

船の低速時操縦性に及ぼす風と潮流の影響について

小 川 陽 弘*

The Effect of Wind and Flow on the Low Speed Manoeuvrability of Ships

A. Ogawa

1. はじめに

港内等の狭水域では、船は必然的に低速で航行し、操舵・増速・減速等の機会も多い。また操船上、船首方位を保つことよりも、船のコースを保つことの方がはるかに大切になってくる場合もある。

このような要求に対して、大きな影響を与える要素として、風・潮流・波・水深等の自然条件が考えられる。これらの影響については、それぞれ詳細な研究が行なわれており、多くの論文が発表されているが、実際の運航面にそれらを利用しようとすると、また1つ手数がかかって、直ぐには応用し難いことが多い。

そこで、ここでは風と潮流の2つの影響をとりあげ、その取扱いの実用的な考え方と、具体的に船の運動を計算した例について考察してみた。

便宜上、実例として計算の対象にした船は、DW15万トン級タンカーと、15,000トン級コンテナ船の2隻の満載状態に限った。前者は巨大船の例として、後者は風圧面積の大きい例としてとり上げたものである。

2. 風の影響

風の力が船に与える影響は、2つの立場から考えられる。1つは主として横安定に及ぼす影響を考えるもので、いわゆるヒーリングモーメントとして風の力を取扱う立場である。他の1つは、主として操縦性あるいは推進性能の立場から、風の力を考慮するものである。前者は漁船等の小型船舶の場合には重要な問題であるが、大型船の港内操船等で水深のことを考えない

ときには二義的となるので、ここでは後者についてのみを扱うこととする。

話を簡単にするために、船の運動を広い意味での操縦運動、即ち、水平面内での移動に限定すれば、理論的に不都合でない範囲で、風の力を2次元的に取扱うことができる。つまり、風の力の高さ方向の分布とか、風の力によるヒールの影響の修正とかは、普通の場合はあまり考えなくても良い、ということである。

2.1. 風圧力

2.1.1. 風圧力の表現法

船に対する風の力の表わし方には、大きく分けて2通りの方法がある。

第1の方法は Hughes 以来の流れを汲むもので、図1に示すように考える。即ち風速 V_a の風が、相対風向 θ_a の方向から、船に向って吹いている時、船全体としては、船首から a の距離の点 P に力 F を受け、そ

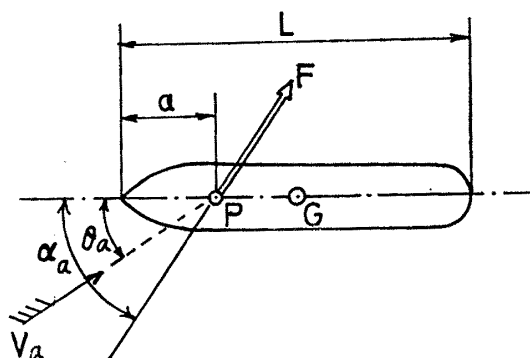


図1 風の力の表現法 (1)

* 船舶技術研究所 (東京都三鷹市新川6-38-1)

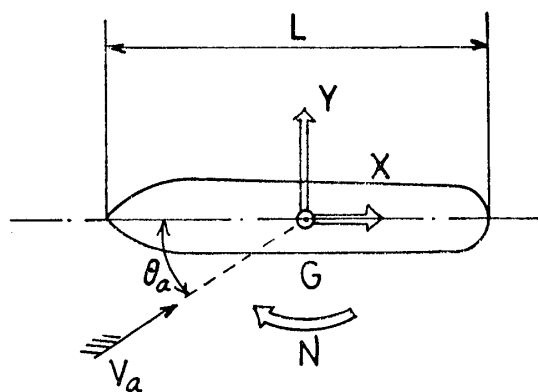


図2 風の力の表現法 (2)

の方向は角 α_a で表わされる、とする。この F を風圧力あるいは風圧合力、 P を風圧中心、 α_a を風圧合力角という。

この表わし方は直観的で実用的であるところから、広く用いられている。

第2の方法は、船の運動を力学的に取扱ったり、運動の計算をする場合に使いやすいもので、図2のように表わす。即ち上と同じ風の条件の時に、船にはその重心に、力 X と Y 、モーメント N が働くと考え。

実は、この2つの表わし方は、全く同等であることは勿論である。即ち両者の間には

$$\left. \begin{aligned} X &= F \cos \alpha_a \\ Y &= F \sin \alpha_a \\ N &= P G \times Y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

の関係がある。

2.1.2. 風圧力の無次元表示

異なつた大きさの船に働く力の傾向を知るためには、これを無次元化しておく、直接比較できて便利である。前項の力やモーメントを無次元の係数の形にするためには、普通次のような形が用いられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{風圧合力係数: } C_R &= F / \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 \\ &= (A \cos^2 \theta_a + B \sin^2 \theta_a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{風圧中心位置: } a/L$$

ただし、記号は前記のもののほか、次の通りである。

$$\rho_a: \text{空気の密度} \approx 0.125 \quad (\text{kg sec}^2/\text{m}^4)$$

$$A: \text{水線上船体の正面投影面積} \quad (\text{m}^2)$$

$$B: \quad \quad \quad \text{側面} \quad \quad \quad (\text{m}^2)$$

$$L: \text{船の長さ (全長 } L_{OA} \text{ でもよいが、普通垂線間長 } L_{PP} \text{ を使うことが多い)} \quad (\text{m})$$

図2の表わし方では、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{抵抗係数} &: C_X = X / \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 A \\ \text{横力係数} &: C_Y = Y / \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 B \\ \text{モーメント係数: } C_N &= N / \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 B L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

Hughes 式の表現によるものを図3に、第2の方法によるものを図4に示した。例にあげたのは、船尾船橋型のタンカーと、高速コンテナ船の、それぞれ満載

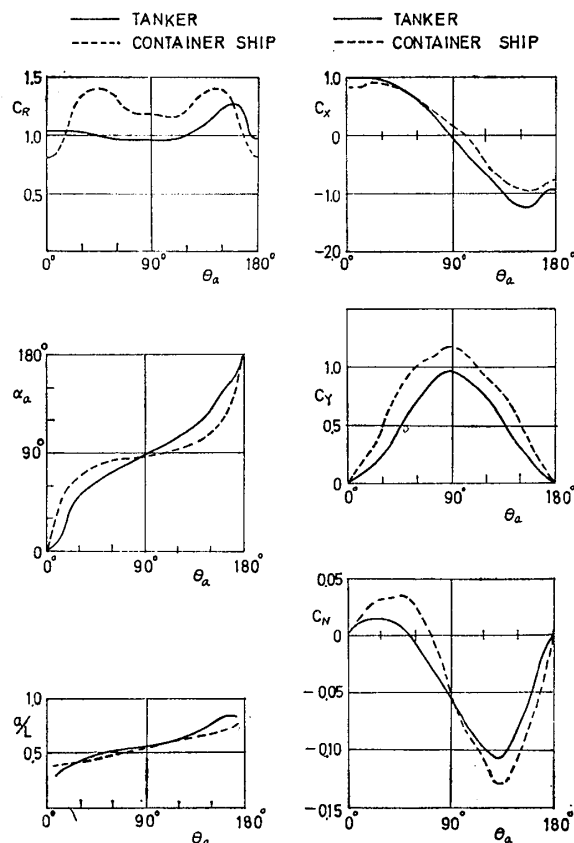
図3 風圧合力係数等
(文献[1]による)図4 風圧抵抗係数等
(文献[1]による)

