

ISSN 0389-4010

UDC 159.936

531.38

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1258

空間識失調の誘起要因となるコリオリ効果の力学的解析

鈴木孝雄・幸尾治朗・久米真樹

1994年10月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

空間識失調の誘起要因となるコリオリ効果の力学的解析*

鈴木孝雄*¹ 幸尾治朗*² 久米真樹*³

Dynamical Analysis of the Coriolis Effect Which Causes Space Disorientation*

Takao SUZUKI*¹, Jiro KOO*² and Masaki KUME*³

Abstract

The Coriolis effect or illusion is a sensation of angular motion in response to an inclination of the head when the head is undergoing a passive rotation. A dummy head including three gyros and three accelerometers was assembled, and was supported with a pivot and four springs to simulate human neck mechanism. The dummy head was tilted on a rotating table and the data obtained by the inertial sensors were analyzed to explain the cause of the Coriolis effect responsible for the illusion. In conclusion, the force acting on the dummy head is proportional to the angular velocity of the rotating table as well as to the linear velocity of the tilting motion. The force is found to be well described mainly by the principle of the Coriolis acceleration.

Key Words : Coriolis illusion, dummy head, inertial sensors

概要

空間識失調とは、空間における自身の位置、姿勢が解らない状態であり、多くのパイロットがこれを経験している。空間識失調を実験的に誘起させる手段の一つとして、コリオリ刺激(Coriolis Stimulation)がある。これは、身体を上下軸周りに回転させているときに、頭部を前後屈、又は側屈させることで、頭部に2軸の回転刺激を与え、被験者に方向感覚の混乱(コリオリ効果: Coriolis Effect)を与える方法である。

コリオリ効果に関する従来の研究手法は、被験者の主視的レイティング法によるものであり、その誘起要因が明らかではなかった。そこで本研究では、水平面で回転するテーブル上で前後屈運動する頭部模型を製作した。模型内部には3軸の直線加速度と角速度が計測できるよう、加速度計とジャイロを3個ずつ組込んだ。そして上記の2軸回転を与えたときに頭部模型に作用する力を計測した。その結果、頭部模型に作用する力は、テーブルの回転角速度と前後屈運動の線速度に比例することが解った。したがって、コリオリ効果の誘起要因の主たるものはコリオリの力であると結論できる。

1. まえがき

人類が地球上に現れて以来現在に至るまで、二百万年もの年月を経ている。この間、人類は長い年月をかけて、身体諸機能を進化させ生命を維持するのに都合が良くなるように適応してきた。その結果、我々の身体諸機能は、

地球上の引力場で、自らが能動的に動いた場合、その状況を把握するのに最も適した感覚機能を身につけるに至った。一方、この人類の進化に比べて科学技術の進歩、発展のスピードがいかに加速度的なものであるかは、人類が初めて三次元運動を体験できるようになったライト兄弟の飛行機の完成から、スペースシャトルが開発され、

* 平成6年10月24日受付(received 24 October 1994)

* 1 制御部(Control Systems Division)

* 2 東海大学(Tokai University)

* 3 向の岡工業高等学校(Mukaino-oka Technical High School)

地球-惑星間の往復が可能になるまでに、わずか100年足らずしか経過していないことから理解できる。

加速度的な科学技術の進歩により多くの人々は、飛行機に代表される受動的物体により、十数時間で世界各地へ行くことが可能となった。しかし、人類の進化と科学技術の進歩のスピードから考えると、このような受動的な移動は、我々の適応限度を超えて身体に様々な悪影響を及ぼしている。それは、人的過誤(Human error)に起因する自動車事故、航空機事故の増大、あるいは輸送物体に乗り受動的に動かされることにより起こる、乗物酔い(動揺不快感)などから簡単に想像できる。

航空関係者におけるその最も重大な影響として、パイロットの「空間感覚の錯誤」が挙げられる。空間感覚の錯誤は航空医学では、空間識失調(Spatial Disorientation)と呼ばれている。空間識失調とは、空間における自身の位置、姿勢がわからない状態である。現在、航空機事故の70パーセントはパイロットを含む航空関係者のHuman Errorにより発生しており、そのうちの14パーセントが、空間識失調に関連するものであることが知られている。また、小型機のパイロットは100パーセント軽度あるいは重度の空間識失調を体験していたことが報告されている⁽¹⁾。

空間識失調を実験的に誘起させる手段の一つとして、コリオリ刺激(Coriolis Stimulation)が用いられる⁽²⁾。これは、身体の上軸周りの回転(水平回転)を与えている最中に、頭部を前、後屈あるいは側屈させることで、身体に対して直交2軸の回転刺激を与えることを言う。なお、航空医学の分野で、コリオリ刺激と言う用語は、見かけの力として知られているコリオリ力を発生する運動とは異なる意味で使われている。コリオリ刺激は、被験者に方向感覚の混乱を与え、空間識失調を誘起することができる。これをコリオリ効果(Coriolis Effect)という。空間識失調は、動揺病(Motion Sickness)の一つのカテゴリーとして考えられており⁽³⁾、動揺病は感覚矛盾説(Sensory Conflict Theory)や、これを拡張した神経不一致説(Neural Mismatch Hypothesis)により誘起されることは実験的に証明されている⁽⁴⁾。また、コリオリ効果は力学的な作用による感覚矛盾や、神経不一致で起こる。しかし、その作用要因については、諸説がありはっきりしていない。

