# 強風時における避泊船舶の係留時の挙動に関する研究

## (Study on behavior of harborage ship at mooring in strong winds)

### 伊藤 麻衣子 (Maiko Ito)

Wind forces acting on a ship that harbors behind a big building is studied using a open channel instead of a wind tunnel. For the purpose of safety mooring, the behavior of this wind force must be investigated sufficiently. The flow profile of 1/7 law are made in the channel by means of up-stream roughness. Then, a ship and a building that is a fence or a warehouse are set in the flow.

The wake of buildings are measured. As a result, the regurgitation area becomes 10 times and 5 times of a building height for a fence and a warehouse, respectively. Then, wind force on a ship and sway of a ship are investigated. And as a result, pulling force acts on the moored ship around just behind a building. And as a ship's position leaves from a building, pushing force becomes large as well as sway motion do. For a fence, the pushing force of wind on a ship moored is larger than that of a ship fixed.

#### 1. 緒言

強風に対して建屋の背後では風が弱くなると考 えられている。例えば、強風時に船舶が港内で避 泊しようと考える際に大きな建屋の背後を選ぼうと する。このような建屋の陰を利用しようとするいくつ かの研究<sup>1)、2)、3)、4),5)</sup>があるが、船舶に作用する弱 くなったはずの風の力、特に変動成分が実際どの 様に船舶の動揺に影響するかは十分調べる必要 がある。風荷重については風洞実験が有力な調査 方法であるが、本研究では、二次元開水路に建屋 と船舶の模型を配置し、建屋背後における船舶に 与える風の影響について調べた。

#### 2. 実験方法

実験の模式図(固定時)を図1に、実験模式 図(動揺時)を図2に示す。長さ10m、幅0.6m、 高さ0.4mの二次元開水路の上流に粗度、中央部 に建屋模型、その下流に動揺可能な船舶模型を 配置して、表1の水理条件の下で実施した。なお、 実験で使用したバネ定数を表2に示す。

計測範囲で 1/7 乗則を再現するために粗度として 3cm の立方体 40 個を配置した。また、図示のご とく建屋の前面からX軸、Y軸をとった。建屋模型 は、水路幅いっぱいに長さ 0.53m で、高さ d=0.05m、幅 0.1m の倉庫模型と、山形鋼(0.04m ×0.05m×0.002m)のフェンス模型の 2 種類を使 用した。また、船舶模型はカーフェリーを想定し、 高さ0.03m、長さ0.58m、幅0.08mの立方体で近 似した。バネは両端、即ち水槽側壁で図示のよう に係留した。

流速計測に PIV (粒子画像流速計)を使用した。 計測範囲に厚さ 2mm のシート状のレーザー光を 当てるとトレーサー粒子が光に反射するので, それをハイスピードカメラで撮影した。撮影し た画像 (1260×1024pix) は時間間隔 1/50(秒)で 3000 枚、即ちフレームレート 50Hz で 60 秒間撮 影した。図4は撮影画像例である。微小時間の シャッター間隔と連続する2枚の粒子画像から 求めた粒子の距離で、流速を算出する。その結 果から乱れ強度と渦度を求めた。

また、船舶の動揺をロードセルで測定した。船舶固 定時の流体荷重(風荷重)は六分力計で計測した。 表1 水理条件

流量:Q	0.0165m³/s
断面平均流速	0.133m³/s
レイノルズ数	約7300
水深:h	0.2m
水胶匀配	16/1000

表2 バネ定数

バネ(個数)	バネ定数(N/mm)
1個	0.012
2個	0.006
3個	0.004



風は地表の植生、建築物等の摩擦の影響を受けるため、地表に近づくにつれて弱くなる性質である。風速の高度分布については、理論的に 大気が中立状態の時、「対数則」によって式(1) で与えられる。

$$V = V_1 \{ \ln(z / z_0) / \ln(z_1 / z_0) \}$$
(1)

ここで、*z*o: 粗度長である。

が得られるが、経験則として式(1)の「指数 則(べき法則)」が成り立つことが知られており、 以下の式が用いられる。

 $V = V_1 (z / z_1)^{1/n}$  (2)