表1 計算の対象とした船の主要目

		Tanker	Container Ship
Length (PP)	(m)	290.00	175.00
Breadth	(m)	47.50	25.00
Depth	(m)	24.00	15.40
draft	(m)	16.08	9.50
trim	(%)	-0.1	0
Displacement	(ton)	183,200	24,135
Block coefficient		0.805	0.58
Projected Area	$A(\text{m}^2)$	1,030	522
"	$B(\text{m}^2)$	3,212	2,311

状態のもので、それらの主要目を表1に示す。

次にこれら2組の図について、その見方のポイントを述べる。風圧合力係数 C_R の形を見ると、相対風向 30° 及び 150° 付近で、多少山がある様な形になっている。これはかならずしも風圧合力 F が、このような傾向を持っているためだけではなく、無次元値の作り方が、式(2)のように特殊な形になっているためでもある。式(2)の第1式の分母のカッコの中は、書き直すと

$$A \cos^2 \theta_a + B \sin^2 \theta_a = A + (B - A) \sin^2 \theta_a$$

となり、図5に示すように、 θ_a によつて大きく変化する。表1の例でも見られるように、通常の船型では B は A の3~5倍であるから、上式の値は A の値か

ら、その2～4倍の範囲で変化することになり、特に図5でスロープの急な付近では、 C_R の値に急激な変化を与えることになって、無次元値の表わし方としては、余り適当でないと言うことができる。

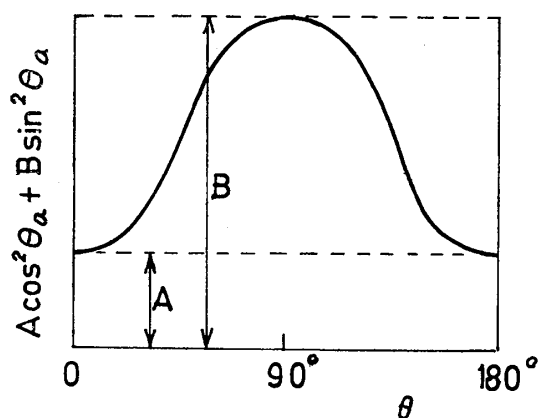


図5 分母の値の変動

そういう意味では、図4のように C_x , C_y , C_z で表わす方が、より合理的である。こちらの場合、特徴のあるのは C_x 曲線で、 0° 及び 180° から 30° 及び 150° 付近にかけて、 C_x が多少増加する傾向がある。これが前の C_R の山と、関係を持つているわけである。

いずれの方法で考えても、現象の本質が変わるわけではないのだから、どちらの表現でも素直に理解できるような、柔軟性のある態度を持つていることが望ましい。

2.2. 速力に及ぼす風の影響

2.2.1. 水と空氣の抵抗の割合

前出の図4からわかる様に、風による抵抗係数は、約1.0の程度である。一方、前進方向に対する水の抵抗係数 C_{RW} は、便宜的に式(3)と同じ形で、水線下正面々積 (A_w とする) を用いて表わせば、低速時には約0.06の程度である。水の密度は空氣の密度の約800倍であるから、水の抵抗と空氣の抵抗の割合は

$$\frac{R_a}{R_w} = \frac{C_x \cdot \frac{1}{2} \rho_a A V_a^2}{C_{RW} \cdot \frac{1}{2} \rho_w A_w V_w^2} \div \frac{A}{A_w} \left(\frac{V_a}{V_w} \right)^2 \dots (4)$$

となる。ここで V_w は相対流速の意味であるが、一応船速と考えておいて差支えない。

A/A_w は満載状態では、タンカーで1～1.5、コンテナ船で2～2.5の程度であるから、ごく大まかに考えて(4)式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_a}{R_w} &\div \left(\frac{V_a}{6V_w} \right)^2 \dots \text{タンカー(満載)} \\ &\div \left(\frac{V_a}{5V_w} \right)^2 \dots \text{コンテナ船(満載)} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

のように表わせる。このことは、たとえ無風状態でも、相対風速は $V_a = V_w$ であるから、3～4%は空氣抵抗が含まれていることを示すものである。また相対風速が、船速の5～6倍になれば、空氣抵抗は水の抵

抗と同等になるので、特に低速時には風の影響が大きいことがわかる。

2.2.2. 風の中で保持できる速力

以上のような考察を、更に詳しく計算したものが、図6(a), (b)である。これは、無風時に或る速度 U_0 で航行することのできる馬力で、風の中をどれ程の速度で走れるかを計算したもので、図4に示した風圧抵抗係数を用いている。風の方向は、船首方向から吹く場合を 0° とし、これを基準とした対地風向を時計回りにとっている。図6は円周方向にこの風向 ψ_B を、半径方向に船速比 U/U_0 をとり、風速比 U_B/U_0 が0, 2, 4, 6, 8の場合について、計算した結果を示したものである。

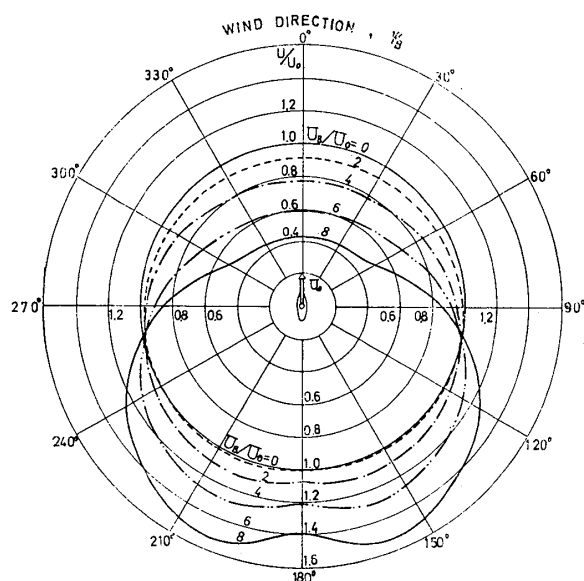


図6(a) 速力に及ぼす風の影響(タンカー, 満載)

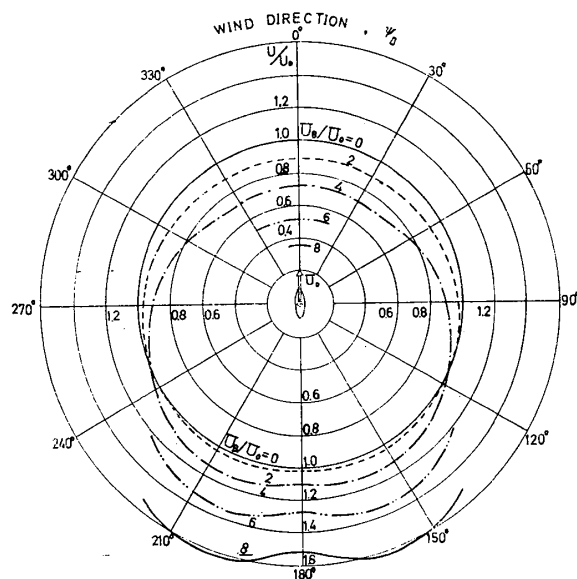


図6(b) 速力に及ぼす風の影響(コンテナ船, 満載)

