

command swallow)」による実験結果をよく説明するものであった。しかし、咀嚼を伴う固形物の嚥下は4期連続モデルでは説明できず、Process Modelが提案された。つまり、咀嚼を伴う固形物の嚥下では、食物は舌により臼歯部まで運ばれた後に (stage I transport)、咀嚼により嚥下可能なまでに粉碎され (processing) ながら、舌により中咽頭まで能動的に輸送され (stage II transport)、中咽頭 (喉頭蓋谷部) で食塊形成されることが明らかになった。すなわち、この場合、口腔準備期、口腔送込期は明確に区別できず、かつ、嚥下反射前に食塊が咽頭内に進行することが明らかとなった。われわれは、この結果を追試し、さらに、液体および液体を含む混合物を咀嚼嚥下させ、この現象が食物物性によるのではなく咀嚼に伴う現象であることを確定した (武田斉子ら 2002)。さらに、食物が液体を含む場合には、食塊は嚥下反射開始前に中咽頭を超えて下咽頭にまで到達することも明らかにした。今回のPalmerとの議論で、以上の過程における咀嚼の役割について同意が得られた。つまり、種々の傍証を考え合わせて議論し、固形物という食物形態が重要なのではなく、咀嚼という運動がstage II transportを生み、かつ、嚥下反射前の中咽頭での食塊形成 (食塊の嚥下前咽頭進行) を引き起こすという点について見解の一致を見た。

・咀嚼の嚥下反射抑制の可能性：

Stage II transportに伴う食塊の咽頭進行に際して直ちに嚥下反射が誘発されないとい

う現象は、咀嚼が嚥下反射惹起を抑制するという考えを生む。実際、それを裏付ける結果が羊の実験で存在する (Lamkademら 1999)。一方、ヒトの場合、この考えは生体防御という観点から不都合と思われる。なぜなら、喉頭蓋谷が口腔内に存在する羊などのほ乳類と異なり、ヒトの喉頭蓋谷は中咽頭に露出しており、喉頭蓋谷に達した食塊は容易に下咽頭まで進行してしまうためである。われわれは、咀嚼が嚥下反射惹起に及ぼす影響を考察する目的で平成14年度に咽頭滴下実験を行った。その結果、咽頭への直接的水滴下による嚥下反射惹起の潜時は、咀嚼の有無で変化せず、また、滴下速度によって変化せず、随意的な我慢の有無によってのみ変化することが分かった。つまり、この実験系において咀嚼は嚥下閾値を変化させないといえた。Palmerと共にこの実験の内視鏡ビデオ所見を再度見直しながら議論を重ねて、その解釈に3つの可能性を見いだした。1) 咀嚼は嚥下反射惹起の閾値を変化させない、2) 下咽頭刺激は強力な嚥下反射惹起を引き起こすため僅かな閾値変化が観察できなかった、3) 下咽頭は緊急的嚥下を惹起する場であり主たる咀嚼嚥下の惹起様式を反映していない、というものである。これらの解釈については、さらに平成15年度に行った高齢者の咀嚼嚥下実験結果を議論することでその一部がより明確となった。すなわち、健常高齢者の咀嚼嚥下実験において、舌骨の上方移動開始時点 (IHM: Initiation of Hyoid Movement) を嚥下反射惹起開始とした場合、若年成人に比較して健常高齢者では、IHMと食塊位置との

関係は、命令嚥下でもコンビーフおよびクッキーの咀嚼嚥下でも遅延する傾向（IHM時に食塊がより深部に進行している傾向）があったのに対し、混合物の咀嚼嚥下ではその傾向を認めなかった。つまり、混合物の咀嚼嚥下では高率に下咽頭進行が認められるため、この結果は、下咽頭で誘発される嚥下（混合物咀嚼嚥下および咽頭滴下時の嚥下）と通常の固形物の咀嚼嚥下の惹起機構が異なる可能性、すなわち、先の可能性の2）あるいは3）を支持するものと考えられた。以上より、現時点では「咀嚼は咀嚼嚥下の際に生じる下咽頭での嚥下反射惹起には影響を与えない」とまとめることができた。一方、高齢者における命令嚥下と咀嚼嚥下の反射開始遅延例は同一でなく、むしろ両者には相関がほとんどなかった。従って、両者の反射惹起についても別々の機構と考えた方がよいと思われた。

