

東京大学大学院新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻

平成 22 年度

修士論文

漂流船舶が着床式洋上ウインドファームに及ぼすリスクに関する研究

2011 年 2 月提出

指導教員 鈴木英之 教授

47-096642 岡山 真也

目次

図表目次	3
第1章 序論	5
第1節 風力発電が必要な背景	5
第1項 地球温暖化	5
第2項 枯渇するエネルギー資源	7
第3項 日本のエネルギー資源の脆弱性	8
第4項 有望な再生可能エネルギーとしての風力発電	9
第2節 風力発電の現状及び洋上風力発電の必要性	10
第1項 風力発電の国内外の動向	10
第2項 洋上風力発電の必要性	13
第3節 本研究の目的	13
第1項 風車と船舶に関する先行研究	13
第2項 本研究の目的	14
第4節 本論文の構成	14
第1項 WFと船舶の衝突シナリオ	14
第2項 本論文の構成	14
第2章 漂流・WF 進入確率モデル	15
第1節 漂流する船舶の種類	15
第2節 来島海峡モデル	16
第1項 来島海峡の特徴	16
第2項 来島海峡における航行船舶数データ, 事故データ	16
第3項 モデル化	17
第3節 検証 (津軽海峡の AIS データと比較して)	21
第1項 津軽海峡の特徴	21
第2項 AIS (Automatic Identification System=船舶自動識別装置) データ	21
第3項 来島海峡との比較	22
第4節 本章の結果と考察	23
第3章 船舶漂流衝突シミュレーター	24
第1節 初期条件の設定	24
第1項 船体形状(水線面および水面下)	24
第2項 船体形状(水上の形状)	27
第3項 海象条件	27
第2節 外力の計算	29
第1項 船舶に作用する流体力 $F_{X_current}, F_{Y_current}, F_{N_current}$	30
第2項 波漂流力	31
第3項 風圧力	33
第4項 風車との衝突による船舶に与える外力のモデル	34
第5項 風車のモデル	35
第6項 風車の運動方程式	37
第3節 運動方程式	38
第4節 シミュレーターの動作検証	40

第1項	船舶の漂流	40
第2項	風車の運動	44
第5節	被害額算定	45
第1項	風車の変位と損害額の関係	45
第4章	船舶とウィンドファームとの連鎖衝突リスク	46
第1節	連鎖衝突リスクの定式化	46
第2節	航路内の航行船舶数 N_{total}	47
第3節	漂流確率 P_{DRIFT}	48
第4節	損害の期待値 $C_{collision_WF}(i, v, \theta)$	48
第5節	風速発現確率 P_v	48
第6節	風向発現確率 P_θ	50
第5章	結果と考察	53
第1節	航路及びWFの設定	53
第1項	着底式ウィンドファーム設置可能海域	53
第2項	想定する着底式風車	53
第3項	ウィンドファームの形状と航路	54
第2節	初期位置	55
第3節	船舶が衝突する風車の期待値と損害額の期待値計算	56
第4節	ウィンドファームの比較検討	58
第5節	連鎖衝突リスク	58
第6章	結論	61
	参考文献	63
	謝辞	65

図表目次

図 1-1 年平均気温の変化 ^[2]	5
図 1-2 大気中の二酸化炭素濃度の経年変化 ^[2]	6
図 1-3 人為起源の温室効果ガスの種類別の割合 ^[3]	6
図 1-4 世界の一次エネルギー供給量の推移 ^[6]	7
図 1-5 世界の石炭の可採年数の推移 ^[7]	8
図 1-6 日本の一次エネルギー供給の推移 ^[8]	9
図 1-7 主要国のエネルギー自給率 ^[8]	9
図 1-8 世界の風力発電累積導入量の推移 ^[10]	11
図 1-9 世界の風力発電累積導入量割合 ^[10]	11
図 1-10 日本における風力発電導入量の推移 ^[11]	12
図 1-11 漂流する船舶の動きイメージ図	14
図 2-2 来島海峡の航路 ^[36]	16
図 2-5 各事故が発生する場所のモデル	18
図 2-6 標準正規分布の確率密度関数	19
図 2-9 津軽海峡における AIS データ	22
図 2-10 船舶の存在確率	23
図 3-1 船舶の漂流	24
図 3-2 計算フロー	24
図 3-3 船舶の水線面の形状	26
図 3-4 水面下の船体形状	27
図 3-5 船舶の水上部の形状	27
図 3-7 風波, 潮流の迎え角 (角度は反時計回りを正とする.)	30
図 3-8 無次元化周波数と無次元化漂流力の関係 ^[21]	32
図 3-9 波の入射角と漂流力の関係	33
図 3-10 風の迎え角と無次元化風圧力の関係	34
図 3-11 衝突判定	35
図 3-12 衝突力モデル ^[35]	35
図 3-13 風車の倒壊事故例 ^[27]	36
図 3-14 風車のモデル	36
図 3-15 荷重とタワー頂部変位の関係 (高さ 35 m) ^[27]	37
図 3-16 塔頂水平変位と塔頂水平荷重の関係 ^[28]	37
図 3-17 漂流船舶の船速ベクトルと船体の向き ^[18]	41
図 3-18 船の速度の比較	42
図 3-19 船の進む方向の比較	42

図 3-2 0 船体の回転角の比較	43
図 3-2 1 静的動作の確認	44
図 3-2 2 固有振動数の確認	44
図 4-1 想定海域での Weibull 係数 $k^{[25]}$	49
図 4-2 想定海域での 10 分平均風速発生頻度分布	50
図 4-3 風向頻度分布	51
図 5-1 銚子沖の海底地形図	53
図 5-2 WF 1 の形状 (2MW 風車)	54
図 5-3 WF 2 の形状 (5MW 風車)	54
図 5-4 座標設定	55
図 5-5 風速ごとの損害期待値(WF1 (2MW×100))	56
図 5-6 風速ごとの損害期待値(WF2 (5MW×42))	56
図 5-7 初期位置による損害額への影響 (WF1 (2MW×100))	57
図 5-8 初期位置による損害額への影響 (WF2 (5MW×42))	57
図 5-9 各 WF の損害額期待値と衝突期待基数	58
図 5-1 0 仮想海域	59
表 1-1 資源と確認可採埋蔵量, 確認可採年数 ([7]より作成)	8
表 1-2 発電方式別の発電コスト ^[9]	10
表 1-3 風力発電導入に関するロードマップ ^[11]	12
表 2-1 航路を逸脱する船舶の分類	16
表 2-2 来島海峡における通行船舶数 (隻/日)	17
表 2-3 備讃・来島海域での事故 (第六管区海上保安本部業務統計資料から)	17
表 2-4 事故発生確率	20
表 2-5 WF の位置と航路幅の比と進入確率の関係	21
表 3-1 各風速における有義波高・有義波周期	29
表 3-2 設置にかかる費用の比較	45
表 4-1 銚子港の期待船舶数の内訳 ^{[30][31]}	47
表 4-2 鹿島港の入港船舶数と内訳 ^[32]	47
表 4-3 航路を逸脱する船舶の分類 (再掲)	48
表 4-4 風速発現確率 P_v	50
表 4-5 想定海域における風向頻度分布	51
表 5-1 航路中心から WF までの距離とリスクの関係	60

第1章 序論

第1節 風力発電が必要な背景

第1項 地球温暖化

近年、地球温暖化はテレビや新聞などのメディアで一般的に報道されるほど人類の共通課題として身近に認識され始めている。IPCCの第4次評価報告書によると、ここ100年で世界の平均気温は 0.74°C も上昇しており、今後も上昇傾向にあるという(Fig.1)。また平均気温が上昇するだけでなく、異常高温、大雨、干ばつなどの大きな気候変化、さらには水温上昇に伴う海水の膨張や氷河の融解による海水面の上昇、積雪面積の減少などをももたらすため、生態系などへの影響が大きく懸念されている。このような地球温暖化の原因は、18世紀半ばの産業革命以降、化石燃料の大量消費によって発生した二酸化炭素などの温室効果ガスの増加であり、その増加率は1970～2004年の間で70%といわれている(Fig.2)。今までのデータから将来の温暖化影響予測もされており、それによると21世紀末の地球の平均気温は20世紀末に比べて $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ 上昇し、現在17cmまで上昇している海水面水位は18～59cmまで上昇すると予測されている

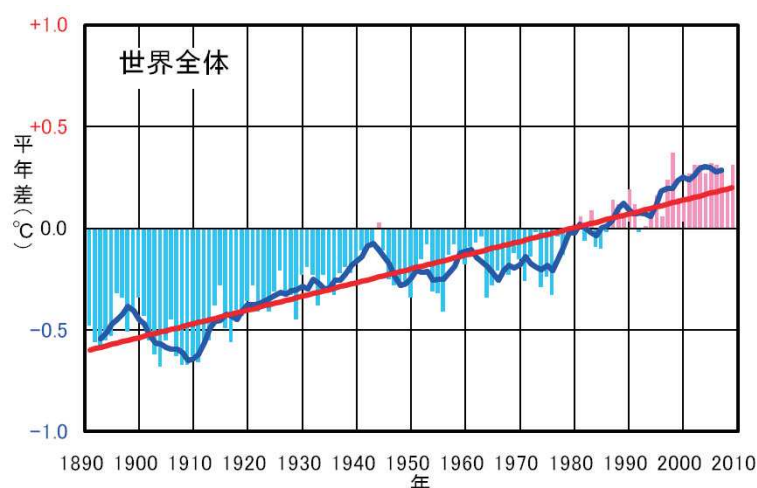


図 1-1 年平均気温の変化²⁾

棒グラフは各年の平均気温の年平均差(平年値は1971～2000年の平均値)を、太線(青)は年平均差の5年移動平均を示し、直線(赤)は年平均差の長期的傾向を直線で近似したものである。

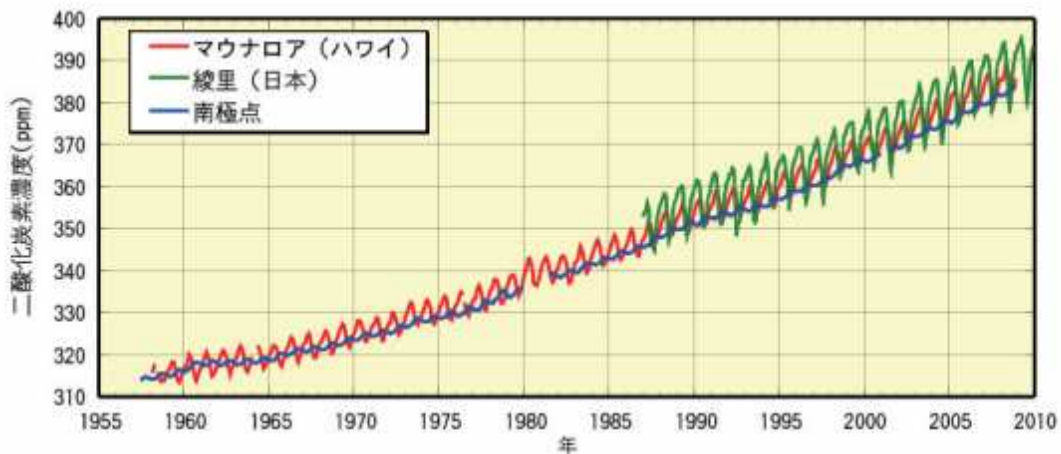


図 1-2 大気中の二酸化炭素濃度の経年変化^[2]

温室効果ガスの大気中濃度増加抑止を目的とした対策は 1990 年代以降、国際規模でなされている。1992 年にリオ・デジャネイロで開催された地球サミットにて大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的とした気候変動枠組条約が各国に署名され、1994 年に発効された。この枠組条約の目的達成のため第 3 回締約国会議(COP3)で採択されたのが京都議定書である。これは先進国などに対し、2008～2012 年の 4 年間で温室効果ガスを 1990 年比で一定の値(日 6%、米 7%、EU8%)を削減することを義務付けるものである。この議定書で規定された温室効果ガスとは二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄を指す。中でも特に化石燃料消費による二酸化炭素が半分以上を占める

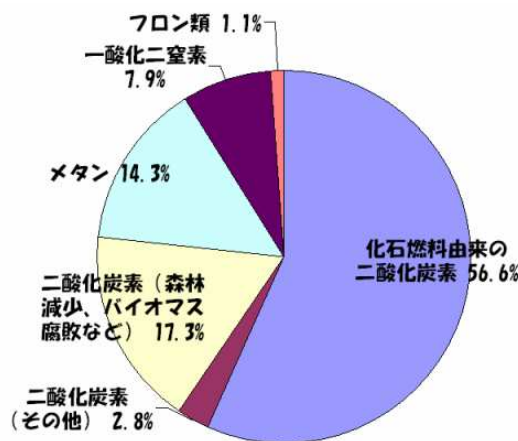


図 1-3 人為起源の温室効果ガスの種類別の割合^[3]

また、京都議定書の中には国内での単なる排出量削減を除く植林活動や、国外での活動、削減量の国家間取引など、温室効果ガスの削減をより容易にするための京都メカニズムと

呼ばれる規定がある。これは柔軟性措置とも呼ばれ、主に以下の3つのメカニズムを指す

- クリーン開発メカニズム(CDM:Clean Development Mechanism)

先進国が開発途上国への援助によって温室効果ガス排出量を削減する事業を実施した結果、削減できた排出量の一定量を先進国の温室効果ガス排出量の削減分の一部に充当することができる制度。

- 排出量取引(ET:Emissions Trading)

国家間で排出権を売買する制度。削減目標に対して排出量に余裕がなければ他国から排出権を購入し、余裕があれば他国に排出権を売却することができる。

- 共同実施(JI:Joint Implementation)

投資先進国が事業を実施する国で温室効果ガス排出量を削減し、そこで得られた削減量を取引する制度。

2006年に発表されたスターン報告^[5]によると地球温暖化の対策を施さなかった場合、世界がGDPの約20%に相当する損失を被るリスクがあるとされている。ただし、強力な緩和政策によりその被害の多くを回避することができ、かつそのためにかかる費用はGDPの1%程度であると見積もられており、気候変動に対する早期かつ強力な対策による利益はそのコストを凌駕することがわかる。そこで今後は有効な緩和策を考案し、実行していくことが必須である。

第2項 枯渇するエネルギー資源

資源量という観点からも化石燃料には問題が迫っている。

現在、世界の1次エネルギー供給は主に、石油、石炭、天然ガス、ウランと再生可能エネルギーによる(図1-4)。また、年間の消費量も非常に増えており、特に石炭、石油に関しては中国での消費量の伸びが著しく、石炭は世界増加分の77%、石油は世界増加分の33%を占めた^[7]。

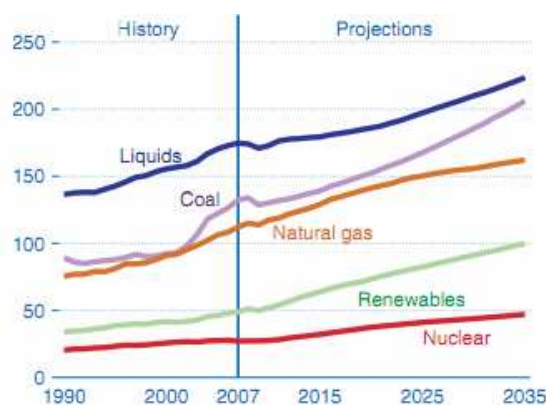


図 1-4 世界の一次エネルギー供給量の推移^[6]

しかし石油、石炭、天然ガスのような化石燃料資源は有限のものであり、一般的に確認可採埋蔵量と確認可採年数で表される(表 1-1). この確認可採埋蔵量というのは現在の技術力や経済力で採掘可能な資源量を表しており今後の発展に伴い増加するが、石炭の様に消費量が増加量を圧倒的に上回ってしまうと、可採年数は減ってしまう事もある(図 1-5). 石油の確認可採年数は現在 41 年といわれているが、推定埋蔵量などを含めると実際には約 100 年で完全に枯渇するとも言われている。

表 1-1 資源と確認可採埋蔵量, 確認可採年数 ([7]より作成)

資源	確認可採埋蔵量	確認可採年数
石炭	8260 億 t	122 年
石油	12580 億 t	42 年
天然ガス	185 兆 m ³	60 年
ウラン	546.9 万 t-U	100 年

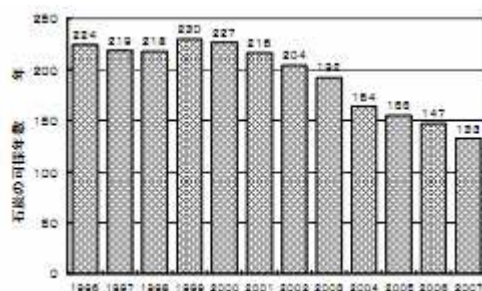


図 1-5 世界の石炭の可採年数の推移^[7]

第3項 日本のエネルギー資源の脆弱性

日本は世界第 4 位のエネルギー消費量大国であるが、国内で生産できるエネルギー資源は非常に乏しい。これまで原子力や新エネルギーの開発などによってエネルギー供給源の多様化を図っており、日本のエネルギーセキュリティは大きく向上した(図 1-6). しかし、それでも日本のエネルギー自給率は 4%, 原子力を国産とした場合でも 18%と世界のエネルギー自給率から見ても非常に低い値であり、深刻な状況となっている(図 1-7). 特に消費量の多い石油は海外依存度が 99.6%となっている。

