ストロボ検査

— 粘膜の波を見る —

磯 貝 豊

Laryngostroboscopy

— Observation of the Travelling Wave of the Mucous Membrane —

Yutaka Isogai

The purpose of laryngostroboscopy is to observe the vibration of the vocal fold. The essential principle of human vocal fold vibration during phonation is the travelling wave phenomenon of the mucous membrane. This wave crest travels from the lower portion to the upper-lateral portion of the vocal fold continuously. Consequently, both the so-called upper lip and the lower lip indicate the wave crest of the travelling wave.

This travelling wave phenomenon was clearly observed by the newly developed digital subtraction X-ray stroboscopy.

Furthermore, easy visualization and quantitative analysis of vibrations of the vocal fold synchronously with some voice-related signals (VRS) including the voice signal, EGG, subglottic pressure on laryngostroboscopy has become possible by the newly developed laryngostrobography.

The observation of the travelling wave by conventional laryngostroboscopy was explained by the aforementioned method.

Key words : ①喉頭ストロボスコーピー, ②デジタルサブトラクション X 線ストロボスコーピー, ③喉頭ストロボグラフィ, ④声帯振動, ⑤進行波

1. 喉頭ストロボスコーピーの意義

喉頭ストロボスコーピーは、発声中の声帯の振動をスローモーション像ないしは静止像として観察する方法である。

発声中の声帯は無関位発声でも約100Hz から300Hz で振動しているため、通常光による観察では声帯振動の観察は不可能である。しかし、喉頭ストロボスコーピーは、発声中の声帯の振動をスローモーション像で観察することができるので、音声障害の原因を声帯振動の異常と関連づけて診断することができ、さらには、声帯振動状態をモニターしながら手術を行ったり、声帯振動の改善度から術後の評価をすることができるという意義がある。

言い換えれば、喉頭ストロボスコーピーは、聴覚情報としての音声情報を視覚情報としての声帯振動情報に変換する方法といえる(図1)。

2. 喉頭ストロボスコーピーの原理(図2)

声帯の振動周波数(基本周期)は、音声の基本周波数 F_0 (基本周期 T) である。

したがって、声帯が定常的に振動しているときは、音声の基本周波数 F_0 (基本周期 T) も一定である。

音声の基本周波数 F_0 が一定の時、音声の基本周期 (T)

と同じ時間間隔で充分短い閃光(ストロボ光)を発光させると、ストロボ光は常に一定の声帯振動位相で発光することになるので、見かけ上、声帯振動はストロボ光が発光する振動位相で静止しているかのように見える。これを静止モードと仮称する。

そこで、音声の基本周期 (T) より極くわずかの時間 (Δt) だけ発光間隔を長くしてストロボ光を発光させる、すなわち、($T + \Delta t$) の時間間隔でストロボ光を発光させると、ストロボ光が発光するタイミングは、1 回発光する毎に、前回発光した声帯振動位相より Δt だけ進んだ振動位相で発光することになるので、見かけ上、声帯振動は順

図1 喉頭ストロボスコーピーの意義

図2 喉頭ストロボスコープの原理

方向にゆっくり振動して見える。これを順行モードと仮称する。

喉頭ストロボスコープの順行モードで、見かけ上1周期声帯が振動したように幻視されるのは、ストロボ光が最初に発光した声帯振動位相から再び最初に発光した振動位相に戻った時点である。この見かけの1周期の間にストロボ光が n 回発光したとすると、見かけの振動周期は $\frac{n \times (T + \Delta t)}{n}$ となる。

逆に、音声の基本周期 (T) より極くわずかな (Δt 時間) だけ発光間隔を短くしてストロボ光を発光させる、すなわち、 $(T - \Delta t)$ の時間間隔でストロボ光を発光させると、ストロボ光が発光するタイミングは、1回発光する毎に、前回発光した声帯振動位相より Δt だけ過去に溯った振動位相で発光することになるので、見かけ上、声帯振動は逆方向にゆっくり振動して見えることになる。この時の見かけの振動周期は、 $\frac{n \times (T - \Delta t)}{n}$ となるが、これを逆行モードと仮称する。

