平常時の歩行支障に関する実験研究

人間の行動性に基づいた浮遊式海洋建築物の動揺評価に関する研究 その1

EXPERIMENTAL STUDY ON DIFFICULTIES IN WALKING OF USUAL MOTION CONDITION

Study on acceptable motion of floating ocean structures for human activities Part 1

野口 憲一*

Kenichi NOGUCHI

The purpose of this study is to estimate habitability to the motion in floating ocean structures. The human response tests on difficulties in a few daily activities to typical motion of floating structures were carried out. In this paper, tests on difficulties in walking, one of the daily activities, are mentioned. Typical motions are uniaxial and biaxial motions which consist of pitching, rolling and heaving. Relationships of difficulties in walking and motions of the structure were clarified.

Permitted area of the motion for walking of usual time and slightly difficult area of that are proposed.

Keywords : ocean structure, floating type, human response, motion, habitability, walking

海洋建築物, 浮遊式, 人体反応, 動揺, 居住性, 歩行

1. はじめに

近年,「フローティングアイランド」,「みなとみらい海上旅客ターミナル」などのように浮遊式海洋建築物がみられるようになってきた。さらに,浮遊式による長期滞在型の海洋建築物プロジェクトの提案もみられ,今後,規模も大きくかつ数も多くなってくると考えられる。

浮遊式には,建設時,稼働時において海洋環境にあまり変化を与えない利点がある反面,風や波浪によって長周期の全体運動すなわち「動揺」しやすい欠点がある。この動揺は人の居住上,ならびに機器装置の稼働に影響を及ぼすおそれがある。

一般に,居住性を満足するためには「安全」で「健康」で「能率」的で「快適」な環境を確保することが必要な条件とされている。

振動,動揺を対象とした人体反応を扱うとき,まず基本となるのは知覚限界を知ることである。しかしわずかな動揺の範囲ではあまり抵抗感がない浮遊式海洋建築物での生活においては,知覚限界よりも行動,作業などに対する支障の程度が居住性の評価要素として重要であると考えられる。

本論文では,以上の観点のもとに行動性に着目して,

行動からみた動揺に対する「安全性」,「行動能」を中心にとらえる。そこで,代表的な行動として歩行を取り上げ,動揺に対する支障の程度を明らかにすることを目的にしている。本報は,日常生活時を念頭においた動揺レベルに対する直進歩行の能力低下の程度を実験により明らかにしたものである。動揺としては浮遊式海洋建築物に生じる代表的な3方向の動揺,すなわちピッチ,ロールおよびヒープを対象に1成分ずつの単軸動揺および2成分を合成した2軸動揺を対象としている。さらに,これらの結果をもとに,歩行時の支障にかかわる動揺限界量を検討している。なお,本論文の一部は大会学術講演梗概集に発表している^{1),2)}。

2. 本研究と既往の研究との位置づけ

浮遊式海洋建築物の居住性の観点から設計計画の手順を追えば,まず計画地域の海象条件などから動揺を予測し,居住性能評価と対照しつつ動揺対策・制御を施すことになる。これをフローとしてまとめたのが図-1である。本研究はこのフローの中の 線で囲んだ部分を対象にした研究として位置づけられ,動揺に対する日常生活行為における人体反応実験結果から支障の程度を明

* 大成建設技術研究所 主席研究員・工修

Chief Research Eng., Technology Research Center, Taisei Corporation, M. Eng.

図-1 海洋建築物の動揺と居住性における連関

らかにすることを主眼としている。最終的には、これらの資料をもとに浮遊式海洋建築物の動揺量の予測結果と照合して、動揺に対する居住性能評価の確立を目指している。

動揺に関する居住性能評価に関しては、高層建築物、固定式海洋建築物を対象とした評価指針 ISO 6897³⁾があるが、浮遊式海洋建築物に関する評価指針はないのが現状である。また、揺れの人体に及ぼす影響についての研究も少なく、実験データの蓄積が望まれている。

海洋建築物を対象にした研究では、渡辺⁴⁾が浮遊式建築物の揺れ（特にヒープ）に対する心理的な振動感覚を定量的に評価するために、被験者実験から主観的反応の許容限界曲線を提案している。そのほかには、目立った研究はほとんどない。

