

座位および仰臥位における声道形状の相違

— 開放型 MRI 装置を用いた観測 —

北村 達也[†] 竹本 浩典[†] 本多 清志[†] 島田 育廣^{††} 藤本 一郎^{††}
赤土 裕子^{††} 正木 信夫^{††} 黒田 輝^{†††} 奥内 昇^{†††} 千田 道雄^{†††}

[†] ATR 人間情報科学研究所 〒619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2

^{††} ATR 脳活動イメージングセンタ 〒619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2

^{†††} 財団法人 先端医療振興財団 〒650-0047 神戸市中央区港島南町 2-2

E-mail: †{kitamura,takemoto,honda}@atr.jp

あらまし 体位の変化が母音発声に与える影響を明らかにするため、開放型 MRI 装置を利用して正中矢状断面の MR 画像を観測した。成人男性 3 名を対象にして座位および仰臥位での日本語 5 母音の持続発声時の撮像を行った。硬口蓋を基準とした体位間の比較の結果、仰臥位では舌がより後方に移動し、軟口蓋と口唇にも重力の影響がみられた。大きな舌の移動は前舌母音よりも後舌母音にて現れる傾向があった。一方、座位では頸椎と咽頭後壁が前方に移動した。これは重力よりも頭位による影響であると考えられた。また、撮像と同時に収録した音声进行分析したところ、体位間の差異は約 1.5 kHz 以上の周波数帯域で顕著であった。

キーワード 声道形状, 座位, 仰臥位, 開放型 MRI 装置, 重力

Difference in vocal tract shape between upright and supine postures

Observations by an open-type MR scanner

Tatsuya KITAMURA[†], Hironori TAKEMOTO[†], Kiyoshi HONDA[†], Yasuhiro SHIMADA^{††},
Ichiro FUJIMOTO^{††}, Yuko SYAKUDO^{††}, Shinobu MASAKI^{††}, Kagayaki KURODA^{†††},
Noboru OKU-UCHI^{†††}, and Michio SENDA^{†††}

[†] ATR Human Information Science Laboratories 2-2-2 Hikaridai, "Keihanna Science City" Kyoto
619-0288 Japan

^{††} ATR Brain Activity Imaging Center 2-2-2 Hikaridai, "Keihanna Science City" Kyoto 619-0288 Japan

^{†††} Institute of Biomedical Research and Innovation 2-2, Minatojima Minamimachi Chuo-ku, Kobe
650-0047, Japan

E-mail: †{kitamura,takemoto,honda}@atr.jp

Abstract Midsagittal images were collected using an open-type magnetic resonance imaging scanner to examine possible effects of body postures on vowel articulation. Three male speakers performed sustained productions of five Japanese vowels with supine and upright body postures. Comparisons of data between the two conditions revealed that the tongue tends to be more retracted backward in supine posture in back vowels, and that the soft palate and lips also showed effects of gravity. In upright posture, the cervical spine and posterior pharyngeal wall were found to be more anterior relative to the hard palate, which suggests effects of head posture rather than of gravity. Acoustic data demonstrated major spectral differences in the frequency range above 1.5 kHz.

Key words vocal tract shape, upright posture, supine posture, open-type MRI scanner, gravity

1. はじめに

核磁気共鳴画像法 (MRI) は非侵襲な生体観測手法として音声生成系に関する研究に広く利用されている。一般に, MRI による撮像では被験者は仰臥位にて MRI 装置内に入る。この場合, 人間が通常発声を行っている立位または座位とは重力の方向が異なるため, 観測する調音器官の形状に何らかの差異がある可能性がある。そこで, 本研究では体位による声道形状の差異について検討を行う。

体位の違いが音声に与える影響に関しては, 園田ら [1] らが母音を対象にして基本周波数とホルムント周波数の体位による差異を報告している。Shiller ら [2] は, 立位, 仰臥位, 腹臥位で発声された母音のホルムント周波数を調査している。その結果, F1 は立位, 仰臥位, 腹臥位の順で低くなり, F2 はこの順で高くなる傾向があると報告している。また, Tiede ら [8] は, 2 つの体位で発声された音声を比較してホルムント周波数のバンド幅に差異が見られると述べている。そして, 被験者がこれらの音声を聞いてチャンス・レベルよりも高い確率で体位を判定可能であったと報告している。