喉頭ストロボスコープの原理は、音声の基本周期より Δt だけずらした発光間隔で、1周期に1回だけストロボ光を発光させることによって、声帯振動を静止モード ($\Delta t = 0$) で幻視したり、順方向モード ($\Delta t > 0$) や逆行モード ($\Delta t < 0$) のスローモーション像として幻視することにある。

通常は順行モードで観察する。

喉頭ストロボスコープによる見かけの声帯振動周期は、 Δt によって決定される。 Δt が小さくなる程見かけの声帯振動はよりゆっくりした振動として幻視され、 Δt が大きくなるほど見かけの声帯振動はより速い振動として幻視される。 Δt は、声帯振動位相上の発光点をずらす時間と解釈することもできるので、この Δt のことを移相時間と称することもある。

音声の基本周期を T 、移相時間を Δt 、 $(T + \Delta t)$ の発光

間隔でストロボ光が n 回発光したときの、見かけの振動周期を A とすると下の2式が成立する。

$$A = n(T + \Delta t) \dots\dots\dots ①$$

$$T = n \times \Delta t \dots\dots\dots ②$$

②の Δt を①に代入すると、

$$A = n(T + T/n)$$

$$= n \times T + T$$

$$\therefore n = (A - T) / T$$

$$= A/T - 1 \dots\dots\dots ③$$

A を周波数 A_0 であらわすと、

$$A = 1000 / A_0$$

T を基本周波数 F_0 であらわすと、

$$T = 1000 / F_0$$

$$\therefore n = F_0 / A_0 - 1$$

見かけの周波数 A_0 を 1 Hz にすると、

$$n = F_0 - 1$$

$$\div F_0 \dots\dots\dots ④$$

したがって、ストロボの発光回数が F_0 回になるように Δt を設定すると、見かけの周波数 A_0 が 1 Hz になる。

④式を②式に代入すると、

$$\Delta t = T / n \div T / F_0$$

となる。

たとえば、基本周波数 $F_0 = 100 \text{ Hz}$ の原振動を、見かけの振動周波数 $A_0 = 1 \text{ Hz}$ の振動として見える様にするには $\Delta t \div T / F_0 = 10 \text{ ms} / 100 = 0.1 \text{ ms}$ にすればよい。

喉頭ストロボスコープでは、声帯振動が定常的で、音声の基本周波数 (F_0) あるいは基本周期 (T) が一定の時のみ、見かけの声帯振動像も定常振動として幻視される。

逆にいうと、喉頭ストロボスコープで声帯振動が定常振動として幻視されるときは、そのストロボ像は原振動を直接反映しているとみなしてよい。

しかし、声帯振動が乱れて、非定常的な振動に見えるときは、そのストロボ像は、原振動の乱れを直接反映したものではない。

3. 喉頭ストロボスコープの使用上の注意

喉頭ストロボスコープ (図3) は、発声中の音声の基本周波数 F_0 (あるいは基本周期 T) を抽出して発声中の声帯振動像をスローモーション像として幻視する装置である¹⁾。

したがって、喉頭ストロボスコープの使用に際して最も大切な点は、音声の基本周波数 F_0 あるいは基本周期 T を正確に抽出することである。

音声の基本周波数 F_0 あるいは基本周期 T は、通常、コンタクトマイクロフォンを介して電氣的に抽出する機構に

図3 喉頭ストロボスコープ（永島製 LS-3A）

なっている。

この方式だと、音声は身体組織を通じて伝達される間に音声信号中の高調波成分が自然に減衰することと、周囲の環境雑音が混入しないことによって、音声の基本周波数 F_0 あるいは基本周期 T を電氣的に抽出するのが容易になるからである。

コンタクトマイクロフォンを接触させる部位は、音源の近く、すなわち、喉頭近傍が良いが、甲状軟骨にあまり近すぎても良くないことがある。

コンタクトマイクロフォンは、コンタクト部分の全面を均等に軽く押し当てるくらいの感じで頸部に当てるのが大切である。一部分しか接触していなかったり、浮いてしまったりしている場合には、音声の基本周波数 F_0 を正確に抽出できないので、喉頭ストロボスコープで非定常振動に見えてしまうことになる。