また、浮遊式海洋建築物と類似のものとして船舶が挙げられるが、動揺に対しては動揺病、いわゆる船酔いに関する研究⁵⁾が主であり、快適性や作業性に関する研究はほとんど行われていない。

行動性に関しては、星野⁶⁾が、アクアポリスと連絡船間をかけ渡されたトラップで観客が乗降する際の通行の難易度を判定するために、実際に動揺しているトラップ上を被験者に通行させ、その結果をもとにトラップ通行限界（案）を提案した研究がある。しかしながら、実際の歩行時のデータがないこと、実際にはトラップの傾斜変化もあると考えられるが、評価に水平速度、上下速度を用いている点など、まだまだ検討の余地がある。

また、陸上建築の分野では、後藤⁷⁾が高層建築物の長周期水平振動を対象に床面歩行、階段歩行を取り上げ、被験者からの難易度アンケート結果から行動能の評価を行い、居住性検討限界を提案している。

既往の研究を概観してみると、浮遊式海洋建築物に特有の床面が傾く動揺に対する行動を中心とした人体反応に関する研究はほとんどなく、行動性に関する動揺評価のために、こうしたデータを系統だって調査研究し、蓄積することは必要不可欠であると判断している。

3. 実験の目的および概要

本研究は、ピッチ、ロールを中心にした動揺に対して直進歩行実験を行い、その結果から歩行上の支障程度を明らかにすることを目的としている。支障の程度を定量的にとらえるために、難易感、不安感といった心理的な支障の程度および物理的にとらえられる直進歩行中の乱れの程度に着目している。歩行場所における視覚的環境条件の違いとしては屋内および屋外の2条件を想定した実験を行い、支障程度の差異について検討している。

なお、歩行時と静止時との安定感の差異を確認するために片足立位実験を行っている。歩行動作における一瞬時の様態として片足立位状態を取り上げたもので、バランスの難易感を端的に評価するためである。

4. 実験における動揺条件

海洋建築物に生じる動揺は、6方向の動揺成分がランダムに混ざりあった複合動揺である。実験では、先に述べたように主としてヒープ、ピッチ、ロールの単軸正弦波動揺およびこれらを合成した2軸複合正弦波動揺を対象とする。なお、船舶工学では船舶の長軸方向を前後軸として動揺軸を決めているが、ここでは図-2に示す人体軸で動揺軸を表している。

本報で対象としている実験における動揺条件の設定範囲は、以下のように決定した。

- 1) 日本沿岸波浪観測資料⁸⁾から波高と平均波周期との関係を求めた結果（図-3）を基礎とし、さらに沖合いの大型浮遊式海洋建築物までを対象範囲として、周期範囲は5～20秒（一部の実験では30秒まで）とする。
- 2) ピッチ、ロールの角振幅は「海洋建築物安全性評価指針」⁹⁾において、傾斜している避難路の勾配を7度以内に規定していることから、7度までとする。
- 3) ヒープの加速度振幅は、ISO 2631/3¹⁰⁾で提唱している8時間暴露時間の許容限界値を含む30 cm/sec²以下とする。ただし、本実験で使用する6軸振動再生装置

図-2 人体と動揺軸の関係

図-3 有義波高と平均波周期の関係

図-4 長周期大振幅振動再生装置

表-1 実験における動揺条件

振 幅 周 期 (振動数)	動 揺 記 号	ピ ッチ (ロー ル) (deg)	ヒ ー ブ (cm/s^2)	位 相 差 ¹⁾ (deg)	条 件 数
5.0 sec (0.20Hz)	P, R	1.0, 3.0, 5.0, 7.0	0.	—	4x2
	PH, RH	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	10	90	4x2
	H	0.	5, 10, 15, 20, 30	—	5
10.0 (0.10)	P, R	1.0, 3.0, 5.0, 7.0	0.	—	4x2
	PH, RH	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	10	90	4x2
	PS	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	$10^{2)}$	225	4
	RS	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	$10^{3)}$	-45	4
	H	0.	5, 10, 15, 20	—	4
15.0 (0.067)	P, R	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	0.	—	4x2
	PH, RH	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	10	90	4x2
	H	0.	5, 10	—	2
20.0 (0.05)	P, R	1.0, 3.0, 5.0, 7.0	0.	—	4x2
	PH, RH	1.5, 3.0, 5.0, 7.0	5	90	4x2
	H	0.	5	—	1
30.0 (0.033)	P, R	1.0, 3.0, 5.0, 7.0	0.	—	4x2

