

# [B25]奇網の熱・物質輸送

知能機械工学科 山田研究室  
9914071 野元大資

## 1. 緒言

カモシカの類であるレイヨウが、ときに 46 を越す体温に達しているにもかかわらず、熱に最も敏感な部位と考えられる脳や中枢神経系が、それによって障害を受ける様子はない、ということが確認されている。また、魚が海中深く潜り、周囲の水圧が増大しているにもかかわらず、浮袋はその水圧に押しつぶされないということもわかっている。

このような体外の環境の大きな変化にもかかわらず、体内の器官や個体の状態を保持するという生物の機能(恒常性)に対して、奇網と呼ばれる器官が大きく貢献している場合がある。

奇網は多数本の細い静脈と動脈が互いに対向して流れるという対向流の構造を有しており、接しあう動脈と静脈の間で熱交換や物質交換を行っている。

本研究では、奇網の熱・物質交換性能を熱工学的視点から解析やシミュレーションによって、調べ理解することを目的とする。

## 2. 奇網内温度分布

奇網内温度分布を解析するために図 1 に示す条件を設定した。微小区間内の熱バランスから式(1)(2)が導かれる。

$$T_{ai+1} = \frac{kl \Delta x}{c_p W} (T_{vi} - T_{ai}) + T_{ai} \dots (1)$$

$$T_{vi+1} = \frac{kl \Delta x}{c_p W} (T_{vi} - T_{ai}) + T_{vi} \dots (2)$$

$k$ :熱通過率[W/m<sup>2</sup>K]  $c_p$ :比熱[J/gK]  $W$ :質量流量[kg/s]  
 $T$ :温度[ ]  $l$ :血管周囲長さ

条件  $T_{ain}=37.5$ ,  $T_{vin}=36.5$ ,  $x=0.1\text{mm}$  として数値的に式(1)(2)を解く。奇網長さ  $L=5\text{mm}$  を 50 分割し、奇網内温度分布を求めた。

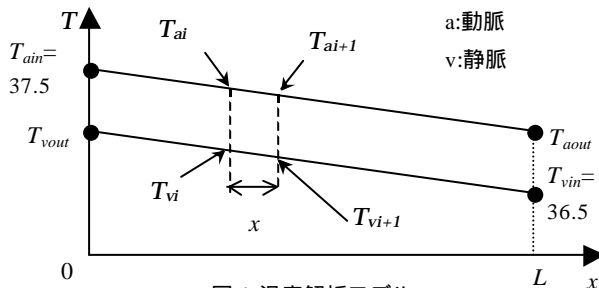


図 1 温度解析モデル

解析のために式(1),(2)に用いた各値は表 1.のとおりである。動脈血流量と静脈血流量は等しいと仮定した。

表 1.温度分布各値

$k$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$c_p$ [J/(kgK)]	$W_a=W_v=W$ [kg/s]	$l$ [m]
7.4	3840	$2.91 \times 10^{-11}$	$2.5 \times 10^{-5}$

得られた奇網内温度分布は図 2.のとおりである。

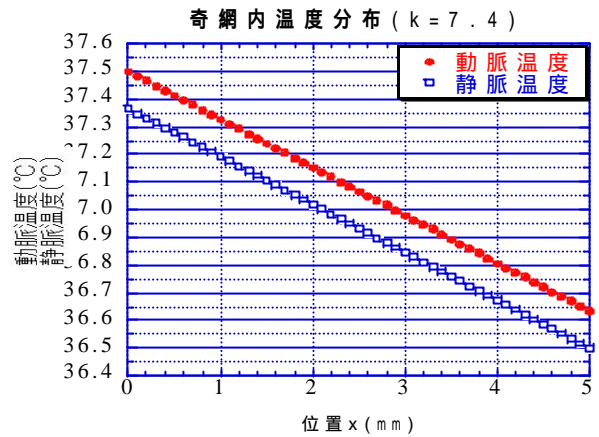


図 2.奇網内温度分布

## 3. 奇網内物質濃度分布

魚の浮袋に付属している奇網は二酸化炭素の物質交換により浮袋の圧力調節に大きな役割を担っている。そこで奇網における二酸化炭素の物質交換を解析する。

奇網内物質濃度分布を解析するために図 3 に示す条件を設定した。微小区間内の質量バランスから式(3)(4)が導かれる。

$$C_{vj+1} = \frac{k_m l \Delta x}{V_v} (C_{aj} - C_{vj}) + C_{vj} \dots (3)$$

$$C_{aj+1} = \frac{k_m l \Delta x}{V_a} (C_{aj} - C_{vj}) + C_{aj} \dots (4)$$

$k_m$ :物質通過率[m/s]  $V$ :体積流量[m<sup>3</sup>/s]  
 $C$ :質量濃度[kg/m<sup>3</sup>]  $l$ :血管周囲長さ