図によれば、たとえばタンカーで、風速 $U_B = 40$ kt の場合には、無風時船速 $U_0 = 10$ kt の馬力では、向い

風 ($\phi_B=0^\circ$) のとき船速 V は 7.8 kt に落ち、追い風 $\phi_B=180^\circ$ では約 11 kt で走れることになる。

図(b)のコンテナ船で、風速比 $U_B/U_0=6$ 以上のカーブが一部欠けているのは、この範囲の風向では、船を一定の航路に走らせるための当て舵が、異常に大きくなってしまうためにわざと省いたもので、これについては次項に述べる。

2.3. 風 圧 流

2.3.1. 漂流角の考え方

船が風の力を受けると、一般に風下側へ流されるが、これには水の力が抵抗として働き、両方の力が釣り合った状態では、一定の速さで流されることになる。

このとき、停船中に横風を受けて流される場合と、航走中とは、横流れに対する水の抵抗の性質が相当異なる。停船中の場合については、後に流圧の項で述べることにし、ここでは航走中の風圧流について検討する。

一定の針路を保つて航行中の船に働く力と、船の姿勢との関係の、典型的な例を図7に示した。(図では前後方向の力は省略してある。) 以下これについて説明する。

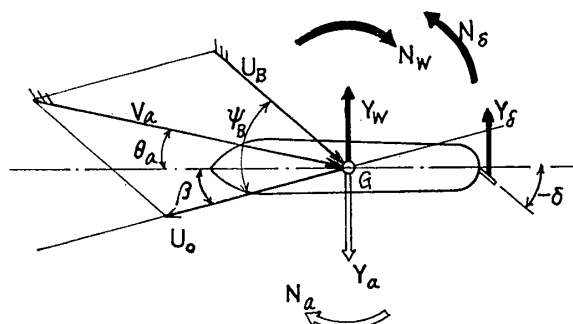


図7 船に働く流体力の関係

風圧流の考え方には2通りあつて、大洋航行中のように、船首方位を基準にして考える場合には、「風によつて何度流された」というように考えても良いが、港内等のコースが定まっている所では、「所定のコースを維持するために、何度の偏角(漂流角)を保つ必要がある」というように考える方が便利である。ここでは後者の見方で考えることとする。

2.3.2. 直進の条件

さて、図7に帰つて、船は速度 U_0 でこの方向に進む必要があるとする。この方向を基準とした対地風速、風向をそれぞれ U_B , ϕ_B とすれば、船に対する相対風速、風向は V_a , θ_a のようになる。 β は前述の偏角である。舵角 δ は、船を右回頭させる方向を正にとると、図の状態では負で、これで全流体力及びモーメントが次のようにバランスしている。

$$\left. \begin{aligned} Y_a &= Y_W + Y_\delta \\ N_a &= N_\delta - N_W \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 Y_δ , N_δ は舵による力とモーメントで、 N_a を除いては各力とモーメントは図の方向に生ずる。 N_a は図4に示すように、 θ_a によつて方向が変わることは、よく知られていることである。

図8(a), (b)は、あらゆる方向の風に対して、所定のコースに直進するのに必要な、偏角 β と舵角 δ の組合せを計算したものである。

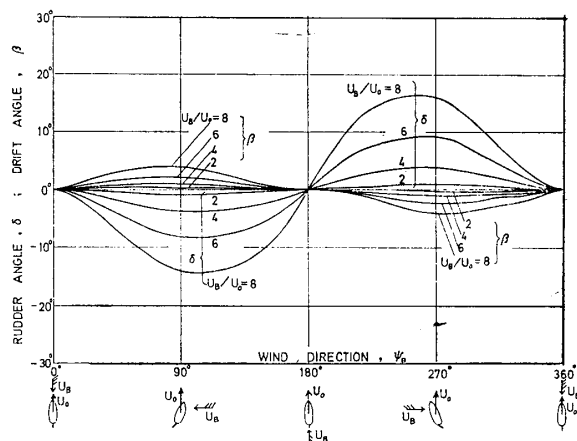


図8(a) 風の中を直進するに要する偏角と舵角
(タンカー, 満載)

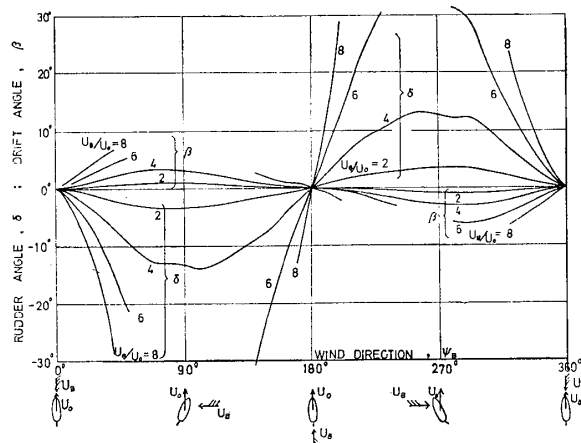


図8(b) 風の中を直進するに要する偏角と舵角
(コンテナ船, 満載)

図8(b)で、風速比 $U_B/U_0=6$ 以上では、横風の範囲で、必要とする舵角が異常に大きくなり、事実上操船不能となることがわかる。これは前出の図6(b)で述べた通りである。

また $\phi_B=180^\circ$ (追い風) 付近では、計算上は直進可能であるが、針路安定性の面から見ると、風速が大きくなると非常に不安定になり、やはり事実上操船不能と考えた方がよい。向い風では針路不安定にはならないから、前述の横風の範囲に入らない限り、一応操船可能である。

2.4. 増減速および停止

2.4.1. プロペラ回転と舵効き

増速，減速あるいは停止運動の場合にも，風の影響が本質的に変わるわけではない。しかしながら，相対的に考えると，増速の場合と減速の場合とでは，風の影響の受け方は非常に異なる。

以下に述べるのは，極めて大まかな議論であるが，増減速時における力の関係から，風の影響を考察する。

まず一定速度で航行中の場合から始める。

このときには前々項の(5)式の割合で，空気と水の抵抗を受けており，プロペラはそれに対抗するだけのスラストを発生するために，或る回転数 N_0 で回転している。1軸1舵，2軸2舵などのように，舵がプロペラの後に配置されている場合は，舵に当る流速は $N_0 P$ (P はプロペラのピッチ) の程度で，「舵の効き」はほぼ $(N_0 P)^2$ に比例すると考えて良い。

次に増速のために，プロペラ回転数を N_1 にまで上げたとする。回転の上昇によつて，スラストが増加するから，船は当然加速し始めるが，慣性が大きいから，その加速は緩慢である。つまり，船速は急には変らない。したがつて，船が受ける風の力も，余り変化はないと考えて差支えない。一方，「舵の効き」は，流速の変化によつて，ほぼ $(N_1 P)^2$ にまで上昇するから，定速航行中の場合に比べて， $(N_1/N_0)^2$ 倍だけ操船し易くなる，と考えると良いであろう。可変ピッチプロペラの場合は，勿論 $(N_1 P_1/N_0 P_0)^2$ として考えれば良い。