1) ピッチ (ロール) を基準にしている

2) ピッチとサージの組合せ

3) ロールとスウェイの組合せ

の最大振幅の制約から、10秒以上の周期については、再生可能な範囲までとする。

設定値の組合せを表-1に示す。なお、ここではピッチと他の動揺成分を組み合わせた動揺をピッチ系動揺 (P:ピッチ, PH:ピッチ+ヒーブ, PS:ピッチ+サージ), ロールと他の動揺成分を組み合わせた動揺 (R:ロール, RH:ロール+ヒーブ, RS:ロール+スウェイ) をロール系動揺と系群化した表現も使用する。

設定値に対して実験する順番を固定すると、動揺に対する慣れや疲労、あるいは直前の動揺の影響が残るおそれがある。それらの影響が特定の振動条件に集中しないで平滑になるように、実験で与える動揺の順番を各被験者グループごとに乱数表に基づいて別々に組んでいる。また、被験者のアンケートに対する回答の信頼性を確認するため、動揺条件として無振動も組み込んでいる。

すべての実験は法政大学工学部の長周期大振幅振動再生装置¹¹⁾を用いて行う。本装置は、振動装置本体、それを駆動させるための油圧発生装置、制御装置および振動

装置本体上の実験家屋からなる。振動装置本体の形状、寸法を図-4に示す。なお、振動台上の実験家屋はFRP製で、内外を視覚的に遮断するために周壁はメラパネルにしてある。

5. 被験者

振動、動揺に対するヒトの感応度は、性別、年齢、姿勢などによって異なるとされている。本実験では、主たる被験者を20歳前後の女性とし、比較のために同年齢層の男性による実験も一部実施している。一般に、女性の方が男性より、年齢的には若年の方が老年より感応度が高いとされていることから、刺激を受けやすい側に着目して選択したものである。

また、実験を行う前に、被験者特性として「振動に対する強弱感」についてアンケートを取っている。被験者数および被験者特性は、実験ごとに一覧として各章に示す。なお、実験を都合3期(1:単軸動揺, 2:2軸動揺女性, 3:2軸動揺男性)に分けて行ったため、被験者は期によって異なっている。被験者数は延べ104人である。

6. 歩行実験

6.1 実験条件および方法

実験は振動再生装置上の床(実験家屋の外)で行う。図-5に示すように、床上には長さ320cmの乱れ幅測定用グリッドが描かれており、被験者は基線(白テープ)上を直進歩行する。なお、ピッチ、ロールと進行方向の関係は同図に示すとおりである。視覚的屋内環境条件(以下屋内歩行という)を模擬するためには実験装置の外周および上部にシートを張り、周辺環境を視覚的に遮へいする。それに対し、視覚的屋外条件(以下屋外歩行という)を模擬する場合はシートを外し、装置床と周辺との相対的動きが視認できるようにしている。

被験者は、かかとが低く歩きやすい靴をはき、まっす

ぐ前を向いた姿勢で両手を自然に振り、メトロノーム 90 打／分に合わせた歩調で、グリッド内の基線上を 4 往復歩行する。歩調の統一は個人差の除去を意図したもので、あらかじめ何人かの被験者が廊下で歩行した結果から、ゆっくりめの歩調を採用したものである。なお、一般に室内歩行の場合はほぼ 120 歩／分が平均的とされている。

観察者は被験者が歩行中に最も左右にふらついた幅をグリッドで判定し、乱れ幅として記録する。被験者は、歩行終了後、「難易感」および「不安感」の程度を 5 段階評価で回答する。各動揺条件で 3～4 人の被験者についてこれを繰り返し、次の条件による実験に移る。

6.2 実験結果および考察

6.2.1 被験者数および結果のまとめ方

被験者数および被験者特性は表-2 に示すとおりである。なお、ヒープの実験における被験者数が少人数であるのは、主眼をピッチ、ロールの回転運動にしていること、実験範囲内のヒープに対して支障度合いが比較的小さいことなどから、少人数で十分目的を果たせると判断したものである。また被験者特性をみると、2/3 以上の被験者が日常の「振動に対する強弱感」について「普通だと思う」と答えている。これらの被験者とそれ以外の被験者との支障に関する回答を比較検討した結果、有

