

全天候バースにおける空気流動の特性

近藤 俣郎*, 渡部 靖憲**, 山上 佳範***, 杉岡 一郎****

1. はじめに

波浪に加え風雪などの厳しい気象条件下にある港湾では、年間を通じて安全で円滑な操船・荷役作業のできることは大きな課題である。このような背景から、新日本製鉄(株)室蘭製鉄所では、昭和62年および平成2年に荒天時にも荷役可能な全天候バースを建設し、現在まで高い稼働率を確保してきている(山上ほか, 1991)。

この全天候バースは、荒天待機要因となる雨・風・波浪に対し、海上部は屋根・壁により、海中部は鋼矢板によりバース内と外部を遮断し、船舶の動揺低減や荷役クレーンの荷振れ低減および作業者の労働環境維持を図っている。

しかし、全天候バースは構造上船舶の出入り口を除きほぼ密閉された状態となるため、進入波浪による水面変動によって建家内の空気圧が変動する。それにより、出入り口から出入する風が発生し、建家内の風速減衰特性や風圧特性を変化させ、係留船舶や荷役作業に支障を来すことも懸念される。

ここでは、このバース建家内の空気流動特性について理論解析と模型実験により検討したものである。

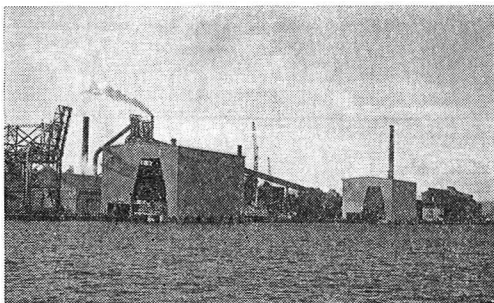


写真-1 新日鐵室蘭製鐵所の全天候バース

2. 空気流動理論

全天候バースを密閉された空気室とみなし、OWC式

* 正 会 員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
 ** 学生会員 北海道大学大学院 土木工学専攻
 *** 正 会 員 室蘭工業大学大学院後期建設工学専攻
 **** 工博 室蘭工業大学助教授 地域共同研究開発センター

波力発電ケーソンの空気流動の取扱い(小島ほか, 1983, 1984)に準拠して、波浪によって発生する風速を求め、さらに開口部から風が流入する時の圧力損失を導いた。

(1) 波浪による空気流動

入射波によって空気室内の水面が上下動し、これに伴って出入り口の空気が流出する。ここで、バース内の波浪を一定水面の昇降と想定し、出入り口を通じて流入する空気全体について、質量およびエネルギー保存の関係式を求めると次式のようになる。

(空気流出時)

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{P_a} \frac{dP_a}{dt} - \frac{V}{T_a} \frac{dT_a}{dt} + C_a A_n W = 0 \quad \dots(1)$$

$$\gamma \frac{dV}{dt} + \frac{V}{P_a} \frac{dP_a}{dt} + \gamma C_a A_n W = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

(空気流入時)

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{P_a} \frac{dP_a}{dt} - \frac{V}{T_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{T_a P_0}{P_a T_0} C_a A_n W = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\gamma \frac{dV}{dt} + \frac{V}{P_a} \frac{dP_a}{dt} - \gamma \frac{P_0}{P_a} C_a A_n W = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、下付 a は空気室内、 0 は外部をさし、空気は理想気体とする。

P : 空気圧, V : 空気体積, T : 空気温度,
 C_a : 開口比, A_n : 出入り口を通過する空気流面積,
 γ : 比熱比 ($=C_p/C_v$), W : 空気流の速度,

次に、バース建家内では空気圧・空気温度変化がほぼ0とみなし、バース内の水面波形を完全重複波で一様昇

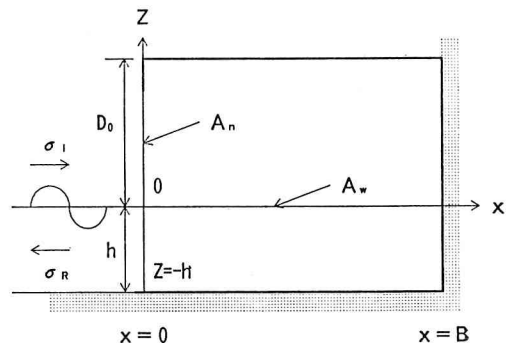


図-1 空気室の座標

降の振幅とすると、空気流の速度は次式のようになる。

$$W = \frac{H}{C_a \varepsilon B} \frac{L}{T} \frac{\cos \sigma t}{1 - S \sin \sigma t} \sin k B \dots\dots\dots (5)$$

