嚥下第2期における横隔膜および内外肋間筋の活動様式

佐賀医科大学耳鼻咽喉科学教室（主任：進 武幹教授）

前山 忠嗣, 進 武幹, 森川 郁郎, 梅崎 俊郎, 吉田 太, 岩永康成

ACTIVITY OF THE DIAPHRAGM AND INTERCOSTAL MUSCLES DURING SECOND STAGE OF THE DEGLUTITION

TADATSUGU MAEYAMA, M. D., TAKEMOTO SHIN, M. D.,
IKURO MORIKAWA, M. D., TOSHIRO UMEZAKI, M. D.,
FUTOSHI YOSHIDA, M. D. and YASUNARI IWANAGA, M. D.

Department of Otolaryngology, Saga Medical School, Saga

It has generally been considered that respiration is suppressed or interrupted during the second stage of deglutition. However, the subglottic pressure changes during deglutition to some extent. The purpose of this investigation is to elucidate the activity of the respiratory muscles during the second stage of deglutition. In this study, electrical activities of the diaphragm and intercostal muscles and the subglottic pressure during deglutition in felines, were simultaneously recorded. Deglutition was elicited by water being poured into the pharynx and/or by repetitive electrical stimulation of the superior laryngeal nerve under general anesthesia by administration of ketamine hydrochloride. The results of these experiments indicate the following; 1) Activities of the diaphragm and intercostal muscles were observed to be highly constant in each deglutition. The diaphragm was active simultaneously with the thyrohyoid muscle and the contraction was 100-200 msec in duration. The external intercostal muscle was active simultaneously with the thyrohyoid muscle, while the internal intercostal muscle activity was suppressed during deglutition. 2) Although respiratory activities of these muscles varied depending on the depth of anesthesia, the degree of dyspnea or superior laryngeal nerve stimulation, the activities during deglutition were always found to be constant. 3) The subglottic pressure decreased initially with the onset of diaphragm and external intercostal muscle contractions, and increased afterward with the cessation of the diaphragm contraction. 4) It appears that the activities of the diaphragm and intercostal muscles are regulated by a preprogrammed command of the swallowing center.

Key words: 嚥下, 筋電図, 横隔膜, 肋間筋, 声門下圧

A90—0680—60020

緒 言

一般には嚥下時（以下本稿では第2期または反射期をいう）呼吸は抑制ないしは停止されと考えられているが、嚥下呼吸がなされるという説^{1)~4)}があり、また嚥下時には声門下圧や気管内圧に変動がみられるという報告^{5)~8)}もあり、嚥下時には呼吸に関与する諸筋

がなんらかの活動を行っていることが十分考えられる。我々は猫を用いて嚥下時における横隔膜および内外肋間筋の筋電図を観察し、同時記録した声門下圧の変化と対応させ、その活動様式について検討を行ったので考察を加えて報告する。

方 法

実験動物は成猫を使用した。麻酔は塩酸ケタミン 20-30 mg/kg を筋注し、必要に応じて腹腔内に追加した。頸部正中皮膚に縦切開を加え、喉頭気管を剥離露出した。側胸部に皮膚切開を入れ第5または第6肋間筋を露出し内肋間筋と外肋間筋の間に剥離した。また腹部に横切開を加え腹筋および腹膜を切離し横隔膜を露出した。筋電図の誘導にはシリコン被覆のイリジウム白金線で作製した、bipolar hooked wire electrodeを使用し、各筋に明視下に刺入した。なお腹部の切開創は縫合閉鎖した。横隔膜についてはパルスカウンター（日本光電社製 S-0477A）も用いて筋電図とパルスカウンターの同時記録を行い観察した。パルスカウンターのスライスレベルは雑音を除きパルスのみを数えるようにそのたびに適宜設定し、40 msec または 100 msec 単位で行った。声門下圧の測定は気管壁より声門下に刺入した注射針に圧トランスデューサー（グールド社製 P231D）を接続して行った。甲状舌骨筋の筋電図の誘導も行い嚥下の指標とした。声門下圧および筋電図はポリグラフシステム（日本光電社製 RM-6000）にて観察しさらにサーマルアレイレコーダー（日本光電社製 WS-641G）を用いて記録した。嚥下は咽頭注水または上喉頭神経の連続電気刺激（1 msec, 2~3 mV, 25 msec interval）によって惹起させた。実験方法のブロックダイアグラムはシェーマに示す通りである（図1）。

