三角波様回転刺激による眼振反応†

伊藤 和也, 高橋 健一*

草刈 潤, 小林 俊光, 六郷 正暁**

van Egmond, et al. はクプラ内リンパ系を damped torsion pendulum と考え, このモデルの微分方程式から, 回転刺激量と回転停止後の回転感の持続時間との関係式を提出した。それは,

$$t_u = \frac{\pi}{A} \log_e \left(\frac{\theta_r}{\pi_{\min}} \right) \text{ (approx)}$$

t_u : 持続時間

r : 回転刺激量

である。これによれば, 回転感をひきおこす最小の回転刺激量が定まれば, クプラの π/A (time constant of response decay) が求められることを示している。

Guedry, et al. は同一モデルより, 三角波様回転刺激を用いた時の, 回転刺激の加速時間と回転椅子が最高速度に達してから, 眼振方向が逆転する時間との関係式を提出した。それは,

$$t_r = \frac{\pi}{A} \log_e \left(2 - \exp \left(-\frac{A}{\pi} T_1 \right) \right)$$

t_r : 最高速度から眼振方向が逆転するまでの時間

T_1 : 加速時間

である。これによって, クプラの π/A を求めている。

今回, 回転刺激量と回転感との関係式を回転後眼振に応用し, 回転後眼振による π/A を求め, 更に三角波様回転刺激による回転中眼振の変化によって得られたクプラの π/A と比較し, damped torsion pendulum というモデルが回転後眼振と回転中眼振とで一致しているかどうか検討した。

方 法

T.M. 松井製作の電動式等角加速度回転装置にスリップリング (CAY-675-6; エアフライト社) と回転板付フォトトランジスタを設置した。眼運動は, 被験者の両外眼角と前頭部につけた不分極電極から, スリップリングを通し, 三栄測器製直流増幅器 (1117) を使用して記録した。回転椅子の回転運動は回転板付フォトトランジスタを使用し, 眼運動と同時に記録した。

被験者の頭部を前屈30度に固定し, 黒色布で眼をおおい, 開眼を命じてから, $4^\circ/\text{sec}^2$ の加速度で回転椅子を回転 (この実験では反時計方向) させ, $20^\circ/\text{sec}$, $30^\circ/\text{sec}$ 又は $60^\circ/\text{sec}$ に達した後, それぞれの等速度で定速回転を行ない, 5~10 回転の後に, 回転椅子にブレーキをかけ, その時の回転後眼振の解発状態を観察した。 $20^\circ/\text{sec}$, $30^\circ/\text{sec}$, $60^\circ/\text{sec}$ それぞれの回転後眼振の持続時間を測定し, 眼振を指標としたクプログラムを作製し, これより回転後眼振をひきおこす最小の回転刺激量を求め, van Egmond, et al. の提出した式から, クプラの π/A を求めた。

次に, 回転様式を等加速, 等減速という三角波様回転にかえ, この時の眼振の解発状態を観察した。回転椅子の最高回転速度を $126 \sim 136^\circ/\text{sec}$ に設定し, 回転加速度を $6^\circ/\text{sec}^2$, $7^\circ/\text{sec}^2$, $8^\circ/\text{sec}^2$, $9^\circ/\text{sec}^2$ と変化させ, それぞれの回転加速度に於ける眼振を観察した。最高回転速度を $76 \sim 96^\circ/\text{sec}$ に設定し, 回転加速度を $2^\circ/\text{sec}^2$, $3^\circ/\text{sec}^2$, $4^\circ/\text{sec}^2$, $5^\circ/\text{sec}^2$ と変化させ, それぞれの回転加速度による眼振を観察した。

それぞれの回転加速度に於いて, 回転椅子の加速時間 (T_1) と回転椅子が最高速度に達してから, 眼振方向が逆転するまでの時間 t_r を測定した。Guedry, et al. が提案した式より, コンピューターを利用し, 加速時間 (T_1) と t_r との値より, クプラの π/A を得るためのプログラムを作製し, 三角波様回転刺激によるクプラの π/A を求めた。

結 果

回転椅子に加速度を加えてから, 定速回転に移る時の眼振反応は, 加速時, 回転椅子の回転速度が早くなるに従って, 回転中眼振が解発し, 緩徐相速度が大きくなっていくが, 加速度がなくなり, 定速回転になると眼振は減少し, やがて消失した。眼振消失後, 定速回転を続け, 急に回転椅子を停止されると, 図1の如く, 回転後眼振が解発し, しばらく後消失した。 $20^\circ/\text{sec}$, $30^\circ/\text{sec}$, $60^\circ/\text{sec}$

† Nystagmic response to triangular wave-like rotatory stimulation.

* Kazuya Ito, M.D., Kenichi Takahashi, M.D.