従来のコリオリ効果に関する研究には、被験者にコリオリ刺激を負荷したときの被験者の主観的な報告にもとづく指数を、空間識失調の評価の対象とする、主観的レイティング法が用いられていた。動揺病の程度を被験者の主観的評価から、相対的な値として表わすために、1970年、Reason and Brand⁽⁵⁾らは、0~10の11段階の不快感指数(Well-being Scale Number)で表わしている。また、

1977年、幸尾⁽⁴⁾らは一対比較法(Paired Comparisons Method)を用いて、動揺周期と乗り心地の関係の尺度化を試み、1982年Bock and Oman⁽⁶⁾らは、マグニチュード評価法(Magnitude Estimation)を用いて、被験者の主観的な感覚を直接、尺度化することを試みた。しかし、これらの主観的レイティング法では、被験者の定性的な感覚を評価の対象としており、定量的にこの問題を扱うことは困難であった。

一方、機械力学的な観点からの研究として、井須⁽⁷⁾、服部⁽⁸⁾、米田⁽⁹⁾らは、被験者を用いたコリオリ刺激の実験を行い、コリオリ効果は、ジャイロスコピックトルク的作用によって誘起されると報告している。しかし、これらの研究はいずれも主観的レイティング法を用いて行われているので、被験者に作用するジャイロスコピックトルクの大きさがどの程度であるか、定量的な評価が行われていない。定量的な結果を得るためには、コリオリ刺激を負荷したときのコリオリ効果の大きさを、人体頭部に作用する物理的な量として計測することが必要であり、これを力学的に考察することは大変重要なテーマである。

本研究では、コリオリ刺激を負荷したときに作用する力を、定量的に扱い、コリオリ効果がどのような力学的作用により誘起されるかを調べることで、空間識失調の誘起要因を究明することを目的としている。この手法として、人体頭部を質量-バネ系の力学モデルとして考え、人体頭部の模型を、前後、左右4箇所のバネで支持することで首の特性を模擬した。そして人体頭部模型内に3個のジャイロ(角速度センサ)及び3個の加速度計(直線加速度センサ)から構成される慣性計測装置(Inertial Measuring Unit)を組み込み、コリオリ刺激を負荷したとき頭部模型に作用する力を計測した。コリオリ刺激という2軸回転では、水平回転角速度の変化によるトルク、ジャイロスコピックトルク、コリオリの力/トルク等が発生する。この実験結果より、従来コリオリ効果の要因として考えられてきた諸説や、本研究において考えた説を比較検討して、誘起要因を明らかにした。すなわち、航空機の飛行等によりコリオリ刺激を発生する運動では、水平回転角速度の変化、ジャイロスコピックトルクなどよりもコリオリ力が優勢であることを明らかにした。

2. 空間識失調

空間識失調をテーマとした研究は、第2次世界対戦後から現在にいたるまで活発に行われている。一般に空間識失調(Spatial Disorientation)は、Vertigoあるいは、Pilot Vertigoと同じ意味として取り扱われている。

航空事故の人的要因のうち、飛行中の空間識失調に関わったものが少なくないことは種々の統計からも明らか

で、Talbat⁽¹⁰⁾は、致死にいたるような大事故(1955~1956年、米空軍)の14%が空間識失調に起因していると指摘した。

Nuttaal⁽¹¹⁾は、685名の操縦者に面接した結果、全員が軽度以上の空間識失調を経験し、このうち20名は事故寸前の状態であったと報告している。

加藤⁽¹²⁾らによると、航空自衛隊の操縦者120名の内、空間識失調の体験をしたものは38%である。また空間識失調の体験時の自覚症状として、右あるいは左傾感、飛行機の姿勢に対する不信感、はきけ、又は嘔吐、冷感又は熱感などがあると報告している。

2.1 空間識失調の誘起に関する仮説

空間識失調は動揺病(Motion Sickness)の1つのカテゴリーとして考えられているので、ここでは、動揺病の誘起に関する説について述べる。

動揺病の誘起に関して、医学的・工学的な見地から定性的に検討されるようになったのは19世紀以降からである。

2.2 医学的な見地からの検討

19世紀に入り、動揺病の主たる原因は、その乗り物の動揺にあることが定説となったが、動揺が身体にどのように作用しているのか、また、身体の中のどの部分が影響を受けるのかは、この時代には解明されていなかった。

1881年、Irwinは、動揺感覚の受容器は前庭器官であり、動揺病の誘起に前庭器官(耳石器、三半規管)が関与しているという“前庭”説(Vestibular Theory)を提唱した。さらに1882年、William Jamesは内耳障害をもつ者を対象に動揺病に関する実験を行い、前庭器官に障害があると動揺病は誘起されないことから、“前庭”説を実証した。