体位の違いが発話器官の筋活動に与える影響も研究されている。Hoit ら [3] は, 立位と仰臥位において呼吸時と発声時の腹部の筋活動を調査した。その結果, 立位では腹側部の筋活動が高いことなどを報告している。Niimi ら [4] および熊田ら [5] は, 発声時のオトガイ舌筋の筋活動は体位によって異なることを明らかにし, 仰臥位において特に垂直方向に近い筋の活動が大きいことを示した。Moon ら [6] は, 口唇破裂音 [p] 発声時の口蓋帆挙筋と口蓋舌筋の筋活動への重力への影響を調査した。そして, 仰臥位では重力が鼻咽腔の閉鎖を助長する方向に働くため, 口蓋帆挙筋の筋活動が低くなると推測した。

体位の違いが調音動作に与える影響については, 各種の観測技術を用いた研究が行われている。Tiede ら [7] [8] は磁気センサおよび X 線マイクロビームを用いて, 座位と仰臥位における調音運動の差異を示した。また, Stone ら [9] は超音波画像法を用いて体位による調音運動の差異を研究している。

このように, 様々な手法を用いて体位の違いが音声や発話器官に与える影響が調べられてきた。しかし, 調音器官や声道の形状が詳細に観測できる MRI を用いて体位間の違いを調査した研究はみられない。そこで, 本研究では仰臥位に加えて座位でも撮像可能な開放型 MRI 装置を用いて, これらの体位による声道形状の差異を明らかにする。

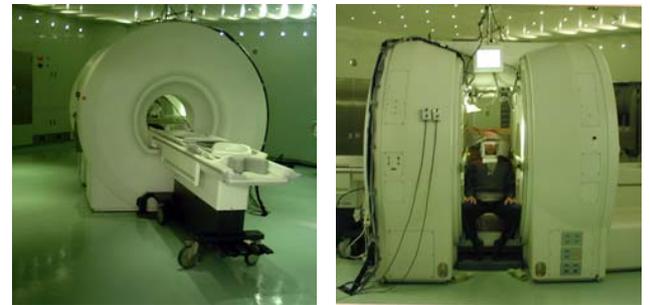
本稿では, まず MRI 撮像条件について説明する。次に, 被験者 3 名の調音器官および声道の形状に関して体位による差異を示す。そして, MRI 撮像と同時に収録した音声の体位による差異を示す。

2. MRI 撮像

2.1 開放型 MRI 装置

(財) 先端医療振興財団に設置された開放型 MRI 装置, GE 製 0.5T MRI SIGNA SP/i を用いて撮像実験を行った。この MRI 装置は, 医療処置や手術中に MR 画像をモニタするため

に特殊設計されており [10], 図 1 (a) に示すように 2 つのドーナツ型超伝導磁石が術者空間を隔てて対立するように配置されている。被験者は図 1 (b) に示すようにこの空間に座位または仰臥位にて入り, 撮像を行った。



(a) front view

(b) lateral view

図 1 撮像に用いた開放型 MRI 装置。被験者は 2 つのドーナツ型超伝導磁石の間に入る。

2.2 撮像条件

撮像シーケンスは Spoiled Gradient Recalled Echo (SPGR) 法である。TE = 6.9 msec, TR = 35 msec, FA = 30 度, NEX = 1 である。撮像領域は 250 × 250 mm, 分解能 256 × 256 pixels である。撮像面は正中矢状断面の 1 面のみで, スライス厚 10 mm である。MR 画像 1 枚の撮像に要する時間は約 4 sec である。撮像面は体位ごとに決定したため, 2 つの体位で厳密には断面の位置が一致していない。

撮像にはフレキシブル RF コイルを用い, 声道が撮像領域の中心になるようにした。被験者がこの RF コイルを装着した様子を図 2 に示す。RF コイルにより外鼻が変形するものの, 調音動作には影響しないことを撮像前に確認した。

