



低減メカニズムの解明を目的とした数値解析を実施する。その解析結果に基づき、風抵抗の低減とその要因を評価し、風向きや船体による抵抗低減効果への影響についても検討を加える事で、風抵抗低減メカニズムの詳細を明らかにする。

## 2. 段差隅切り形状を有する船舶居住区

### 2.1 船舶居住区における風抵抗低減技術

船舶の風抵抗において船体上部に存在する居住区の影響が占める割合は大きく、これまでも風抵抗低減を目的とした様々な形状の居住区<sup>2),5)</sup>が提案されてきた。その代表例として居住区角部を切欠く形状改良が挙げられる。これは、風工学分野において矩形柱状構造物の渦励振抑制を主目的に提案された角部隅切り技術<sup>6)</sup>を、風抵抗低減手法として船舶の洋上構造物に応用したものである。角部隅切り形状による風抵抗低減効果については、小規模な形状変更で居住区としての性能を維持しながら抵抗低減効果を期待できる上、2次元正方角柱では角部を同寸法の曲面とした場合よりも高い抵抗低減効果を示す場合もある<sup>7)</sup>など、実用上非常に有効な風抵抗低減技術として期待されるものである。松本ら<sup>5)</sup>は風洞試験を行い、居住区前面側方角の隅切りによってタンカーやバルクキャリアに作用する風抵抗の約1割を低減できると報告している。そこで本論文では、なかでも居住区内の配置に影響が少ないと考えられる矩形切欠きに着目し、前面側方の角を切欠く隅切り形状<sup>5)</sup>と前面上方の角をも切欠く段差隅切り形状を対象とする。

### 2.2 船舶居住区モデルと対象形状

抵抗低減形状の影響についてより明確に議論するため、艤装品や詳細形状を排して単純化した3種類の居住区モデル形状を導入する。Fig.1(a)に示した形状が基準とする形状であり、以降は”基準モデル”と称する。その寸法はD/W 8万トン級バルクキャリアに相当する幅(B) 21.1m、奥行(L) 17.6m、高さ(h) 18.4mであり、幅B、奥行L、高さ0.84hの直方体の居住区部とその上部に配置された幅0.42B、奥行0.78L、高さ0.16hのナビゲーションブリッジ部からなる。Fig.1(b)の形状は、基準モデルの前面側方角部を幅0.15B、奥行0.22Lの矩形で切欠く”隅切り”形状による風抵抗低減モデル形状であり、以降は”隅切りモデル”と称する。Fig.1(c)の形状は、”隅切りモデル”居住区部の前面上方角を高さ0.21h、奥行0.22Lの矩形で切欠き、ナビゲーションブリッジ部を同奥行だけ後退させて、”段差”形状を複合的に導入した形状である。以降は同形状を”複合モデル”と称する。

上述の3形状を用い、平板上に配置した居住区モデルのみの状態と、船体影響考慮のためバラスト状態の船体上部に配

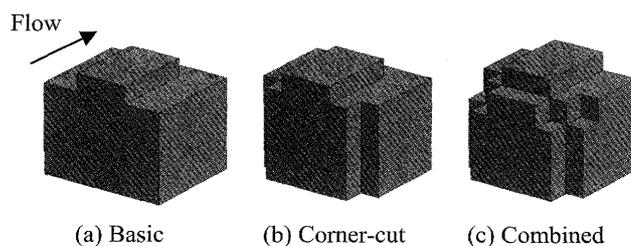


Fig.1 Model geometry of accommodation house

置した状態について、それぞれ周囲気流の数値解析を実施する。また、風向変化の影響を検討するため、解析条件は正面風と迎え角30度の斜風の2条件とする。居住区モデルを配置する船体部の寸法は型幅( $B_h$ ) 33.0m、全長( $L_h$ ) 231m、型深さ20.0mで、乾舷( $h_h$ )は13.0mとする。

### 2.3 風洞模型試験

居住区周囲流の数値解析に先立ち、1/55スケールの模型を用いた風洞試験を実施した。試験対象は船体部を含めず、居住区モデル形状のみである。試験には広島大学大学院工学研究科所有の大型風洞試験装置(吹出型風洞、吹出口径1.7m)を使用し、風洞吹出口から0.8m下流のターンテーブル上に居住区モデルを設置して、検力計による風抵抗力の計測を行った。計測値は、風抵抗値が充分安定した後に計測した20秒間の平均値とした。風洞吹出部の主流流速 $U_m$ は12.7m/sであり、模型幅と主流流速によるReynolds数は $2.7 \times 10^5$ である。ターンテーブルを用いてモデルを回転させることによって、正面風と迎え角30度の斜風に対する風抵抗値を計測した。計測結果は、第4章の数値解析結果との比較において示す。なお、モデル非設置状態における熱線流速計を用いた計測より、ターンテーブル上のモデル設置位置中心で排除厚さ約50mm(約 $h/6$ )の境界層の形成が確認されている。

## 3. 数値解析手法

次に、居住区および船体の周囲気流に対する数値解析手法について述べる。本論文で対象とする気流は居住区モデル周囲で大規模な剥離を伴う複雑乱流場である。そこで、角柱周り流れ等の複雑乱流場に適した<sup>8)</sup>乱流モデリング手法とされるLarge-Eddy Simulation (LES)を用いて解析を実施した。