逆に減速のために，プロペラ回転数を N_2 にまで下げたとすると，上と全く同様に考えて，「舵効き」は $(N_2/N_0)^2$ 倍まで弱くなり，風に対抗する力は，定速航行時よりも非常に弱まる，と言うことができる。

2.4.2. 横風の中の減速

これが更に極端な場合として，プロペラ回転を全く停止してしまつたと考えると，舵はほとんど効かなくなる，と考えた方が妥当である。厳密に言えば，仮に $N_2=0$ でも，船体伴流の中の舵に対する相対流速は残っているから，舵が全く効かない，ということはないが，一応効かないと考える方が安全である。図9はこのような仮定のもとに計算した例で，一定速度で横風の中を直進して来た船が，プロペラを停止した時以後の運動を示すものである。初速は $U_0=8$ kt (一部4kt) とし，タンカーについては，風速 20, 40, 60 kt の場合，コンテナ船では風速 20 kt の場合のみについて示した。図の下段に記入した β_0 , δ_0 は，図8に示したのと同じ，直進時の偏角と舵角である。コンテナ船で

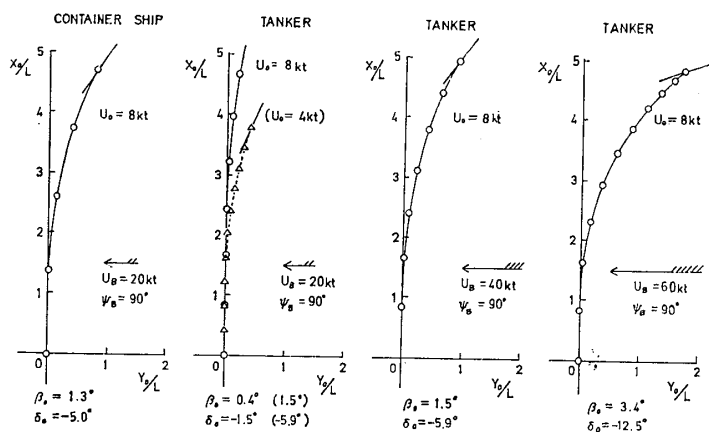


図9 横風を受ける船の機関停止後の運動

は，風速 40 kt 以上では，この δ_0 が非常に大きくなるので省略した。図中のマークは 1 分毎の船の位置を示し，最後のマークの所に引いた 1 船長相当の長さの直線は，その位置での船首方位を示すためのものである。

図9を見ると，いろいろのことが分る。まず，横風でも風速が大きくなると，減速の度合いが大きい。またいわゆる「風上旋回」の傾向が，明瞭に現われている。初速 4 kt で風速 20 kt の場合と，初速 8 kt で風速 40 kt の場合とは，時間の経過がほぼ $\frac{1}{2}$ になつていただけで，航跡，船の姿勢などはほとんど同じになつてい

る。風上旋回とは，航走中の船が風を受けると，ほとんどの場合風上側へ向おうとする性質を言うもので，これは風圧力の着力点よりも，水圧力の着力点が前方にあることによる。

2.4.3. 向い風及び追風の場合

風を前方または後方から受ける場合の，減速の様子を図10(a), (b)に示した。横軸に前進距離の船長に対する比 (X_0/L) を，縦軸に速度低下率 (U/U_0) をとり，時間の経過を 1 分毎にマークで示した。 $\phi_B=0^\circ$ が向い風， $\phi_B=180^\circ$ が追風の場合である。この場合，船は直進するものと仮定している。

図10によれば，タンカーの場合には，風速 20 kt 程度までは余り影響が大きくないが，コンテナ船の場合には，風速 20 kt でも，相当に影響があることが分る。向い風よりも追い風の方が影響が少ないように見えるが，これは初速 U_0 を保つための主機出力が，追い風では向い風よりも少なく済むので，機関を停止した時の変化が少ないためである。なお同図で，追風の場合に増速して行くものがあるが，これは実は，追風に対して初速を保つために，負のスラストをかけていたことになり，現実には余り意味がないが，参考のためにあえて記入した。

なお前項と同様に速度が違う場合には，風速との比

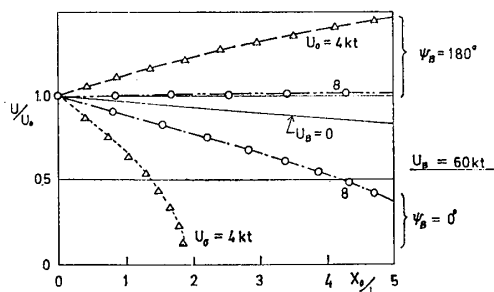
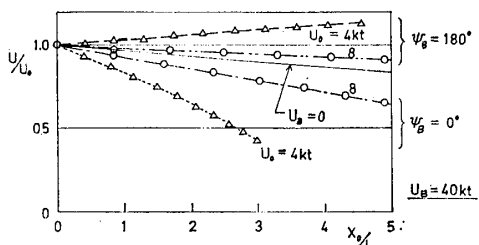
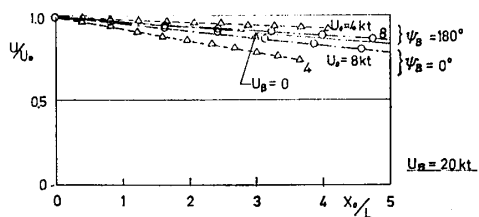


図10(a) 機関停止後の船速に及ぼす追い風及び追風の影響 (タンカー, 満載)

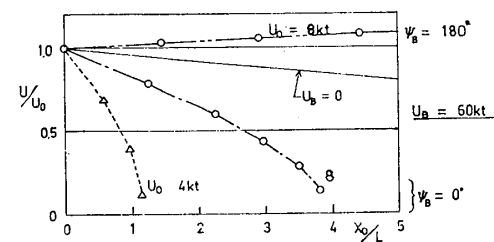
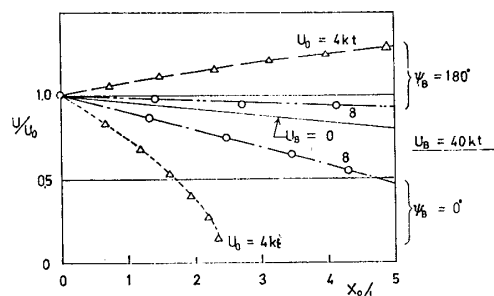
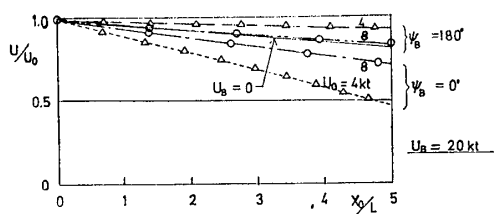


図10(b) 機関停止後の船速に及ぼす追い風及び追風の影響 (コンテナ船, 満載)

をとつて考えれば, この図を利用することができる。

2.5. 旋回性能

2.5.1. 旋回航跡の平均的な漂流

一定方向から吹いている風の中で, 旋回試験を行なうと, 旋回航跡が次第に流されて行くことは, 常に経験される所である。ただしこの場合, 流される方向と風の方向とは, かならずしも一致しない。これは旋回中の船の偏角と, 船に対する相対風速との関係を考えても分ることであるが, 右旋回の場合には, 風下へ向つて左方へ, 左旋回の場合には, 逆に右の方へ, 全体として流されて行く,

