

コンテナヤードにおける空コンテナの耐風性について

著者	庄司 邦昭 , 三田 重雄
雑誌名	東京商船大学研究報告. 自然科学
巻	54
ページ	71-94
発行年	2003
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000570/

コンテナヤードにおける空コンテナの耐風性について

庄司 邦昭・三田 重雄

On the stability of empty container by wind force at the container yard

Shoji Kuniaki, Mita Shigeo

Abstract

Accidents involving empty containers scattered by wind forces are matter of prime concern in container yards, Authors investigated the stability and safety measures of empty containers during wind force at the container yard by model experiments. Stacked models of 40 feet container were used for investigation of wind pressure distribution, wind force and moment. The wind velocity at which containers begin to slide is calculated by analytical and experimental techniques. It is found that both methods yield similar results.

1. 序

近年、我が国のコンテナヤードにおいてはコンテナ取扱量の増加により、コンテナの蔵置スペースを確保する必要性が高まってきた。そのためにコンテナヤードの大規模な増築と、土地利用効率を高める方策が検討されている。この対策の一つとしてコンテナの積み付け段数の増加が考えられている。しかしコンテナの積み段数が増加した場合の事故例も報告されており、その安全性について把握しておくことが、コンテナヤードを管理する上で重要なことであると言える。

従来より、コンテナヤードに蔵置された空コンテナの強風による飛散問題については、発生した事故をもとに、その重要性が述べられており、すでに、20ft ドライコンテナについては、その耐風性に関する模型実験が行われ、その結果が研究成果として報告されている^{(1),(2),(3)}。しかし、40ft コンテナについて風力係数を計測し、その結果にもとづく耐風性の研究はまだ行なわれていない。近年の全コンテナ取扱量に各コンテナが占める割合は、40ft コンテナ (58%)、20ft コンテナ(37.6%)、40ft コンテナよりも長尺なもの(3.7%)、その他のコンテナ(0.7%)の順となっており、このことから、40ft コンテナについて、積み段数を変化させた場合の、その耐風性に関する研究が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、20ft ドライコンテナについての耐風性に関する模型実験結果を参考にして、ハイ・キューブ型の 40ft 空コンテナに対して本学風洞実験水槽において、風圧力分布測定実験、風力測定実験、そして、滑動開始風速測定実験の3種類の模型実験を行い、耐風性に関する基礎的な研究結果について考察した。

2. 測定方法

2.1 風圧力分布測定実験

風圧力分布測定実験では構造物に作用する風により引き起こされる構造物表面の圧力分布を測定した。構造物に作用する圧力は、風洞実験において図 2.1 のように構造物の模型表面の各点に作用する圧力 (P) と風洞内の基準静圧 (Ps) の差として計測した。この差圧を測る方法として、本実験では差圧計を用いて、高压側に模型表面からの圧力を、低压側に基準静圧を導き、その圧力差を読み取った。

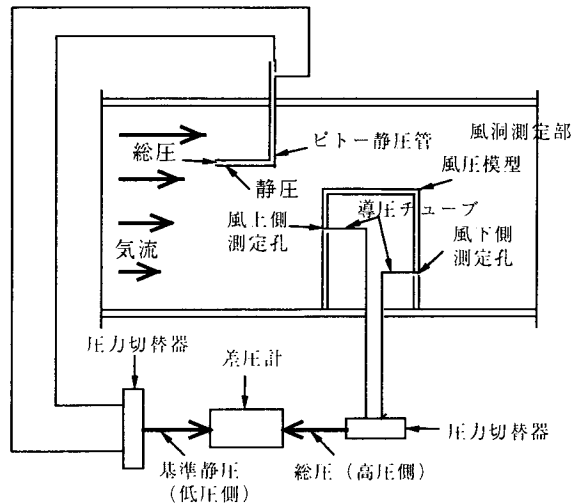


図 2.1 風圧力の測定方法

2.2 風力測定実験

風力測定実験においては、構造物全体に作用する力を測定した。本実験では、3 分力を測定することができるロードセルを用いて、コンテナの横方向の力 (横力:D) とコンテナの水平面に直角上向きの力 (揚力:L) およびコンテナ長さ方向の軸周りのモーメント (転倒モーメント:Mp) を測定した。図 2.2 に測定した風力の成分を記す。

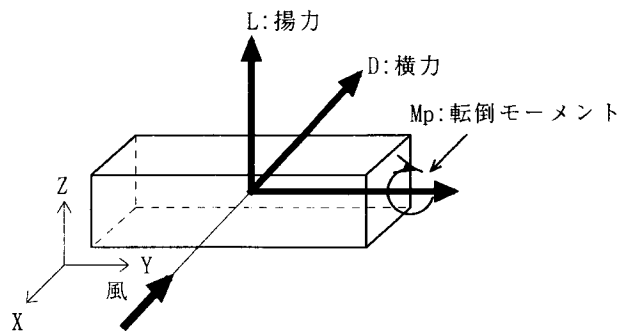


図 2.2 コンテナに作用する風力とモーメント

風力は一般に次式で表現できる。

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C \cdot A \quad (2.1)$$

ここに、 F :風力(kgf)、 ρ :空気密度(kg·sec²/m⁴)、 V :風速(m/sec)、 C :風力係数、 A :代表面積(m²)、である。ここに代表面積 $A=L \times H$ 、ただし、 L =コンテナ長さ、 H =コンテナ高さとした。

また、風力係数およびモーメント係数は次式で表現できる。

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (2.2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot l} \quad (2.3)$$

ここに、 F :風力(kgf)、 ρ :空気密度(kg·sec²/m⁴)、 V :風速(m/sec)、 C :風力係数、 A :代表面積(m²)、 l :モーメント中心から風力作用点までの距離(m)、 M :モーメント(kgf·m)である。

風力係数の場合、式(2.2)の F に図 2.2 の D 、 L 、を代入し、転倒モーメント係数の場合は式(2.3) の M に M_P を代入し、次のようになる。

$$\text{横力係数: } C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (2.4)$$

$$\text{揚力係数: } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (2.5)$$

$$\text{転倒モーメント: } C_{M_P} = \frac{M_P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot l} \quad (2.6)$$

ここに、 D :横力(kgf)、 L :揚力(kgf)、 M_P :転倒モーメント(kgf·m)、 C_D :横力係数、 C_L :揚力係数、 C_{M_P} :転倒モーメント係数、 ρ :空気密度(kg·sec²/m⁴)、 V :風速(m/sec)、 A :代表面積(m²)、 l :モーメント中心から風力作用点までの距離(m)、である。

2.3 滑動開始風速測定実験

風的作用を受けて被害、事故が起こる場合、それらの事故は風の力による滑動、転倒、変形、あるいは振動などに分類できる。その中で、この実験においては、空コンテナの転倒問題において、主たる要因といえる滑動開始風速について、風洞水槽の測定部の様子を、側面にあるガラス壁面から真横に設置した CCD カメラを用いて測定した。

力の釣り合いという点から考えると、構造物に働く滑動風力（水平力）と、抵抗力との力の釣り合いは次式で表現できる。

$$F_D = (W - F_L) \cdot \mu \quad (2.7)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A \quad (2.8)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot A \quad (2.9)$$

ここに、 F_D :横力(kgf)、 C_D :横力係数、 F_L :揚力(kgf)、 C_L :揚力係数、 ρ :空気密度(kg・sec²/m⁴)、 V :滑動開始風速(m/sec)、 A :代表面積(m²)、 μ :摩擦係数、 W :重量(kgf)である。

式(2.7)に式(2.8)、(2.9)をそれぞれ代入し、滑動開始風速についてまとめると、次式のようになる。

$$V = \sqrt{\frac{W \cdot \mu}{1/2 \rho \cdot (C_D \cdot A + \mu \cdot C_L \cdot A)}} \quad (2.10)$$

3. 実験装置

3.1 供試模型

40ft ドライコンテナの空コンテナ単体についての耐風性に関する基礎的研究として3種類の実験を行った。本節では、それぞれの実験において使用したコンテナ模型について説明する。また、今回の実験において使用したコンテナ模型のモデルとなった実物コンテナの主要寸法および重量は図 3.1 に示すように、全長 $L_c=12.192\text{m}$ 、全高 $H_c=2.896\text{m}$ 、全幅 $B_c=2.438\text{m}$ 、重量 $W_c=3.8\text{ton}$ である。

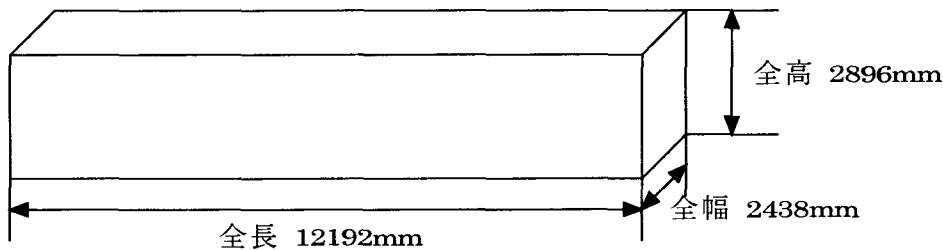


図 3.1 実物コンテナの主要寸法

(1) 風圧力分布測定実験

風圧力分布測定実験に使用したコンテナ模型として、写真 3.1 に示すように縮尺 1/20 の上下 2 段構成の亚克力板製模型で上部コンテナの模型表面に圧力導入用の測定孔を多数設けたものを用意した。その模型の上部、下部それぞれのコンテナ各面についての主要寸法と測定孔の配置について表 3.1 および図 3.2~3.4 に記す。