結 果

1) 横隔膜の活動様式

横隔膜は塩酸ケタミン麻酔下における安静呼吸時に

図1 実験方法のブロックダイアグラム

は規則的に収縮と弛緩を繰り返しているが、活動時間及び活動停止時間は常に一定ではない。パルスカウンターは横隔膜の活動状態をよく反映している（図2）。

横隔膜は咽頭注水による嚥下時には甲状舌骨筋の活動開始とほぼ同時に活動を開始し、その活動は100~200 msec 持続し、その後しばらく活動を停止するがその時間は一定しない（図3）。1回の注水によって嚥下が連続して惹起される場合でも横隔膜の活動は各嚥下毎に認められ、その活動状態は一定である（図4）。この嚥下第2期における横隔膜の活動は呼吸困難があったり全身状態が悪く呼吸の規則性が乱れている時にも必ずみられ、しかもその活動様式は安静呼吸時のそれとほぼ同様であった。横隔膜はほとんどの場合、嚥下に先立ち呼吸性の活動を停止するが、活動停止より嚥下が惹起されるまでの時間は一定していない。呼吸困難があったり全身状態が著しく悪い時には稀には横隔膜の活動が停止することなく嚥下が惹起されたり、嚥下時の活動がはっきりと停止することなく吸気性の活動に移行することもあった。

図2 安静呼吸時の横隔膜の節電図、パルスカウンターおよび声門下圧

図3 注水嚥下時は横隔膜は甲状舌骨筋の活動開始とほぼ同時に活動を開始し（矢印）、その活動は約100msec持続している。

図4 注水により嚥下が2回惹起されているが、横隔膜の活動は各嚥下毎に認められる(矢印)。

声門下圧は横隔膜の活動開始とともに下降を開始し、横隔膜の活動が停止する時にそのピークに達し、その上昇に転じている。

上喉頭神経の連続電気刺激によって反射性の嚥下が惹起されるが、各嚥下毎に横隔膜には注水によって惹起させた嚥下の場合とほぼ同様の活動が認められ、また声門下圧も同様の変化を示した(図5)。なお嚥下と嚥下の間に呼吸性の活動がみられることもあった。上喉頭神経の連続電気刺激は嚥下のみならず咳嗽も惹起するが、この場合横隔膜の活動は咳嗽が惹起される直前まで次第に増強し、咳嗽が惹起されるとともに約50 msecの間抑制され、さらにその後約200 msecにわたって咳嗽直前と同程度の増強を示すのが認められた。

上喉頭神経の連続電気刺激効果は個体によりまた麻酔深度によって異なったが、多くの場合は刺激開始直後より横隔膜の活動は停止し、その後嚥下や咳嗽が連続して惹起された。なお嚥下や咳嗽の間に不規則な呼吸性の活動が認められることもあった。時には刺激によって呼吸の間隔が延長し横隔膜の活動電位が小さくはなっても呼吸は停止せず、しばらくして嚥下や咳嗽が惹起されることもあった。また刺激によって咳嗽が連続して惹起されているときに刺激を停止すると嚥下が連続して起こってくることもあったが、この場合も各嚥下毎に横隔膜には注水嚥下時とほぼ同様の活動が認められた(図6)。

2) 内外肋間筋の活動様式

塩酸ケタミン麻酔下においては内外肋間筋には持続性の活動がみられるが、呼吸と同期した活動変化はほ

図5 上喉頭神経の連続電気刺激開始直後より横隔膜の活動は停止し、その後4回嚥下が惹起されており、各嚥下毎に横隔膜には注水嚥下時とほぼ同様の活動が認められる(矢印)。なお1回目と2回目および2回目と3回目の嚥下の間にみられる横隔膜の活動は呼吸性のものである。

図6 上喉頭神経の連続電気刺激によって咳嗽が続発し、刺激を停止した後嚥下が2回惹起されているが各嚥下毎に横隔膜の活動が認められる(矢印)。

とんど認められない。しかしながら姿勢を変化させるとその活動は著明に変化する。また注水嚥下時には、外肋間筋は甲状舌骨筋の活動開始とほぼ同時に活動を増強し、その増強は200-300 msec持続する。内肋間筋はその間活動が抑制される傾向にある(図7)。上喉頭神経の連続電気刺激を開始しても内外肋間筋の活動には特別の変化は認められないが、嚥下が惹起されると注水嚥下時とほぼ同様の活動状態を示す(図8)。外肋間筋の活動増強開始とともに声門下圧は下降を開始し、活動増強のピークの時点で声門下圧の下降もピークとなり、その後は上昇に転じており、活動増強が消失する時点で上昇のピークに達している。

