ストロボモーションアナライザーによる 喉頭ストロボ画像の記録・解析

磯 貝 豊

Record and Analysis of Vocal Fold Vibrations by the Strobe-motion-analyzer

Yutaka Isogai

The strobo-motion-analyzer is a newly developed device that can synchronously record and analyze both the video signal of the vibrations of the vocal folds and certain voice-related signals (VRS), including the voice signal, EGG, and subglottic pressure by using the flash signal to the strobolight of the laryngostroboscope as a trigger pulse.

Laryngostrobography is a method of recording and analyzing with the strobo-motion-analyzer. It can order 128 fields of the vibratory images of the arbitrary transverse section of the vocal folds in time series as a single still image (Strobogram) superimposed with VRS.

The strobogram of vocal folds stiffened, for example by cancer, a postoperative scar, a cyst, or the like, is compared with that of the normal vocal folds.

The essential principle of vocal fold vibration is the traveling wave motion in the membranous portion of the vocal folds, whose wave crest travels continuously from the lower portion toward the upper portion of the vocal folds.

However, the traveling wave motion is greatly disturbed and changed into the standing wave motion when the vocal folds are stiffened.

Key words : ストロボモーションアナライザー, ストロボグラフィー, ストロボグラム, 喉頭ストロボスコープ, 声帯振動

1. は じ め に

発声中の声帯は100Hz以上の振動数で振動しているの
で、通常光源を用いたのではその振動状態を観察することができない。

しかし、喉頭ストロボスコープを用いれば、発声中の声帯振動をスローモーション化して観察（喉頭ストロボスコープ¹⁻³⁾）することができ、さらに、これをビデオ録画すれば、録画した声帯振動像（ストロボビデオ像）を繰り返し再生（コマ送りやスロー再生なども含む）して観察できるので、肉眼だけによる観察よりも格段に確実に精密な観察を行うことができる。

それでも、ストロボビデオ像を肉眼で観察するだけでは、やはり、主観的（定性的）な解析にとどまらざるをえない。ストロボモーションアナライザー^{4, 5)}（図1）（以下、SMA）は、ストロボビデオ像の客観的（定量的）な解析を目的として、（株）永島医科器械ならびに（株）フローベルと共同開発した装置であり、喉頭ストロボスコープの発光信号を同期信号として利用することによって、発声中の音声信号・EGG信号・声門下圧信号などの音声関連信号とストロボ

図1 ストロボモーションアナライザーのシステム図

ビデオ像とを同期的に合成して記録・解析することができるという特長がある。

われわれは、SMAを用いた客観的（定量的）な解析方法を「喉頭ストロボグラフィー」と仮称しているが、この

うち、声帯前後軸に直交する解析線上の声帯像だけを音声関連信号と同期的に合成して1枚の静止画として表示する方法は、両者の関係を一目瞭然に解析・理解できるので、この方法のことを特に「ストロボグラム」と称している。

今回は、粘膜硬化病変例を中心に、ストロボグラムによる解析結果を報告する。

2. 声帯振動正常例のストロボグラム

はじめに、無関位発声における声帯振動正常例（成人男子）のストロボグラムを提示する。

①解析範囲の設定。

図2は、音声関連信号と合成録画したストロボビデオ像をSMAにとりこんだフレーム画像で、声帯振動正常例（成人男子）の無関位発声における開大期のフレームである。

画面最下段に表示されている3段の白い横バーは音声関連信号の振動振幅で、向かって左側は、上から順に音声信号・EGG信号・声門下圧信号である。向かって右側は音声基本周波数で、上から順に、1桁目・2桁目・3桁目である。

白線P-A（P：後連合側，A：前連合側）は声帯前後軸設定用カーソルである。カーソルの上端と下端は水平方向に左右に移動できる。2重白線Bは白線P-Aに直交する解析範囲設定用カーソルで、白線P-A上を上下に移動できる。