### 3.1 数値解析の基礎方程式

対象とする気流は低マッハ数流れであり、非圧縮性流体を仮定する。空間平均により得られる格子スケール(Grid Scale: GS)の質量及び運動量の保存方程式に、格子幅以下のスケール(Sub-Grid Scale: SGS)における乱流渦粘性を仮定したLESの基礎方程式は以下の2式となる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

ここで、物理量  $f$  の空間平均値を上線により  $\bar{f}$  と表した。  
 $\bar{P} = \bar{p} / \rho + 1/3 (\bar{u}_i \bar{u}_i - \bar{u}_i \bar{u}_i)$ ,  $\bar{S}_{ij} = 1/2 (\partial \bar{u}_j / \partial x_i + \partial \bar{u}_i / \partial x_j)$  であり、 $P$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $u_i$  は  $i$  方向の流速、 $\nu$  は分子動粘性係数である。SGS 渦粘性  $\nu_{SGS}$  は次式の標準 Smagorinsky モデル<sup>9)</sup> を用いて評価した。

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta$  は各有限体積の 3 乗根で表わされる空間フィルタ幅であり、 $f_s$  は壁面近傍での SGS 渦粘性の減衰を表す van Driest の減衰関数である。Smagorinsky 定数  $C_s$  は 0.1 とした。

### 3.2 離散化手法

数値解析は、節点中心有限体積法による非構造格子乱流解析コード“FrontFlow/red ver.3.0”<sup>10)</sup> を使用して実施した。前節で述べた支配方程式の離散化には、有限体積法による空間離散化および SMAC アルゴリズムによる時間進行法を用いた。また、各項の離散化スキームとして、空間微分項に 2 次中心スキーム、時間項には 2 次精度 Adams-Bashforth 法をそれぞれ用いた。ただし、運動量対流項については解析の安定化のため、2 次中心スキームに 1 次風上成分を 5% 混合した混合スキームを用いた。

## 4. 居住区単体の周囲気流の数値解析

居住区単体での周囲気流の数値解析として、1/55 スケールの風洞試験用モデルを対象とした数値解析を実施する。ここでは、解析結果を風洞試験結果と比較することにより、数値解析の妥当性を検証する。さらに解析結果から、隅切り形状と段差形状が居住区周囲流れ場に与える影響を調査し、それらの抵抗低減メカニズムについて議論する。

### 4.1 解析条件

数値解析に適用した解析条件について述べる。解析領域は Fig.2 に示す直方体領域とし、入口境界から 2.1L 下流の床面中央にモデルを配置した。領域の寸法は  $9.0B \times 17L \times 7.5h$  である。また、座標軸は居住区正面の中央下端を原点とし、居住区の後向き、右向き、上向きをそれぞれ  $x, y, z$  軸方向と定義した。流入境界条件では、風洞試験時に熱線流速計によって計測したターンテーブル上の主流速度鉛直分布を平均値として与えた。さらに、居住区前方  $0.93L$  から上流側の床面境界 (Fig.2 領域 A) をすべり境界とし、境界層の過度な発

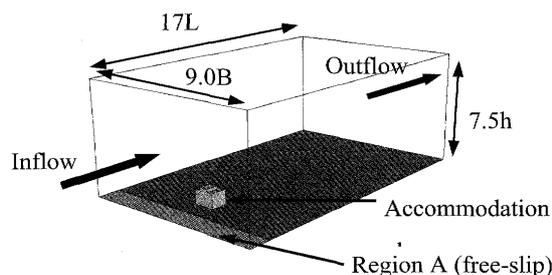


Fig.2 Computational domain and boundary conditions

達を抑制して、風洞試験時のモデル位置における境界層を再現した。流出境界に自由流出条件、床面と居住区表面に対数則に基づく壁法則を、それぞれ適用した。解析領域側面および上面の境界は充分遠方とみなしてすべり壁条件を与えた。

解析格子は主に四面体からなる非構造格子系で作成し、居住区近傍の格子を集中させて空間解像度を高めた。居住区稜線上における節点間隔は  $5.00\text{mm}$  ( $0.015h$ ) である。また、境界層流速分布の再現性を高めるため、床面から高さ  $150\text{mm}$  ( $0.45h$ ) までの領域には三角柱セルを用いた。解析格子数はいずれのモデルでも約 250 万セル、約 40 万節点である。

解析時間間隔は  $1.0 \times 10^{-4}\text{sec}$  とした。初期条件には鉛直方向に入口境界と同じ流速分布を与え、解析を開始から十分な流れの発達をみた後、 $10,000\text{step}$  分の時間平均値を統計平均量として取得し、これを本稿における解析結果とした。

また、解析は広島大学情報メディア教育研究センター所有の HPC サーバ HITACHI SR11000/J1 の 1 ノード 16CPU を使用して実施し、1 条件あたりおよそ 15 時間を要した。

### 4.2 風抵抗係数の比較

本節では、数値解析で得られた風抵抗係数を示すとともに、風洞試験結果との比較から解析結果の妥当性を検証する。

はじめに、数値解析により得られた正面風時の基準モデルに作用する風抵抗係数の時間履歴と統計平均量を取得した期間を Fig.3 に示す。LES を用いた非定常解析により、居住区角部からの渦放出などに伴う風抵抗の時間変化が捉えられており、本稿ではその平均値を解析結果として議論する。

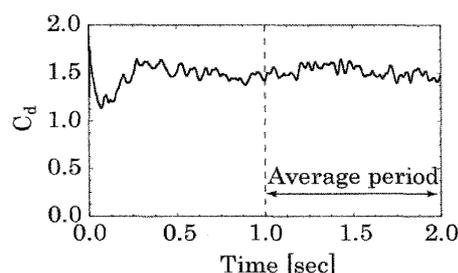


Fig.3 Time-series of predicted wind drag in the basic case.

