

ISSN 0389-4010
UDC 159. 931:
159. 936

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-787

水平回転時の視界移動の知覚 —航空機の旋回運動と視知覚に関する—

井須尚紀・幸尾治朗・大川嘉久

1983年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

水平回転時の視界移動の知覚*

—航空機の旋回運動と視知覚に関して—

井 須 尚 紀** 幸 尾 治 朗** 大 川 嘉 久***

Perception of the Movement of Visual Scenes during Horizontal Body Rotation

Naoki ISU, Jiro KOO and Yoshihisa OHKAWA

Abstract

As the first step in clarifying the factor of motion sickness the way movement of visual scenes was perceived during body rotation was examined under two conditions: when visual scenes were moving coincidentally with the body and when they were kept stationary. These visual scenes are those represented in our daily life by, respectively, the view from inside and that from outside a moving vehicle (e.g. aircraft).

For this purpose three experiments were conducted and their results led to the following conclusions.

- (1) The scenes moving coincidentally with the body (inside view) are not always perceived coincident with it, and the apparent movement of visual scenes is perceived when the body is rotated sinusoidally at frequencies higher than 0.2 Hz.
- (2) Stationary scenes (outside view) with peripheral vision are perceived as stationary, but without peripheral vision they are perceived as moving.

Further, by modeling the perception system of the movement of visual scenes we obtained the frequency characteristics of the human vestibulo-ocular system. It was indicated that the sensation of apparent movement in the inside view is due to incomplete inhibition of the vestibulo-ocular reflex and that the sensation of movement in the outside view is due to an incomplete vestibulo-ocular reflex.

第1章 まえがき

動搖病 (motion sickness) は船・馬車・鉄道・自動車・航空機・宇宙船などによる乗り物酔として我々を悩ませ、さらには高層建築の揺れによって不快感を与えるに至った^{1)~3)}。中でも航空宇宙の分野で

は、動搖病はその運航に大きな障害を与える要因の一つとして、これまでになく数多くの研究が行われている^{1)~5)}。近年になって、Z軸横臥回転装置 (ZARR)⁶⁾や低速回転室 (SRR)^{7),8)}等を用いた実験室実験が盛んになり、特に身体の回転中に頭を傾けた時に生じるコレオリ効果⁹⁾が注目を集めている。こうした中で、動搖病誘起要因を説明するものとして、感覚矛盾論 (sensory conflict theory)³⁾や神経的不一致仮説 (neural mismatch hypothesis)^{3),10)}が

* 昭和57年11月8日受付

** 計測部

*** 日本大学研修生

有力視されてきた。これらは、前庭感覚と視覚、或いは半規管と耳石器等、感覚相互間の情報の矛盾、および感覚情報と記憶との矛盾によって動搖病が誘起されるものである。

これらの中でも特に前庭と視覚の相互作用の研究が多く見られる。幸尾²⁾, Brandt¹¹⁾ や Teixeira と Lackner¹²⁾は身体および視界を水平回転させ、その両者の回転関係が生み出す動搖病や回転幻覚の大きさへの影響を調べた。また、Dichgans¹³⁾は視界の動きが回転感覚へ与える影響を金魚の神経活動の変化として記録した。Guedry ら^{14),15)}や Barnes ら¹⁶⁾は視覚-前庭系の相互作用による前庭動眼反射[†]の抑制について調べた。一方、直線運動における視覚-前庭系の相互作用については Berthoz ら^{17),18)}の研究が挙げられる。彼らは周辺視界の動きによって生じる運動感覚と前庭系による運動感覚との相互作用について調べた。また、Buizza ら¹⁹⁾は、直線運動が視覚運動性眼振^{††}の眼球運動速度を変化させ、視界の運動速度の知覚に影響を与えることを観察している。

これら従来の研究は、実験的に与えられた身体と視界の相対運動（物理的関係）をパラメータとして眼球運動や運動知覚等がそれによって受ける影響を調べているが、身体と視界の移動の感覚的な相対的関係については明らかにされていない。Lackner と Graybiel²⁰⁾はパラボリックフライトによって被験者が受ける見かけの重力を変化させ、それに伴って前庭動眼反射の利得が変化する結果を得た。そして、その利得の変化が動搖病（特に宇宙酔）の誘発因子

になると論じているが、これは視覚と運動感覚との感覚上での相対的関係が動搖病の発生機序に直接関与していることを意味している。そこで、これら両者の感覚上での相対的関係を調べることが、動搖病のメカニズムを考える上で重要な課題となってくる。与えられた両者の刺激の物理的相互関係は、感覚上においても保たれているであろうか？感覚上の両者の関係で考えると、それらが与える効果・影響はどうになるであろうか？

これらを検討する第1段階として、身体を水平回転（垂直軸まわりの回転）させた時に、回転体とともに回転する視界（内部視界）および外部の視界がどのように移動して見えるかを調べた。日常の生活環境に置き換えると、旋回中の航空機の乗客にとって、機内の座席や他の乗客が全く自分と一緒に動いているように見えるのか、窓外の景色は本当に静止していると見えるのかどうかを調べたことに相当する。このために3つの実験を行い（第2章）、身体の回転時に視界がどのように移動して知覚されるか（第3章-1），周辺視^{†††}が視界移動の知覚にどのような効果を及ぼすか（第3章-2）を検討した。また、得られた結果から、視界移動の知覚モデルにより前庭動眼系の周波数特性について検討した（第3章-3）。

第2章 実験

本実験は、着席した身体を水平回転させた時に身体と共に回転する内部視界および静止している外部視界がどのような動きをしていると知覚されるかを

† [vestibulo-ocular reflex]。頭部が例えば水平面で右方向に回転したとき、右側の内耳の水平半規管に加わる角加速度が刺激になって半規管からのインパルスが増加し、これが前庭神経を通って中枢神経系に達して眼球を頭部の回転と逆の方向にまわす反射である。この反射は頭が動いても一点を注視するのに役立っている。（時実利彦：脳と神経系、岩波書店）

†† [opto-kinetic nystagmus]。p.12の脚注参照。

††† [peripheral vision]。網膜の周辺部による視覚。中心窓（p.10の脚注参照）には錐体だけがあるのに対し、周辺に行くにつれて錐体が少なくなり杆体が増すので、中心視（p.10の脚注参照）では色覚は完全であるが、周辺では色覚が悪くなる。視力も中心視では最大であるが、周辺に行くにつれて急激に小さくなる。物を注視する場合は中心視によるのであるが、中心視だけでは物を認識することが困難で、同時に周辺視を行って、初めて中心視が有効になる。固視点から約25度内の視野を中心視野（広義）、25度からの外の視野を周辺視野（広義）ということが多い。周辺視野は50度を境にして intermediate (midperipheral) と peripheral に分ける。（南山堂医学大辞典）

調べることを目的とした。ここで内部視界とは、航空機等の乗客が見ている乗り物内部の視界（壁や他の乗客等）に相当しており、実験では被験者の身体の回転と一緒に回転する画像をスクリーン上に投影することによってこれに換えられる。また、外部視界とは、乗客が航空機等の窓から見る外部の景色を想定しており、本実験ではスクリーン上の静止画像がこれに当る。

さて、被験者の身体を振子様回転させ、画像が身体の回転と感覚的に一致して動いていると見えるように画像の回転（振幅、位相）を被験者に調整させた。この時の画像の回転を測定し（実験Ⅰ），身体の回転との相対的関係から内部視界の感覚上での動き及び見かけの動きを推察した（第3章-1）。また、同様の手順で、感覚的にあたかも静止しているように見える画像の回転を測定し（実験Ⅱ），外部視界の感覚上での動きを推察した（第3章-1）。さらに、これらの見かけの動きや感覚上の動きがどの程度知覚され得るかを検討するために、知覚され得る最小の視界の回転振幅（閾値）を測定した（実験

Ⅲ）。尚、これらの知覚に対する周辺視の影響を調べるために、中心視のみのスポットと周辺視を与える縦のストライプを視界画像として用いて実験を行った。

2-1 実験システム

実験システムの構成を図1に示す。

被験者を振子様回転椅子に座らせ、垂直軸まわりに回転（水平回転）を与えた。回転椅子は振幅30度の振子様往復回転をし、周期は1.4秒から32秒まで可変である。回転椅子の軸にポテンショメータを取り付け、椅子の回転角を後述のように視界の動きの制御信号として用いるために、A/Dコンバータを介して計算機に入力した。