解析範囲を設定するには、まず白線P-Aの上端と下端を移動させて声帯前後軸を設定し、ついで、2重白線Bを移動させて目的の解析範囲を設定する。

②ストロボグラム

図3は、図2の解析範囲を元に作成されたストロボグラムである。

②-i. 全体の構成

画面左の声帯振動像は、先に設定した解析範囲Bを連続128フィールド分（64フレーム分、約2秒間分）だけ時系列に上から順に垂直方向に並べたものである。画面中央の青い波形はEGG信号、画面右側の白い波形はコンタクトマイクロフォンからの音声信号である。

これら3種の信号はすべてストロボ発光信号を同期信号として合成記録されているので、声帯振動位相と音声関連信号の位相関係も同期的に解析することができる。

画面の最下段の左端には解析用の2本のカーソル線（A，B）の位置を示すフィールド番号が、その右隣には各カーソル位置における音声基本周波数が表示されている。本図では、画面の上段の黄色カーソル（線A）の第23フィールドの音声基本周波数が129Hz、下段の緑色カーソル（線B）の第82フィールドの音声基本周波数が129Hzと表示されている。線A側の右隣の白い数字は、線Aと線Bのフィールド間の平均基本周波数で128Hzである。

その右隣のOQはOpen Quotient 開放時間率，SQはSpeed Quotient 開閉速度率，SIはSpeed Index 開閉速度指数である。これらの値は、線Aと線Bの2本のカーソルを用いて設定された閉鎖期・開大期・閉小期の各開閉期間

のフィールド数を元に計算表示される。本図ではそれぞれ、 $OQ=0.6$ ， $SQ=1.2$ ， $SI=0.1$ である。

最右端の2段の数値、24と49は、上に述べた各開閉期間設定時のカーソルの位置のフィールド番号であり、本図では、[閉鎖期]が第24フィールドと第49フィールドの間の区間であることを示している。

②-ii. 声帯振動像と音声関連信号との位相関係

画面左端に垂直に走る赤い帯は仮声帯縁である。仮声帯縁は振動していない。

規則的な声帯振動像が約2周期分表示されている。ストロボスコープ（LS-3A，永島医科器械）の見かけの振動周期を1Hzに設定してあるので、128フィールド分=64フレーム分=約2秒間分=約2周期分が表示されているのである。

声帯振動は、閉鎖期・開大期・閉小期を繰り返す周期的な開閉運動のようにみえるが、その本質は、声帯内側下面から上面外側に向かって連続的に移動する粘膜隆起を波頭とするtraveling wave（進行波）である。

開大期の声帯縁は上唇と呼ばれているが、これは、閉鎖期間中に声帯下面から上方へ移動してきた進行波がひきつづき外方へ移動していく様子をみているのであり、固定された一点の動きをみているのではない。また、閉小期の声帯縁は下唇と呼ばれているが、これは進行波が、引き続き外方へ移動する波と、これとは逆方向の内下方に戻る波とに分裂する位相における内下方に向かう波頭の動きをみているのであり、固定された一点の動きをみているのではない。

この他にも、声帯上面の血管や喉頭分泌液（右声帯上面の白色ハレーション部）の振動様式もみることができる。

線Aと線Bのカーソルを用いて音声関連信号との位相関係を解析すると、声門閉鎖期の開始位相がEGG信号の右端位相（+電位側のピーク位相）に一致しており、声門閉鎖期の最後の位相はEGG信号の左端（-電位側のピーク位相）に近い位相になっている。

②-iii. 声帯振動像と声帯上面の血管の振動位相との関係

つぎに、声帯上面の血管の振動と声門開閉運動との位相関係を解析するために、解析範囲設定用カーソルを下方に移動し、血管の多い位置に設定しなおして（図4）作成したストロボグラムが図5である。

右側声帯上面の3本の血管の振動様式がまるで地図の等高線のように見える。

血管どうしの位相関係をみると、血管の位置が最内方にある位相は3本ともほぼ同位相であるが、最外方にある位相は少しづつずれており、内側にある血管ほど進相で外側の血管ほど遅相になっている。