Table 1 Comparison of wind drag coefficients

		LES		Exp.	
		$C_x$	Reduction rate [%]	$C_x$	Reduction rate [%]
0 deg.	Basic	1.40	—	1.17	—
	C-Cut	0.86	38.9	0.76	35.6
	Combined	0.67	52.5	0.53	54.6
30 deg.	Basic	1.19	15.5	1.01	14.2
	C-Cut	0.99	29.4	0.85	27.8
	Combined	0.84	39.9	0.74	37.1

次に、Table 1 に迎え角 0 度の正面風と迎え角 30 度の斜風の両条件下における風抵抗係数  $C_x$  と、正面風時の基準モデルを基準とした抵抗低減率を示す。数値解析、風洞試験ともに、居住区角部を切欠いた隅切りと複合の両モデルの風抵抗係数が基準モデルよりも低く、風抵抗低減効果が確認できる。また、迎え角 30 度の斜風時においても、基準モデルと比べて隅切りと複合の両モデルの風抵抗係数が低く、風抵抗低減効果が示されている。ただし、同一形状の正面風時との比較では、両モデルとも風抵抗係数が増加に転じており、抵抗低減効果は正面風時の方がより高い。

さらに、本研究で用いた離散解像度の妥当性評価のため、最も複雑な形状を有する複合モデルに対して、より高解像度な条件下でも解析を実施した。正面風条件において、解像度を時間 2.0 倍、空間約  $(1.5)^3$  倍とした解析の結果、両離散間隔の変化に伴う誤差は風抵抗値の 7% 程度であった。これは形状変化に伴う風抵抗変化に対して十分小さく、本稿での議論に十分な精度の解が得られることを示している。

数値解析と風洞試験との比較では、いずれのモデルでも数値解析による風抵抗係数が計測値に対して 20% 程度過大な値を予測している。しかし、正面風時の基準モデルの抵抗値を基準とした抵抗低減率に着目すると、両者は良い一致を示しており、角部切欠の導入により得られる風抵抗低減効果と風向き変化の影響が再現されている。これは、居住区モデル形状の形状変化と風向の変化が居住区周りの流れ場に対して与える影響を、数値解析が再現していることを示しており、数値解析結果に基づいた抵抗低減メカニズムに関する議論の妥当性を示すものである。

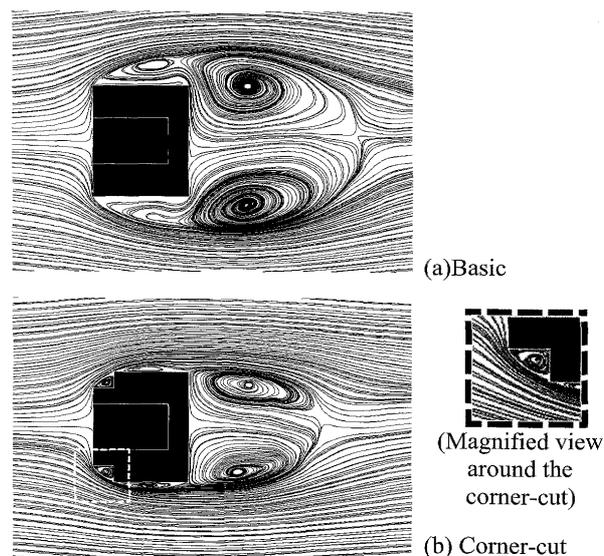
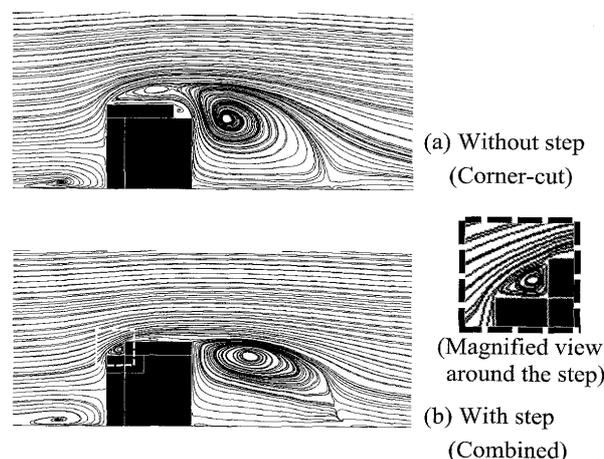
#### 4.3 正面風時の居住区モデル周囲流れ場

本節では、数値解析結果を基に正面風時に隅切りおよび段差形状による周囲気流の変化と抵抗低減メカニズムを示す。

まず、隅切り形状によるモデル周りの流れ場の変化を示す。Fig.4 に基準モデルと隅切りモデルの居住区部中央高さ ( $z=0.42h$ ) における水平断面内時間平均流線を示す。同図 (a) の基準モデル周りの流れでは、モデル前面角部から流れが大きく剥離し、居住区側方の剥離せん断層の内側に循環領

域が形成される。一方、同図(b)の隅切りモデル周りの流れでは、破線で囲んだ領域の拡大図に示すように、隅切り部にキャビティ流れが形成されている。また、モデル側方を通る流れの剥離位置が基準モデルと比べて隅切り幅分だけ居住区の中心側へ移動しており、居住区側方の剥離域の広がり方が抑制されている。この流れの変化は居住区後流にも影響を与えており、側方の剥離域の縮小に伴って、隅切りモデルでは居住区後方の循環領域も縮小している。