・嚥下反射の咀嚼への影響：

高齢者の方が咀嚼停止と嚥下反射開始時点の逆転例が多かったという若年者と高齢者の比較検討により、咀嚼運動が嚥下反射機構もしくは嚥下反射起動機構によって抑制もしくは停止される可能性が示唆された。この点は、患者データによってさらに検討したい。

（2）咽頭における誤嚥防止機構

健常者では、嚥下前咽頭進行による誤嚥は稀である。従って、従来の「嚥下反射遅延による誤嚥」という概念は一定の修正を要する。Palmerはこの問題の糸口を呼吸の協調とい

う観点に見いだしている。我々は、内視鏡所見から披裂部の感覚に注目している。平成14～15年度に得られた多面的なデータとPalmerのデータとをつきあわせてこの機構について議論した。

・咀嚼中の呼吸運動と咽頭・喉頭構造の変化：

Duaら（1997）は、咀嚼時の内視鏡観察から披裂部の内転が起こると報告した。また、Palmerら（予備的検討）は、咀嚼中の呼吸周期を測定し、それが通常と異なり不規則化することを見いだした。しかし、今回、われわれの咀嚼時の内視鏡所見から、披裂部の内転は僅かであり、命令嚥下時に比して喉頭挙上開始前の披裂の内転頻度が少ないことを見いだした。これらは、矛盾する結果であり、負荷法の更なる検討と症例数を増やすことが必要と思われた。一方、われわれは咀嚼中嚥下を我慢させると喉頭がやや前方に偏位し披裂が内転することを見いだした。これは、我慢課題では、能動的運動過程によって喉頭を食塊から回避するという方法論を採っており、感覚閾値を変化させているわけではないと理解できた。この点は、生体防御の観点から合目的と思われた。以上、咀嚼中に呼吸運動と咽頭・喉頭構造の変化が観察されたが、各報告者の結果間に一部相反する部分が残る、今後の検討を要した。

・咽頭構造の個人差：

咀嚼嚥下における食塊の嚥下前咽頭進行の個人内の再現性は高いが、明らかな個人差が

存在する。つまり、ある個人では嚥下前咽頭進行が高頻度に観察されるのに対し他の個人では頻度が少ないといった現象が存在する。この個人差の生じる原因もしくはその関連で喉頭の形状に差がないか否かを喉頭蓋の形態を3型に分類して比較した。その結果、喉頭蓋の形態と嚥下前咽頭進行程度との間に弱い関係性を認めた。しかし、喉頭蓋の形態は加齢と共に変化するという古い報告があり、この結果は加齢の影響を間接的に眺めたものかも知れない。

されないことを確認した。

・ 誤嚥防止の訓練法：

誤嚥防止、特に咀嚼嚥下の際の誤嚥防止に対する訓練について議論し、いくつかの興味ある考察を行った。すなわち、1) 今のところ最も安全性の高い嚥下障害食とされているゼラチンゼリーは咀嚼により水溶液化してしまうので、下咽頭進行が生じやすく誤嚥頻度を高める可能性があること、2) 嚥下時の幾つかの肢位のレントゲン計測の結果、頭部伸展位(chin down position)は喉頭蓋谷を広げるため安全なstage II transportの確保に有利と思われること、3) 頭部伸展位を指導する際に一般に用いられる「顎を出すように」という指示は、咀嚼に際して下顎が運動するため不適切であり、「鼻先を出すように」という上顎部の固定位置を指示する方法が有効であること、など臨床上有益な議論がなされた。また、多用されている訓練法であるsupraglottic swallowの安全性について、日米のデータの比較を行い、米国で指摘されたような不整脈誘発の副作用は本邦では観察

The Process Model of Feeding and its Clinical Implications

Jeffrey B. Palmer, M.D.

Department of Physical Medicine and Rehabilitation and Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, Johns Hopkins University and Good Samaritan Hospital, Baltimore, Maryland, USA

The Process Model of Feeding (*PMF*) is a major conceptual development in the study of swallowing. The model grew out of research on mastication and swallowing in mammals and was subsequently adapted to human subjects. I will present the conventional model of swallowing, review recent studies that cast doubt on that model, explain the *PMF*, and discuss its clinical implications.

