喉頭ストロボグラフィーによる声帯振動の解析

—解析機能の改良—

磯 貝 豊

Analysis of the Vocal Fold Vibration by the Laryngo-strobography —Improvements of the Analytic Function—

Yutaka Isogai

Laryngo-strobography is a newly developed analytic method for quantitative analysis by stroboscography. Its characteristic point is that it can arrange not only in time series all of the vibratory periods of arbitrarily sectioned images of the vocal folds as a single still image, but also superimpose voice-related signals (the voice signal, EGG, subglottal pressure, etc.,) synchronized to the trigger pulse of the laryngo-stroboscope.

The five improvements of the analytic function mentioned below are added to the previous paper.

① Three parameters of open quotient, speed quotient, and speed index can be displayed by the automatic calculation from the three numbers of the fields of the opening phase, closing phase, and closed phase during the one vibratory cycle of the vocal fold.

② The fundamental frequency of voice synchronized to the each analytic field can be displayed by the automatic count of the time interval between the trigger pulses of the laryngostroboscope.

③ Three analytic axes can be selected simultaneously.

④ The analytic axis of the artificially shifted field due to the scope-folding-hand tremor can be corrected automatically by the semi-automatic detection of the boundary between the non-vibratory false vocal fold and the vocal fold.

⑤ The differences of the brightness among the each fields due to the difference of the count of the strobo-light radiation can be corrected automatically.

Key words : 喉頭ストロボグラフィー (Laryngo-strobography), 喉頭ストロボグラム (Strobogram), 喉頭ストロボスコープ (Laryngo-stroboscopy), 声帯振動解析 (Analysis of the vocal fold vibration)

1. は じ め に

ストロボモーションアナライザー (図1) は、喉頭ストロボスコープ時に、喉頭ストロボコープのストロボ発光信号に同期した位相における声帯振動画像と音声関連信号 (音声信号・EGG 信号・声門下圧信号など) の両者を同時に合成記録することによって、声帯振動様式だけでなく音声関連信号との位相関係も簡単かつ定量的に解析することを目的として、フローベールならびに永島医科器械と共同開発した装置である。

われわれは、ストロボモーションアナライザーを用いた解析方法を喉頭ストロボグラフィー¹⁾と仮称しているが、とりわけ、振動声帯の解析目的部位 (声帯膜様部中央など) を直交座標方式による解析軸によって指定し、指定部位の画像だけを field by field に継時的に128フィールド分 (64フレーム、約2秒間分: ストロボスコープの見かけの振動

図1 ストロボモーションアナライザーのブロック図

周波数が1 Hzの場合は約2振動周期分) 連結表示する喉頭ストロボグラムは、解析部位の全周期にわたる声帯振動様式のみならず、これに同期した音声関連信号もあわせて1枚の画像として合成表示できるので、振動周期全体にわたる両者の関係を一目瞭然に把握できるという利点がある。

今回、ストロボモーションアナライザーの解析機能をさらに向上させ、下記の改良を行ったので報告する。①ストロボグラム上の2本の解析フィールド指定カーソルに対応するフィールド番号をもとに声帯振動開大期・閉小期・閉鎖期の相対的な時間(フィールド数)を計測し、この値から、OPEN QUOTIENT, SPEED QUOTIENT, SPEED INDEXの開閉運動に関するパラメータ²⁾を自動計算表示するようにした。②それぞれの解析フィールドにおける音声の基本周波数と、2本の解析フィールド指定カーソル間の平均基本周波数を表示した。③解析部位を、声帯前部と中央部と後部など、合計3ヶ所まで同時に指定可能にした。④喉頭鏡の手ぶれなどによって声帯振動解析軸の補正を行う時、より容易で確実な補正を可能にするため、前後のフィールドの解析軸をスーパーインポーズすることにした。また、仮声帯との境界を自動検出することによって、左右方向軸のぶれの自動補正を可能にした。⑤ストロボ発光回数の違いによる、各フィールド間の輝度のばらつきを補整できるようにした。