このような隅切り形状による周囲流れ場への影響は、居住区前方上角部を切欠く段差形状によっても生じる。Fig.5 に隅切りモデルと複合モデルにおける居住区中央 ( $y=0$ ) 断面上での時間平均流線を示す。両モデルとも隅切り形状を有しており、段差形状の有無のみが主な形状の差異である。前述の隅切り形状の影響と同様に、段差形状によって居住区上方への剥離域の広がり方が抑制され、居住区後方の循環領域も縮小している。また、隅切り部と同様に、破線領域内の拡大図に示した段差部にもキャビティ流れが形成されている。

Fig.4 Time-averaged streamlines on a horizontal plane  $z=0.42h$ Fig.5 Time-averaged streamlines on a vertical plane  $y=0$

次に、居住区モデル周囲の流線の変化に伴う、圧力場の変化を示す。Fig.6に、Fig.4と同じ居住区部中央高さの水平断面における圧力係数分布を示す。ここに、圧力係数  $C_p$  は主流流速  $U_m$  と解析領域の入口境界平均圧力  $p_{in}$  を用いて  $C_p = 2(\bar{P} - p_{in})/U_m^2$  と定義した。居住区の側方から後方にかけて大規模な剥離領域が形成される基準モデル周囲では、隅切りモデルに比べ居住区後方の低圧領域がより広く、より低圧になっている。一方、隅切りモデル周囲では居住区側方から後方にかけての剥離循環領域の縮小に伴い、低圧領域も縮小している。このとき、同領域内の圧力は基準モデルよりも高く、圧力回復が促進されている。また、キャビティ流れが形成された隅切り内部では、居住区前面の主流が衝突する領域と比べて圧力係数が低下し、負値となっている。

続いて、周囲流線及び圧力分布の差異を踏まえ、居住区表面に作用する風圧分布を示す。Fig.7に各モデルの正面における圧力係数分布を示す。Fig.7(a)の基準モデル正面ではほぼ全域にわたって、激み点圧力に近い高い風圧 ( $C_p \approx 1.0$ ) が作用しているのに対し、同図(b)、(c)の隅切りおよび複合モデルでは段差部および隅切り部の壁面で圧力係数が大きく低下している。これは、段差部および隅切り部においてキャビティ流れの形成により壁面への主流の衝突が妨げられるとともに、低圧領域が形成されたことが要因である。一方、背面側は正面側と比べ圧力の分布に乏しく一様に近いため、ここでは図示を省略するが、形状変化に起因する居住区側方から後方にかけての剥離循環領域の縮小と同領域内の圧力回復の促進によって、隅切りと複合の両モデルにおいて基準モデルよりも高い圧力が生じた。

最後に、各モデルの風抵抗係数と、居住区の前面と背面に作用する圧力の抵抗への寄与分について述べる。Fig.8に各モデルの風抵抗係数のグラフを示す。図中では、解析領域入口の平均圧力を基準値として、居住区の前面と背面に作用する圧力抗力の抵抗係数への寄与分（それぞれ、 $C_{df}$ 、 $C_{db}$ とする）を分離して示してある。これより、隅切り形状と段差形状の導入によって、前面と背面に作用する風圧抵抗がともに低減されていることがわかる。居住区前面に作用する抵抗の減少は、隅切り及び段差形状を設けた個所の圧力低下によるものである。また、圧力回復の促進に伴う、背面負圧による抗力の減少分 ( $\Delta C_{db} = -0.21$ ) が、全体の風抵抗低減量 ( $\Delta C_d = -0.73$ ) のおよそ3割に達している。

以上より、正面風時に隅切り、段差の両形状によって得られる風抵抗低減効果は、居住区周囲流れの変化に伴う居住区前背面での圧力変化によるものであることが示された。すなわち、隅切り、段差の両形状内における居住区前面圧力の低下と、剥離循環領域内の圧力回復促進に伴う居住区背面圧力の上昇という二要因によって、抵抗低減効果が得られている。

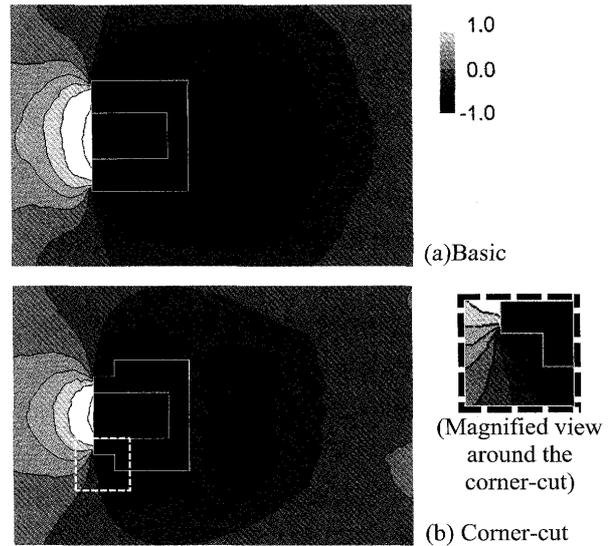


Fig.6 Time-averaged pressure coefficient on the plane  $z=0.42h$

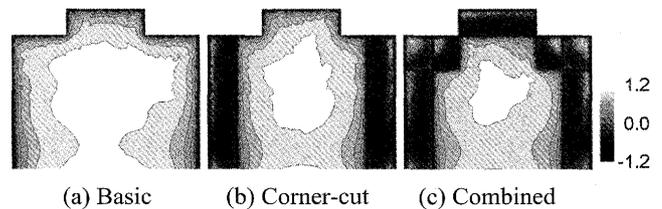


Fig.7 Pressure coefficient distributions on the frontal surfaces at the yaw angle of 0 deg