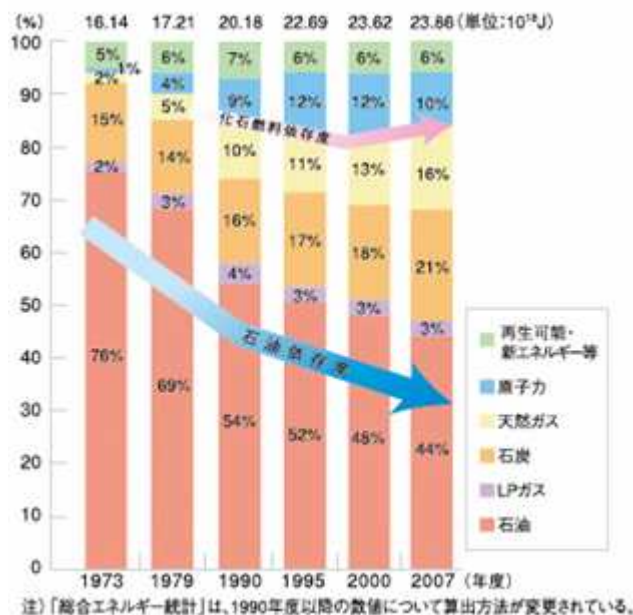


図 1-6 日本の一次エネルギー供給の推移⁸⁾

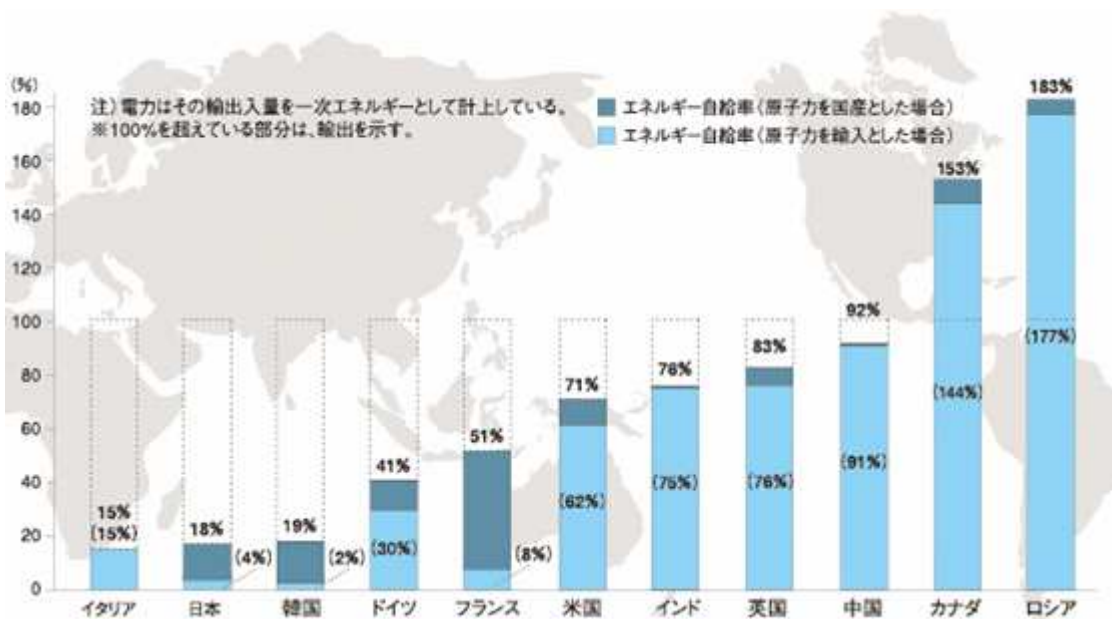


図 1-7 主要国のエネルギー自給率⁸⁾

第4項 有望な再生可能エネルギーとしての風力発電

上記の問題から、日本のエネルギー資源の脆弱性から、現在再生可能エネルギーの開発や導入が求められている。特に有望視されている発電方式の一つが風力発電である。風力発

電は環境負荷が小さいことに加え、豊富なポテンシャルと他の発電方式に比べて非常に低コストで発電できるという利点がある(表 1-2)。ポテンシャルの面では洋上展開も含めて考えると最大で日本の電力需要の 39%を貯えるといった試算^[9]も出ており、今後の動向が注目されている。

表 1-2 発電方式別の発電コスト^[9]

発電方式	発電単価(円/kWh)
水力	8.2~13.3
石油	10.0~17.3
LNG	5.8~7.1
石炭	5.0~6.5
原子力	4.8~6.2
太陽光	46
風力	10~14

第2節 風力発電の現状及び洋上風力発電の必要性

第1項 風力発電の国内外の動向

事実、世界の風力発電累積導入量は過去十年間、堅調に伸びており、2009 年末に 158.5GW に達した(図 1-8)。

近年では中国が急激に導入量を増やし、ドイツを抜いて世界第 2 位の風力発電大国となった。他にもインドなども導入量を増やしている(図 1-9)。一方今まで上位を占め、風力発電をリードしてきたドイツ、スペイン、デンマークなどの西欧諸国はそれぞれの国内市場でピークを迎えてしまっている。この主な要因は風力発電の設置場所の減少やバードストライクなどによる生態系に与える影響、景観の悪化による住民の反対などが挙げられ、これらの対策もこれからの風車の課題の 1 つとされている。

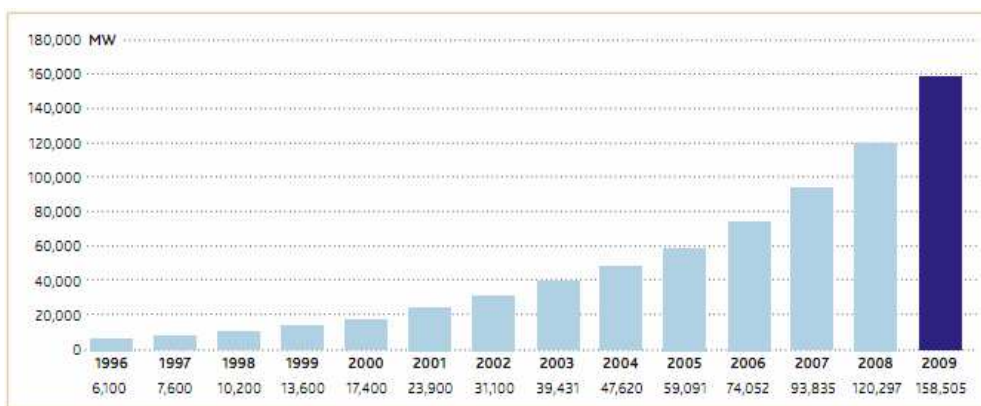


図 1-8 世界の風力発電累積導入量の推移^[10]

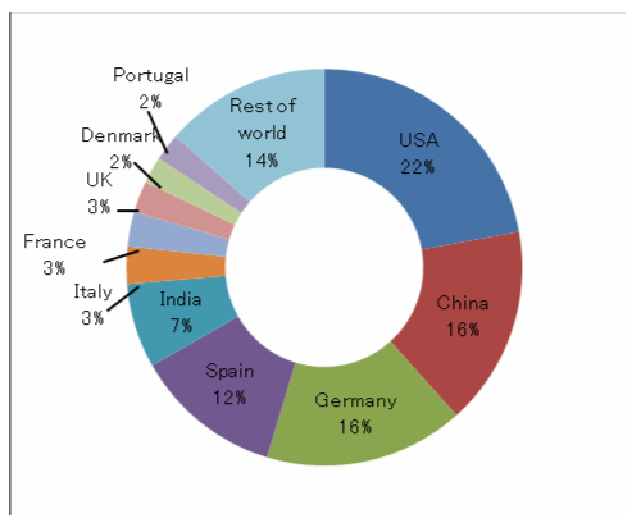


図 1-9 世界の風力発電累積導入量割合^[10]

また、日本においても 1990 年代後半から急速に導入が進み、2009 年までの 10 年間で導入量は 20 倍以上に増加。2009 年度で累積容量 2,186MW に達した(図 1-10)。

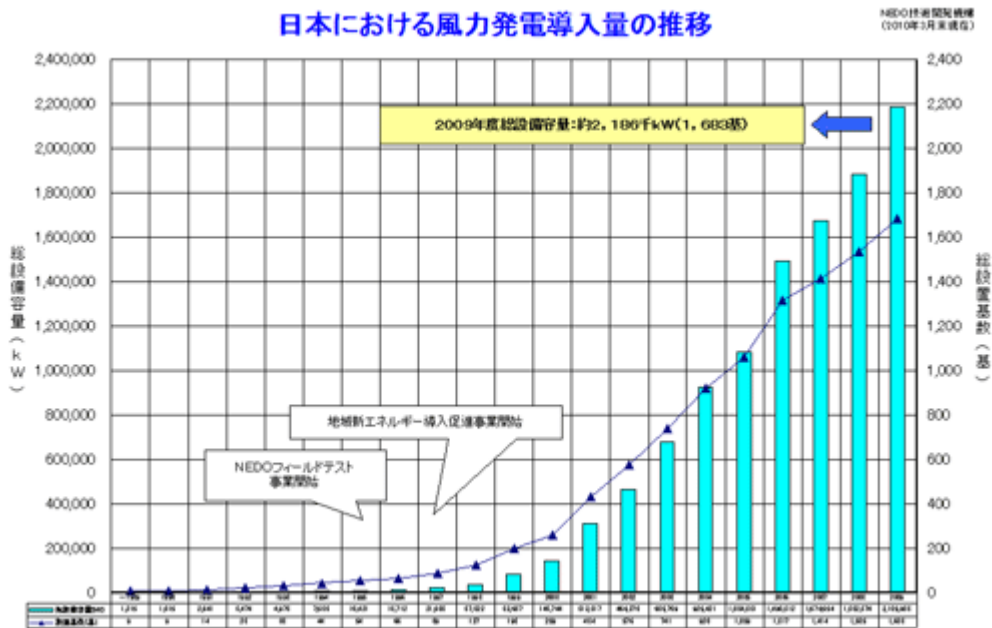


図 1-10 日本における風力発電導入量の推移^[11]

表 1-3 風力発電導入に関するロードマップ^[11]

年度	風力導入目標(MW)			
	2050 年度需要電力量の 10%以上供給			
	陸上	着床	浮体	合計
2008	1,854	0	0	1,854
2010	3,000	0	0	3,000
2015	6,400	5	0	6,405
2020	11,100	200	10	11,310
2025	16,400	1,100	600	18,100
2030	21,500	2,700	2,800	27,000
2035	25,100	4,700	6,700	36,500
2040	26,000	6,700	11,500	44,200
2045	26,000	7,500	15,600	49,100
2050	26,000	7,500	16,500	50,000

風車の技術開発は、1970 年大のオイルショック以降に欧米にて本格的に開始された。主

に「大型化」「高性能・高耐久化」に関わる技術開発が進められ、現在の発電コストは 10 円/KWh 前後まで下がっている。

第2項 洋上風力発電の必要性

しかしながら、陸上における適地の減少から、今後設置コストや発電コストが上昇する可能性がある。また、陸上ではウィンドファーム周辺の公害といった環境問題も顕在化した。さらなる低コスト化、環境負荷の少ない風力発電という側面、そして洋上には強くて安定した風が吹くという側面から、洋上風力への関心が高まっている。

洋上風力発電は、欧州を中心に技術開発が勧められており、現在設置されている洋上風力のほとんどが欧州に存在している。日本における洋上風力発電は 1990 年代後半から調査・研究開発が開始された。現在では北海道久遠郡せたな町、山形県酒田市、茨城県神栖市にて着底式洋上風力発電が設置されている^[11]。

また 2010 年 6 月からは、NEDO と東京電力により「洋上風力発電システム実証研究」が開始された^[12]。このように日本においても本格的に洋上風力発電が行われようとしている。

また、風力発電は風車が大きいほど効率がよくなる。そしてそのため、世界では現在定格出力 7.5MW の洋上風車が製造されており、洋上風車の大型化が進んできている。

その一方で、大型化するほどに風車の一本あたりにかかる費用は高くなる。陸上の風車では 2MW の風車で 6 億円となっており、7.5MW では約 20 億円とできる。これが破壊された場合、大型化による風車が壊れるリスクが上がってしまうようにも見える。特に洋上には船舶も多く、衝突事故によるリスクが大きな懸案事項の 1 つである。船舶との衝突については次節で紹介するような研究がされていた。

第3節 本研究の目的

第1項 風車と船舶に関する先行研究

洋上 WF や船舶についての先行研究を見てゆく。

まず日本では、洋上ウィンドファームと船舶の衝突リスクに関する研究は見られない。

ただし、船舶の漂流予測についての研究^{[18][19]}が上野 道雄ら (2002) や原 正一ら (2006) によって行われている。

一方で世界では、欧州の風力発電事業が盛んであり、洋上風力と船舶との衝突リスクをテーマとする論文^{[15][14][13]}が見られた。

Henk ら (2005) は衝突による事故リスクを低減する方法^[13]に着目している。

Biehl (2005) は衝突による船舶の損傷に関して研究^[14]を行っていた。

Biehl ら (2006) は、衝突により船舶が受ける影響に着目^[15]しており、洋上 WF 全体のリスクを考えている論文は見当たらない。

なので船舶が洋上 WF 与えるリスクを評価することは着手されていない新しい着眼点と言える。特に漂流船舶が WF に進入すると、どのような被害が起こるだろうか。大型化した場

合ではリスクは大きくなるのだろうか。

第2項 本研究の目的

以上をふまえて本研究の目的は次の二つとした。

- 1、漂流船舶がWFの風車と連続して衝突すること（これを連鎖衝突とする）によるWF全体のリスクの定量的に評価する。
- 2、「巨大な風車からなるWFのほうが、WF全体のリスクが増える」という仮説の検証を行う。

第4節 本論文の構成

第1項 WFと船舶の衝突シナリオ

本論文の構成を述べる前に、WFと船舶の連鎖衝突シナリオに言及したい。そしてこのシナリオを元に本論文の構成を次項で説明する。

まず、WFを設置したことで、海域に航路が決められると仮定する。この海域では多くの船舶が航行しており、年間数隻の船舶が何らかの理由で漂流を開始する。ある船舶はWFに進入する事無く漂流を続け、ある船舶はWFに進入する。WFに進入したとしても必ず風車に衝突するわけではない。全く衝突せずにWFを通り抜ける船舶もあれば、何度も衝突を繰り返す船舶もあるだろう。

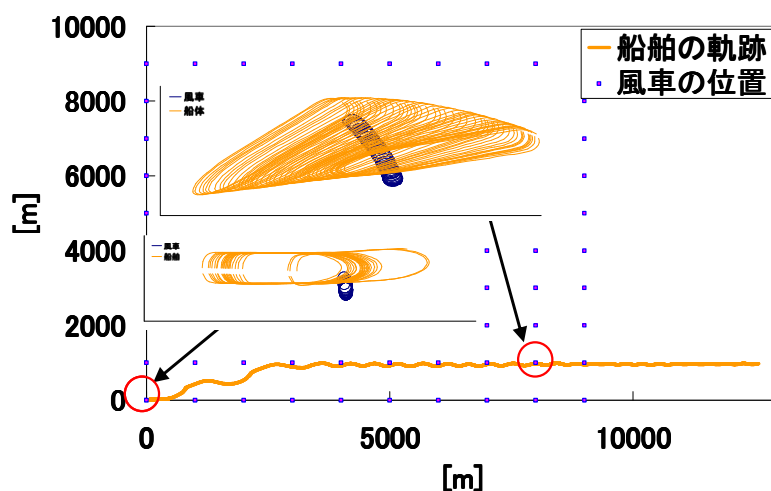


図 1-1-1 漂流する船舶の動きイメージ図

第2項 本論文の構成

船舶が漂流し、洋上WFに進入するまでを第2章でモデル化し、第3章で船舶の漂流運動、船舶と風車の衝突運動のシミュレーターについて説明を行う。第4章で本研究にて扱うリスクの定式化及び算出方法を示す。そして以上を用いて第5章ではリスク分析及び仮説の検証を行い、最後に第6章で本論の結論を述べる。

第2章 漂流・WF 進入確率モデル

本研究のリスクを求めるためには、漂流してWFに進入する船舶の隻数を求める必要がある。

航路を航行する船舶隻数を N_{total} 漂流してWFに進入する確率を P_{drift_in} とするとWFに進入する船舶隻数は

$$N_{SHIP} = N_{total} \times P_{drift_in} \quad (2-1)$$

と出来る。

しかし、洋上WFは日本には存在しておらず、 P_{drift_in} をデータから求めることは出来ない。なのでその他の情報から P_{drift_in} を推測することとし、海難統計を利用した。

ただし、事故を記録した海難統計に船舶の漂流は記録されることはない。

一方ある海域での船舶の運行隻数は容易に手に入れることができる。なので航路を航行する船舶の運行隻数から船舶の漂流隻数を予測するモデルを作成した。

漂流には様々な原因があるが、航路幅を定めることで、容易に船舶が漂流し、WFに進入する確率を求めることができるモデルとした。

第1節で漂流船舶を種類ごとに分類し、第2節、第3節でモデルの説明を行う。

そして第4節でこれらのモデルを用いて漂流発生確率を求める。

また、得られたデータの種類と海域の地理的要因から、二つの海域を選択した。

海域でのデータの種類と、その海域の特徴が選択する条件となる。

- A-1. 十分な隻数の、船舶の運行軌跡が把握されている。
- A-2. その海域での事故データが存在する。
- A-3. 航行する船舶の隻数が把握されている。
- B-1. 陸や島により航行可能な海域が狭くなっている。

Aはデータの種類である。Aの内、A-1を満たす海域、またはA-2とA-3が存在する海域である必要がある。

そして同時にB-1を満たす海域であることも必要となる。

第1節 漂流する船舶の種類

航路を逸脱する船舶の状態には以下の3つが挙げられる。

- 1) 制御されていない状態
- 2) 機械の故障状態
- 3) 制御不能の状態

1) の場合では船舶は直線的に航行し、漂流している時間は不注意による数分から居眠りによる数時間となる。

2) の場合では船舶は漂流している。漂流が継続する時間は故障の程度に大きく依存する。
 3) の場合は2) の場合と同じく漂流しており、漂流している時間は海象が変化するまでとなる。

以上をまとめると下のようになる。

表 2-1 航路を逸脱する船舶の分類

漂流の種類	原因	移動状態	漂流継続時間
制御せず	人為的ミス	航行	数秒～数十分
故障	機械の不具合	漂流	故障の程度による 数時間程度か
	船舶同士の衝突事故	漂流	故障の程度による 数時間程度か
制御不能	荒天時の為	漂流	数時間～一日

荒天時は船舶の往来はほぼないものとし、以下のモデルは人為的ミス（不注意）および船舶の故障の場合についてのものとした。

第2節 来島海峡モデル

第1項 来島海峡の特徴

来島海峡は瀬戸内海中部にある海峡であり、全国的にも船の難所として知られている。こうした背景があり、明治のはじめから信号や複雑なルールの下に船が往来している。航路は以下のように設定されている。航路幅は約 400m～1500m、長さが約 15.4km である。