第2次世界対戦以降“前庭過剰刺激”説(Vestibular Overstimulation Theory)が提唱された。この説は、前庭器官とりわけ耳石器(直線加速度感知器)に過大な刺激が作用するために、動揺病が誘起されるという考え方である。つまり、乗り物の動揺における垂直運動が原因となって、耳石器から神経を通じて運ばれる情報が通常の状態では起こらないほど多量に流れ込むことにより、脳に混乱が生じるとされた。

しかし、動揺病を激しく誘発する直交2軸の回転刺激であるコリオリ刺激や、自動車の運転席から撮った画像を見ている場合のように、視覚刺激は入力されるが、耳石や三半規管に全く刺激が加わらなくても起こる、シミュレータ病(Simulator Sickness)を説明することはできない。これは、実際には動揺病を起こす可能性のある刺激に長い間さらされた直後にも起こる。つまり実際には

全く動揺がない状態、前庭器官が全く動揺をうけない状態でも動揺病にかかることを示している。これらの事象は、“前庭過剰刺激”説では説明できないことである。

そこで、“感覚矛盾”説(Sensory Conflict Theory)が提唱されるようになった。これは、人間の空間識を構成する視覚、前庭器官、体性等の複数の感覚の間に何らかの矛盾が生じると、身体的位置、運動に関する情報に混乱をきたし、その結果、動揺病が誘起されるという考え方である。

この説をさらに拡張したのが“神経不一致”説(Neural Mismatch Hypothesis)である。これは、過去の経験によって記憶された感覚情報の組み合わせと、実際の感覚情報が比較され、記憶によって予期されるものと異なる組み合わせの感覚情報が入力されると、動揺病が誘起されるという考え方である。

2.3 工学的、機械力学的見地からの検討

コリオリ効果の要因として従来、二つの説が考えられていた。第一説は“水平回転角速度の変化”説である。これは、上下軸周りに一定角速度で回転している最中に、頭部を前、後屈させると上下軸周りの角速度成分が減少し、外側半規管から反対方向に回ったという信号が出力されることにより、コリオリ効果が起こるとい説である。1970年G.Melville, Jones⁽¹²⁾は、簡単な水平回転を検知する外側半規管のモデルを用い、頭部中心を通る軸周りに一定角速度で回転させると、スタートから約2分で回転の感覚がなくなり、その状態で突然、頭部を垂直軸周りに90°傾けると、外側半規管に反対方向に回転している感覚が生じる。これが、実際の人間の場合、ベクトルの合成成分が感覚として現れると報告している。この報告は、“水平回転角速度の変化”説を実証した。

第二説は、“ジャイロスコーピックトルク”説である。これは、コリオリ刺激を負荷することにより、頭部と前庭器官にジャイロスコーピックトルクが作用し、感覚矛盾が起こるとい説である。井須⁽⁷⁾、服部⁽⁸⁾は、動揺病の発生原因の1つである、コリオリ刺激を負荷することにより起こるコリオリ効果に着目し、被験者にコリオリ刺激を1回加えることによる一過性の実験を行い、コリオリ効果は、ジャイロスコーピックトルクの作用によって誘起され、その大きさはジャイロスコーピックトルクの大きさに比例すると報告した。また井須⁽⁷⁾、米田⁽⁹⁾は、実際の輸送物体に近い刺激として、被験者にコリオリ効果を繰り返して加えることによる連続的な実験を行い、コリオリ効果は、ジャイロスコーピックトルクの作用時間が関与していると報告した。

3. 実験

3.1 実験概要

本実験では、コリオリ刺激を負荷したときに、人体頭部に作用する力を定量的に計測することを目的とし、慣性計測装置を組み込んだ実物大の頭部模型(写真1、図1)

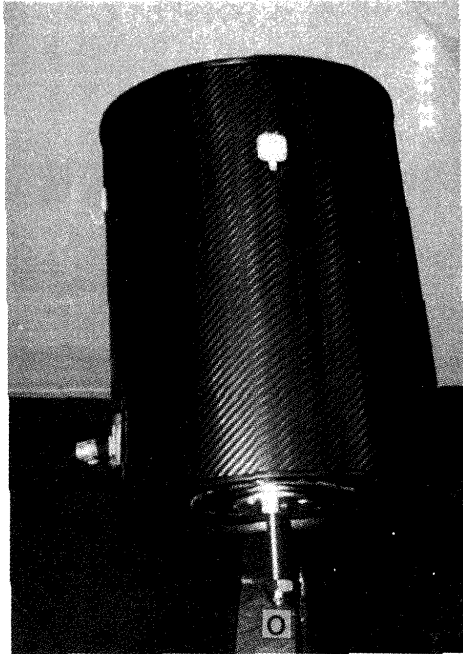


写真1 頭部模型の写真
o: ピボット (支点)