2. 方法ならびに結果

①開閉運動に関するパラメータの自動表示と②音声の基本周波数の表示について(図2～図3)。

図2は、ストロボモーションアナライザーの画像メモリに取り込んだ、右声帯嚢胞症例の比較的大声での発声条件におけるOPENED PHASEのフィールド画像である。

喉頭ストロボグラムの声帯振動画像は、声帯前後軸(A-P線)に直交する2本の解析軸(B軸)で囲まれた範囲の画像だけをフィールド順に連結表示するものである。

解析対象範囲を指定する方法は、声帯前後軸に相当するA-P線のA端とB端とをそれぞれ独立に、あるいはA-P線全体を左右に移動して声帯前後軸の方向を指定し、ついで、A-P線に直交するB線(解析軸に相当する)を、A-P線上を上下に移動させることによって指定すると、B線に囲まれた画像区間だけが解析対象画像範囲として表示される方式になっている。

喉頭鏡の手ぶれが大きい場合には、各フィールドごとに、声帯前後軸と解析軸の両者を微調整する必要が生じるが、喉頭鏡の手ぶれが少ない場合には、最初の第1フィールド画像の声帯前後軸と解析軸を設定すれば、以降のフィールドの声帯前後軸と解析軸の補正は不要である。

図2の最下段に表示してある3段の白線欄(↓)の左側の欄は、このフィールド画像のフィールド番号の位相に同期した音声関連信号(音声信号、EGG信号、声門下圧信号)の数値情報をアナログ画像信号に変換したものを声帯振動画像にスーパーインポーズ(オーバーレイ)したもの

である。

右欄は、今回、新たに追加した機能で、音声基本周波数を3桁(3段)で表示したものである。

図3は、図2のストロボグラムである。このストロボグラムは、喉頭鏡の手ぶれがほとんど無い画像であるので、解析軸の設定は最初のフィールド画像だけである。

左欄は、先に指定した解析範囲の声帯振動画像だけをフィールド順に上から下に連結表示したものであり、中央はEGG波形を、右欄には音声波形を表示したものである。

EGG波形と音声波形が2周期にわたって定常的であるので、この間の声帯振動は定常的振動と判定できる。

声帯振動画像からは、この間の声帯振動が、両側声帯のいわゆる下唇部が接する閉鎖期の開始の位置(←)と、閉鎖期間中に両側のいわゆる上唇部が接する位置(→)とがずれており、上唇部の接合位置(→)が下唇部の接合位置(←)より左側(健側側)に変位していることがわかる。

また、EGG波形からは、開大期の直前から直後の位相にかけて、小さなノッチが形成されており、この位相で声門の電気抵抗に微小な変化があることが推測される。

画面の最下段には、今回新たに追加した解析結果が表示してある。

2本の解析フィールド指定カーソル、線A(黄色線)と線B(緑色線)の右隣には、各線が位置するフィールド番号を表示してあり、線Aは第62番フィールド、線Bは第75番フィールドに位置していることを示している。

その右隣には、A、B両線のフィールド番号の位相における音声基本周波数を表示してあり、線Aのフィールドは138Hz、線Bのフィールドは145Hzである。その右隣には、線Aと線Bのフィールド間の平均基本周波数が表示してあり、本図では147Hzである。

さらに右隣には、今回新たに追加した、開閉運動に関するパラメータ、OQ(OPEN QUOTIENT:開放時間率)、SQ(SPEED QUOTIENT:開閉速度率)、SI(SPEED INDEX:開閉速度指数)を自動計算表示してある。

各パラメータの値は、左欄の声帯振動画像フィールド間を、線Aと線Bを移動させて開大期、閉小期、閉鎖期の各振動周期を指定し、その間のフィールド数(線Aのフィールド番号と線Bフィールド番号との差分)を求めることによって、OQ(開放期のフィールド数/1周期のフィールド数)、SQ(開大期のフィールド数/閉小期のフィールド数)、SI(開大期のフィールド数-閉小期のフィールド数/開大期のフィールド数+閉小期のフィールド数)を自動計算によって求めたものであり、この声帯振動は、OQ=0.4, SQ=1.2, SI=0.1である。

最右欄には、開大期を指定した時の線Aのフィールド番号62と線Bのフィールド番号75が表示されている。

③解析対象部位の増設について(図4～図5)。

今回さらに、声帯前後軸に直行する解析対象部位を3ヶ

図4 3ヶ所の解析部位（A：声帯後連合部，B：嚢胞部，C：前連合部）。

図5 図4の線A，B，Cの声帯振動画像だけを左から順番に並列表示したストロボグラム。

所まで指定可能にした。

図4は3ヶ所の解析部位（A：声帯後連合部，B：嚢胞部，C：前連合部）を示し，図5は，図4の線A，B，Cの部位の声帯振動画像だけを左から順番に並列表示したストロボグラムである。