声門閉鎖期のはじまりの位相は、最内側の血管が最外方から内方に戻りはじめる位相であり、最大開大期では、いわゆる声帯縁と最内側の血管との距離が最小になっている。

もっとも重要なことは、声帯上面の血管群の振動位相と声門の開閉運動位相との間に位相差があり、声門の開閉運動位相のほうが最内側の血管の振動位相より進相であることである。このことは、声帯振動の本質が、粘膜隆起を波

頭とする traveling wave (進行波) であることを意味している。

3. 症 例 検 討

①白斑症 (leukoplakia)

図 6 は、右声帯白斑症 (ロイコプラキア) の閉小期の位相で、カーソル B が設定された解析範囲である。

図 7 は、そのストロボグラムである。2 本のカーソル間の平均基本周波数は 182Hz, OQ=0.6, SQ=0.5, SI=-0.3 である。

患側では、正常例と同様に、声門の開閉運動位相と白斑部の振動位相との間にずれを認め、声門の開閉運動位相のほうが白斑部の振動位相より進相である。さらに、声門閉小期間中に声帯上面を外方に移動する進行波の波頭もはっきりと認める。

このことは、患側の白斑病変部に進行波が存在していること、いいかえれば、この白色病変は進行波を障害していない非硬化病変であることを示している。

また、閉鎖期の開始位相は EGG の最右端位相 (+ 電位側のピーク位相) に一致しており、同時に、声帯上面の白色病変部が最外方へ移動した位相にもほぼ一致している。

②左声帯癌 T1a

図 8 は、左声帯中央部から前連合部にかけての声帯癌 T1a の開大期で、カーソル B, C が設定された解析範囲である。

図 9 はそのストロボグラムで、向かって左側は解析範囲 B に、右側は解析範囲 C に対応する声帯振動像である。

健側の声帯では、声帯下面と上面との間で閉小期の開始位相に差を認め、閉小期に内下方へ向かう声帯下面の進行波の様子 (右上向き矢印) がはっきりとわかるが、患側の腫瘍部分は同じ幅で S 字状に変位しているだけで位相差がなく、閉小期の声帯下面の進行波も見られない。

このことは、進行波の波頭の移動が腫瘍部分で障害されていること、すなわち、この部に硬化病変があることを示している。

③両側声帯癌 T1b 根治照射後の左再発

図 10 は、両側声帯癌 T1b 根治照射後の左再発例で、左声帯縁に白色病変が存在し声帯上面は全体的に発赤している。カーソル B が設定された解析範囲である。

図 11 はそのストロボグラムである。

健側の声帯上面には、閉小期間中に引き続き外方に移動する進行波の波頭がはっきりとみえる (右下向き矢印) が、患側の声帯上面は充血していて変位もみられず、最内側縁の白色病変部だけがわずかに変位した振動をしている。これは、進行波の波頭の移動がこの部で障害されていること、すなわち、この部に粘膜硬化病変があることを示している。

④右声帯癌 T1a の CO₂ レーザーラリノマイクログラフおよび根治照射後の瘢痕

図 12 は、右声帯癌 T1a に対して CO₂ レーザーラリノマイクログラフと術後根治照射を行った後の瘢痕例

の閉小期である。カーソル B が設定された解析範囲である。図 13 はそのストロボグラムである。

健側の声帯では、②の症例と同様に、声帯下面と上面との間で閉小期の開始位相に差 (左上向き矢印) があることがはっきりとわかるが、患側の瘢痕部分は同じ幅で S 字状に変位しているだけで声帯上面と下面の位相差がなく、閉小期の声帯下面の進行波も見られない。このことは、この部で進行波の波頭の移動が障害されていることを示している。

また、閉鎖期に左右の位相差があり、患側の方が健側より進相になっている。

⑤右声帯嚢胞

図 14 は、右声帯嚢胞の閉小期である。左仮声帯縁が白いは喉頭液が付着しているためである。

B の解析範囲を設定して作成したストロボグラムが図 15 である。

健側では、仮声帯に邪魔されて声帯上面の進行波の様子が全部はみえないが、声帯下面と上面との間で閉小期の開始位相に差 (左上向き矢印) があることがわかる。

閉鎖期は、患側が健側より上側にかぶさっている様子がかがわれる。2-②-ii の正常例と 3-①の白斑症例で EGG の右端位相 (+ 電位側のピーク位相) が閉鎖期の開始位相だったことから、本例で両側の声帯が接触した位相は、閉鎖期間中の 2 本のカーソルで示した EGG の右端位相 (+ 電位側のピーク位相) の時点と推測される。