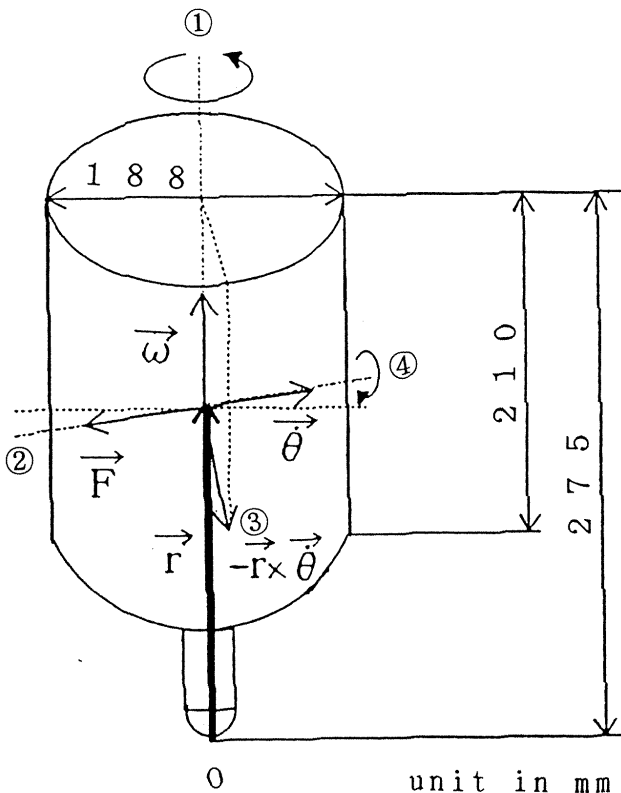


図1 頭部模型の外観
①上下軸②左右軸③前後軸④前屈運動

を、その上下軸周りに一定角速度で回転中に、首の支点(図1、o点)周りに一定角加速度で前(後)屈運動させた。このとき、各軸周りに作用する角速度と各軸方向の直線加速度を計測した。

3.2 実験装置

写真2、図2に実験装置の写真及び概略を示す。本実験では、直交2軸の回転運動の内、水平回転入力が発生させるために、安定した角速度で水平回転する回転台(米国、Genisco Systems社製Model C-181)を用いた。水平回転の角速度は $0.01^\circ/\text{s} \sim 1000^\circ/\text{s}$ まで設定が可能で、設定角速度の変動は0.1%以内である。

回転台には、パルスジェネレータユニットが装着されており、1回転で360個のパルスが発生するので、このパルスを周波数カウンター(Frequency Counter)でカウントすることで、回転テーブルの角速度を計測した。

人体頭部は円筒形であると仮定し、頭部模型の各部の寸法は、航空自衛隊員の身体測定値を参考とした⁽¹³⁾。人

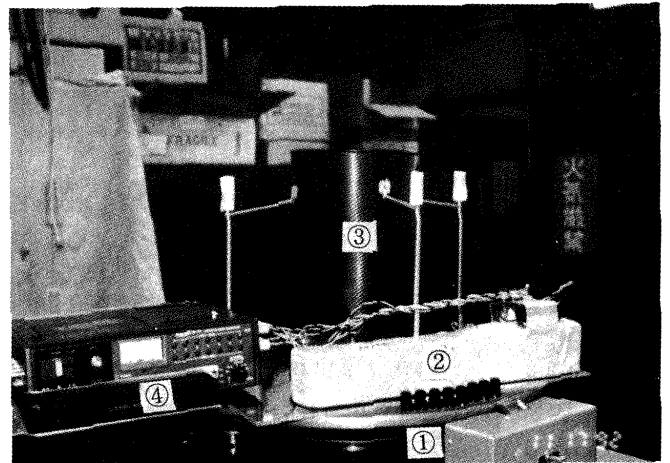


写真2 実験装置の写真
①回転テーブル②バッテリー③頭部模型
④データレコーダ

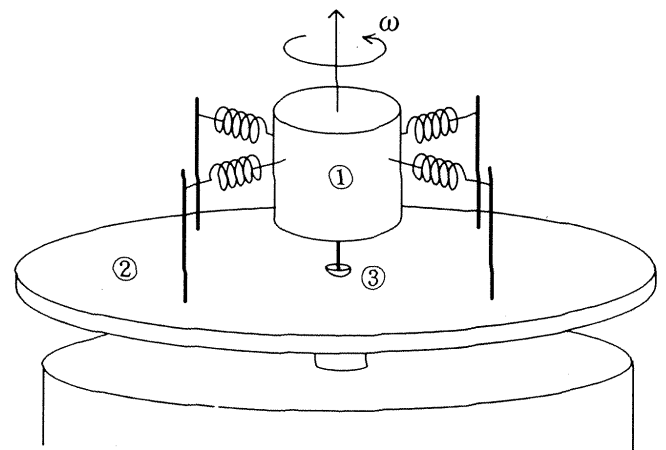


図2 実験装置の概略
①頭部模型②回転テーブル③ピボット

体頭部の密度は約 1 g/cm^3 であり、頭部模型の密度も 1 g/cm^3 に近づけるために、模型内部に均一にペレット(粒状質量)を入れた。その結果、頭部模型質量は 5.6 kg 、密度は 0.96 g/cm^3 となった。

