研究

半規管内クプラ周りのもれ流動の数値シミュレーション

西原主計*

Numerical simulation of leakage flow around the cupula of a semicircular canal

* KAZUE NISHIHARA

* Industrial Products Research Institute

abstract

The flow mechanism for a semicircular canal is expressed in terms of a leakage flow equation for a torus-tube-valve system. Features of the engineering model were determined assuming the leakage flow between ampulla and cupula to be a positive feedback loop. Numerical simulations using presently available data on man's semicircular canals and a simplified valve model of the cupula showed the engineering model to well fit the experimental equations. The efficiency of leakage flow on viscous damping and natural frequency of the system was roughly estimated.

1. はじめに

半規管は円環状の細管 canal, 管路一部の膨大部 ampulla, その中の可動弁 cupula, 内リンパ液 endolymph から成る¹⁾. 角運動により, 内リンパ液が流動しクプラを変位させ, 角運動を感知する. このしくみは, 古くから 2 階線形微分方程式で近似解析され, 回転実験によってカナルの粘性減衰係数, クプラの剛性係数, 時定数の推定と過渡応答の解明に力がそそがれてきた^{2)~6)}.

他方, 円環管内の液体流動解析による時定数の推定もなされてきているが^{7), 8)}, Egmond²⁾の指摘した「減衰係数が実験値と理論値と合わない原因は, クプラ周りのもれ流動にある」ということを裏付けるような流動解析, シミュレーション等はなされておらず, 現在もまだ未解決の課題として残っている.

筆者は先に, 半規管類似の角運動センサの構成を目的として, 円環管・弁・液体系の空間運動・

弁周りもれ流動の近似方程式⁹⁾を導びいた. それは流体運動量に基づく平均流の方程式であるが, 半規管内の複雑なクプラ周りのもれ流動を単純化すれば, その近似方程式がもれ流動効果を概略的に把握することに役立つのではないかと考えた.

そこで本報告では, これまでに知見しているヒトの半規管の実験式にフィットする流体工学的モデルを得るため, これまでに知見している半規管のデータを用い, もれ流動近似方程式の下で起こる可能性のある, 半規管内のもれ流動メカニズムを推定した. もれ流動を正帰還ループと考え, そのループ中でカナルの粘性減衰係数, クプラの剛性係数などを推定し, それらの変化量が粘性減衰率, 不減衰固有角振動数などの諸定数に及ぼす影響を数値シミュレーションにより検討した.

2. クプラ周りのもれ流動方程式

図 1 は空間運動を行う半規管のモデルであり, 図中の定数, 変数は半規管管路内のある中心から見た値をもつ. 便宜上クプラ, アンブラの断面を円形とする. a_i, b は半径, S_i は断面積, L_i は管路中心線の長さ, v_i は流速である. μ は液体粘性係数, ρ は密度, ν は動粘性係数である.

平成 2 年 11 月 14 日受付

* 製品科学研究所

〒305 茨城県つくば市東 1-1-4

キーワード: 半規管 (semicircular canal) クプラ (cupula) 流動メカニズム (flow mechanism) 円環管 (torus tube) 角速度計 (angular velocity sensor)

カナル管路及びアンプラ・クプラ周りの液体流動を平均流として扱う。クプラのヒンジ弁モデルにおいて、クプラの倒れ角 β に対する流量は、 β が小さい場合 $S_3 \beta a_3$ である。一方、クプラに相当する円形弁がアンプラ内壁から一定間隔をもって配置され、その弁が管軸方向に並進変位するときの流量がクプラの倒れによる流量と等しくなるモデルを考える。この両モデルを比較して、クプラの平均変位を $\hat{\xi} = \beta a_3$ と置く⁹⁾。また、両モデルのギャップの平均値も等しいので、ギャップでの流体摩擦は両モデルとも同じと仮定する。それらに基づき、これ以降クプラはアンプラ内壁から一定間隔をもって配置され、平均変位が $\hat{\xi}$ となるような円形弁モデルに置き換えることとする。運動方程式は

$$\ddot{\xi} + d_1 \dot{\xi} + d_2 \hat{\xi} = -u_0 \dot{w} \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 u_0 は管路の形状にかかわるゲイン、 $\dot{w}$ は角加速度の管路方向成分(単位ベクトル e_θ)である。ここでは便宜上、 d_1 を減衰率、 d_2 を角振動数^{*})と記す。半規管は、 d_1 が d_2 に比べ非常に大きい値となっているところに特徴がある。諸係数は以下のように定義される⁹⁾。

図1 半規管の工学的モデル

Fig.1 Engineering model of a semicircular canal.