それゆえ、コンタクトマイクロフォンを適正な条件で頸部にあてさせるといことが、喉頭ストロボスコープを行う上での最大の注意点である。

コンタクトマイクロフォンが適正にあたっているかどうかは、コンタクトマイクロフォンを接触させて発声させた時に、喉頭ストロボスコープの機器上に表示される音声の基本周波数 F_0 が一定になっているかどうかでチェックすることができる。また、静止モードで見たときに、声帯振動が静止して見えるかどうかでもチェックすることができる。

4. 声帯振動概念

4-① 開閉運動としての概念（図4）

正常な声帯振動は、声帯上面からの観察では、左右対称な開閉運動として観察される²⁾（図4）。

声門が開いて行く位相を開大期（opening phase）、閉じて行く位相を閉小期（closing phase）、開大期から閉小

期に移行する境の位相を最大開大期（opened phase）、声門が閉じている位相を閉鎖期（closed phase）という。

声門が開いている位相、すなわち、開大期と閉小期を合わせた位相を開放期（open phase）といい、声帯振動1周期中の開放期の割合を開放時間率（open quotient, OQ）で表す。

声帯の最内側の縁を声帯縁（free edge）といい、開大期における声帯縁のことを上唇（upper lip）、閉小期における声帯縁のことを下唇（lower lip）という。

また、閉小期には、声帯上面を外方に向かって移動する波が見られる。この波の移動現象のことを狭義の粘膜波動（mucosal wave）という。

4-② 進行波（travelling wave）としての概念（図5-A, B）

前頭面からのX線ストロボスコープ^{3, 4)}による声帯振動の解析によって、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進行波（travelling wave）現象であることが解明されている。

図5-Aは、犬摘出喉頭の声帯粘膜上皮下に微小な鉛マーカーを刺入して声帯振動時のマーカーの振動軌跡を前頭面から解析³⁾したもので、声帯遊離縁のマーカーの振動軌跡（点線）を元に、1周期中の声帯振動の輪郭（実線）を描いたものである。

図5-Bは、人発声時の前頭面の声帯振動像を解析⁴⁾するために、1周期中の全画像を加算平均した像をマスク像として、各振動位相の画像からマスク像をデジタルサブトラクションしたもので、黒色矢印の先に示されている黒色部分が実際の振動領域である。この黒色部分は、進行波の波頭（移動する粘膜隆起）に相当する。

波頭は、1から4の閉鎖期間中に、両側接触したまま、形態を扁平化させつつ上方に移動し、5の開大期の始まりから6の最大開大期まで外方に向かって分離し、7から8の閉小期で引き続き外方へ移動する部分（下向き矢印）と内下方に突出する部分（横向き矢印）とに分裂する様子はつきりわかる。

すなわち、進行波は、閉鎖期から開大期にかけて声帯内側下面から上面に向かって移動し、閉小期に入ると、引き続き連続して外側に向かう波と、逆方向の内側下面に向かう波とに分裂する。

声帯上面からの観察で、閉鎖期から最大開大期にかけて声帯縁を形成する「上唇」は、声帯内側下面から上面外側に向かって移動する進行波の波頭（粘膜隆起）であり、閉小期にこの波頭が引き続き減衰しながら外方に向かって移動する現象が「狭義の粘膜波動」である。閉小期に声帯縁を形成する「下唇」は、この粘膜波動と逆方向の内下方に向かう分裂した波頭である。

すなわち、声帯振動を上面から観察したときの声帯縁としての「上唇」「下唇」は、声帯の特定（固定）の部位を指すのではなく、移動する粘膜隆起を波頭とする進行波の、

図4 声帯上面から記録した声帯振動の1周期。1→2：閉鎖期，3→4：開大期，5：最大開大期，6→7：閉小期，8→9：閉鎖期

図5-A 前頭面X線ストロボスコープの解析結果。声帯縁に刺入した鉛マーカの振動軌跡(点線)を元に、声帯振動像の輪郭の変化を描いたもの(犬摘出喉頭)。

進行方向を逆にしたふたつ波頭のことを意味する。また「狭義の粘膜波動」は、閉鎖期から開大期にかけて声帯縁を形成する波頭としての「上唇」が、閉小期にそのまま外側に移動する現象を意味する。

最近では、「進行波現象全体」を「粘膜波動」と称するようになってきている。

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進行波である。

声帯筋層は、この進行波の発生条件を規定する土台としての役割を果たしている^{5, 6)}。

4-③ Shanhärl の声帯振動模式図(図6)

