

「赤とんぼ」歌唱時における 右前頭葉近傍血流とリズム・呼吸プロセスの 時系列的相関に関する研究 —近赤外分光法による—

虎谷知樹[†] 岩坂正和[†]

本研究では近赤外分光法（NIRS）を用いた脳機能計測法により、「赤とんぼ」歌唱中の脳血流を測定した。結果、歌唱中は、前頭葉の脳血流の酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気（歌い出し）点とがよく一致することが見いだされ、歌唱中は呼吸が脳血流に影響を与えることが示唆された。この呼吸による脳血流への影響は、歌唱にある程度没入した時でなければ見られなかった。従って没入状態に入ることにより、脳血流は脳神経系の活動と呼吸とに影響を受けている状態から、呼吸の影響が強くなる状態へとシフトしていると考えられる。

Time Correlation between Hemodynamic Pattern in Right Frontal Brain and Respiration Rhythm during Singing the “Aka-tonbo” — A Near Infrared Spectroscopy Study—

Tomoki Toratani[†] and Masakazu Iwasaka[†]

We investigated the hemodynamic activity of the brain during singing “Aka-tonbo” by means of near-infrared spectroscopy (NIRS). We observed the time correlation between the negative peaks in the hemodynamic pattern of the frontal brain and the expiration points, hence it was suggested that the respirations during the singing entrained the brain activity through the hemodynamic changes. The respiration effects on the brain were observed during only devotion to singing. We suggested that the hemodynamic activity of the brain was affected by brain nerve activity and respiration, and the respiration effects became to be stronger than brain nerve activity effects during devotion.

1. はじめに

近年、様々な脳機能計測法の発達により、脳の音楽認知機能を解明しようとする研究が多くなされている。Altenmullerら[1]は、音楽の旋律の認知は右大脳皮質で行われ、音楽のリズムの認知は左大脳皮質で行われると報告している。

本研究では脳機能計測法の一つである、近赤外分光法（Near Infra-red Spectroscopy, NIRS）を用い、音楽活動時の脳機能を測定した。NIRSは、大脳皮質の血流の変化を捉えて脳機能を計測するものである。この原理は、頭部に出光端子と受光端子を配置し、頭部を透過・反射・散乱してきた光の吸光度の違いから、大脳皮質の比較的表層部分の脳血流の酸素化ヘモグロビン相対変化量を割り出すというものである。

NIRSは非侵襲かつ簡易・低拘束測定を行うことが可能であり、体動等を伴う音楽活動時の脳機能計測に非常に適している。片寄ら[2]はNIRSを用いて、演奏用インターフェイスを使用している際の脳血流を測定することで、音楽活動中の脳活動と没入についての議論を行っている。

また、簡易・低拘束計測が可能なNIRSは、今まで計測の難しかった小児や精神疾患患者への適用も盛んになされており、音楽療法への科学的アプローチが可能な測定法としても期待されている。後藤ら[3]は、NIRSを用いて意識障害の患者らの脳血流を測定し、音楽療法における運動と音楽の同時刺激が前頭葉の活性化を促すことを報告している。

本研究ではNIRSを用いて、歌唱という音楽活動時の脳活動を測定した。歌唱は音楽の聴取などに比べ、高い集中が必要となるタスクであり、他の余分な脳活動が反映されにくく、再現性を得る上で適切なタスクであると考えた。この歌唱という音楽活動が脳に与える影響を調べることにより、音楽療法への科学的アプローチを図ることが本研究の目的である。

2. 実験方法

最初に実験1として、被験者6名に、童謡「赤とんぼ」（作詞：三木露風、作曲：山田耕筰）を歌唱してもらい、その間の脳血流を近赤外分光法（NIRS）を用いて測定した。測定は被験者ごとに3回ずつ行った。測定箇所は、国際法である10-20法のF4とF8の間、すなわち右前頭葉とした。ここは音楽の旋律の認知に関連すると言われており[1]、音楽の認知を調べるのに適していると判断した。

[†] 千葉大学工学部メディカルシステム工学科
Department of Medical System Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University, Japan