H: 波高 L: 波長 T: 周期 B: パース奥行き

ε : パース開口部面積/パース内海水面積

S: (1-空気流面積)/開口面積

ここで、Sは微小項であり無視すると、最大風速 W_{max} は、次式のようになる。

$$W_{max} = \frac{H}{C_a \varepsilon B} \frac{L}{T} \sin k B \dots\dots\dots (6)$$

(2) 風吹き込み時の空気流動

(1)と同様の前提で、出入り口から空気流入のある場合の圧力損失係数を ξ とすると、質量およびエネルギー保存の関係より次式が成立する。

$$\frac{dP_a}{dt} = \frac{P_a C_a}{V} - \left(A_i W_i - \frac{T_a P_0}{P_a T_0} A_i W_i - \frac{dV}{dt} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} & \gamma C_a \frac{P_0}{P_a} A_i W_i - \gamma C_a A_0 W_0 \\ & = \frac{V}{P_a} \frac{dP_a}{dt} + \frac{dV}{dt} + \xi \gamma C_a A_0 W_0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで、下付 i は流入、0 は流出を示す。また、等温変化とみなす。

(7)・(8)式より、波のある場合の損失係数は次式になる。

$$\xi = \frac{A_i W_i}{A_0 W_0} \frac{P_0}{P_a} - \frac{1}{\gamma} + \frac{T_a P_0}{\gamma P_a T_0} - 1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma C_a A_0 W_0} \frac{dV}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

また、波のない場合は、空気室内の容積変化は微小とみなせるので次式のようになる。

$$\xi = \frac{A_i W_i}{A_0 W_0} \frac{P_0}{P_a} - \frac{1}{\gamma} + \frac{T_a P_0}{\gamma P_a T_0} - 1 \dots\dots\dots (10)$$

(3) 理論最大風速曲線

(6)式を用いて、任意の波長、周期および波高を与えた時のパース建家に入入りする理論最大風速について、開口比 $C_a=1.0$ の時を図-2に、 $C_a=0.6$ の時を図-3に示す。横軸の波長または周期と縦軸の波高の交点と実線で描かれた風速曲線から理論最大風速を読み取ることができる。

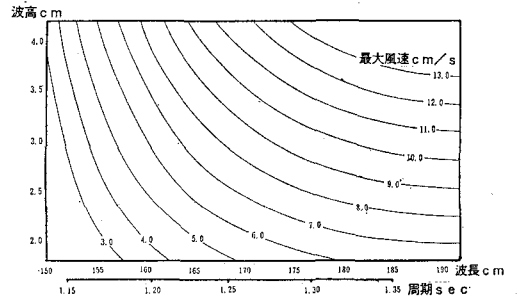


図-2 理論最大風速 ($C_a=1.0$)

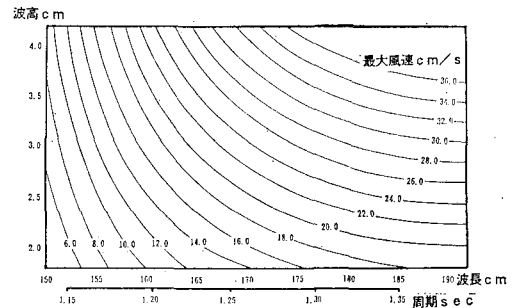


図-3 理論最大風速 ($C_a=0.6$)