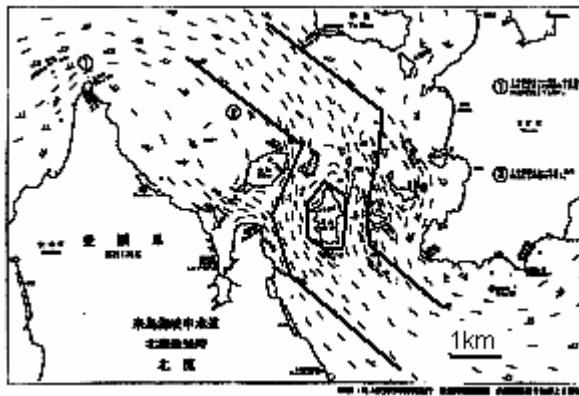


図 2-1 来島海峡の航路^[36]

第2項 来島海峡における航行船舶数データ、事故データ

現在、来島海峡は1日当たり約 1000 隻の通航があり、年間に直すと約 365000 隻となる。

表 2-2 来島海峡における通行船舶数（隻/日）

100t未満	468隻
100～500t	332隻
500～3000t	268隻
3000t以上	62隻
合計	1130隻

航路逸脱の確率評価については統計的な報告は限られているが、「輻輳海域における海上安全制度についての調査研究（1997年度）」では来島海峡における衝突、乗揚事故の調査報告がある。

海難の発生状況については、1983年から1994年の12年間の海難事故について調査が行われている。その中で、いわゆる海上交通事故である衝突と乗揚について、衝突107件、乗揚28件が報告されている。

また、備讃・来島海域での原因別海難発生隻数は表 2-3 となっており、この表を元にモデル作成を行った。

表 2-3 備讃・来島海域での事故（第六管区海上保安本部業務統計資料から）

	H13	H14	H15	H16	H17	合計	平均
衝突	34	30	22	48	27	161	32.2
乗揚	13	12	8	15	12	60	12
転覆	1			1	1	3	0.6
浸水	3	1		2	1	7	1.4
推進器障害	2	5	1	3	2	13	2.6
舵障害	3	2				5	1
機関故障	10	5	7	7	9	38	7.6
火災	1		2	1		4	0.8
爆発				1		1	0.2
運航阻害	4	4	4	3	2	17	3.4
安全阻害	1				1	2	0.4
その他		3	2	3		8	1.6
管区合計	72	62	46	84	55	319	63.8

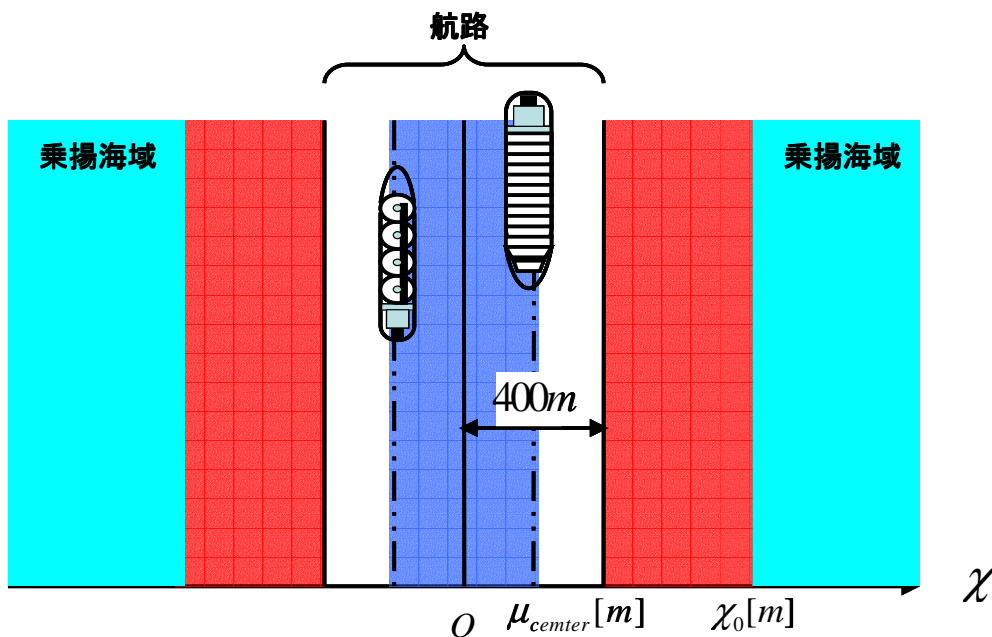
第3項 モデル化

船舶の分布が航路内を航行中は常に正規分布であるという仮定の元に、来島海峡での事故データから分散を決定し、一般に用いることの出来るモデルを作成した。モデル化において次の仮定を用いている。

- 来島海峡の航路幅を片側 400m、合計 800m とおいた。また、乗揚事故が発生する海

域（乗揚海域）を図 2-2 のように航路の中心から χ_0 m とした。

- 表 2-3 の事故を，衝突，乗揚，その他（不注意，故障）に分類する。
- 乗り揚げ事故は航路わきの乗揚海域に存在する船舶全てに発生すると仮定する。
- 乗り揚げ以外の事故は航路を外れた場合に一定の割合で発生すると仮定する。



:不注意，故障による事故ゾーン $\mu_{center} [m]$:船舶の分布の平均
 :衝突による事故ゾーン $\chi_0 [m]$:乗揚海域までの距離

図 2-2 各事故が発生する場所のモデル

正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ と標準正規分布 $N(0,1)$ は，それぞれ (2-2) ， (2-3) の確率密度関数を持つ。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-2)$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (2-3)$$

そして標準正規分布 $N(0,1)$ との間には (2-4) の関係がある。

$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma} \quad (2-4)$$

また, $N(0,1)$ において $z_0 < z < \infty$ での存在確率は (2-5) である.

$$P = \int_{z_0}^{\infty} f(z) dz \quad (2-5)$$

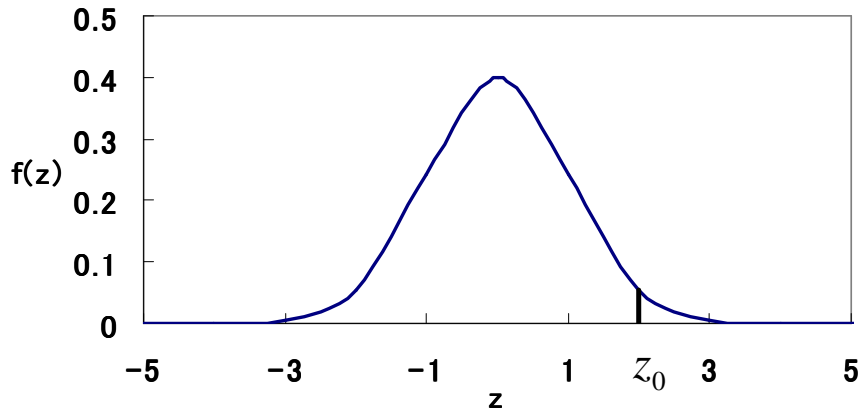


図 2-3 標準正規分布の確率密度関数

まず片側の航路の分布の平均 μ_{center} を求める.

事故確率は表 2-4 となる. 衝突事故は 4.41×10^{-5} であり, $3.92 < z < \infty$ での存在確率とできる. また, 乗揚, その他による事故確率は 4.36×10^{-5} と出来る. これは $3.93 < z < \infty$ での存在確率である. これと図 2-2より, 航路の中心を $0[m]$ とすると, 航行船舶の正規分布の平均 μ_{center} は

$$\begin{aligned} \mu_{center} &= \frac{400}{3.93 - (-3.92)} \times 3.92[m] \\ &= 199.7[m] \end{aligned} \quad (2-6)$$

と出来, ほぼ航路の中心に一致する.

表 2-4 事故発生確率

	両航路での 発生確率	片側での 発生確率
衝突	8.82×10^{-5}	4.41×10^{-5}
乗揚	3.29×10^{-5}	1.65×10^{-5}
故障	3.84×10^{-5}	1.92×10^{-5}
不注意	1.48×10^{-5}	0.79×10^{-5}

次に標準偏差を求める。

乗揚確率は来島海峡では 1.65×10^{-5} となっている。これは標準正規分布表からおおよそ $4.15 < z < \infty$ となる。

乗り上げる領域を $\chi_0 = 700[m]$ とすると、船舶の分布の平均 $\mu_{center} = 199.7[m]$ と (2-4) から、標準偏差 σ は $120.4[m]$ と出来る。

これは片側航路の中心から $\pm 120.4[m]$ の部分に約7割の船舶が存在しているということである。

最後にこれを元に航路を航行していない確率 $P_{outofsearout}$ を求める。航路の境界は $\chi_{ROUTE} = 400[m]$ である。これと $\sigma = 120.4$ 、(2-4) から、正規化すると

$$\begin{aligned} z_{ROUTE} &= \frac{\chi_{ROUTE} - \mu}{120.4} & (2-7) \\ &= 1.66 \end{aligned}$$

確率分布表を用いると $P_{outofsearout} = 4.9 \times 10^{-2}$ となる。

航路外において船舶が漂流をすると仮定しており、その確率は(2-6)より 4.36×10^{-5} であるので、航路外に存在する船舶が漂流する割合 $P_{GOTODRIFT}$ は

$$P_{GOTODRIFT} = \frac{4.36 \times 10^{-5}}{P_{outofsearout}} = 8.8 \times 10^{-2}$$

となる。

船舶の分布の分散 σ^2 は、航路幅を B_{ROUTE} 船舶の分布の平均は航路の中心と一致するとして、

$$\sigma^2 = \frac{B_{ROUTE}}{2 \times z_{ROUTE}} & (2-8)$$

とできる。

これより、航路の幅と WF の位置との比と進入確率の関係を求めると以下のようなになる。

表 2-5 WF の位置と航路幅の比と進入確率の関係

χ_{WF} / B_{ROUTE}	進入確率
0.5	4.95×10^{-2}
0.7	1.03×10^{-2}
0.9	1.93×10^{-3}
1.1	1.36×10^{-4}
1.3	8.16×10^{-6}
1.5	3.18×10^{-7}
1.7	9.01×10^{-9}
1.9	1.40×10^{-10}
2.1	1.70×10^{-12}
2.3	1.00×10^{-15}
2.5	1.00×10^{-15}

第3節 検証（津軽海峡の AIS データと比較して）

第1項 津軽海峡の特徴

津軽海峡は北海道と本州に挟まれた海峡である。最も幅が狭いのは海峡の東側、亀田半島の汐首岬と下北半島の大間崎の間であり、その距離は約 18.7km である。

また、津軽海峡は国際海峡と呼ばれる海峡であり、日本海から太平洋に抜ける船舶、反対に太平洋から日本海に行く船舶が多く航行している。

第2項 AIS (Automatic Identification System=船舶自動識別装置) データ

AIS とは識別符号、船名、位置、進路、速力、目的地などのデータを発信する装置である。500 トン以上の内航船に搭載が義務化されており、AIS から船舶の位置情報を読み取ることが可能である(図 2-4)。

図 2-4 図からデータを読み取った^[33]。上からコンテナ船、下段右がバルク船、左が一般貨物船の航跡となっている。

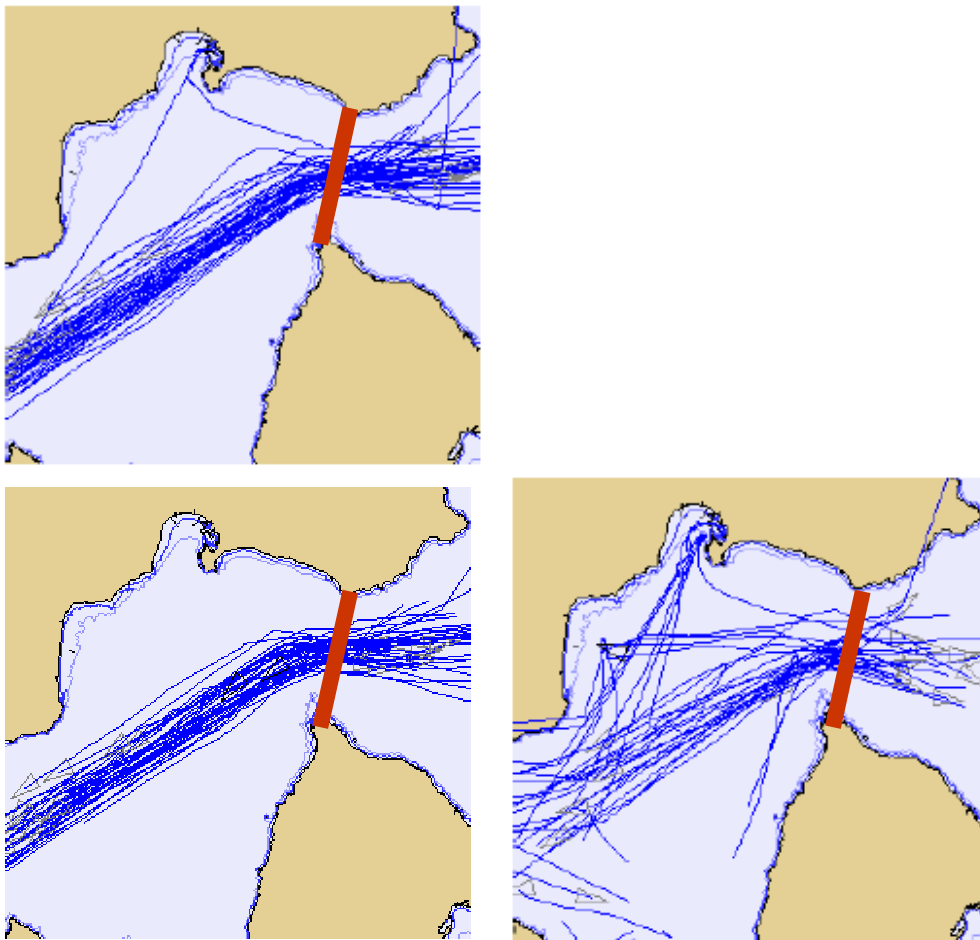


図 2-4 津軽海峡における AIS データ

汐首岬—大間崎に直線を引き（図中赤線），原点を汐首岬（北海道側）とする．船舶がこの直線上のどこを通ったかを記録した．

第3項 来島海峡との比較

汐首岬—大間崎を船舶は正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ で航行すると仮定．し，航路幅は汐首岬—大間崎間の 18.1km とした．

陸地を乗り上げ海域とみなして来島海峡の分布を津軽海峡に適応し，津軽海峡で船舶が航行する分布と比較を行った．

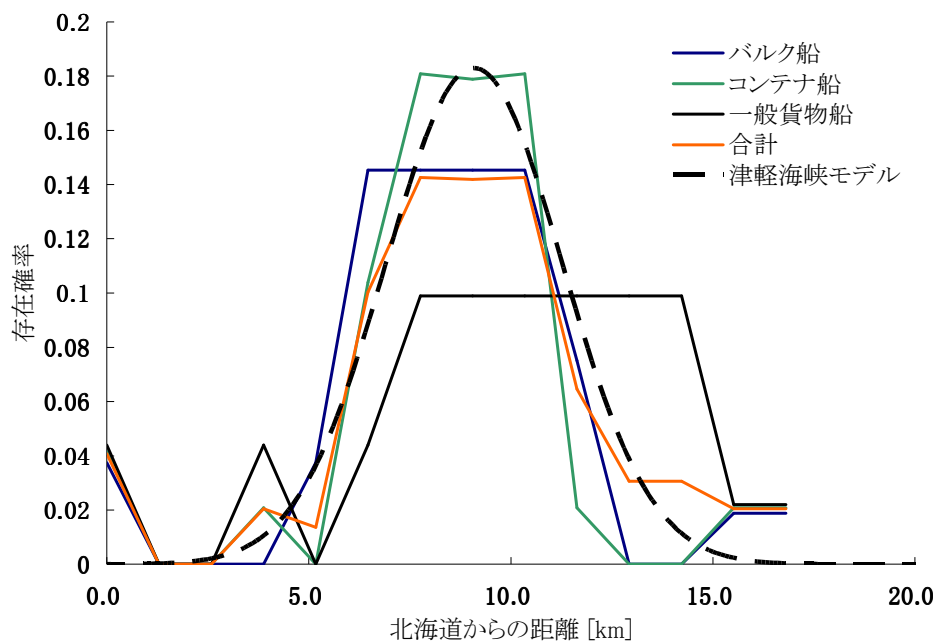


図 2-5 船舶の存在確率

第4節 本章の結果と考察

図の両端部にある点は、図 2-4にある全ての図にプロットされており、しかも全て同じ航跡になっている。なので AIS データ集計時のバグである可能性もある。

図 2-5から、津軽海峡の乗り揚げ海域を津軽海峡での陸地とすると分布の形状は類似すると出来る。なので来島海峡のモデルを用いてその他の海域における船舶の航行分布の目安とすることが出来ることがわかった。