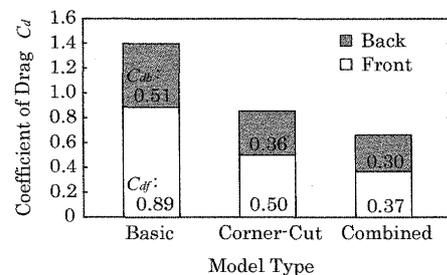


Fig.8 Comparisons of drag components acting on the front and back surfaces of accommodation house.

#### 4.4 迎え角 30 度の斜風時の居住区モデル周囲流れ場

本節では、迎え角 30 度の斜風時に隅切りおよび段差形状が生じる居住区周囲流れの変化と抵抗低減メカニズムについて示し、風向きの変化による影響について議論する。前々節の風抵抗係数の比較で述べたように、迎え角 30 度の斜風時には、隅切りと複合の両モデルにおいて正面風時よりも大きな風抵抗が生じる。一方で、基準モデルでは正面風時の風抵抗の方が大きいことから、斜風時には隅切り及び段差形状による風抵抗低減効果が低下するものと考えられる。そこで、特に風向変化の影響が大きく表れるであろう隅切り形状に着目し、居住区周囲流れ場に与える影響を示す。

はじめに、Fig.9に30度斜風時の基準モデルと隅切りモデルの居住区部中央高さ ( $z=0.42h$ ) における水平断面内時間平均流線を示す。両モデルとも風上側の居住区側面では流れの剥離が発生しておらず、後端から流れが剥離している。このため、前端角部を切欠く隅切り形状の影響は小さく、後端から発生する剥離せん断層の振舞いとその内側に形成される循環流れは両モデル間で類似している。さらに、その剥離循環流れが居住区背面近傍の流れ場で支配的なため、居住区背面への流れ場の影響もまた、両モデル間で類似であると考えられる。また、風上側隅切り部では、正面風時のようなキャビティ流れはなく、主流が流入して壁面に衝突している。

一方、風下側側面については、居住区前面に衝突した主流の多くが流れ込み、基準モデル周りに大規模な剥離が生じている。しかし隅切りモデルでは、正面風時と同様に隅切り形状の幅だけ剥離位置が居住区中心側へ移動するため、剥離せん断層は居住区側へと近づき、居住区側方から後方へかけての循環領域が縮小している。また、風下側の隅切り部分は、その大半が主流に対して居住区正面の影に入っており、正面風時より縮小しているものの、キャビティ流れも生じている。

次に、居住区モデル周囲の圧力分布を示す。Fig.10にFig.9と同一断面上での圧力係数分布を示す。先に示した流線の変化に伴って居住区周囲の低圧領域の位置が変化しており、隅切りモデルでは居住区風下側の側方から後方へかけて低圧領域の広がりが抑制されている。しかし、居住区背面近傍では風上側の居住区側面後端から剥離した流れの影響が支配的であるため、同領域では圧力分布でも両者の間に大きな差異は見られない。居住区後方で形成される低圧領域中心位置は、むしろ隅切りモデルにおいて背面により近く、背面上の圧力が低下するものと考えられる。

続いて、居住区モデル表面に作用する風圧力分布を示す。30度斜風時の居住区モデル正面の圧力係数分布を Fig.11 に示す。正面風時と比べ、いずれのモデルでも濃み点圧に近い高圧領域が風上側へ偏って存在している。これにより基準モデルでは、全面が高圧となっていた正面風時よりも高圧領域が縮小している。一方、隅切り、複合の両モデルでは上流側隅切り内へ主流が流入して居住区正面に衝突するため、同部位の圧力が低下せず、正面風時に比べて低圧領域が減少している。また、背面圧力は正面風時と同様にほぼ一様な分布であったためここでも図示を省略したが、正面風時のようなモデル間の平均圧力差はなく、全モデルでほぼ同じ圧力となっていた。これは、背面近傍の流れ場が、風上側面後端から剥離した流れの影響を強く受けており、隅切り形状の影響を受けないことに起因している。

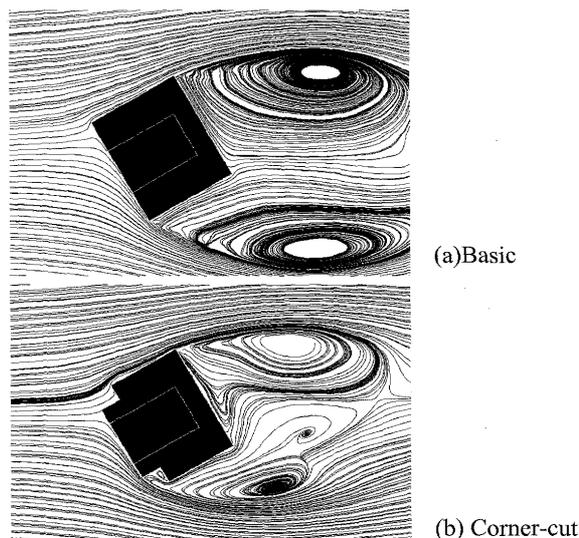


Fig.9 Time-averaged streamlines on the plane  $z=0.42h$  at the yaw angle of 30 deg.