定常旋回の場合はさておき, 現在問題にしているのは, 港内操船であるから, 旋回初期の運動に及ぼす風の影響を取扱うこととする。

図11, 12は, タンカー及びコンテナ船の右旋回の計

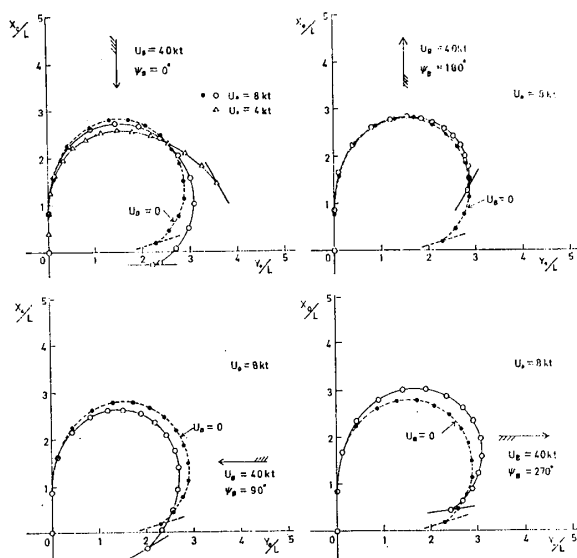


図11 タンカーの風の中の旋回 (舵角右35°)

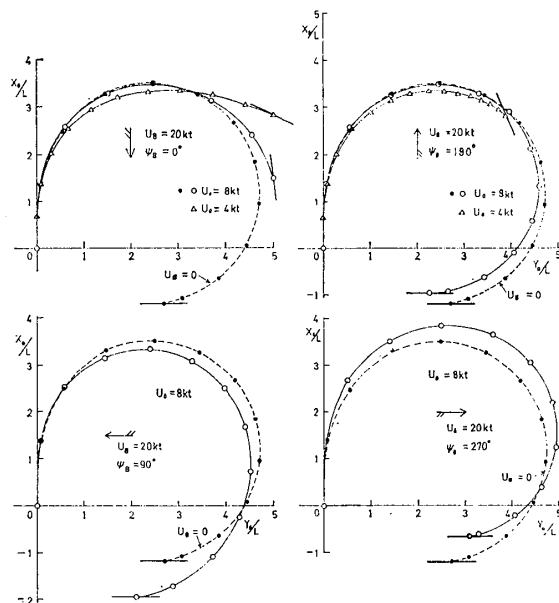


図12 コンテナ船の風の中の旋回 (舵角右35°)

算例で、初速は 8 kt (一部 4 kt), 風速はタンカーが 40 kt, コンテナ船のとき 20 kt の例で、風向は $\phi_B = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の場合を示した。図は操舵開始 (座標原点) から、 270° 回頭まで、または 15 分後まで、あるいは偏角が異常に大きくなつて、船が横流れをするような姿勢になつてしまうまで、などの条件で打切つて航跡を示したものである。白マークは 1 分毎の船の重心の位置を示し、黒マークの破線は、同じく無風状態での旋回軌跡を示すものである。また最終のマークの所の短い直線は、その時の船の姿勢を示すもので、前項 2.4 と同じである。

図11, 12によつて、旋回初期の運動を、たとえばタンカーのアドバンスについて見ると、無風時に約 2.8 L だつたものが、向い風と追い風ではほとんど変わらず、 $\phi_B = 90^\circ$ (右からの風) では約 2.6 に、 $\phi_B = 270^\circ$ (左からの風) では、約 3.0 にまで変つてゐる。即ち旋回初期の運動に関する限りでは、右旋回では、左からの風を受けている時が最も旋回しにくく、右からの風を受けているときは旋回し易い、向い風と追い風とでは、無風時と比べて余り変化はない、ということができる。

この理由は次のように考えられる。まず、右風右旋回は風上旋回の性質で助長されること。次に、右風では操舵前の直進時に、すでにコースに対してわずかながら右向きに偏角を持つてゐること。第3に、本項の最初に述べた様に、風による全体としての漂流方向を考えると、左風では右前方へ流されることになること、等である。

2.5.2. 強風下の旋回

船速にくらべて風速が大きくなると、予想通りに旋回することができなくなることがある。図11(a)と図12(a)の、共に $\phi_B = 0^\circ$, $U_0 = 4$ kt の場合に、この傾向が出はじめてゐるが、更に苛酷な条件について計算した例が図13である。これはコンテナ船の、風速 40 kt の向い風と追風の例であるが、まず $\phi_B = 0^\circ$, $U_0 = 8$ kt では、前述の $U_B = 20$ kt, $U_0 = 4$ kt とほとんど同じ様に、図の終りの位置で、ややコントロールを失ひかけてゐる。この後風上へ向つてしまうわけである。これがもつとはつきりするのだが、同図の $U_0 = 4$ kt の場合で、操舵開始直後は旋回に入るかに見えるが、間もなく再び風上へ向つてしまう。

次に同図の $\phi_B = 180^\circ$, $U_0 = 8$ kt の旋回では、回頭角が 180° 近くなると、相対風向が向い風の方になるため、船速の低下がはなはだしく、遂にはバランスを失つて、逆向きの旋回に入つてしまう。この状態は、前の $\phi_B = 0^\circ$, $U_0 = 4$ kt と同様な条件になつてゐることは、同図を 180° 回して風の方向を揃えて比較

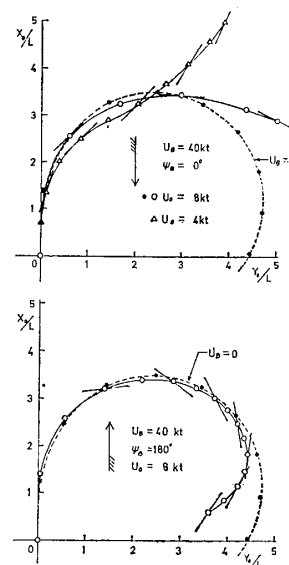


図13 強風下の旋回 (コンテナ船, 舵角右35°)

するとわかる。

なお図13には、参考のために、途中の船の姿勢も示した。

3. 潮流の影響

3.1. 流 圧

3.1.1. 水の力の性質

水線下の船体が水から受ける力は、前節の風圧力と全く同様に表現することができる。即ち、前出の図1, 2において、相対風速・風向等を、相対流速・流向等と置きかえれば、力やモーメントの表わし方としては同じになる。

しかしながら、力の性質は、水線上と水線下で、非常に異なる。風圧による力は、ほとんど圧力抵抗であるが、水線下の船体に働く水の力は、圧力抵抗の他に、摩擦抵抗、造波抵抗、揚力など種々の力の組合せで成立つており、しかもそれらの割合が、相対流向角 θ_w , 相対流速 V_w 等によつて著しく異なる。即ち、相対流向角 $\theta_w = 0^\circ$ では、低速時の水の力は主として摩擦抵抗で、その大きさは水線下の正面面積で無次元化したとき、0.06の程度であることは、前節2.2.1.に述べた通りである。これは水線上の、風圧による抵抗係数が、1.0の程度であるのとくらべて見ると、その性質の相違が良く分る。