表 3.1 コンテナ模型の主要寸法 (風圧力分布測定用)

	実物	模型	備考
全長	12192	609	
全高	2896	143.6	縮尺1/20
全幅	2438	112.3	

単位 : mm

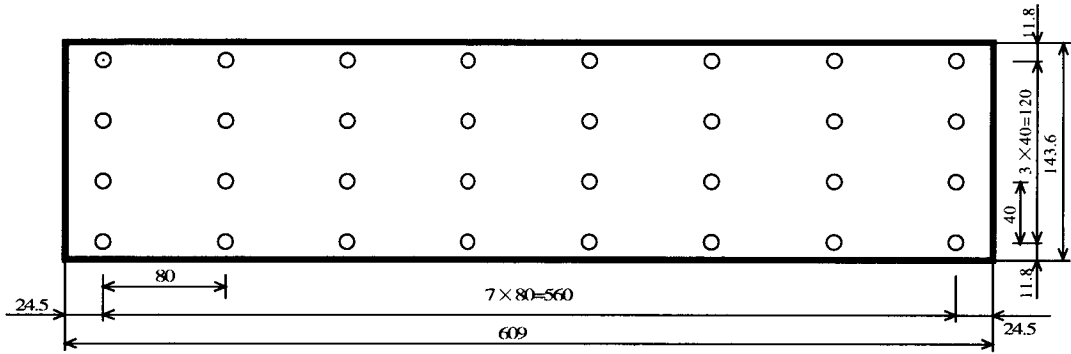


図 3.2 正面部分の風圧力測定孔の配置

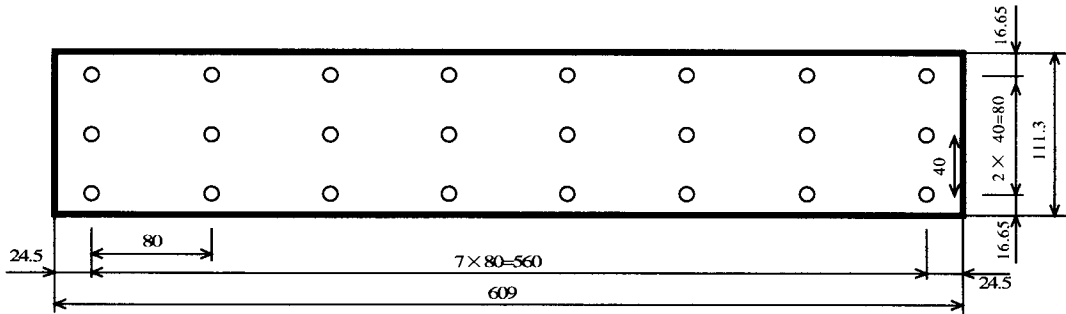


図 3.3 上面部分の風圧力測定孔の配置

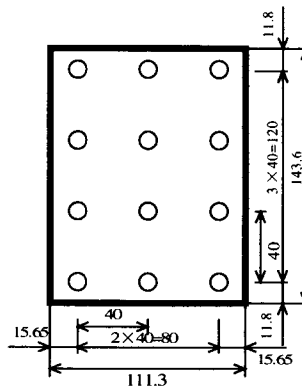


図 3.4 側面部分の風圧力測定孔の配置

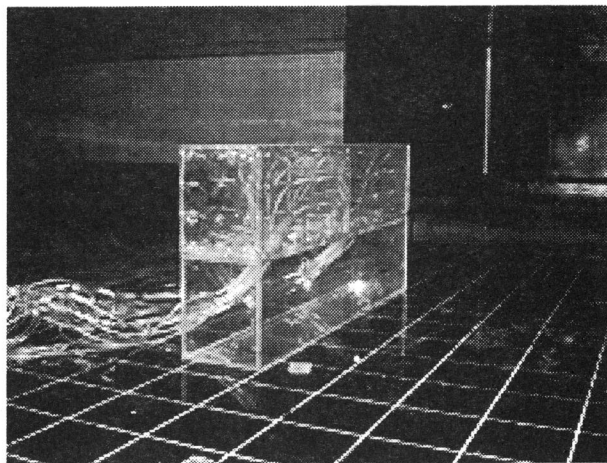


写真 3.1 アクリル板製コンテナ模型（風圧力分布測定実験）

(2) 風力測定実験

風力測定実験に使用するコンテナ模型として、写真 3.2 に示すような上下 2 段構成のアクリル板製模型で、その下部の中央位置にロードセルを取り付けたものを用意した。上、下部それぞれのコンテナの主要寸法については、風圧力分布測定実験に使用したのと同じである。

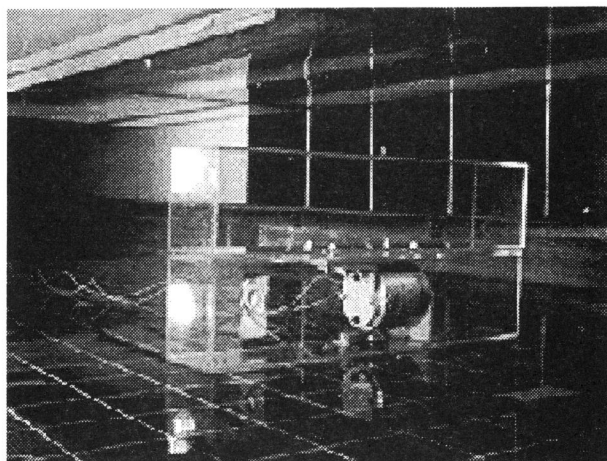


写真 3.2 アクリル板製コンテナ模型（風力測定実験）

(3) 滑動開始風速測定実験

滑動開始風速測定実験に使用するコンテナ模型として、表 3.2 及び写真 3.3、3.4 に示すように実物コンテナに対し縮尺 1/20、1/40 のウレタンフォーム製模型を作製した。

表 3.2 コンテナ模型の主要寸法 (滑動開始風速測定実験)

	縮尺1/20模型	縮尺1/40模型
全長	609	304.5
全高	143.6	71.8
全幅	112.3	56.15
重量	0.5	0.06

単位 : mm、kg

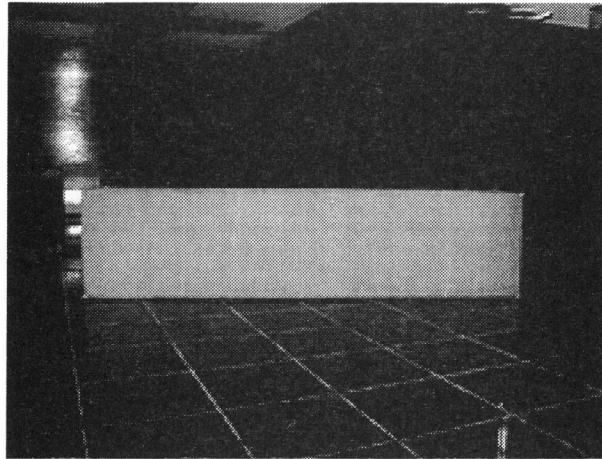


写真 3.3 縮尺 1/20 硬質ウレタンフォーム製コンテナ模型 (滑動開始風速測定実験)

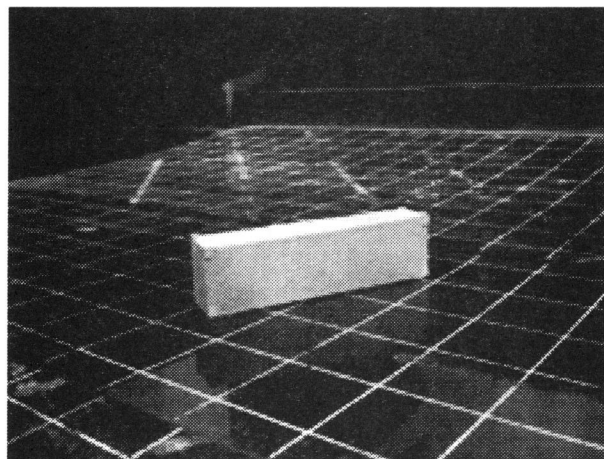


写真 3.4 縮尺 1/40 硬質ウレタンフォーム製コンテナ模型 (滑動開始風速測定実験)

