

声帯振動に伴う喉頭腔共鳴の 周期性

北村達也^{†‡}, 竹本浩典^{†‡}, 足立整治^{*},

パーハム・モクタリ^{†‡}, 本多清志^{‡♪}

[†]NICTユニバーサルメディア研究センター

[‡]ATR認知情報科学研究所

^{*}Fraunhofer institute for building physics

[♪]LPP (CNRS-Paris3/ORL-HEGP)

はじめに

- 喉頭腔は高次ホルマントに影響を与える.
- 北村ら2004
 - 声道全体から喉頭腔を除去するとF4が消失する.
- 竹本ら 2005, Takemoto et al. 2006
 - 声道全体から喉頭腔を除去するとホルマントのうち1つが消失する.
 - 喉頭腔の1/4共鳴がこのホルマントを生じさせる.
 - 彼らの男性被験者ではF4.
 - 喉頭腔とそれ以外の部分(主声道)は音響的にほぼ独立.
 - extra formant

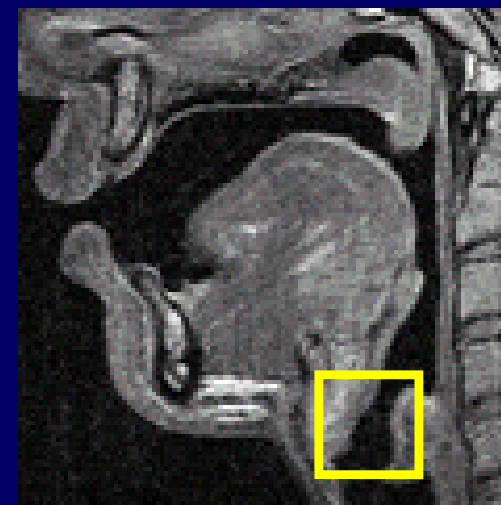
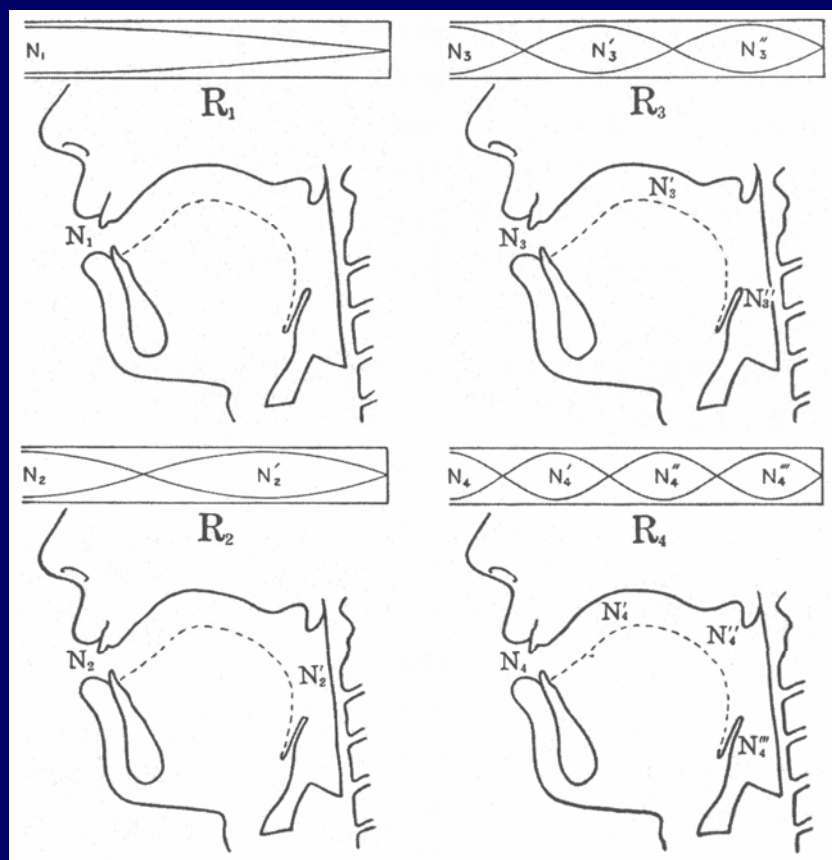
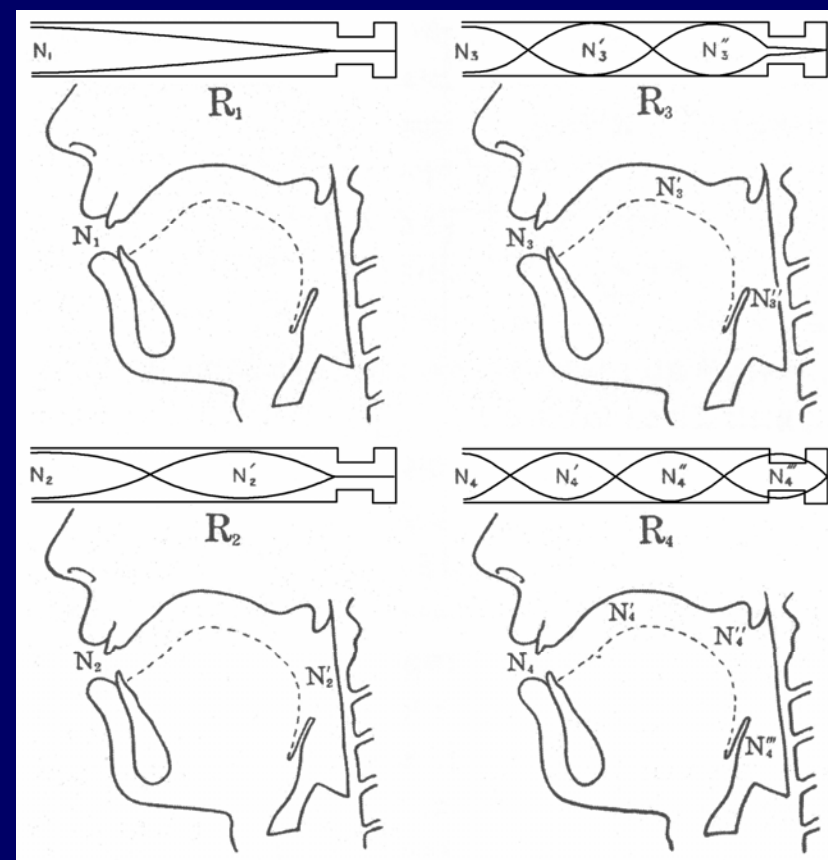


図1:本研究における喉頭腔の範囲(喉頭室および喉頭前庭).