視界画像の動きの振幅および位相を変化させるために、それぞれポテンショメータAおよびBを被験者に操作させ、これらの端子電圧を計算機に入力した。なお、ポテンショメータの両端に掛ける電圧を可変にした。また、実験者の設定用にポテンショメータCを設け、この端子電圧を計算機に入力した。

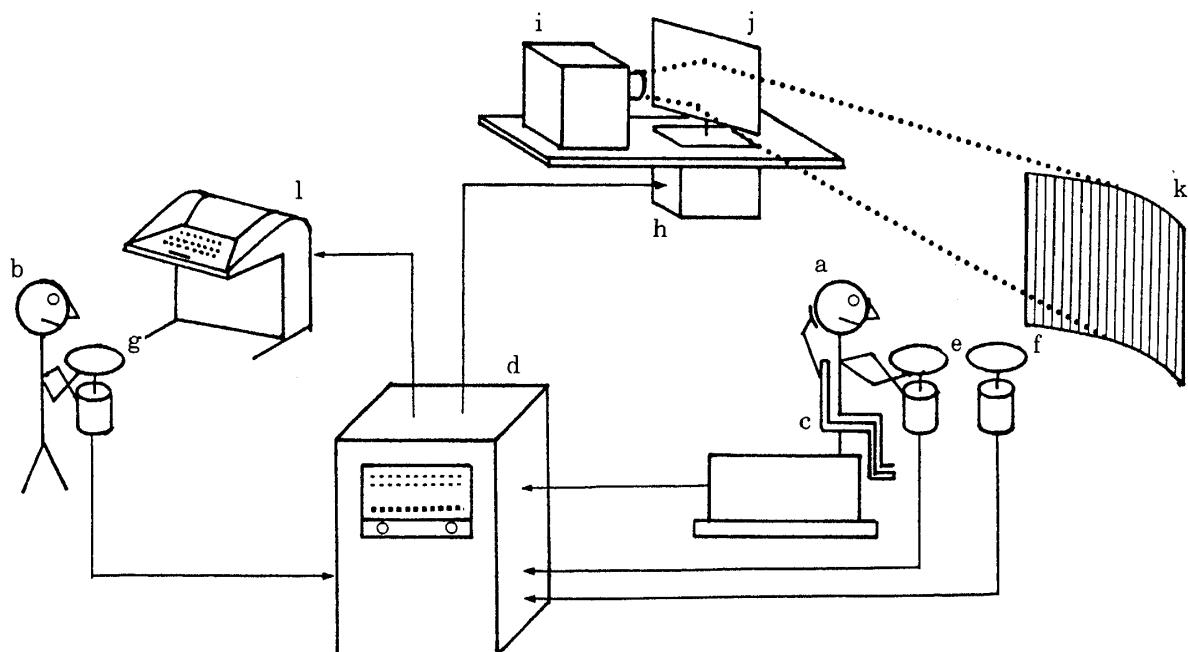


図1 実験システム

- a : 被験者 b : 実験者 c : 振子様回転椅子 d : 計算機 e : ポテンショメータA
- f : ポテンショメータB g : ポテンショメータC h : ガルバノメータ
- i : スライドプロジェクタ j : ミラー k : スクリーン l : タイプライタ

これは、被験者の操作する調整用ポテンショメータ A および B の回転角が画像の動きの振幅や位相の値と一定の対応をしないようにするために、および各試行ごとに初期条件を実験者が任意に与えられるようになるためである。

計算機では、ポテンショメータ A・B および C の端子電圧に応じて、回転椅子の回転角の信号に振幅比および位相差を与えて視界の回転角制御信号に変換し、ガルバノメータを駆動した。

スライドプロジェクタで投射した映像を、被験者頭上のガルバノメータに取付けたミラーに反射させてスクリーン上に投影し、振子様に回転する視界とした。スクリーンは幅 1.8 m、高さ 0.8 m で半径 1.0 m の円弧を有しており、被験者の 1.0 m 前方に設置した。

各試行の終了後、視界の回転と身体の回転との振幅比および位相差を、計算機で算出し、テレプリンタで記録した。

2-2 実験 I -回転体内部視界の動き感覚-
身体の回転と一致して動く回転体内部の視界が、どのような動きをしているかを感じるために、身体と一致して動いていると知覚される時の回転視界の振幅比と位相差を被験者調整法で測定した。また、この感覚に与える周辺視の影響を調べた。

2-2-1 実験手順[†]

暗室内で被験者を振子様回転椅子に座らせ、パラシュート用ベルトを用いて身体を椅子に固定し、回転軸が頭中心部を通るようにした。被験者に頭をヘッドレストに密着させて動かないように指示し、意識的な首振りを禁じた。また、マスキングをしたゴーグルを用いて視野を視角 40 度に制限し、回転画

像以外は視野に入らないようにした。

回転椅子によって被験者の身体に振幅 30 度の振子様水平回転を与え、「目の前に止って見えるように視界画像の回転の振幅と位相を調整せよ」と指示し、画像の回転の振幅および位相をポテンショメータ A、B を用いて同時に調整させた。被験者が調整完了を報告した時点で試行の終了とした。1 試行に要した時間は約 30 ~ 90 秒であり、被験者が疲労を訴えない限り特に休息時間は与えず、順次試行を継続した。各試行の初期条件である画像の回転振幅および位相の値は、初期値効果を与えないように実験者が任意に設定した。

身体および視界の回転周期は、その対数値が等分割となるように、1.4・2.0・2.8・4.0・5.6・8.0・11.2・16.0・22.4・32.0 [秒] の 10 段階とし、視界画像は、スポット（直径視角 0.5 度）、縦縞の太いストライプ（明部視角 0.4 度、暗部視角 1.0 度）および細いストライプ（明部視角 0.1 度、暗部視角 0.4 度）の 3 種類を用いた。

被験者には、22 ~ 24 才の内耳既応症のない健康な青年男子 4 名（内 1 名は視界画像にスポットを用いた実験のみ）を選んだ。

各被験者の実験の構成は、周期（10 段階）と画像（3 種類）の組合せ 30 ブロックから成り、各ブロック 16 試行ずつ計 480 試行（全被験者で 1600 試行）とした。1 回の実験では同一画像の 5 ブロックをランダムな順序に配置して各々 8 試行ずつ計 40 試行を行い、12 回の実験で全試行を終えた。1 回の実験の所要時間は約 1 時間であった。尚、各被験者は身体および視界の回転によって動搖不快感を訴えることはなかった。

2-2-2 結果

身体の回転と一致していると見える視界の回転の

† 実験 I

測定対象：身体の回転と感覚的に一致して見える視界の回転<振幅、位相差>

パラメータ 周期：1.4・2.0・2.8・4.0・5.6・8.0・11.2・16.0・22.4・32.0 秒 (10 段階)

画像：スポット、太いストライプ、細いストライプ (3 種類)

被験者：4 人 (内 1 人はスポットのみ)

試行数：16 試行 × 10 段階 (周期) × 3 種類 (画像) × 3 人 (被験者) } 1,600 試行
16 試行 × 10 段階 (周期) × 1 種類 (画像) × 1 人 (被験者) }

振幅および位相差の周波数特性[†]を図2に示す。

振幅の周波数特性 視界画像にスポットを用いた場合には、視界の回転振幅は身体の回転振幅(30度)よりも全般に小さくなっている。特に低い周波になる程小さな振幅を示した。周波数が高くなるに