模型内部に組込んだ慣性計測装置の3直交軸(上下軸、左右軸及びこれら2つの軸に直交する前後軸)に関して角速度、直線加速度が計測できるように、各3個の角速度、加速度センサを内蔵した。角速度センサには、村田製作所製振動ジャイロ(形式ENV-05S)を用い、加速度センサには、日本航空電子製加速度計(形式1441-2A)を用いた。なお、慣性センサの直交度、バイアスは慣性計測装置を頭部模型に組み込み後、再度計測した。

慣性計測装置への電源供給はDC12Vバッテリーで行い、慣性計測装置からの出力は、データレコーダー(TEAC社製R-71)に記録し、波形記録装置(日本電気三栄株式会社製PT2108)を用いて再生した。

3.3 実験方法

頭部模型の上下軸が鉛直となるように前後、左右のバネを取付ける。次に、上下軸周りに一定角速度で水平回転させ、一定回転に達したところで、後部(又は前部)のバネをはずし、頭部模型に首の支点o周りに一定角加速度で前屈(又は後屈)運動を行わせる。この方法で、コリオリ刺激を負荷したとき、頭部模型に作用する3軸の加速度及び角速度を慣性計測装置で計測し、データレコーダーに記録した。

航空機の飛行中に発生するであろう2軸回転運動に近い角速度と振幅を頭部模型に与えた。すなわち、パラメーターとして水平回転の角速度 ω を $30, 50, 70, 90, 120^\circ/\text{s}$ の5とおりについて、頭部前(後)屈運動の角加速度 $\dot{\theta}$ を、 $293^\circ/\text{s}^2$ 、 $344^\circ/\text{s}^2$ の2とおりで行った。なお、水平回転の方向は、頭部模型を上から見て時計回り(clock wise以下CWとする)、と反時計回り(counter clock wise以下CCWとする)とした。

3.4 実験結果

(1) 諸説と実験結果の比較検討

コリオリ効果の要因については、“水平回転角速度の変化”説と“ジャイロスコピックトルク”説がある。また、本研究で検討した説は、“コリオリ力”説である。

まず、“水平回転角速度の変化”説は、頭部の前後屈により上下軸周りの水平回転角速度成分が減少し、外側半規管から「反対方向に回転した」という信号が出力されることでコリオリ効果が起こるとするものである。上下軸が角度 θ 傾斜したとき、上下軸方向の角速度の変化は $\omega(\cos\theta - 1)$ となる。半規管は角速度の変化(=角加速度)を検出する。文献⁽¹²⁾の例のように、頭部が上下軸周りに約

2分間以上一定角速度($60^\circ/\text{s}$)で回転してから、突然(1秒間で)頭部を 90° 傾斜させる場合は、 $\omega = 60^\circ/\text{s}$ 、 $\theta = 90^\circ$ であるから、半規管は $-60^\circ/\text{s}^2$ を検出する。しかし通常の動作では、このように頭部が突如 90° 回転するということは稀である。例えば $\theta = \pm 25^\circ$ に対して角速度の変化は -0.0937ω となるので、わずか 9% であり、コリオリ効果の主要因とは言い難い。すなわち、 9% は、前述の11段階レイテイング法の分解能に相当し、被験者の感知誤差の範囲である。ただし、前述の例のように、短時間の内に θ が 90° 近くまで変化する時はこの限りではない。また今回の頭部模型実験では $\theta = \pm 12.5^\circ$ であったので、角速度の変化は -0.024ω 、すなわち 2.4% と極めて小さいことが予想される。実験でも明瞭な角速度変化の確認が出来なかった。

つぎに、“ジャイロスコピックトルク”説は、頭部の2軸回転により、頭部にジャイロスコピックトルクが作用するという説である。しかし、実験により得られたトルクの符号は、理論的なジャイロスコピックトルクの符号とは、逆向きであった。理論式によると⁽¹⁴⁾、角速度 ω で自転する慣性能率 I の剛体が角速度 θ で回転する時、剛体に働くトルクは、 $\mathbf{T} = I\boldsymbol{\omega} \times \dot{\boldsymbol{\theta}}$ である。このトルクの向きは図1(ω : CCW、 $\dot{\theta}$: 前屈回転運動)の場合、前後軸後ろ向きになる。一方、これまでの被験者を用いた実験ならびに今回の頭部模型を用いた実験では、頭部を前後軸の向きに回転させる結果となった。従って、“ジャイロスコピックトルク”説では説明が出来ない。

そこで最後に“コリオリ力”説について検討した。

(2) コリオリ力の作用

コリオリ力 \mathbf{F} は、回転座標上で線速度 \mathbf{V} で直線運動する質量 m に働く力で、次式で表される。ただし、 ω は回転座標(回転テーブル)の角速度である。

$$\mathbf{F} = -2m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}$$

図1において、 $\mathbf{V} = -\mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\theta}}$ であるから

$$\mathbf{F} = -2m\boldsymbol{\omega} \times (-\mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (1)$$