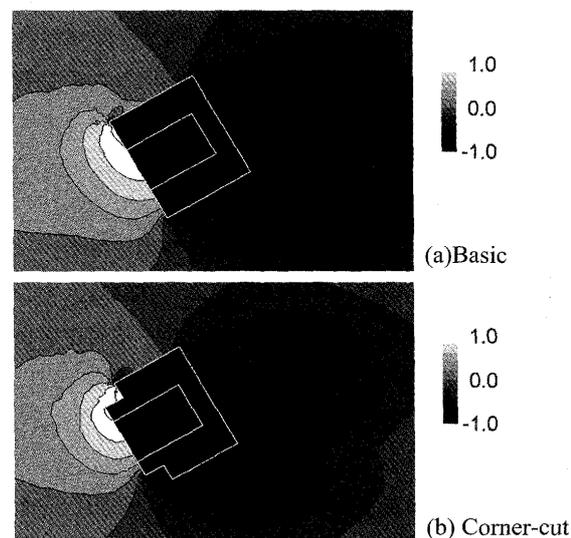


Fig.10 Time-averaged pressure coefficient on the plane  $z=0.42h$  at the yaw angle of 30 deg.

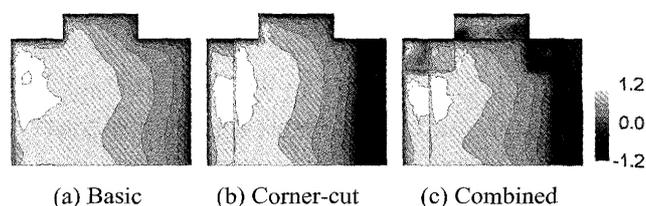


Fig.11 Pressure coefficient distributions on the frontal surfaces at the yaw angle of 30 deg.

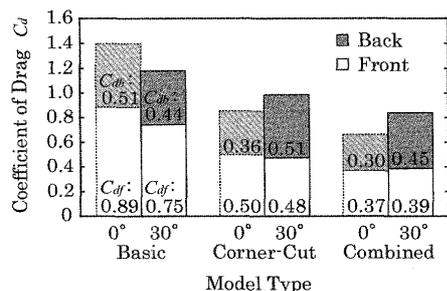


Fig.12 Comparisons of drag components acting on the accommodation house at the yaw angles of 0 deg. and 30 deg.

最後に、各モデルの抵抗係数と、居住区の前面と背面に作用する風圧力抵抗の寄与分を示す。Fig.12 に各モデルの 30 度斜風時の風抵抗係数を、正面風時のものと併せてグラフに図示する。居住区前面に作用する風抵抗成分については、正面風時と比べて定量的な減少量が縮小しているものの、隅切りと段差形状の導入による抵抗の低減が示されている。これは、風下側の隅切り部と段差部の壁面における圧力低下が寄与したものと考えられる。一方、背面に作用する圧力については、基準モデルと同等か、むしろやや増大する傾向にある。これは、居住区風上側では隅切り形状が流れ場に及ぼす影響が小さく、その差異が小さな流れ場が居住区背面周囲において支配的であるためである。これにより、隅切り、複合両モデルでは、正面風時に比べ抵抗が増大する結果となっている。

以上のように、30 度斜風時には背面での圧力回復の差異が失われ、抵抗低減に寄与しなくなることで、段差および隅切り形状による抵抗低減効果が低下している。このことは、本抵抗低減機構において、背面に作用する圧力が重要であることを、再度示唆している。

本章における結果と考察より、風抵抗低減のためには、背面圧力にも留意するとともに、居住区前方形状のみならず、側方および後方の形状や Wing、煙突等の付加構造物の配置による影響を考慮した設計が必要であると考えられる。

## 5. 船体の影響を考慮した居住区周囲気流の数値解析

本章では、船体の影響を考慮した実船スケールでの数値解析を実施する。船体形状上方に居住区モデルを配置した状態を解析対象とし、居住区周囲気流に対して、居住区側方および後方に船体端部が存在することの影響について検討する。

### 5.1 解析条件

風洞条件での解析と同様に、正面風と迎え角 30 度の斜風の 2 条件について解析を行った。解析領域は、寸法 32B×5.0L×11h の直方体領域とし、床面上に対象形状を配置した。

解析格子数は約 320 万セル、55 万節点とし、居住区近傍に解析格子を集中させて、居住区表面における無次元空間解像度を居住区単体の解析と同等に保った。離散化手法は居住区単体の解析と同様とし、時間離散間隔は  $5.0 \times 10^{-3}$  秒とした。

主流流速は船速 15 knot と beaufort 5 の風況を想定し、正面風時 16.5m/s、30 度斜風時 14.55m/s とした。このとき、居住区への接近流では上流側の船体により形成される流速分布が支配的であると仮定し、大気境界層の影響を無視して、入口境界に鉛直方向に一律な流速を与えた。居住区幅に基づく Reynolds 数は正面風時で  $1.9 \times 10^7$  となる。その他の境界条件は、風洞条件での解析と同様に設定した。また、船体表面は居住区部と同様に、対数則による壁面モデルを適用した。