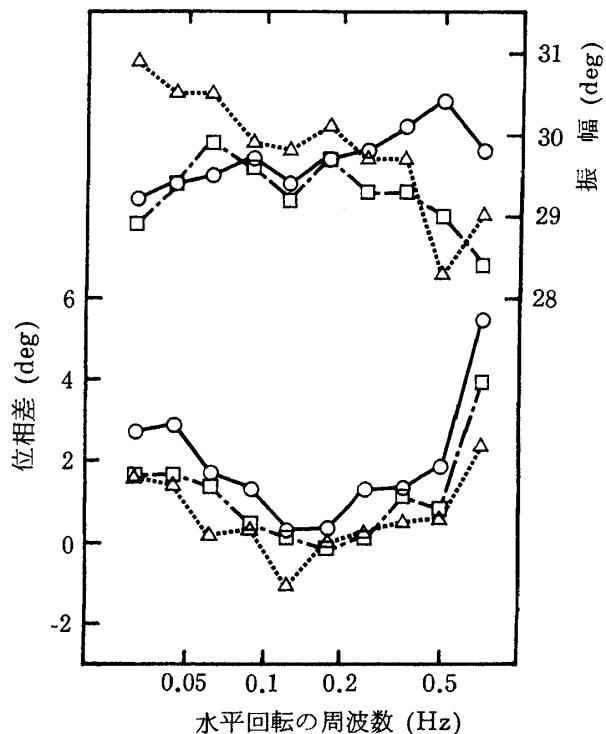


図2 身体の回転と一致していると見える視界の回転

視界画像 : ○—○ スポット
 △·····△ 太いストライプ
 □—□ 細いストライプ

従い振幅は大きくなり、0.5Hz前後で身体の回転振幅と一致した。それに対し、画像に太いストライプを用いた場合には、周波数の低い領域で視界の回転振幅は大きくなり、周波数が高くなる程小さな振幅を示した。身体の回転振幅と等しくなるのは0.1～0.2Hzあたりであった。両者の周波数特性に見られたこの傾向の差異は、分散分析の結果、統計的に有意なものであった。^{††} 画像に細いストライプを用いた場合には、太いストライプの場合と同様に周波数が高くなるに従って振幅が小さくなる傾向を示したが、低周波数領域においては逆に小さな振幅を示した。

位相差の周波数特性 3種の視界画像のいずれの場合も、視界の回転は身体の回転に対し、全般的に正の位相差、即ち位相進みを示した。0.1～0.2Hz付近で視界の回転は身体の回転にはほぼ同調したが、その周波数領域から離れるに従って位相進みは大きくなかった。この周波数特性の定性的傾向は3種の画像いずれの間にも統計的有意差は見られなかった。^{†††}しかし、位相差の大きさには3種の画像の間で統計的に有意な差があり、^{††††} スpotの場合に最も大きく、細いストライプの場合がそれに次ぎ、太いストライプの場合に最も小さな位相進みを示した。

2-3 実験Ⅱ -回転体から見た静止外部視界の動き感覚-

身体が回転している時、静止している外界がどの

[†] 本来、「出力と入力との比を表わす量を周波数の関数と見たときの特性」(岩波理化学辞典)の意であるが、ここでは視界の回転を周波数の関数として表わしたときの振幅および位相差(身体の回転との位相差)が示す特性の意に用いる。以降、視界の感覚上の動き及び見かけの動きについても同様の意に用いる。

^{††} 「繰返しのある二元配置分散分析法」(石居進:生物統計学入門, 培風館)による交互作用の有意性の検定を行った。

$$F(9, 940) = 9.28 \quad (p < 0.001)$$

尚、本研究での有意性の検定には全て「繰返しのある二元配置分散分析法」を用いており、要因「周期」には無作為型、要因「画像」には固定型を適用している。

^{†††} スpotと太いストライプ : $F(9, 940) = 1.80 \quad (p > 0.05)$

スspotと細いストライプ : $F(9, 940) = 0.48 \quad (p > 0.25)$

太いストライプと細いストライプ : $F(9, 940) = 0.94 \quad (p > 0.25)$

^{††††} スspotと太いストライプ : $F(1, 9) = 34.50 \quad (p < 0.001)$

スspotと細いストライプ : $F(1, 9) = 29.65 \quad (p < 0.001)$

太いストライプと細いストライプ : $F(1, 9) = 7.06 \quad (p < 0.05)$

ように動いていると感じられるかを検討するために以下の実験を行った。本実験では実験Ⅰと同様の手法を用いて、静止していると知覚される視界の振幅および位相差を被験者調整法により測定した。また、周辺視の影響を調べた。

2-3-1 実験手順[†]

被験者に「静止していると見えるように画像の回転の振幅と位相を調整せよ」と指示を与え、実験Ⅰと同様の手順で行った。

身体および視界の回転周期は実験Ⅰと同じ 10 段階を設定し、視界の画像は実験Ⅰと同じ 3 種類を用いた。

被験者には、22~24 才の内耳既応症のない健康な青年男子 3 名を選んだ。

各被験者の実験の構成は、周期(10 段階)と画像(3 種類)の組合せ 30 ブロックから成り、各ブロック 16 試行ずつ計 480 試行(全被験者で 1440 試行)とした。1 回の実験では同一画像の 4 ブロックをランダムな順序に配置して各々 8 試行ずつ計 32 試行を行い、15 回の実験で全試行を終えた。1 試行に要した時間は約 40~120 秒であり、1 回の実験の所要時間は約 1 時間であった。尚、実験中に被験者が動搖不快感を訴えることはなかった。

2-3-2 結果

身体を振子様回転させた時、あたかも静止しているように見える視界の回転の振幅および位相差の周波数特性を図 3 に示す。グラフ上に示された振幅 a および位相差 ϕ は、各試行での測定値(a_i, ϕ_i)の $a - \phi$ 極座標上での幾何的な平均値

$$a \exp(j\phi) = \frac{1}{N} \sum_i^N a_i \exp(j\phi_i)$$

$$(j^2 = -1)$$

より求めたものである。

振幅の周波数特性 視界画像にスポットを用い場合には、0.05 Hz 以下の低い周波数の回転で 2

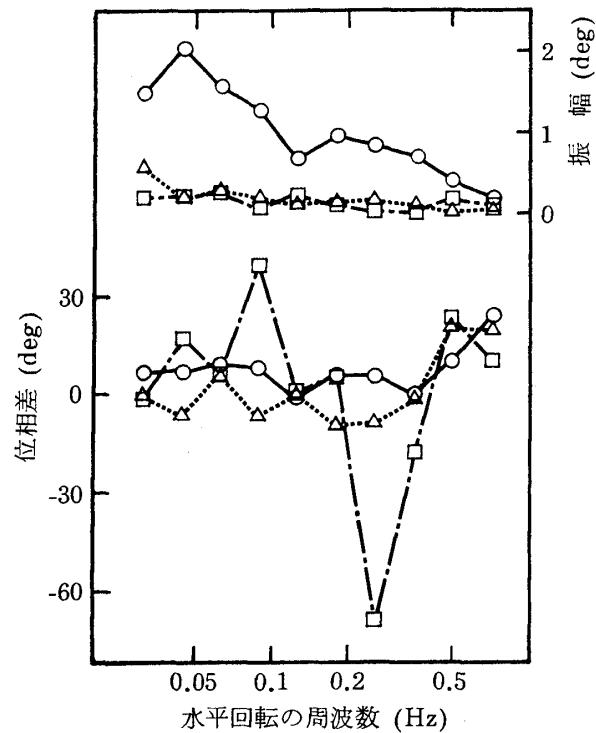


図 3 身体回転時に静止していると見える視界の回転

視界画像 : ○—○ スポット
△···△ 太いストライプ
□—□ 細いストライプ

度程度の振幅を示し周波数が高くなるに従って振幅は小さくなり、0 度、即ち静止に近づいた。太いストライプ或いは細いストライプを用いた場合には、同様に周波数が高い程振幅が小さくなる傾向は見られたが、その振幅は全般に 0.3 度程度以下でスポットの場合と比較すると一貫して小さく、極立った相異を示した。

位相差の周波数特性 スポットの場合には全般にやや位相進みを示したが、太いストライプおよび細いストライプの場合にはその傾向は見られなかった。いずれの場合にも回転周波数による位相差の違いは見られず、身体の回転とほぼ同相であった。

† 実験Ⅱ

測定対象：身体の回転時に感覚的に静止して見える視界の回転<振幅、位相差>

パラメータ 周期：1.4・2.0・2.8・4.0・5.6・8.0・11.2・16.0・22.4・32.0 秒 (10 段階)

画像：スポット、太いストライプ、細いストライプ (3 種類)