撮像時には被験者の頭部をバンドで固定した。仰臥位での撮像の際には, 被験者の頭部の下に平らなクッションを敷いた。

MR 撮像と同時に備え付けのマイクを用いて音声の収録を行った。音声は DAT レコーダー (SONY TCD-D10 Pro II) を用いて標準化周波数 48 kHz で記録した。



図 2 フレキシブル RF コイルを装着した被験者。

2.3 タスク

被験者は, 静止状態の後に /a/, /i/, /u/, /e/, /o/ の順で持続発声を行った。各母音の発声継続時間は約 8 sec であり, その間に撮像を行った。

2.4 被験者

被験者は日本人成人男性 3 名である。以降ではこれらの被験者を A, B, C と表す。

3. 正中矢状断面における声道形状の差異

3.1 分析方法

座位と仰臥位で撮像した MR 画像では、画像における被験者の像の位置が異なる。そこで、以下のようにして 2 つの MR 画像で硬口蓋の輪郭を一致させた。まず硬口蓋を 2 本の直線で近似するようにトレースし、次に 2 つの体位の MR 画像でこれら直線が一致するように座位の MR 画像に対してアフィン変換を施した。以上の処理の後、MR 画像のトレースを行った。

また、体位による舌と軟口蓋の形状変化を定量的に表す指標として、2 つの体位間の舌尖の距離および口蓋垂下端の距離を計測した。これらの位置は目視により決定した。

3.2 結果と考察

被験者 A の座位と仰臥位での MR 画像を図 3 に示す。座位の MR 画像は上記のアフィン変換を施したものである。全ての被験者のトレース図を図 4 に示す。また、座位と仰臥位間の舌尖の距離を表 1、口蓋垂下端の距離を表 2 に示す。図 3 の MR 画像では外鼻の変形が認められるが、これはフレキシブル RF コイルが外鼻に接触しているためである。

これらの図から体位により調音器官の形状や位置が異なることがわかる。体位による形状変化は舌、咽頭腔、軟口蓋、口唇に観察され、変位は頸椎と下顎に観察される。また、形状変化や変位の程度には個人差がみられる。

3.2.1 舌への影響

図 3 および図 4 から、仰臥位での発声時に舌は重力の影響を受けて後方移動する傾向があることがわかる。この結果は、磁気センサ [7]、X 線マイクロビーム [8]、超音波 [9] を用いて体位間の舌形状を比較した研究の報告を支持するものである。

仰臥位では舌の後方移動に伴い舌尖も後方移動する。本研究の被験者では、体位の違いにより舌尖が被験者 A は最大 2 mm、被験者 B は最大 20 mm、被験者 C は最大 3 mm 後方移動した (表 1)。特に被験者 B は舌尖の移動距離が大きく、母音 /a/、/e/、/o/、/u/ では舌尖と歯列との間にくぼみが生じている。被験者 B の舌尖の移動距離は前舌母音よりも後舌母音で大きい。前舌母音では舌が口蓋に接触することによって舌を支持することができるが、後舌母音ではそれができないためであろうと考えられる。

3.2.2 軟口蓋への影響

被験者 C の仰臥位での MR 画像では軟口蓋の形状を特定できなかった。体位の違いによる口蓋垂下端の移動は、被験者 A で最大 6 mm、被験者 B で最大 8 mm であった (表 2)。口蓋垂下端の向きは重力の方向と概ね一致していた。

また、体位の違いにより主声道と鼻腔との連結関係が変わることはなかった。被験者 A の母音 /a/ では座位および仰臥位ともに鼻咽腔の閉鎖が不完全で、その他の母音では座位および仰臥位ともに鼻咽腔が閉鎖している。被験者 B では全ての母音に関して座位および仰臥位ともに鼻咽腔が閉鎖している。この結果は、被験者が重力の向きに応じて軟口蓋の制御を行っていたことを示唆している。