スカラー量で表すと、 $\boldsymbol{\omega}$ と \mathbf{V} は直交しているので

$$F = 2m\omega V \quad (2)$$

θ : 頭部前(後)屈角度 $\dot{\theta}$: 頭部前屈運動の角速度

r : 頭部中心の回転半径 \mathbf{V} : 線速度($r\dot{\theta}$)

ただし、式中の太字はベクトルをあらわす
まず、理論式(1)で示される力の向きは実験の結果と一致した。すなわち図1のように、 ω : CCW、 $\dot{\theta}$: 前屈運動の場合、 \mathbf{F} は左右軸の向きになった。つぎに、(2)式によると、 F は m 、 ω 、 V に正比例するはずであるが、 m は固定なので、 F が ω と V に正比例するかどうか、実験で確認する。

実験では、頭部模型を上下軸まわりに一定の角速度で回転中に前屈させると、最初零だった $\dot{\theta}$ は時間と共に増

加してゆく。ただし、実験装置の構造上頭部模型の回転角は $\pm 12.5^\circ$ に限定されており、 $\dot{\theta}$ にも限界がある。また頭部模型の前屈により左右軸方向に力が作用すると、頭部模型は o を支点として前後軸まわりに回転する。このため左右軸方向の加速度計には、左右軸方向の加速度以外に、重力の成分 Ag が加算されるので、これを補正(差引)する必要がある。前後軸まわりの回転角を α とすれば、 $Ag = G \sin \alpha$ (G :重力加速度)となる。 α は前後軸まわりのジャイロ(角速度センサ)の出力を時間積分して求め、