歌唱曲「赤とんぼ」は、前奏部と1~4番までの歌唱部で構成されており、1~4番までの歌唱部はそれぞれ2フレーズから成ると定義した。すなわち歌唱部全体は8フレーズで成り立っており、各フレーズの前の大きな吸気（息継ぎ）の後の呼気（歌い出し）点をE（Expiration）と定義した。また各フレーズの中心には小さな吸気（息継ぎ）が存在し、その後の呼気（歌い出し）点をE'と定義し、ここから新たに歌い始める部分を、フレーズ'と定義した（表2.1）。フレーズとフレーズの間隔は12秒であり、フレーズとフレーズ'の間隔は6秒であった。

音源は楽譜作成ソフトで作成したものをを用い、それをスピーカーから被験者に呈示し、被験者はそれに合わせて、歌詞を完全に暗記した状態で、目を瞑り立位で歌った。

また被験者 A,B,C には、追加実験として以下の A~C をそれぞれ3回ずつ行ってもらった。

(1) 追加実験 A：左前頭葉で測定した場合の脳血流

歌唱中の脳血流を右前頭葉ではなく左前頭葉（F3 と F7 の中間）で測定し、左右の差について調べた。

(2) 追加実験 B：一定のリズムで歌唱中の息継ぎと同じような呼吸をした場合の脳血流

歌唱中と同じ周期の一定のリズムで、歌唱中の息継ぎと同じような呼吸のみをした場合の脳血流を測定した。これにより、音楽の影響を省いた場合の脳血流を調べた。

(3) 追加実験 C：ランダムなタイミングで歌唱中の息継ぎと同じような呼吸をした場合の脳血流

被験者の任意のタイミングで、歌唱中の息継ぎと同じような呼吸のみをした場合の脳血流を測定した。これにより、リズムの影響も省いた場合の脳血流を調べた。

なお、追加実験 B,C では、呼吸をそれぞれ9回ずつ行った。また追加実験 B,C には小さい吸気がないため、その後の呼気点 E' は存在しない。

表 2.1 本研究で用いる略語の定義

フレーズにある呼気（歌い出し）点	E
フレーズ'にある呼気（歌い出し）点	E'
E の 1 秒後の点	postE
E' の 1 秒後の点	postE'

3. 結果

実験1で得られた「赤とんぼ」歌唱中の脳血流および呼気・吸気点、および同時に測定した心拍変動のようすを図3.2に示す。

歌唱中は、脳血流の酸素化ヘモグロビン相対変化量が、正弦波的に変動していることが明らかとなった。

細かく見ていくと、酸素化ヘモグロビンのネガティブピークが、呼気（歌い出し）点とよく一致していた。また心拍変動のポジティブピークとも一致していた。

逆に、酸素化ヘモグロビンのポジティブピークと吸気点、心拍変動のネガティブピークもよく一致していた（図3.1）。

すなわち、酸素化ヘモグロビンと心拍変動は、逆位相になっていた。

なお、この「脳血流の酸素化ヘモグロビンのポジティブピークが吸気点に一致し、酸素化ヘモグロビンのネガティブピークが呼気点に一致する」という結果は、Elwellら[4]が1996年に報告した“呼気中は脳血流酸素化ヘモグロビンが上昇し、吸気中は減少する”という現象と同じであり、Elwellらの現象を再現することができたといえる。