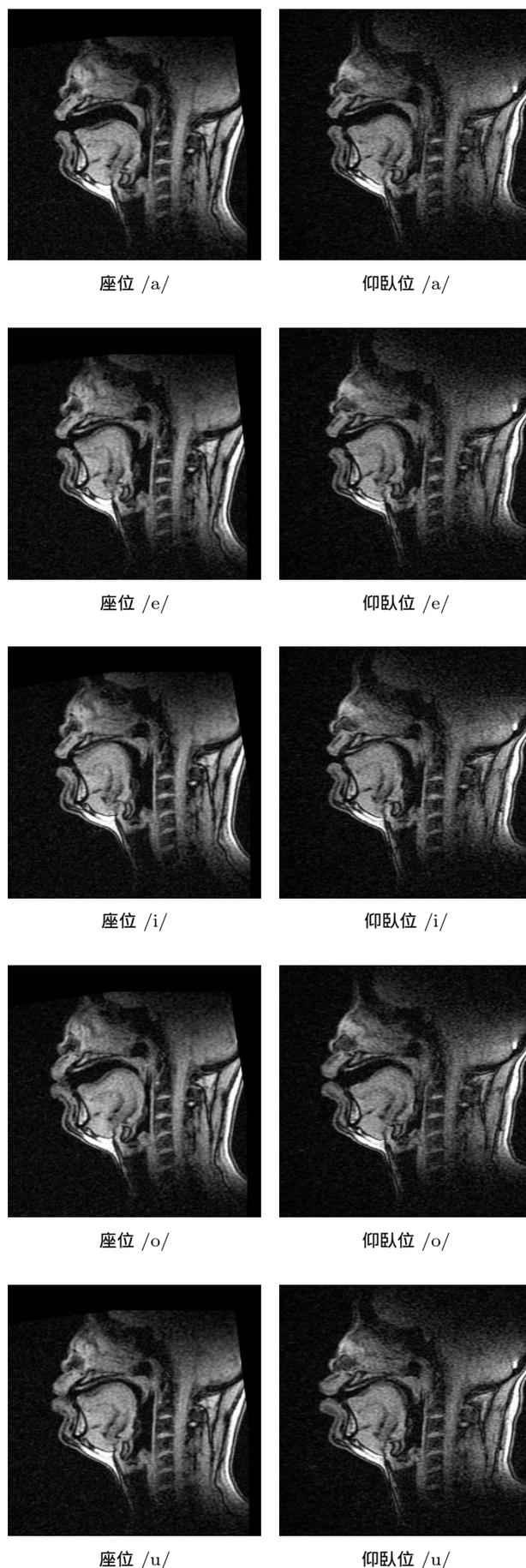


図 3 被験者 A の座位および仰臥位における発声時の MR 画像 (左) 座位 (右) 仰臥位。

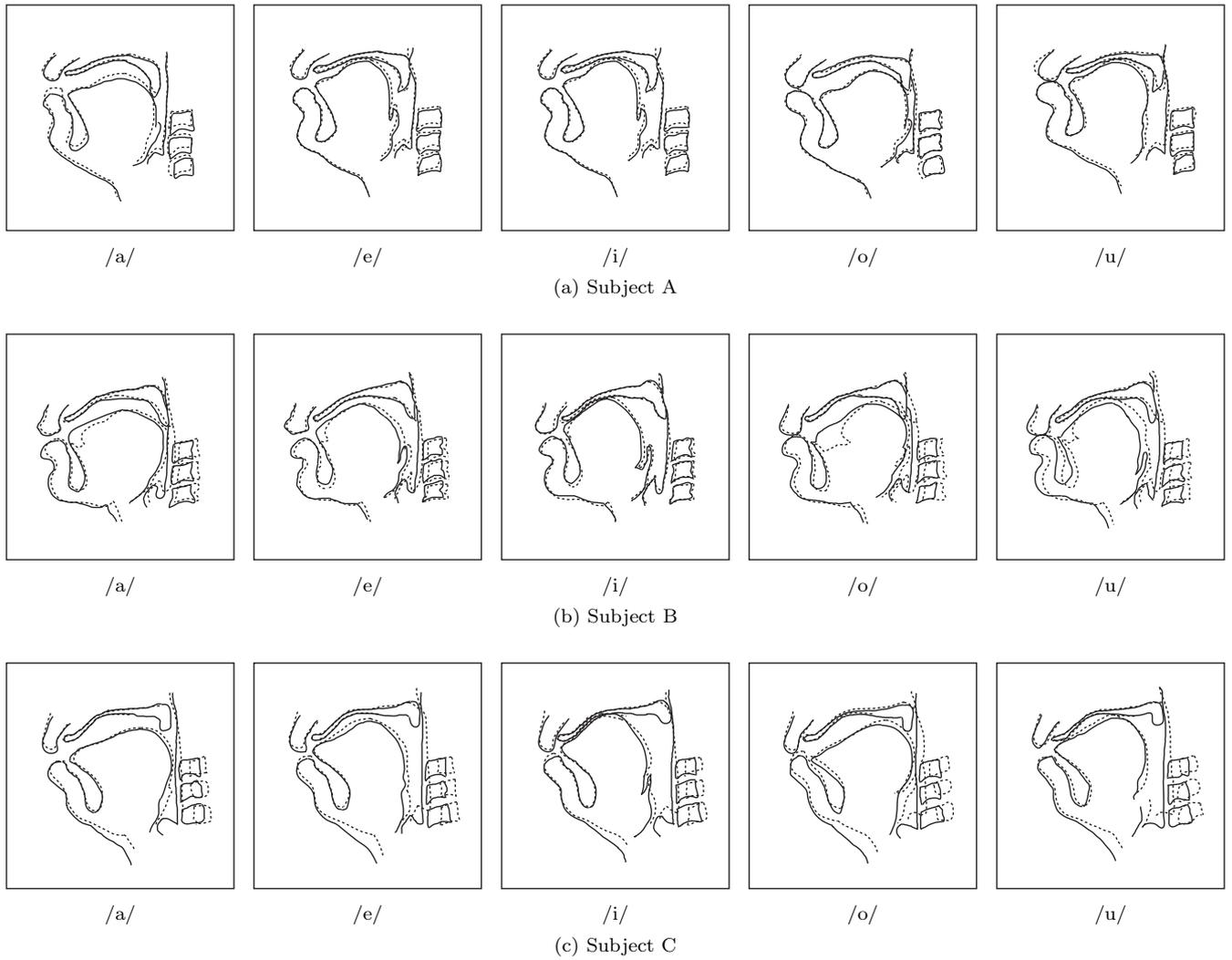


図 4 座位および仰臥位における発声時の MR 画像のトレース図 (実線) 座位 (破線) 仰臥位 .
被験者 C は仰臥位での軟口蓋の輪郭が不明瞭でトレースできなかった .

表 1 座位と仰臥位間の舌尖の距離 (mm) .

	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/
Subject A	2	1	1	1	2
Subject B	11	7	5	20	9
Subject C	3	1	2	3	1

表 2 座位と仰臥位間の口蓋垂下端の距離 (mm) . 被験者 C は仰臥位での軟口蓋形状を特定できなかったため除外してある .

	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/
Subject A	6	5	3	2	3
Subject B	4	5	3	8	8

3.2.3 頸椎および咽頭腔への影響

被験者 B と C は仰臥位において頸椎が後方移動し、それに伴い咽頭後壁も後方移動している . この原因の 1 つとして、頭部が体位間で変位 (主として体軸に対して前後移動) していることが考えられる . 頸椎の後方移動は、咽頭腔および喉頭腔の声道形状を変化させる . 頸椎の位置は下顎の開口位置に影響を与えるため、間接的に口唇の位置にも影響が及ぶと考えられる .

この問題に関しては、被験者ごとに後頭部形状に合わせた枕を用いることにより、仰臥位と座位における頸椎の位置を一致させる必要がある .