The Conventional Four-Stage Model of Swallowing

Swallowing is typically modeled as a sequence of stages named for the areas in which they occur. The four stages of the Conventional Model (*CM*) are the oral preparatory, oral propulsive, pharyngeal, and esophageal stages.¹ During the oral preparatory stage, food is chewed and mixed with saliva. In the oral propulsive stage, the bolus is transported from the oral cavity to the pharynx (Figure 1). The pharyngeal stage includes transport through the upper esophageal sphincter into the esophagus. The *CM* incorporates 3 assumptions: 1) the stages are sequential; 2) the oral propulsive stage is brief, and the pharyngeal stage follows immediately; 3) food entering the pharynx during the oral preparatory

stage is pathological.² The *CM* was developed using the “command swallow” paradigm in human subjects; the subject was instructed to take liquid in the mouth, hold it there, and swallow on command.

The Process Model of Feeding

The mechanisms of mastication, oral food transport, and swallowing have been described in a variety of mammals.³ This research led to the *Process Model of Feeding (PMF)*. The *PMF* divides oral food transport into two stages: *Stage I Transport* moves the food from the lips to the molar region; *Stage II Transport* propels it from the molar region to the pharynx. The timing of food transport and storage is quite different from that described in the *CM*. In mammals, chewed food is transported into the pharynx, where it is stored until

swallow onset. The swallow itself transfers this bolus from the pharynx to the esophagus. Given their evolutionary relationships, it is difficult to understand why the process of swallowing would be fundamentally different in humans than in other mammals. Some have attributed this to interspecific differences in anatomy. The typical mammal has its larynx in a high position, just behind the oral cavity. The palatal folds wrap around the larynx, separating it from the pharynx, so food can be stored in the pharynx without aspiration. At birth, the human infant has a high larynx. During childhood, the larynx descends, achieving the adult configuration by 8 years of age.⁴ The adult human larynx is low in the neck, making the larynx vulnerable to penetration by food in the pharynx. Another proposed explanation for the difference between the *PMF* and the *CM* is the difference in experimental methods. The mammalian studies were naturalistic; experimental animals were free to determine the rate and manner of eating and drinking. This is quite different from the command swallow paradigm of the human studies.

Studies of Feeding in Man

Videofluorography was used to study healthy young adults eating and drinking in as natural a manner as possible.⁵ We

found that chewed solid food was transported into the lower oropharynx as much as six seconds before the onset of swallowing. The patterns of oral food transport and swallowing were similar to those in other mammals. Our critical findings were replicated in several studies using videofluorography⁶ or fiberoptic endoscopy.⁷ Single swallows of liquid showed the sequence of stages predicted in the *CM*, but studies of rapid sequential swallowing revealed liquid in the pharynx prior to swallowing, violating the *CM*.⁸

Karen Hiiemae and I adapted the *PMF* to describe the major events occurring during solid food intake in man.⁹ During *Stage I Transport*, the bite of food is placed on the lower molars by tongue retraction and rotation. In *Food Processing*, food is chewed and mixed with saliva. When a portion of the food is ready for swallowing, it is propelled into the pharynx. This propulsion, known as *Stage II Transport*, is usually accomplished by a “squeeze-back” mechanism (Figure 2) nearly identical to that described for the oral propulsive stage of swallowing (in the *CM*). Food processing often continues after stage II transport begins, and additional food gradually accumulates in the pharynx (during the *Oropharyngeal Aggregation*

Time, OPAT). OPAT is highly variable; it may be an instantaneous event or last as long as 5 to 10 s in normal individuals. At a variable time after onset of OPAT, the pharyngeal swallow occurs. The main difference between the *CM* and the *PMF* is bolus aggregation in the pharynx (OPAT).