声道共鳴パターン



Chiba & Kajiyama (1942)



Takemoto et al. (2006)

図2: ChibaとKajiyamaによる声道共鳴パターン(左)と Takemotoらによるその修正版(右).

→喉頭腔は常に閉管?

喉頭腔は常に閉管？

- 先行研究では喉頭腔は閉管として扱われてきた。
- しかし、声門開放時は喉頭腔は閉管ではない。
- 声門開放は喉頭腔共鳴にどのような影響を与えるのか？

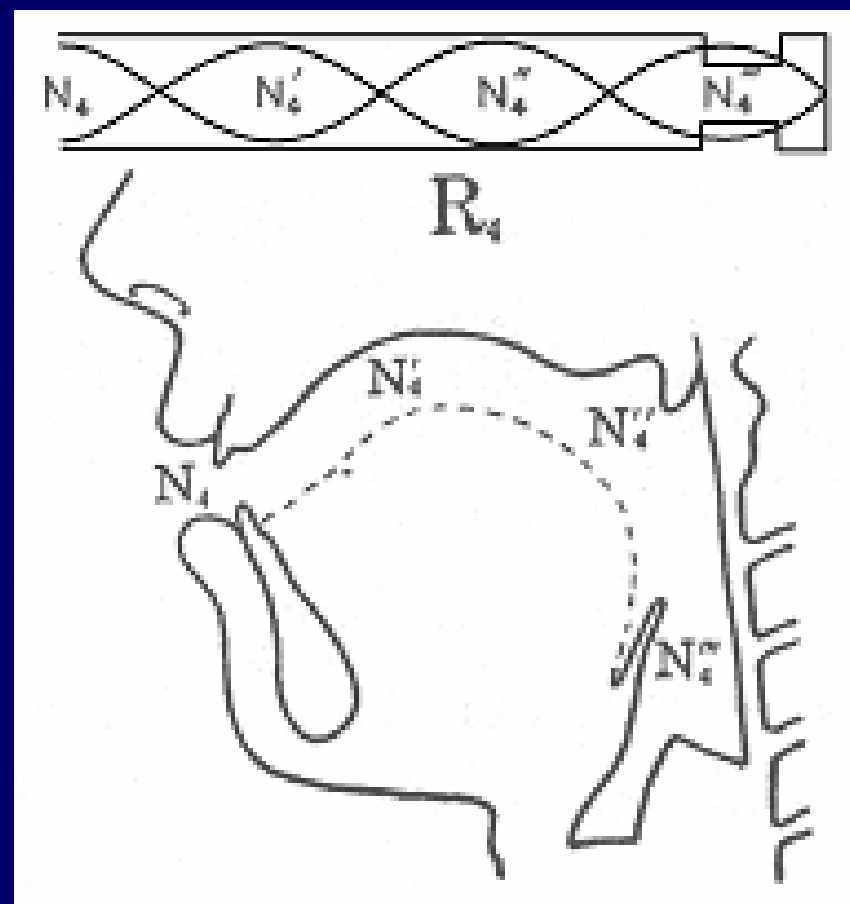


図3: 喉頭腔共鳴発生時の声道共鳴パターン (Takemoto et al. 2006).

先行研究

- 声門開放時には
 - 低次3ホルマントのバンド幅が増加する (Tarnoczy 1962).
 - 第1ホルマントが大きく減衰する (Fujimura & Lindqvist 1971).
 - ホルマント周波数とバンド幅が増加する. その効果は低周波数になるほど大きい (Flanagan 1972).

方法

- 声門開閉が喉頭腔共鳴に与える影響を調査
 1. 等価回路モデルによるシミュレーション
 2. 実音声を対象にしたスペクトル分析

等価回路モデルによるシミュレーション

- 声門開放が喉頭腔共鳴に与える影響を調査
- 声道断面積関数
 - 成人男性3名(被験者KH, TI, YT)の3次元MR画像から抽出.
 - 日本語5母音(/a/, /e/, /i/, /o/, /u/).
- 5 kHzまでの声道伝達特性を等価回路モデルにより計算.

MRI撮像条件

- 発声同期撮像 (Masaki et al. 1999, Takano et al. 2005)
- 骨伝導によるガイド音提示 (Nota et al. in press)
- 頭頸部・胸部用コイル
- 撮像時間 約6分/母音
- 歯列補填 (Takemoto et al. 2004)



シミュレーション条件

1. 声門閉鎖条件: $A_g = 0.0 \text{ cm}^2$
 - 声門インピーダンス $Z_g = \infty$
2. 声門開放条件: $A_g = 0.2 \text{ cm}^2$

$$Z_g = R_g + j\omega L_g$$

$$= \left(\frac{12\mu d_g l_g^2}{A_g^3} + \frac{0.875}{A_g} \sqrt{2p_0\rho} \right) + j\omega \frac{\rho d_g}{A_g}$$

(Ishizaka & Flanagan 1972, Flanagan 1972)

3. 主声道
 - 声道から喉頭腔を除去した部分
 - 声門閉鎖状態で計算.

シミュレーション結果

青：声門閉鎖
赤：声門開放
黒：主声道

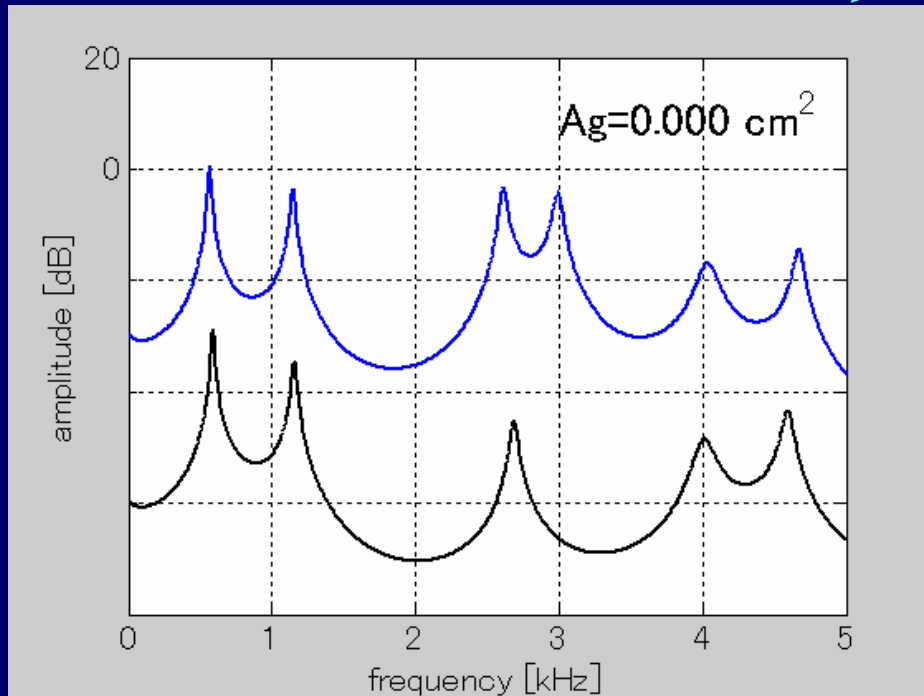


図4: A_g を0.0 cm²から0.2 cm²まで変化させたときの声道伝達特性(被験者KH).