被験者：3 人

試行数：16 試行 × 10 段階 (周期) × 3 種類 (画像) × 3 人 (被験者) = 1,440 試行

2-4 実験Ⅲ - 視界の回転知覚に要する振幅の閾値 -

身体を回転した時に生じる感覚上での視界の回転を調べるために実験Ⅰ, Ⅱを行なったが、本実験ではその動きが実際どの程度知覚され得るかを検討するために、知覚可能な最小の視界の回転振幅(閾値)を測定した。実験は、被験者を静止させ、視界画像を振子様回転させて、回転が知覚されなくなるまで振幅を減少させていく方法、即ち逆行を許す下降系列の被験者調整法により行った。また、回転の知覚に与える周辺視の影響を調べた。

2-4-1 実験手順[†]

暗室内で被験者を振子様回転椅子に座らせ、頭をヘッドレストに密着させて動かさないように指示し、意識的な首振りを禁じた。また、ゴーグルを用いて視野を視界40度に制限し、回転画像以外は視野に入らないようにした。

被験者の身体を静止させ、視界の回転のみを与えて、「視界の動きが知覚出来なくなるまで回転振幅を小さくせよ」と指示し、ポテンショメータを用いて調整させた。初期振幅は初期値効果を生じないように画像の動きが充分に知覚される範囲で実験者が任意に設定し、被験者が振幅を逐々に小さくしていく下降系列で実験を行ったが、その調整過程での逆行は許した。その他の手順は実験Ⅰと同様である。

視界の回転周期は実験Ⅰと同じ10段階を設定し、視界画像は実験Ⅰと同じ3種類を用いた。

被験者には、22および23才の内耳既応症のない健康な青年男子2名(1名は他の1人の半数の試行数)を選んだ。

実験の構成は、周期(10段階)と画像(3種類)の組合せ30ブロックから成り、両被験者を合わせ

て各ブロック24試行ずつ計720試行とした。1回の実験では同一画像の5ブロックをランダムな順序に配置して各々8試行ずつ計40試行を行った。1試行に要した時間は約20~60秒であり、1回の実験の所要時間は約1時間であった。

2-4-2 結果

視界の動きを知覚出来なくなる回転振幅、即ち視界の動きの知覚に要する振幅の閾値の周波数特性を図4に示す。周波数の低い領域では振幅の閾値は大きく、周波数が高くなるに従って減少した。この傾向には画像による有意な差はない^{††}、また全般的な閾値の大きさも3種類の画像間に統計的有意差は見られなかった^{†††}。即ち、視界の回転知覚の振幅の閾値に、

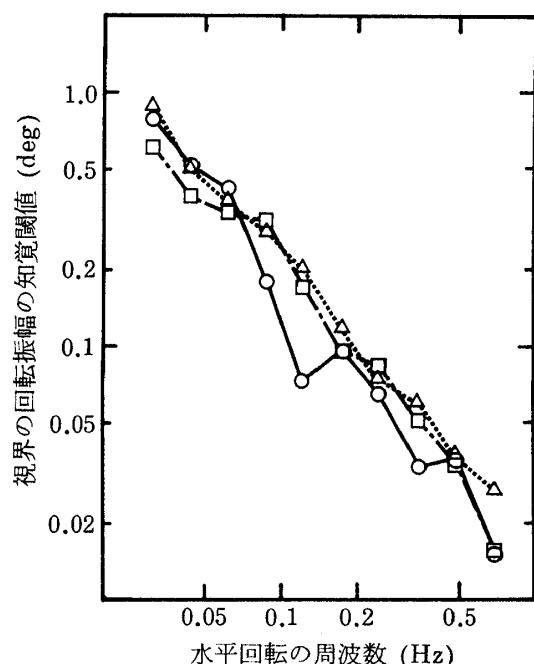


図4 視界の動きの知覚に要する回転振幅の閾値

視界画像 : ○—○ スポット
△·····△ 太いストライプ
□—□ 細いストライプ

† 実験Ⅲ

測定対象：身体の静止時に知覚し得る最小の視界の回転<振幅>(閾値)

パラメータ 周期: 1.4・2.0・2.8・4.0・5.6・8.0・11.2・16.0・22.4・32.0秒(10段階)

画像: スポット, 太いストライプ, 細いストライプ

被験者: 2人(1人は他の1人の半数の試行)

試行数: 16試行 × 10段階(周期) × 3種類(画像) × 1人(被験者) } 720試行
8試行 × 10段階(周期) × 3種類(画像) × 1人(被験者)

†† F (18, 690) = 1.36 (p > 0.25)

††† F (2, 18) = 2.01 (p > 0.25)

画像による相違は認められなかった。

図 4 に示されるように、振幅の閾値 a_{Thr} を回転周波数 f に対して両対数グラフ上にプロットすると、 f の上昇によって a_{Thr} は直線的に下降した。最小二乗法による回帰直線の推定を行うと、その傾きは -1.1 となり、 -1 に近く、ほぼ振幅の閾値と周波数の積 $a_{Thr} \cdot f$ が一定、即ち回転速度 v の振幅が一定となる結果となった。換言すれば、視界の動き知覚の閾値は回転速度の最大値で与えられた。そこで、図 4 のプロットを傾き -1 の直線に回帰させると、その推定された直線は

$$\log a_{Thr} = -\log f + \log 0.019$$

となり、視界の回転知覚に要する速度の閾値 v_{Thr} は

$$v_{Thr} = 2\pi a_{Thr} f = 0.12 \text{ deg/sec}$$

となった。

第 3 章 考 察

3-1 視界の感覚上の動きと見かけの動き

回転体内部視界の感覚上の動き 実験 I では、身体の回転と一致して動くように見える視界の実際の動きを測定した。位相差の周波数特性については、 $0.1 \sim 0.2 \text{ Hz}$ 付近で位相進みが最も小さく、それ以上および以下の周波数領域では大きくなる傾向が見られた。Fernandez と Goldberg²¹⁾ は覚醒しているサルに $0.006 \sim 8.0 \text{ Hz}$ の振子様水平回転刺激を与え、前庭一次求心性線維の活動（三半規管からの回転情報）を記録した。その周波数特性は、 $0.25 \sim 0.5 \text{ Hz}$ で位相進みが最小となり、それより低い周波数領域および高い周波数領域では大きくなっていくという結果を得ている。この両者の類似性から考えると、実験 I の位相差の特性は、回転刺激に対する前庭感覚の位相進みが反映した結果であると思われる。

また、実験 I の結果から、身体と一致して回転する視界、即ち回転体内部の視界の感覚上の動きが図 5 の特性を示すと推察される。ただし、図 5 は、振幅 30 度、位相差 0 度を対称軸として図 2 の各点を折り返してプロットしたものであり、感覚的に身体と一致して回転するように見える画像の物理的動き（測定値；図 2）と感覚上の動き（身体の回転に等しい；振幅 30 度、位相 0 度）の差を、実際に身体

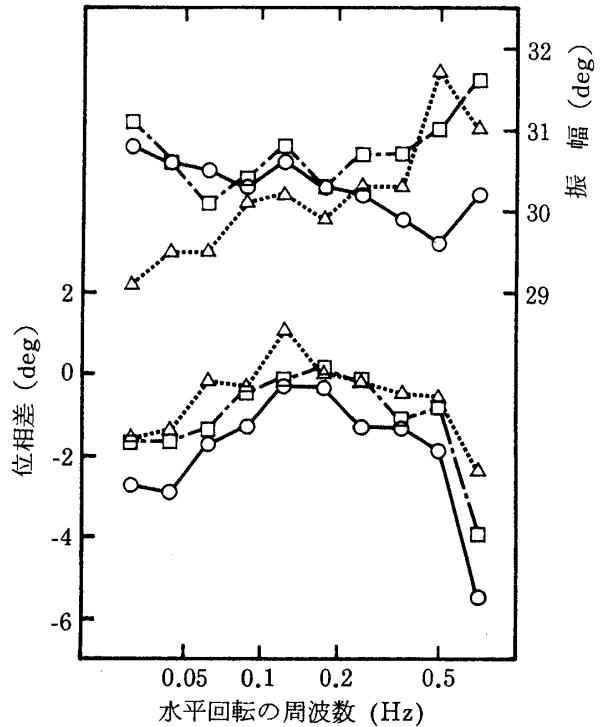


図 5 身体と一致して回転する視界（回転体内部視界）の感覚上の動き

視界画像： ○—○ スポット
△·····△ 太いストライプ
□—□ 細いストライプ

と一致して回転する視界（内部視界）の感覚上の動き（推定値；図 5）と物理的動き（振幅 30 度、位相 0 度）の差に等しいと仮定したものである。この仮定は感覚量を微小範囲で線形近似することと等価である。