3. 模型実験方法

(1) 実験装置

図-4に実験装置概要を示す。実験は、長さ18.5m、

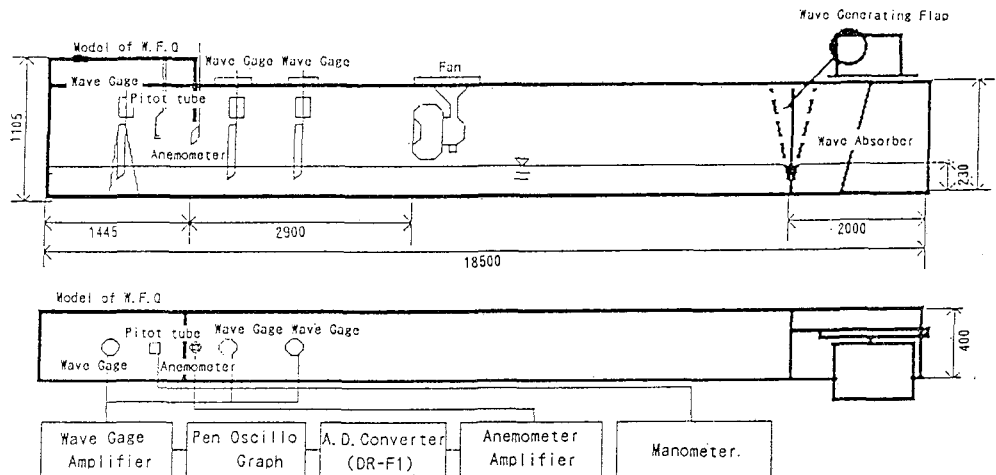


図-4 模型実験装置

幅 0.4 m, 深さ 1.0 m の二次元水槽で行った。水槽内部の端部に開口形状を単純化した縮尺 1/50 のバース建家模型を設置し, 他方の端部にフラップ式造波機を設置した。また, 水槽中央部に送風用としてプロペラ式扇風機を取り付けた。

風速測定は, 熱線式微風計を用い A/D 変換しフロッピディスクに記録した。波高測定は, 容量式波高計を用い 1 台をバース内に 2 台を水路途中に設置し, 風速と同時にフロッピディスクに記録した。圧力測定は, ビーター管を用い, マノメータと接続して読み取った。また, 圧力損失の算出に必要な空気の流れ面積を求めるため, 開口部にタフトを取り付け, ビデオカメラ撮影し, 風向測定を行った。

(2) 実験ケース

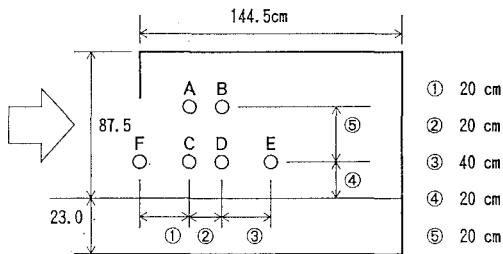
実験波の諸元を表一に示す。現地水深は 11.5 m(室蘭港の HWL 下) を対象とし, 模型水深は 23 cm(縮尺 1/50) とした。

全天候バースでは, 強風時に船舶出入りに透過率 60% のネットを降ろすため, 風の出入りする面積は狭くなる。この面積の変化による空気流動特性を調べるため, 模型の開口部を部分的に塞げようとした。

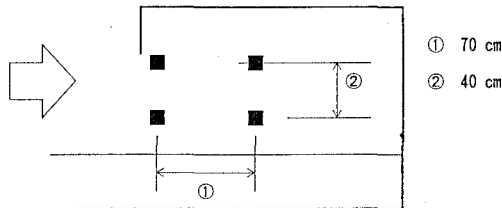
実験では, 開口部全体の面積に対する塞がれていない部分の面積の割合を開口率として, 開口率 100%, 80%, 60% の 3 ケースについて, 以下に示す実験を行った。

表一 模型実験の実験波諸元

諸元	波高 (cm)	周期 (sec)
模型	1.0, 2.0, 3.0, 4.0	1.1, 1.2, 1.3, 1.4
実物	50, 100, 150, 200	7.8, 8.5, 9.2, 9.9



図一五 風速測定点



図一六 圧力測定点

a) 風速特性

表一に示す実験波に対して, バース内の風速を測定した。流入する風の向きは開口面と直角方向で, 風速は一定とし, 風のある場合とない場合の 2 ケースを測定した。風速測定点は, 内部風速分布をみるため, 図一五に示す点とした。

b) 圧力特性

圧力は, 予備実験より波の諸元に関する差が小さいことから, 実験波は周期 1.4 秒, 波高 4.0 cm の場合のみとし, 波のある場合とない場合の 2 ケースとした。測定点は, 図一六に示す 4 点とした。

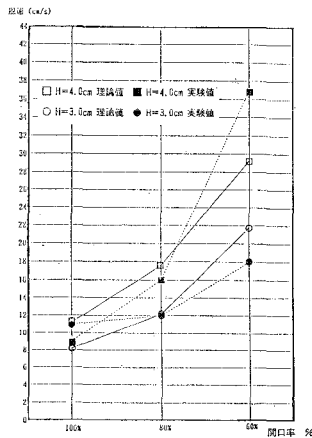
c) 風向特性

b) と同じ実験波に対し, 波のある場合とない場合および風のある場合とない場合の計 4 ケースを行った。

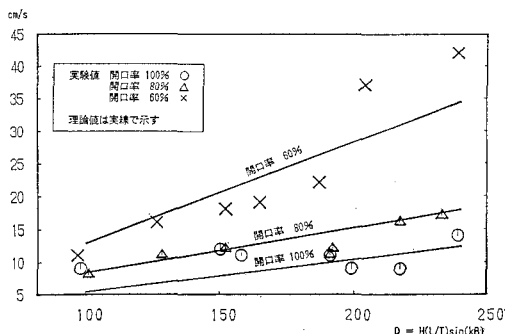
4. 結果と考察

(1) 波浪による開口部の風速

開口率をパラメータとしたバース開口付近の風速について実験値と理論最大風速値を比較したものを図一七に示す。これによると, 波高および周期が大きいほど風速は大きくなり, 開口率の 2 乗に比例する傾向にあることがわかった。