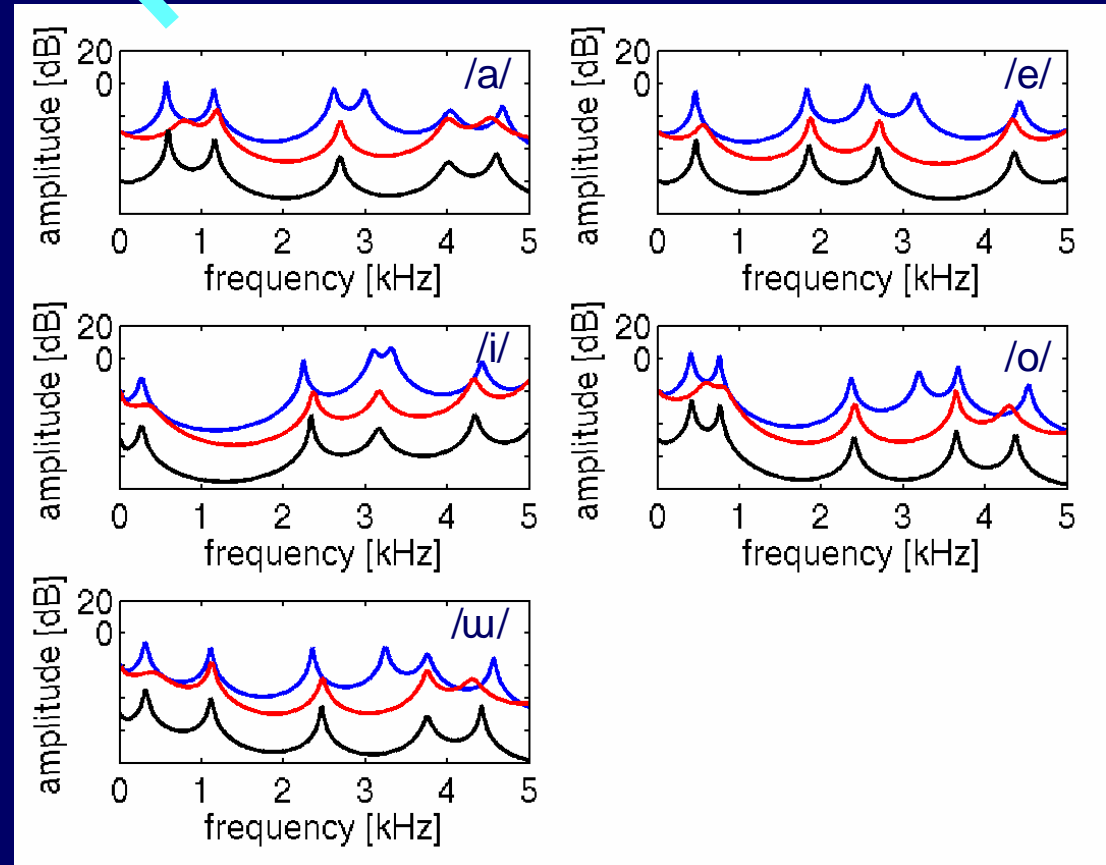


図5: 3条件の声道伝達特性(被験者KH).

考察

- ホルマントのうちの1つ
 - 主声道の伝達特性に現れない.
 - 喉頭腔で生じるextra formant.
 - 声門閉鎖条件で現れ, 声門開放条件で消失する.

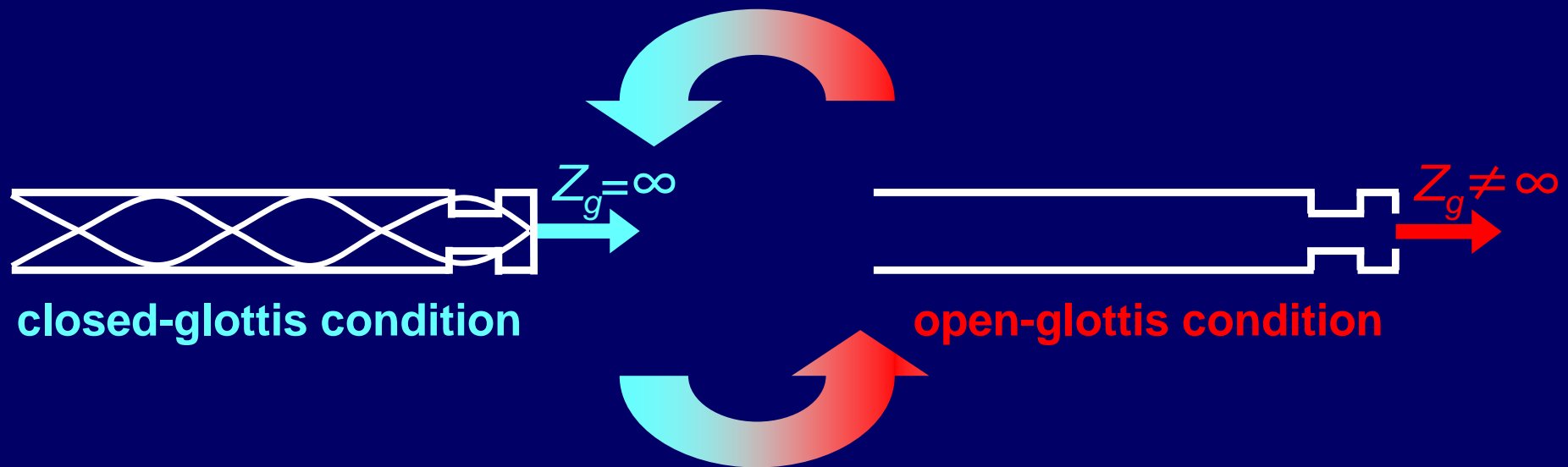


図6: 声門開閉に伴う共鳴状態の交替.