開大期の開始の位相が，A，B，C間でずれていることがわかる。

④喉頭鏡の手ぶれの自動補正について（図6～図14）。

喉頭鏡の手ぶれが小さい図3のような振動周期では，声帯振動の前後軸と解析軸の設定は最初の第1フィールドだけですむが，喉頭鏡の手ぶれが大きい場合には，各フィールドごとに声帯前後軸と解析軸の補正が必要となる。

図6は，喉頭鏡の手ぶれが大きい周期のストロボグラムであり，声帯前後軸と解析軸の設定は最初の第1フィールドでしか行っていない。

左欄の声帯振動画像でわかるように，動画再生で見ると振動していない仮声帯と声帯との境界部（→）が手ぶれによって正弦波状に揺れてしまっている。

図6のようなケースでは，手ぶれによる声帯前後軸と解析軸のぶれの補正を全フィールドにわたって順次行う必要がある。

しかし，手ぶれの影響が主に水平方向だけの場合には，声帯前後軸の補正はさほど重要でなく，解析軸の左右方向（水平方向）の補正だけを重点的に行えばよいので，非振動部位（仮声帯と声帯との境界部）を自動認識させることによって，水平方向についてだけ自動補正することが可能となる。

図7は，図6の最初の第1フィールド画像の解析軸上の輝度信号分布を，R（赤色），G（緑色），B（青色），W（白色）（ $2R + G + B / 4$ ）で表示したものである。

この輝度信号分布波形を左端から自動掃引し，画素数3ドット分以上連続して輝度が上昇している部分を輝度上昇

部，3ドット分以上連続して輝度が下降している部分を輝度下降部とし，下降部から上昇部に転じる部分（谷底部）を自動認識のノッチ点とする。

最初のフィールド画像において，まず目認によって，左側の非振動部分（↓）と右側の非振動部分（↑）のノッチの位置を指定し，さらに，どちら側のノッチを非振動部の基準とするか（この場合は左側）を指定する。この位置を解析軸上の基準位置とし，次のフィールドから順次，非振動部の位置を自動的に同定する。

すなわち，次のフィールド画像は，前のフィールド画像の基準位置から±15ドット以内の範囲のノッチ部分を自動検出し，最寄りのノッチ部分を同じ基準位置として自動判定する。この範囲内にノッチ部分が検出されない場合には，前のフィールド画像の基準位置と同じ位置に自動設定する。

この方式で非振動部の位置を水平方向についてだけ自動補正した結果が図8である。左端の非振動部分（→，仮声帯と声帯との境界部）が縦に一列に並んで，きれいに自動補正されていることがわかる。

しかし，この方式でも，ノッチ部分が極めて小さい場合は自動検出が困難なフィールド個所も生じる。

図9は，図6とは異なる振動周期における，解析軸の補正無しのストロボグラムで，左端の非振動部分（→，仮声帯と声帯との境界部）が手ぶれによって不規則に揺らいでいる。図10はその第2フィールド画像の解析軸上の輝度信号分布波形であるが，基準点とした左側のノッチ（↓）の振幅が極めて小さいことがわかる。

そのため，自動補正の結果（図11）が一部（→）で誤認されてしまっている。

このようなケースのために，目認（手動）による簡単な追加補正法も考案した。

図12に示したように，目認によって，非振動部分の位置（仮声帯と声帯との境界部，→の白点部）をまず基準点として指定し，次いで，この基準点の位置に一致させるべき

図15 各フィールド画像間の画面の明るさ（輝度）のばらつきを明るいフィールドの輝度に合わせて補正した結果。

補正対象フィールドの位置（↑の+記号部）を指定すると、+の位置を基準点の白点部の位置まで自動的に移動するようにした。

その結果を図13に示す。誤認された非振動部の位置が基準点の位置（→）に適正に補正されており、全周期にわたって完全に手動（マニュアル）で解析軸の補正を行った図14とはほぼ同じ結果がえられている。

⑤各フィールド画像間の画面の明るさ（輝度）のばらつきの補正について（図15）。

最後に、ストロボ発光回数の違いによる各フィールド画像間における輝度のばらつきの補正について述べる。

補正方法として、各フィールドにおける共通部位（仮声帯と声帯との非振動境界部）の輝度を、画面全体の明るさ（輝度）の基準とするフィールド画像の輝度に合わせる方法をとった。