*) ここでの減衰率とは、流体摩擦による粘性減衰率の略称であり、粘性減衰係数/質量のこと、また、角振動数とは、不減衰固有角振動数の2乗の略称であり、剛性係数/質量のことである。

$$d_1 \triangleq c_1 + c_2 k \quad (2)$$

$$d_2 \triangleq (c_3 + c_1 c_2) k$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &\triangleq \frac{8\nu}{a_1^2} \cdot \frac{L_1}{2\pi b} \quad [s^{-1}] \\ |c_2| &\triangleq \frac{S_4}{S_3 D} \quad [g^{-1}s] \\ c_3 &\triangleq \frac{1}{2\pi \rho b S_3} \quad [g^{-1}] \\ 1/D &\triangleq \frac{a_2 - a_3}{8\mu K S_3} \quad [g^{-1}s] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$u_0 \triangleq \frac{S_1 L_1 + S_2 L_2}{2\pi b S_3} \quad (4)$$

ただし、 K はアンプラの断面中心からのクプラの中心位置のずれ、ギャップ周囲の形状などによるギャップ面積、平均流速等の見積り誤差の微修正を行う定係数であり、理論上は誤差がないものとして1とする。ここでは、 K をもれ流動修正係数と呼ぶ。 k はクプラの剛性係数であり、角変位 β が小さい場合を扱うので線形と仮定する。この仮定は、既知の実験式²⁾と同レベルのものであり、本論の検討において不都合は生じない。もれ流動は c_2 、すなわち $1/D$ が存在することによる。

これまでの半規管モデルでは、実験結果からクプラ周りのもれ流動が考察されているが、解析的には考慮されていなかった。Egmond²⁾のモデルでは、各種の実験から、ヒトの半規管の場合、誤差20~25%の範囲で $d_1 = 10$ 、 $d_2 = 1$ が決定されている。測定された半規管のサイズを円管内定常流動方程式に適用した計算からは、円環体の中心円周の長さ L_1 を最小に見積り全長の1/2としても、 $d_1 = 27$ が最小値である。さらに、誤差の最大値を差し引いても $d_1 = 20$ であり、ヒトの半規管では、このような大きい値は実験から得られないとして、この隔たりの原因がクプラ・アンプラ間のもれ流れにあるのだろうと推測している。

一方、Young⁷⁾のモデルは、Egmondのモデルからnystagmusと神経系の適応機能とを分離し、

$d_1/d_2 = 16$ が実験値にフィットするため, クプラの振子系の部分を $d_1 = 10$, $d_2 = 0.625$ と推定している. しかし, この d_1 , d_2 がどのようなメカニズムか, ということまでは明らかにされていない. ここで式(2)のごとく, フィードバック項 c_2 が和差の形で振子部分の係数に寄与する本報のモデルは, 係数推定の自由度が増えるため, 過去の実験から得られている係数関係に合致するような流れのメカニズムが得られるものと思われる.

3. もれ流動の正帰還モデル

3.1 諸定数とクプラの剛性

クプラ周りの流れをモデル化する. 式(1)~(4)は, 図2のごとく半規管内のクプラ周りのもれ流動を含むフィードバックループであり, c_2 , c_3 に k が関与している. s はラプラス演算子である. 信号入力部 A は正負が考えられるが, 式(2)の d_1 の値を減少させるためには, c_1 , c_3 が正であるから, c_2 が負である必要がある. それは図1(b)のごとく, もれ流速 v_4 がカナル内の流速 v_1 に対し逆方向をとることを意味する. これ以降, このような現象をポジティブ・フィードバックと考える.

図2 半規管のフィードバック・モデル

Fig. 2 Feedback model of a semicircular canal.