3.2 風洞水槽

実験は図3.5に示す風洞水槽を使用した。

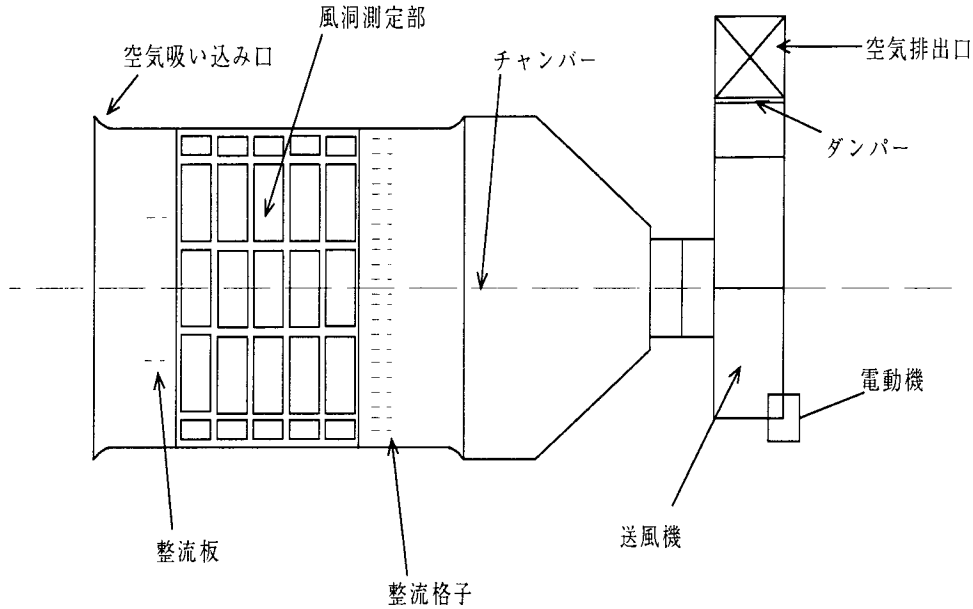


図3.5 風洞実験水槽の概要（平面図）

風洞水槽の要目は次のとおりである。

風洞	長さ×幅×高さ	5.5m×4.0m×0.5m
	風速範囲	約0.5～7.0m/sec（建造当時）
水槽	長さ×幅×高さ	5.5m×4.0m×0.5m
送風機	（ミツヤリミットロードコノイダルファンLL型）	
	風量	940m ³ /min
	回転数	520rpm
電動機	（東芝三相交流モートル）	

3.3 実験台の設置

今回の実験に先立ち、風洞水槽の測定部における風速の垂直分布を風速計を用いて測定した。その結果を図3.6に示す。結果を見ると、水槽底面から離れるほど風速が大きくなることがわかった。その理由としては、風洞の吹き出し口の高さが底面より72cm高く、測定部の底面に対して風が吹き下ろすためであることが考えられる。そこで、上下方向に一定の風速を得るために、図3.7に示すように高さ30cm、幅30cm、長さ100cmの台座を用意し、風洞測定部の底面に配置しその上にアクリル製の板を乗せて、底面の底上げを行った。

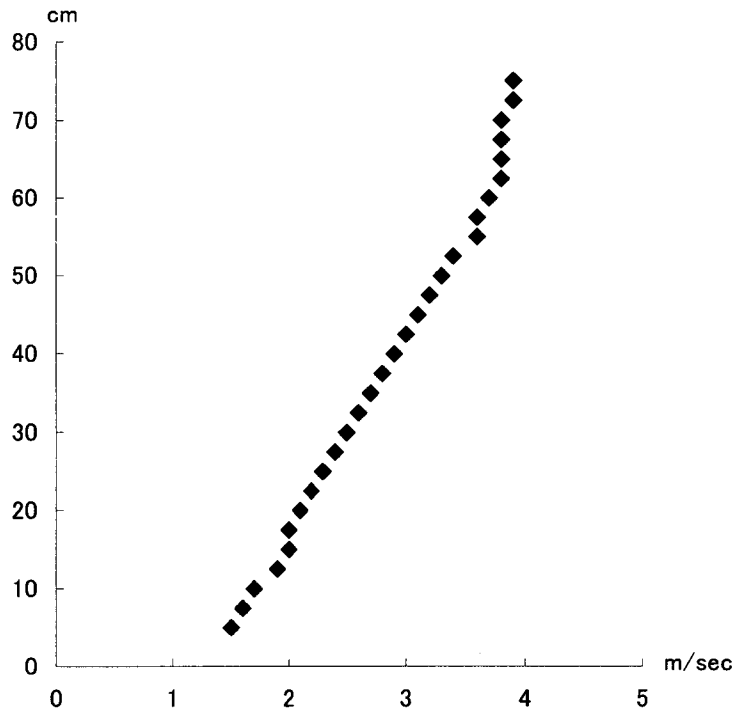


図 3.6 風洞測定部における風速の垂直方向分布

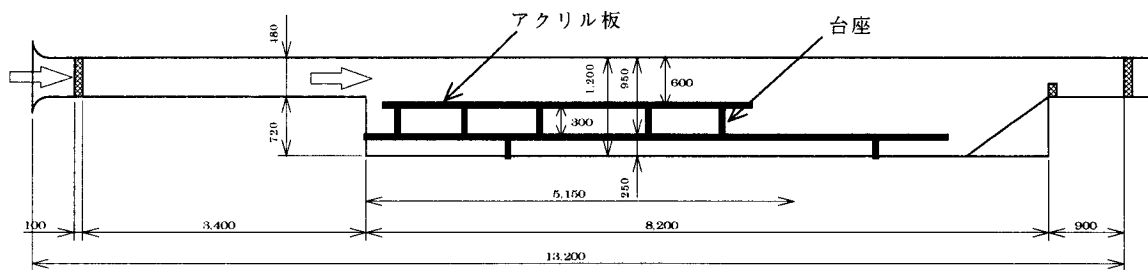


図 3.7 実験台の設置状況

3.4 ロードセル

本実験で使用したロードセルは、 F_x (X 方向：コンテナ横方向風力)、 F_y (Z 方向：コンテナ揚力方向風力) の容量が 5kgf、 M_z (転倒モーメント) が 2kgf・m、測定の精度は容量の 1/1000 まで表示される。今回の実験において電圧から風力への換算のための較正值は表 3.3 のようになった。

表 3.3 電圧から荷重への換算

	揚力	横力	転倒モーメント
較正值	6.673592 (kg/V)	7.233736 (kg/V)	1.803347 (kg・m/V)

3.5 差圧計

今回行った風圧力分布測定実験において、構造物表面に作用している圧力は、模型表面に作用する圧力（全圧）と風洞内の基準静圧の差として与えられる。そこで本節では、模型表面にある圧力測定孔から得られる全圧と、風洞内の基準静圧をそれぞれ差圧計まで導く方法について述べる。

風圧力測定が行われる場合、構造物模型の表面には圧力導入用の測定孔が多数設けられる。構造物表面の局所的な圧力を測定するために、それぞれの圧力測定孔からビニールチューブのような導圧管を用いて差圧計まで圧力を導いて圧力測定を行うのが一般的である。今回は、差圧計が一つに対して、圧力測定孔が多数あるため圧力切換器を用いて、差圧計への導圧管を手動により切り替えて測定を行った。

風洞内の基準静圧を測定するために、模型の天井高さの位置にピトー静圧管を設置して、風洞内の基準静圧を測定し差圧計へ導いた。

3.6 測定機器

本実験において使用した測定計器は下記の通りである。

- (1) 風速計 ANEMOMASTER-6141 日本科学工業
- (2) 3分力ロードセル LMC-3504-5 和泉測器
- (3) 差圧計 GC62 デジタル微差圧計 長野計器
- (4) ピトー静圧管 LK-6 岡野製作所
- (5) 動歪み増幅器 6M47-6 日本電機三栄
- (6) デジタルレコーダ DR-F2 TEAC
- (7) ペンレコーダ WR3701 グラフテック

4. 風洞実験

本実験におけるコンテナ模型の配置方法についての説明をすると図4.1のようになる。

今回の実験では、風圧力分布測定実験では、縦列数は1列とし、横列数は1列と5列の2パターンとし、積み段数は2段と5段の2パターンとした。風力測定実験では、縦列数は1列とし、横列数は1列から6列まで変化させ、積み段数は2段から4段まで変化させた。滑動開始測定実験では、縦列数は1列とし、横列数は1列から6列まで変化させ、積み段数は1段から5段まで変化させた。

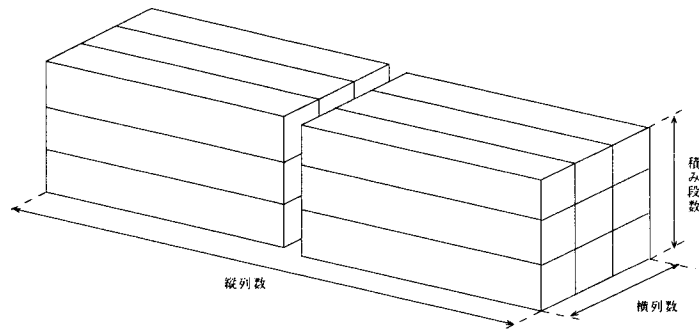


図4.1 コンテナ模型の配置方法

4.1 風圧力分布測定実験

4.1.1 実験条件

実験の項目は、次の2つである。

はじめに、縦列数1、横列数1の場合において、積み段数を2段積み上段のコンテナに対し、風速を5.0m/sec、風向を真横(0°)とした場合の風圧力分布測定実験を行った。