この方式によって、図14のストロボグラムを補正した結果が図15である。

極端に暗いフィールド画像部分が基準フィールド画像の明るさに合わせて、ストロボグラム全体が明るい輝度に補正されていることがわかる。

3. 考 察

喉頭ストロボスコーピー、とりわけ、その所見をVTRにビデオ記録する喉頭ストロボビデオグラフィーは、音声障害の原因を声帯振動の異常と関連づけて解明する上で不可欠の方法である。

しかしながら、喉頭ストロボビデオグラフィーによっても、記録したビデオ画像の再生だけでは、定量的解析に限界がある。

著者は、喉頭ストロボビデオグラフィーのより定量的な解析を目的として喉頭ストロボモーションアナライザーを開発し、その解析方法を喉頭ストロボグラフィー¹⁾と仮称しているが、本稿では、その解析機能の改良について報告した。

今回の改良により、開閉運動に関するパラメータと音声基本周波数の解析が可能となり、さらに、喉頭鏡の手ぶれによる解析軸の自動補正も簡単かつ容易となった。

しかしながら、解析軸の自動補正に関しては、①解析軸の補正が水平方向に限られること、②非振動部分の基準点の輝度変化が小さい場合には、誤認による自動補正ミスが起りやすいことなどの問題点が未解決であり、今後の更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究に際し、多大なご協力をいただきました永島医科器械株式会社石田康裕氏、ならびに、フローベール株式会社山田道雄氏、小田島伸寿氏、星 幸一氏の各位に感謝いたします。

本論文の要旨は、第7回日本喉頭科学会において報告した。

参 考 文 献

- 1) 磯貝 豊：Strobographyによる喉頭機能検査．喉頭 6：91～96，1994．
- 2) 平野 実：声帯の振動状態に関する検査．声の検査法（第1版），（日本音声言語医学会編）79～87，医歯薬出版株式会社，東京，1979．

別刷請求先 〒160 東京都新宿区信濃町9-2

東京電力病院耳鼻咽喉科 磯貝 豊

図2 OPENED PHASEのフィールド画像（右声帯嚢胞）。A-P線は声帯前後軸、B線はA-P線に直交する解析軸。最下の3段の白線欄（↓）は、このフィールド画像に同期した音声関連信号（音声信号、EGG信号、声門下圧信号）（左欄）と音声基本周波数（右欄）をアナログ画像信号に変換してオーバーレイしたもの。

図3 図2の喉頭ストロボグラム。左欄は声帯振動像、中央はEGG波形、右欄は音声波形。黄色線（線A）と緑色線（線B）は解析フィールド指定カーソル。画面最下段の線A、線Bの右隣の数値は各線の位置するフィールド番号、その右隣は両フィールドに同期した音声基本周波数、その右隣は、両フィールド間の平均基本周波数、その右隣は開閉運動のパラメータのOQ、SQ、SI。

図6 喉頭鏡の手ぶれが大きい振動周期のストロボグラム。左欄の声帯振動画像は、動画再生では振動していない仮声帯と声帯との境界部（→）が手ぶれによって正弦波状に揺れてしまっている。

図7 図6の第1フィールド画像の解析軸上の輝度信号分布：R（赤色）、G（緑色）、B（青色）、W（白色）（ $2R + G + B / 4$ ）。左側（↓）と右側（↑）の非振動部分（ノッチ）の位置と、基準とする側（この場合は左側）を指定する。

図8 図7を自動補正した結果。左端の非振動部分（→、仮声帯と声帯との境界部）が縦に一直線に並んで自動補正されている。

図9 図6とは異なる振動周期の、解析軸の補正無しのストロボグラム。左端の非振動部分(→、仮声帯と声帯との境界部)が手ぶれによって不規則に揺らいでいる。

図10 図9のフィールド画像の解析軸上の輝度信号分布波形。基準とした左側のノッチ(↓)の振幅が極めて小さい。

図11 図9の自動補正の結果、非振動部が一部(→)で誤認されている。

図12 目認(手動)による図11の簡単な追加補正法。非振動部分の位置(→の白点部)を基準点として指定し、この位置に一致させるべき別のフィールドの位置(↑の+記号部)を指定すると、+の位置を基準点の白点部の位置まで自動的に移動する。

図13 図12で誤認された非振動部が基準点の位置(→)に適正に補正されている。

図14 図9を、全周期にわたって完全に手動(マニュアル)で解析軸の補正を行った結果。(→は仮声帯と声帯の境界部)