図一七 波浪によって発生する風速 (周期 1.3 秒)



図一八 波浪による風速の実験値と理論値

次に、式の波に関する項 $H(L/T) \sin k B$ を D とおき、この D に対する風速をグラフ化したものを図-8に示す。これによると、 D が大きくなるほど風速は大きくなり、波浪によりパース建家内が不安定な状態にあることがわかった。

風速の大きさについては、理論値と実験値もほぼ同じであるが、開口率 100% の $D=100\sim 150$ の時と、開口率 60% の $C>200$ で実験値にずれがあった。前者については、風速が小さいレベルのため、水槽内で常時発生する $1\sim 5\text{ m/s}$ の微風に影響されているものとする。また、後者については、開口率を小さくすると水位変化に対する等温圧縮作用が顕在化し、理論上の仮定 $dP_a/dt=0$ が成立しなくなるためとする。

(2) 風が流入する時の風速分布

図-9 に外部から流入する風速 1.0 をとして、内部の風速減衰率分布を示す。これによると、波なしより波ありの方が風速減衰率が小さく、建家内の風速が同測定点で約 2 倍であることがわかった。また、パラメータ D が大きいほどこの傾向が大きいことがわかった。さらに、開口率の大きいほど減衰勾配が緩く、建家奥まで減衰しにくいことがわかった。

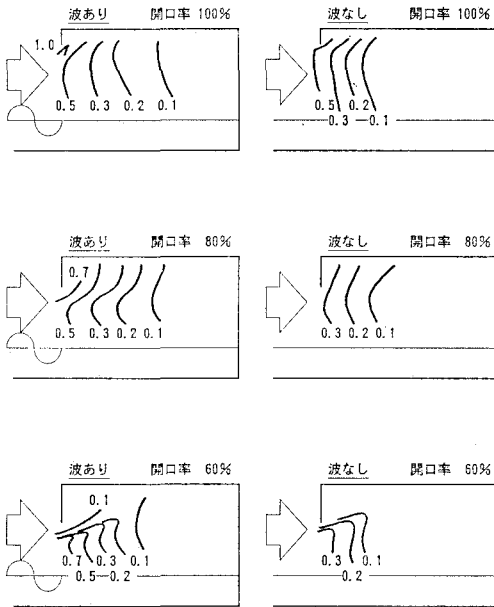


図-9 建家内部の風速減衰率分布

(3) 風が流入する時の圧力分布

図-10 に開口率を変化させた時の圧力分布を示す。これによると、内部圧力は比較的空気流動の自由な開口部付近より内部の方が高く、開口率が大きいほどその差は大きいことがわかった。さらに、初期風速を小さくすると開口部と内部の差はほとんどないことがわかった。これは、空気の流入により建家内の空気が圧縮されるため

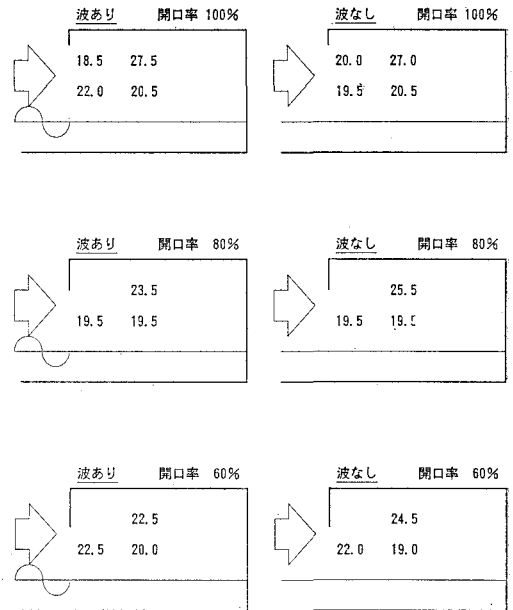


図-10 建家内部の風圧分布 (mm) $1\text{ mm} \approx 3.3\text{ g/cm}^2$

と考える。波ありとなしを比較すると、若干波ありの方の圧力は高く、水面変動によるもの考えられる圧力値の変動がみられた。

(4) 風が流入する時の風向分布

開口部には流入する空気と流出する空気の境界線が形成されるが、この境界線は水面変動しないことがわかった。また、表-2 に示すように、強風が流入する場合、流入断面積と流出断面積は開口率によってほぼ決まり、波浪の有無の影響が小さいことが知れた。