次に積み段数を5段として、縦列数1、横列数5の場合において、最上段最前列コンテナと最上段最後列コンテナに作用する風圧力分布をそれぞれ測定した。風速は5.0m/sec、風向は真横(0°)とした。

4.1.2 実験結果

圧力測定孔より得た風圧力を速度圧を基準とした値に直し、その値をもとにしてコンテナ各面の風圧力分布図を作成した。作成した分布図は次のとおりである。

2段積み上段前面の風圧力分布：図4.2

2段積み上段後面の風圧力分布：図4.3

2段積み上段上面の風圧力分布：図4.4

5段積み5列、最上段、最前列、前面の風圧力分布：図4.5

5段積み5列、最上段、最前列、後面の風圧力分布：図4.6

5段積み5列、最上段、最前列、上面の風圧力分布：図4.7

5段積み5列、最上段、最後列、前面の風圧力分布：図4.8

5段積み5列、最上段、最後列、上面の風圧力分布：図4.9

5段積み5列、最上段、最後列、後面の風圧力分布：図4.10

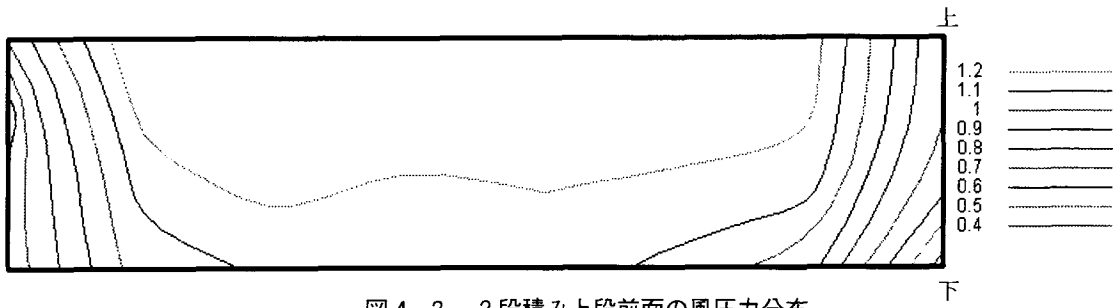


図 4.2 2 段積み上段前面の風圧力分布

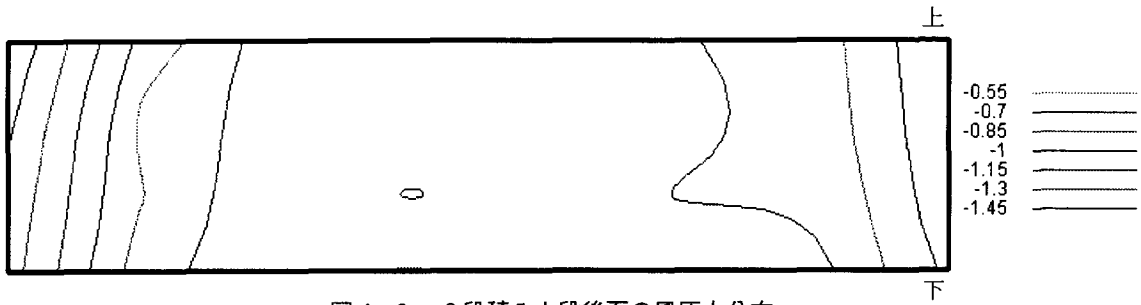


図 4.3 2 段積み上段後面の風圧力分布

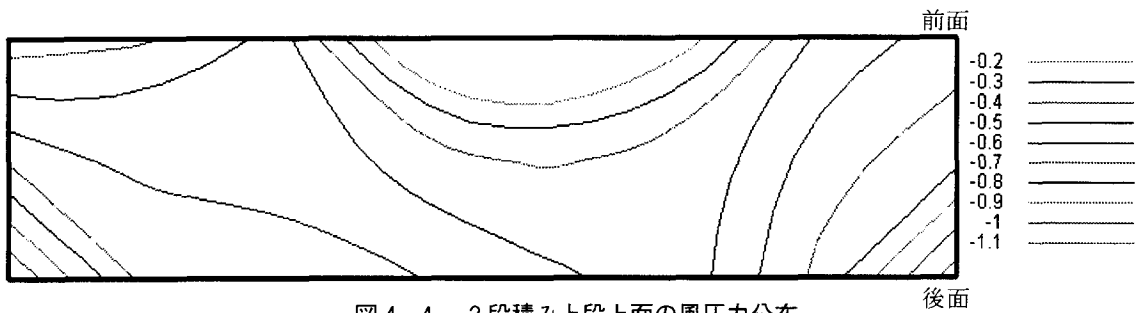


図 4.4 2 段積み上段上面の風圧力分布

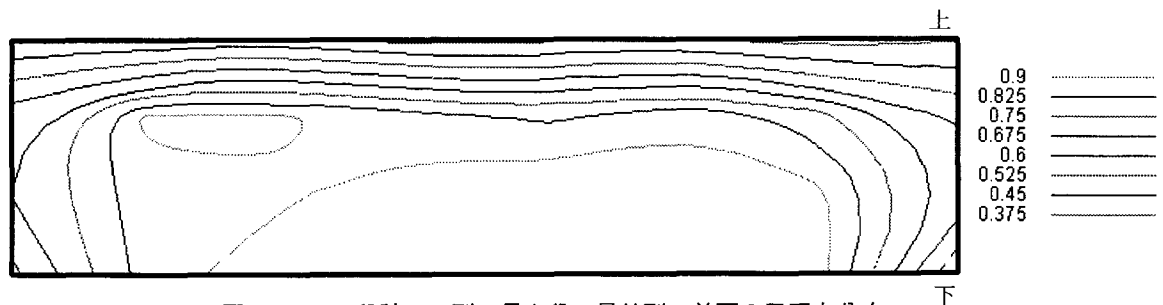


図 4.5 5 段積み 5 列、最上段、最前列、前面の風圧力分布

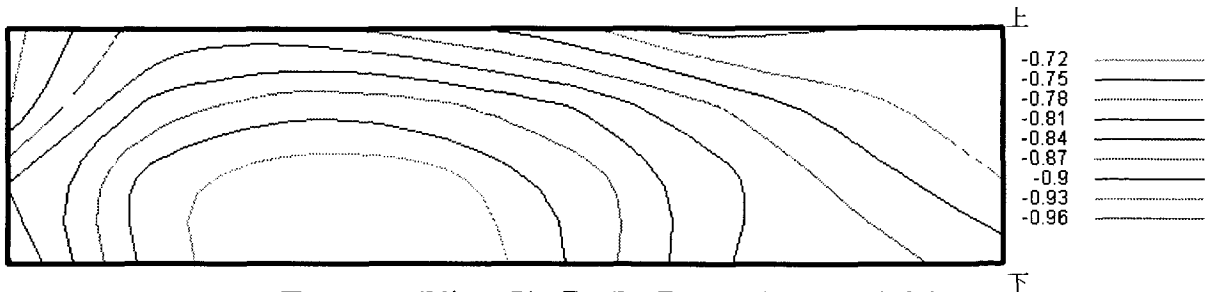


図 4.6 5 段積み 5 列、最上段、最前列、後面の風圧力分布

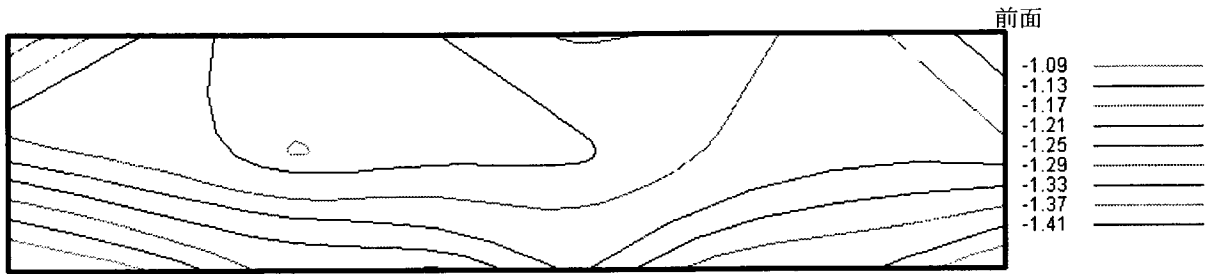


図 4.7 5 段積み 5 列、最上段、最前列、上面の風圧力分布



図 4.8 5 段積み 5 列、最上段、最後列、前面の風圧力分布



図 4.9 5 段積み 5 列、最上段、最後列、上面の風圧力分布

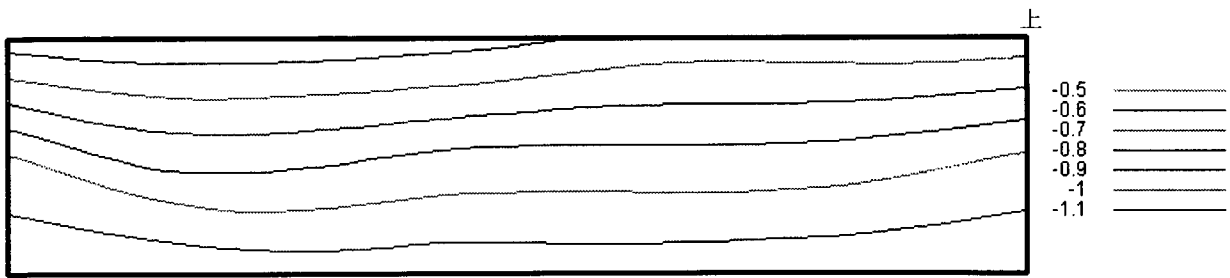


図 4.10 5 段積み 5 列、最上段、最後列、後面の風圧力分布

4.2 風力測定実験

4.2.1 実験条件

実験台上にコンテナ模型を配置し、そこに一様流を当てた場合に、コンテナ模型に作用した風力を、模型の下段内部の長さおよび高さの中央に取り付けたロードセルを用いて測定し、動歪み増幅器で増幅し、デジタルレコーダで記録した。