また、脳血流の酸素化ヘモグロビンと心拍変動が逆位相であるという点も、「心拍数は吸気中には上がり、呼気中には下がる」という一般的な現象から推測されるものであった。

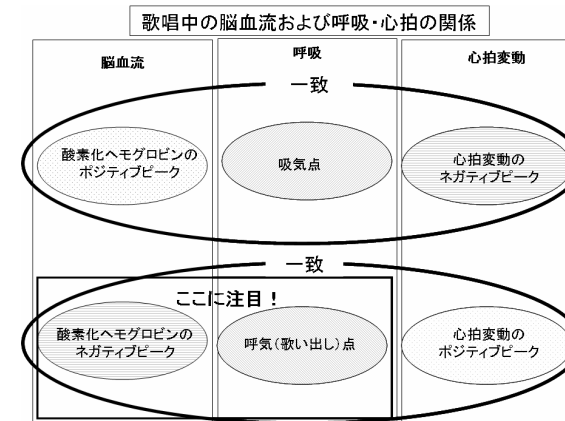


図 3.1 脳血流および呼吸・心拍変動の関係

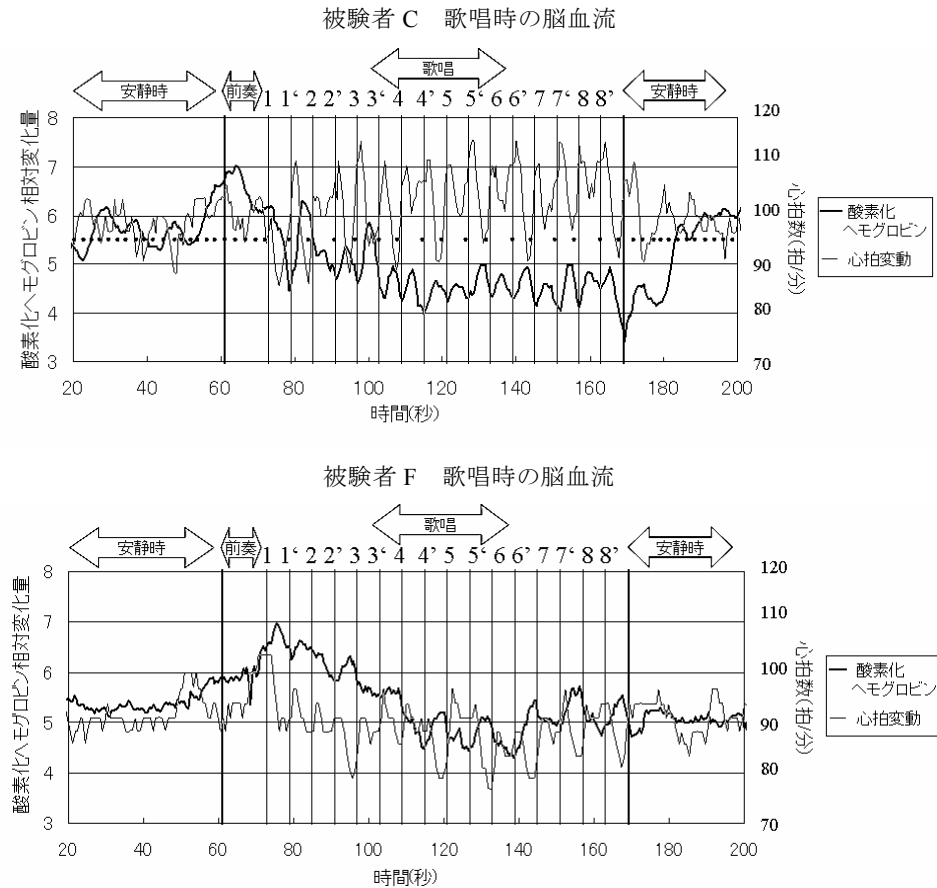


図 3.2 実験 1: 歌唱中の右前頭葉脳血流の酸素化ヘモグロビンおよび、心拍変動、呼気(歌い出し)点、吸気点
 酸素化ヘモグロビン: 黒太線 心拍変動: 灰色線
 呼気点(歌い出し)点: 灰色縦線 ※1,2,3...は呼気点 E, 1',2',3'...は呼気点 E'
 吸気点: 黒丸 実験の開始と終わり: 黒太縦線
 上図: 被験者 C 下図: 被験者 F なお、被験者 F は吸気点を測定することができなかったため、吸気点を表示していない。
 歌唱部の数字はフレーズの番号

本研究ではこれらの一致のうち、脳血流酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと 2 種類の呼気(歌い出し)点(E および E')との一致について調べた。
 ここで、一致の定義を以下のように定めた。

一致の定義

- 酸素化ヘモグロビンのネガティブピークを±3秒の間で最小値の点と定義
- 酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気点とが、± 0.5秒間に同時に存在する時、一致していると定義

また酸素化ヘモグロビンのネガティブピークは、呼気点(E, E')から約1秒後に存在することが非常に多かった。故に E, E' の 1 秒後の点を postE, postE' と名づけ、それらと一致している場合も呼気と一致しているを見なし、どちらか一方にでも一致している場合は、E+postE もしくは E'+postE' と一致すると定義した。

実験 1 および追加実験 A, B, C における、各被験者の脳血流酸素化ヘモグロビンのネガティブピーク(Hb/N ピーク)と呼気(歌い出し)点(E+postE, E'+postE')との一致率を図 3.4 に示す。また実験中によく見られた波形を図 3.3 に示す。