回転体内部視界の動きは必ずしも身体の回転と一致しているように感じられておらず、その動きの感覚は図 5 に示されるような周波数特性を持っている。視界の動きは概ね身体の回転に比べて位相が遅れて感じられ、 $0.1 \sim 0.2 \text{ Hz}$ から離れた周波数領域程その位相遅れは大きくなる。また振幅については、画像がスポットの場合には低い周波数領域で、ストライプの場合には高い周波数領域で、身体の回転に比べて視界の回転振幅が大きくなるように感じられているのが見られる。

回転体内部視界の見かけの動き 回転体の内部視界が身体の回転に対して相対的にどの様な動きをしているように見えるか、即ち見かけ上、内部視界が被験者の眼前でどのように動いて見えるかを検討

する。視界と身体の相対的な回転の振幅および位相差は、図5に示す視界の感覚上の動き（振幅 a 、位相差 ϕ ）と身体の回転（振幅30度、位相0度）との $a - \phi$ 極座標上での差 $a \exp i\phi - 30$ によって与えられ、その周波数特性は図6のようになる。また、この見かけの動きがどの程度知覚されるかを検討するために、図中の振幅の特性に実験Ⅲで得られた視界の動きを知覚するために要する回転振幅の閾値を重ね合わせる。ただし、この閾値は身体静止時における視界の回転知覚の閾値であり、身体回転時にそのまま適用出来るかは明らかではないが、検討のための目安にはなり得るであろう。

内部視界の見かけの動きは0.2Hz付近で最も小さく振幅0.4度以下になるが、0.2Hz以上および以下の周波数領域では0.2Hzから離れるに従って増大している。しかし、0.2Hz以下の周波数領域では、見かけの動きの振幅は身体静止時の閾値の2倍程度であり、その動きはわずかに知覚されるに留まるものと思われる。一方、0.2Hz以上の周波数

領域では、見かけの動きの振幅は閾値を大きく上回り、0.7Hz付近では1.6～2.8度に達しており、充分に知覚されるものと考えられる。

動搖病に関する経験的事実として、移動する交通機関の内部を視界とする時に不快になり易いことはよく知られているところである。さらに、船舶・航空機等の動搖周期が5～6秒程度の時に最も不快感を催し易いことが知られている^{22),23)}。この周期は、上記の視界の見かけの動きの振幅が最小の周期、或いは前記の視界の感覚上の回転の位相遅れが最小となって身体の回転とほぼ同調する周期と大旨一致している。即ち、身体と内部視界の回転が感覚上でよく一致する周期で不快になり易いことを示唆している。動搖病と見かけの動き、或いは感覚上の動きとの間に何らかの相関関係を予想させるが、これについては今後の研究に待たねばならない。

さて、見かけの動きの位相差に見られる0.2Hz以下の大きな変動は、振幅が閾値と近いために動きの知覚が困難なことから生じたものと思われる。0.2Hz以上の領域では、画像がスポットの場合には見かけの動きは70～110度程度の位相遅れを生じており、身体の回転の速度方向とほぼ逆方向に回転していることになる。一方、画像にストライプを用いた場合には、50度以下の位相遅れとなっている。

回転体から見た静止外部視界の感覚上の動き

実験Ⅱの結果から、身体回転時に回転体外部の静止視界がどのように回転して感じられるかが、図7の特性を示すと推察される。ここで、図7は、感覚上で静止していると見える画像の動きの逆をそのまま静止視界の感覚上での動きに等しいと仮定し、図3の位相差を180度進めたものである。また、その感覚上の動きが知覚され得るかどうかを検討するために、図中の振幅の特性に実験Ⅲで得られた視界の回転知覚の振幅の閾値を重ね合わせる。ここでもこの閾値は前述のように検討のための目安と考えるべきである。

画像にスポットを用いた場合、静止外界の感覚上の動きは、周波数が低くなるに従って振幅が増大し、0.05Hz付近で約2度に達している。この感覚上の動きの振幅は、測定した周波数領域ですべて回転知

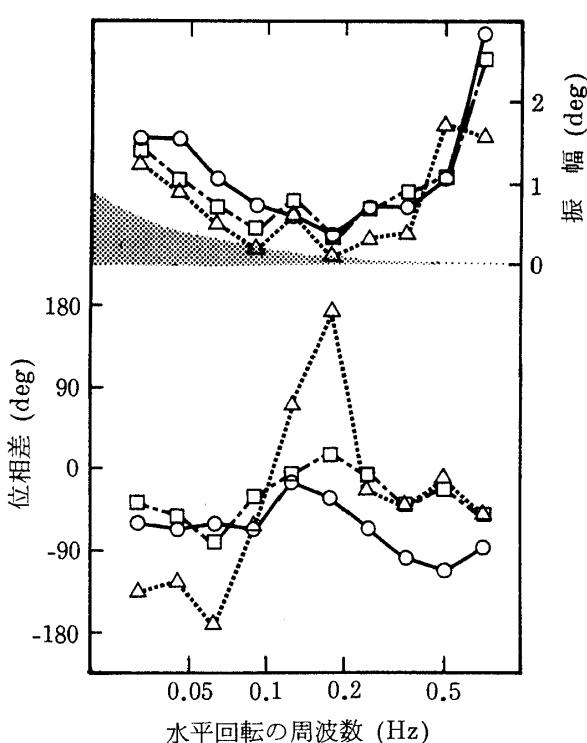


図6 身体と一致して回転する視界（回転体内部視界）の見かけの動き

視界画像 : ○—○ スポット
 △···△ 太いストライプ
 □—□ 細いストライプ
 ■■■■■ : 視界の動きを知覚出来ない振幅の領域

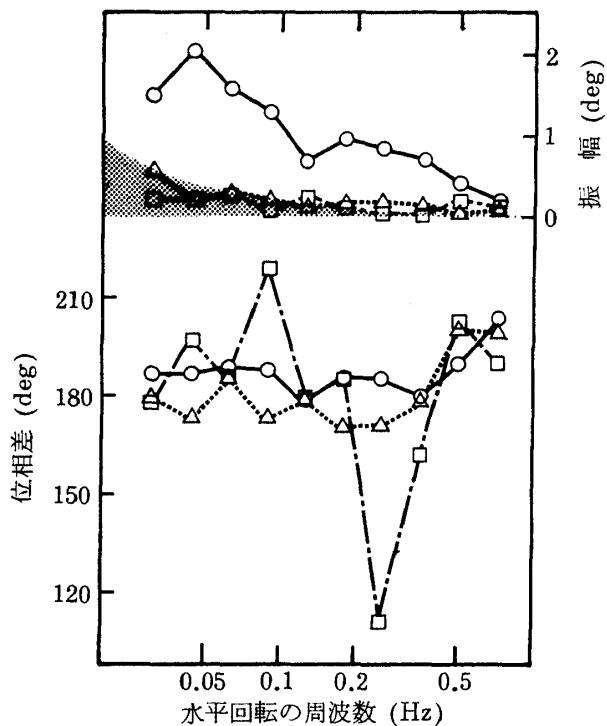


図 7 身体回転時における静止視界(静止外部視界)の感覚上の動き

視界画像 : ○—○ スポット
 △···△ 太いストライプ
 □—□ 細いストライプ
 ■■■■■ : 視界の動きを知覚出来ない振幅の領域

覚の閾値を大きく上回っており、充分に知覚されるものと思われる。また、位相差は 180 度よりもやや大きく、身体の回転と逆方向に多少の位相進みを持って動搖しているように見えるものと考えられる。