V:地上高zにおける風速

 $V_1$ : 地上高 $z_1$ における風速

**n** :指数則のべき指数

「指数則」から地表付近の風速指数則で表す場合、べき指数 n の値は、表 3 のように与えられる。本研究では n=7 を採用している。

表3 べき指数

地 表 状 態	n	1/n
平坦な地形の草原	7~10	0.10~0.14
海 岸 地 方	7~10	0.10~0.14
田園	4~6	0.17~0.25
市 街 地	2~4	0.25~0.50

#### 3. 実験結果

(1)建屋背後の流速場

図3にフェンス模型設置時の、また、図4に倉庫 模型設置時の時間平均流速分布を示す。ただし、 この時、船舶模型は設置していない。流速 u は建 屋の影響が出ていない接近流速 U(断面平均流 速)で無次元化した。図中の点線は計測結果より 推定した逆流域を示している。倉庫模型では X/d ≒6 が、フェンス模型では X/d ≒10 が再付着点で あり、逆流域の範囲は倉庫の方が狭いことが分か る。さらに実験中の観察では境界は常に同じ場 所にあるわけではなく、倉庫、フェンス共にそ れぞれ前後に動いていることが確認できた。図 3、図 4 とも X/d=0 では流速が速くなっている。 その影響は X/d=16 まで及んでいる。建屋模型 背後で建屋より低いところで、流速は、両建屋模型 とも遅いが、倉庫模型の方がフェンス模型より速 いことが分かる。両建屋模型建屋高さ d は同じな のでこの違いは、建屋模型の幅が関係している と言える。

#### (2)建屋背後の乱れ強度

図5にフェンス模型設置時の、また、図6に倉庫 模型設置時の流速の乱れ強度分布を示す。風荷 重の乱れ強度は Root Mean Square である。両 模型とも建屋の後流で乱れが大きくなりその影響 は少なくとも X/d=16 まで及んでいる。乱れ強度は 倉庫模型に比べてフェンス模型の方が強いが、 高さ Y/d≤1 では両模型の乱れ強度の強さに大き な差は見られない。船舶位置においてにこの乱れ が大きく影響するとは言い難い。倉庫模型の乱れ 強度分布は上下に幅広くなっていくのに対し、フェ ンス模型では始め狭く、かつ、上方に向かって突き 出ていくように見える。しかし、X/d=16 に至る。全 体的に広がることが分かった。実験で、粒子は渦 を巻きながら水面付近まで上昇していく様子 が両建屋模型共に確認できた。再付着点での乱 れ強度は、建屋前方で影響のない X/d=-4 の地 点の乱れ強度と同程度である。



図3 流速分布(フェンス模型)

M-1



(3) 建屋背後の渦度

図7にフェンス模型の、また、図8に倉庫模型の 背後の渦度分布を示す。図中の黒塗り部分が模 型部を示している。倉庫模型では前面の角で、フ エンス模型ではフェンス角において強い渦が発生 している。倉庫模型ではやや水底に向かって流下 しているが、フェンス模型では上昇しながら流下し ており、様子が異なることが分かる。この理由として、 フェンス模型では、発生した渦に下から流体が供 給され連行していくが、倉庫模型では、幅があるた めに、流体が供給されず、このような結果になった と考えられる。図3、図4にみた逆流域の領域に違 いがあったのは、この事が影響していると言え る。また、発生した渦は後流に拡散していき、船 舶が係船されるところでよく乱れた流れになっ ていることが分かる。この渦度分布に沿って流速 の乱れ強度が変化していると見てよい。



図7 渦度分布(フェンス模型)



図8 渦度分布(倉庫模型)