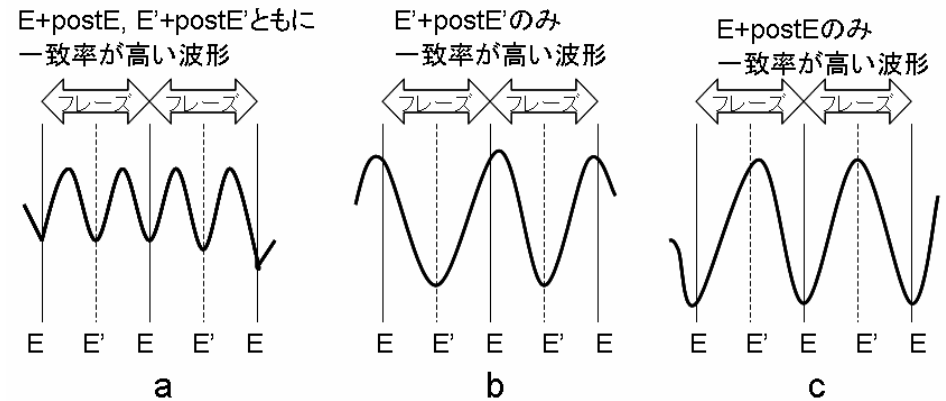


図 3.3 歌唱中によく見られた脳血流酸素化ヘモグロビンの波形
 E は大きい吸気あとの呼気点
 E' はフレーズ中心にある小さい吸気あとの呼気点

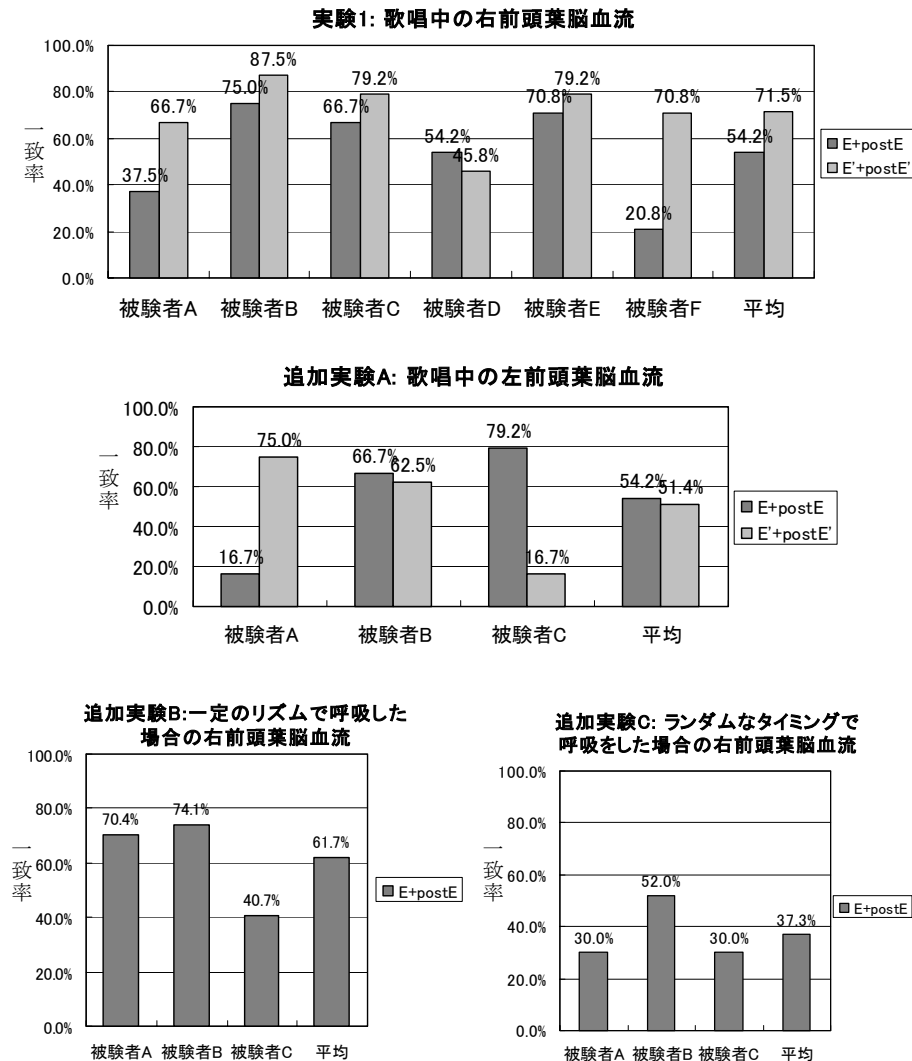


図 3.4 被験者ごとの酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気点 (E+postE, E'+postE') との一致率 標本数: E+postE, E'+postE', それぞれ 24.