** Jun Kusakari, M.D., Toshimitsu Kobayashi, M.D. and Masaaki Rokugo, M.D.

* 国立仙台病院耳鼻咽喉科

** 東北大学医学部耳鼻咽喉科学教室

図 1

sec についての回転後眼振の第 I 相の持続時間はそれぞれ、11秒、20秒、30秒であった。半対数グラフに記入し、クプログラムを作製した。

クプログラム(図 2)はほぼ直線性を示し、回転後眼振をひきおこすのに必要な最小の回転刺激量が $10^\circ/\text{sec}$ であることがわかった。この値は van Egomond, et al. の提出した式の $r_{\min} = \xi_{\min} \cdot \pi / \theta$ に相当し、最小の回転刺激量を関係式に代入し、回転刺激量と回転後眼振の持続時間とから、クブラの $\pi / \Delta = 16$ 秒が得られた。又、逆に、得られた π / Δ と $r_{\min}$ の値から、理論式をコンピューターに記憶させ、Graphic Display を利用し、クプログラムを作製すると、実際に得られたクプログラムとはほぼ同一のクプログラムが得られた。

図 2

次に三角波様回転刺激を用いた時の眼振反応については、回転加速度 $5^\circ/\text{sec}^2$ で、19秒間加速し、同じ加速度で減速した時の眼振反応は図 3 の如くである。加速度を加えると眼振が解発し始め、眼振緩徐相速度が上昇していく、最高速度 $95^\circ/\text{sec}$ に達した後、減速がはじまると、眼振緩徐相速度は減少し、最高速度の時点より、8秒の所で眼振が消失し、12.5秒の所で反対方向に眼振が解発した。回転椅子が停止しても、眼振反応は持続し、やがて消失した。加速時間と眼振方向が反転する時間とからクブラの $\pi / \Delta = 23$ 秒が得られた。

$6^\circ/\text{sec}^2$, $7^\circ/\text{sec}^2$, $8^\circ/\text{sec}^2$, $9^\circ/\text{sec}^2$ で加速し、最高速度 $126 \sim 136^\circ/\text{sec}$ に達した後、同じ加速度で減速していった時の眼振反応をまとめると図 4 の如くである。これによると、回転椅子が最高速度に達してから、眼振方向が反転するまでの時間 t_r は、加速時間が長い程、長くなっていく傾向が認められた。加速時間と反転時間とからクブラの π / Δ を求めると $6^\circ/\text{sec}^2$, $7^\circ/\text{sec}^2$, $8^\circ/\text{sec}^2$, $9^\circ/\text{sec}^2$ の順に、31秒、32秒、22.5秒、22秒が得られた。

回転加速度、 $2^\circ/\text{sec}^2$, $3^\circ/\text{sec}^2$, $4^\circ/\text{sec}^2$ の時、最高速度 $76^\circ/\text{sec} \sim 96^\circ/\text{sec}$ に達した後、同じ加速度で減速した時の眼振反応は図 5 の如くである。これによると、最高速度に達してから眼振方向が反転するまでの時間 t_r は、加速時間が長くなっても、長くならず、むしろ短くなる傾向が認められる。クブラの π / Δ は、 $2^\circ/\text{sec}^2$, $3^\circ/\text{sec}^2$, $4^\circ/\text{sec}^2$ の順に19秒、14秒、29秒であった。

Guedry, et al. の提出した理論式より作製した加速時間(T_1)、反転時間(t_r)とクブラの π / Δ との関係は、コンピューターの Graphic Display を利用し、作製すると

図 3

図 4

図6の如くである。クプラの π/Δ が一定であれば、加速時間が大きくなるにしたがって、反転時間が大きくなっていくことがわかる。

$9^\circ/\text{sec}^2$, $8^\circ/\text{sec}^2$, $7^\circ/\text{sec}^2$, $6^\circ/\text{sec}^2$ で加速し最高速度がほぼ一定であった場合、加速時間が長くなるにつれ、反転時間が大きくなるという傾向は、それぞれの π/Δ に

図 5

図 6

バラツキがあったが、理論式によって得られた所見と一致している。しかし、 $4^\circ/\text{sec}^2$, $3^\circ/\text{sec}^2$, $2^\circ/\text{sec}^2$ と低加速度刺激で、最高速度がほぼ一定であった場合、やはり π/Δ にバラツキはあるが、加速時間が長くなるにつれ、反転時間が小さくなるという傾向は、理論式の所見と反対であった。

考 按

回転刺激による眼振の観察方法には、直接観察法と ENG による観察法がある。いずれの方法であっても、回転運動体内の物の観察である以上、必ず介在装置が必要である。直接観察法では特殊光学装置であり、ENG 観察では精密なスリッピングである。今回使