### 5.2 正面風時の流れ場と船体の影響

はじめに、正面風時における居住区周囲の流れ場への船体の影響について示す。Fig.13 に居住区中央断面上での時間平均流線を示す。段差によるキャビティ流れやそれに伴う居住区上方の流れ構造についてはほぼ差異がない。一方、居住区後方の循環領域では船尾部で巻き上がる流れと干渉して同領域の後方への広がりが縮小している。しかし、居住区上方を通過した流線の曲率には大きな変化は見られない。また、Reynolds 数の上昇と上流で形成される境界層厚さの差異により、居住区前方の床面近傍の馬蹄渦は縮小している。

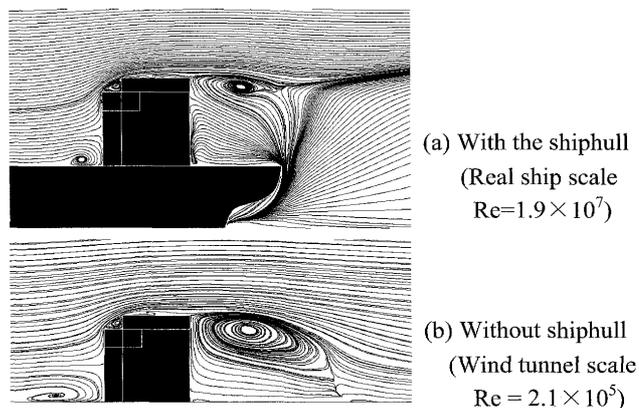


Fig.13 Time-averaged streamline on a vertical cut-plane through the centerline of the front surface ( $y=0$ )

### 5.3 30 度斜風時の流れ場と船体の影響

次に、30 度斜風時における居住区周囲の流れ場への船体の影響について示す。居住区前面中央を通る主流に平行な鉛直断面上の時間平均流線を Fig.14 に示す。居住区単体の解析では居住区正面に衝突していた主流が、風上側の船体縁で剥離し、居住区正面の低層部はその剥離循環領域内に含まれている。主流が衝突する領域は居住区上層のみとなり、激み

点位置も上方へ移動している。一方、居住区後方では、下流側船体側方から巻き上がる流れにより、正面風時よりもさらに循環領域が縮小している。また、ここでは居住区上方を通過した流線の曲率も居住区単体条件と比べ増大している。

以上に示した居住区周囲気流への船体影響により、その圧力分布にも影響が生じる。Fig.15に示す居住区正面圧力分布では、上流側船体側端からの主流の剥離によって居住区低層はその剥離循環領域内に含まれるため、居住区単体条件と比べて高圧領域が上層側へと偏っている。これにより、上層に低圧領域を形成する段差形状の抵抗低減効果が相対的に向上する。また、高圧領域は下流側でより上方に狭まっており、船体側端からの剥離域が上層部に達することを示している。

5.4 風抵抗低減効果への船体の影響

最後に、数値解析により得られた居住区部に作用する風抵抗について示す。Table 2に正面風時と30度斜風時の居住区部の風抵抗係数と、各風向き時の基準モデルの風抵抗を基準とした抵抗低減率を示す。また Fig.16には、居住区単体の解析結果と同様に、各条件での風抵抗係数を居住区前背面に作用する圧力抗力の寄与を分離して図示した。正面風時には船体の考慮により抵抗係数が2割程低下しているが、抵抗低減率は同程度で、後流構造の変化に伴う背圧の変化は生じていない。一方、30度斜風時には船体の影響で抵抗が4割前後低下している。これは、居住区下層が風上側船体端部からの剥離域内に入り、Fig.16に示すように、居住区正面に作用する風抵抗が減少したことに起因する。また、隅切り形状が効果を発揮する下流側角部では剥離域が居住区上層まで達し、隅切り形状の抵抗低減効果が弱まる。このため、隅切り、複合の両モデルでは船体の考慮により抵抗低減率が低下する。しかし、高圧領域が偏る居住区上層部において抵抗低減効果を生じる段差形状を含んだ複合モデルでは、その低下は隅切りモデルよりも小さい。これは段差形状の効果の相対的な向上を意味しており、このことは居住区正面に作用する圧力抗力の寄与分の差にも表れている。また、船体を考慮した斜風条件下では、居住区単体の斜風条件よりもさらに背面負圧による圧力抗力が支配的である。これは、上流側船体側端からの剥離による居住区周囲の平均全圧の低下に加え、船体側方から巻き上がる流れと居住区後方の循環領域が干渉により循環領域が居住区近傍で閉じ、周囲流線の曲率が大きくなって居住区背面の圧力低下を促進したためと考えられる。

このことから、風抵抗低減のためには、前章で述べた居住区後部や付加構造物の形状に加えて、特に船尾周囲の船体形状の影響も考慮した設計が必要であると考えられる。

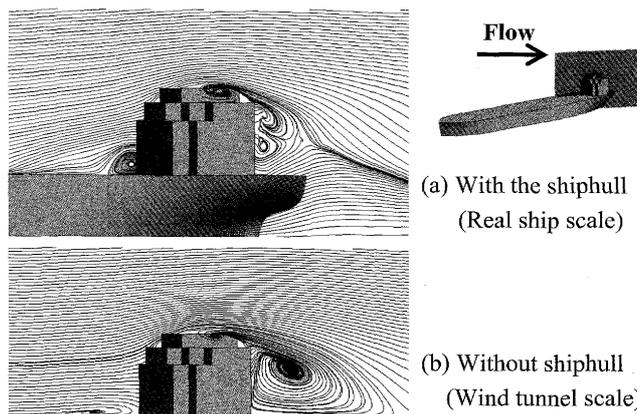


Fig.14 Comparison of the streamlines on the vertical cut-plane through the centerline of the front surface (y=0)

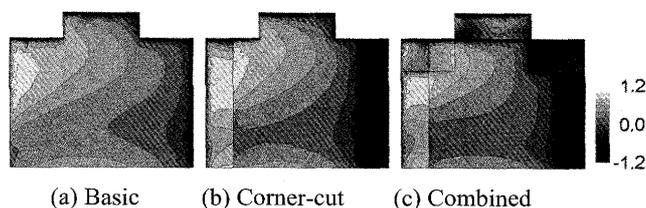


Fig.15  $C_p$  distributions on the frontal surfaces with shiphull at the yaw angle of 30 deg.