上面から観察した声帯振動様式を元に、Shanhärl⁷⁾が描いた、前頭面の声帯振動想像図(図6)は、X線ストロボスコープによる前頭面振動様式とよく似ている。Shanhärlは、声帯振動を進行波(travelling wave)という概念で捉えることこそできなかったが、進行波の概念で見直してみても、とてもわかりやすい図である。

5. 喉頭ストロボグラフィーによる声帯振動の解析

5-① 喉頭ストロボグラフィー

喉頭ストロボスコープは、声帯振動を見かけのスローモーション像として幻視する方法であるが、喉頭ストロボグラフィー^{8, 9)}は、声帯振動画像だけでなく、声帯振動に同期した音声関連信号(音声信号・EGG・声門下圧)も声帯

図5-⑧ デジタルサブトラクションX線ストロボスコープによる、人発声時の前頭面X線ストロボスコープの解析結果。黒色矢印の先の黒色部分が進行波の波頭(粘膜隆起)に相当する部分。

振動画像と同時にストロボ処理(ストロボスコープ化)することによって、声帯振動画像と音声関連信号との関係を定量的に解析する方法である。

5-② ストロボモーションアナライザー (図7)

喉頭ストロボグラフィーを日常臨床で簡易に行えるよう、ストロボモーションアナライザーを(株)フローベルならびに(株)永島医科器械と共同開発した。

喉頭ストロボスコープは永島製LS-3Aを用い、音声の基本周波数が変わっても、見かけのスピード(移相速度)を一定にできるよう改良した。

図7は、システムのブロック図である。

内視鏡に接続したCCDカメラからの声帯振動画像を、1フレーム分ずつビデオメモリーに書き込みながら、128フィールド分のRGB画像メモリーにリアルタイムで連続

的に取り込む。同時に、喉頭ストロボスコープの発光信号に同期した位相の音声関連信号(音声信号・EGG信号・声門下圧信号)をA/Dコンバーターを介してオーバーレイメモリーに取り込む。この両者を、スーパーインポザーを介して合成映像出力する。

VTRに録画した合成映像も、VTR再生時に再びストロボモーションアナライザーに取り込むことによって、任意の振動周期をストロボグラフィー化することができる。

また、声帯振動様式と、声帯振動位相と音声関連信号位相との位相関係の両者を、声帯振動周期全長にわたって1枚の画像上で定量的に解析できるよう、声帯前後軸に直交する任意の位置の振動解析部分を解析対象として指定し、同じ位相の音声関連信号と合成して継続的に連結することによって、128フィールド分の振動周期を1枚の画像とし

図6 Shanhärlの声帯振動模式図

図7 ストロボモーションアナライザーのシステム図

図8 声帯振動解析区間の設定

図9 無関位発声のストロボグラム

て表示できるようにした。これをストロボグラムと呼ぶ。
図8の声帯前後軸に直行した2重線が解析対象区間である。

図9は、図8で指定した声帯振動画像の解析区間だけを128フィールド分だけ継時的に連結した画像を左欄に、これに同期した位相におけるEGG信号を中央に、音声信号を右欄にスーパーインポーズしたストロボグラムである。

発声条件は無関位発声である。

CLOSED PHASEからOPENING PHASEにかけて上唇が外方に開大し、CLOSING PHASEからは下唇が内方に閉鎖し、CLOSED PHASEで下唇から両側声帯が接触し、CLOSED PHASEを経て再びOPENING PHASEにいたる2周期分の振動様式が1枚の画像で一目瞭然にわかる。

この上唇、下唇は、特定(固定)の部位の振動ではなく、

図10 高音発声のストロボグラム

図12 声門下圧と EGG のストロボグラム

図11 低音発声のストロボグラム

移動する粘膜隆起を波頭とする TRAVELLING WAVE (進行波) の波頭であり、上唇は CLOSED PHASE から OPENING PHASE にかけて内下方から上外方へ向かう粘膜隆起の波頭を、下唇は CLOSING PHASE 時の内下方へ向かう波頭を指す。