3.1.2. 相対流向角が小さい場合

θ_w が0でなく、少し斜航の状態になつて来ると、摩擦抵抗の他に、主として揚力に基づく横方向の力が生じて来る。船が前進速度を持つてゐる場合の操縦運動を調べるには、この段階での流体力が非常に重要で、一般に船の運動を表わす運動方程式の中の、力及びモーメントの「微係数」という形で、図2のような座標系について取扱われることが多い。この場合、相

対流向角 θ_w というのは、偏角 β と本質的に同じものであることは、前節2.3.で述べた通りである。

なおこの状態のときは、一般に水の力の着力点は相当前方にあり、漂流角が風圧力によつて生じた場合には、風上旋回の性質を生ずることになる。

3.1.3. 相対流向角が大きい場合

θ_w が $20^\circ \sim 30^\circ$ を越えると、流れの剝離にもとづく圧力抵抗の成分が、急激に増加して来る。こうなるとその力の無次元値が、風圧力の場合と同じ様に、最大1.0の程度になるであろう、ということは容易に想像できる。

図14は、この状態の流圧を調べるために、模型実験を行なつた結果を示したものである。座標系は図2の

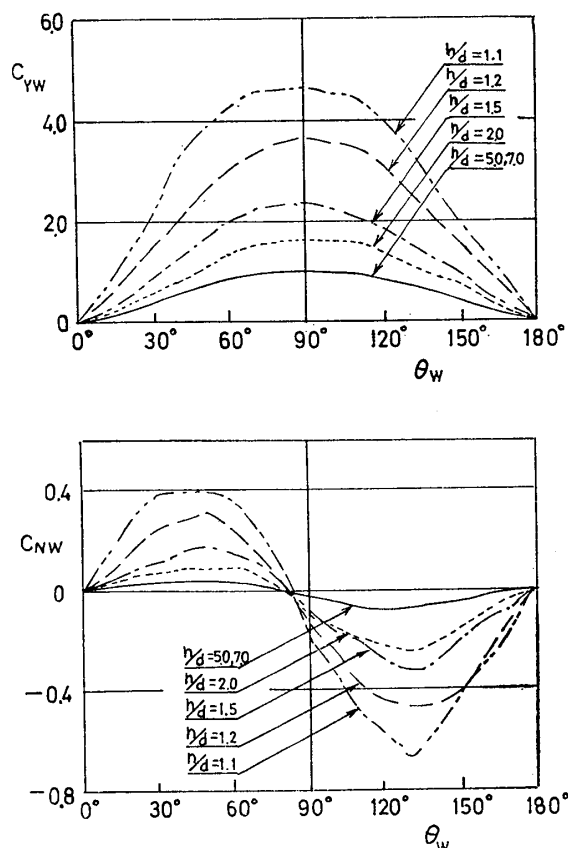


図14 巨大船の水圧横力及びモーメント
(文献[2]による)

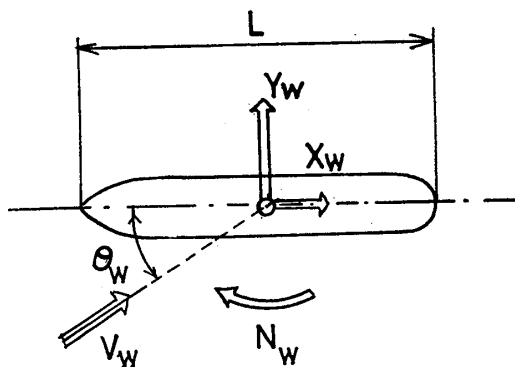


図15 水圧力及びモーメントの表現法

場合と同様に、図15のように表わし、相対流速 V_w による力 Y_w とモーメント N_w の無次元値を

$$\left. \begin{aligned} C_{Yw} &= Y_w / \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 L d \\ C_{Nw} &= N_w / \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 L^2 d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

で表わしたものである。風圧力係数では、水線上側面積を用いているのに対して、ここでは $L \times d$ を用いて無次元化しているが、これは水線下側面積と大差ないことは明らかである。なお、図には水深が浅い場合も示してあるが、水深が浅くなると水圧力が急増することがわかる。

3.1.4. 水圧力の特徴

図14によれば、水圧力係数の形が、風圧力係数とよく似ていることが分る。但し、これは横力とモーメントに限つてのことであつて、前進方向の抵抗成分は、風圧力の場合と異なり、著るしく小さいことは前述の通りである。このため「風圧合力」と同じ様に「水圧合力」の形にしても、これは横力とほとんど変わらないものになり、風圧合力で見られたような「肩」が出ない。したがつて水圧合力角は、相対流向角の相当に広い範囲にわたつて、 90° に近い値を持つことになる。このため、前述の揚力が大きな影響を持つている範囲では、船首側からの相対流によつて、時には船首方向へ船を押すような力の成分を発生することもある。

ただし着力点（水圧中心）は船体中央から前後 $L/5$ 位の範囲で移動する。要するに、水圧力の場合は、性質の違う流体力の組合せになつていたので、その時の相対流向角によつて、見方を変えるのが便利であるし、誤りが少なくて済むわけである。

3.2. 速力に及ぼす潮流の影響

風の力を全く考慮に入れないければ、一樣な潮流の中での船の運動は、流れのない場合の運動を、流れの速さで時々刻々移動させたものに等しい。したがつて、対地運動として考えるときは、このことを理解しておく必要がある。

図16はこれを説明するためのものである。今、船の進行方向の対地速度を U とし、そのコースに対する流向を ψ_F 、流速を U_F と表わすと、船の対水速度は V_w となり、見掛け上は偏角 β を持つが、相対流向角は0である。この時の速度の関係は

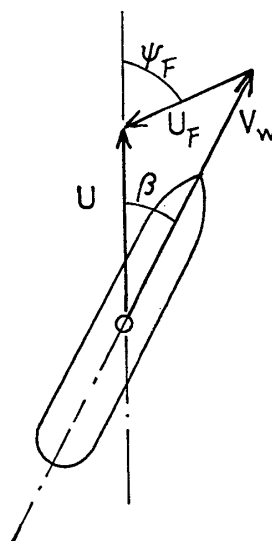


図16 対地速度と対水速度

$$\left. \begin{aligned} U &= V_W \cos \beta - U_F \cos \phi_F \\ V_W \sin \beta &= U_F \sin \phi_F \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となる。大洋航行中のように U_F/V_W が小さく、 β が非常に小さい場合には

$$U = V_W - U_F \cos \phi_F \dots\dots\dots (9)$$

と考えて良いが、船速が低い場合には、流れが横方向からあると、 β も大きくなつて無視できなくなることがある。

3.3. 増減速及び停止

前項で示したように、流れの影響は風の影響と違って、船に生ずる偏角は見かけのもので、実際の偏角即ち相対流向角は0である。このため当然舵角も原理的には0である。

したがって、加速あるいは減速しても、船速の増減によつて、流れの効き方が相対的に変つて来るだけで、その影響は比較的少ない。図17は、横からの流れを受けて航行して来た船が、機関停止してから後の運動を示すもので、船の重心の対地運動の軌跡と、1分毎の位置、及び最初と終り頃の船首方位を示す。これを前節の図9の風の場合と比較すると、潮流と風の影響の仕方の相違が明らかになる。