一方、ストライプを用いた場合には、スポットの場合と同様に、周波数が低くなるに従って静止外界の感覚上の動きは振幅を増大するが、その振幅値は測定した周波数領域を通じて視界の回転知覚の閾値程度、或いはそれ以下であり、静止外界が動搖しているように見えることはほとんどないと思われる。また、位相差に大きな変動が見られるが、これは視界の動きがほとんど知覚されないために生じたのであろう。

3-2 周辺視の効果

前章および前節で述べたように、画像にスポットを用いた場合とストライプを用いた場合とでは、視界の感覚上および見かけの動きに質的・量的な差違が見られた。回転体内部の視界の感覚上の動きに関しては、スポットの場合には周波数の上昇に伴って振幅が減少するのに対し、ストライプでは増大した。また、位相遅れはスポットの場合の方が有意に大きかった。見かけの動きにおいてもスポットの場合に大きな位相遅れを示した。さらに、静止外界の感覚上の動きでは、その振幅の大きさに顕著な差が見られ、スポットでは動き知覚の閾値を大きく上回ったが、ストライプの場合には閾値程度以下であった。

これらの画像による差異は周辺視の有無によるものと考えられる。スポットの場合には、被験者はそのスポットを注視し、画像を眼の中心窓[†]に落とすようにしておらず、中心視^{††}のみが許されていると言える。一方、ストライプの場合には、画像は 40 度の視野に広がっており、中心視および周辺視が行われる。

Guedry ら¹⁴⁾は、周辺視が前庭動眼反射に与える影響を調べ、前庭神経核内の神経活動の変化を考え合わせて、周辺視が身体の回転感覚に重要な役割を果していると論じている。我々が得た実験結果は、周辺視が視界の動きの知覚にも大きな影響を与えていることを示すものである。

実験ⅡおよびⅢから得られた図 7 の結果は、周辺視を行う場合には静止外界が動くようには見えないにもかかわらず、中心視のみの場合には静止外界が動搖するように知覚されることを示すものであった。通常我々が行う外界の把握には周辺視が関与しており、このことから考えて、日常の身体回転時に外界が静止して見えることには、経験的認識の関与に加えて周辺視が重要な役割を果しているものと思われる。

[†] [fovea centralis]。網膜の中央付近のくぼんだ所を指し半径が約 2.6 度の範囲をいう。視軸はこの点を通しておる。(池田光男: 視界の心理物理学, 森北出版)

^{††} [foveal vision]。眼の中心窓で物を見る。普通物を注視するときはみな中心視である。視力が最も良く、色の識別能もよい。錐体のみが働くから錐体視 [cone vision] ともいう。(南山堂医学大辞典) p. 2 の脚注「周辺視」参照。

3-3 視界移動の知覚モデルと前庭動眼反射

実験ⅠおよびⅡにおける視界移動の知覚モデルを図8(a)に示す。被験者は身体の回転 $[x]$ を刺激として与えられ、視界の回転 $[y]$ を調整する。ここで、 $[y]$ は $[x]$ に振幅比および位相差を与えたものであり、調整用ポテンショメータとミニコンピュータから構成される視界の回転の調整系 $[G]$ によって $y = Gx$ として与えられる。この $[y]$ と $[x]$ との差 $[y - x]$ が身体の回転に対する視界の相対的回転 $[e]$ となる。一方、身体の回転 $[x]$ は前庭系 $[V]$ に受容され、動眼系 $[O]$ に眼球運動 $[o]$ を起こさせる。ここで、 $[e]$ もまた前庭系 $[V]$ および動眼系 $[O]$ に入力され、 $[x]$ と競合する。 $[e]$ と $[o]$ との差 $[e - o]$ は網膜上に投影される視界の動き $[r]$ となる。

これら $[r]$ 、 $[o]$ および前庭系の出力 $[v]$ が高次の中枢神経系 $[C]$ で統合され、視界の感覚上の動き或いは見かけの動き $[p]$ が知覚されることになる。

さて、これまでこの $[p]$ に関して考察を加えてきたが、ここでは高次中枢における感覚統合機構に関する検討は避け、前庭動眼系に重点を置いてモデルの簡略化を試みる。先づ前庭系 $[V]$ と動眼系 $[O]$ を一つにまとめ、前庭動眼系 $[V_0]$ とする。前庭動眼系 $[V_0]$ は身体の回転 $[x]$ と視界の相対的回転 $[e]$ の2入力を受けるが、簡略化のために $[e]$ は $[x]$ と眼球運動 $[o]$ の入出力の特性に影響を与えるのみであると考え、 $[V_0]$ を可変とし、 $[e]$ が $[V_0]$ を変化させるものであるとする。すると、モデルは図8(b)に示すように簡略化される。Lauら²⁴⁾のモ

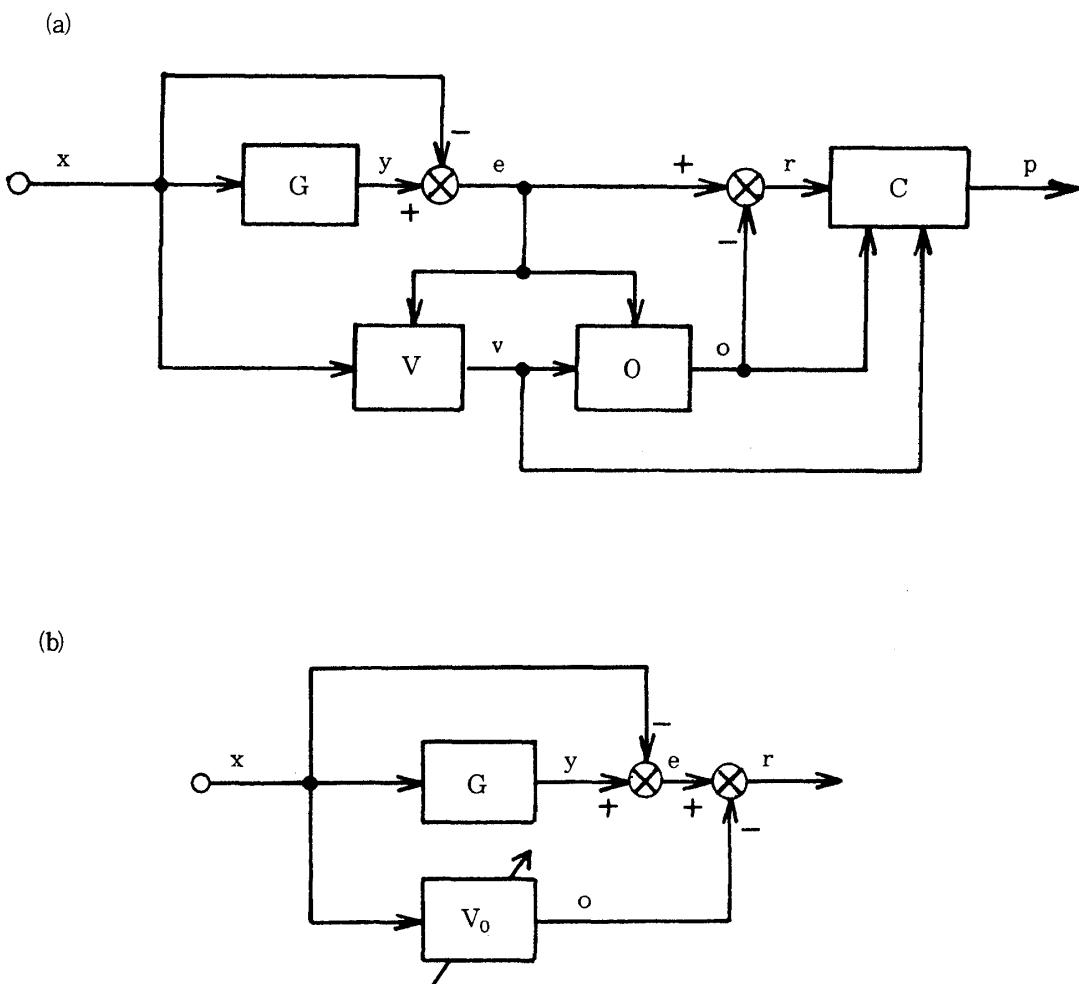


図8(a) 視界移動の知覚モデル (b) 簡略化したモデル

G: 視界の回転の調整系 V: 前庭系 O: 動眼系 C: 高次の中枢神経系
 V_0 : 前庭動眼系 x: 身体の回転 y: 視界の回転 e: 身体の回転に対する視界の相対的回転 o: 眼球運動 r: 網膜上に投影される視界の動き
v: 前庭系の出力 p: 視界の感覚上の動き或いは見かけの動き