また、声帯上面の血管群の水平方向の振動様式が、まるで地図上の等高線のようにはっきり見える。声帯上面の血管の水平方向の移動距離は、最内側の血管が最大で、外側に向かうほどその移動距離が小さくなっており、最内側の血管と最外側の血管との距離は CLOSED PHASE の最後の位相で最大となり、CLOSING PHASE の途中で最小となっている。

画面中央欄の EGG 信号が右端になる位相は CLOSED PHASE の始まりの位相に一致しており、CLOSED PHASE

の最後、OPENING PHASE の起始の位相では、未だ両端の中央部あたりにあるが、OPENED PHASE で左端位相になる。

図10は同一被験者の高音発声におけるストロボグラム、図11は低音発声におけるストロボグラムである。振動振幅が変化しているが、振動パターンと位相関係は変わらないことがわかる。

図12は声門下圧 (中央欄) と EGG (右欄) とを同時に記録したストロボグラムである。

声門下圧が最大になる位相は、CLOSING PHASE 途中から CLOSED PHASE の起始位相の間であり、声門下圧の最大位相の最後期と EGG の最右端位相とが略一致している。

6. 代表的疾患の喉頭ストロボスコーピー像

喉頭ストロボスコーピーでは、声帯の振動位相と振幅、粘膜波動 (進行波の波頭の移動) が左右声帯で対称かどうか、前後軸上で均一かどうかを中心に、声帯振動を観察する。

声帯ポリープやポリープ様声帯など、粘膜の硬化が無い柔らかい腫瘍性病変では、腫瘍の突出や重さによる影響が見られるが、進行波の移動は障害されない。

しかし、癌、嚢胞、瘢痕などの粘膜硬化病変では、病変部位の硬化によって、当該部位で進行波の進行がストップする現象が見られる。声帯溝症でも、硬化した溝が形成されている部位での進行波の途切れが観察される。

声帯白板症では、病変が薄く硬化度が小さければ進行波は障害されないが、厚くなって硬化度が増すと、それに比例して進行波が障害される。進行波が障害されているときは、癌化していることが多い。しかし、進行波が障害されていないからといって、癌化を否定することはできないので、バイオプシーによる組織検査は必須である。

反回神経麻痺では、左右声帯の位置と筋緊張の違いによ

る左右の振動の差が見られる。

また、声帯の病変に加えて、粘調度の高い粘液が病変部に絡まることによって、声帯振動がさらに悪影響を受けることもあるので、粘液の振動状態も観察する必要がある。

もっとも大切なことは、声の高さ、強さなどの発声条件を変えて発声させたときの声帯振動の変化をみることである。

特に、声帯結節などの微小な病変は、高音で発声させないと、声帯振動への悪影響がわからないことが多い。

一般的に、声帯縁の病変では低音発声は障害されず、高音発声が障害される。声門下病変では、声帯縁の病変と逆に、低音発声が障害されるが高音発声は障害されない。

その理由は、低音発声の方が進行波の波頭が大きく、かつ、進行波の起始部が高音発声よりも声門下方にあるからである。

7. 今後の展望

喉頭ストロボスコーピーは、声帯振動の動態を観察するものなので、VTRに記録することによって、声帯振動動態を繰り返し再生できる。

今後は、コンピュータによるデジタル画像処理技術の発展によって、喉頭ストロボグラフィーのような定量的な解析を、より高度により簡単に安価に行えるようになることが期待される。

本論文の要旨は、第8回日本喉頭科学会における教育パネル「実際に役に立つ喉頭疾患の検査法」において報告した。

なお、第39回日本気管食道科学会の研修会において報告

した「喉頭ストロボスコーピーによる声帯振動の観察」と重複する部分が多いことをお断わりする。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, 1995.
- 5) 平野 実：振動体としての声帯の構造。日耳鼻 77：1341～1349, 1973.
- 6) 都築 達：声帯層構造を考慮した声帯振動の基礎的研究。耳鼻 30：131～152, 1984.
- 7) Shanhärl E：Die Stroboskopie in der praktischen Laryngologie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1960.
- 8) 磯貝 豊：STROBOGRAPHYによる喉頭の機能検査。喉頭 6：91～96, 1995.
- 9) 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.

別刷請求先 〒160 東京都新宿区信濃町9番地2
東京電力病院耳鼻咽喉科 磯貝 豊