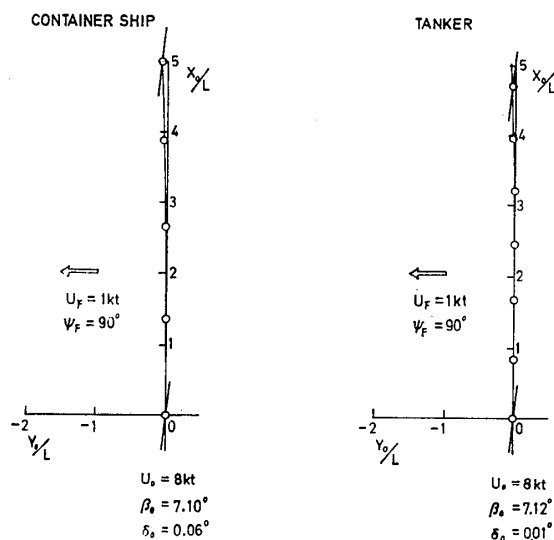


図17 横からの流れを受ける船の機関停止後の運動

図18(a), (b)は、流れを正面から、或は後方から受ける場合の、機関停止後の速度低下率を示す。前節の図10と同様に、 $U_0=8\text{kt}$ または 4kt の一定速度からのものであるから、流速が大きい程、また船の初速が小さい程、影響が大きい。また正面からの流れの場合の方が風の場合と同様に影響が大きい、船の相違による差は非常に少ない。

つまり、流れの中の運動では、船に対する相対流速が支配的であることを考えれば、以上の特徴は自ら理解できることである。

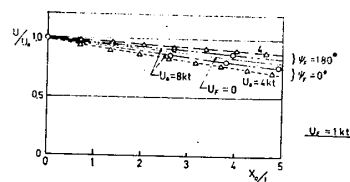


図18(a) 機関停止後の船速に及ぼす流れの影響 (タンカー, 満載)

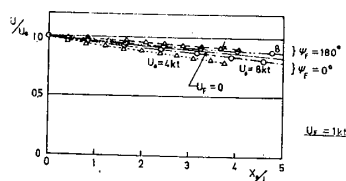


図18(b) 機関停止後の船速に及ぼす流れの影響 (コンテナ船, 満載)

3.4. 旋回性能

再三述べるように、流れの影響は、流されることによつて相対的な風による影響が、わずかに相違して来ることを考えなければ、単なる座標系の時間的な移動に過ぎない。したがって、流れの中で旋回しても、その対地運動としての航跡は、一定の割合で流れの方向にずらして行つたようなものになることは容易に予想できる。

図19, 20はこの様子を見るために、船の初速 8kt 、流速 1kt の場合について計算したものである。流れの方向は $\phi_F=0^\circ$ (正面から), 90° (右横から), 180° (後方から) の3種とし、比較のために流れのない場合も示した。舵角は右 35° である。

両図とも $\phi_F=90^\circ$ の場合に、アドバンスが平水中よりも短く、流される方向が予想と違つて見えるが、これは操舵前の直進時に見かけの偏角を持つており、船首方位を基準として取ると、流れは右前方から来る形になるので、流される方向は、左後方へということになり、対地運動の軌跡としては、これで正しいわけである。

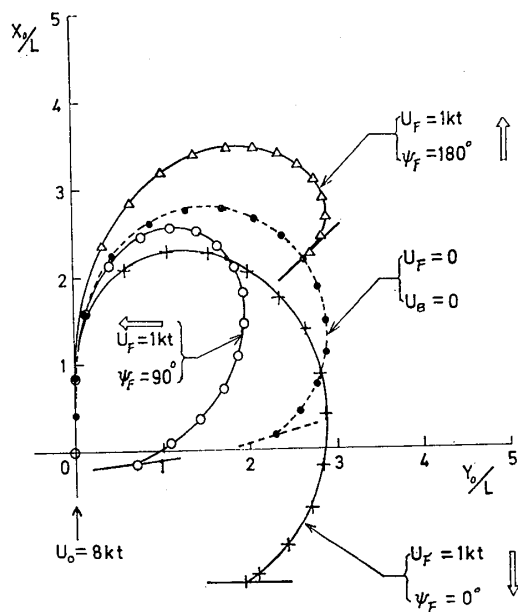


図19 潮流の中の旋回 (タンカー, 舵角右35°)

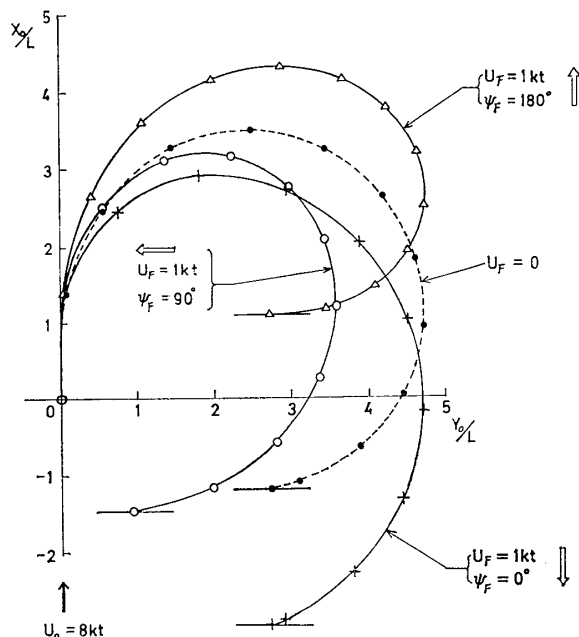


図20 潮流の中の旋回 (コンテナ船, 舵角右35°)

また $\phi_B = 0^\circ$ 及び 180° の場合は, この様な初期偏角がないから, 単純に流れの方向に軌跡が引き伸ばされている様子が良くわかる。

初速の違いによる相違は, 流速との比で考えてやれば良いことは言うまでもない。

3.5. 局所潮流の影響

3.5.1. 流れのモデル化

流れの速度や方向が, 局所的に変化している場合について, 一般的に解析することは, ほとんど不可能である。

ここでは, 図21のような, 防波堤の出入口付近で, その中と外に異なった流速の, 平行な流れがある場合を仮定し, その境界を横切る船の運動を, 計算によつ

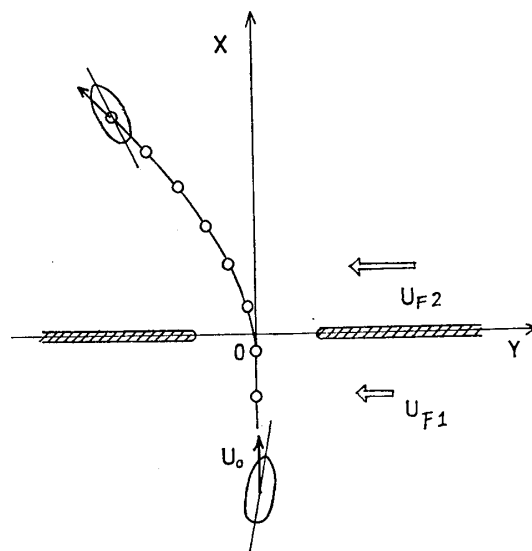


図21 流速の異なる流れのモデル

て調べ, 局部的に流圧を受ける場合に, 船体がどのような力を受け, どのように運動するかを考察する。座標系及び流速, 流向を図のように表わすこととする。

船はX軸の負の方向から, X軸に沿つて, 速度 U_0 で直進して来るものとする。この時は勿論, 流れ U_{F1} の中の直進条件を満足するような, 偏角 β_0 を持っている。