患側には、今までの硬化病変と同様、同じ幅で S 字状に変位し、声帯上面と下面の位相差のない開閉運動だけがみられる。

4. 考 察

①ストロボグラムの意義について

X 線ストロボスコーピー⁶⁻⁹⁾を用いた研究によって、「声帯振動の本質は、声帯内側下面から上面外側に向かって連続的に移動する粘膜隆起を波頭とする traveling wave (進行波) である。この波は、閉小期間中に、内下方に戻る波とひき続き減衰しながら外方に進む波とに分裂する。この波の動きを声帯上面から眺めると、開大期は上唇、閉小期は下唇の運動として見えるが、これは進行波の波頭そのものである」ことが明らかにされている。

すなわち、声門閉小期間中は、内方に戻る声帯下面の波と引き続き外方に移動する声帯上面の波の、進行方向を逆にするふたつの進行波が同時に存在するのである。

声帯振動周期を 1 枚の静止画として合成記録するストロボグラムによって、この進行波現象を一目瞭然に定量的に解析することが可能となった。

正常例および白斑症例のストロボグラムによって、この進行波現象が、声帯上面 (の血管群) の振動位相と声門の開閉運動位相の位相差、および、声帯上面と下面との間の閉小期の開始位相の差として解析できることが明らかになった。

また、粘膜硬化病変例のストロボグラムによって、硬化病変部の振動は同じ幅で S 字状に変位するだけであり、正

常例でみられる、声帯上面の振動位相と声門の開閉運動との位相差も、声帯上面と下面との間の閉小期の開始位相の差も認めないことが明らかになった。

このことは、粘膜硬化病変では「進行波の移動が障害され、声帯振動がstanding wave化（定在波化）する」ことを意味している。

したがって、3-①の白斑（leukoplakia）症例のように、声帯粘膜に病変があっても、病変部に進行波が生じていればその病変部の硬化度は少ないと判断できることになる。

ストロボグラムは、喉頭ストロボスコーピーで観察される「病変部位の粘膜硬化度は進行波の障害度に比例する」ことを一日瞭然に定量的に明らかにすることができる方法といえる。

②音声関連信号との同期的記録・解析の意義について

本報告では、音声信号とEGG信号の2信号を音声関連信号として記録・解析した。

論者は、音声信号と声帯振動の位相関係を解析することにはあまり意義を感じず、むしろ、声帯振動像の原振動が定常振動であると見なせるかどうかのモニター信号としての意義があると考えている。ストロボスコーピーの原理からいって、ストロボグラム上の声帯振動像（128フィールド分）が規則的（定常的）で音声信号も規則的（定常的）であれば、その原振動も規則的＝定常的振動とみなせるからである。

EGG波形については、EGGの最右端位相（+電位側のピーク位相）が声門閉鎖期の開始位相に一致することから、このEGGの最右端位相を基準にすることによって、両側の声帯が接触を開始する位相を判断することができるのではないかと推測される。

③ビデオキモグラフィーについて

論者は喉頭ストロボスコーピーの定量的記録・解析を目的としてストロボモーションアナライザーを開発し、ストロボグラムの解析方法を考案した。

最近、論者と同様の解析方法で高速度ビデオカメラを用いたvideokymography^{10, 11)}が報告されている。高速度ビデオカメラは声帯振動の原振動そのものを直接記録できるという利点がある。今後、音声関連信号との同期的記録・解析も行えるようになることが期待される。

5. 結 論

1. 声帯振動の本質は、声帯内側下面から上面外側に向かって連続的に移動する粘膜隆起を波頭とするtraveling wave（進行波）である。声門閉小期間中は、内方に戻る声帯下面の波と引き続き外方に移動する声帯上面の波の、進行方向を逆にするふたつの進行波が同時に存在する。