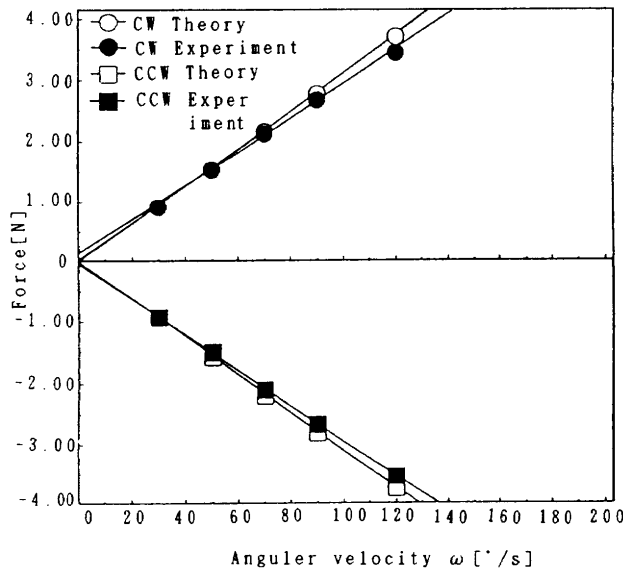


図3 頭部模型に作用する力
作用力対 ω [回転テーブルの角速度]
 V [線速度] 一定: 15.9cm/s

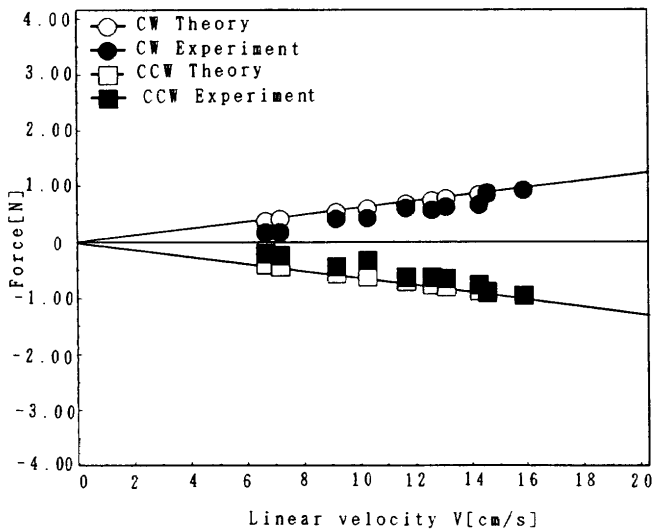


図4 頭部模型に作用する力
作用力対 V [線速度]
 ω [回転テーブルの角速度]一定: 30°/s

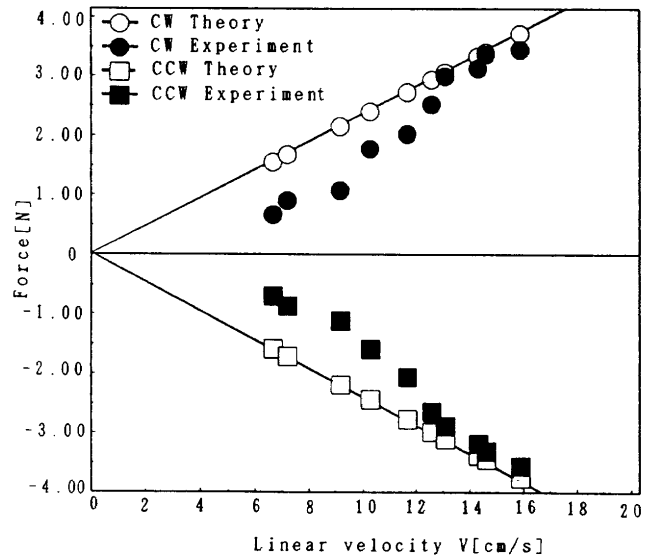


図5 頭部模型に作用する力
作用力対 V [線速度]
 ω [回転テーブルの角速度]一定: 120°/s

重力成分の補正に用いた。

計測された加速度に、頭部模型質量5.6kgを掛けることで、力($\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{s}^2 = \text{N} \cdot 10^{-2}$)として表すことができる。図3は回転テーブルの水平回転角速度 ω を変化させた時、頭部模型に働く力を、図4~図5は頭部模型重心の線速度 V を変化させた時頭部模型に働く力を示す。図には、水平回転の方向がCW、CCWそれぞれについて実験値と理論値を示した。

理論式(2)によりコリオリ力 F は、 ω 及び V に正比例することがわかる。本実験の結果、 V を一定にして ω を $30 \rightarrow 120^\circ/\text{s}$ へ変化させるにつれて、頭部模型の作用力が比例的に大きくなることが解った(図3)。また、 ω を一定として線速度 V を増加させると、作用力が比例的に大きくなるが示された。(図4~図5)。

以上のように、本実験結果は頭部模型に作用するコリオリ力によって良く説明できる。

4. 考察

身体を一定角速度でCCWに回転している最中に、頭部を前屈させると、コリオリ力は頭部を右側に傾けるように作用し、首を支点とする回転が生じる。このことは被験者による実験及び頭部模型を用いた実験で確認している。この結果、三半規管の中で、右前半規管と右後半規管は、内リンパが遠膨大部方向に流れ、身体が右側に回転したと出力する。また、体性感覚情報も、頭部が右側へ傾いた出力する(図6)。さらに、前庭器官内の耳石器にコリオリ力が作用する。頭部の傾きや、直線運動の加速度を検知する耳石器は、頭部が右側に傾いたと出力す

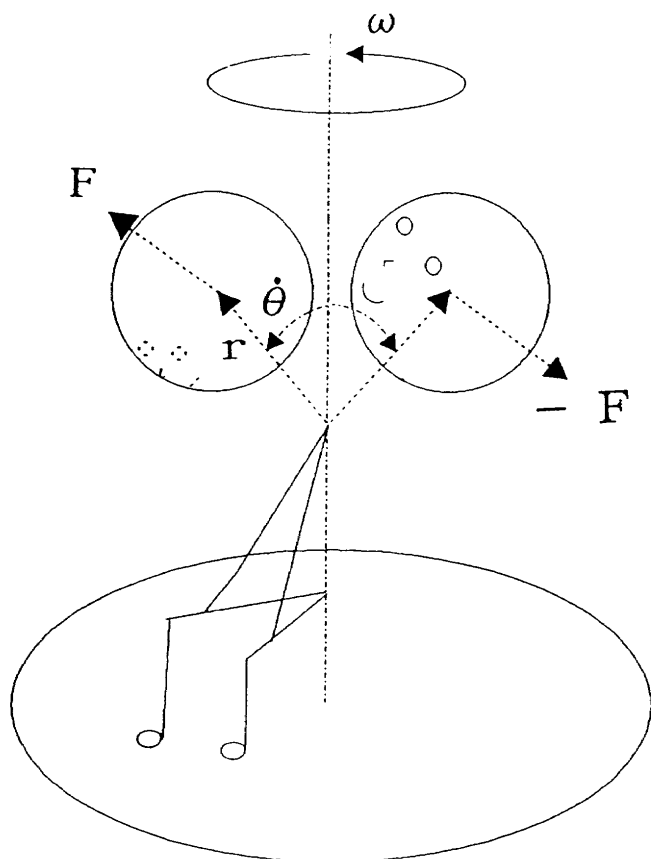


図6 頭部に働くコリオリ力

る。ただし、身体が一定の角速度で定常回転していると、我々はその回転を感知できない。すなわち静止の状態だと判断してしまう。というのは、三半規管は回転の角加速度を検知する構造なので、我々は、回転していることを感知することができないからである。

今までの地上生活の経験によって、身体が上下軸周りに回転していないときに頭部を前屈させると、前庭器官と視覚からどのような出力が送られるかということは、脳の神経貯蔵装置に記憶されている。脳には、もう1つ比較装置があり、ここでは様々な空間感覚から脳へ送られてくる最新情報と、貯蔵装置に記憶されている情報との比較を行うことが知られている⁽¹⁵⁾。

一方、前述のように身体が一定の角速度で回転していても、三半規管は回転を感知できない(静止状態と判断している)。このとき前屈すると、前庭器官から過去の経験とは異なる出力(頭部を前屈させたとき、正面に傾かず、右側に傾いてしまうという感覚情報)が脳に送られ、比較装置で過去の記憶情報と比較される。この2つの情報の差が不一致信号として、身体の様々な機構へ出力される。コリオリ効果は、この感覚情報間の矛盾によって誘起され、空間識失調を引き起こすと考えられる。すなわち、図7のように頭部の2軸回転(コリオリ刺激)により頭部を右(又は左)に傾斜させる力(主としてコリオリ力)が作用する。これは、これまで(非回転時)頭部を前屈

