

## 鳥の呼吸器官の構造とその呼吸メカニズム

嶋脇聡<sup>1)</sup>、清水優史<sup>2)</sup>

1) 産業技術総合研究所計量標準総合センター、2) 東京工業大学情報環境学専攻

はじめに

鳥は飛行という特殊能力を有している。それを可能とするために、鳥の呼吸器官は哺乳類ものと比較して非常にガス交換効率が高い。Tacker によって報告された実験では、すずめとマウスを 0.5 気圧の状況に放置したところ、すずめは飛行可能な状態であったのに対し、マウスは呼吸困難から昏睡状態になった。両者の血液の酸素結合能力に違いが無いことから、この実験による両者の相違は呼吸器官の構造とその呼吸メカニズムの違いによるものであろうと推測された。

鳥の呼吸器官の構造（文献 1）

鳥の呼吸器官の構造は哺乳類のそれとは全く異なる。図 1 に示すように、鳥の呼吸器官は 2 種類の気嚢と 5 種類の気管支から構成される。気嚢は軟組織でできていて、その拡張および収縮によって空気の取り込みを行う。これは哺乳類の横隔膜の機能に相当する。5 種類の気管支の中で Parabronchi だけは異なった機能を有する。その機能はガス交換である。そして毛細血管がこれに平行して張り巡らされている。Parabronchi を含む全ての気管支は比較的、硬組織からできている。これは、管径が非常に小さいため、その中の潤滑剤による表面張力で押しつぶされないためである。

鳥の呼吸器官内における空気の流れ

図 1 には、気管支内における空気の流れ方向も示す。2 種類の気嚢の拡張および収縮は同期している。1 呼吸における空気の流れを以下に示す（文献 2、文献 3）。

吸気時 気嚢の拡張によって、主気管支から空気が取り込められる。その空気は中央気管支を通過して、その一部は後方気嚢に格納される。また、その残りは Dorsobronchi を通って Parabronchi へ運ばれてガス交換される。その後、ガス交換された空気は前方気嚢に格納される。

吐き出し時 後方気嚢の収縮によって、吸気時に格納されていた空気は押し出される。その空気は、吸気時と同様に、Dorsobronchi を通って Parabronchi へ運ばれてガス交換される。ガス交換された空気は、前方気嚢から押し出された空気と共に、Ventrobronchi と主気管支を通過して体外へと排気される。

この中で特徴的な空気の流れは、ガス交換の場である Parabronchi において 1 呼吸を通じて常に Dorsobronchi から Ventrobronchi へ向かう一方向流れとなっていることである。その利点を次に示す。一方向流れに対向して血流を流すことにより、空気と血流との間の酸素濃度差を常にほぼ一定に保てる。これは対向型の熱交換器の原理に似ている。これによって、非常に高効率のガス交換を可能としている。

しかし、この流れ場を実現する際に一つの疑問点がある。それは、吸入時に主気管支から取り込まれた空気は、Ventrobronchi と中央気管支との分岐があるにもかかわらず、Ventrobronchi へは流入せずに、全て中央気管支へと流入することである。この現象は、この分岐部に弁のような機械的な作用が無いことから、「空力バルビング」と呼ばれる。

空力バルビングの生成メカニズム

空力バルビングの生成要因について、今まで幾つかの仮説（文献 4）が示された。その中で、Wang ら（文献 5）によって示された仮説は最も有力であると考えられる。それは、図 1 の Ventrobronchi と中央気管支との分岐部の上流に、局所的に管径の小さい狭窄（収縮部）を設けることによって、流入された空気をジェット流として分岐部を飛び越えさせて、空力バルビングを実現させているだろうというものである。

そこで、我々は、鳥の呼吸器官を、図 2 に示すような直角に分岐した後再び合流する管路網でモデル化し、その管路内を流れる流体の流れ方向を流れの可視化によって調査した。管はガラスでできており、作動流体は水とした。図 2 に示すように分岐部上流に収縮部を設けることによって、支管 (daughter tube) では、合流部から分岐部へ向かう逆方向流れが形成された。さらに、収縮部から流れ出た全ての流体は、ジェット流を形成して本管 (parent tube) へと流れていた。モデル実験ではあるが、Wang らによって示された空力バルピングの生成仮説を実証できたと考える。

この逆方向流れの生成メカニズムは以下のように考えられる。直管内に収縮部を設置すると、収縮部下流では流れの剥離、再付着、逆流が生じる (文献 6)。これらによって、収縮部下流における壁面圧力は圧力回復を生じる。つまり、剥離内では圧力が上昇する。この圧力回復によって局所的に上流よりも下流の圧力が高くなり、この 2 点を支管にて結ぶと、そこに逆方向流れが生じる。

#### 工学への応用

全章の分岐 合流モデルにおいて、更なる調査により、収縮部の形状や位置が、支管側の流量及び流れ方向に大きく影響を及ぼしていることが分かった。このことは、収縮部を操作することによって、支管側の流れを制御することができることを示唆している。鳥の呼吸においても、過呼吸を防止するために Parabronchi の流量の制御が必要と思われ、この制御を収縮部で行っていることが推測される。このメカニズムは往復流の弁のような制御や機械制御の好ましくない状況への応用が考えられる。

#### 文献

1. Duncker, H.-R.: Structure of Avian lungs. **14**: 44-63, 1972.
2. Scheid, P. and Piiper, J.: Direct Measurement of the Pathway of Respired Gas in the Lungs. *Respir., Physiol.*, **11**: 308-314, 1971.
3. Bretz, W. L. and Schmidt-Nielsen, K.: Bird Respiration: Flow Patterns in the Duck Lung. *J. Exp. Biol.*, **54**: 103-118, 1971.
4. Hazelhoff, E. H.: Structure and Function of the lung of birds. *Poult. Sci.*, **30**: 3-10, 1951.
5. Wang, N., *etc.*: Bird lung models show that convective inertia effects inspiratory aerodynamic valving. *Respir., Physiol.*, **73**: 111-124, 1988.
6. 嶋脇、清水、龍前: 低レイノルズ数における円管内収縮部下流の流れ方向壁面圧力分布に関する研究、機論 B, 66: 2034-2041, 2000.