条件は文献値をもとに(参考文献[2]) 2種類の実験データ(異なる個体の試料 A, B)について行い  $C_{vi}=0.889$ (A) or  $1.09$ (B)kg/m<sup>3</sup>,  $C_{ae}=0.722$ (A) or  $1.00$ (B)kg/m<sup>3</sup>,  $x=0.1\text{mm}$  として数値的に式(3)(4)を解く。奇網長さは文献[1]に明記されていないため  $L=4\text{mm}$  (試料 A4,B4),  $5\text{mm}$  (試料 A5,B5),  $6\text{mm}$  (試料 A6,B6) と変え、奇網内物質濃度分布を求め、それらの場合の物質通過率  $k_m$  を求めることを本研究の目的とした。なお、温度分布の場合と静脈・動脈の位置関係が入れかわっている。

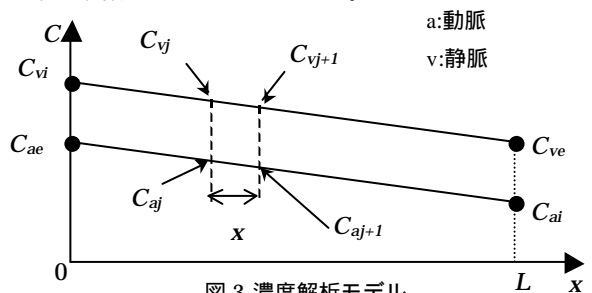


図 3.濃度解析モデル

解析のために式(3),(4)に用いた各値は表 2.表 3.のとおりである。静脈血流量は動脈血流量に比べ途中での分岐

により5%少なくした。

表2.物質濃度分布各値

$l$ [m]	$V_v$ [m <sup>3</sup> /s]	$V_a$ [m <sup>3</sup> /s]
$2.5 \times 10^{-5}$	$4.75 \times 10^{-9}$	$5.00 \times 10^{-9}$

表3.試料A 二酸化炭素濃度[kg/m<sup>3</sup>]

	$x=0$	$x=L$	濃度差
静脈	$C_{vi}=0.889$	$C_{ve}=0.598$	0.291
動脈	$C_{ae}=0.722$	$C_{ai}=0.445$	0.276

表4.試料B 二酸化炭素濃度[kg/m<sup>3</sup>]

	$x=0$	$x=L$	濃度差
静脈	$C_{vi}=1.09$	$C_{ve}=0.544$	0.547
動脈	$C_{ae}=1.00$	$C_{ai}=0.483$	0.520

試料A4,B4A5 に対して得られた奇網内物質濃度分布を図4,5,6.に示す。なお、他の試料に対しても同様の結果が得られている。また、得られた物質通過率を表5.に示す。

表5.物質通過率  $k_m$

試料	$k_m$ [m/s]		
	$L=4$ mm	$L=5$ mm	$L=6$ mm
A	0.0858	0.0687	0.0572
B	0.351	0.281	0.234