用したスリップリングは、きわめて良好に眼運動のシグナルを ENG 増幅器に伝えた。

van Egmond, et al. の提出した式は、ひとつのクプラについての damped torsion pendulum の式である。人間には両側にクプラ内リンパシステムがある。回転刺激による眼振反応をこのモデルで考えることは妥当であろうか。Lowenstein, et al. はクプラの偏位と放電頻度とについて、向膨大流の時は相関し、反膨大部流の時は相関しないと報告している。回転刺激が加わり、クプラの偏位が左右耳で同程度におこった時、放電頻度は、一方では増加し、他方ではそれ程変化せず、そして中枢での放電頻度のバランスが、左右耳からの神経放電の和と考えると、ひとつのクプラの偏位運動が眼振反応と相関していると考えても、的はずれとは言えないであろう。

同一被験者のクプラの π/Δ は、一定の damped torsion pendulum のモデルであるとすれば、いかなる加速度刺激、加速時間によろうと、計算結果としての π/Δ は一定であると考えねばなるまい。又、回転刺激法が異なり、観察対象が回転中眼振であろうと、回転後眼振であろうと同じ π/Δ であろう。

今回の実験では、三角波様回転刺激に於いて、加速度が異なれば、 π/Δ が異なり、回転刺激法が異なれば、やはり π/Δ が異なるという結果がでた。いったい、このバラツキをどのように考えたらよいのであろうか。

Gilson, et al. は三角波様回転刺激に $15^\circ/\text{sec}^2$ という回転加速度を使用している。我々の用いた刺激量とは異なっている。Guedry の理論式には加速度のことは触れてないが、理論式作製の過程で、弱回転刺激には適用できないようにしたのかもしれない。Stockwell, et al. によれば、 $5^\circ/\text{sec}^2$ の加速度で、加速時間の延長にしたがって、反転時間が、最初は大きくなるが、後に小さくなる傾向があり、回転中眼振に adaptation があるとし、response decline の時定数を用い、計測値と理論値を一致させている。

以上のことから、damped torsion pendulum というモデルを回転眼振を応用するにあたって、受容器が2個あることと、回転眼振に adaptation という機構があることを考慮に入れて、検討することが必要とおもわれる。

参 考 文 献

- 1) Lowenstein, O. and Sand, A.: The mechanism of the semicircular canal. A study of the responses of single fiber preparations to angular acceleration and to rotation at constant speed. Proc. Roy. Soc., Ser. B. 129: 256-275, 1940.
- 2) van Egmond, A. A. J., Groen, J. J. and Jongkees, L. B. W.: The mechanics of the semicircular canal. J. Physiol., 110: 1-17, 1948.
- 3) Hallpike, C. S., Hood, J. D. and Byford, G. H.: The design, construction and performance of a new type of revolving chair. Acta Otolaryng. 42: 511-538, 1952.
- 4) Guedry, F. E., Stockwell, C. W. Norman, J. W. and Owens, G. G.: Use of triangular wave forms of angular velocity in the study of vestibular function. Acta Otolaryng. 71: 439-448, 1971.
- 5) Gilson, R. D., Stockwell, C. W. and Guedry, F. E.: Nystagmus responses during triangular wave forms of angular velocity about the Y- and Z-axes. Acta Otolaryng. 75: 21-26, 1973.
- 6) Stockwell, C. W., Gilson, R. D. and Guedry, F. E.: Adaptation of horizontal semicircular canal responses. Acta Otolaryng. 75: 471-476, 1973.
- 7) 渡辺 勲: 前庭の生理. 耳鼻咽喉科学(上) (白岩俊雄, 北村武編), pp. 653-670, 医学書院, 1975.

Abstract

The subject was allowed to sit on a swivel chair with nonpolarizing electrodes placed at the outer canthus of the eyes and on the forehead and with his head tilted 30° forward in order to study the nystagmus evoked by rotatory movements of the body, accelerated and decelerated at an equal rate.

The velocity of the slow component of nystagmus was increased with an increase in the velocity of rotation of the chair, and decreased as the chair was decelerated after the maximum velocity was reached. The direction of nystagmus was reversed before the chair was stopped.

A theoretical formula is available by which to calculate the π/Δ for the cupula from the magnitude and duration of acceleration and the time of reversion of the direction of nystagmus on the assumption that the endolymph system within the cupula represents a damped torsion pendulum. The π/Δ for the cupula at an acceleration of stimulus of $2^\circ/\text{sec}^2$, $3^\circ/\text{sec}^2$, $4^\circ/\text{sec}^2$, $5^\circ/\text{sec}^2$, $6^\circ/\text{sec}^2$, $7^\circ/\text{sec}^2$, $8^\circ/\text{sec}^2$ and $9^\circ/\text{sec}^2$ as calculated by using the formula was 19 sec, 14 sec, 23 sec, 31 sec, 32 sec, 22.5 sec and 22 sec respectively. A π/Δ of 16 sec was obtained when the duration of postrotatory nystagmus was employed as a basis of calculation.

The value for π/Δ was found to vary with different magnitudes of acceleration, even in the same subject. thus, further studies are required to refine the theoretical formula and the method of stimulation.