第3章 船舶漂流衝突シミュレーター

第3章では船舶の漂流運動および衝突を再現するシミュレーターの解説を行う。

図 3-1 のように、漂流する船舶は外力により運動をする。そして漂流船舶は WF 内の数基の風車と衝突を繰り返す。衝突により風車が損傷もしくは倒壊する。

この運動を計算するシミュレーターは図 3-2 のフローに従い計算を行う。

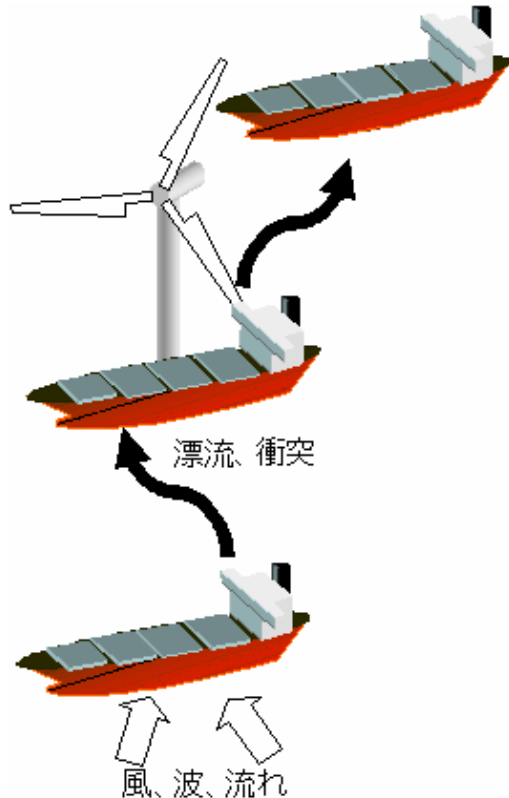


図 3-1 船舶の漂流

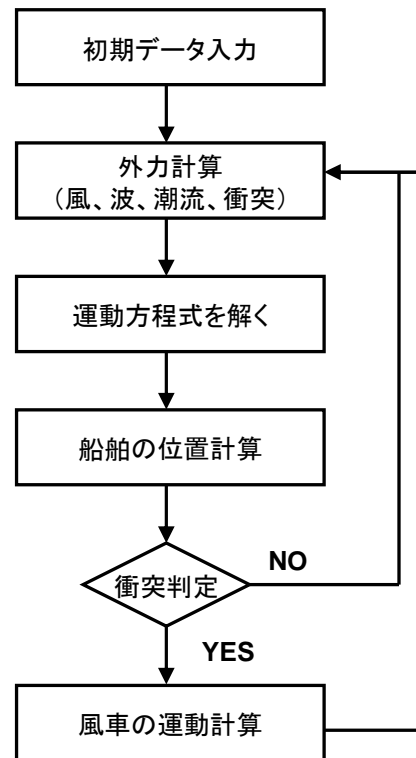


図 3-2 計算フロー

本シミュレーターでは空間固定座標 $O-XY$ で記述されたデータを船体固定座標に座標変換し、船体の外力を求める。こうして求めた外力を元に運動方程式を立て解いてゆく。解法はルンゲクッタ4次精度法を用いた。そして方程式の解（速度成分）を再び空間固定座標に座標変換し、時間積分することで船舶の漂流運動を記述する。

第1節 初期条件の設定

第1項 船体形状(水線面および水面下)

船体と風車は水線面で衝突をすると仮定した。

衝突における水線面における船体形状のモデル化を行うにあたり、楕円よりもより船体に近い形状を得、かつ滑らかな曲線となるように、媒介変数を用いた形式で船体を記述した（式（3-1））。

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (3-1)$$

具体例として、全長 $L=76\text{m}$ 、幅 $B=12\text{m}$ 、船体の形状を表す式と図（図 3-3）を以下に示す。

$$0 \leq t \leq \frac{1}{10}$$

$$y(t) = \frac{1}{2} B \times \sin(5t\pi)$$

$$x(t) = -\frac{1}{2} L \times \cos(2t\pi)$$

$$\frac{1}{10} \leq t \leq \frac{3}{10}$$

$$y(t) = \frac{B}{2}$$

$$x(t) = -\frac{1}{2} L \times \cos(2t\pi)$$

$$\frac{3}{10} \leq t \leq \frac{7}{10}$$

$$y(t) = \frac{B}{2} \times \cos\left(2.5 \times \left(t - \left(\frac{3}{10}\right)\right)\pi\right)$$

$$x(t) = -\frac{1}{2} L \times \cos(2t\pi)$$

$$\frac{7}{10} \leq t \leq \frac{9}{10}$$

$$y(t) = -\frac{B}{2}$$

$$x(t) = -\frac{1}{2} L \times \cos(2t\pi)$$

$$\frac{9}{10} \leq t \leq 1$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} B \times \sin(5t\pi)$$

$$x(t) = -\frac{1}{2}L \times \cos(2t\pi)$$

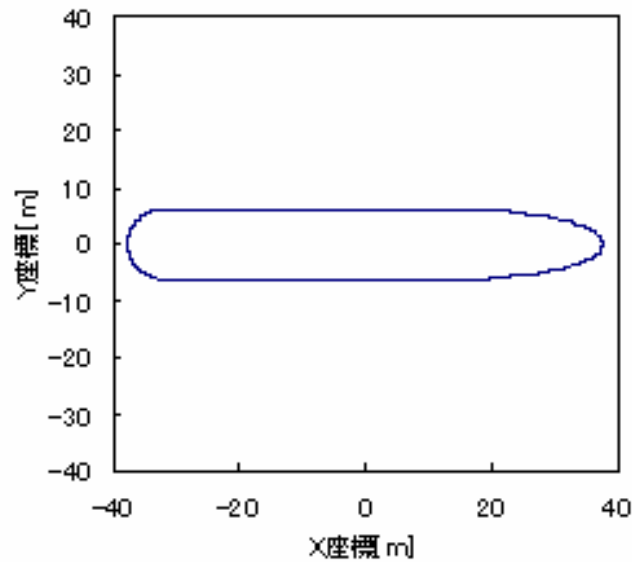


図 3-3 船舶の水線面の形状

また，水面下の船体の断面形状は付加質量の観点から，ルイスフォームとした．ルイスフォームとは，単位円から等角写像（3-2）をすることで得られる形状である．

$$\frac{z}{M} = \zeta + \frac{a_1}{\zeta} + \frac{a_3}{\zeta^3} \quad (3-2)$$

この時の y 軸方向（左右揺れ）の付加質量は，

$$m'_y = \frac{1}{2} \pi \rho T^2 \frac{(1-a_1)^2 + 3a_3^2}{(1-a_1+a_3)^2} \quad (3-3)$$

ρ : 海水の密度 [kg/m^3], a_1, a_3 : 定数, T : 喫水 [m]

なお，流体力および波漂流力を計算するにあたり，船体は喫水や幅に比べて全長が十分長い細長体とし，断面は一様なルイスフォーム断面の箱型とした．

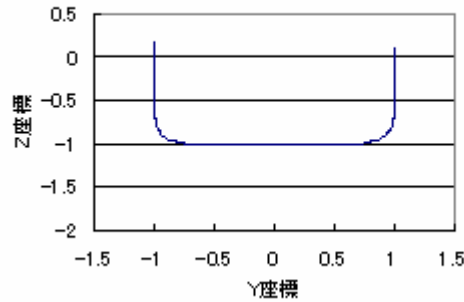
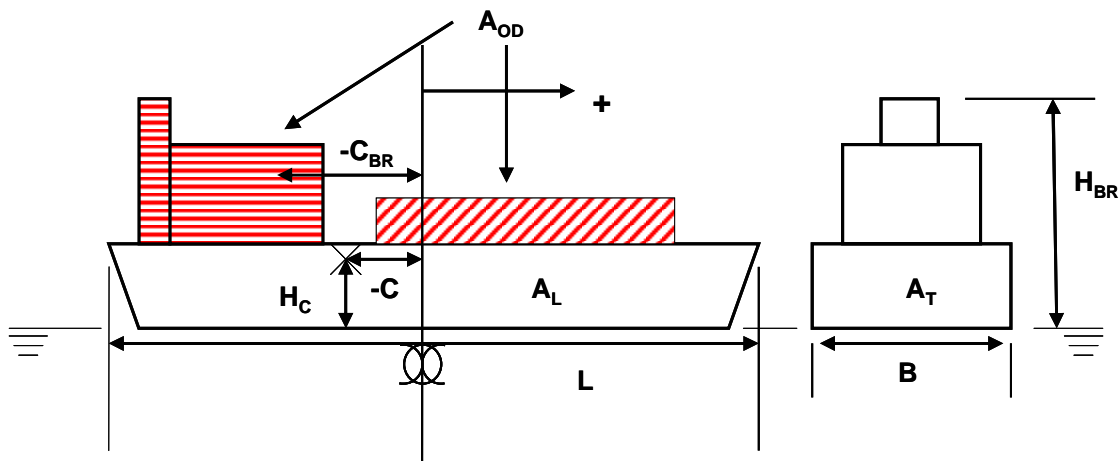


図 3-4 水面下の船体形状

第2項 船体形状(水上の形状)

以下のように水上の船体形状と面積を定義する．この形状は風圧力を求めるとき使用する．
(なお本章第3章第2節第3項において風圧力の説明を行う．)



- L : 全長[m], B : 船幅[m], A_T : 正面投影面積[m²], A_L : 側面投影面積[m²],
- A_{SS} : 船上構造物の側面投影面積[m²],
- A_{OD} : 船上構造物とデッキ部のタンクなどの全側面投影面積[m²],
- C : 船体中央から側面投影面積中心までの距離[m],
- C_{BR} : 船体中央から A_{SS} の面積中心までの距離[m],
- H_{BR} : ブリッジの高さ[m], H_C : 側面投影面積中心の高さ[m]

図 3-5 船舶の水上部の形状

第3項 海象条件

海象条件を設定するにあたり北原 (2010) の考え方^[34]を用いた．考慮する海象条件は，風波及び潮流とする．風により波の有義波高や周期を決定する(詳細は2)にて説明を行う)．海象条件(風速・潮流速・有義波高・有義波周期)は時刻のみの関数とし，位置により変

化しないとした。また、一度のシミュレーションにおいて平均風速、潮流速等は変化しないとした。以下に各海象条件の説明を行う。

1) 風

平均風速を入力値とし、この平均風速に水平方向変動成分を加えた時系列変動風を用いた。なお、時系列変動成分のパワースペクトルは日野スペクトルを用いた (3-4)。

$$E_u(f) = 0.4751 \delta_u^2 \frac{1}{\beta} \left\{ 1 + \left(\frac{f}{\beta} \right)^2 \right\}^{\frac{5}{6}} \quad (3-4)$$

$$\beta = 1.169 \times 10^{-2} \frac{p U_{z_1}}{\sqrt{C_D z_1}} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{2p-1}$$

$$\delta_u^2 = 6 C_D U_z^2$$

f : 振動数[s^{-1}], $E_u(f)$: パワースペクトル密度関数[m^2/s], $z_1 = 10m$: 基準高度
 z : 高度[m], $p = 0.1$: べき指数, $C_D = 0.001$: 粗度係数, U_z : z における平均風速

ただしこの関係を導出するに当たり、コルモゴロフ定数 0.5 という関係を用いている。

$E_u(f)$ を適当な周波数域 $f_0 - \Delta f \sim f_0 + \Delta f$ で積分すると、 f_0 での風速変動のエネルギー [m^2/s^2] が求まる。以上より、時系列変動風は下のようになる。

$$U(t) = U(10) + \sum_f \sqrt{E_u \Delta f} \sin(2\pi f_n t + \theta) \quad (3-5)$$

U_{10} : 10分平均風速[m/s], θ : 各周波数成分でのランダムな位相($0 \sim 2\pi$)[rad]

2) 波

風の変動成分と同様に積分計算を行うことにより、不規則波の再現を行った。パワースペクトルはブレットシュナイダー・光易型スペクトル[24]を用いた。

$$S(f) = 0.257 \left(\frac{H_{1/3}}{T_{1/3}^2} \right)^2 f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (3-6)$$

$H_{1/3}$: 有義波高, $T_{1/3}$: 有義波周期

有義波高と有義波周期は 10 分平均風速[m/s]から求める。風速と有義波高・有義波周期の対応関係については、独立行政法人化医用技術安全研究所の波と風のデータベースを基にした。

表 3-1 各風速における有義波高・有義波周期

風速[m/s]	有義波高 [m]	有義波周期 [s]
5	1.25	6.82
10	1.50	5.50
15	2.50	4.90
20	3.30	8.20
25	4.53	9.53

3) 潮流

潮流速は，シミュレーション中で常に 2knot(=1.028m/s)とした。

第2節 外力の計算

船体固定座標で風波，潮流による力 $\vec{F} = (F_x, F_y)$ を求めるに当たり，空間固定座標での風波，潮流データを船体固定座標に変換することが必要となる。その方法を以下に示し，各項で外力の計算手法を示す。

まず初期条件から風波，潮流の相対速度ベクトル $\vec{V} = (\dot{x}, \dot{y})$ の計算を行った。そして図 3-6 を元に相対速度ベクトルと船体固定座標とのなす角 θ を計算し，これを船体固定座標における風波，潮流の迎え角とした。

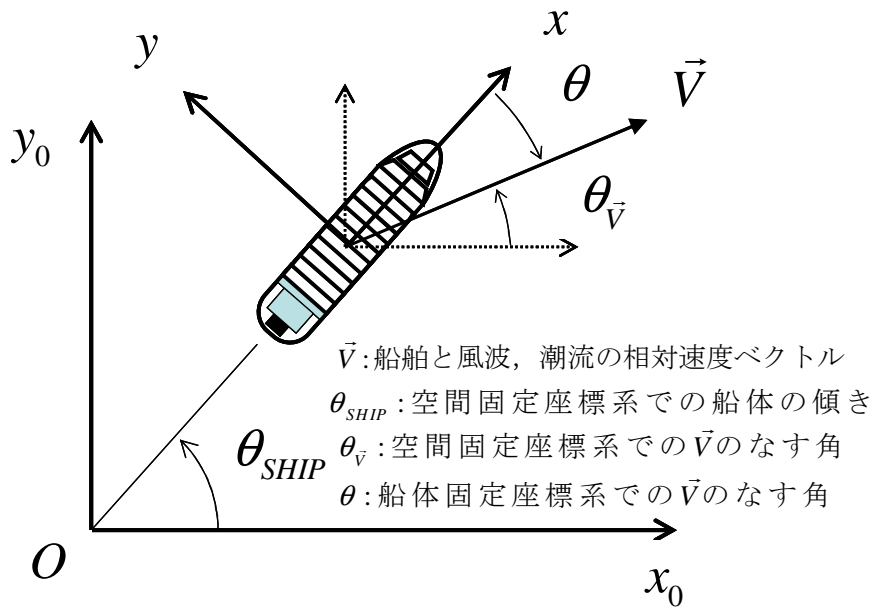


図 3-6 風波, 潮流の迎え角 (角度は反時計回りを正とする.)

また, $\vec{V} = (\dot{x}, \dot{y})$ を船体固定座標 $\vec{V}_r = (u, v)$ に変換する際は

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

を用いた.

第1項 船舶に作用する流体力 $F_{X_current}, F_{Y_current}, F_{N_current}$

流体力は y 軸においてはストリップ法の考えを元に計算した.

ストリップ法は, 「船体は幅, 喫水が長さに対して十分小さい細長体であり, 横断面形状は左右対称である.」という仮定を用いている. そして 3 次元の船体に加わる流体力を x 軸に垂直な厚さ d のストリップに加わる流体力を 2 次的に求め, これを船首から船尾まで積分することで近似的に求める.

潮流は水深によらず一定とすると, y 軸方向の流体力は,

$$F_{Y_current} = \frac{1}{2} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\bar{U}}{|U|} \rho d (U \sin \theta)^2 C_{Dy} dl \quad (3-8)$$

L : 全長[m], d : 喫水[m], l : ストリップの幅[m],

U : 潮流の相対速度[m/s], θ : 潮流の迎え角[rad], C_D : 抵抗係数

と出来る. 船体中心における回頭モーメント N_C は回頭によるストリップの速度を考慮する

と下の式となる.

$$N_C = \frac{1}{2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \rho d |v - l\omega| (v - l\omega) C_{DY} dl \quad (3-9)$$

船体は一様の箱型であり, 左右対称となので, x 軸方向からの力による回頭モーメントは生じないとした. なお, x 軸方向の力については相等平板の考えを用いた (3-8).

$$F_{X_current} = \frac{1}{2} \rho C_{DX} S (U \sin \theta)^2 \quad (3-10)$$

C_{DX} : 抵抗係数, S : 水没面の表面積[m²], u : 潮流の相対速度[m/s] なお, 抵抗係数を求めるに際してプラントル・シュリヒテングの式 (3-11) を用いた.

$$C_F = 0.455 (\log_{10} Rn)^{-2.58} \quad (3-11)$$

第2項 波漂流力

Hsu の方法^[20]を用いて不規則波を分割し, それぞれの波高と周期から, その波の発生時間中の波漂流力を求めた. 以下に, 分割した波から波漂流力を求める過程を述べる.