表-2 流入断面積比と風速比

開口率	100%			80%			60%		
初期風速	3.2m/s	2.6	1.5	3.2m/s	2.6	1.5	3.2		
A_0/A_1	0.89	0.86	0.71	0.68	0.55	0.43	0.33		
W_0/W_1	0.60	0.56	0.84	0.50	0.50	0.44	0.42		

(5) 風が流入する時の圧力損失

以上の実験結果から、(10)式によって風の流入から流出までの損失係数を求め、開口率で比較したものを図-11に示す。また、これと対比するため、初期風速に対する内部風速の割合を図-12に示す。図-11によると、損失係数は W_0/v (v : 初期風速) が小さいほど、また開口率が小さいほど大きくなる。また、開口率が 60% では W_0/v による差はほとんどない。一方、図-12をみると、開口率が小さいほど内部風速は小さくなり、開口率 60% では初期風速 v に関係なくかなり小さい値をとっており、図-11と逆の形となっている。これより、エネルギー損失が内部風速に影響していることがわかった。

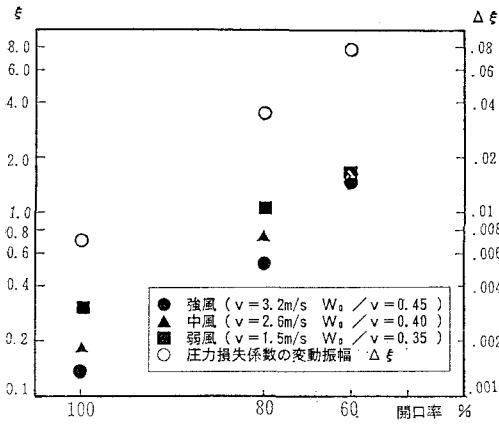


図-11 損失係数および波による損失係数の変動

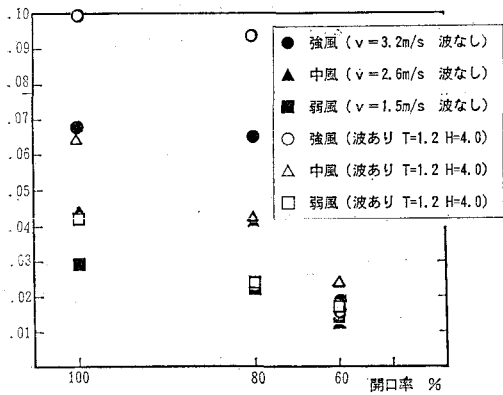


図-12 初期風速に対する内部風速比

また、図-11に示す損失係数の変動は、開口率が小さくなるほど変動振幅は大きくなることがわかった。これは開口部が小さくなるほど、空気は自由な移動ができず、さらに波による圧縮吸収作用を受けるためと考える。

5. まとめ

全天候バース内の空気流動特性について、理論解析お

よび模型実験から次の特性が明らかになった。

(1) 波浪によるバース建家内部の空気の状態

波高および周期を大きくするほど開口部の風速は増加し、開口部を小さくすると2乗に比例して増加する傾向がみられた。また、波に関するパラメータ D が大きいほど風速が大きくなり、内部空気は不安定な状態になる。

(2) 風流入時の風速分布

波浪のある場合がない場合より風速減衰率は小さく、開口率が大きいほど減衰勾配は緩いことがわかった。

(3) 風流入時の風圧分布

出入り口付近より内部圧力が高く、開口率が大きいほどこの傾向の差は大きい。また、波のある方が若干圧力は高く、圧力値の振動がみられた。

(4) 風流入時の風向分布

波の有無に関わらず、空気の流入面積は開口率によりほぼ決まる。

(5) 風流入時の圧力損失係数

圧力損失係数は、 W_0/v が小さいほど、開口率が小さいほど大きい。さらに波浪のある場合は圧力振幅と同様に振動がみられ、開口部が小さくなるほど振幅値が大きくなる傾向にある。

尚、現在、理論および模型実験の検証のため、全天候バースにて風速風圧等の現地観測を実施している。

参考文献

山上佳範・矢崎 尚・近藤淑郎 (1991): 全天候バースのよる荷役稼働率向上性の研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 966-970.
 小島朗史・合田良実・鈴木諭司 (1983): 波力発電ケーソン空気出力効率の解析, 港技研報告, 第22巻3号, pp. 125-148.
 小島朗史・高橋重雄・合田良実 (1984): 波力発電ケーソン防波堤の水理特性, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 163-173.