Clinical Implications

A fundamental difference between the *CM* and the *PMF* is the role of the pharynx in food transport and swallowing. In the *CM*, food passes through the pharynx very rapidly, and aggregation of food in the pharynx is considered abnormal. In the *PMF*, however, the pharynx is the normative site of bolus formation for solid foods. The notion that food does not normally remain in the pharynx for an extended period of time gave rise to the concept of “*delayed swallow onset*.”¹⁰ However, we now know that chewed solid food may normally remain in the pharynx for 5 to 10 s. Recent studies have revealed that liquids may also enter the pharynx well before swallow onset in healthy elderly subjects.¹¹ Delayed swallow, as previously defined, is an outmoded concept.

Respiratory complications are common in individuals with dysphagia. When

food collects in the pharynx, there is constant risk of aspiration. Indeed, aspiration pneumonia is common in dysphagic individuals, and is a major cause of morbidity and mortality in stroke patients.¹² It is not known what mechanisms prevent aspiration during OPAT, but possibilities include alteration of respiration,¹³ partial closure of the vocal folds,⁷ and optimization of bolus cohesion during mastication.¹⁴

Evaluation of individuals with dysphagia typically focuses on the ability to swallow liquids. The *PMF* raises concerns about aspiration of chewed solid food. If food is inhaled, it may cause serious sequelae, including airway obstruction. Thus, the comprehensive evaluation of individuals with dysphagia should include assessment of the ability to drink liquids and to eat solid food.

Acknowledgments

Supported in part by an award (R01-DC02123) from the National Institute on Deafness and other Communication Disorders. I am grateful to Dr. Karen Hiimae who was my co-investigator for much of the research discussed in this paper.