考察

声門開放条件での伝達特性

II・ 類似

主声道の伝達特性



声門開放時の声道

II・ 音響的に等価

終端に損失のある主声道

F1の減衰も説明可能.

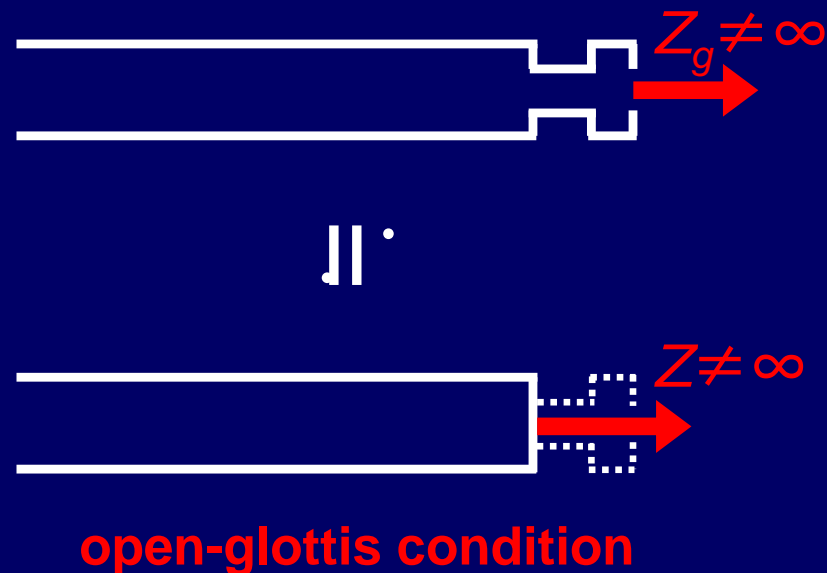


図7: 声門開放時の声道と終端に損失のある主声道の音響的等価性.

参考：有限要素法による解析

- 喉頭腔除去の影響 (北村ら2004, 2005)

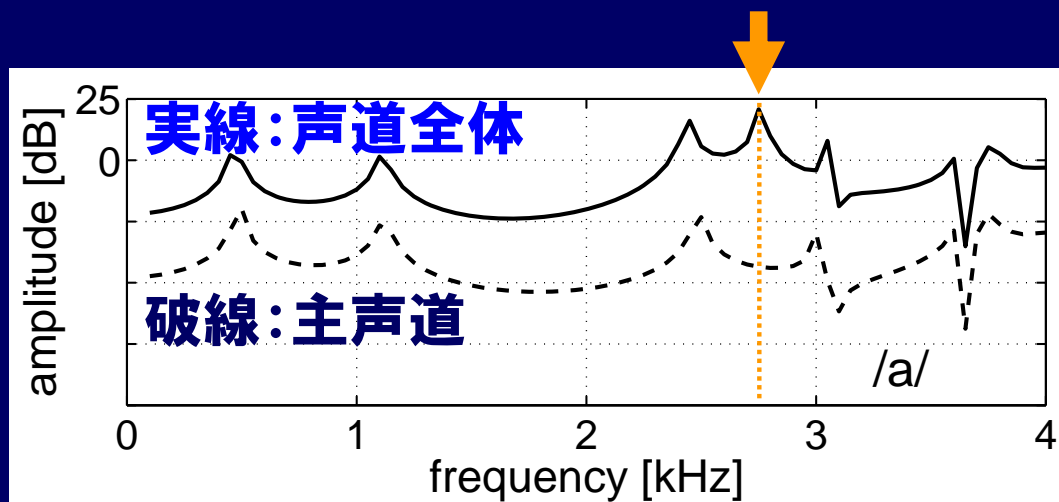


図8: 母音/a/の声道全体および主声道の伝達特性(被験者KH).

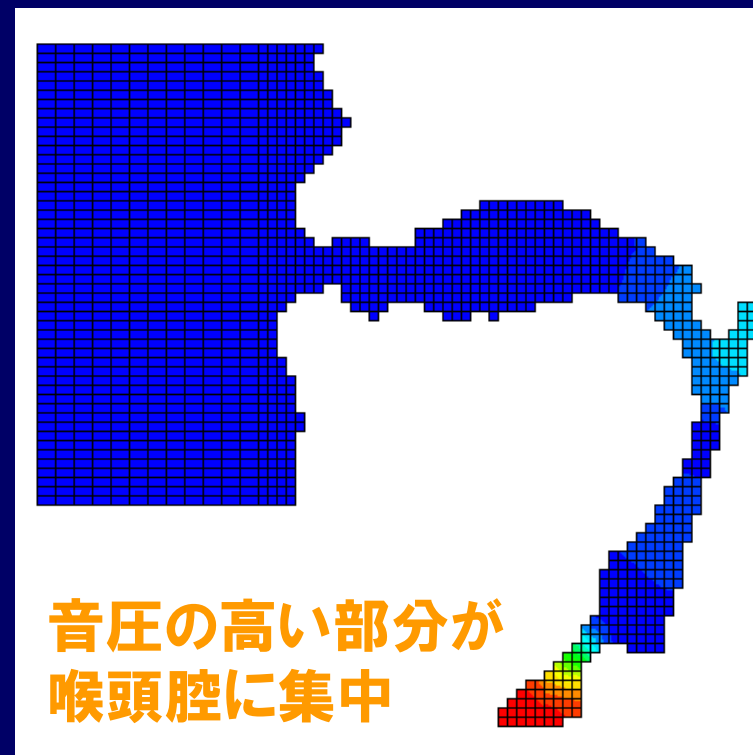


図9: 母音/a/の正中矢状断面における第4ホルマント生成時の音圧分布.