まず, 波漂流力は波高と無次元化周波数 $\xi_B \left(= \frac{\omega^2 B}{g} \frac{B}{2} \right)$ に依存する関数で表すことができる

^[21]ので, 分割した不規則波から, 無次元化漂流力 C_w を算出する. 波は, 物体の代表長さに比べて波長が短い方が, 長いものに比べてより船体に与える力が大きくなる. 特にある波長を堺に加わる力は急増する. その特徴を表したモデルが図 3-7 である. 単純ではあるが, $\xi_B \geq 0.4$ から急激に C_w が増加する特徴を捉えたモデルとなっている. そして (3-12) 式から x 軸 y 軸方向から波が来た場合の波漂流力を求める.

$$F_{drift} = \frac{1}{2} \rho g L \zeta_A^2 C_w \quad (3-12)$$

ρ : 海水の密度 [g/cm^3], L : 波と直交方向の浮体長さ [m]
 ζ_A : 入射波波高, C_w : 無次元化漂流力

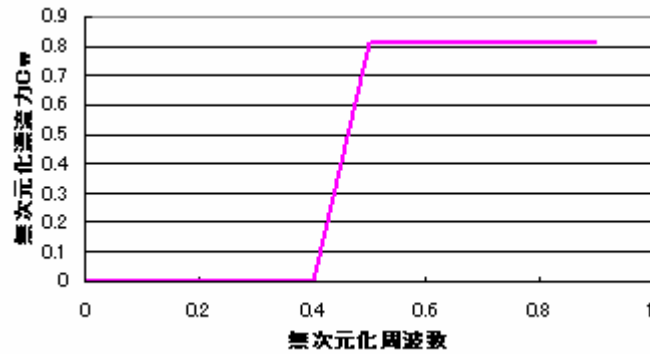


図 3-7 無次元化周波数と無次元化漂流力の関係^[21]

最後に、船体へ向かって波が来る方向（迎え角）を考慮する。波の船舶に対する入射角（迎え角）により、波漂流力は変化する^[18]ことが知られており、入射角と波漂流力の関係は図 3-8 となる。但し、図 3-8 は x 軸方向の力を $\theta = 0[\text{rad}]$ 、y 軸方向の力は $\theta = \frac{\pi}{2}[\text{rad}]$ を 1 としている。

特徴的な点は x 方向に加わる力は $\theta = 40[\text{deg}]$ で最大、 $\theta = 140[\text{deg}]$ で最小となっている点と、y 軸方向に加わる力が $40[\text{deg}] < \theta < 180[\text{deg}]$ においてほぼ一定となる点である。

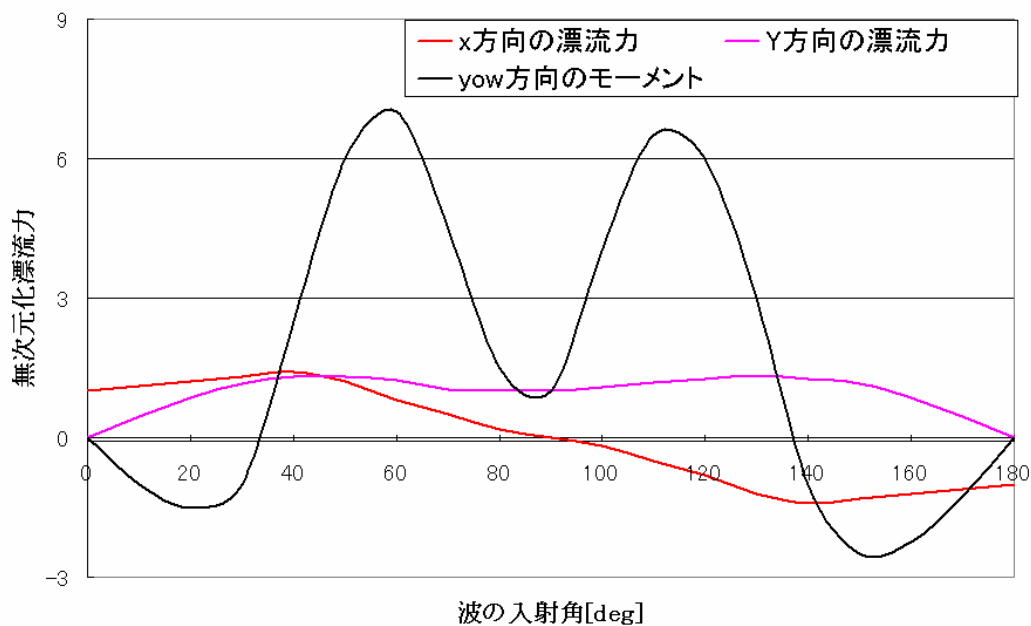


図 3-8 波の入射角と漂流力の関係

第3項 風圧力

藤原らによる推定式^[22]を用いる。空気や風からの抵抗は (3-13) ~ (3-15) と表すことが出来る。そして藤原ら(1998)により、多種多様な船舶を用いた実験から一般の船舶に用いることの出来る C_x, C_y, C_N が水上部の船体形状をパラメータとした関数として求められた。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho U^2 A_T C_x \quad (3-13)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U^2 A_L C_y \quad (3-14)$$

$$N = \frac{1}{2} \rho U^2 L A_L C_N \quad (3-15)$$

ρ : 空気の密度 [kg/m^3], U : 代表風速 [m/s], A_T : 正面の投影面積 [m^2]

A_L : 側面投影面積 [m^2], C_x : x方向の無次元風荷重,

C_y : y方向の無次元風荷重, C_N : 無次元回頭モーメント

具体例としてコンテナ船の C_x, C_y, C_N を以下に示す。コンテナ船のサイズは (3-16)

のようになっている。

$L = 184.33m$: 全長

$B = 25.79m$: 船幅

$A_f = 654.19m^2$: 正面投影面積

$A_L = 2705.12m^2$: 側面投影面積

(3-16)

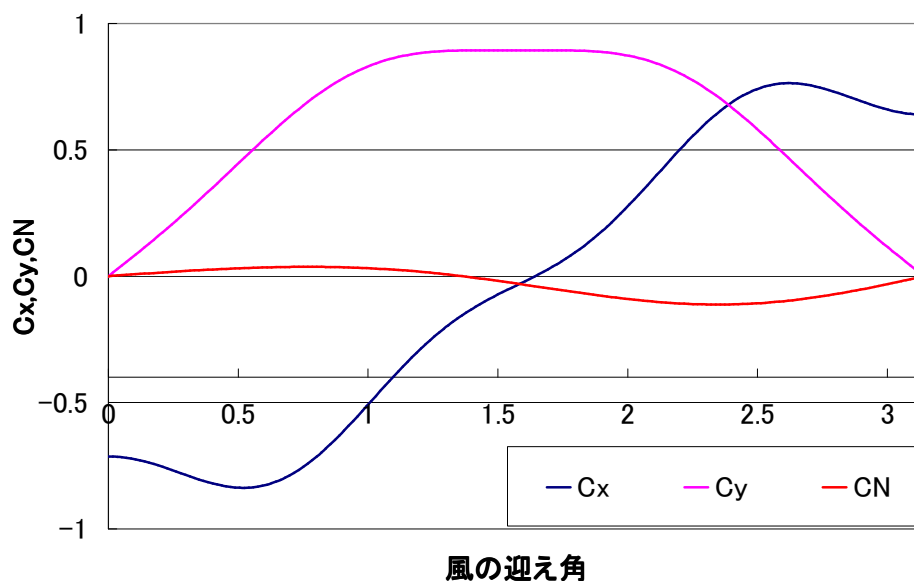


図 3-9 風の迎え角と無次元化風圧力の関係

第4項 風車との衝突による船舶に与える外力のモデル

船体と風車との衝突に際して衝突判定を行い、反力を計算する。衝突判定は、船体要素と風車要素を結んだベクトルに対して、船体要素間を結んだベクトルが全て左側にある場合に衝突しているとした。

なお反力は船側構造^[35]の切り裂き実験からモデル化を行い、切り裂き幅の関数として反力の計算を行った。

切り裂き実験による切り裂き幅と反力の関係を図 3-11に示す。

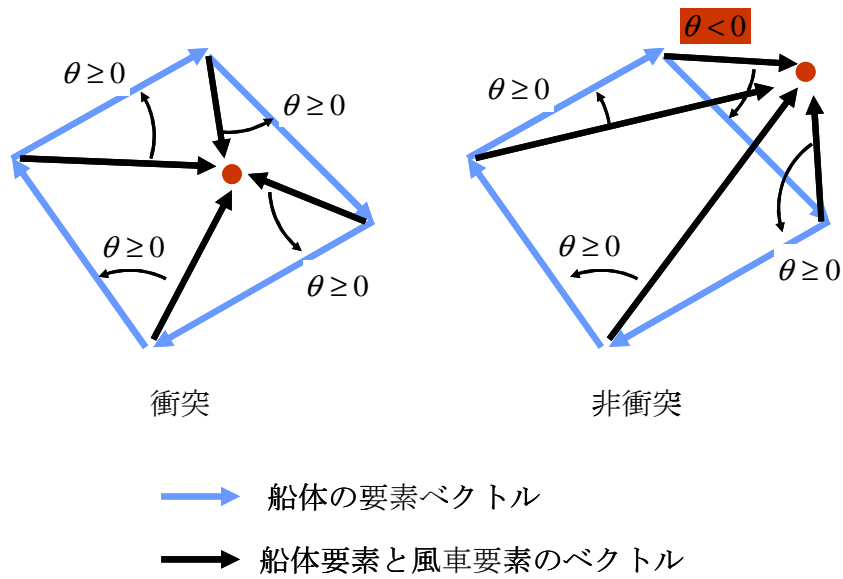


図 3-10 衝突判定

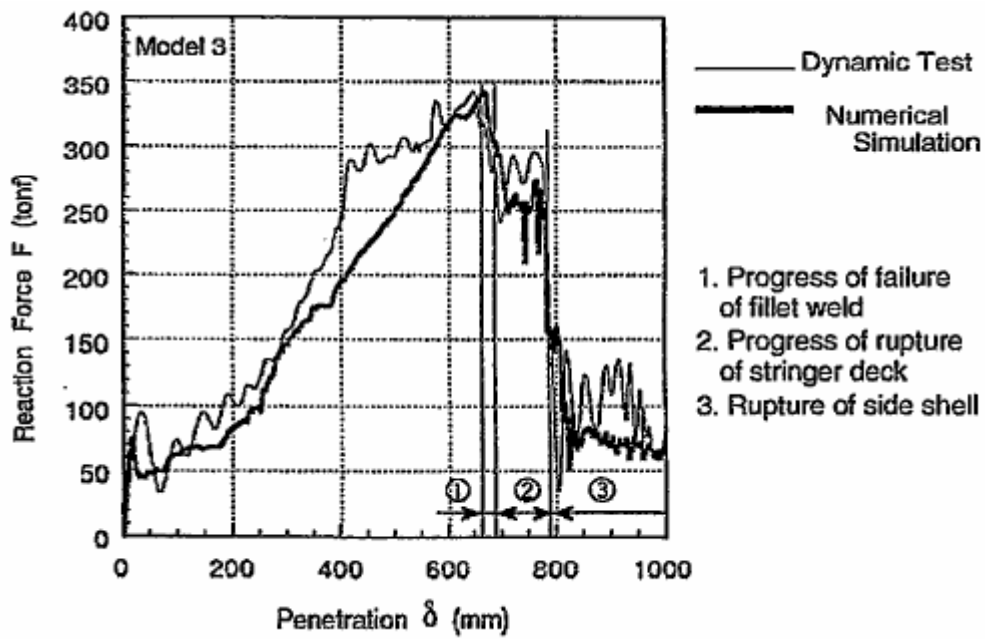


図 3-11 衝突力モデル^[35]

第5項 風車のモデル

風車はタワーの根元から折れることが分かってきている。根拠の1つは台風による倒壊事例^[27]である。

台風により倒壊した風車は、どれも根元から折れていることが図 3-12 から分かる。図

3-1 2 の右下はペDESTALと呼ばれる基礎部分と、風車を繋げるボルトの不具合の結果^[27]という報告もあり、左の二つの事例が風車のタワーの性質を表しているといえる。



図 3-1 2 風車の倒壊事故例^[27]

さらに、風車のタワーを有限要素法を用いて解析した^{[27][28]}結果、風車の塔頂水平変位と塔頂水平荷重には下の関係があることが示されている。図 3-1 4 では最大荷重に達した後に開口部からタワーが折れることが示されている。また、船舶との衝突による荷重の位置はケーソンの上端やタワーの根元であり、ケーソンが倒れる可能性もある。以上を踏まえて図 3-1 3 のように2要素でのモデル化を行った。

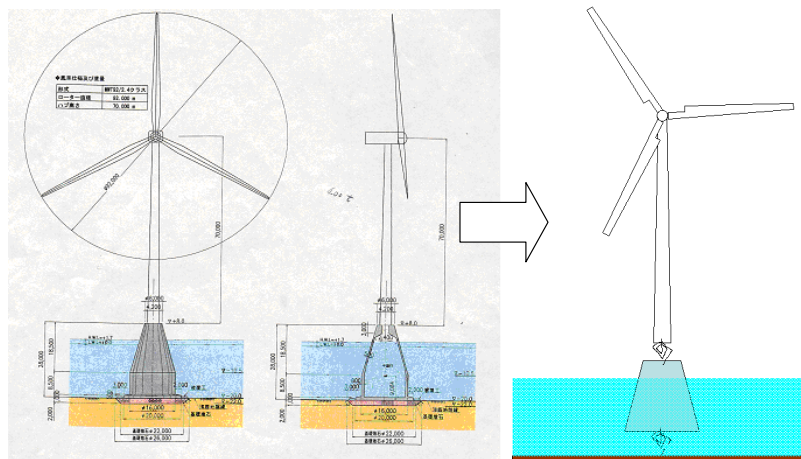


図 3-1 3 風車のモデル

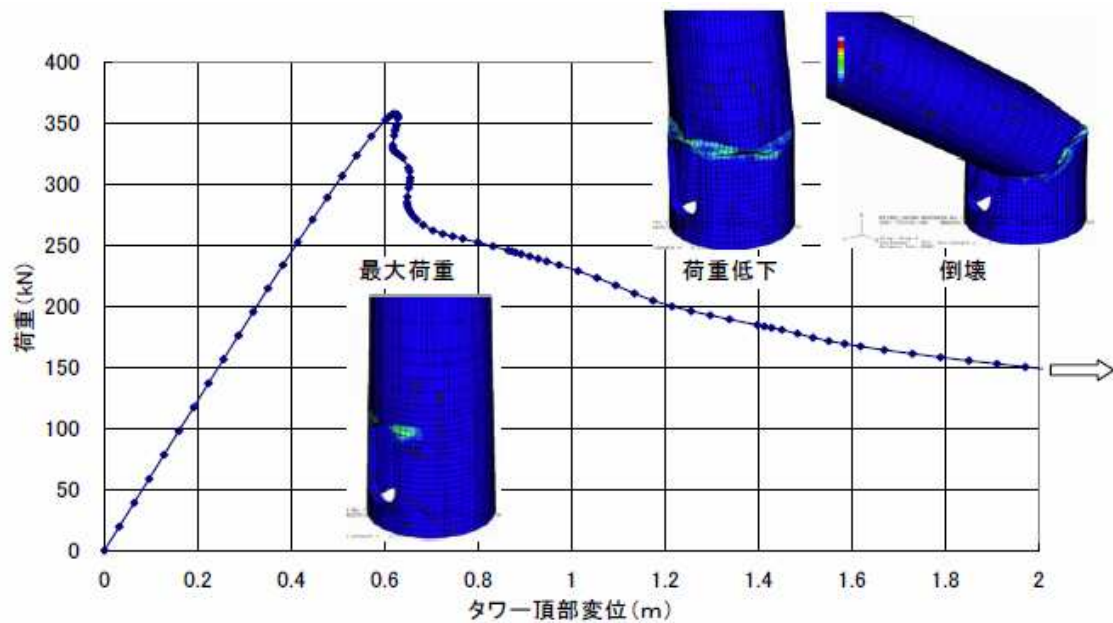


図 3-14 荷重とタワー頂部変位の関係 (高さ 35 m) [27]

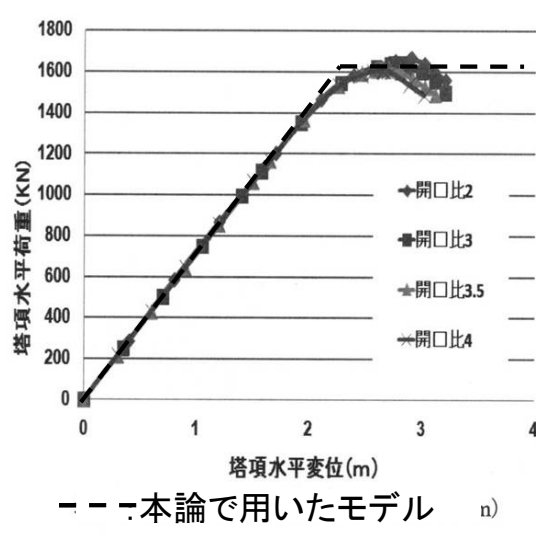


図 3-15 塔頂水平変位と塔頂水平荷重の関係 [28]

そしてタワー部分の変位 [rad] と転倒モーメントの関係、ケーソン部分の変位とモーメントの関係をと図 3-14 を元に作成した。

なお本研究で扱うタワーは 75m と 80m 程度であるため、塔頂部にかかる最大荷重は 77m の最大荷重と同じものとする。

第6項 風車の運動方程式

風車のタワーの重心及びケーソンの底における運動方程式は (3-17) となる。タワー

とケーソンの角加速度 $\ddot{\theta}_t, \ddot{\theta}_c$ とモーメント M_t, M_c 、各要素に加わる外力 F_{xt}, F_{xc}, F_{yc} の間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} I_t \ddot{\theta}_t &= M_t + F_{xt} L \\ (I_c + m_c l^2) \ddot{\theta}_c &= F_{xc} H + F_{yc} \frac{B}{2} - M_c + M_0 \\ F &= F_{xt} + F_{xc} \end{aligned} \quad (3-17)$$

I : 慣性モーメント, $\ddot{\theta}$: 角加速度, F_{xt} : タワーに加わる水平方向の力,
 F_{yc} : ケーソンに加わる垂直方向の力,
 F_{xc} : ケーソンに加わる水平方向の力,
 M_c : ケーソンのモーメント, M_0 : タワーのモーメント

M_c, M_t は θ の関数とし、以下のモデルを用いた。

$$\begin{aligned} M_0(\theta) &= m_c g L \cos(\theta - \theta_0) \\ M_t &= \begin{cases} k\theta_0 & (\theta_0 < \theta) \\ k\theta & (-\theta_0 < \theta < \theta_0) \\ -k\theta_0 & (\theta < -\theta_0) \end{cases} \end{aligned} \quad (3-18)$$

θ : 各要素の変位[rad],
 θ_c : ケーソンの重心による復元力が0となる角度[rad],
 θ_0 : タワーの最大変位[rad],
 m_c : ケーソンの浮力を考慮した質量[kg],
 L : ケーソンの支点と重心の距離[m],
 k : タワーのバネ定数

第3節 運動方程式

本研究では船舶の平面方向の運動が重要であるため、船舶の動きは前後、左右、回頭の3方向を考慮した。

空間固定座標での方程式を元に、座標変換を用いて船体固定座標における運動方程式を立てた。

空間固定座標系での運動方程式は(3-19)となる。図2.7に示す慣性系 $O-x_0y_0$ において、平面運動している船の重心 G の加速度を \ddot{x}_0, \ddot{y}_0 及び角速度を $\dot{\varphi}$ とすれば、船の質量 m 及び慣性モーメント I と船に働く力 X_0, Y_0 及びモーメント N_G の間には一般に次の関係

が成立つ.

$$\begin{cases} m_x \ddot{x}_0 = F_{x_0} \\ m_y \ddot{y}_0 = F_{y_0} \\ I_G \ddot{\phi} = N_G \end{cases} \quad (3-19)$$

m_x, m_y : 付加質量を含めた船体の質量

\ddot{x}_0, \ddot{y}_0 : 空間固定座標における x, y 方向の加速度

F_{x_0}, F_{y_0} : 空間固定座標における x, y 方向に加わる力

$I_G, \ddot{\phi}, N_G$

また, 空間固定座標における船舶がなす角を ϕ とすると (3-20) となる.

$$\begin{cases} F_x = F_{x_0} \cos \phi + F_{y_0} \sin \phi \\ F_y = F_{y_0} \cos \phi - F_{x_0} \sin \phi \end{cases} \quad (3-20)$$

これに (3-19) を代入すると,

$$\begin{cases} F_x = m(\ddot{x}_0 \cos \phi + \ddot{y}_0 \sin \phi) \\ F_y = m(\ddot{y}_0 \cos \phi - \ddot{x}_0 \sin \phi) \end{cases} \quad (3-21)$$

となる.