なお両側の横膈神経を切断すると内外肋間筋の呼吸性の活動は著明となり、また注水嚥下時には切断前と

図7 注水嚥下時は内肋間筋の活動は抑制され、外肋間筋は甲状舌骨筋の活動開始とほぼ同時に活動が増強し、その増強は約 300 msec持続している。

図8 上喉頭神経の連続電気刺激における嚥下の場合も内外肋間筋は注水嚥下時とほぼ同様の活動を示す。

ほぼ同様の活動を示すが活動電位は呼吸性の活動に比べればはるかに小さい。また嚥下時約 1 mmHg 程度の声門下圧の下降が認められた。

横隔膜および内外肋間筋は嚥下時常に一定の作動様式を示した。嚥下時の横隔膜および内外肋間筋の活動様式と声門下圧の変化の関係をシェーマにすると図9のようになる。

考 察

横隔膜および内外肋間筋は通常は呼吸中枢の支配下にあり、孤束核に存在する pattern generator よりの

図9 嚥下時の横隔膜および内外肋間筋の活動様式と声門下圧の変化との関係のシェーマ。

インパルスによって活動が変化する⁹⁾と考えられている。横隔膜および肋間筋の活動に関しては、呼吸との関連および肺の圧受容器との関係については数多くの研究がなされているが、嚥下時の活動に関する報告は少なくまだ十分には解明されていない。

小田中¹¹⁾は除脳した家兎、犬および猫を用いて実験を行い、口腔内注水または上喉頭神経電気刺激によって惹起させた嚥下において、常に短時間の横隔膜の収縮弛緩が著明にみられたと述べ、これを嚥下呼吸と名づけている。油川¹²⁾も家兎の上喉頭神経刺激による嚥下で嚥下呼吸を認めたと述べている。山本³⁾は家兎、犬および人の気管内圧測定を行ったところ嚥下呼吸が認められ、また家兎および犬の嚥下時の筋電図を観察し、嚥下時横隔膜は必ず収縮し、両側の横隔神経を切断すると嚥下呼吸は停止の傾向を示すと述べている。さらに家兎の嚥下時の横隔膜の収縮は喉頭挙上開始の直前より出現し、その時間は 0.3-0.5 秒であったと述べている。我々の猫における観察結果では横隔膜の収縮開始の時間は甲状舌骨筋の収縮開始とほぼ同じであるが、収縮時間は 0.1-0.2 秒と家兎より短時間であった。Doty and Bosma¹⁰⁾は犬、猫および猿を用いて嚥下に関する詳細な実験的研究を行っており、嚥下時横隔膜は短時間の収縮を行うこともあるが、嚥下には必

須のものでないと言っている。しかしながら我々の観察では横隔膜の活動は常にみられ、その作動様式は一定であり、またその活動は声門下圧の変化とよく対応している。さらに横隔膜の呼吸性の活動は麻酔深度によって変化し、呼吸困難や誤嚥があると著明に増強するが、嚥下時の横隔膜の活動は呼吸性の変化とはかわりなく常にほぼ一定であった。これらのことより我々は、横隔膜は嚥下時には常に一定のパターンに従って活動するものと考えている。

嚥下時の内外肋間筋の活動に関する研究はわずしか行われていない。山本⁹⁾は嚥下時外肋間筋はほとんど変化を認めないと述べており、Kawasaki ら⁵⁾は嚥下時肋間筋は一定の活動を示さないと述べている。我々の観察では嚥下時内外肋間筋は常に一定の活動を示し、また両側横膈神経切断もわずかな声門下圧の下降がみられたことより、嚥下時内外肋間筋は一定のパターンに従って活動し、また声門下圧の変化には内外肋間筋の活動も関与しているものと考えている。なお塩酸ケタミン麻酔下の安静呼吸時においては内外肋間筋には持続性の筋放電を認めるが呼吸と同期した活動変化はほとんどみられず、姿勢を変化させた時に活動状態に変化がみられた。安静呼吸時においては胸郭の保持および姿勢の変化への対応が内外肋間筋の主たる機能であるように思える。

Hukuhara and Okada¹¹⁾は猫を用いて嚥下時の呼吸中枢ニューロンの活動に関する研究を行っているが、嚥下時は吸気ニューロンは burst を示し、呼気ニューロンは抑制されると述べている。さらに Sumi¹²⁾はより詳細な観察を行い、吸気ニューロンおよび呼気ニューロンとも burst を示すものと抑制されるものがあり、この活動は嚥下に伴う喉頭からの求心性インパルスが消失しても同じように起こると述べている。これらの研究結果は、呼吸中枢のニューロンは嚥下時には呼吸性の活動を停止して嚥下のプログラムに従って活動していることを示唆している。