意な差は認められなかった。したがって、以後、全被験者のデータを対象として検討を進める。

回答は、表-3 に示すように難易度、不安度に数値置換して集計し、平均値および標準偏差を求める。角振幅と平均難易度・不安度および 95 % 信頼区間との関係を図-6 に例示する。同振幅数において角振幅が大きくなるほど、歩行の難易度、不安度とも高くなる傾向にある。各振動数ごとに角振幅と申告値の平均値との関係をワイブル関数で近似している。この図にみられるようにワイ

表-2 歩行実験の被験者データ

		単軸動揺			2軸動揺			
		ピッチ	ロール	ヒープ	ピッチ & ヒープ	ロール & ヒープ	ピッチ & サージ	ロール & スウェー
屋外	女性	17 (0,14,3)	16 (0,13,3)	7 (0,6,1)	15 (1,14,0)	14 (1,12,1)	15 (1,14,0)	14 (1,12,1)
	男性	—	—	10 (1,9,0)	17 (1,14,2)	16 (1,13,2)	17 (1,14,2)	16 (1,13,2)
屋内	女性	17 (0,14,3)	19 (0,14,5)	7 (0,6,1)	15 (0,13,2)	15 (0,11,4)	15 (0,13,2)	15 (0,11,4)
	男性	—	—	10 (1,9,0)	15 (2,10,3)	16 (1,13,2)	15 (2,10,3)	16 (1,13,2)

註：() 内は振動に対して (強い, 普通, 弱い) の各申告人数

表-3 評価尺度と日本語カテゴリー (歩行)

難易度	内 容
4	もう歩けない
3	かなり乱れ、同じ間隔、同じ速さでは歩けない (まっすぐには)
2	乱れるが、ほぼ同じ間隔、同じ速さで歩ける (まっすぐ)
1	やや乱れるが、同じ間隔、同じ速さで歩ける (まっすぐ)
0	普通に歩ける
不安度	内 容
4	非常に不安である
3	かなり不安を感じる
2	不安を感じる
1	やや不安を感じる
0	全く不安を感じない

註：難易度の内容は、ピッチ系&ヒープについてであり、括弧内にロール系について示す。

図-5 歩行実験用グリッド

図-6 角振幅と平均難易度・不安度との関係 (女性：ピッチ, ロール)

図—7 屋内歩行：難易度曲線

図—8 屋内歩行：不安度曲線

図—9 屋外歩行：難易度曲線

図—10 屋外歩行：不安度曲線

ブル近似曲線は 95 % 信頼区間の中にあり，妥当と考えられる。

その回帰曲線から各支障の申告の程度に相当する角振

幅を求め，それを振動数—角振幅の関係で表し，それぞれ難易度曲線，不安度曲線を得た。

グリッドテープの間隔から 5 cm 刻みに判定された乱

れ幅についても、回答の場合と同様の処理をして乱れ度曲線を得た。

6.2.2 難易度、不安度について

屋内歩行の難易度曲線、不安度曲線を図-7、図-8に、屋外歩行のそれを図-9、図-10に示す。同じ難易度、あるいは不安度を示す曲線が下方にある方が、支障を感じやすい（支障度が高い）あるいは動揺条件が厳しいことを意味している。いずれの動揺に対しても、振動数が低くなるにつれて同じ難易度、不安度を示す角振幅の値が大きくなり、難易、不安を感じにくくなるといえる。

屋内歩行については、ピッチ系動揺に対するよりもロール系動揺に対する難易度が明らかに高い。一方、不安度については必ずしもそうではなく、男性はロール系動揺に対する方が不安を感じやすいのに対し、女性はピッチ系動揺に対しての方が不安を感じやすいという逆の傾向がみられる。

図-7の中央および右の図から、男性、女性の難易度を比較すると、どちらかといえばピッチ系動揺では女性の方が、ロール系動揺では男性の方がやや小さな角振幅で難しいと感じる傾向があるが、有意な差はみられない。不安度については、図-8の中央および右の図から、ピッチ系動揺では女性の不安度曲線の方が下方にあり、不安を感じやすいといえるが、ロール系動揺では男女の不安を感じる度合いにほとんど差異がない。全体的には、女性の方が不安を感じやすい傾向がみられる。