References

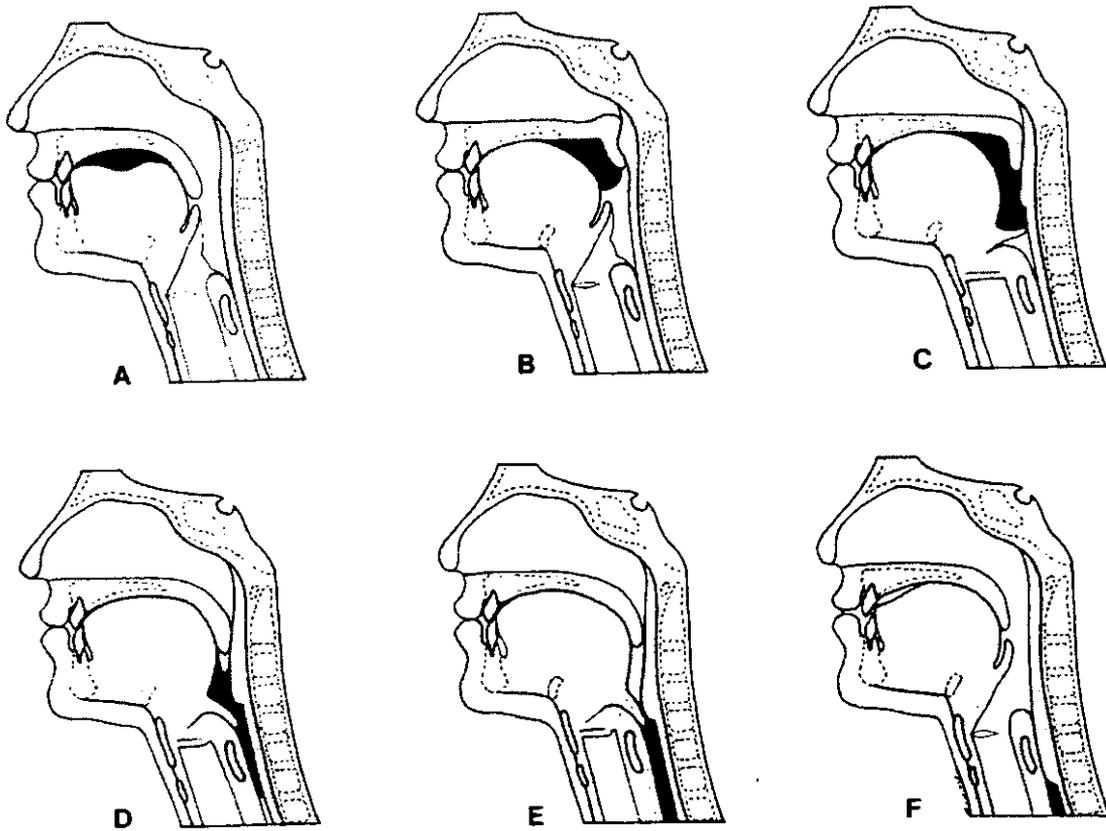
1. DODDS WJ, et al.: Physiology and radiology of the normal oral and pharyngeal phases of swallowing. *AJR Am J Roentgenol* 154:953-63, 1990.
2. LOGEMANN JA: Aspiration in head and neck surgical patients. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 94:373-6, 1985.
3. HIIEMAE KM and CROMPTON AW: Mastication, food transport and swallowing. Hildebrand M, et al.: *Functional Vertebrate Morphology*. Cambridge, MA, Belknap Press of Harvard University Press, 1985.
4. LIEBERMAN DE, et al.: Ontogeny of postnatal hyoid and larynx descent in humans. *Arch Oral Biol* 46:117-28., 2001.
5. PALMER JB, et al.: Coordination of mastication and swallowing. *Dysphagia* 7:187-200, 1992.
6. PALMER JB: Bolus aggregation in the oropharynx does not depend on gravity. *Arch Phys Med Rehabil* 79:691-6, 1998.
7. DUA KS, et al.: Coordination of deglutitive glottal function and pharyngeal bolus transit during normal eating. *Gastroenterology* 112:73-83, 1997.
8. CHI-FISHMAN G and SONIES BC: Motor strategy in rapid sequential swallowing: new insights. *J Speech Lang Hear Res* 43:1481-92., 2000.
9. HIIEMAE KM and PALMER JB: Food transport and bolus formation during complete feeding sequences on foods of different initial consistency. *Dysphagia* 14:31-42., 1999.
10. LOGEMANN JA and BYTELL DE: Swallowing disorders in three types of head and neck surgical patients. *Cancer* 44:1095-105, 1979.
11. ROBBINS J, et al.: Oropharyngeal swallowing in normal adults of different ages. *Gastroenterology* 103:823-9, 1992.
12. DING R and LOGEMANN JA: Pneumonia in stroke patients: a retrospective study. *Dysphagia* 15:51-7, 2000.
13. ARVAS T, et al.: How mastication affects respiration. *J Dent Res supplement*, 1999.