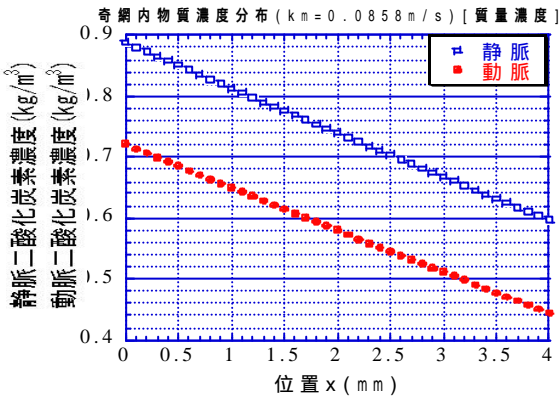


図4.試料A4の濃度分布

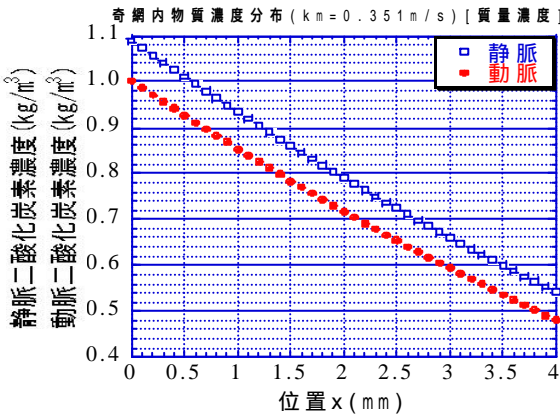


図5.試料B4の濃度分布

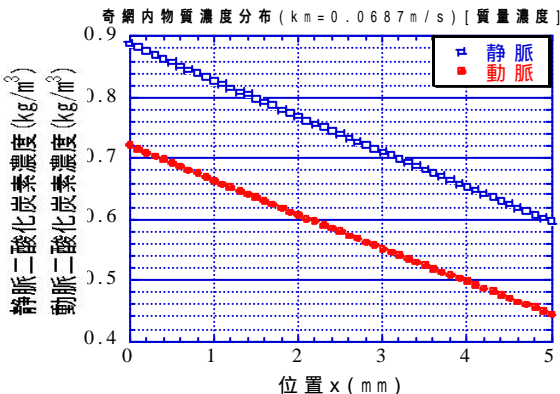


図6.試料A5の濃度分布

#### 4. 結果と考察

奇網内温度分布は静脈・動脈共に直線の変化をすることがわかった。これは動・静脈血流量と比熱が等しく、熱通過率を一定としたためである。温度分布を解析するにあたり、本来のウナギの奇網のデータから熱通過率  $k$  を求めると、およそ  $k=1.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$  となる。これを用いると動脈と静脈の温度差は0.01 以下の非常に小さな値となる。結果を見やすくするため、温度分布の解析では実際の熱通過率の値を大幅に小さくした  $k=7.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  の値を用いた(図2)。このことからウナギの奇網内では必要以上に高効率の熱交換が行われており、奇網は体温維持を目的にしていないことが推測される。

二酸化炭素濃度分布はどの試料もほぼ直線であるが、わずかに湾曲している。この原因は静脈と動脈で流量が異なるからである。

個体差のため物質通過率  $k_m$  の値は各試料で異なる。物質通過率が大きければ、物質は通過しやすい。そのため、奇網長さの個体差により計算される  $k_m$  にどれだけ影響があるかを調べたが、5mm を4mmあるいは6mmにしても  $k_m$  は大幅には変化しない。試料AとBでは得られた物質通過率  $k_m$  が3~4倍異なっている。個体差とはいえ血管壁の物質透過性や、血液流速がそれほど違うとは考えにくく、このような大きな差が何故生じたのか、今後の検討課題である。

#### 5. 結論

ウナギの浮袋に付属している奇網の熱交換および物質交換の性能を調べた結果、この奇網の目的は熱交換ではなく、二酸化炭素の物質交換にあることが定量的に示された。また、その物質通過率は0.06~0.35m/sの範囲にあると見積もられた。

今後、熱および物質通過率に分布がある場合や、個体差などについて検討することが課題である。

#### 参考文献

- [1] Francis A. Duck: *Physical Properties of Tissue*, 1990, Academic Press Limited.
- [2] Hirotsuke Kobayashi, Bernd Pelster, Peter Sheid (1989). *CO<sub>2</sub> back-diffusion in the rete aids O<sub>2</sub> secretion in the swimbladder of the eel*. *Respiration Physiology*, 79 (1990) 231-242
- [3] Hirotsuke Kobayashi, Bernd Pelster, Peter Sheid (1989). *Solute back-diffusion raises the gas concentrating efficiency in counter-current flow*. *Respiration Physiology*, 78 (1989) 59-71
- [4] 山田 幸生・柳澤 一郎・谷下 一夫・横山 真太郎 共著『からだの熱と流れの科学』1998、オーム社
- [5] k.シュミット=ニールセン 著・柳田為正 訳『動物の作動と性能』1973、培風館
- [6] 西川 兼康・藤田 恭伸 共著『伝熱学』1982、理工学社
- [7] 板沢 靖男・羽生 功 編『魚類生理学』1991、恒星社厚生閣
- [8] R・N・ハーディ 著・佐々木 隆 訳『温度と動物』1980、朝倉書店
- [9] 『伝熱工学資料』1986、日本機械学会
- [10] David・O・Cooney 著・権藤 晋一郎 訳『医工学』1984、アイピーシー