まず, b , a_1 , a_2 は固定されているものとして, a_3 を求める. 式(3)から, アンブラ・クプラのギャップ ($a_2 - a_3$) は,

$$a_3 = a_2 \left\{ 1 + \sqrt{\frac{8 \nu K C_0}{2 \pi b (a_2 + a_3)}} \right\}^{-1} \quad (5)$$

ただし, 既設定の係数を用い

$$C_0 = \frac{c_1 - d_1}{c_1^2 - d_1 c_1 + d_2}$$

の反復演算で求められる. 式(5)は簡単な演算により, クプラの剛性 k によらない量であることが分かる. k は式(2)の第1式, 式(3)の第3式を式(2)の第2式に代入し,

$$\left. \begin{aligned} k &= \{ d_2 + c_1 (c_1 - d_1) \} \cdot 2 \pi \rho b S_3 \\ \text{又は,} \\ d_1 &= c_1 - \frac{1}{c_1} \cdot \frac{k}{2 \pi \rho b S_3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

である. これは, 生体系におけるクプラの設計値 k , s_3 と減衰率 d_1 , 角振動数 d_2 の関係を与え, $c_3 - c_1 \mid c_2 \mid > 0$ の広い範囲で成立する. Egmond などの実験モデルによれば, 式(6)第1式の括弧内の第2項が第1項に比べて十分大きいので, k は d_2 にほぼ無関係と思われる. ギャップが大きくなるか又は k が小さくなるとき, d_1 は増大する傾向にある. すなわち, k , s_3 の微小変化量と d_1 の微小変化量 (定変数に Δ を付ける) との関係は式(6)から,

$$\frac{\Delta d_1}{c_1 - d_1} = \left(\frac{\Delta S_3}{S_3} \right)_{k=\text{const}} = - \left(\frac{\Delta k}{k} \right)_{S_3=\text{const}} \quad (7)$$

となる. これから, k とギャップ面積の変化が同程度で d_1 を変化させることが分かる.

3.2 固有値

運動方程式(1)の固有値に d_1 , d_2 がどのように寄与するかを調べることにする. 状態変数 $x = \begin{pmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{pmatrix}^T$, T は転置行列, を用いて式(1)を

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (8)$$

の形で表す. ここでは, C は単位行列, D は0となっている. 伝達関数 $G(s) = Y(s)/U(s)$ は,

$$G = C^* (sI - A^*)^{-1} B^* + D \quad (9)$$

で与えられる。ただし、 $A^* = T^{-1}AT$, $B^* = T^{-1}B$, $C^* = CT$ である。固有値 λ_1, λ_2 には $(\lambda_1 + \lambda_2) = -d_1$, $\lambda_1 \lambda_2 = d_2$ の関係がある。伝達関数を変換行列

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

により対角化し、逆ラプラス変換により、

$$G^*(t) = \frac{u_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \begin{pmatrix} 0, e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t} \\ 0, \lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix} \quad (10)$$

が得られる。よって、定角速度入力 $U(s) = (0, s\bar{w})^T$ の場合、式(10)の第2行から観測量

$$y(t) = \frac{u_0 \bar{w}}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{\lambda_2 t}) \quad (11)$$

を得る。 $|\lambda_1| \ll |\lambda_2|$ として d_1, d_2 の微小変化が固有値に与える影響は、

$$\begin{pmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 / \lambda_2 & 1 / \lambda_2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

の標準型として得られる。上式と式(6), (7)によって $\Delta S_3, \Delta k$ と固有値の微小変化量 $\Delta \lambda_1$ の関係が求まる。ここに、 λ_1 はゆっくりと持続する応答に、 λ_2 は短時に動作しすぐ消滅する応答に対応する。なお、これらの固有値によるクプラの静止状態から倒れていく方向での経時応答は、現在までの知見^{2,7,8)}により、推察可能であるので省略した。

4. 数値シミュレーション

表1はヒトの半規管のサイズに関するデータである。*印の数値を用い、クプラの半径 a_3 (又はギャップ $a_2 - a_3$), d_1 の適正值、クプラの剛性係数 k 等を推定する。なお、クプラの剛性のデータが入手できないため、Vries¹⁰⁾の試算例を参考とした。液体定数は37℃の水のもの、 $\mu = 0.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\nu = 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ を代用する。

references	b	a_1	a_2	L_1	L_2	gap($a_2 - a_3$)
Egmond ²⁾		*0.03				0.01~0.001
Mayne ⁴⁾		0.02				以下
Groen ⁵⁾		0.034				0.0001
Vries ⁹⁾	*0.366	-	0.0504 *(0.05)	*1.5	*0.8	

*: Simulation model used in this paper.

[$\times 10^{-2} \text{ m}$]

表1 ヒトの半規管のサイズ

Table 1 Size data of man's semicircular canal.