また、喉頭腔のトレース図に見られるように仰臥位では披裂部が上昇している . これは体位により声道長が変化することを示唆している . 披裂部の変位には 2 つの要因が影響を及ぼしている可能性がある . 第 1 に、頸椎の変位に伴う影響である . 第 2 に、腹部内臓に対する重力の影響が喉頭に及ぶ可能性がある . 座位では重力の影響により腹部内臓が下降し、それに伴い横隔膜と肺が下降する . その結果、喉頭が気管により引き下げられる . 一方、仰臥位ではこの影響が無い . 従って、仰臥位では喉頭が上昇するのではないかと推測される .

3.2.4 口唇への影響

被験者 B と C では仰臥位において上唇、下唇ともに座位と比較して後方移動している . 3 次元レーザー計測器を用いて座位と仰臥位の顔形状の比較を行った研究から、仰臥位では座位と比較して頬領域が大きく後方移動すると報告されている [13] [14] . 頬部組織の後方移動は口唇組織の厚みを減少させると考えられ

る．これに加えて，下顎位置の変位が口唇に影響すると考えられる．

3.2.5 下顎への影響

被験者 B では仰臥位で下顎骨が後方移動する傾向がある．一方，被験者 A と C では，体位間の下顎骨の変位は小さい．下顎の変位には，重力による影響に加えて，頭位により下顎開口が制限を受けることが影響していると考えられる．

3.2.6 声道形状への影響

以上の調音器官の形状変化により，声道形状にも体位間の差異が現れる．特に，舌の後方移動による口腔の口唇部の形状変化，および舌と頸椎の後方移動に伴う咽頭腔と喉頭腔の形状変化が顕著である．

4. 音声分析

体位による声道形状の差異が音声に与える影響を明らかにするために，MRI の撮像パルスを発生させる直前に収録した音声の分析を行った．

4.1 分析方法

MRI 撮像時に DAT に記録した音声を USB オーディオ・インタフェース (Roland UA-3D) を用いてパーソナル・コンピュータに標本化周波数 16 kHz にて記録した．その後，撮像ノイズが重畳されていない音声区間と暗騒音区間を切り出した．ただし，音声区間には暗騒音が重畳されている．

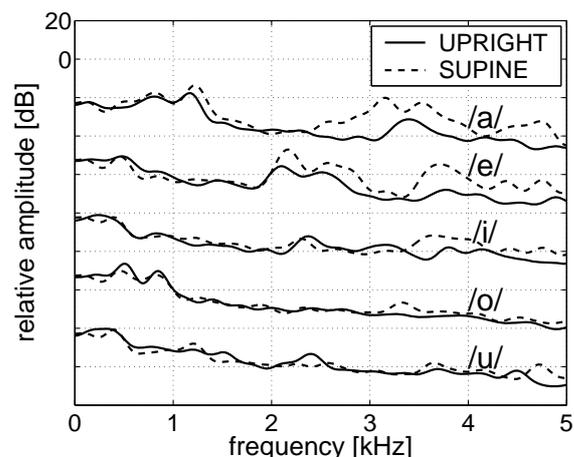
暗騒音の原因は，MRI 室内の空調や MRI 装置の冷却装置の音である．この暗騒音は定常的な雑音であることが判明した．そこで，音声区間のスペクトル包絡から暗騒音区間のスペクトル包絡を減算することにより，暗騒音の影響を抑圧した．まず，音声区間と暗騒音区間に関して FFT ケプストラムにもとづくスペクトル包絡を不偏推定法 [11] により求めた．ここで，分析窓は Hanning 窓，フレーム長は 64 msec，フレーム周期は 32 msec，ケプストラム次数は 50 次とした．得られたスペクトル包絡の 20 フレーム分を加算平均した．そして，以下の式にもとづいて，音声区間の平均スペクトル包絡 $\hat{S}(\omega)$ から暗騒音区間の平均スペクトル包絡 $\bar{N}(\omega)$ を減算した．