空間固定座標における船体重心における速度 \dot{x}, \dot{y} は船体固定座標系の x, y 軸方向の速度

u, v を用いて次式のように表すことができる.

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = u \cos \phi - v \sin \phi \\ \dot{y}_0 = v \cos \phi + u \sin \phi \end{cases} \quad (3-22)$$

これを時間微分して,

$$\begin{cases} \ddot{x}_0 = \dot{u} \cos \phi - u \dot{\phi} \sin \phi - \dot{v} \sin \phi - v \dot{\phi} \cos \phi \\ \ddot{y}_0 = \dot{v} \cos \phi - v \dot{\phi} \sin \phi + \dot{u} \sin \phi + u \dot{\phi} \cos \phi \end{cases} \quad (3-23)$$

を得る. (3-12) に代入して整理すると (3-24) となる.

$$\begin{cases} F_X = m(\dot{u} - v\dot{\phi}) \\ F_Y = m(\dot{v} + u\dot{\phi}) \\ N_G = I_G\ddot{\phi} \end{cases} \quad (3-24)$$

m : 船の質量

u : 船体固定座標系 X 方向の速度

v : 船体固定座標系 Y 方向の速度

F_X : 船体固定座標系 X 方向で船に働く力

F_Y : 船体固定座標系 Y 方向で船に働く力

I_G : 船の慣性モーメント

N_G : 全体座標系でのモーメント

ϕ : 船体と全体座標系 X 方向の角度

本研究にて考慮した外力は第 2 節で挙げた波，風，潮流による漂流力と風車からの反力である．船体に加わる外力を式に表すと，（ 3-25 ）

（ 3-26 ）の様になる．

$$F_{total} = F_X + F_Y \quad (3-25)$$

$F_{X,Y}$: 船体固定座標における x 軸、y 軸に加わる力

$$\begin{aligned} F_X &= F_{X:current} + F_{X:wave} + F_{X:wind} + F_{X:WM} \\ F_Y &= F_{Y:current} + F_{Y:wave} + F_{Y:wind} + F_{Y:WM} \\ N_G &= N_{current} + N_{wave} + N_{wind} + N_{WM} \end{aligned} \quad (3-26)$$

N : モーメント

$current, wave, wind$:

$wind$ は風, $current$ 潮流, $wave$ は波, WM は風車により船体に加わる力

第4節 シミュレーターの動作検証

本節では，シミュレーターの動作を検証する．

漂流については実海域における船舶の移動と，シミュレーターでの船舶の移動の仕方を比較することを検証とした．

衝突については，風車の運動の妥当性を確認した．

第1項 船舶の漂流

実海域での船舶の漂流を記録したものは少なく、上野ら^[18]が取り上げた事例（図 3-16）を元に実海域との比較検証とした。

この漂流船舶の全長は105.52[m]，幅は18.20[m]，総トン数は6788.0[GT]である．そして「左に約32度傾斜して右舷側から風を受ける状態で漂流」^[18]した。

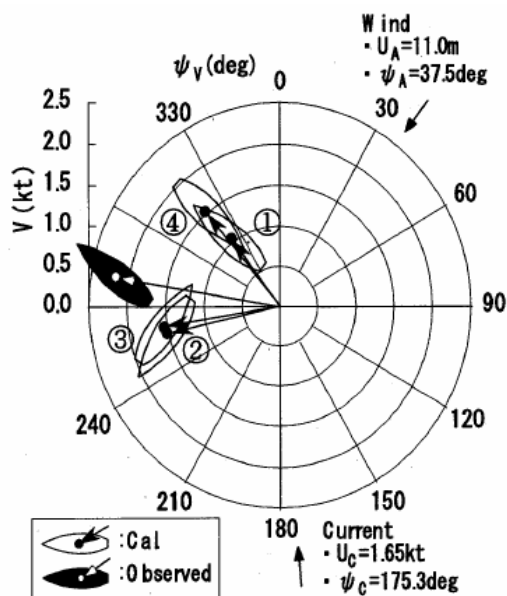


図 3-16 漂流船舶の船速ベクトルと船体の向き [18]

．図 3-16 において，黒いマークが漂流船舶の事例である．風が37.5[deg],11[m/s]，潮流が175.3[deg],1.65[kt]の場合に船舶が約107[deg],2.2[kt]で漂流していることを示している．（シミュレーターの角度の原点は $\theta = 270[\text{deg}]$ 反時計回りを正としているので，約163[deg],2.2[kt]で漂流していることになる．）この情報を元にシミュレーターで計算を行った結果が下の図である．収束してゆく船体の速度や進む方向が良く表現できている．

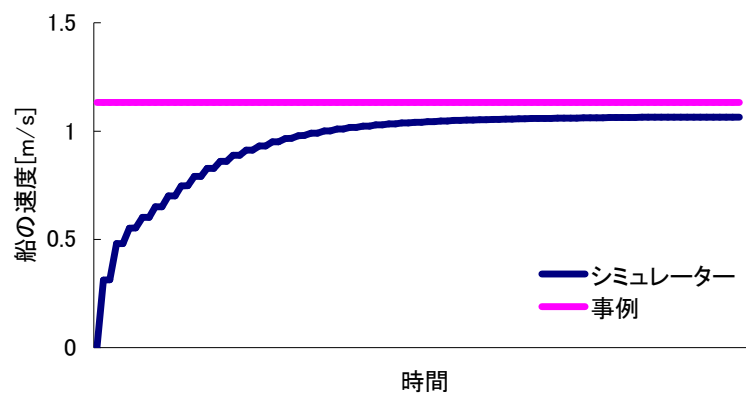


図 3-17 船の速度の比較

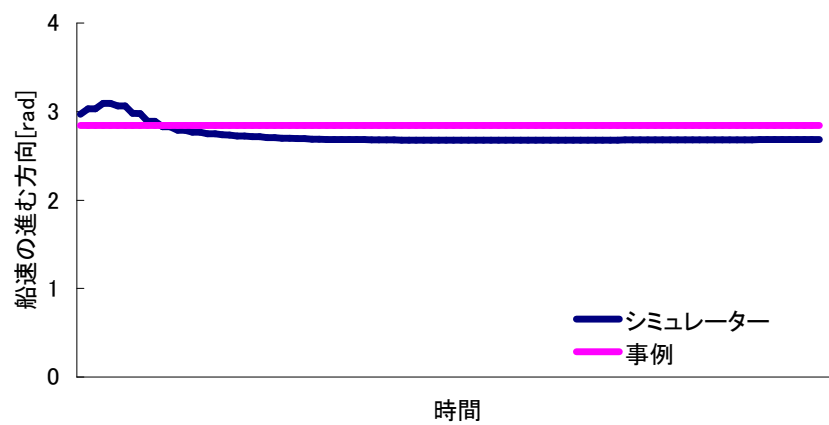


図 3-18 船の進む方向の比較

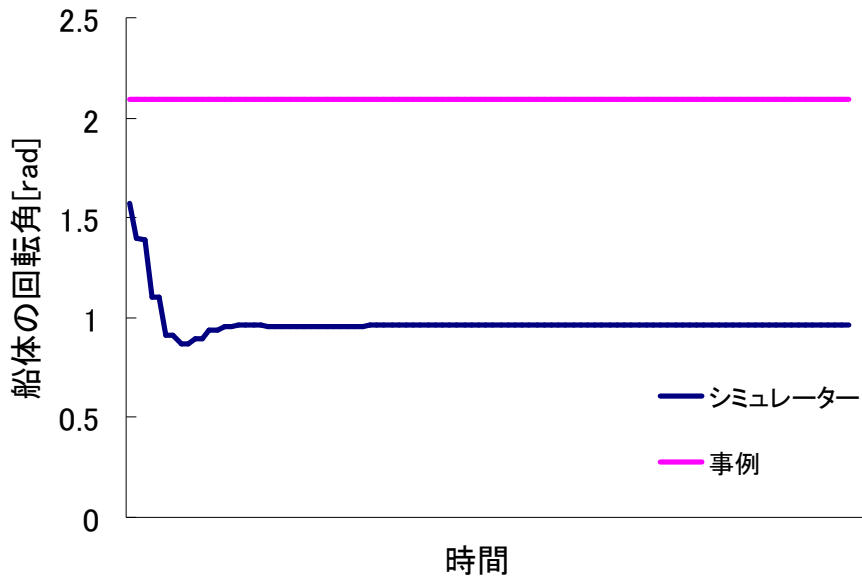


図 3-19 船体の回転角の比較

回転角は約 $1.2[\text{rad}]$ 程度ずれており、ほぼ正面から風を受けていることになる。漂流運動を完全に再現しているとは言えないまでも、漂流の方向およびスピードが近い数値にあり、船体の漂流の傾向をつかんだモデルとなっている。

第2項 風車の運動

風車の基本的な動きを以下に示す. 図 3-20 はケーソン部分の頂点に力を徐々に加えた時の図である. 図からシミュレーション上の風車は 8×10^6 [N]まで耐えることが出来る.

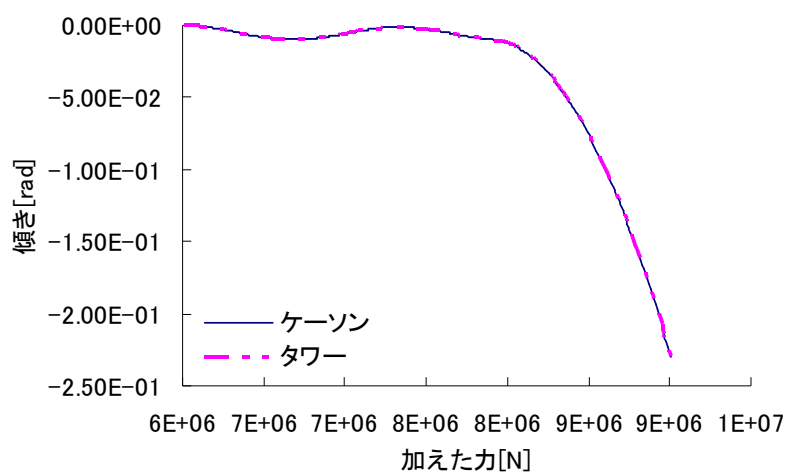


図 3-20 静的動作の確認

図 3-21 固有振動数の確認は風車に力を加えたときのケーソンとタワーの変位グラフである. ケーソンとタワーの固有振動数はそれぞれ0.8[sec],1.3[sec]程度となり, 運動方程式の解と同様の結果となる.

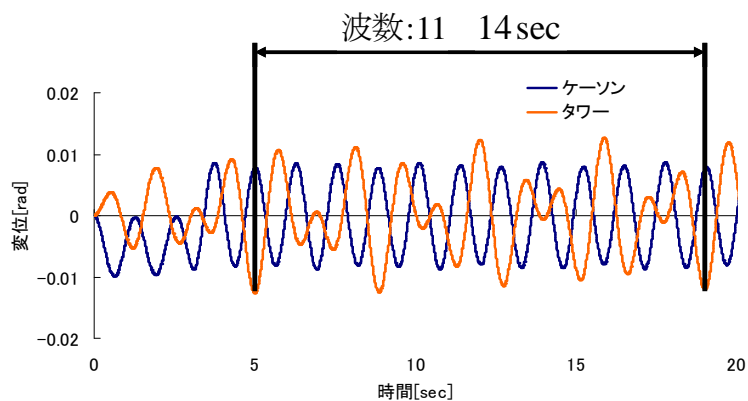


図 3-21 固有振動数の確認

第5節 被害額算定

第1項 風車の変位と損害額の関係

費用を元に損害額の計算を行った。ウィンドファームの費用は、風車本体価格、ケーソンと送電線といった基礎工事コストと、設置コストがある。

$$\text{コスト} = \text{風車本体} + \text{基礎工事コスト} + \text{設置コスト} \quad (3-27)$$

損害が生じた場合はこれらの費用及び、風車が稼働できない場合には、仮に稼働していた場合に得る売上高分の損害も出る。

大規模な洋上でのウィンドファームの日本での事例は無いため、陸上のウィンドファームを元に損害額の合計を算出した。

陸上では1基あたり6億円、風車自体は2MW風車で3億円/基の費用がかかっている^[29]ことが分かっている。また、陸上のウィンドファームと洋上のウィンドファームの費用の相違は以下のようなになる。

表 3-2 設置にかかる費用の比較

	陸上	海上
コスト	風車本体	風車本体
	送電線	送電線
	設置場所までの舗装工事	
		ケーソン
	設置コスト	設置コスト

陸上と海上とでは風車本体と送電線といった部分では同じものである。違いは陸上では必要な道の舗装とケーソンの費用である。また、設置コストは工期に依存するものであり、陸上では数日/基である一方、海上では波や風の影響により平均して一週間程度必要となると言われている。

また、kw当たりの建設費用は洋上で40万円程度とも言われており^[29]、本研究では洋上の風車は2MWで8億円/基、5MWで20億円/基とした。

風車のタワーは弾塑性変形をするので、衝突の影響で折れ曲がったとしても必ずしも倒れる事はないだろう。しかし、本研究では風車が塑性変形を起こすまで傾いた時点で、最大損害額とした。

そして損害額はタワーの最大変位角の関数として計算を行った。

$$COST(\theta) = COST_{MAX} \times \theta^2 \quad (3-28)$$

第4章 船舶とウィンドファームとの連鎖衝突リスク

3章までのモデルとシミュレーターを用いて、どのように船舶と風車の連鎖衝突リスクを算出するかを本節で説明する。

第1節 連鎖衝突リスクの定式化

ある事象が発生するリスクとは、その事象の発生確率と事象が発生した場合の損害の積で表される。本論では損害を損害額として扱う。

本研究では「ある事象が発生するリスク」＝「洋上WFに船舶が連鎖衝突するリスク」である。これを求めるにあたり、事象を第1章第4節第1項のシナリオに沿って二つの独立な事象に分けた。

1つはWF内に進入する船舶数 N_{ship} であり、もうひとつはWF内に進入した船舶が風車と衝突する期待基数 $N_{collision_WF}$ 及び期待損害額 $C_{collision_WF}$ である。本論では期待損害額 $C_{collision_WF}$ を用いてリスク評価を行う。

$$RISK = N_{ship} \times C_{collision_WF} \quad (4-1)$$

N_{ship} は航路内を運行する年間船舶数 N_{total} と船舶が漂流しWFへ進入する確率 P_{DRIFT} の積である (4-2)。

$$N_{ship} = N_{total} \times P_{DRIFT} \quad (4-2)$$

とできる。 P_{DRIFT} は第2章の来島海峡のモデルを適用して算出する。

$C_{collision_WF}$ は損害額の期待値であり、簡単には衝突確率と損害額の積となる。ただし、衝突の仕方は様々であり、その結果船舶が風車に及ぼす損害もそれぞれ異なる為、単純計算を行うことは難しい。なのでシミュレーションを用いて算出する。

船舶の漂流は、船舶の漂流の状態と外力に依存するので、 $C_{collision_WF}(i, v, \theta)$ と出来る。ここで i は漂流の種類を表し、 v は風速、 θ は風向を表す。なお、本研究では風速と風向を海象条件の決定要因としている。

風向及び風速の発現確率 $P_v(v, \theta)$, $P_\theta(v, \theta)$ を考慮して、WFの $RISK$ は以下の式で表すことが出来る。

$$\begin{aligned} & TOTAL_RISK[\text{円}/\text{年}] \\ & = \int \int_{v, \theta} N_{SHIP} \times C_{collision_WF}(i, v, \theta) \times P_v(v, \theta) \times P_\theta(v, \theta) dv d\theta [\text{円}/\text{年}] \end{aligned} \quad (4-3)$$

ただし本研究では、風向と風速の関係を表したデータが少ないことから、 $P_v(v, \theta)$, $P_\theta(v, \theta)$ を $P_v(v)$, $P_\theta(\theta)$ とした。

第2節 航路内の航行船舶数 N_{total}

港に入港する船舶の隻数を用いる。銚子港は以下のようになっている。

なお銚子港は漁港である。タワーと同規模（150ton程度）以上の船舶は全体の0.55%，100ton以上の船舶も0.66%である。

表 4-1 銚子港の期待船舶数の内訳^{[30][31]}

漁船規模 (ton)	千葉県の 動力漁船(隻)	千葉県の 動力漁船(%)	銚子に入港する 期待船舶数(隻)
～1	120	6.74%	1,879
1～3	347	19.48%	5,429
3～5	722	40.54%	11,299
5～10	417	23.41%	6,525
10～20	156	8.76%	2,442
20～30	0	0.00%	0
30～50	1	0.06%	17
50～100	8	0.45%	125
100～150	2	0.11%	31
150～200	5	0.28%	78
200～350	3	0.17%	47
350～500	0	0.00%	0
500～1,000	0	0.00%	0
合計(隻)	1,781	100.00%	27,871

また、利根川を挟んで銚子の反対側には鹿島港があり、年間の入港隻数と総トン数は下のようになっている。

表 4-2 鹿島港の入港船舶数と内訳^[32]

	隻数	総トン数 (ton)	平均トン数 (ton)
内航船	12,905	13,446,814	1,042
外航船	1,995	34,270,737	17,178

第3節 漂流確率 P_{DRIFT}

船舶が漂流をし、洋上 WF に進入する確率を P_{DRIFT} とした。これは来島モデルを用いて算出する。故障および制御不能による漂流の継続時間は表 4-3 から、ある海象が継続する時間である 3 時間とした。

表 4-3 航路を逸脱する船舶の分類（再掲）

漂流の種類	原因	移動状態	漂流継続時間
制御せず	人為的ミス	航行	数秒～数十分
故障	機械の不具合	漂流	故障の程度による 数時間程度か
	船舶同士の衝突事故	漂流	故障の程度による 数時間程度か
制御不能	海嘯条件による	漂流	数時間～一日

第4節 損害の期待値 $C_{collision_WF}(i, v, \theta)$

損害の期待値は、ある海象条件において船舶が WF 周辺で漂流した場合の WF の総損害額である。 m 番目の風車と船が衝突した場合の損害額を $C(i, v, \theta; m)$ とすると、

$$C_{collision_WF}(i, v, \theta) = \sum_{m=1}^M C(i, v, \theta; m) \quad (4-4)$$

M : WF 内の風車の数

となる。

第5節 風速発現確率 P_v

風速発現確率 P_v は風向と季節変化に影響を受けると考えられる。しかし風速と風向頻度分布の相関といった詳細なデータは少なく風向および季節変化の影響は考慮しないこととした。