実験 1 (歌唱中の右前頭葉脳血流) および追加実験 A (歌唱中の左前頭葉脳血流) では、いずれの被験者においても酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと、2 種類の呼気 (歌い出し) 点 E+postE もしくは E'+postE' の少なくともどちらか一つの一致率が高かった (50%, 60%, 70% 以上)。このことから、歌唱中は右前頭葉、左前頭葉問わず、脳血流酸素化ヘモグロビンのネガティブピークが、呼気 (歌い出し) 点とよく一致する、すなわち脳血流は呼吸の影響を強く受けているといえる。

また、追加実験 B (一定のリズムで呼吸した場合の右前頭葉脳血流) では、被験者 A, B は酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気 (歌い出し) 点 (E+postE) との一致率が高かったが (70% 以上)、被験者 C は一致率が歌唱時に比べて落ちていた。

追加実験 C (ランダムなタイミングで呼吸した場合の右前頭葉脳血流) では、全ての被験者の酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気 (歌い出し) 点 (E+postE) との一致率が、他の実験に比べて低くなっていた。

このことから、単純に歌唱中の息継ぎと同じような呼吸をただけでは、脳血流は呼吸の影響を受けないといえる。歌唱中や一定のリズムで呼吸をした場合にのみ、影響を強く受けるといえる。

次に各実験における曲のフレーズ (1~8) ごとの一致率を図 3.5 に示す。追加実験 C の一致率が全体的に低いのは先程も述べた。

実験 1 および追加実験 A, B では、タスクの序盤に当たるフレーズ 1 のみ一致率が低かった。実験 1 ではフレーズ 2 の一致率も低かった。また追加実験 A では、タスクの終盤の一致率が低くなっている傾向も見られた。

しかし、タスクが始まってから 2 回目の呼気にあたる、実験 1 および追加実験 A のフレーズ 1' や、追加実験 B のフレーズ 2 では、一致率が高い傾向が見られた。

これらの点から、曲の序盤や終盤にかけては、脳血流は呼吸の影響を受けにくくなるといえる。しかし、タスクが始まってからちょうど 2 回目の呼気の影響を、脳血流は強く受ける傾向にあるといえる。このことから、ちょうど 2 回目の呼気点に、脳血流と呼吸を同期させる重要な要素が存在するといえる。