$$\hat{S}_n(\omega) = S_n(\omega) - \alpha \bar{N}(\omega) \quad (1)$$

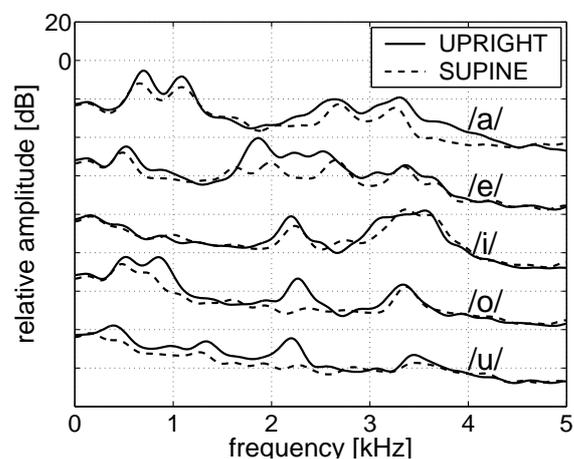
ここで， ω は周波数， $\hat{S}(\omega)$ は暗騒音の影響を抑制したスペクトル包絡， α は減算程度を示す定数である．本研究では $\alpha = 0.5$ とした．

4.2 結果と考察

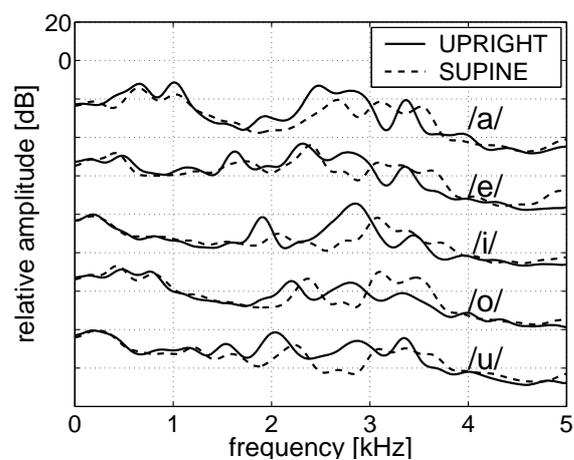
被験者 3 名の 5 母音の平均スペクトル包絡を図 5 に示す．体位間の差異は約 1.5 kHz 以上の周波数帯域で顕著である．喉頭腔の形状変化は F3 および F4 に大きな影響を与えると報告されている [12]．従って，体位間の喉頭腔の変形がこの差異を生じさせている可能性がある．また，声道長の変化はホルマント周波数の周波数方向のシフトを引き起こすが，体位間でのホルマント周波数のシフトは見られない．しかし，本研究で採用した撮像条件では喉頭腔や声門が詳細に分析できなかった．今後，声道下部構造の撮像に適した撮像条件で喉頭腔の形状と声門位置の体位による差異を明らかにする必要がある．



(a) Subject A



(b) Subject B



(c) Subject C

図 5 座位および仰臥位での平均スペクトル包絡 (実線) 座位 (破線) 仰臥位．

被験者 B の母音/o/において体位間で顕著な差異が見られた。座位のスペクトル包絡ではホルマントが明瞭に現れているが、仰臥位では F2, F3 が現れていない。図 4 に示したように、被験者 B は仰臥位での母音/o/発声時に舌が大きく後方移動し、舌尖と歯列の間にくぼみが生じていた。この舌の後方移動が発声された音声に影響を与えていたと考えられる。

ただし、ここに示した平均スペクトル包絡は、発声 1 回分のものである。従って、ここに示したスペクトル包絡の体位間の差異が普遍的なものか否かを明らかにするには、大規模な音声データを統計的に分析する必要がある。

5. おわりに

本研究では仰臥位に加えて座位でも撮像可能な開放型 MRI 装置を用いて、これらの体位による調音器官と声道形状の差異について検討した。体位による形状変化は舌、咽頭腔、軟口蓋、口唇に観察され、変位は頸椎と下顎に観察された。これらの形状変化の程度には個人差があることも明らかにした。また、体位間の舌形状の変化は前舌母音よりも後舌母音で大きくなる傾向があることがわかった。