(4)船舶に働く力

図9にフェンス模型の、図10に倉庫模型の背後 に船舶模型を配置したときの時間平均風荷重 F を 示す。建屋模型が無い場合の船舶に働く時間平 均風荷重 Foで規格化してある。横軸は建屋と係 留船舶の距離である。図中に「固定」とあるの は船舶を固定した場合の船舶に働く時間平均荷 重で、「動揺」とあるのは船舶を係留した場合の 係留ラインに働く力である。結果によれば、両 建屋模型とも固定時、動揺時とも建屋直背後の L<sub>b</sub>/d=4 では逆流が生じているため風荷重が負に なる。一方、船舶模型位置が建屋模型から離れて いくにつれ時間平均荷重は、増大して1に近づく ことが分かる。フェンス模型の場合では明らか に固定時よりも動揺時の方が風荷重が強いこと が分かる。しかし、倉庫模型では固定時と動揺 時との間には有意な差はない。なお、係留のバ ネ定数が変わっても船舶模型に作用する風荷重 がいずれのバネ定数の場合でもほぼ近い値を示 していることが分かる。



図 10 時間平均風荷重(倉庫模型) (3)風荷重の標準偏差

図 11 に船舶に作用する風荷重の標準偏差を 示す。縦軸は構造物が有る場合の風荷重の標準 偏差 Foであり、構造物が無い場合の風荷重の標 準偏差 Fm<sub>a</sub>0 で無次元化されている。図 7 と図 8 の結果を見ると、フェンス模型では倉庫模型よ りも渦が上昇していることなどの違いがあり、 このことから、図 11 に見られるようにフェン ス模型の場合の変動が倉庫模型の場合より大き くなる結果を与えている。その結果、建屋の高 さが同じでもその幅が違うと船にかかる風荷重 の変動の仕方が違うということが分かる。一方、 固定時の変動強度は、建屋なしの場合に対して、 約 1.5~2.5 倍と大きくなることが分かる。一方、動 揺時では、倉庫模型が約 1~5 倍、フェンス模 型が約 1~7 倍になり、フェンス模型は倉庫模 型より乱れの変動が強くなっている。動揺時は 固定時よりも荷重の変動が大きいことも分かる。 この結果から船舶の動揺は建屋背後で大きくなる 可能性があると言える。



図 11 変動風荷重の標準偏差

M-1

(4) 流速と風荷重

図 12 は倉庫模型がある場合とフェンス模型 がある場合について、船舶模型位置で船舶が無 い時の流速 ud に対して時間平均風荷重 F がど うなるのかを見たものである。ud は、水底から 構造物の高さ d までの平均流速であり、接近流 速 U で無次元化されている。図 12 を見ると、 船舶模型位置での流速が速くなっていくと風荷 重も大きくなっていく。即ち、船舶模型位置で の流速と風荷重には強い相関があると考えられ る。次に、図 13 は流速と船舶模型に作用する 係留荷重と風荷重の標準偏差の関係みたもであ る。これによると、動揺時の係留荷重は前例と 同様に強い相関があるが、固定時の風荷重は動 揺時の係留荷重に比べて相関が弱いと言える。



#### (5) Sway と Yaw の時間平均値

図 14 にフェンス模型設置時の Sway の時間 平均値、図 15 に倉庫模型設置時の Sway 時間 平均値を示す。建屋直背後の Lb/d=4 でバネ定 数によるその違いはそれほど無い。Lb/d が大き くなると揺れは大きくなるし、係留バネ係数が 小さいほど揺れは大きい Lb/d=6 では、Sway が 交差して、さらに、下流に行くほど差がはっき りと表れてくる。そこではバネ定数が小さけれ ば大きく揺れると言える。なお、図示していな いが Yaw は値が小さいので船舶は回頭運動し ていないと言える。



図 14 Sway の時間平均値(フェンス模型)



図 15 Sway の時間平均値(倉庫模型)

(6) Sway の標準偏差

図16にフェンス模型時の、また、図17に倉庫模 型時のSwayの標準偏差y。を示す。Lb/d=4では、 建屋両模型とも、あまり差はない。しかし、Lb/dが 大きくなるのにつれ差が大きくなる。倉庫模型は、 Lb/d=10で変化の仕方が変わる。これは、船舶模 型が逆流域から出た時に当たりそのことが原因に なっているのではないかと考えられる。Lb/d=18で は、フェンス模型は減少していくのに対し、倉庫模 型では、増加傾向にある。よって、フェンス模型、 倉庫模型では標準偏差の増え方に違いがある。