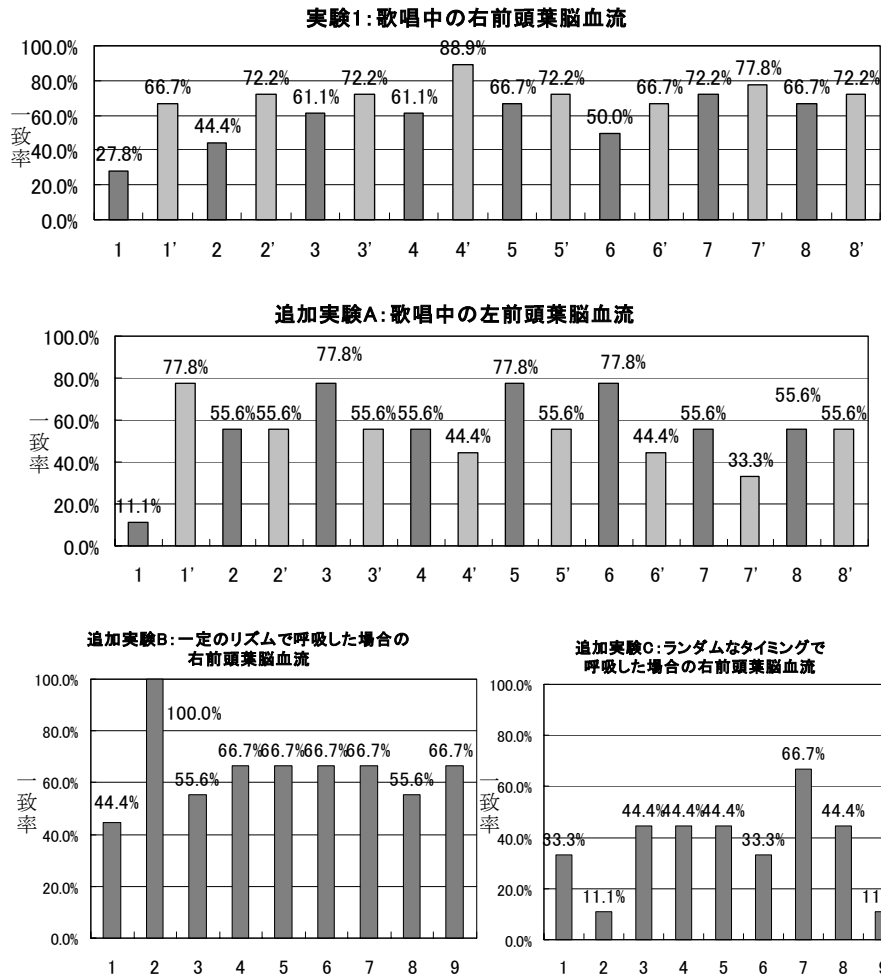


図 3.5 フレーズごとの酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気点 (E+postE, E'+postE') との一致率 下部数字はフレーズ番号. 「'」がついていないものは呼気点 E+postE, 「'」がついているものは呼気点 E'+postE' を示す. 標本数は実験 1 ではフレーズごとに 18, その他ではフレーズごとに 9. なお追加実験 B,C には、呼気点 E'+postE' は存在しない.

4. 考察

歌唱中の右前頭葉および左前頭葉の脳血流の酸素化ヘモグロビンのネガティブピークが、呼気（歌い出し）点とよく一致することが示された. この結果は、Elwell ら[4]が同じ近赤外分光法で得た“吸気中は脳血流の酸素化ヘモグロビンが下がり、呼気中では上がる”という結果に等しく、Elwell らの現象を再現できたといえる.

よって歌唱中の脳血流は、呼吸の影響を強く受けていると考えられる. しかし、曲序盤では酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼気点との一致率が低く、またランダムなタイミングで歌唱中の息継ぎと同じような呼吸をした場合の一致率も低かった. 片寄ら[2]は、音楽等の芸術的活動への没入により、前頭葉正中部の脳血流酸素化ヘモグロビンが低下することを報告している. このことから、曲序盤に没入状態に入ることにより、脳血流は脳神経系の活動と呼吸とに影響を受けている状態から、脳神経系の活動の影響が弱まり呼吸の影響を強く受けるようになる状態へとシフトしていると考えられる (図 4.1). すなわち、歌唱による呼吸の影響は、ある程度歌唱という行為に没入していなければ得られないと考えられる.

このことは、音楽療法における歌唱という行為の科学的有用性を示唆している. なぜならば、音楽療法によって患者を歌唱行為に没入させることにより、呼吸が脳血流に影響を与えるようになることが示唆されたからである.

今後の研究では、脳血流が呼吸の影響を受けることによって、どのような作用がもたらされるかを明らかにしたい. また、脳血流中の脳神経系の活動の影響と呼吸の影響との比率から、被験者の没入の度合いを測定する何らかの指標を得られる可能性についても追求していきたい.

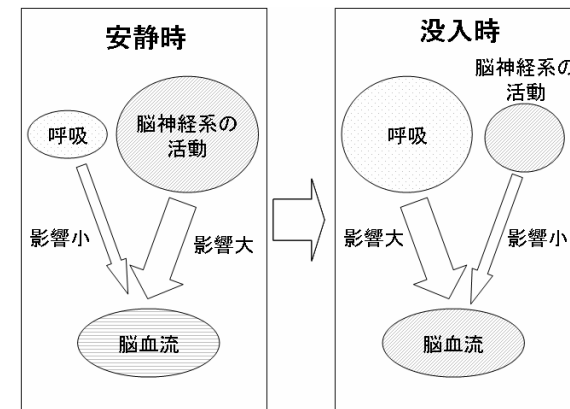


図 4.1 脳血流と呼吸・脳神経系の活動の関係

また今回の実験では、歌唱中の脳血流酸素化ヘモグロビンの波形は、図 3.3 の a,b,c という 3 種類のものが得られた。a は完全に呼吸に同期している状態であるが、b,c は歌唱中にある 2 種類の呼吸のうち 1 種類としか同期していない。今回用いた歌唱曲「赤とんぼ」では、息継ぎと息継ぎの間隔が $3/4$ 拍子 \times 2 小節：6 秒なのに対し（図 3.3 における E と E' の間隔）、「赤とんぼ」のフレーズの間隔、すなわち楽曲におけるちょうど良い区切り目の間隔は $3/4$ 拍子 \times 4 小節：12 秒であった（図 3.3 における E と E の間隔、および E' と E' の間隔）。