屋外歩行の場合は、図-9からわかるように、ピッチ系、ロール系動揺に対して、ともに低振動数側での難易度の程度がほぼ等しく、振動数による差が屋内歩行の場合ほどみられない。また、同じ難易度の角振幅は、屋内歩行同様、ピッチ系よりロール系動揺の方が小さく、難易度が高いといえる。図-10に示す不安度についても同様であるが、屋内歩行の場合に比べてその差が小さくなる傾向がみられる。なお、ピッチ系、ロール系の動揺に対して、男女ともほぼ同じ難易度、不安度となっている。

ヒープに対しては、横軸を加速度にとった場合について図-11、図-12に示す。屋内、屋外歩行とも、各振動数ごとにヒープの振幅を大きくしていくと、ばらつきはあるものの難易度、不安度も高くなる。ただし、難易度は「やや乱れるが、……（難易度1）」までであるのに対し、不安度は「不安を感じる（不安度2）」を超えるまでに達しており、ヒープは歩きにくいのが不安要素として重要であることがうかがえる。なお、振動数0.05 Hz、加速度振幅5 cm/sec²のヒープに対してはほぼすべての被験者が「普通に歩ける（難易度0）」であり、この動揺は歩行にほとんど影響を与えないと判断できる。また、難易度では男女の違いによる反応の差異がほとんどみられないが、不安度ではその差異が明らかにあ

図-11 ヒープに対する屋内歩行の難易度、不安度

図-12 ヒープに対する屋外歩行の難易度、不安度

り、女性の方が不安を感じやすいといえる。

6.2.3 屋内歩行と屋外歩行における反応の差異

前節では、屋内、屋外歩行それぞれの支障を動揺方向、男女による違いなどについて考察してきたが、ここでは視覚的環境条件の違いについて考察する。

図-7、9および図-8、10から屋内歩行、屋外歩行における難易、不安の程度をみると、振動数0.033 Hzのピッチに対してのように一部例外はあるが、ピッチ系、ロール系動揺とも屋内歩行時の曲線の方が下方にあり、屋内歩行時の方が歩きにくい傾向がみられる。不安度は、難易度の場合に比べて、屋内、屋外での差が小さい。特に振動数が低くなるにつれて、その差がより小さくなる傾向がみられる。屋外歩行では静止した周辺部を見ることになり、左右のバランスが取りやすくなるため、特に難易度にその差が現れると考えられる。

6.2.4 単軸動揺および2軸動揺における反応の比較

図-7～10の左と中央のグラフを対比して、女性についての単軸動揺と2軸動揺における反応の比較を行う。[ピッチ+ヒープ]および[ピッチ+サージ]の方が[ピッチ]の場合より難易度、不安度ともに角振幅が小さい。すなわち、同じ角振幅に対して[ピッチ]より[ピッチ+ヒープ]および[ピッチ+サージ]の方が厳しいといえよう。

[ロール+ヒープ]、[ロール+スウェイ]および[ロール]の比較では難易度、不安度ともにほとんど差がみられない。強いていえば、[ロール]単軸動揺の曲線がやや下方にあり、支障の程度がやや高いと考えられる。

総体的にとらえれば、歩行の場合には[ピッチ]あるいは[ロール]の単軸動揺に加速度振幅が10 cm/s²以下の[ヒープ]が加わった2軸動揺に対する反応は単軸動揺の場合とほとんど変わらず、[ヒープ]の影響は無

視してよいと考えられる。しかしながら、図—11, 12 にみられるように加速度振幅 10 cm/s^2 を超える [ヒープ] が加わる場合には不安が大きくなることが推察され、この点の検討が今後の課題となろう。

6.2.5 難易度、不安度の相互比較

ピッチ系動揺における屋内歩行の場合、図—7, 8 から難易度、不安度にみる同じ程度の曲線は不安度の方が難易度より下方に位置しているといえる。一方、図—9, 10 から屋外歩行の場合も屋内歩行と同様ではあるが、屋内歩行の場合ほど不安度と難易度との差がないことがわかる。

ロール系動揺においてもほぼ同じ傾向であるが、不安度と難易度の差はピッチ系の場合ほどではない。逆にロールにおける屋内歩行のように、難易度の方が不安度より下方に位置する場合もみられる。