3.5.2. 流れの中へ入る場合

図22, 23は, 流れのない所 ($U_{F1} = 0$) から, 1 kt または 2 kt の流れ (U_{F2}) がある所へ, 進入する場合の計算例で, 計算は便宜上, 船の重心が $X_0 = -0.6L$ に来たときから始めて, その後の航跡と, 1分毎の位置及び船首方位を示している。初速は $U_0 = 8$ kt 及び 4 kt の場合を示した。図中点線で示した Y_0/X_0 の線は, 流速と船の初速との比を表わしたもので, 船が $U_{F1} = 0$ の状態から瞬間的に U_{F2} の中へ移つたとすれば, 船首方位は変わらずに, 軌跡はこの線に乗る筈である。しかし実際には, 次の様な過程で, 船は大きく針路を変えてしまう。なお舵は一切操作しないものとしているから, 舵角は常に $\delta = 0$ である。

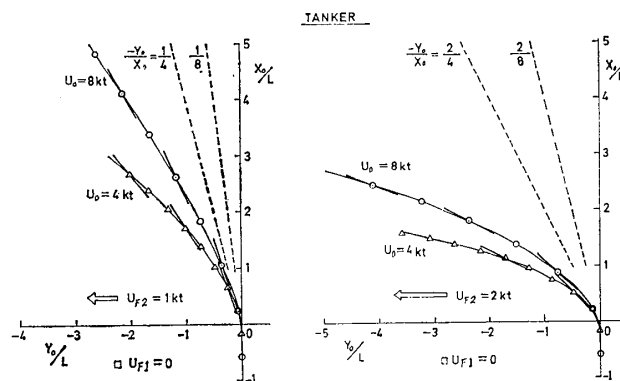


図22 横向きの流れの中へ入る船の運動 (タンカー, 満載)

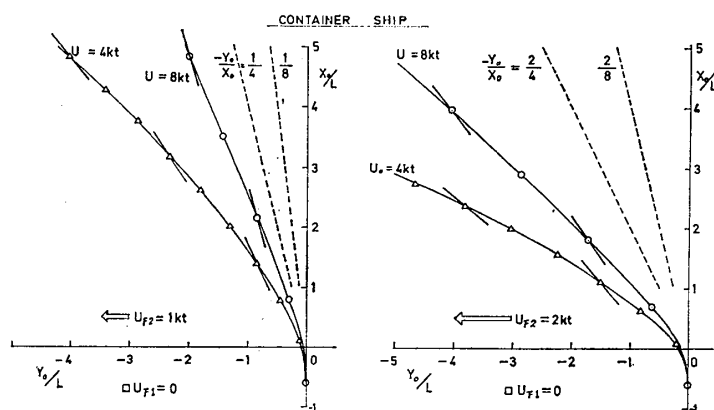


図23 横向きの流れの中へ入る船の運動
(コンテナ船, 満載)

(i) 船首が流れの境界に入った時から、船はその部分に U_{F2} による流圧を受け始めるため、大きな回頭角速度を生じ、左へ回頭し始める。

(ii) 船体中央が境界にかかる頃、この回頭角速度は最大になるが、以後は U_{F2} の流圧が後部にも働き、また旋回抵抗も全体として大きくなるので、角速度は減少し始める。

(iii) 船体が完全に U_{F2} の中へ入ってしまう直前には、角速度は激減しているが、船首方位はすでに大きく左へそれてしまっている。

(iv) 完全に U_{F2} の中へ入った後は、減少しつつあるがまだ残っている回頭角速度によって、それまでに大体定まった方位から少しずつ変って行くような運動になる。

図ではタンカーの方がコンテナ船よりも大きく影響を受けているように見えるが、これは同じ船速で比較しているためで、船型による相違を考えなければ、影響度は見かけ程は変わらない。即ち同じ速度ならば、小さい船ほど境界を通過するに要する時間が相対的に短かいので、コースの外れる度合いが少ないわけである。

3.5.3. 流れの中から出る場合

次に図24は流れのある所 ($U_{F1}=1$ kt) から、流れの

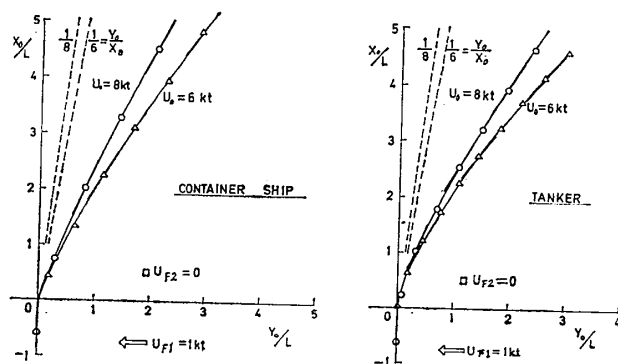


図24 流れの中から出る船の運動
(左: コンテナ船, 右: タンカー)

ない所 ($U_{F2}=0$) に進入する場合を示す。この場合は、初期に流速による見かけの偏角 β_0 を持っているため、これが $U_{F2}=0$ の部分に入った時に実偏角(相対流入角)となり、 U_{F1} と逆方向に大きな流圧を生じ、前記と同様の過程によって右方へ外れて行く。この場合は、 $U_{F2}=0$ の中へ完全に入ってしまうと、もはや流されなくなるので、見かけの偏角もほとんど0となる。この点は図22, 23の場合と異なる特徴である。

反流の場合については、たとえば $U_{F1}=1$ kt, $U_{F2}=1$ kt の様な時は、ほぼ $U_{F1}=0$, $U_{F2}=2$ kt の場合と等しいか、少なくとも最初に偏角を持っていた分だけ、やや影響を大きく受けるか、というように考えて良い。

いずれにしても、流れの境界を横切る時には、流速から考えられるよりも、はるかに大きい影響を受け、また等しい船速で考えると、大きい船ほど影響を受け易いことは注意する必要がある。

4. おわりに

本文で引用した運動計算は、主として文献[3]の方法を用い、船研共用電子計算機 FACOM 270-20 により行なつた。風速0の場合でも、船速による相対風速の力は計算に入っている。対象とした船は、タンカーは図14を除き東京丸、コンテナ船は PSW 航路のあめりか丸型である。タンカーに対する計算値は、種々の実験値と比較的良く一致しているのに対して、コンテナ船の方は、大舵角に対するデータにやや不満足な所があり、舵の力を過少評価していると思われるが、実際との比較から見れば安全側であるので、あえて修正はしなかった。

話の性質上、内容は極めて現実的かつ平凡なものになつてしまつたが実際の運航に携わる方々に、何らかの参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] 辻 豊治, 高石敬史, 菅 信, 佐藤辰二: 船体に働く風圧力に関する模型試験, 船舶技術研究所報告, 第7巻 第5号, 1970
- [2] 辻 豊治, 森 信篤, 山内保文: 斜航する船体に働く水圧力について(続, 制限水路影響), 船舶技術研究所報告, 第6巻 第5号, 1969
- [3] 小川陽弘: 外力を受ける船の操縦運動の計算(その1), 日本造船学会論文集, 第126号, 1969