→ピッチ同期短時間スペクトル分析

ピッチ同期短時間スペクトル分析

- 声帯振動に伴う音声スペクトルの変化を調査.
- 方法
 - Burg法により声門閉鎖および開放区間のパワースペクトル密度(PSD)の分析.
 - 10 kHzにダウンサンプリングの後, 高域強調(0.98).
 - 連続する5周期の声門閉鎖および開放区間のARモデルパラメータを加算平均してPSDを計算.
 - ARモデル次数 p はMinimum description length (MDL)を最小化する値を選択(Rissanen 1983).

$$MDL[p] = N \ln(\hat{\rho}_p) + p \ln(N)$$

N the number of data samples

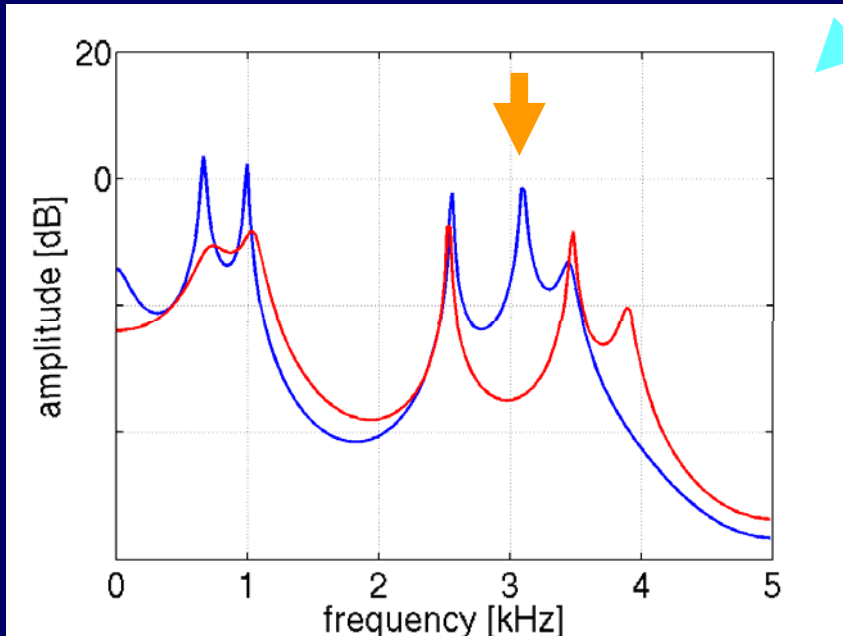
$\hat{\rho}_p$ estimated white noise variance

音声データ

- シミュレーション実験と同じ被験者3名による日本語5母音.
- 持続発声.
- 無響室にて標本化周波数48 kHz, 量子化16 bitにて収録.
- 声門閉鎖および開放区間を推定するためにEGG波形を同時に収録.
- 音声波形とEGG波形の間の時間差は補正.
- EGG波形の微分波形から声門閉鎖/開放区間を推定.

パワースペクトル密度

青：声門閉鎖
赤：声門開放



声門開放時にextra formantが消失.

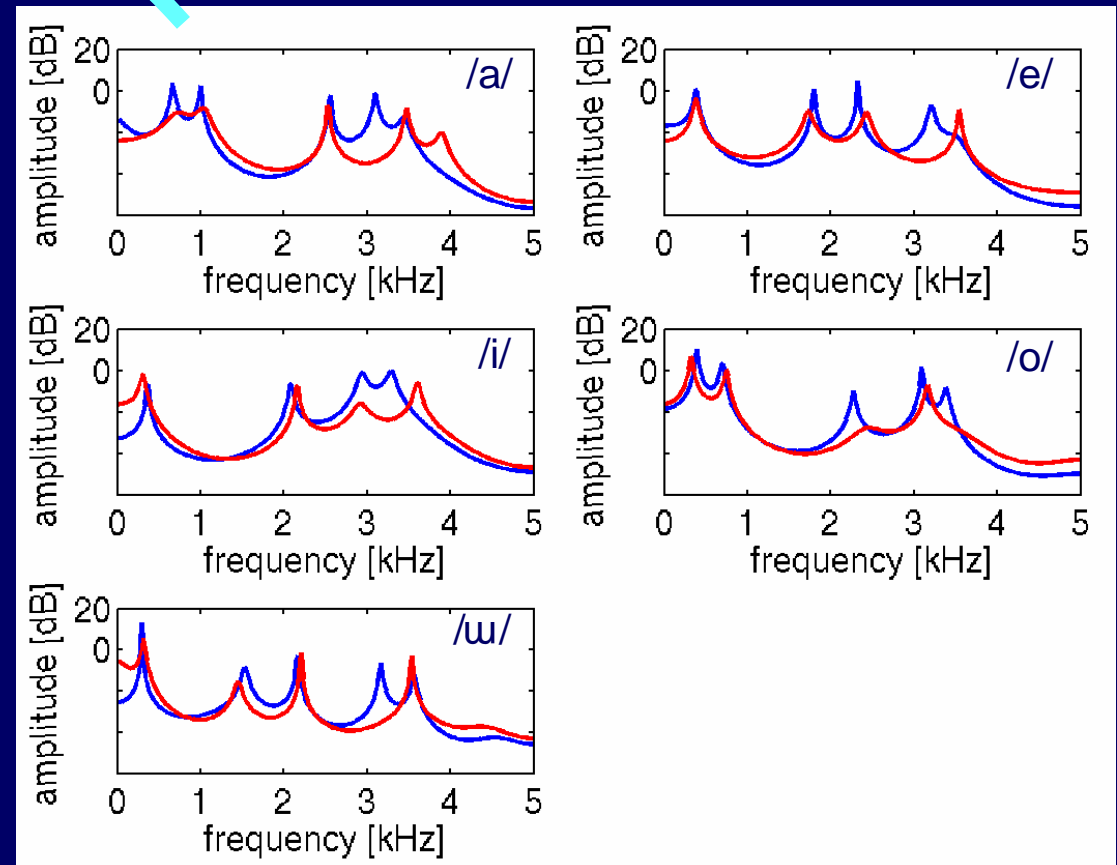


図10: 声門閉鎖および開放区間でのパワースペクトル密度(被験者KH).