さらに、MRI 撮像と同時に収録した音声を分析した。その結果、体位間の差異は約 1.5 kHz 以上の周波数帯域で顕著であり、体位間の声道形状の差異が大きい場合には音声の音響的特徴にも大きな差異が見られることを示した。

従って、仰臥位で撮像した MR 画像を用いる際には、立位もしくは座位の声道形状とは若干異なることを認識しておくことが重要である。また、本研究の被験者 B の母音/o/や/u/のように著しい舌の後方移動が観察された場合には、適切な指示を行い再度撮像を試みる必要がある。

なお、本研究で示した体位間の差異は重力の影響のみに起因するものではない。3 節に示したように体位を変えることによる頸部の形状変化が含まれている。重力のみの影響を調査するためには、被験者の頭頸部を固定したまま体位を変えて観測を行う必要がある。

本研究では正中矢状断面のみを対象にしたが、今後は 3 次元 MRI を用いて声道形状全体について体位間の差異を分析する必要がある。体位間の声道形状の差異と音声の差異との対応関係を明らかにするには、3 次元声道形状や声道断面積関数が必要だからである。また、座位と仰臥位の顔形状の比較を行った研究から、顔形状は体位により大きく変化することが報告されている [13] [14]。顔形状の変化は声道形状に影響を与える可能性が高い。

謝 辞

岡山大学大学院医歯学総合研究科 本多 康聡先生には撮像に関するご助言をいただいた。近畿大学医学部 小坂 正明先生、東京大学大学院医学系研究科 今川 博先生には貴重な文献をお送りいただいた。ここに感謝の意を表す。本研究の一部は情報通信研究機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」により実施したものである。

文 献

- [1] 園田, 井上, “発話時の姿勢を変えた時の音響特徴,” 音講論 (春), pp. 303–304, 1995.
- [2] Shiller, Ostry, and Gribble, “Effects of gravitational load on jaw movements in speech,” J. Neurosci., Vol. 19, No. 20, pp. 9073–9080, 1999.
- [3] Hoit, Plassman, Lansing, and Hixon, “Abdominal muscle activity during speech production,” J. Appl. Physiol., Vol. 65, No. 6, pp. 2656–2664, 1988.
- [4] Niimi, Kumada, and Niitsu, “Functions of tongue-related muscles during production of the five Japanese vowels,” Ann. Bull. RILP, Vol. 28, pp. 33–39, 1994.
- [5] 熊田, 新美, 新津, “母音調音時の舌関連筋の機能,” 信学技報 SP94-98, 1995.
- [6] Moon and Canady, “Effects of gravity on velopharyngeal muscle activity during speech,” Cleft Palate-Craniofacial Journal, Vol. 32, No. 5, pp. 371–375, 1995.
- [7] Tiede, Masaki, Wakumoto, and Vatikiotis-Bateson, “Magnetometer observation of articulation in sitting and supine conditions,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102, Issue 5, p. 3166, 1997.
- [8] Tiede, Masaki, and Vatikiotis-Bateson, “Contrasts in speech articulation observed in sitting and supine conditions,” SPSS Secon 2000, pp. 25–28, 2000.
- [9] Stone, Crouse, and Sutton, “Exploring the effects of gravity on tongue motion using ultrasound image sequences,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, Issue 5, pp. 2476–2477, 2002.
- [10] (財) 先端医療振興財団, “映像医療研究部,” http://www.ibri-kobe.org/01center/01_03_3b.htm
- [11] 今井, 古市, “対数スペクトルの不偏推定,” 信学論, Vol. J70-A, No. 3, pp. 471–480, 1987.
- [12] 竹本, 本多, 正木, 島田, 藤本, “3 次元 MRI 動画データに基づく声道下部構造のモデル化,” 音講論 (秋), pp. 281–282, 2003.
- [13] 小坂, 上石, “顔面計測における立位非接触法と臥位石膏模型法の差異: Laser Light Scanner による比較検討 (第 1 報),” 日本コンピュータ支援外科学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 6–10, 1994.
- [14] 小坂, “立位と臥位における顔面形態の変化,” 医学のあゆみ, Vol. 198, No. 8, pp. 489–493, 1999.