ヒープに対しては、図—11, 12 に示されるように屋内歩行、屋外歩行とも同じ加速度振幅に対して、不安度の方が難易度に比べて程度が高く、その差も大きい。

これらのことから、揺れが見えない場合には歩行が難しくなくても不安を感じやすいことがわかる。不安感は視感覚に対する情報不足が影響しているものと考えられる。また、難易感は一行為に対しての感覚であるのに比べて、不安感は揺れていることに対する感覚と認識され、そのために異なった様相を呈していると推察される。

6.2.6 歩行の乱れについて

歩行の乱れには、前後方向での歩幅の乱れおよび左右方向にふらつく乱れがある。ピッチに対する歩行実験ではビデオ撮影し、足の軌跡を観察分析している。その結果によれば、振動数 0.20 Hz 、角振幅 $5^\circ, 7^\circ$ の屋内歩行において、歩幅の乱れが顕著である。歩幅の乱れは床面傾斜が正負逆転する際に現れている。その他の条件下では、歩幅の乱れはほとんど観察されていない。一方、左右方向へのふらつきは、ロール系動揺の全振動数において顕著である。また、一般に歩行時において前後方向より左右方向の方が不安定であるとされている。したがって、ここではより支障の程度が厳しい左右方向へのふらつきの程度を乱れ幅で評価する。乱れ幅は角振幅が大きくなるにつれて大きくなり、同じ角振幅に対しては振動数が低くなるにつれて小さくなる傾向がみられる。

屋内および屋外歩行における乱れ度曲線を図—13 に示す。

屋外歩行より屋内歩行の方が同じ乱れ幅の曲線が下方にあり、ふらつきの程度が大きいといえる。これは、屋内歩行では周辺の静止した情景を目で察知することができなくなり、視覚によらず身体だけで動揺に対応するため、身体のバランスがとりにくくなることによると考えられる。

屋内歩行に着目すると、[ロール] と [ロール+ヒープ]

図—13 歩行：乱れ度曲線

図—14 乱れ幅と難易度との関係

図—15 乱れ幅と不安度との関係

での乱れ度曲線はほとんど同じであり、単軸動揺と2軸動揺の違いの影響がみられない。男女を比べると、乱れ幅10 cmでは大きな差はないが、乱れ幅が大きくなると明らかに男性の乱れ度曲線が上方になる。これは、角振幅の小さい範囲では乱れ幅に男女差がほとんどないが、角振幅が大きくなると女性の方が乱れ幅が大きくなることであり、その理由のひとつとして男女の体力差が考えられる。

難易度および不安度と乱れ幅の関係を図—14、図—15に示す。難易、不安の程度2.5以下ではほぼ比例関係にあるが、これを超えると乱れ幅の増加の方が大きい。したがって、物理量である乱れ幅を基準にすれば、支障のカテゴリースケールは等間隔ではなく「かなり……（程度3）」と「非常に……（程度4）」の間は他の間より伸びたスケールと考えられる。ただし、難易、不安とも程度3、4は正常な日常生活を維持できる範囲を大きく上回っていると考えられる。したがって、程度2以下をその検討範囲と考えて、ほぼ比例関係にあると判断する。

同じ難易、不安の程度に対して、屋内歩行の方が屋外歩行の場合より、また、女性の方が男性よりやや乱れ幅が大きい。すなわち、難易、不安の程度と乱れ幅との関係はほぼ比例するが一義的に決まるものでなく、視覚的環境条件、男女の違いなどによってその比例定数が異なる。したがって、歩行時における支障の度合いは、物理的に現れる乱れ幅と心理的な面からの支障に諸条件を加味して、総合的に判断する必要がある。

7. 片足立位実験

7.1 実験条件および方法

実験は、振動再生装置上の実験家屋内床上で行う。動揺が定常になってから、被験者はきき足で片足立ちする。その時、両手にはアンケート用紙記入用ボードを持ち、手によるバランスはとれない状態とする。途中でふらついたり両足をついたりしても、所定の時間が経過するまで片足立位の姿勢を取り続ける。なお、所定の時間は、動揺周期20秒までは40秒、周期30秒の場合は60秒で

表—4 評価尺度と日本語カテゴリー（片足立位）

難易度	内 容
4	とても立ってられない
3	かなりふらつくが、立ってられる
2	ふらつくが、立ってられる
1	ややふらつくが、立ってられる
0	普通に立ってられる