実験の項目は、次の2つである。

(1) 積み段数別による測定

積み段数の影響をみるための測定については、縦列数1、横列数1の場合、2段積み上段、3段積み上段、4段積み上段の3パターンとし、また、横列数の影響がある場合として、1列から6列まで変化させて各列数における最前列（風上側）と最後列（風下側）それぞれについて風力を測定した。このときの風向は $\theta=0^\circ$ とした。

(2) 相対風向別による測定

コンテナ模型の受ける風の角度を長手方向に直角に当たる風を $\theta=0^\circ$ として $\theta=90^\circ$ まで15度毎にコンテナ模型の向きを変化させて、横列数1の場合について、積み段数を2段積み、3段積み、4段積みとして、各最上段のコンテナについての相対風向別による風力を測定した。

風速は、3m/sec（実物約13.4m/sec）、4m/sec（実物約17.9m/sec）、5m/sec（実物約22.4m/sec）、6m/sec（実物約26.8m/sec）、7m/sec（実物約31.3m/sec）の5段階に変化させて測定を行った。

4.2.2 実験結果

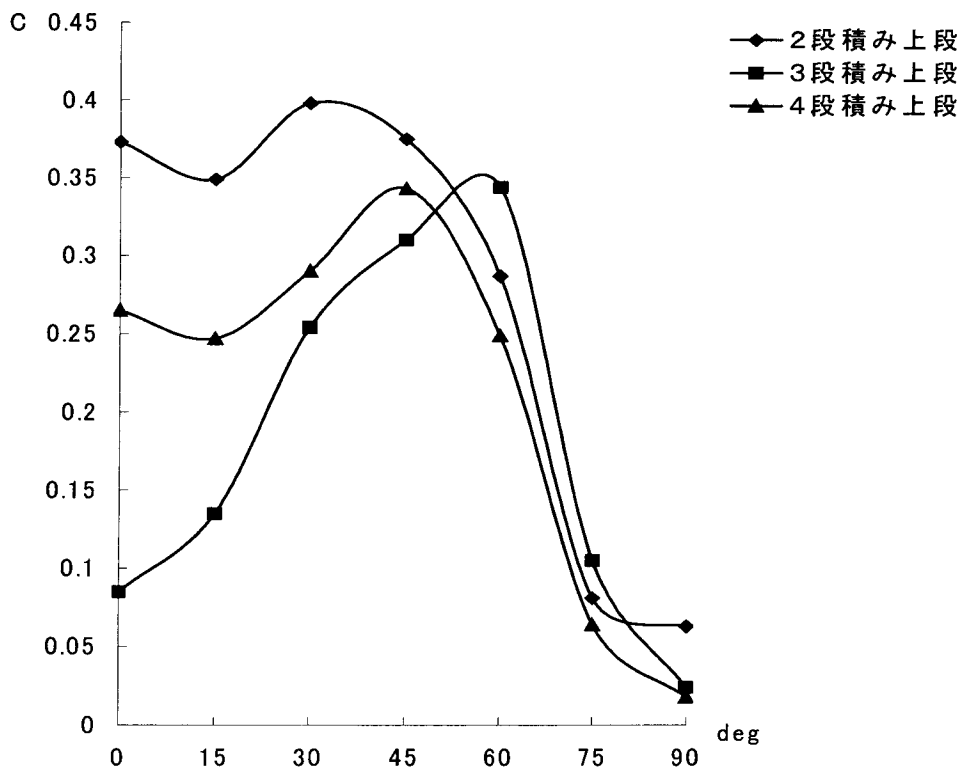


図4.11 横列数1のときの風向別揚力係数

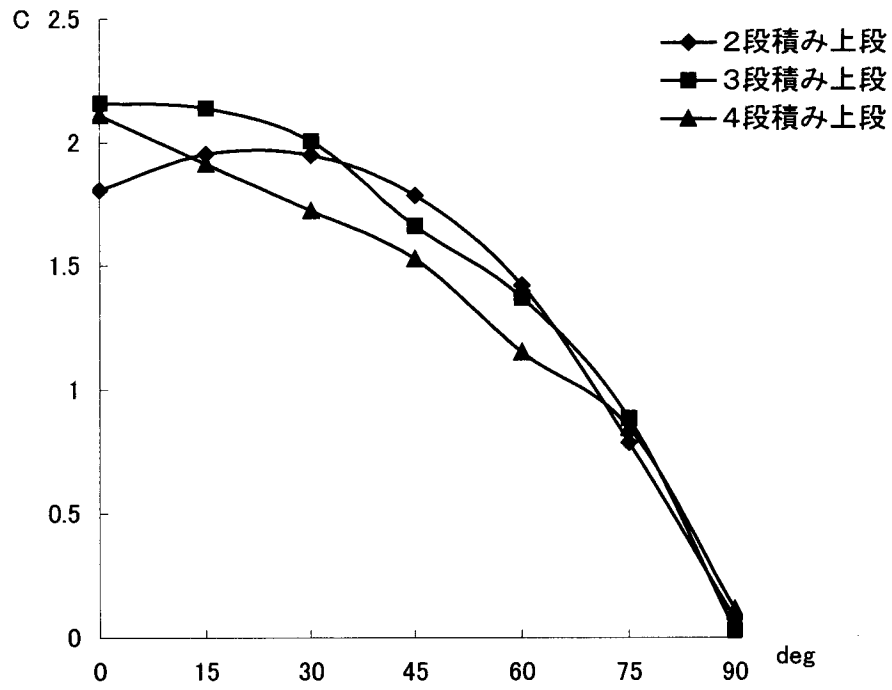


図 4.12 横列数 1 のときの風向別横力係数

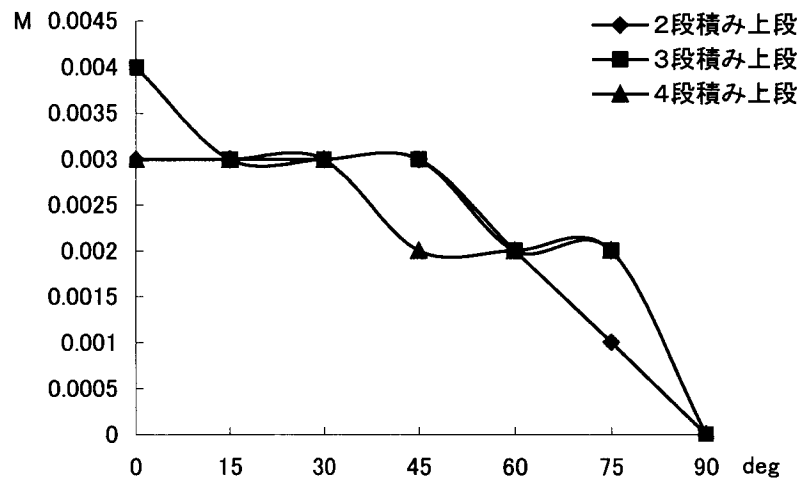


図 4.13 横列数 1 のときの風向別転倒モーメント係数

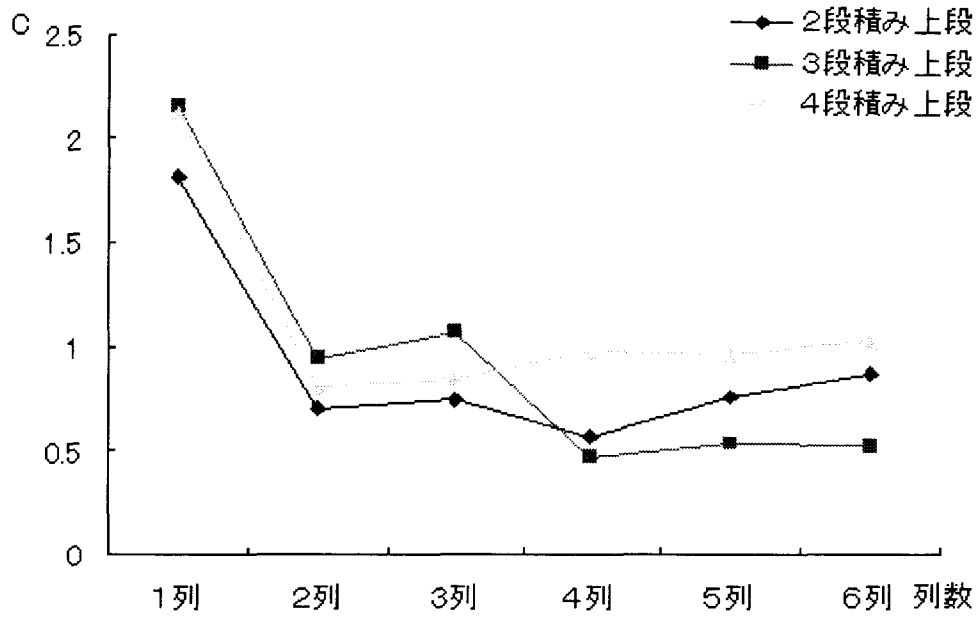


図 4.14 最前列 横列数別横力係数

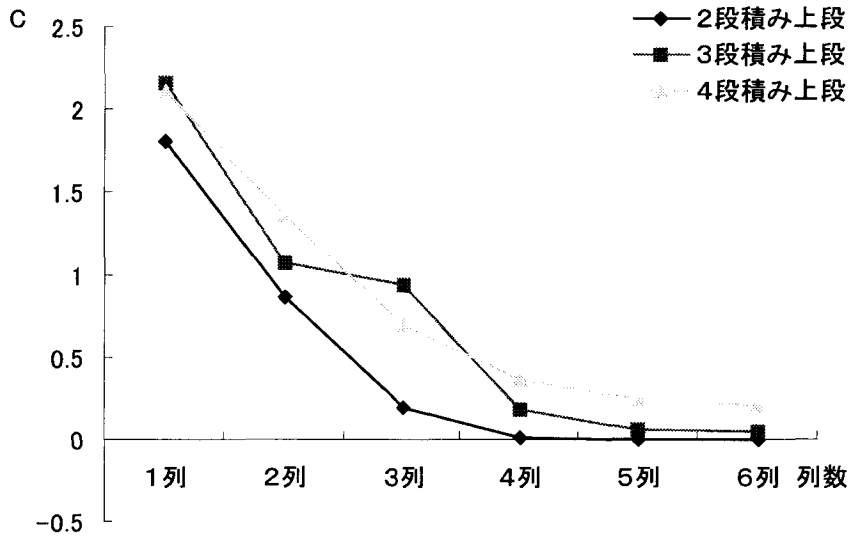


図 4.15 最後列 横列数別横力係数

4.3 滑動開始風速測定実験

4.3.1 実験条件

実験台上にコンテナ模型を配置し、徐々に風速を増加させながら供試模型が滑動する瞬間の風速を風速計で測定し、同時に、その状況を CCD カメラに記録して、詳しく解析した。

実験の項目は、次の2つである。

(1) 段積み形状別による測定

・横列数1の場合について

縮尺 1/40 の硬質ウレタンフォーム製のコンテナ模型を用い、段積み形状としては、1段積み、2段積み上段、2段積み連結、3段積み上段、三段積み連結、4段積み連結、5段積み連結として、それぞれの場合についての滑動開始風速を測定した。

・横列数6の場合について

縮尺 1/20 の硬質ウレタンフォーム製のコンテナ模型を用い、2段積み、3段積み、4段積みの3つの場合について、それぞれ列数を6列のみとして風速を 3.5m/sec から 7.0m/sec までの範囲で 0.2m/sec ずつ増加させて、各列について振動、滑動の様子を測定した。コンテナ模型の配置を写真 4.1 に示す。