また一般に 10 分平均風速の頻度分布は (4-5) で表される Weibull 分布が用いられている。

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right) \quad (4-5)$$

k : Weibull 分布の形状パラメータ, c : Weibull 分布の尺度パラメータ

特に日本近海の場合では図 4-1 から分かるように Weibull 分布における形状パラメータ $k=2$ の分布, Rayleigh 分布が適している。このとき, c を求めるにあたり, データベース^[23]

を参照した。このデータベースは一日2回、1994年2月～2004年1月の10年間分の波浪推算のデータである。図4-2のようにデータベースとWeibull分布を重ね合わせた結果、 $c=7.28$ となった。これは年平均風速6.47[m/s]に相当する。

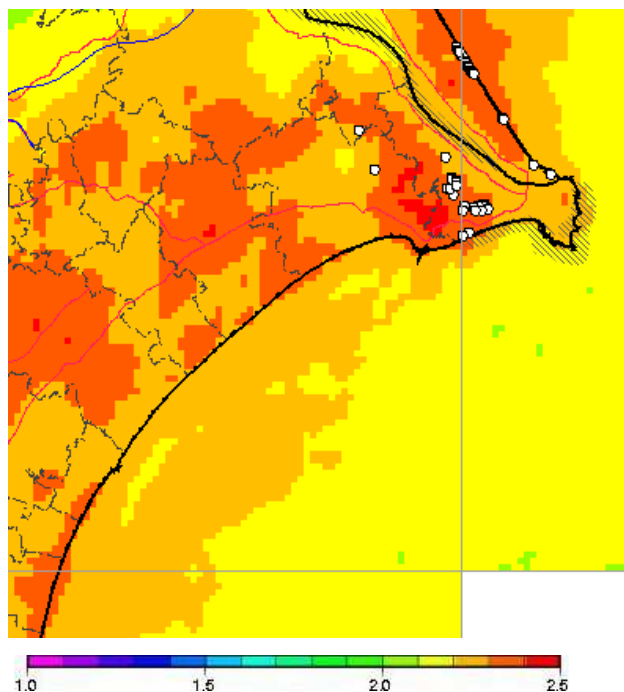


図 4-1 想定海域での Weibull 係数 k ^[25]

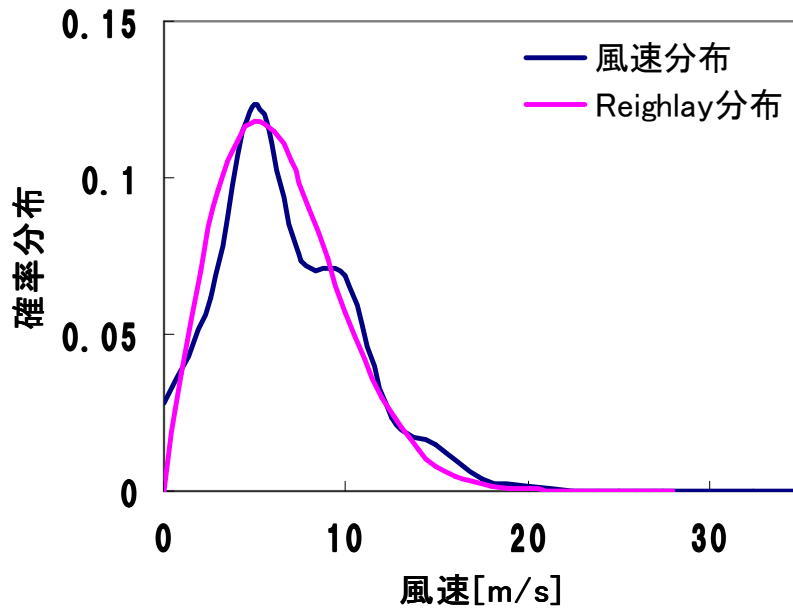


図 4-2 想定海域での 10 分平均風速発生頻度分布

表 4-4 風速発現確率 P_v

風速[m/s]	風速発現確率 P_v
0	0.00.
5	1.18×10^{-1}
10	5.74×10^{-2}
15	8.14×10^{-3}
20	3.99×10^{-4}
25	7.15×10^{-6}
30	4.79×10^{-8}

第6節 風向発現確率 P_θ

風速発現確率と同様に，風向は風速に影響を受けなく，かつ季節変動を考慮に入れないこ

ととして、簡略化を行った。銚子沖における風向分布は表 4-5 であり、レーダー図で表すと図 4-3 となる。

表 4-5 想定海域における風向頻度分布

風向 発現頻度 [%]	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
	10%	7%	5%	3%	3%	3%	5%	8%
風向 発現頻度 [%]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
	12%	7%	3%	3%	6%	11%	9%	6%

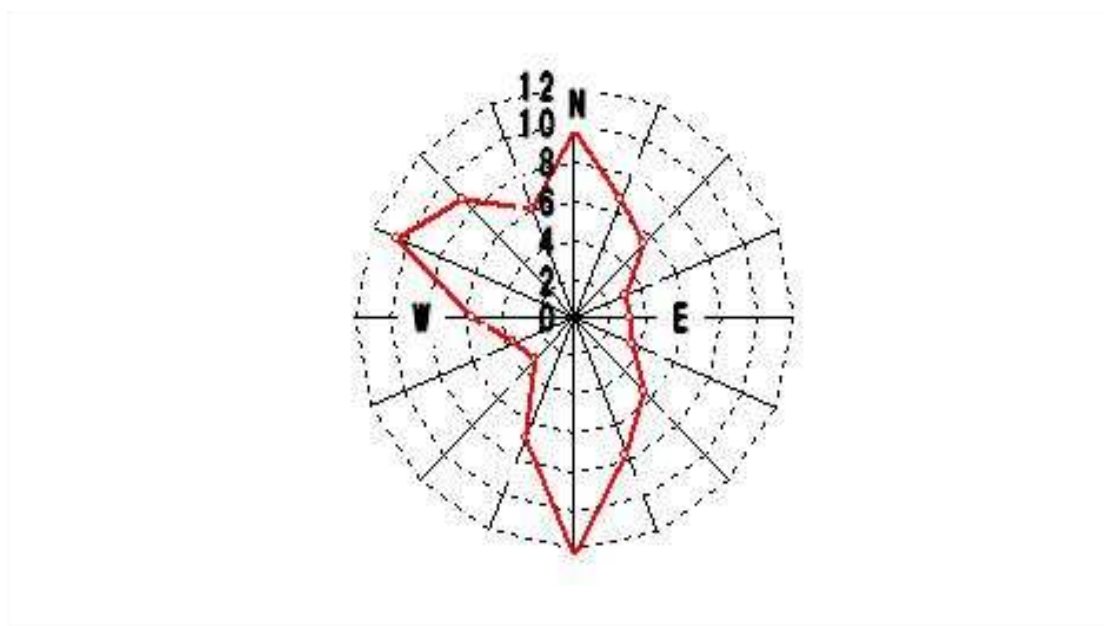


図 4-3 風向頻度分布

図 4-3 及び表 4-5 を用いて風向発現確率を決定する。 $\theta = 0^\circ$ は西からの風を表し、 $\theta = 90^\circ$ は南からの風を表すとすると、以下のように出来る。

$$P\theta(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} 0.0554 & (0 \leq \theta < 11) \\ 0.0349 & (11 \leq \theta < 34) \\ 0.0301 & (34 \leq \theta < 56) \\ 0.0670 & (56 \leq \theta < 79) \\ 0.0122 & (79 \leq \theta < 101) \\ 0.0752 & (101 \leq \theta < 124) \\ 0.0534 & (124 \leq \theta < 146) \\ 0.0342 & (146 \leq \theta < 169) \\ 0.0301 & (169 \leq \theta < 191) \\ 0.0308 & (191 \leq \theta < 214) \\ 0.0534 & (214 \leq \theta < 236) \\ 0.0663 & (236 \leq \theta < 259) \\ 0.0964 & (259 \leq \theta < 281) \\ 0.0558 & (281 \leq \theta < 304) \\ 0.0862 & (304 \leq \theta < 326) \\ 0.1053 & (326 \leq \theta < 349) \\ 0.0554 & (349 \leq \theta < 360) \end{array} \right. \quad (4-6)$$

第5章 結果と考察

第1節 航路及びWFの設定

第1項 着底式ウインドファーム設置可能海域

着底式 WF は水深 20～30 m が目安となっている。また、なだらかな海底地形であることも 1 つの条件となる。

本研究では仮想海域のモデルとして、東京電力による洋上ウインドファームも計画されている銚子港周辺海域を扱っている。この海域のうち、どこが WF 設置に優れているかを上記の条件から検討した。

銚子港周辺の海底地形図を示すと図 5-1 となっている。図中の青線は水深 20 m、赤線は勾配がなだらかなであり、WF 設置に適した海域となっている。また、黒丸は仮想的に設置した港である。

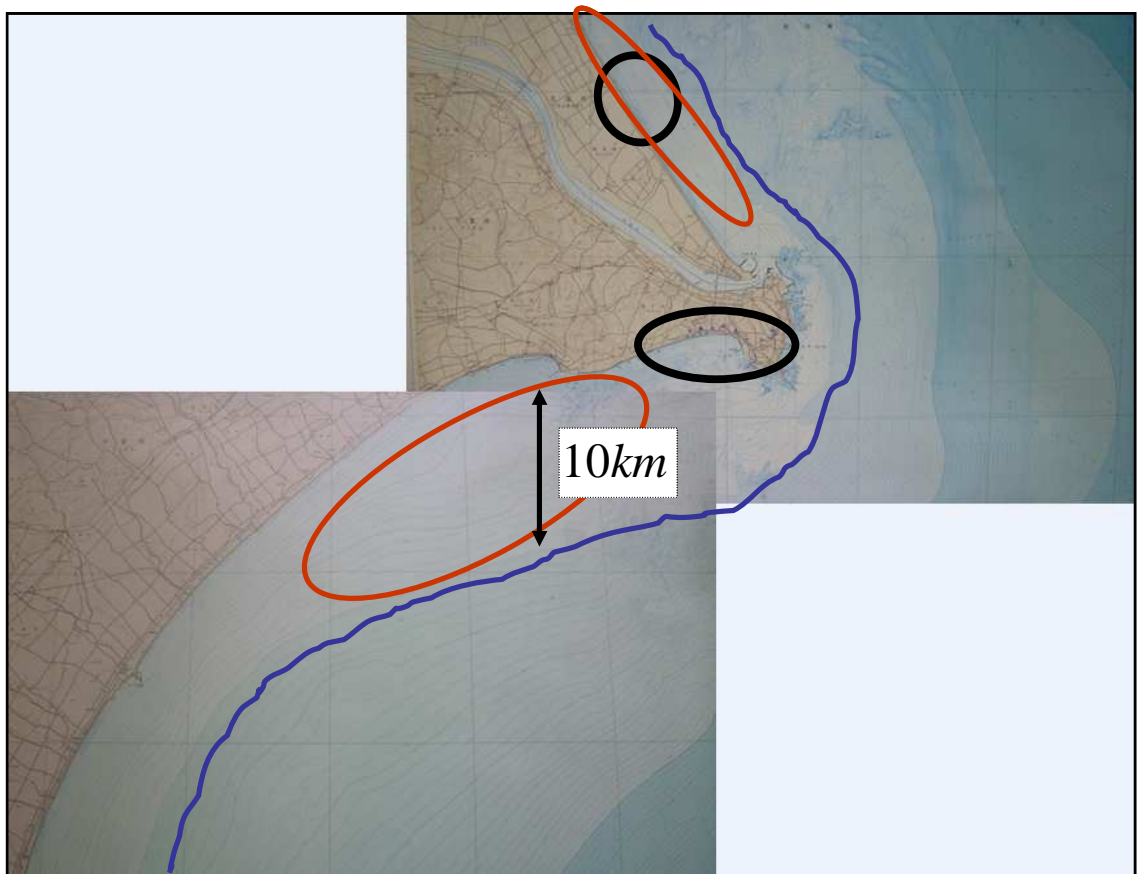


図 5-1 銚子沖の海底地形図

第2項 想定する着底式風車

2 MW 風車風車と 5 MW 風車を考える。2 MW 風車はタワー高さ 70 m、ブレードの回転直径 D が 92 m であり、5 MW 風車はタワー高さ 80 m、ブレードの D が 126 m となる。風の特

性上、風上側の風車から風下側の風車の間隔は $10D$ 以上であることが望ましい。

第3項 ウインドファームの形状と航路

WF の出力を 2010 年現在世界最大級の Horns Rev 2 洋上風力発電所に倣い 200MW とすると、 2MW 風車では 100 基、 5MW で 40 基程度必要となる。

銚子沖の風向が定まっていないことから、風車間隔を前後左右約 $10D$ ずつ離して設置した場合を考える。

2MW 風車では前後左右の間隔を 1000m 一辺 9000m の正方形とし、 5MW 風車の WF はこの正方形に図 5-3 のように 6×7 基配置するとした。 2MW による WF を WF1、 5MW による WF を WF2 と呼ぶ。

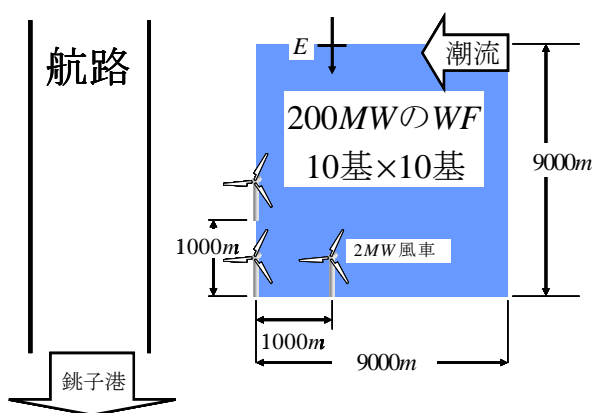


図 5-2 WF 1 の形状 (2MW 風車)

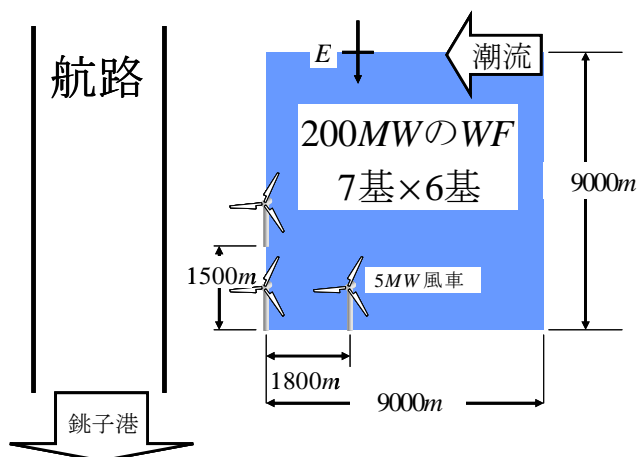


図 5-3 WF 2 の形状 (5MW 風車)

航路幅は片側 1km とすると、表 2-5 WF の位置と航路幅の比と進入確率の関係から 2.3km

以上離すと船舶の進入確率は 10^{-5} となる。

第2節 初期位置

銚子の南の海上（図 5-1 赤線枠内）をモデルとした仮想海域を設定し，そこに洋上 WF を立てる場合を想定して以下考える。

図 5-4 のように座標を設定し，x 軸方向については $x = -100[m]$ から漂流させる。y 軸方向に関しては，各風車の正面から及び風車と風車の間を初期位置とした。

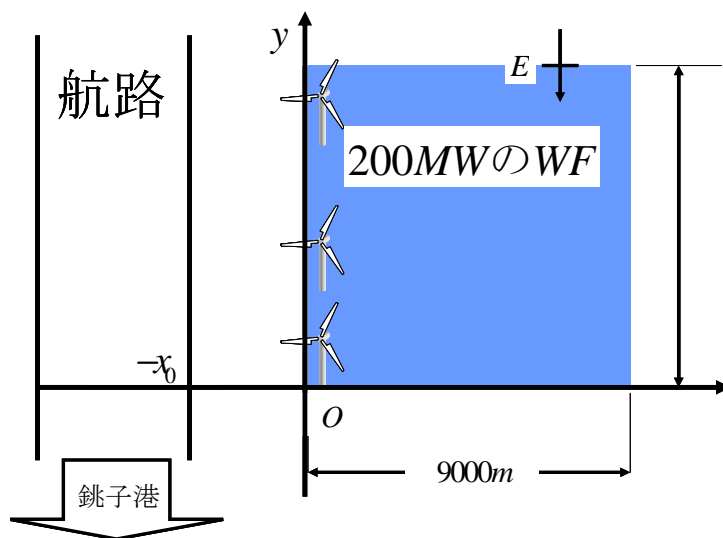


図 5-4 座標設定

第3節 船舶が衝突する風車の期待値と損害額の期待値計算

二種類のWF形状、複数の初期位置、風速、風向でシミュレーションを行った。全試行回数は5760回となった。

図 5-5, 図 5-6 は速度別に損害額を見た図である。

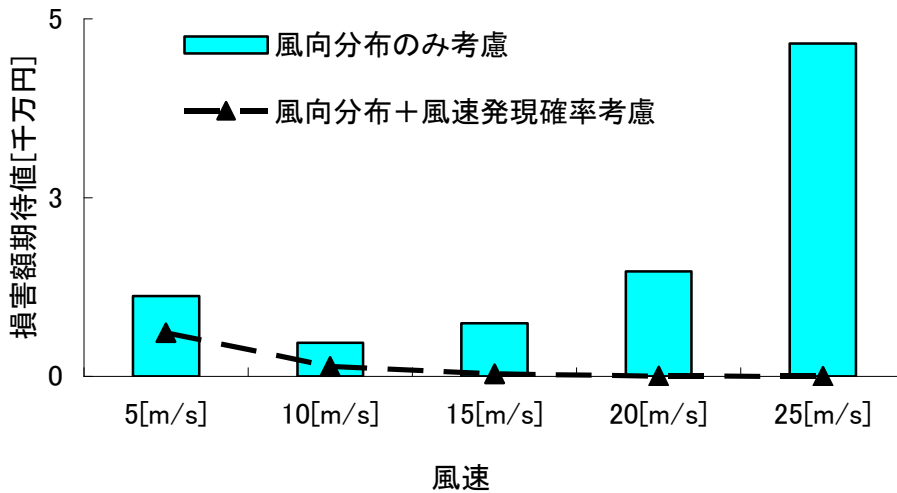


図 5-5 風速ごとの損害期待値(WF1 (2MW×100))