14. PRINZ JF and LUCAS PW: An optimization model for mastication and swallowing in mammals. Proc R Soc Lond B Biol Sci 264:1715-21, 1997.

15. DONNER MW, et al.: Anatomy and physiology of the pharynx. Gastrointest Radiol 10:196-212, 1985.

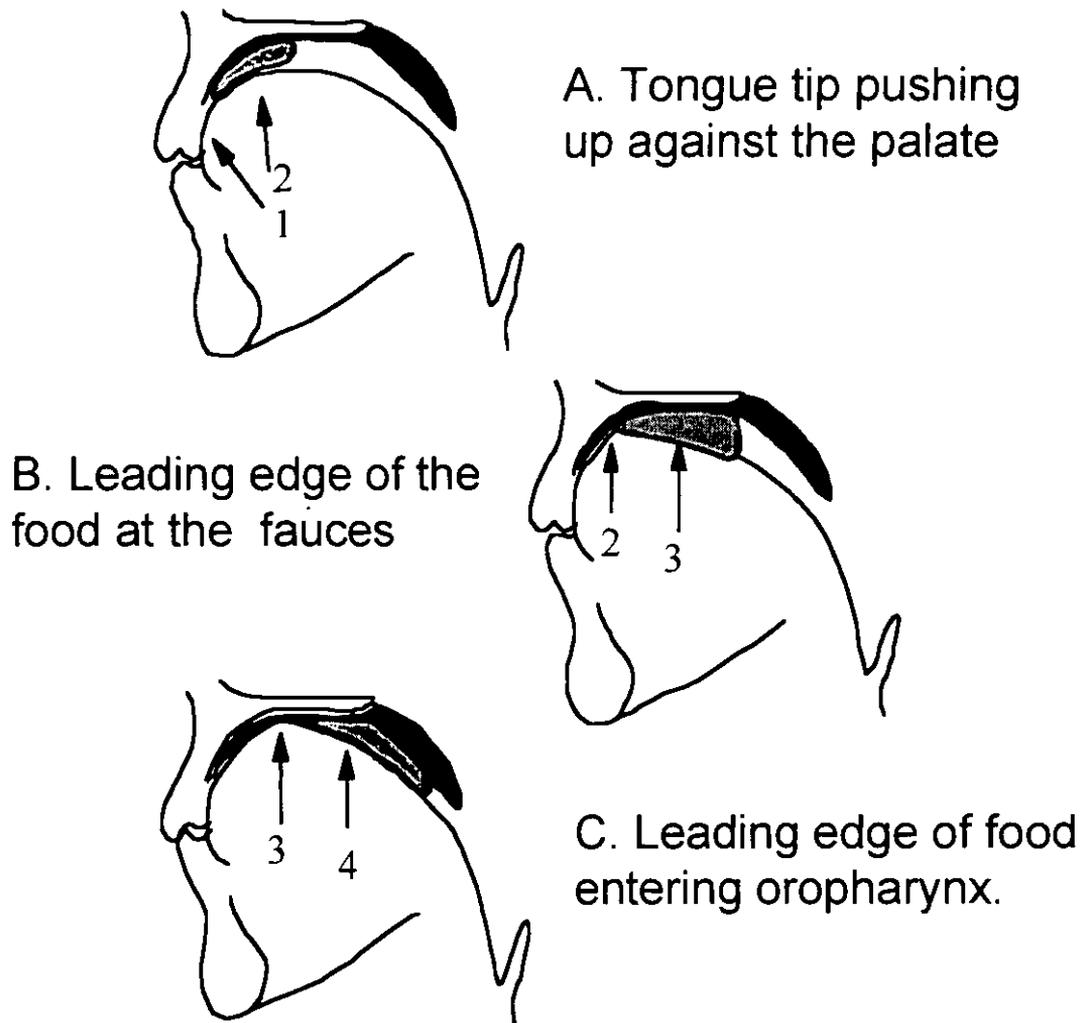
16. PALMER JB: Mechanisms of food transport during mastication and swallowing. Japanese Journal of Dysphagia Rehabilitation 4:3-9, 2000.

FIGURE 1



A liquid swallow as seen from the lateral view. The airway is shown in white; bony structures are shown in dashed line. From Donner et al.¹⁵

FIGURE 2



Stage II Transport. A. The tongue pushes against the anterior palate. B. The area of tongue-palate contact expands backward, squeezing the bolus back. C. The leading edge of the food enters the oropharynx. The arrows show the expansion of the area of tongue-palate contact from the anterior to posterior. From Palmer.¹⁶

その他の関連文献

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻名	ページ	出版年
Haruka Tohara, Eiichi Saitch, Keith A Mays, Keith Kuhlemeier, Jeffrey B Palmer	Three Tests for Predicting Aspiration without Videofluorography.	Dysphagia	18	126-134	2003
小野木啓子, 才藤栄一	摂食・嚥下障害への対応	難病と在宅ケア	9	60-62	2003
小口和代	言語障害と摂食・嚥下障害のリハビリテーション	治療	85	133-140	2003
岡田澄子, 重田律子, 才藤栄一	食欲不振・嚥下障害	総合臨床	52	2135-2141	2003
重田律子, 岡田澄子, 才藤栄一	高齢者の摂食・嚥下障害	Aging & Health	12	18-19	2003
戸原玄, 才藤栄一, 馬場尊	嚥下障害 ベッドサイドにおける評価	総合リハビリテーション	32	69-76	2004
稲本陽子, 保田祥代, 小口和代, 才藤栄一	脳血管障害による摂食・嚥下障害の分析～嚥下訓練前後の変化～	日本摂食・嚥下 リハビリテーション学会雑誌	7	117-125	2003
森田一三, 中垣晴男, 熊谷法子, 奥村明彦, 桐山光生, 佐々木晶浩, 根崎端午, 阿部義和, 才藤栄一	日帰り介護施設（デイサービスセンター）の利用者の生活食事状況と 嚥下機能の関係	日本公衆衛生学会誌	50	456-463	2003