表—5 片足立位実験の被験者データ

	単 軸 動 揺			2 軸 動 揺			
	ビッチ	ロール	ヒープ	ビッチ & ヒープ	ロール & ヒープ	ビッチ & サージ	ロール & スウェー
女 性	17 (0,13,4)	19 (0,15,4)	7 (0,6,1)	16 (0,15,1)	17 (1,12,4)	16 (0,15,1)	17 (1,12,4)
男 性	—	—	10 (1,9,0)	17 (1,14,2)	16 (1,13,2)	17 (1,14,2)	16 (1,13,2)

註：（ ）内は振動に対して（強い、普通、弱い）の各申告人数

ある。

所定の時間が経過したら、被験者は片足立位をやめ、その動揺による実験を終了する。被験者は立位時の「難易感」を5段階評価（表—4）して回答用紙に記入する。以後、次の動揺条件の実験に移る。

7.2 実験結果および考察

被験者数および被験者特性は表—5に示すとおりである。ここでも、被験者特性と実験中のアンケート結果を比較検討した結果、特に被験者特性による有意な差異は認められなかった。以下、歩行実験と同様の方法で回答の処理を行い、難易度曲線を得た。

片足立位における難易度曲線を図—16に示す。

振動数が低くなるにつれて大きな角振幅に耐えることができるようになることが明らかである。振動数0.033 Hzでは難易度曲線の勾配が下がり難しいと感じているようだが、これは片足立位の時間が長いために難しさが増大されたものと推察される。したがって、動的な歩行と対比して評価する際に振動数0.033 Hzにおける片足立位の難易度については無視する。また、女性の方が小さい角振幅でふらつきだす傾向がみられるが、有意な差はない。

図一16 片足立位：難易度曲線

図一17 ヒーブに対する片足立位の難易度

ピッチ系よりロール系の方が、同じ程度の難易度曲線が下方にあり、難しく感じていることがわかる。その差は振動数が低くなるほど広がる傾向にある。ピッチ系動揺とロール系動揺における同程度の難易度の差をみると、歩行における難易度の場合に比べ、違いが顕著である。これは、歩行の場合は進行方向への慣性力があるが、片足立位の場合は静止しているので、よりふらつきやすくなるためと考えられる。

各振動数でのヒーブの加速度と平均難易度との関係を図一17に示す。ばらつきはあるものの、各振動数とも加速度振幅が大きくなるにつれて難易度も上がる傾向にある。また、歩行時より難易度がやや厳しくなっている。なお、振動数ならびに男女による差異はそれほどない。

図一16にもどり、女性の単軸動揺および2軸動揺に対する難易度曲線に注目すると、角振幅が大きいところではロール系で単軸動揺に対する方が難しくなる傾向がみられるものの、全体的にはほぼ同じ難易度を示している。ピッチ、ロールの回転運動に、サージ、スウェイの水平運動が合成された2軸動揺に対しても同様である。

これらのことから、片足立位の難易度も、この動揺範囲における回転運動に直線運動を複合した2軸動揺では直線運動による影響はほとんどなく、支障に対しては回転運動が支配的であるといえる。

8. まとめ

歩行実験ならびに片足立位実験における人体反応の結果から得られたことを以下にまとめる。

- 1) 心理的な支障および物理的な支障の評価曲線として、角振幅と振動数の関係で示す難易度曲線、不安度曲線および乱れ度曲線を得た。
- 2) 歩行、片足立位ともに左右方向の動揺に対しての方が前後方向の動揺に対してよりも支障を生じやすい。
- 3) 歩行時における難易度、不安度はいずれにも屋内歩行の方が屋外歩行の場合より高い傾向にある。これは静止している周囲が見えない状態では揺れを視認できず、視覚と揺れ感覚に食い違いがでて、バランスがとりにくくなるためと考えられる。
- 4) 難易度については男女の違いによる差がほとんどみられないが、不安度については女性の方が高く、不安を感じやすい傾向がみられる。
- 5) 難易度はその行為に直接かかわる支障であるが、不安度はその行為を介しての動揺に対する感覚であるため、評価する際に注意する必要がある。
- 6) 単軸動揺とヒーブを合成した2軸動揺における歩行時の反応には、動揺の組合せによる若干の差が認められるが、全体的には2軸動揺においてヒーブは歩きにくさにはあまり影響しない。また、片足立位の難易度にも2軸動揺におけるヒーブの影響はほとんどないといえる。これらのことから、海洋建築物内の人間が動揺の回転中心に位置していない場合はヒーブ成分が入ってくるが、そのヒーブ成分を無視してよいと考えられる。実験範囲内のヒーブの加速度は、ISO 2631/3で規定している極めて不快な限界以下であることから妥当であると考えられる。しかしながら、大きなヒーブ振幅になると不安要素として考慮する必要がでてくる場合がある。日常の動揺を対象とした場合はヒーブ振幅は小さく、回転中心に位置していなくても回転運動のみ考慮すればよいと考えられる。
- 7) 横方向の動揺に対する歩行の乱れ幅と心理的な支障の関係は、支障の程度が2.5以下ではほぼ比例する。そ