4.1 計算結果

数値演算により、得られた結果は以下のとおりである。ここに、 a_1 すなわち c_1 は固有値である。

1) 式(6)及び(3)(5)を用い、 $K=1, d_1=10$ を固定し、 d_2 を0.5~1.5の範囲で変化させたとき、 $a_3 = 0.0463$, $k=13.4$ でほぼ一定、 c_i ($i=1\sim 3$) も有効数字3桁まで一定であった。よって、 a_3, k は共に d_2 に影響を与えない。

2) 上と同一の計算式を用い、 $K=1, d_2=1$ または0.625を固定し、 d_1 を4~34の範囲で変化させたとき、 $a_3 = 0.0463 \sim 0.0464$, $c_2 = 1.85 \sim 1.78$, $u_0 = 0.678$ でほぼ一定、 k は式(6)によって図3の直線Aのごとく一意に定まる。その勾配は式(7)に等しい。

3) 上と同一の計算式を用い、 a_1 を固定し、式(5)により a_2, a_3 の数値関係を保ちつつ、 a_2 や K を変化させると図3の曲線Bのようになる。 K は本来1であるが、式(5)から K の変化がギャップの変化に対置できるので、 K を変化させて k への影響を見た。これから、 $a_2 = 0.05$ で K が1~4(4倍)のとき、 $k = 13.5 \sim 11.5$ の範囲(約17%の開き)となり、 k は K に対しロバストであることが分かった。ギャップ ($a_2 - a_3$) は同図のCのように a_2 に関して直線的に変化する。なお、これまでの数値演算(有効桁数5)を通して、式(5)の反復計算は1~4回であった。

4) 式(7)は図4のようになる。ただし、 a_3 と a_2 , k は式(5), (6)で束縛されている。 k 及びギャップのわずかな変化によって、 d_1 は大きく変化している。

5) 式(12)は図5のようになる。同図のAのごとく、

d_1 の変化は λ_1, λ_2 に大きな影響を与える。また、同図の B のごとく d_2 のみの変化は λ_1 に影響し、 λ_2 はほとんど変わらない。また、 $\Delta \lambda_2 / \Delta d_1, \Delta \lambda_1 / \Delta d_2$ は共に 1 のオーダーである。

図3 クブラの諸係数の関係

- A : 減衰率 d_1 とクブラ剛性係数 k
 B : アンブラ半径 a_2 ともれ流動修正係数 K
 C : アンブラ半径 a_2 とアンブラ・クブラのギャップ ($a_2 - a_3$)

Fig. 3 Relationships of coefficients of a cupula.

- A : damping rate d_1 vs. cupula stiffness k
 B : ampulla radius a_2 vs. leakage flow compensator K
 C : ampulla radius a_2 vs. ampulla-cupula gap ($a_2 - a_3$)

図4 クブラ面積 S_3 の変化が剛性係数、減衰率に与える影響

Fig. 4 Influence of change of cupula area on the stiffness and flow damping.

図5 減衰率、角振動数と固有値の関係

- A : 減衰率 d_1 と固有値 λ_1, λ_2
 B : 角振動数 d_2 と固有値

Fig. 5 Relationships among damping rate, angular frequency and eigenvalues.

- A : damping rate d_1 vs. eigenvalues λ_1, λ_2
 B : angular frequency d_2 vs. eigenvalues

4.2 まとめ

(1) 先に導出した円環管内の液体もれ流動の近似方程式⁹⁾に対し、半規管のクブラ・アンブラに類似し、かつ単純化した弁モデルを与え、その弁の変位が小さい場合のもれ流動に関する数値シミュレーションを行い、クブラ周りのもれ流動の影響を推定した。このクブラ・アンブラの単純化モデルは、円形弁が円形管の内壁から一定間隔をもって配置され、管軸方向に小変位で並進運動をするものである。

(2) もれ流動は式(2)の係数 c_2 で代表され、それによって、諸係数調整の自由度を増やすことができた。 c_2 をポジティブ・フィードバックと考えることにより、カナルの粘性流動による減衰率を小さくすることが可能となり、従来の実験から決定されている減衰率、角振動数に合致するシミュレーション値を得ることができた。

(3) クブラ剛性係数の計測データが見当らず、数式関係から推定せざるを得なかった¹⁰⁾カナルのサイズ a_1 が固定されているとき、アンブラのサイズ

a_2 が決まると, クブラの剛性係数 k は減衰率 d_1 の計算値及び実験値と, クブラ面積 S_3 との関係によって一意に定まり, しかも, 角振動数 d_2 にほとんど影響を与えない. 表1および Egmond の d_1 を採用したとき, k の推定値は $13.4 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-2}$ であった.