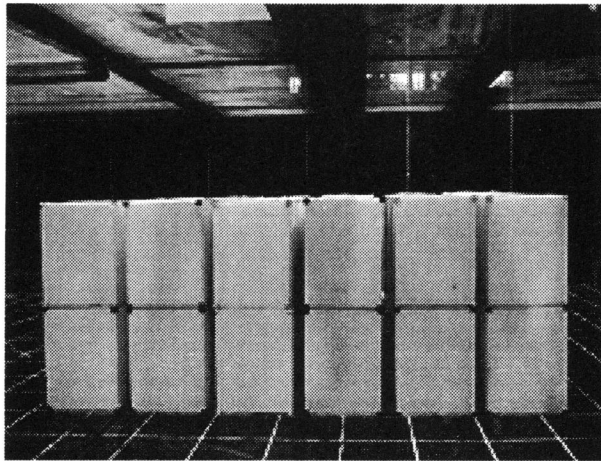


写真 4.1 コンテナ模型の配置

(2) 相対風速別による測定

横列数1の場合について、縮尺 1/40 のコンテナ模型を用い、コンテナ模型の受ける風の角度を長手方向に直角に当たる風を $\theta=0^\circ$ として $\theta=75^\circ$ まで 15 度毎にコンテナ模型の向きを変化させて、表 4.1 に記した段積み形状に対して、相対風向別による滑動開始風速を測定した。

4.3.2 実験結果

前節までの条件で実験を行い、実験の結果については、次のように示す。

(1) 横列数1の場合の滑動開始風速

各段積み形状について、それぞれ得られた結果を表 4.1 に示す。

表 4.1 風向別滑動開始風速

段積み形状 風向	1段積み	2段積み		3段積み		4段積み	5段積み
		上段	連結	上段	連結	連結	連結
0°	3.50	3.04	3.03	2.68	2.84	2.40	2.37
15°	2.91	2.73	2.99	2.56	2.55	2.58	2.31
30°	2.97	2.75	2.87	2.65	2.65	2.64	2.37
45°	3.56	3.13	3.28	2.80	2.70	2.76	2.49
60°	3.76	3.23	3.32	2.84	2.99	2.89	2.65
75°	3.88	3.43	3.45	3.19	3.17	3.01	2.83

単位：m/sec

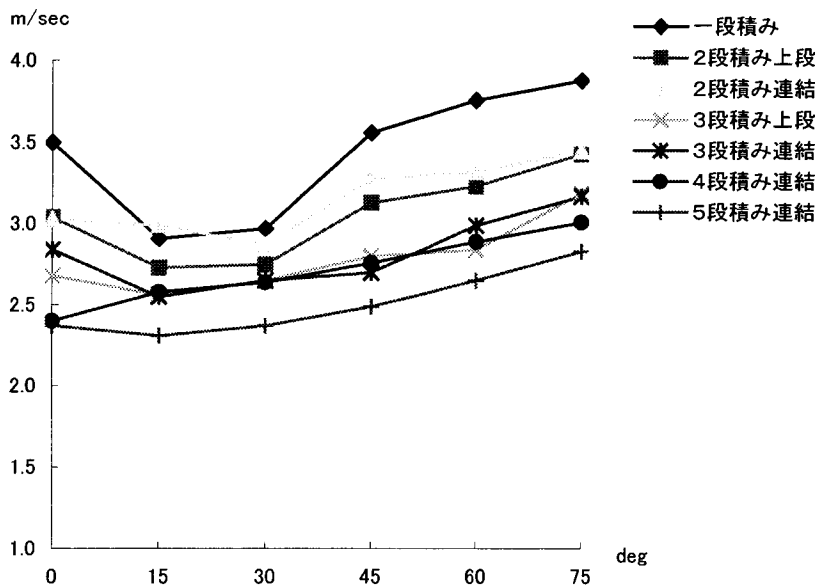


図 4.16 風向別滑動開始風速

(2) 横列数 6 の場合の滑動開始風速

- ・ 2 段積み 6 横列についての結果：表 4.2
- ・ 3 段積み 6 横列についての結果：表 4.3
- ・ 4 段積み 6 横列についての結果：表 4.4

表 4.2 2 段積み 6 列についての結果

	1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目
振動開始風速	4.6	4.6	4.6	×	×	×
滑動開始風速	4.8	×	×	×	×	×

×：変化なし

単位：m/sec

表 4.3 3 段積み 6 列についての結果

	1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目
振動開始風速	3.3	3.5	3.5	3.7	3.7	3.7
滑動開始風速	3.9	5.4	×	×	×	×

×：変化なし

単位：m/sec

表 4.4 4 段積み 6 列についての結果

	1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目
振動開始風速	3.3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
滑動開始風速	3.5	3.9	6.2	7	×	×