合成音声を対象にしたフレーム分析

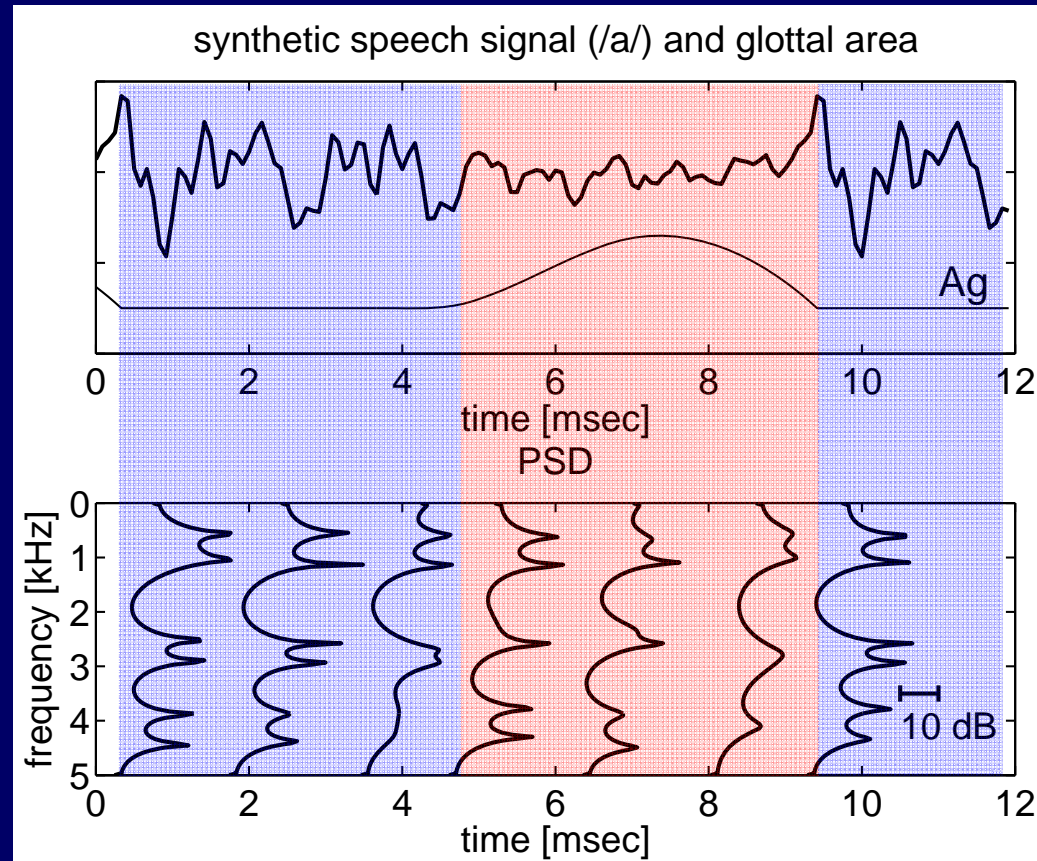


図11: Maeda (1982)による手法で合成した母音/a/の波形と声門開口面積 A_g (上)およびBurg法によるフレーム分析結果(下)。

総合考察

- 古典的な声道共鳴モデル
 - 全てのホルマントは声道全体の共鳴による.
 - 部分共鳴は生じない.
 - (ただし, 一部では喉頭腔の音響的独立性に関する指摘があった.)
- 声門開放の影響に関する先行研究
 - ホルマント周波数の上昇とバンド幅の拡大.
 - 低周波数領域のほうが影響が大きい.
- 本研究の結果
 - 声道の部分共鳴によりextra formantが生じる.
 - 声門開放によりextra formantが消失する.
 - Honda et al. (2004)が提案したモデルを支持.

おわりに

- 喉頭腔共鳴によるextra formantは,
 - 声門閉鎖区間で生じる
 - 声門開放区間で消失する
- 喉頭腔は,
 - 声門閉鎖時に閉管としてふるまい、喉頭腔共鳴を生じさせる.
 - 声門開放時にその共鳴を大きく減衰させる.
- 喉頭腔共鳴によるextra formantは、声道形状によりF3やF5になりうる.
 - F1, F2, ...という表記法の限界？

AR model order

Table 1. Model order for short-term spectral analysis for open- and closed-glottis period of vowels optimized by minimizing the minimum description length.

subject	glottal condition	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/
KH	closed	13	12	10	11	14
	open	11	10	11	11	13
TI	closed	11	10	13	12	13
	open	11	10	11	11	11
YT	closed	14	11	13	13	12
	open	11	10	10	10	10