また, アンブラ・クブラ間のギャップ ($a_2 - a_3$) は, 減衰率と角振動数の関係で決まり, クブラの剛性係数によらない. 剛性係数, ギャップの変化が減衰率に与える影響は大きい.

(4) 減衰率の変化は二つの固有値に大きな影響を与える. 角振動数の変化はゆっくりと持続する応答に影響し, 短時動作にはほとんど影響しない.

5. 考察

クブラ周りのリークが大きいとセンサ感度が悪く, 逆にセンシティブなものは, クブラがアンブラにはほぼ完全にフィットしているとされている.²⁾ 後者の場合, $c_2 \neq 0$ であるから, 式(2)により $d_1 \neq c_1$ となるはずである. 実験的に d_1 がこのような大きな値にならないので, やはり $c_2 < 0$ が成立していると思われる.

図3のCに得られたアンブラ・クブラ間のギャップは $0.00366 \times 10^{-2} \text{ m}$ であり, 表1の Egmond モデルから妥当な値であると思われる. 本報のモデルでは k と d_1 は一意に定まり, $d_1 = 27$ で計算した Vries モデルに対しては, 図3のAのごとく $k = 4$ となり, 他方, $d_1 = 10$ とした Egmond, Young のモデルに対しては $k = 13.4$ となった. a_2 , a_3 , K 及び d_2 を変化させても, k が4のような小さな値はでてこない. よって, $k = 13.4 \times 10^{-3} \text{ kg s}^{-2}$ 程度がクブラ剛性の適当な推定値であると思われる.

本シミュレーションにおいて, 計算値 d_1 を既得の実験値に整合させ得ること, ギャップが観測値の範囲にあること, 式(2)が広い範囲にわたって成立すること, d_2 が $1 \sim 0.625$ の範囲であっても安定なシミュレーション値が得られることなどを合わせ, ポジティブ・フィードバックループ, すなわち, 逆流が存在することが想定できる. 流体工学的には, クブラ・アンブラ間のギャップにある液体は,

アンブラの壁面せん断力により流動せず, 相対的にカナルの平均流れと逆流の様相を呈す, その相対的逆流の存在が管全体の流量を小さくさせ, よってカナルの流速を減じ, 流速に比例する粘性減衰力 (d_1 の項) を計算上小さくさせる, と考えることができる.

次に, 図4でのわずかなギャップの変化及び図3での k の変化が, 減衰率 d_1 を大きく変化させることは注目に値する. 鈍感な半規管はもれが大きいことを示唆し, クブラのギャップが大きい (0.1 mm 程度) とされ, それにかかわる実験値 d_1/d_2 が相当小さくなっている²⁾. それは, 4.1節の1) から a_3 , k が共に d_2 にほとんど影響を与えないので, d_1 が小さくなることに相当する. このシミュレーションでも, k が通常的设计値程度の大きさでギャップが大きい場合は, 式(2)により d_1 が小さくなる. 定性的ではあるが, d_1 に関し実験データ²⁾ とこの数式モデルの傾向は一致した. 一方, k が小さいときは, 図3から d_1 が大きくなる傾向にあり, 図5のAから運動時にクブラは元の状態に復帰しにくくなると思われる.

なお図5のBから, d_2 の減少は $|\lambda_1|$ を減少させ, その λ_1 によって過渡応答がより長時間持続することとなる. Young のモデルも数式的に実現可能である. すなわち, 非常にゆっくりした時定数で指数関数的に減衰する (λ_1 にかかわる) 応答を, d_2 のみでチューニングしたことに相当する. 工学的応用においては, λ_1 の設計は d_2 単独で行い, λ_2 の設計は d_1 で行った後, d_2 で λ_1 の変動成分を補正することとなる.

この Young のモデルにおいて, 式(2)のフィードバック項 c_2 を考慮しないで d_2 の値を Egmond のモデルより小さくさせるためには, クブラ剛性 k か面積 S_3 を変化させなければならないが, いずれも構造的に無理がある. 式(1)上式を下式に代入し, d_1 , k を固定したとき, 分母の共通項は S_3 , 分子において c_3 がもたない項はギャップ ($S_2 - S_3$) と ($a_2 - a_3$) である. d_2 を減少させるためには, ギャップが大, すなわちクブラの変形時にアンブラの径が相対的に大となるような非線型性の取り扱いが必要であろう.