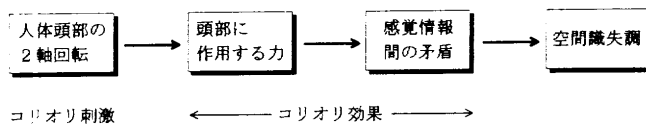


図7 頭部の2軸回転により空間識失調が誘起されるメカニズム

したときに体験した感覚情報とは異なるため感覚情報間の矛盾を生じる。この結果空間識失調を誘起すると考えられる。

被験者を用いたコリオリ効果の実験報告⁽²⁾によると、コリオリ効果(不快感)の大きさは、身体上下軸周りの水平回転角速度の大きさに比例する。また身体をCWに一定角速度で回転させ、頭部前屈運動を行うとコリオリ力は、頭部を左傾するように作用する。逆に、CCWに回転した場合は、頭部を右傾するように作用する。これは、我々の実験結果と一致した。

頭部の屈折を前後に周期的に行わせた場合には、頭部が前後に屈折する毎にコリオリ力の方向が左右に180°変化する。したがって感覚情報間の矛盾が倍増し、コリオリ効果をさらに激しくすると考えられる(図6)。

5. 結論

空間識失調の誘起要因究明の一助として、コリオリ効果の作用要因について、力学モデルを考案し、頭部模型を製作して定量的な実験・解析を行った。その結果、次の結論を得た。

コリオリ刺激による主要作用力は、身体上下軸周りの水平回転角速度 ω と頭部前後屈運動の線速度 $V(=r\dot{\theta})$ に比例して増加する。

この実験結果を説明する理論として、従来からの説である“水平回転角速度変化”説、“ジャイロスコピックトルク”説、さらに“コリオリ力”説を比較検討した結果、“コリオリ力”説による説明が、矛盾も無く、理論と実験の定量的な一致も良いことが解った。

したがって、コリオリ効果の作用要因の主たるものはコリオリ力(ω と $V=r\dot{\theta}$ の積に比例)の作用によるものであり、コリオリ力の作用により頭部が右(又は左)に傾くので、過去の感覚情報との間に矛盾を生じ、この結果、空間識失調が誘起されると考えられる。

参考文献

- 1) Nuttall, J. B.: The Problem of Spatial Disorientation, J. A. M. A., 166, 431(1958)
- 2) Guedry FEJr, Montague LtColEK.: Quantitative Evaluation of the Vestibular Coriolis Reaction, Aerospace Med. 32, 487/500(1961)

- 3) Baltzley, D. R., Kennedy, R. S. & Berbaum, K. S.: The Time Course of Postflight Simulator Sickness Symptoms, *Aviat. Space Environ. Med* 60, 1043/1047(1989)
- 4) 幸尾治朗：航空機の乗り心地に関する研究 航空宇宙技術研究所報告 TR-645(1980)
- 5) Reason, J. T. & Brand, J. J.: Motion Sickness. (1975) pp. 74-75, Academic Press, London
- 6) Bock, O. L. & Oman, C. M.: Dynamics of Subjective Discomfort in Motion Sickness as Measured with a Magnitude Estimation Method, *Aviation Space and Env. Med.*, 53, 773/777(1982)
- 7) 井須尚紀ほか：動揺病不快感の大きさはジャイロスコピクトルクに比例する、SICE第4回生体・生理工学シンポジウム論文集、147/150(1989)
- 8) 服部和彦：動揺不快感の誘起におけるジャイロスコピクトルクの効果と重力の影響、東海大学工学部動力機械工学科卒業論文(1989)
- 9) 米田茂夫：動揺不快感の誘起におけるジャイロスコピクトルクの作用、東海大学大学院修士論文(1989)
- 10) Talbot, J. M.: Unexplained Aircraft Accidents in the USAF in Europe, *J. Aviat. Med.*, 29, 111(1958)
- 11) 加藤紀子：An Investigation on the Empirical Vertigo in Aircraft Pilots during Flight, *医実報告* 9(3), 192/202(1968)
- 12) Jones, G. M.: Origin Significance & Amelioration of Coriolis Illusion from the Semicircular Canals: A Non-mathematical Appraisal, *Aerospace Medicine*. 41, 483/490(1970)
- 13) Aeromedical Laboratory: Anthropometry of JASDF Personal and its Application for Human Engineering, JASDF(1980)
- 14) Ira Cochlin: Analysis and Design of the Gyroscope for Inertial Guidance, 28/30, John Wiley & Sons, Inc.(1963)
- 15) Reason, J. T. & Brand, J. J.: Motion Sickness (1975) pp. 169-170, Academic Press, London

航空宇宙技術研究所報告1258号

平成6年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

Printed in Japan