これは、脳における循環調節機構の関与によるものと考えられる。運動処方上、注意を要すると考えられるのが、変化量が小さいとはいえ、負荷強度によって血流量の変動は推察しうる。今後、運動中の血流量測定を検討を進めたい。

V. 結 語

脳循環系の運動負荷応答として、QFMによる無侵襲法で生理的条件下での総頸動脈血流計測を可能とし、次のような結論を得た。

(1) 血流量値：姿勢変化、2KP負荷では変化量が小さかったが、2.75KP負荷、3.5KP負荷では、有意な増加が1分時において確認された。

(2) 血流速：姿勢変化、2KPにおける血流速は1分値に増加傾向があるが、経時的には、ほとんど大きな変化を示さなかった。しかし、2.75KP負荷における(3.5KPも含み)1分値に有意な増加が認められた。

(3) 心拍数、血圧値は従来報告されている傾向と同様であった。

(4) 循環抵抗：運動負荷による平均血圧値の上昇に対し、脳循環抵抗の増大を認め、脳血流量調節に循環抵抗が関与している結果を得た。

文 献

- 1) 相沢豊三；脳循環とその臨床，初版，中外医学社，東京，93—95 (1966)
- 2) 新城之介，吉村正治，原一男，赫彰郎，宮崎正，山手昌二，菊池太郎，岩崎一；Radioisotope 体外計測法による脳循環動態の研究，*Radioisotopes*, **13**, 308 (1964)
- 3) Astrand, P.O. et al.; A Nonogram for Calculation of Aerobic Capacity from Pulse Rate During Submaximal Work. *J. Appl. Physiol.*, **7**, 218—221 (1954)
- 4) Donald, K.W., J.M. Bishop, G. Cmmig, O.L. Wade, The effect of the Cardiac output and circulation dynamics of normal subject. *Clin. Sci.*, **14**, 37—73 (1955)
- 5) 古幡博，菅野亮一，古平国泰，青柳徹，松本博治，林純，吉村正蔵；血流速度の絶対値計測をめざした超音波ドプラ法，*医用電子と生体工学*, **16—4**, 30—34 (1978)
- 6) 後藤文男；脳循環における血圧因子に関する研究，*精神誌*, **60**, 104—115 (1958)
- 7) Harper, A.M.; The inter-relationship between a P_{CO_2} and blood pressure in the regulation of blood flow through the cerebral cortex, *Acta. Neurol. Scand, Suppl.*, **14**, 94 (1965)
- 8) Hedlund, S., C. Nytl, O. Regnström; The behavior of the cerebral circulation during muscular exercise, *Acta Physiol. Scand.*, **54**, 316—324 (1962)
- 9) 岩崎一；Radio isotope 体外計測法による各種薬剤ならびに運動負荷時の脳循環動態の研究，*日医大誌*, **39** (6), 457—467 (1972)
- 10) Kety, S.S., Schmidt, C.F.; The determination of cerebral blood flow in man by the use of nitrous oxide in low concentrations, *Am. J. Physiol.*, **143**, 53 (1945)
- 11) Samnegård, H., Carlens, D.; Effect of physical exercise on internal carotid artery blood flow after arterial reconstruction, *Scand. J. Thor. Cardiovasc. Surg.*, **9**, 220—228 (1975)
- 12) 佐藤佑，石河利寛，青木純一郎，清水達雄，前嶋孝；運動に対する心拍数，血圧，呼吸数の反応の年齢別，性別特性に関する研究，*体力科学*, **26**, 165—176 (1977)