実際の半規管は、カナルの流路やカナル・アン
プラの接続部の形状が図1と異なる、クプラの下
端が固定され上端が柔軟にたわむ、などの理由で
流れ形状、流体摩擦等が一様でないと思われる。
しかし、現段階ではそれらの解析が困難であるの
で、本シミュレーションは、図1のモデルにおい
て円環径がその管断面の径に比べ十分大きいとし、
直円管近似を行い、平均流、遅い流れ、ストーク
ス近似として解析した解⁹⁾から出発した。それゆ
え、本論は流路の曲り、部分的な形状のゆがみ等
が無視できる遅い一次平均流れへの適用であると
位置付けられる。このように解析解が簡略化、線
形化されているため、実際の半規管の形状、配置、
クプラの変位、ばね剛性等を同様に簡略化、線形
化し、かつ、既存の2階線形微分方程式の実験式
と対比しつつ検討したので、精度的には既存の実
験式と同程度となっている。

6. 結言

本論は、過去に得られているもれ流動を考えな
い2階線形常微分方程式の実験式において、粘性
減衰率の実験値が計算値と大きく異なる点に着目
し、それらの整合をとるため、もれ流動のパラメ
ータを追加し推定の自由度を増やした。半規管内
流れを簡単な弁周り流れのモデルに置き換え、ク
プラ・アンプラ間のもれ流動の方向が、従来のフ
ロート流量計などとは逆方向と考えて、その解析
解がポジティブ・フィードバックを示すことを提
案し、既知の実験データを使って数値シミュレ
ーションにより確かめた。数値シミュレーションに
当たっては、未知のクプラ剛性が大きければ大き
いなりに(逆も同様)このフィードバック・メカニ
ズムが成立する、というロバスト性に配慮した。

粗い近似ではあるが、本シミュレーションによ
って、半規管内のクプラ周りのもれ流動メカニ
ズム、すなわち、Egmondらの実験から決定された
係数が解析的に表現できた。今後クプラの剛性、
変形パターン等の計測値が入手できれば、本論を
土台として、剛性、流路、流体摩擦等の非線型性
を考慮した動力的検討が可能になるものと思わ
れる。

おわりに、フィードバックモデルの考え方につ
いて、貴重なご示唆をいただいた当所基礎人間工
学部生体システム課長和田充雄氏に感謝します。

文 献

- 1) 西原主計：動物重心維持機能に関する調査研究，
製品科学研究所報告，109号，45-52(1987)
- 2) A. A. J. Van Egmond, J. J. Groen and L. B.
W. Jonkees : The mechanics of the semicircu-
lar canal, J. Physiol., 110, 1-17(1949)
- 3) J. J. Groen, O. Lowenstein and A. J. H.
Vendrik : The mechanical analysis of the
response from the end-organs of the horizon-
tal semicircular canal in the isolated
elasmobranch labyrinth, J. Physiol., 117,
329-346(1952)
- 4) R. Mayne : The dynamic characteristics of
the semicircular canals, J. Comp. Physiol.,
309-319(1950)
- 5) J. J. Groen and M. Phil : Cupulometry,
Laryngoscope, 67, 894-905(1957)
- 6) A. J. Benson, M. A. Bodin : Interaction of
linear and angular accelerations on vestibular
receptors in man, Aerospace Medicine, 37,
144-154(1966)
- 7) L. R. Young : The current status of vestibular
system models, Automatica, 5, 369-383(1969)
- 8) W. C. Van Buskirk : The biomechanics of the
semicircular canals, IEEE Eng. in Med. &
Biology Soc. 10th Annual Int. Conf. CH 25
66-8/88, 1056-7(1988)
- 9) 西原主計：円環・液体系による角運動センサ，精
密工学会誌，57, 02, 60-65(1991)
- 10) Hl. de Vries : Physical aspects of the sense
organs, Proc. Biophysics, 6, 207-264(1956)

西原主計(にしはら かずえ) 昭和
37年東京理科大学物理学科卒業，現在，
工業技術院製品科学研究所勤務。地震
センサの構成法の研究，生体のシステ
ムの機能の数理工学的研究，生体の柔
軟型動作機構の開発，動物重心維持機
能の研究，姿勢センサの開発等，主として機械と生体
に関する動力的研究に従事。精密工学会，計測自動
制御学会，日本機械学会，日本ロボット学会の会員。