上喉頭神経内枝の連続電気刺激は喉頭粘膜の刺激と同様に嚥下や咳嗽などの様々な気道反射を誘発するが、その中枢機構に関してはまだよくわかっていない。我々の観察では反射の起こり方は個体によって異なり、また麻酔深度、呼吸困難の程度などによっても異なっていた。西野¹³⁾は中枢の状態が喉頭粘膜刺激により誘発される反射効果のパターンに大きな影響をおよぼすであろうと述べている。また嚥下反射の誘発には至適頻度が存在するとされている^{14)~17)}がその理由は

まだ明らかではない。福原¹⁸⁾は延髄網様体の呼吸ニューロンは上喉頭神経内枝よりの求心性刺激に対して各ニューロン固有の周波数応答能を有しており、頻度効果が中枢性制御機構の基本的情報処理様式であることが示唆されると述べている。上喉頭神経の連続電気刺激は生理的な刺激ではないが、様々な反射機構の解明には有用な方法だと考えられる。我々の実験では嚥下の誘発がその目的であり、常に 1 msec, 2~3 V, 40 msec interval で刺激したが、いろいろな現象が観察された。Sessle ら¹⁹⁾は上喉頭神経の連続電気刺激では脳幹の半数以上の呼吸ニューロンの活動がすぐに抑制されると述べている。また Iscoe ら²⁰⁾は横隔膜の運動ニューロンは刺激開始後 50 msec 以内に活動を停止すると述べている。我々の観察でもほとんどの場合横隔膜の呼吸性の活動はすぐに停止し、その後嚥下および咳嗽が繰り返して誘発されたが、時には呼吸性の活動は抑制されるだけで消失しないこともあった。なお嚥下または咳嗽が繰り返して誘発された後に刺激が持続していても呼吸性の活動が回復してくることもあり、Iscoe ら²⁰⁾が述べている break out というべき現象も認められた。また刺激を停止した後で嚥下が惹起されることもあった。内外肋間筋の活動には刺激による影響はほとんどみられなかった。嚥下が惹起されている時は横隔膜および内外肋間筋は注水嚥下時とほぼ同じ活動様式を示した。これらのことより横隔膜および内外肋間筋の呼吸性の活動は上喉頭神経刺激直後より break out が起こるまで抑制され、嚥下が誘発されているときは嚥下のプログラムに従って作動しているものと推察される。

嚥下時の呼吸に関与する筋の活動がどのような役割を果たしているかについてはまだ明らかにはされていない。山本²⁾、広戸および富田³⁾は空気嚥下と誤嚥を防止するための嚥下呼吸としており、豊住²¹⁾は形態的および生理的進化の観点よりこれを痕跡的呼吸であると述べている。しかしながら吉田²²⁾の報告によれば嚥下時甲状舌骨筋が活動している間、つまり声門下圧が下降を開始し上昇のピークに達するまでの間は声門はほぼ閉鎖されているとされており、咽頭の空気が気管内に移動するとは考えにくい。Ramsey ら²³⁾は嚥下時気管内に入る空気は少量であり大部分は食物とともに嚥下されると述べている。また声門下圧が上昇する時点での内外肋間筋の活動は認められず、積極的な呼吸がなされているとは思えない。我々は嚥下時に声門下圧が下降しその後上昇するという変化は、声門が閉鎖さ

れた状態で横隔膜および内外肋間筋が活動することによって引き起こされてくる胸腔内圧の変化によるものと考えている。Fink²⁴⁾は声門が絞扼性に閉鎖された状態で咽頭圧が上昇すると声門閉鎖はより強固になると述べており、嚥下時声門が絞扼性に閉鎖された状態で声門下圧が下降すると声門閉鎖はより強固になると考えている。これらのことより我々は、従来いわれていた嚥下呼吸は見かけ上のものであり、実際の呼吸、吸息は起こっていないものと推定している。

Doty and Bosma¹⁰⁾は嚥下時の内外喉頭筋の活動は呼吸時の活動と異なり麻酔深度や呼吸困難の程度によってほとんど変化することはなく常に一定であると述べているが、我々の観察でも嚥下時の横隔膜および内外肋間筋の活動には同じような特性が認められ、このことは横隔膜および内外肋間筋の活動が嚥下中枢のプログラムに従った活動であることを強く示唆している。

我々の実験結果より、嚥下第2期においては横隔膜および内外肋間筋は常に嚥下中枢のプログラムにそった活動を行い、その活動は呼吸運動ではなく声門の閉鎖をより強固にするための活動であると考えている。