×: 変化なし

単位: m/sec

5. 考察

5.1 風力係数

5.1.1 段積み形状別に見た風力係数およびモーメント係数

(1) 横列数 1 の場合

横列数 1 の場合の各風速における風力係数とモーメント係数については若干の乱れは見られたものの一定とみなすことができた。

段積み形状を変化させた場合の風力係数とモーメント係数への影響を見ると、本実験においては、コンテナ模型が上下 2 段構造になっているために、構造上 1 段積みについて測定することができなかった、よって、本実験の結果とともに、三菱重工長崎研究所の大型耐風拡散風洞において、藤井、本多らによって行われた、40ft コンテナの 1 段積みについての結果⁴⁾を用いることとした。表 5.1 は風向が 0 度の場合の各段積み形状における横力係数をそれぞれ示している。表 5.1 から、横力係数については、4 段積み上段の結果に実験状態の影響が出たために、3 段積み上段の結果より小さな値となっているが、全体としては、積み段数が高く増えるにつれて横力係数は大きな値をとっており、コンテナ単体の場合で、風向 0° とき、1 段積みを基準として、2 段積み上段では 2% 減となったが、3 段積み上段で 14%、4 段積み上段で 13% 増となった。滑動開始風速測定実験の結果も踏まえると、積み段数の高さに比例して大きくなる傾向にあるといえる。また、20ft コンテナの結果と比較すると、各積み段数において、ともに 40ft コンテナについての値の方が大きな値を取っている。その理由としては、3 次元角柱の場合、横力係数は、その前面の辺長比（アスペクト比）に比例して大きくなるためだと思われる。揚力係数の値については、3 段積み上段の結果が極端に小さな値となっており、4 段積み上段については前述したような問題があるため、今回の実験の結果からは、段積み形状の違いによる影響を述べることは難しく、本学の風洞水槽において、今後実験を行う際には、コンテナ模型の縮尺等を検討し直さなければならないと思われる。転倒モーメント係数の値については、計測された転倒モーメントに対してロードセルの容量が大きかったために非常に小さい値となり、段積み形状の違いによる変化についてはその違いを見ることができなかった。また、今回の実験の結果から、コンテナ模型に作用する風圧力中心位置を算出した所、上段のコンテナ模型の高さ (H) に対して、0.57 倍の位置となった。ちなみに、20ft コンテナに対しての風圧力中心位置は、1 段積み、2 段積み両方の場合で 0.59 倍、3 段積みについては 0.57 倍である⁴⁾。

表 5.1 段積み形状別に見た横力係数

	20ftコンテナ	40ftコンテナ
1段積み	1.025	1.850
2段積み上段	1.235	1.810
3段積み上段	1.580	2.160

(2) 横列数の影響がある場合

(a) 最前列のコンテナ模型について

各風速における風力係数とモーメント係数については若干の乱れは見られたものの一定とみなすことができた。また、それぞれの段積み形状における、各列において、風力係数とモーメント係数の平均を取り、コンテナの滑動に大きく影響する横力係数を列別にまとめたものを図 4.14 に示した。図からわかるように、1 列目つまり、横列数 1 の場合において当然横力係数は最大値を取っている。その他の列の値について見ると、2 列目から 6 列目まで 1 列目の値と比べると非常に小さい値を取っており、変化する範囲も狭く、ほぼ一定の値であると言える。

(b) 最後列のコンテナ模型について

風力係数とモーメント係数については、最前列の場合と同様にまとめた。そのまとめたものを図 4.15 に示した。この場合についても、横列数 1 の場合において横力係数は最大値を取っている。列数別の変化を見ると、列数が増えるにつれて抗力係数は 2 次曲線に沿って減少しており、このことから、列数が増える程滑動開始風速は 2 次曲線的に小さくなると思われる。

これらの結果より、積み付けコンテナの影響がある場合については、横列数を増やすことによって最上段のコンテナは滑動しにくくなることがわかった。しかし、最前列のコンテナについては横列数を増やした場合でも注意が必要である。

5.1.2 相対風向別に見た風力係数およびモーメント係数

風力係数およびモーメント係数について、風向別にそれぞれまとめたものを図 4.11~4.13 に示した。揚力係数については検討の余地がある。横力係数については、その傾向として風向角が大きくなると 2 次曲線にそって減少しており、 $\theta=0^\circ$ のときが最も滑動しやすく、角度が大きくなる程滑動開始風速も 2 次曲線的に大きくなると思われる。転倒モーメント係数については、風向別に見ていくと、横力係数の場合と同じで、 $\theta=0^\circ$ のとき最大となり最も転倒しやすく、角度が大きくなるにつれてその危険度は低くなると考えられる。

5.1.3 風圧力分布測定実験の結果との比較

物体に作用する風力は物体の表面に作用する風圧力を積分することによって計算することができる。そこで、本実験によって得られた 2 段積み上段の風圧力分布図を用いて横力係数を求めた。その方法としては、風圧力分布図の等高線で囲まれた領域の面積を数値積分（シンプソンの公式）を用いて求め、風圧力 P を、それぞれの面積と風圧力係数と速度圧との積の和として求めて、 $P=(1/2)C_p A V^2$ の式より風圧力係数 C を求めた。そして、この作業を、前面と後面についてそれぞれ行った。得られた結果はそれぞれ、前面の風圧力係数が $C_F=1.05$ 、後面が $C_B=0.79$ となり、横力係数は $C_D=1.84$ となった。

5.2 風圧力分布

20ft コンテナについての結果との比較

風圧力分布測定実験の結果を図 4.2 から 10 に示した。その中の横列数 1 の場合で 2 段積み上段の前面と後面の結果に対して、20ft コンテナの風圧力分布について本田、堀⁽¹⁾によって求められた結果と比較を行った。図 5.1 に 20ft コンテナの 2 段積み上段前面の風圧力分布図を、図 5.2 に後面のものをそれぞれコンテナ長さ方向に 2 倍に伸ばして 40ft コンテナの縦横比に合わせたものを示す。図 4.2、4.3 に示す 40ft コンテナの風圧力分布は 20ft コンテナの風圧力分布をコンテナ長さ方向に 2 倍に伸ばした図 5.1、5.2 と同じ傾向を示していることが分かる。

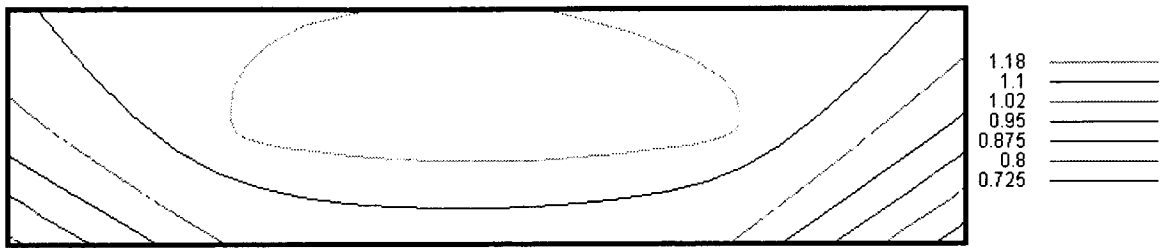


図 5.1 2 段積み上段前面の風圧力分布 (20 f't コンテナ)

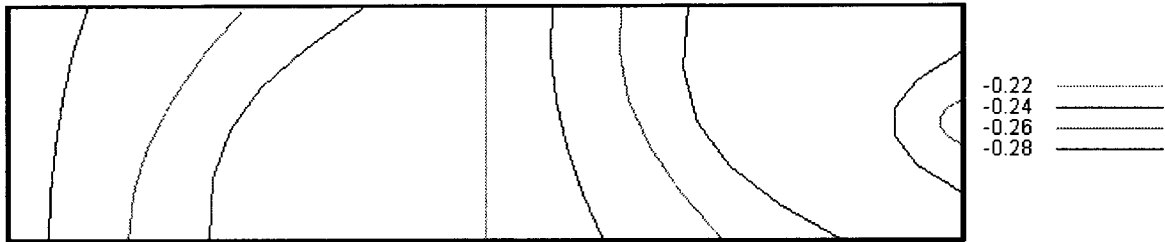


図 5.2 2 段積み上段後面の風圧力分布 (20 f't コンテナ)

5.3 滑動開始風速

5.3.1 段積み形状別と相対風向別に見た滑動開始風速

横列数 1 の場合についての滑動開始風速測定実験の結果を表 4.1、図 4.16 に示した。その結果より、積み段数の増加による変化については、その増加によって滑動開始風速は小さくなる傾向にあることがわかった。また、風向角の増加による変化は、全体の傾向としてその増加により滑動開始風速は大きくなる傾向にあり、最小値つまり最も滑動し易い風向については、コンテナの長手方向に対して直角な方向から 15 度から 30 度付近の風を受けたときで、その付近で最小値を取っている。表 5.2 に実験結果を実物換算したものを示す。

表 5.2 実験結果の実物換算風速

段積み形状 風向	1 段積み	2 段積み		3 段積み		4 段積み	5 段積み
		上段	連結	上段	連結	連結	連結
0°	22.14	19.23	19.16	16.95	17.96	15.18	14.99
15°	18.40	17.27	18.91	16.19	16.13	16.32	14.61
30°	18.78	17.39	18.15	16.76	16.76	16.70	14.99
45°	22.52	19.80	20.74	17.71	17.08	17.46	15.75
60°	23.78	20.43	21.00	17.96	18.91	18.28	16.76
75°	24.54	21.69	21.82	20.18	20.05	19.04	17.90

単位: m/sec

横列数 6 の場合についての結果を表 4.2~4.4 に示した。これらの表は、各列において振動を開始する風速と滑動を開始する風速についてそれぞれまとめたもので、その結果を見ると、横列数の影響がある場合の横力係数について述べた列数の変化と横力係数の変化の関係が適用でき、列数が増加するにつれて振動や滑動が起りにくくなっている。

5.3.2 計算値との比較

模型スケールの滑動開始風速について、実験結果と供試模型の摩擦係数を用いて算出した推定値および実物コンテナの摩擦係数を用いて算出した推定値との比較を行った。図 5.3 に示す。推定値については式(2.10)を用いて算出し、摩擦係数については、模型、実物それぞれについての材質について物理定数表に定められた表 5.3 に示す値を用いた。