ルは眼球の追跡運動と前庭動眼反射の線形和を視覚入力に負帰還することによって視覚-前庭系の相互作用を与えていているのに対し、我々のモデルは前庭動眼系の特性を実験的に与えようとするものである。すると、実験Ⅰのように視界の見かけの動きが小さい場合 ($e \approx 0$) には、前庭動眼反射は強く抑制されて¹⁶⁾ $V_o \approx 0$ となるであろう。また、実験Ⅱのように視界の動きが小さく、見かけの動きが身体の回転と等振幅、逆回転に近い場合 ($e \approx -x$) には、前庭動眼反射によって $V_o \approx -1$ ²⁵⁾ となるであろう。

今、網膜上に投影される視界の動き [r] は

$$\begin{aligned} r &= y - x - o \\ &= x(G - 1 - V_o) \end{aligned}$$

と表わされる。さて、実験Ⅰにおいては、視界の画像は眼前に静止しているように見えており、網膜上に投影される視界の動きはないもの ($r = 0$) と仮定する。また、実験Ⅱにおいては、眼球は画像を正しく追跡し、眼球振盪[†]を起こした場合でもその緩徐相では正しく追跡すると考えられるので、 $r = 0$ であると仮定する。すると、前式から

$$V_o = G - 1$$

となり、視界の回転の調整系 [G] の測定によって前庭動眼系 [V_o] の特性を求めることが出来る。

実験Ⅰの結果から、身体と一致して回転するよう見える視界を与えられた時の前庭動眼系の周波数特性が図9に示すように得られる。前庭動眼反射は強い抑制を受けて利得は非常に小さくなっているが、0.2 Hzあたりで特に強い抑制を示している。Barnesら¹⁴⁾は0.2～3.0 Hzの範囲で視覚による前庭動眼反射の抑制を調べるために、眼前に視標を見せた時と閉眼時の眼球運動の速さの比を求め、周波数が上がるに従って抑制が弱くなる結果を得ている。また、WaespeとHenn²⁶⁾はサルの前庭神経核で神経活動の記録を行い、回転角加速度が大きくなると視覚によ

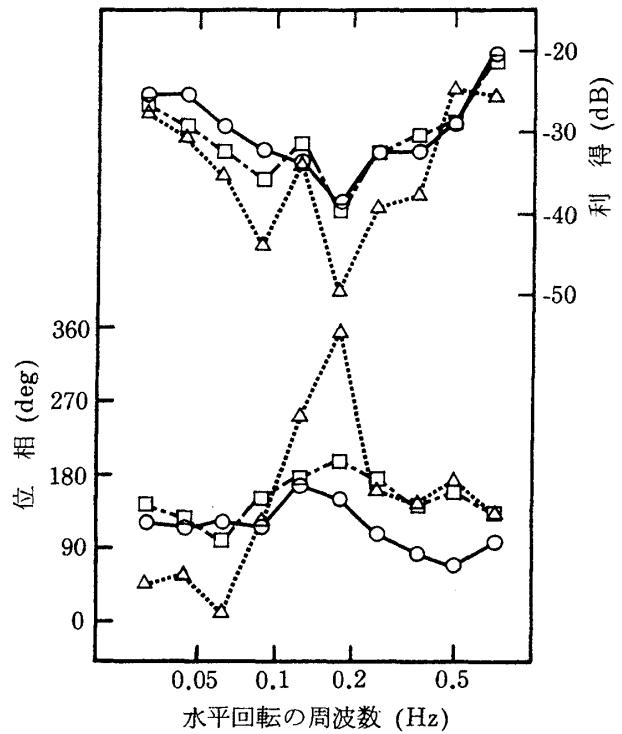


図9 身体の回転と一致していると見える視界を与えた時の前庭動眼系の特性
視界画像 : ○—○ スポット
△···△ 太いストライプ
□—□ 細いストライプ

る抑制が弱くなることを報告している。我々が得た0.2 Hz以上の領域での特性は前庭動眼反射の抑制が弱くなることを示しており、これらの結果と合致している。

また、実験Ⅱの結果から、静止しているように見える視界を与えられた時の前庭動眼系の周波数特性が図10のように得られる。スポット画像の場合、即ち周辺視野を与えたかった場合には、利得は低周波数領域で低く、0.05 Hz付近で-0.5～-0.6 dBであるが、周波数が高くなるに従って上がり0 dBに近づく。Keller²⁵⁾はサルの前庭動眼反射を0.5～6.0 Hzの水平回転を用いて調べ、暗視野下で利得

† [nystagmus]。眼球の律動的運動で、他覚的に容易に認められる程度のものを眼球振盪、または眼振と呼ぶ。健康者にも特殊の条件の下で現われ（生理的眼振）るが、眼球・神経・脳などに病変があれば病的眼振が現われる。生理的眼振としては、1) 終末位眼振、2) 視覚運動性眼振、3) 回転による眼振、4) 温度性眼振、5) 電流性眼振などがある。（南山堂医学大辞典）頭部を傾け水平半規管を水平にしておいて、垂直軸の回りに右に回転させると、眼球はまず左に向ってゆっくり回転する。あたかも視線を固定しておこうとするように動く。次いですばやく右に回転してもとにもどる。これを水平回転性眼振という。（真島英信：生理学、文光堂）

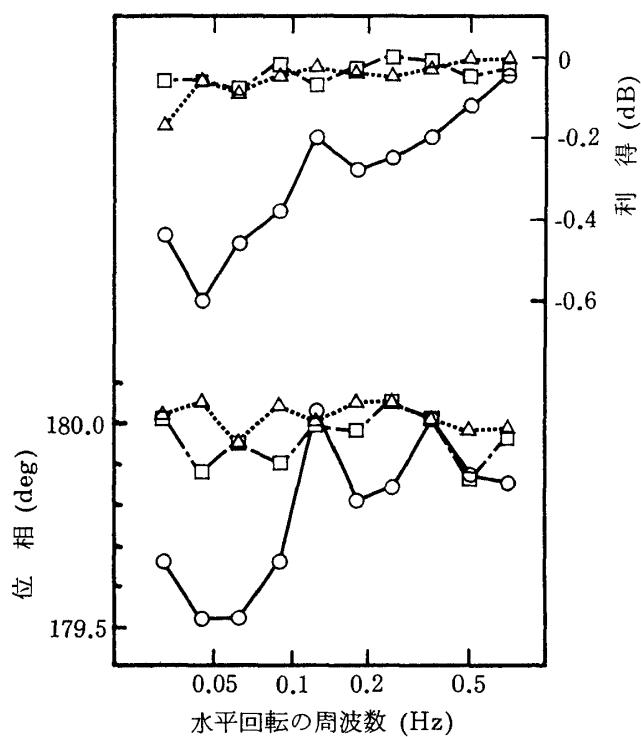


図 10 身体回転時に静止していると見える視界を与えた時の前庭動眼系の特性

視界画像 : ○—○ スポット
 △—△ 太いストライプ
 □—□ 細いストライプ

は周波数が高くなるに従って 4 Hz までは増大し、それ以上で急減少する結果を得た。また、Batini ら²⁷⁾はウサギを用いて実験し、0.03 ~ 0.5 Hz の範囲で周波数の上昇に伴って利得が上がることを報告している。動物の種によって前庭動眼反射の利得に大きな差があるため定量的な比較は困難であるが、我々の得た結果はこれらと同じ傾向を示すものである。また、ストライプ画像の場合、即ち周辺視野を与えた場合にも、利得に同様の傾向が見られるが、その値は全般に 0 dB に近く位相は 180 度前後であり、 $[V_0]$ はほぼ -1 となっている。これは明視野下での前庭動眼反射²⁵⁾と同様の結果を示すものである。