振動数 (Hz)	0.033	0.067	0.20
歩行：無支障限界曲線	3.0	0.8	0.8
歩行：弱支障限界曲線	7.0	3.5	1.4

図—18 平常時の歩行：支障限界範囲

の比例定数は条件によって異なる。特に揺れを視認できるか否かによる違いが大きい。

以上のことを踏まえ、動揺に対して日常の行動性を確保するために、①不安は若干生じるが歩行に支障のない上限（歩行：無支障限界）として、屋内歩行における女性の「やや不安がある（程度1）」と片足立位における「やや難しい（程度1）」のいずれか小さい方②やや支障を感じるが、乱れ幅としてほぼ支障のない上限（歩行：弱支障限界）として、屋内歩行における「やや難しい（程度1）」程度と「乱れ幅10 cm」のいずれか小さい方この2レベルを平常時の歩行に対する評価検討曲線として図—18に示す。振動数が0.033 Hzでの歩行：弱支障限界7°は、海洋建築物安全性能評価指針で規定している避難路の傾斜制限に一致している。なお、歩行：弱支障限界曲線は、片足立位の場合の「やや難しい」と「難しい」の間にあり、妥当と考えられる。

動揺に対して比較的刺激を受けやすい被験者群を対象にした実験であるため、ここでは平均値でまとめているが、今後、老若、男女さまざまなタイプの被験者による人体反応結果を得て、評価に適切な代表値を選択する必要がある。

謝 辞

本研究の実施、遂行にあたって、法政大学工学部後藤

剛史教授にご指導いただいた。また、後藤研究室所属の学生諸君には実験の実施、データの取りまとめに多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野口憲一、石和あゆみ、後藤剛史：浮遊式海洋建築物の動揺を対象とした姿勢保持に関する人体反応実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A, pp.1207～1208, 1991.9
- 2) 野口憲一、樋渡 潔、後藤剛史：浮遊式海洋建築物の2軸動揺を対象とした姿勢保持に関する人体反応実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A, pp.1443～1444, 1992.8
- 3) ISO 6897: Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz), 1984.08.15
- 4) K. Watanabe, W. Kato: Subjective response of whole body to low frequency vertical vibration, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.155～163, 昭和56年5月
- 5) 神田 寛：船舶の居住性能—人間工学的研究—, 成文堂, 1964 など
- 6) 星野 守ほか4名：沖縄国際海洋博覧会“アクアポリス”—設計・建造と試験研究概要—, 三菱重工技報 Vol.13, No.4, 1976.7
- 7) 後藤剛史：居住性に観点を置いた高層建築物に生じる振動の評価に関する研究（その1）振動に対する人間の各種反応, 日本建築学会論文報告集, 第237号, pp.109～118, 昭和50年11月
- 8) 菅原一晃ほか5名：沿岸波浪観測15か年統計（昭和45年～昭和59年）, 港湾技研資料 No.554, 運輸省港湾技術研究所, 1986.6
- 9) 日本建築センター：海洋建築物安全性評価指針, 平成2, 年4月
- 10) ISO 2631/3: Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 3: Evaluation of exposure to whole-body z-axis vertical vibration in the frequency range 0.1 to 0.63 Hz, 1985.05.01
- 11) 坪井義隆ほか3名：大型長周期大振幅振動再生装置の検証実験 その1 振動再生装置について, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）E, pp.47～48, 昭和62年10月

（1993年3月10日原稿受理, 1993年11月24日採用決定）