結 語

成猫を用いて嚥下第2期における横隔膜および内外肋間筋の活動を筋電図的に観察し、声門下圧の変化と対応させ、その作動様式について検討し次のような結論を得た。なお嚥下の惹起は咽頭注水または上喉頭神経の連続電気刺激によって行った。

1) 嚥下時には横隔膜および内外肋間筋は常に一定のパターンで活動を行っている。

2) 嚥下時の声門下圧の変化は横隔膜および内外肋間筋の活動によるものである。

3) 両側横隔神経を切断しても声門下圧はわずかながら下降する。

4) 嚥下時における横隔膜および内外肋間筋の活動は呼吸運動ではなく嚥下のプログラムに従った活動であると考えられる。

5) 声門下圧の下降は声門閉鎖をより強固にするものと推定している。

参考文献

- 1) 小田中貞：嚥下呼吸。日本生理学雑誌 14：114-119, 1952.
- 2) 油川貞敏：嚥下呼吸に就いて。日本生理学雑誌

- 14：175-176, 1952.
- 3) 山本忠邦：嚥下と呼吸との関係に関する実験的研究。耳鼻臨床 49：346-362, 1956.
- 4) 広戸幾一郎、富田英寿：脳幹疾患と嚥下障害。災害医学 11：148-156, 1968.
- 5) Kawasaki M et al：Neurophysiologic observations of normal deglutition. I. Its relationship to the respiratory cycle. Laryngoscope 74：1747-1780, 1964.
- 6) 進 武幹 他：嚥下のメカニズムとその障害。耳鼻臨床 77：2475-2486, 1984.
- 7) 進 武幹 他：嚥下反射のメカニズムに関する基礎的研究。日耳鼻 88：643-650, 1985.
- 8) 森川郁郎：誤嚥のメカニズムに関する基礎的研究—主として反回神経麻痺の関与について—。耳鼻 31：315-329, 1985.
- 9) Wyman RJ：Neurophysiology of the motor output pattern generator for breathing. Fred Proc 35：2013-2023, 1976.
- 10) Doty RW and Bosma JF：An electromyographic analysis of reflex deglutition. J Neurophysiol 19：44-60, 1955.
- 11) Hukuhara T and Okada H：Effects of deglutition upon the spike discharges of neurones in the respiratory center. Jap J Physiol 6：162-166, 1956.
- 12) Sumi T：The activity of brain-stem respiratory neurones and spinal motoneurones during swallowing. J Neurop hysiol 26：466-477, 1963.
- 13) 西野 卓、本田良行：気道反射の受容器と反射効果。呼と循 30：346-351, 1982.
- 14) Doty RW：Influence of stimulus pattern on reflex deglutition. Am J Physiol 166：142-158, 1951.
- 15) 巽 正一：嚥下反射に関する研究—上喉頭神経刺激による反射性嚥下—。耳鼻臨床 59：433-444, 1966.
- 16) Miller AJ：Characteristics of the swallowing reflex induced by peripheral nerve and brain stem stimulation. Exp Neurol 34：210-222, 1972.
- 17) 前山忠嗣：嚥下時の内外喉頭筋の機能に関する実験的研究—特に喉頭挙上について—。耳鼻 21：787-807, 1975.
- 18) 福原武彦：シンポジウム「上気道と下気道の相関」生理学的(神経反射機構の)立場から。日気食 29：100-106, 1978.
- 19) Sessle BJ et al²⁵⁾：Effects of upper respiratory tract stimuli on respiration and single respiratory neur-

- ons in the adult cat. *Exp Neurol* 61 : 245-259, 1978.
- 20) Iscoe S et al : Properties of inspiratory termination by superior laryngeal and vagal stimulation. *Respiration Physiology* 36 : 353-366, 1979.
- 21) 豊住頼一：哺乳動物における嗅覚，呼吸，嚥下に関する比較解剖学的研究。耳鼻 25 : 29-37, 1979.
- 22) 吉田哲二：正常嚥下に関する筋電図的ならびに X 線的研究。耳鼻 25 : 824-872, 1979.
- 23) Ramsey GH et al : Cinefluorographic analysis of the mechanism of swallowing. *Radiology* 64 : 498-518, 1955.
- 24) Fink BR : The etiology and treatment of laryngeal spasm. *Anesthesiology* 17 : 569-577, 1956.
-
- なお本研究の一部は第 11 回耳鼻北部九州連合地方部会，第 37 回日本気管食道科学会および第 65 回耳鼻福岡県地方部会において口演した。
-
- (原稿受付 昭和 61. 5. 10 日)
- 別刷請求先 〒 840-01 佐賀市鍋島町大字鍋島三本杉
佐賀医科大学耳鼻咽喉科学教室 前山忠嗣