以上のように、身体と一致して回転していると見える視界を与えた場合（実験Ⅰ）には眼前に視標を与えた時の前庭動眼系の特性に、静止していると見える中心視野のみの視界を与えた場合（実験Ⅱ、スポット画像）には暗視野下の前庭動眼反射の特性に、また静止していると見える周辺視野を含む視界を与

えた場合（実験Ⅲ、ストライプ画像）には明視野下の前庭動眼反射の特性に、それぞれ類似した特性が得られた。そこで、実験的に得られたそれぞれの場合の特性を各々対応する前庭動眼系の特性に置き換えて考えると、回転体の内部視界の見かけの動きは前庭動眼反射の抑制の不完全さのために、また静止外部視界の感覚上の動きは前庭動眼反射の不充分さのために、網膜上への視界の投影像が移動する（ $r \neq 0$ ）ことによって生じるものと思われる。

第 4 章 むすび

航空機等の運動を模擬して身体を水平回転させた時に、視界移動がどのように知覚されるかを検討した。実験の結果、身体の回転と視界の回転（或いは静止）の物理的な相対関係は感覚上では保たれず、見かけの動きや感覚上の動きが生じることがわかった。身体と一致して回転する回転体内部視界は、周辺視の有無にかかわらず、0.2 Hz 以上の回転を与えると見かけの動きが知覚されるものと思われた。また、回転体外部の静止視界は、周辺視を行う場合は静止して見えるものの、周辺視野のない場合には感覚上の動きが知覚されると思われた。

さらに、モデルによる考察から前庭動眼系の特性を検討し、上記の見かけの動きおよび感覚上の動きは、前庭動眼反射の抑制の不完全さ或いは反射の不充分さのために網膜上への視界の投影像が移動することによって生じると考えられた。

本実験では、視界と身体の回転の相対的関係が感覚上ではどのようになるかを、視界と身体の等振幅同調回転および身体のみの回転の二つの場合について調べたが、振幅比および位相差をパラメータとしてこれを一般的に求め、この感覚上の関係が動搖病の発生に与える効果・影響を明らかにすることが今後の課題である。

本稿を終るにあたり、多岐に亘って本実験にご協力いただいた被験者の方々に深く感謝する。また、度重なる議論に計測部人間工学研究室長岡部正典氏ほかの参加を得たことを附記する。

参考文献

- 1) 幸尾治朗; 航空機の乗り心地について, 航技研報告 NAL TM-181 (1970).
- 2) 幸尾治朗; 航空機の乗り心地に関する研究, 航技研報告 NAL TR-645 (1980).
- 3) Reason, J.T. and J.J. Brand; Motion Sickness (1975), Academic Press, London.
- 4) Homick, J.L.; Space Motion Sickness, *Acta Astronautica*, Vol. 6 (1979), pp. 1259 ~ 1272.
- 5) Miller, E.F. II and A. Graybiel; Experiment M-131-Human Vestibular Function, *Aerospace Med.*, Vol. 44 (1973), pp. 593 ~ 601.
- 6) Graybiel, A. and J.R. Lackner; Rotation at 30 RPM About the Z Axis After 6 Hours in the 10° Head-Down Position: Effect on Susceptibility to Motion Sickness, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 50 (1979), pp. 390 ~ 392.
- 7) Graybiel, A., C.D. Wood, J. Knepton, J.P. Hoche and G.F. Perkins; Human Assay of Antimotion Sickness Drugs, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 46 (1975), pp. 1107 ~ 1118.
- 8) Graybiel, A. and J. Knepton; Bidirectional Overadaptation Achieved by Executing Leftward or Rightward Head Movements during Unidirectional Rotation, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 49 (1978), pp. 1 ~ 4.
- 9) Guedry, F.E. Jr. and A.J. Benson; Coriolis Cross-Coupling Effects: Disorienting and Nauseogenic or Not?, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 49 (1978), pp. 29 ~ 35.
- 10) Reason, J. and A. Graybiel; Factors Contributing to Motion Sickness Susceptibility; Adaptability and Receptivity, *AGARD Conf. Proc. No. 109* (1972).
- 11) Brandt, T.; Experimental Vertigo, Ataxia and Motion Sickness; Visual-Vestibular Interaction on Earth and in Space, *ESA SP-130* (1977), pp. 113 ~ 115.
- 12) Teixeira, R.A. and J.R. Lackner; Optokinetic Motion Sickness: Attenuation of Visually-Induced Apparent Self-Rotation by Passive Head Movements, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 50 (1979), pp. 264 ~ 266.
- 13) Dichgans, J.; Optically Induced Self-Motion Perception, *ESA SP-130* (1977), pp. 109 ~ 122.
- 14) Guedry, F.E. Jr., J.M. Lentz and R.M. Jell; Visual-Vestibular Interactions: I. Influence of Peripheral Vision on Suppression of the Vestibulo-Ocular Reflex and Visual Acuity, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 50 (1979), pp. 205 ~ 211.
- 15) Guedry, F.E. Jr., J.M. Lentz, R.M. Jell and J.W. Norman; Visual-Vestibular Interactions: The Directional Component of Visual Background Movement, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 52 (1981), pp. 304 ~ 309.
- 16) Barnes, G.R., A.J. Benson and A.R.J. Prior; Visual-Vestibular Interaction in the Control of Eye Movement, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 49 (1978), pp. 557 ~ 564.
- 17) Berthoz, A., B. Pavard and L.R. Young; Perception of Linear Horizontal Self-Motion Induced by Peripheral Vision (Linearvection). Basic Characteristics and Visual-Vestibular Interactions, *Exp. Brain Res.*, Vol. 23 (1975), pp. 471 ~ 489.
- 18) Berthoz, A., A. Buizza and R. Schmid; Visual-Vestibular Interaction During Linear Motion, *ESA SP-130* (1977), pp. 117 ~ 125.
- 19) Buizza, A., A. Legar, J. Droulez, A. Berthoz and R. Schmid; Influence of the Otolithic Stimulation by Horizontal Linear Acceleration on Optokinetic Nystagmus and Visual Motion Perception, *Exp. Brain Res.*, Vol. 39 (1980), pp. 165 ~ 176.

- 20) Lackner, J.R. and A. Graybiel; Variations in Gravitoinertial Force Level Affect the Gain of the Vestibulo-Ocular Reflex: Implications for the Etiology of Space Motion Sickness, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 52 (1981), pp. 154 ~ 158.
- 21) Fernandez, C. and J.M. Goldberg; Physiology of Peripheral Neurons Innervating Semicircular Canals of the Squirrel Monkey. II. Response to Sinusoidal Stimulation and Dynamics of Peripheral Vestibular System, *J. Neurophysiol.*, Vol. 34 (1971), pp. 661 ~ 675.
- 22) Shaw, C.C.; On the Dynamics of Motion Sickness in a Seaway, *The Scientific Monthly*, Vol. 78 (1954), pp. 110 ~ 116.
- 23) 幸尾治朗, 斎藤秀夫, 矢沢健司, 塚野雄吉, 小野孝次; 航空機の動搖乗り心地に関する一実験, *航技研報告 NAL TR-486* (1977).
- 24) Lau, C.G.Y., V. Honrubia, H.A. Jenkins, R.W. Baloh and R.D. Yee; Linear Model for Visual-Vestibular Interaction, *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 49 (1978), pp. 880 ~ 885.
- 25) Keller, E.L.; Gain of the Vestibulo-Ocular Reflex in Monkey at High Rotational Frequencies, *Vision Res.*, Vol. 18 (1978), pp. 311 ~ 315.
- 26) Waespe, W. and V. Henn; Conflicting Visual-Vestibular Stimulation and Vestibular Nucleus Activity in Alert Monkeys, *Exp. Brain Res.*, Vol. 33 (1978), pp. 203 ~ 211.
- 27) Batini, C., M. Ito, R.T. Kado, P.J. Jastreboff and Y. Miyashita; Interaction between the Horizontal Vestibulo-Ocular Reflex and Optokinetic Response in Rabbits, *Exp. Brain Res.*, Vol. 37 (1979), pp. 1 ~ 15.

航空宇宙技術研究所報告 787号

昭和 58 年 11 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880

電話 武藏野三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182

印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区信濃町 12 三河ビル

Printed in Japan