図 16 Sway の標準偏差(フェンス模型)



(7)固定時と係留時の風荷重の標準偏差の関係 図 18と図 19は、船舶動揺時の風荷重の標準偏 差 F<sub>oy</sub>と船舶固定時の F<sub>ok</sub>を示したものである。 図 18はフェンス模型時の、図 19は倉庫模型時 である。先に図 9 と図 10に見たように時間平 均風荷重が固定時と動揺時では若干差がみられ るが倉庫模型ではその差がほぼないと言える。 しかし、図 18 と図 19 から固定時と係留時の場 合で船舶模型と建屋模型が近い場合の標準偏差 の変化の仕方が大きく異なる。



図 18 風荷重の標準偏差の関係 (フェンス模型)

#### (8) スペクトル

図 20 にフェンス模型時の、図 21 に倉庫模型 時の Sway のスペクトルを示す。両図ともバネ 定数 0.012N/mm の場合の一例である。f は周波 数、P は Sway のパワーを表わしている。フェ ンス模型の方が倉庫模型に比ベパワーが大きい。 どちらの模型でも Sway の固有周期での揺れは 小さい。つまり、固有周期より小さい周波数で 揺れており、よってパワーが大きくなっている ことが分かる。その結果、外力の大小が Sway の大小に関わっていると考えられる。これによ れば建屋模型と船舶模型の距離が違うと揺れや すい周期が分かる。このようにスペクトルでみ ると揺れの様相が複雑であることが分かってく る。



図 20 スペクトル(フェンス模型)



図 21 スペクトル (倉庫模型)

4. 結言

風を避けるために建屋の背後に避泊する船舶 に、どのような風荷重がかかるのか実験的に調 べた。

ウィンドトンネルの代わりに開水路を使用した。水路上流に粗度を配置して 1/7 乗則の流場 を作り模型を配置した。

まず、建屋の背後の流速分布を調べた。その 結果、フェンス型建屋では、生成された渦がゆ っくりと上昇して行き、逆流域がフェンス高さ の約 10 倍まで伸びること、一方、箱形の倉庫 模型では渦が、地面に引き戻され、逆流域は建 屋高さの約 5 倍程度となる。

次に、船舶模型を配置し、船舶を固定した時 の風荷重と、係留したときの係留力を調べた。 その結果、時間平均荷重では、建屋の直背後付 近では船舶に引き戻す荷重が働くが、建屋と船 舶が離れるにつれ、船舶を押す力が増加した。 フェンスの場合、船舶を固定して計測した力よ りも動揺時の荷重の方が少し大きくなった。倉 庫の場合は両者に違いは見られない。

最後に、係留船舶のSwayを調べた。Swayの 動揺量は、船舶が建屋から離れるほど大きくな る。また、係留バネ力が小さいほど大きく揺れ る。

以上により、建屋背後の避泊では、建屋から 離れるほど風荷重の時間平均値が大きくなり、 揺れも大きくなることがわかった。

参考文献

- 鈴木博史・釣谷康(1990):港内係船船泊に 対する近接構造物の遮風効果把握のための 実験アプローチ、海洋開発論文集、VOL.6、 pp113-117
- 2) 平石哲也・本城 智・古川正美(1991):避 泊フェリーの係留張力と振れ回り運動、海 岸工学論文集、第38巻、pp.731-735
- 新井信一・高梨誠一・平山久(1991):岸壁係 留時に関する実船実測、海岸工学論文集、第 38巻、pp.741-745
- 佐藤昭人・我原弘昭(2006):漁船安全係留 のための間伐材を用いた防風柵の減風効果 について、海洋開発論文集、VOL.22、 pp343-348
- 5) Devenport,A.G.:The Relationship of Wind Structure to Wind Loading,Proc.Int.Conf.Wind Effects on Buildings and Structure(teddington),Her Majesty's Stationary Office,2003