Table 2 Comparison of predicted wind drag coefficients between with and without shiphull.

		Without shiphull		With shiphull	
		$C_x$	Reduction rate [%]	$C_x$	Reduction rate [%]
0 deg.	Basic	1.40	—	1.13	—
	C-Cut	0.86	38.9	0.71	37.5
	Combined	0.67	52.5	0.55	51.6
30 deg.	Basic	1.19	—	0.76	—
	C-Cut	0.99	16.5	0.62	17.7
	Combined	0.84	28.9	0.50	34.6

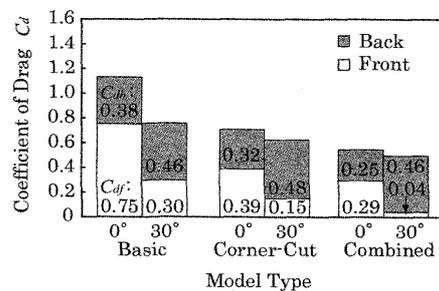


Fig. 16 Comparisons of drag components acting on the accommodation house mounted on the shiphull.

## 6. 結 言

## 参 考 文 献

本論文では、船舶居住区の風抵抗低減技術である段差隅切り形状に着目し、LESを用いた数値解析によって居住区周囲気流を明らかにすることで、その抵抗低減メカニズムの詳細を検討した。これにより以下の結論を得た。

1. 居住区前面角部に矩形の切欠を導入した段差・隅切り形状により、正面風条件下では段差・隅切り内にキャビティ流れが形成され、同時に居住区周囲の剥離循環領域が縮小した。これらの流れ場の変化に伴って、居住区正面での圧力低下と背面の圧力上昇が生じることにより、居住区に作用する風抵抗が低減された。
2. 迎え角 30 度の斜風条件下では、風上側後端角部からの剥離流れが居住区背面近傍で支配的になるため、背面圧力に差異が生じず、抵抗低減効果が低下した。従って、本抵抗低減技術においては、正面風圧の低減に加えて背面圧力の回復も重要な要素である。
3. 船体影響を考慮すると、30 度斜風時において特にその影響が顕著であった。居住区前方の風上側船体縁から生じた剥離域が居住区低層と下流側角部を含むことで、風抵抗が減少するとともに、隅切り形状に対する段差形状の効果が相対的に増大する。また、居住区後方の船体側方から巻き上がる気流と循環領域との干渉によって居住区背面に強い負圧領域が形成され、背面圧力の抵抗への寄与は居住区単体条件よりもさらに増大する。

以上の風抵抗低減メカニズムに関する知見に基づき、居住区、付加構造物、および船体の形状設計を行うことで、より一層の風抵抗低減効果を有する船舶の創出が期待される。

## 謝 辞

本研究の一部は、造船学術研究推進機構からの助成を受けて実施したものである。また、本論文の数値解析は、広島大学情報メディア教育研究センターの H20 年度 HPC サーバ特別利用により実施した。ここに記して謝意を表す。

- 1) The Resistance Committee of 25th International Towing Tank Conference: Final Report and Recommendations to the 25th ITTC; Chapter 10 AIRWAKES, Proceedings of 25th ITTC, Vol. I, 2008, pp.63-68.
- 2) 濱田昇：上部構造物の風圧抵抗 その 1，船舶，56(5)，1983，pp.26-32.
- 3) 二ツ寺暁郎，宮藺大樹，森内洋之，山口一，川村隆文，宮永大：船舶による洋上風応力計測に対する船体及び上部構造物の影響，日本造船学会論文集，(192)，2002，pp.71-80.
- 4) S. Popinet, M. Smith, and C. Stevens: Experimental and Numerical Study of the Turbulence Characteristics of Airflow around a Research Vessel, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21(10), 2004, pp. 1575-1589.
- 5) 松本光一郎，田中良和，廣田和義，宇佐美俊，高岸憲璽：船舶の正面および側面に働く風圧力低減の試み，関西造船協会論文集，(240)，2003，pp.115-121.
- 6) 白石成人，松本勝，白土博通，石崎浩，長田信，松井俊彦：隅切りによる矩形断面の空力安定化効果，第 9 風工学シンポジウム，1986，pp. 193-260.
- 7) 倉田光雄，森澤卓矢，平川浩司，安富善三郎，木田輝彦：エッジの小さな切り落としによる物体の抗力の軽減（正方形断面の角柱の場合），日本機械学会論文集 B 編，64(618) pp.397-404.
- 8) 数値流体力学編集委員会編：乱流解析，東京大学出版会，1995.
- 9) J.Smagorinsky: General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment., Monthly Weather Rev., 91(3), 1963, pp.99-165.
- 10) 畝村毅，張会来，谷口伸行：次世代流体解析ソフトウェア FrontFlow /Red の開発，生産研究，Vol.56, No.1, 2004, pp. 40-43.