比較結果を見ると、風向 75 度の場合について、両者の間に違いが見られるが、その他の風向については実験結果とそれぞれの推定値との間に一致が見られた。

表 5.3 摩擦係数（供試模型と実物コンテナ）

種類	接触面の材質	摩擦係数(μ)
供試模型	紙と紙	0.70
実物コンテナ	鋼と鋼	0.80

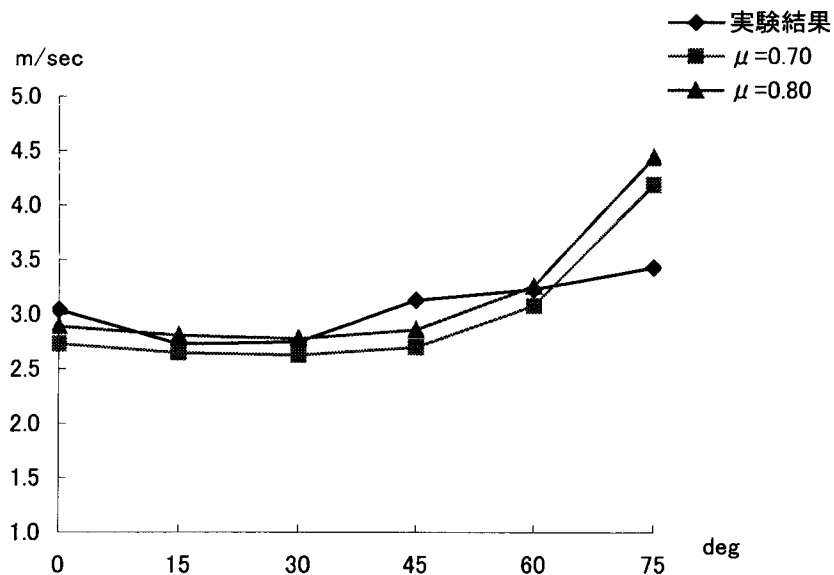


図 5.3 実験値と計算値との比較

5.3.3 コンテナの安定度

今回の実験によって得られた風力係数の値を用いて、20ft コンテナと 40ft コンテナそれぞれの実物コンテナについての安定度を算出し、2 段積み上段と 3 段積み上段の場合について比較を行った。結果を図 5.4 に示す。それぞれについての安定度は、抵抗力と水平力との比で表され、次のようになる。

$$\text{抵抗力} : (W - F_L) \cdot \mu \quad (5.1)$$

$$: F_L = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot A \quad (5.2)$$

$$\text{水平力} : F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A \quad (5.3)$$

安定度 = 抵抗力 / 水平力

ここに、

F_D : 横力(kgf)、 C_D : 横力係数、 F_L : 揚力(kgf)、 C_L : 揚力係数、 ρ : 空気密度(kg·sec²/m⁴)、
 V : 風速(m/sec)、 A : 代表面積(m²)、 μ : 摩擦係数、 W : 重量(kgf)

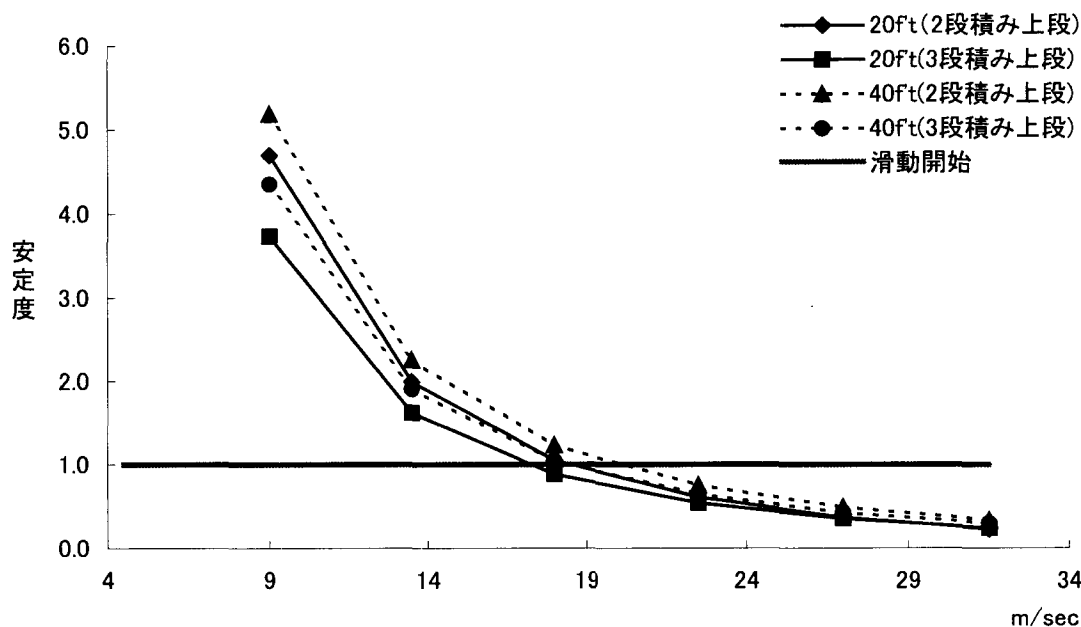


図 5.4 風速別の安定度

結果を見ると、積み段数が増えるにつれて各風速における安定度が低くなっていることがわかる。このことから、コンテナの積み段数が増えることで、その耐風能力が低くなるということがわかる。

また、20ft コンテナと 40ft コンテナとを比較すると、各積み段数において 20ft コンテナの方が低い風速で滑動を開始していることがわかる。それぞれの滑動開始風速についてまとめると表 5.4 のようになる。

表 5.4 滑動開始風速の比較

	20ftコンテナ		40ftコンテナ(計算値)		40ftコンテナ(実験値)	
	2段積み上段	3段積み上段	2段積み上段	3段積み上段	2段積み上段	3段積み上段
滑動開始風速	18.7	17.2	20.2	18.8	19.2	16.9

単位:m/sec

6. 結論

今回の研究によって、40ft 空コンテナについて次のことを示すことができた。

- (1) 風圧力分布については、20ft コンテナのものと似た傾向にある。すなわち、過去において実験されている、20ft コンテナの風圧力分布をコンテナ長さ方向に伸ばした結果は、今回 40ft コンテナにおける同じ条件での実験結果とほぼ一致した。
- (2) 風力係数については、2 段または 3 段と積み段数の増加とともにその値が大きくなることがわかった。また、風向角の増加により横力係数は低減することがわかった。
- (3) コンテナ前面における、風圧力中心位置については、20ft コンテナにおけるものとほぼ同じ高さで、コンテナ高さに対し、底面より 0.57 倍の位置であることがわかった。
- (4) 風向変化がコンテナの滑動に与える影響については、コンテナの長手方向に直角な方向に対して 15 度から 30 度の範囲の風向のときに最も滑動しやすいことがわかった。
- (5) 滑動開始風速について 20ft コンテナと 40ft コンテナを比較すると、20ft コンテナの方がより小さい風速で滑動を開始することがわかった。
- (6) コンテナの横列数を増やすことでコンテナの滑動および転倒は起こりにくくなることがわかった。しかし、最前列のコンテナについては横列数を増やした場合でも注意が必要である。
- (7) 強風時のコンテナの事故については、その主たる原因はコンテナが滑動することであり、その滑動については、コンテナの積み段数の増加により起こりやすくなる。また、40ft コンテナよりも 20ft コンテナの方がより小さい風速で滑動を開始する。

以上、コンテナ横列数 1 の場合を中心に、積み段数と風向角の変化が空コンテナの挙動へ与える影響がわかったが、実際のコンテナヤードには蔵置コンテナの数と配置状況、地盤の傾斜などの地形、そして、まわりの建造物などの、風による空コンテナの挙動に影響を与える要素が多数あり、また、それぞれのコンテナヤードによって違ってくる。実際にコンテナヤードに蔵置されたコンテナ群に今回の実験結果を適用するには、それらの要素も考慮に入れる必要があると考えられる。そのことについては今後の課題としたい。

最後に、本研究に対し共同研究を行った鴻池運輸株式会社大阪港支店海運部の田辺茂樹氏より貴重な御助言をいただいたこと、実験に際し修士論文の一部として大学院生の寺田秀夫君より協力を得たことを付記し、ここにお礼申し上げる。

参考文献

- (1) 本田啓之輔・堀富士男：コンテナの耐風に関する模型実験、日本航海学会論文集、第 63 号、pp.29~34 (1980 年)
- (2) 堀 富士男：コンテナの耐風に関する模型実験 - II、日本航海学会、第 74 号、pp.43~49 (1985 年)
- (3) 日本海上コンテナ協会：風洞実験によるコンテナの挙動調査報告書、(1981 年)
- (4) 藤井・本多ら：風によるコンテナ振れ把握とその制御法、三菱重工技報、第 35 号、(1998)
- (5) 社団法人日本鋼構造協会：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、(1997 年)
- (6) 新藤 章二郎：低速風洞実験法、コロナ社、(1992 年)
- (7) 寺田秀夫：コンテナヤードにおける空コンテナの耐風性に関する研究、東京商船大学商船システム工学専攻修士論文、(2003 年 3 月)