シミュレーション結果

青: 声門閉鎖
赤: 声門開放
黒: 主声道

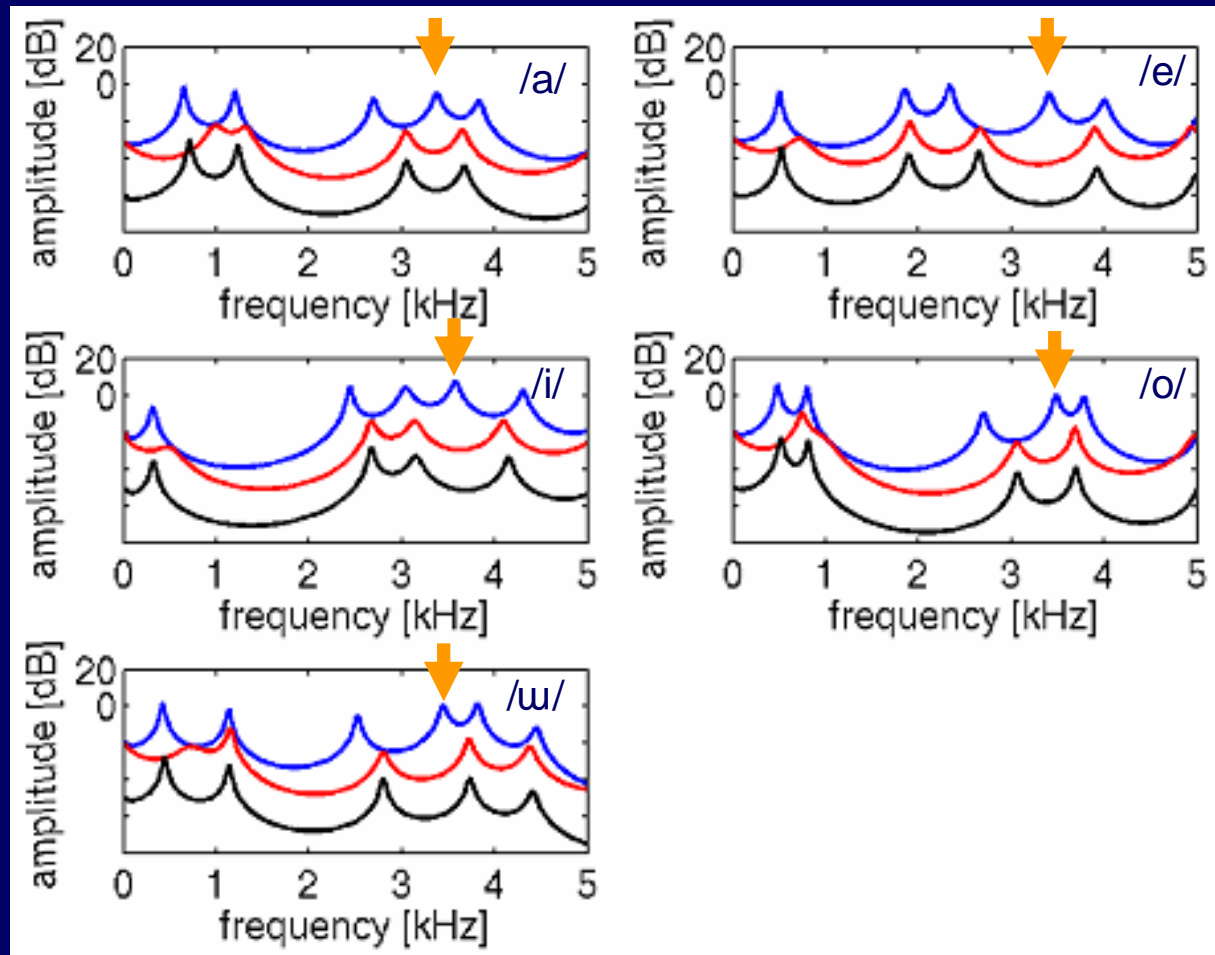


図12: 3条件の声道伝達特性(被験者TI).

シミュレーション結果

青: 声門閉鎖
赤: 声門開放
黒: 主声道

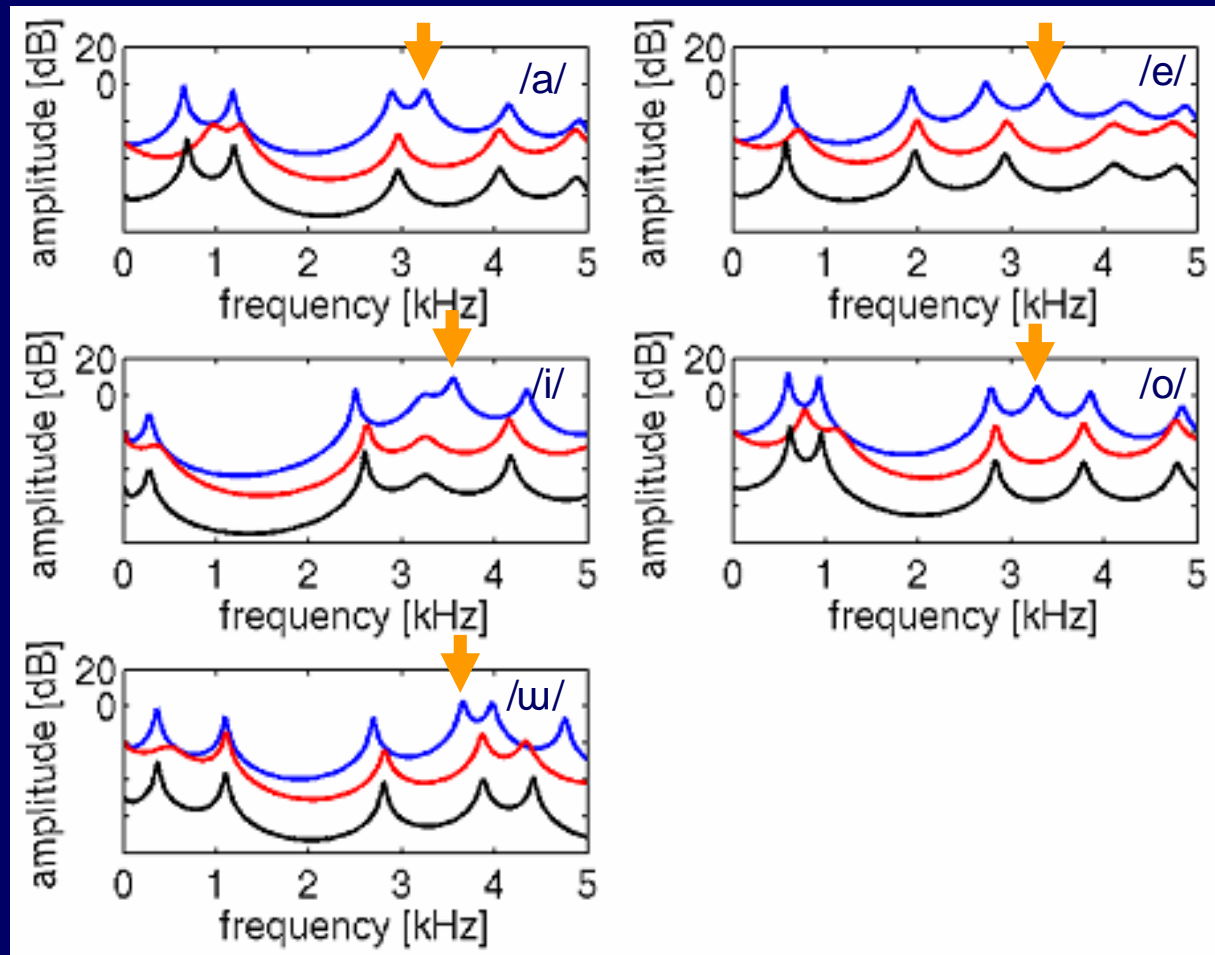


図13: 3条件の声道伝達特性(被験者YT).