このことから、図 3.3 の b,c の波形は、呼吸以上に、「赤とんぼ」のフレーズの間隔、もしくは楽曲の $3/4$ 拍子 \times 4 小節というリズムの影響を強く受けたものであると思われる。

このことは、脳血流が呼吸の影響を受けると同時に、フレーズの長さやリズムによる影響も強く受けることを示唆している。一定のリズムで呼吸をした追加実験 B では脳血流と呼吸との同期が得られたが、ランダムなタイミングで呼吸をした追加実験 C では脳血流と呼吸の同期が得られなかったという結果も、この推測を支持している。恐らく、脳血流はタスク没入時に呼吸の影響を受けるが、没入と同時に脳内でなされたフレーズの長さの知覚やリズムの知覚によって、呼吸影響が補正を受けているのではないかとと思われる（図 4.2）。

脳血流と呼吸の同期、および没入・フレーズの長さおよびリズムの知覚の関連性については、今後の研究を経て議論を進めていきたい。

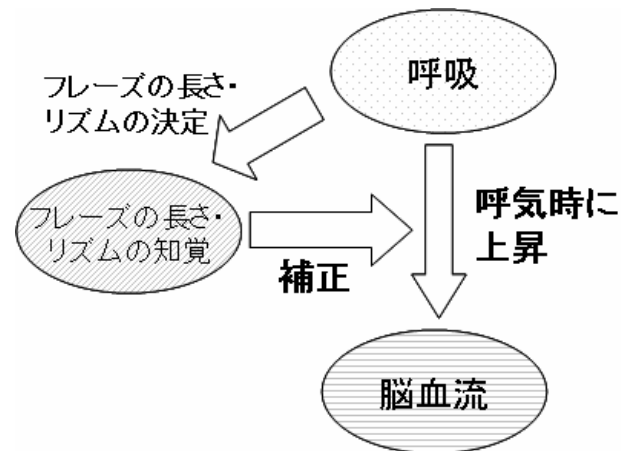


図 4.2 脳血流と呼吸・フレーズの長さおよびリズムの知覚の関係

5. 結論

本研究では近赤外分光法（NIRS）を用いた脳機能計測法により、歌唱中の脳血流を測定した。結果、歌唱中は、脳血流の酸素化ヘモグロビンのネガティブピークと呼吸（歌い出し）点とがよく一致することが見出され、歌唱中は呼吸が脳血流に影響を与えることが示唆された。またこの呼吸による脳血流への影響は、歌唱にある程度没入した時でなければ見られないことや、フレーズの長さの知覚およびリズムの知覚により補正を受ける可能性も示唆された。脳血流中の呼吸成分を測定することにより、被験者の没入の度合いを測定できる可能性も示唆された。

この結果は、音楽療法における歌唱行為の有用性を示唆し、また音楽療法の科学的評価の可能性を示唆するものであり、音楽療法への科学的アプローチに寄与することができたといえる。

参考文献

- 1) E.O. Altenmuller, et al: “Music in Your Head, Scientific American Mind”, Vol. 14, No. 1, (2004)
- 2) 片寄晴弘、ほか、”音楽における没入感に関する検討—技能の拡張と身体性の視点から— 音楽とエンタテインメント”、日本バーチャルリアリティ学会誌、No.9, Vol.1, pp.10-14 (2004)
- 3) Yukio Goto, et al, “Cerebral circulation of consciousness disorder patient using near-infrared spectroscopic topography during brain rehabilitation by music exercise therapy”, Recent advances in human brain mapping, Volume 1232, pp. 549-554 (2002)
- 4) C. E. Elwell, et al: “Influence of respiration and changes in expiratory pressure on cerebral Haemoglobin Concentration Measured by Near Infrared Spectroscopy”, Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism. Vol. 16, pp. 353-357 (1996)