声帯粘膜に硬化病変が生じると進行波の移動が障害され、standing wave化（定在波化）する。

2. 正常例のストロボグラムでは、この進行波現象は、声門の開閉運動位相と声帯上面の血管群の振動位相との位相差、および、声帯上面と下面との間の閉小期の開始位相

の差として現象する。

硬化病変のストロボグラムでは、この位相差が消失して同じ幅でS字状に変位するだけとなる。

3. 声門閉鎖期の開始位相は、EGG信号の+電位側のピーク位相に一致する。

謝 辞

本論文の要旨は、第10回日本喉頭科学会（会長金沢医科大学山下公一教授）におけるシンポジウムⅡ「喉頭ストロボスコーピーの臨床的応用（司会徳島大学小池靖夫教授）」において報告した。

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裕康氏、フローベール株式会社山田道雄氏、小田島伸寿氏、星孝一氏の各位に感謝します。

本研究は、財団法人慶應健康相談センターから医学研究助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) 磯貝 豊：ストロボスコーピー—器械の使い方と臨床的意義。耳鼻と臨床 31：859～862, 1985.
- 2) 磯貝 豊：立体（3D）喉頭ストロボスコーピー。喉頭 6：147～151, 1994.
- 3) 磯貝 豊：ストロボ検査—粘膜の波を見る—。喉頭 8：84～91, 1996.
- 4) 磯貝 豊：Strobographyによる喉頭機能検査。喉頭 6：91～96, 1994.
- 5) 磯貝 豊：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—。喉頭 8：27～32, 1996.
- 6) 磯貝 豊：X線ストロボスコーピーによる声帯振動の解析。耳鼻 27：883～930, 1981.
- 7) 磯貝 豊：デジタルサブトラクションX線ストロボスコーピーによる声帯振動の解析。喉頭 6：140～146, 1994.
- 8) Yutaka Isogai: New techniques of laryngostroboscopy: X-ray Stroboscopy, 3-D laryngostroboscopy, and laryngostrobography. Transactions of the American Broncho-Esophagological Association-1995. 242～247, 1995.
- 9) 磯貝 豊：デジタルサブトラクションX線ストロボスコーピーによる声帯振動の解析（第2報）。喉頭 9：114～119, 1997.
- 10) Jan G. Svec et al: Videokymography: high-speed line scanning of vocal fold vibration. J Voice 10：201～205, 1996.
- 11) H.K. Schutte et al: Videokymography: research and clinical issues. Log Phon Vocol 22：152～156, 1997.

別刷請求先 〒160-0016 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

図 3

図 4

図 5

図 6

図 7

図 8

図 9

図10

図11

図12

図13

図14

図15

図 説 明

- 図2 声帯振動正常例(成人男子)の開大期の位相の声帯像。白線P-A: 声帯前後軸設定用カーソル(P: 後連合側, A: 前連合側)。2重白線B: 白線P-Aに直交する解析範囲設定用カーソル。
- 図3 図2のストロボグラム。
- 図4 図2の解析範囲設定用カーソルを血管の多い位置に移動。
- 図5 図4のストロボグラム。右側声帯上面の3本の血管の振動様式がまるで地図の等高線のように見える。
- 図6 右声帯白斑症(ロイコプラキア)の閉小期。カーソルBが解析範囲。
- 図7 図6のストロボグラム。
- 図8 左声帯癌 T1aの開大期。カーソルB, Cが解析範囲。

- 図9 図8のストロボグラム。向かって左側は解析範囲Bに、右側は解析範囲Cに対応する声帯振動像。
- 図10 両側声帯癌 T1b根治照射後の左再発例。左声帯縁に白色病変が存在し声帯上面は全体的に発赤している。カーソルBが解析範囲である。
- 図11 図10のストロボグラム。
- 図12 右声帯癌 T1aに対してCO₂レーザーラリノマイクローサーと術後根治照射を行った後の癒痕例の閉小期。カーソルBが解析範囲である。
- 図13 図12のストロボグラム。
- 図14 右声帯嚢胞の閉小期。左反声帯縁が白いのは喉頭液が付着しているため。
- 図15 図14のストロボグラム。