パワースペクトル密度

青: 声門閉鎖
赤: 声門開放

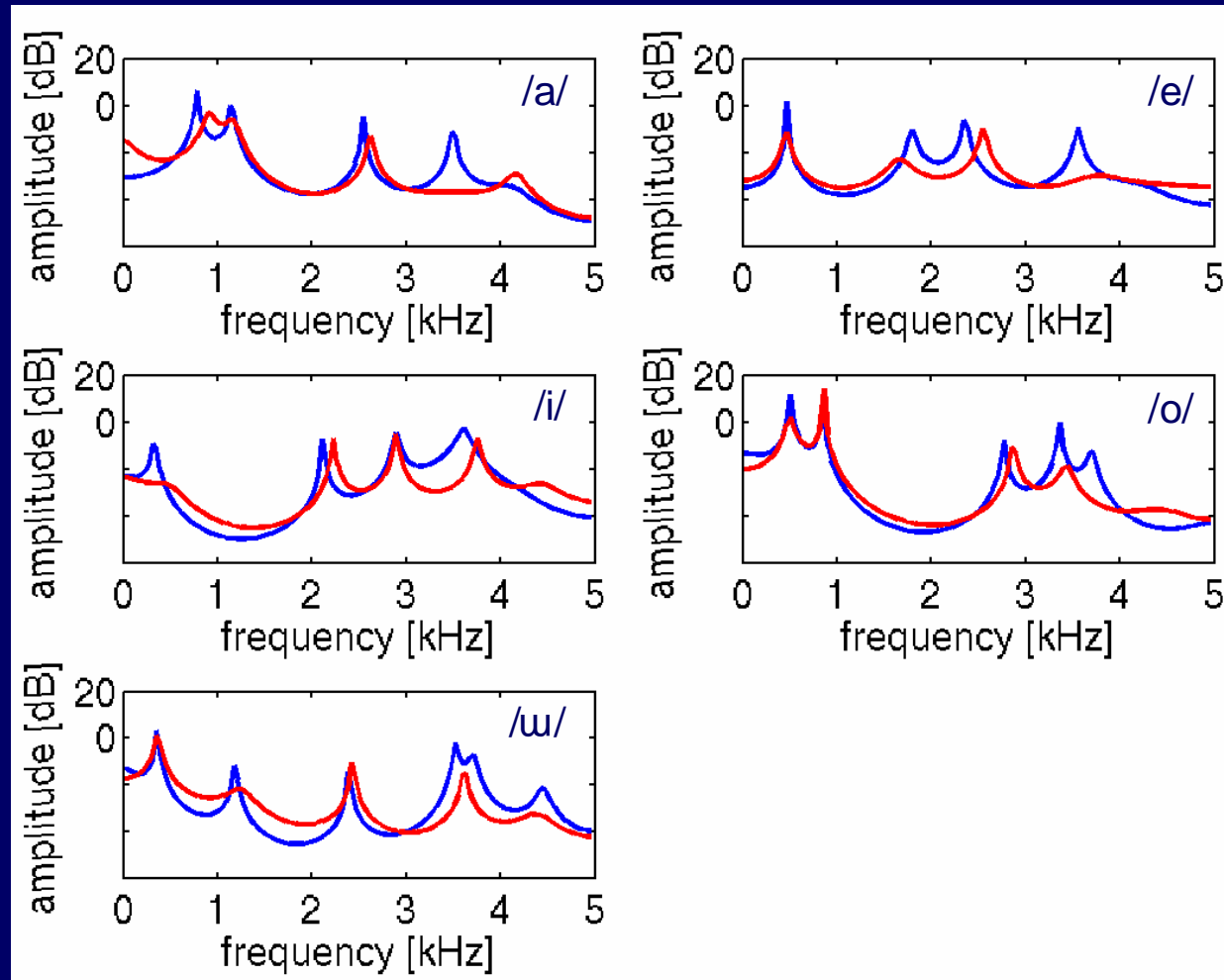


図14: 声門閉鎖および開放区間におけるパワースペクトル密度(被験者TI).

パワースペクトル密度

青: 声門閉鎖
赤: 声門開放

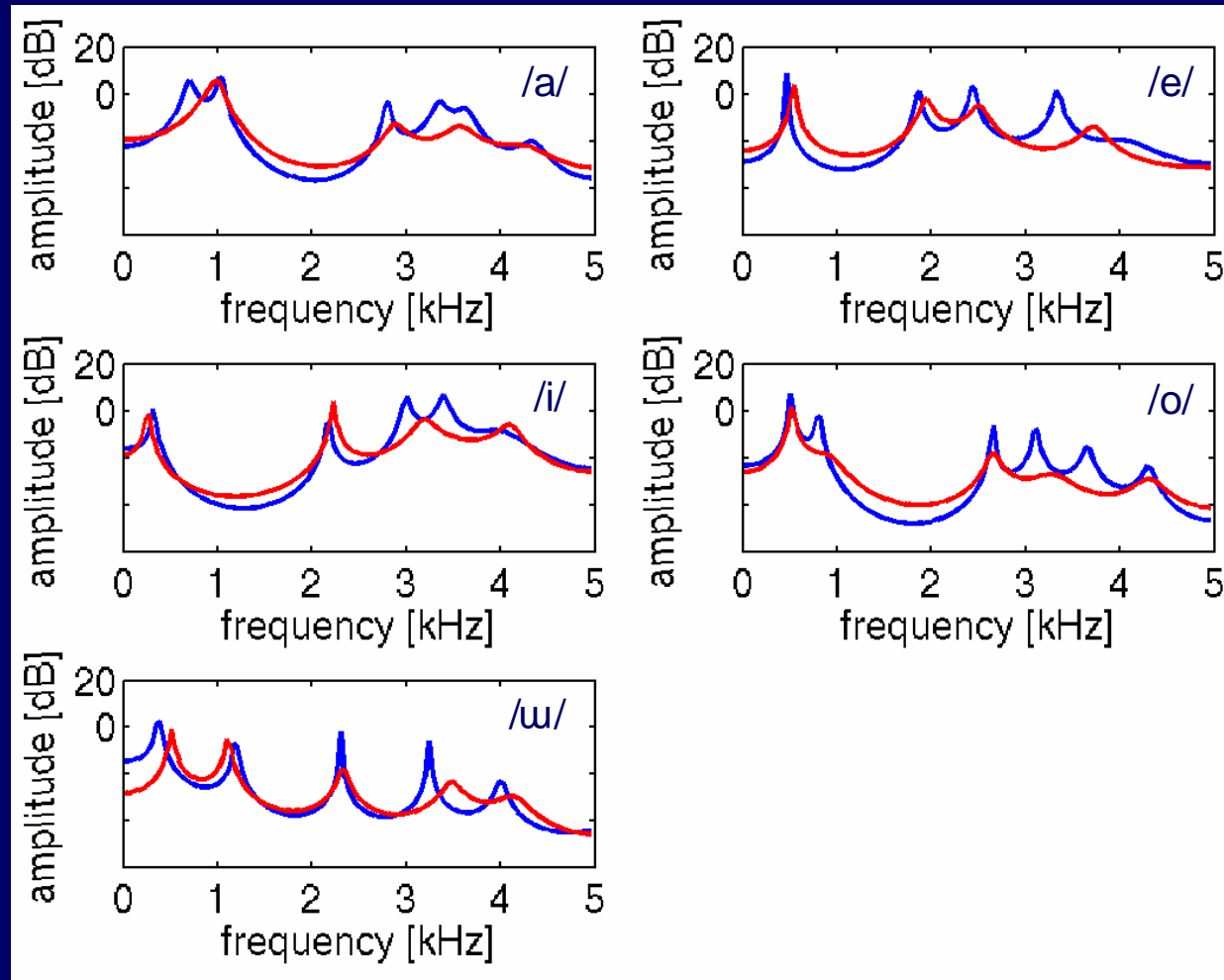


図15: 声門閉鎖および開放区間におけるパワースペクトル密度(被験者YT).