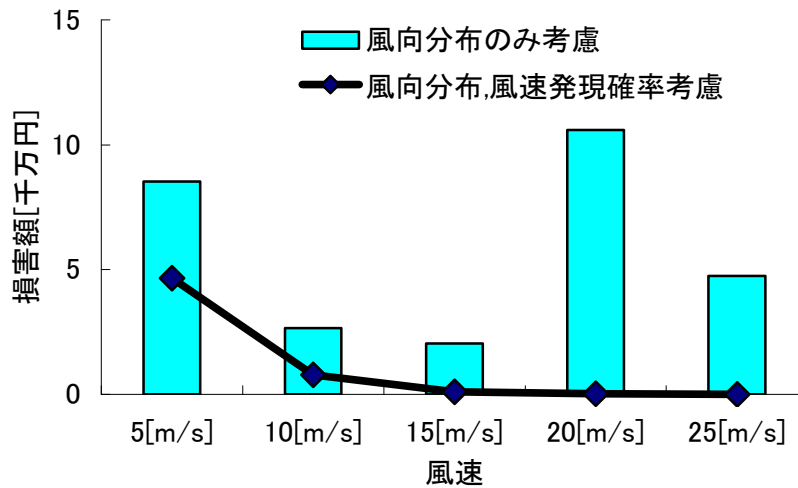


図 5-6 風速ごとの損害期待値(WF2 (5MW×42))

各WFに風向分布のみ考慮した場合の損害額の特徴があるが、風速発現確率を考慮した後は共通して右肩下がりの特徴が現れている。

これは風速分布がレイリー分布であり、平均風速に近い5m/s,10m/sの発現確率が

15m/s, 20m/s, 25m/sの発現確率より非常に大きいためである。

図 5-5, 図 5-6 より, リスクを決定する大きな要因は風速5m/s, 10m/s 以下の場合の損害であるといえる。

次に初期位置が与える損害額への影響を見てゆく。図 5-7, 図 5-8は船舶の初期位置とWFにおける損害額と期待衝突数を表している。

図中の0km, 10km, 40km, 50kmの地点で損害額の期待値が高くなっている。

これは2MW風車のWFでは, 図中の0km, 10km, 40km, 50kmの地点に風車が存在しており, これらの地点で損害額が大きくなっていることが読み取れる。これはx方向の初期位置が $x = -100(m)$ であり, 風車の目の前から漂流させていることによる。

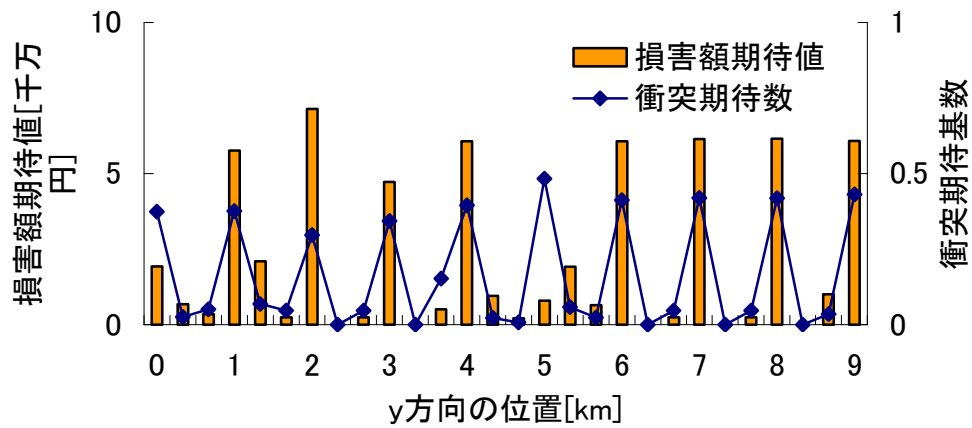


図 5-7 初期位置による損害額への影響 (WF1 (2MW×100))

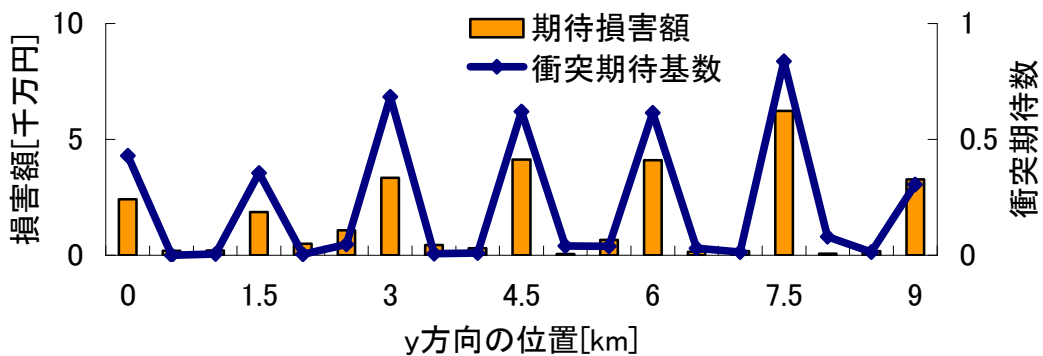


図 5-8 初期位置による損害額への影響 (WF2 (5MW×42))

どちらのケースも風車の間から漂流させた場合に損害期待値は低くなり, 風車付近では高

くなる。

第4節 ウィンドファームの比較検討

WF1とWF2ではどちらのWFが損害額期待値を抑えることができるだろうか。WF2では5MWの風車を使用しており、一度の衝突における損害額は2MWの風車に比べて大きくなると考えられる。一方、WF1は風車が100基とWF2の約2倍の風車基数である。設置面積は同じであるので、衝突期待値はWF1が多くなると予想できる。

WF1とWF2においてシミュレーションを行った結果（図 5-7，図 5-8）をまとめると以下ようになる。

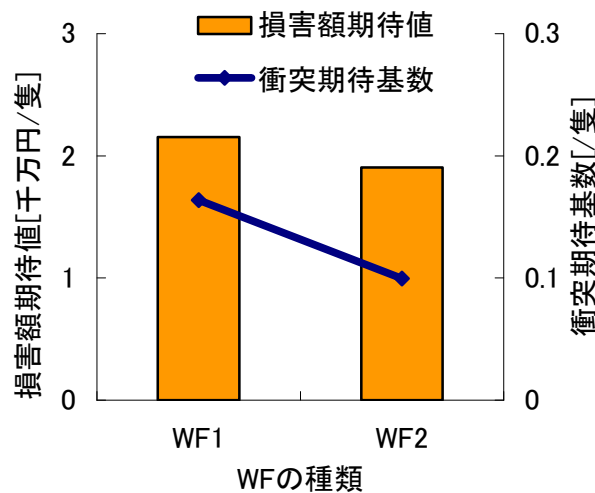


図 5-9 各 WF の損害額期待値と衝突期待基数

図 5-9 より、損害額期待値はWF2がWF1の0.89倍、衝突期待基数はWF2がWF1の0.61倍となっている。この結果から5MWの風車によるWFの方が、2MWのWFよりリスクの小さいWFだとできる。

ただし、航路からの距離によってもWFのリスクは変化するので、5MWの風車によるWFは2MWのそれよりも航路から離して設置すればリスクは抑えられる。

第5節 連鎖衝突リスク

以下の仮想海域に於いて、リスクを算出する。

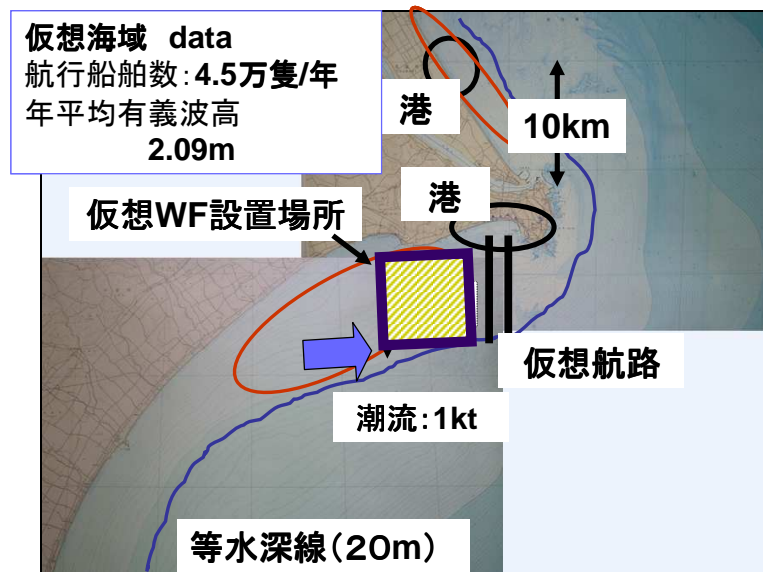


図 5-10 仮想海域

仮想海域に片側1000[m]の航路と航路中心から1500[m]離れた領域に2MWの風車による200MWWFが設置されているとする。そして航行船舶数 N_{total} は銚子港と鹿島港の入港船舶数の和(約4.5[万隻/年])とすると、漂流による年間進入船舶数 N_{ship} は、表2-5より

$$\begin{aligned}
 N_{ship} &= 3.18 \times 10^{-7} N_{total} & (5-1) \\
 &= 1.36 \times 10^{-2} (\text{隻/年})
 \end{aligned}$$

と出来る。

そして、進入船舶一隻あたりの損害額期待値は約2153万円であるので、一年あたりの損害額は約33万円。WFの耐用年数20年とすると、被害総額期待値は約660万円。これは風車を8億円/基としているので、 7.3×10^{-3} 基の費用に相当する。

これは仮に大型火力発電所と同程度の規模(1000MW級)の風力発電施設を設置した場合に、単純計算で風車約0.04基分の損害額期待値となる。

1500[m]と同様に航路中心からWFまでの距離を1,100~1,900[m]とした場合のリスクは以下のようなになる。

表 5-1 航路中心から WF までの距離とリスクの関係

航路中心から WFまでの距離(m)	進入船舶数 N_{SHIP} (隻/年)	20年間の リスク(円)	20年間のリスク (風車換算)
1,100	5.83	28.2 億円	3.14基
1,300	3.49×10^{-1}	1.69億円	1.88×10^{-1} 基
1,500	1.36×10^{-2}	658万円	7.32×10^{-3} 基
1,700	3.85×10^{-4}	18.7万円	2.07×10^{-4} 基
1,900	5.97×10^{-6}	2890円	3.21×10^{-6} 基

第6章 結論

本論では漂流船舶が *WF* に与えるリスクの定量的な評価を行うにあたり、以下のようなアプローチを行った。

まず航路が設定された海域を仮定した上で、船舶が漂流し *WF* 内の風車と衝突するシナリオを作成し、リスクの定式化を行った。そしてリスクを求めるためには、「航路を航行する船舶数」と「船舶が漂流して *WF* に進入する確率」および「*WF* 内に進入した船舶が *WF* に与える損害額期待値」が必要となった。

「船舶が漂流して *WF* に進入する確率」を求めるにあたり、来島海峡での事故データと航路を用いた。来島海峡のデータから、航路を設定した場合の船舶の分布を求めるモデルを作成した。このモデルにより、航路の幅と航路から *WF* までの距離の比が 1.5 のとき、*WF* に進入する船舶の確率は 3.18×10^{-7} であることが分かった。

また、来島海峡モデルを津軽海峡においてスケーリングを行い、これと津軽海峡での船舶の分布とを比較を行った。その結果同様の分布が確認できたので来島海峡モデルは航路を設定した場合における船舶の分布を良く表現していると言える。

「*WF* 内に進入した船舶が *WF* に与える損害額期待値」を求めるにあたり、船舶が *WF* 内を漂流するシミュレーターを開発した。

船舶は二次元平面を考慮し、加わる外力は風、波、潮流とした。そして衝突時には船舶の歪みの分だけ反力を船舶と風車に与えて運動方程式を解いた。風車のモデルは過去の陸上での倒壊事例やモデル化した風車の特徴から 2 要素のモデルとし、損害額は風車の最大変位を元に算出するモデルとした。

これらを用いてリスクの評価を行った。比較のために二種類の *WF* を考慮した。*WF1* は $2MW \times 100$ 基、*WF2* は $5MW \times 42$ 基の *WF* である。

まずシミュレーションの結果、損害額期待値に影響が大きな風速は $5[m/s]$, $10[m/s]$ であると言える。また *WF1*, *WF2* を比較すると、損害額期待値は *WF2* の方が小さくなった。言い換えると大型の風車による *WF* の方が損害額期待値が抑えられることが分かった。

このシミュレーションの結果と来島海峡のモデルから、航路幅が 1000[m] の場合において航路中心から *WF* までの距離を 1500[m] とすると、20 年間のリスクが 658 万円。風車換算で 7.32×10^{-3} 基であることが分かった。

本研究に残された課題は以下の通りである。

本研究では漂流船舶として、航行不能船舶を対象としていた。しかし漂流船舶にはそれ以外にも不注意や居眠りによる船舶も含まれると考えられる。こうした船舶は、航行不能船舶よりも発生確率は低いものの、十分小さいとは言い切れない。また航行速度が速いため、衝突した場合の損害額期待値は大きくなると予想できる。なので不注意や居眠りによる漂流船舶を含めた漂流船舶が与えるリスクを評価する必要があるだろう。

また、損害額の計算をより正確に行うには、計算機の性能にもよるが、シミュレーターの

高度化が必要となる。具体的には、船舶の漂流・衝突シミュレーターを三次元6自由度に改良する、風車の運動に有限要素法を用いるという点である。ただし、特に有限要素法は計算時間が膨大になる恐れがあるため、計算時間の都合も考慮した最適なシミュレーターにする必要がある。

参考文献

- [1] 石原 孟:洋上風力発電の現状とその技術開発, 土木学会, 研究討論会, 2010
- [2] 気象庁, 気候変動監視レポート 2009(元データは温室効果ガス世界資料センター及び米国二酸化炭素情報解析センター)
- [3] 気象庁データ(元データは IPCC 第四次評価報告書)
http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki_ondanka/p04.html
- [4] 気候変動に関する国際連合枠組み条約の京都議定書
- [5] Stern Review on the Economics of Climate Change
- [6] EIA, International Energy Outlook 2010
- [7] BP 統計 2008
- [8] 資源エネルギー庁, 日本のエネルギー2010
- [9] 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2008
- [10] Global Wind Report 2009
- [11] NEDO: NEDO 風力発電の技術の現状とロードマップ, 再生可能エネルギー技術白書, 2010.
- [12] <https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/press/FF/nedopressplace.2009-06-08.5858382467/nedopress.2010-05-17.6228093529/>
- [13] den Boon, H., Just, H., Hansen, P.F., Ravn, E.S., Frouws, K., Otto, S., Dalhoff, P., Stein, J., van der Tak, C., van Rooij, J.: Reduction of Ship Collision Risks for Offshore Wind Farms - SAFESHIP, EWEC London, 2004
- [14] Florian Biehl: Collision Safety Analysis of Offshore Wind Turbines, LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2005
- [15] Biehl, F., Lehmann, E.: Collisions of Ships and Offshore Wind Turbines: Calculation and Risk Evaluation, OMAE2006-92270 pp. 663-670
- [16] Florian Biehl, Peter Dalhoff, Daniel Povel, Collision Risk Analysis and Collision Friendly Design of Offshore Wind Farms 2006
- [17] Peter Dalhoff, Florian Biehl, Ship Collision, Risk analysis - Emergency systems -Collision dynamics
- [18] 上野 道雄, 二村 正, 宮崎 英樹: 航行不能船舶の定常漂流運動について, Journal of the Society of Naval Architects of Japan (192), 103-111, 2002-12
- [19] 原 正一, 谷澤 克治: 航行不能船舶の漂流予測と曳航技術, 海上技術安全研究所報告, 第6巻, 第4号 (2006) pp. 465-470.
- [20] F. H. Hsu, K. A. Blenkarn, Pan American Petroleum Corp. : Analysis of Peak Mooring Force Caused by Slow Vessel Drift Oscillation in Random Seas, OTC 1159, 1970
- [21] 谷澤 克治, 南 真紀子: 非線形シミュレーションによる波漂流力の推定, 第72回船研研究発表. 会講演集, 1998, pp181-185

- [22]藤原 敏文, 上野 道雄, 二村 正:船体に働く風圧力の推定, 日本造船学会誌, 第 183 号(1998) pp.77-90
- [23]社団法人日本鋼造協会:構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997
独立行政法人海洋技術安全研究所:日本近海の波と風データベース,
http://www.nmri.go.jp/wv/japan/namikaze_main.html
- [24]光易 恒:海洋波の物理, 岩波書店, 1995
- [25]独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構:風況マップ 2006 年度改訂版,
<http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/top/top.html>
- [26]<http://www.biwako.shiga-u.ac.jp/sensei/mnaka/ut/normdisttabhigh.html>
- [27]沖縄電力株式会社:台風 14 号による 風力発電設備の倒壊等事故調査果について, 2004 年
- [28]Le Anh TUAN 勝地 弘 山田均 佐々木栄一:大きな開口比を有する風力発電設備鋼製タワーの座屈耐力解析, 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2010
- [29]Hideyuki Suzuki:private communication
- [30]農林水産省:海面漁業に関する統計(都道府県編), 2008 年漁業センサス第 2 巻, 2010
- [31]銚子市漁業協同組合:年次別水揚高
- [32]鹿島港湾事務所:港湾統計
- [33]高橋宏直, 後藤健太郎:AIS データの港湾整備への活用に関する研究
- [34]北原 悠:[係留系強度モデルを用いたウインドファームにおける浮体式風車の連鎖漂流事故リスク評価](#), 修士論文, 東京大学, 2010
- [35]大坪 英臣:衝突・座礁事故と船体強度, 船の強度と災害防止シンポジウム. 1993
- [36]東京電力共同研究資料

謝辞

本研究を行うに当たり多くの方にお世話になりました。感謝の言葉をこの機会に述べさせていただきます。

本研究を行うに当たり、2年間にわたりご指導頂きました鈴木 英之教授に感謝申し上げます。行き詰まったときも優しくアドバイスをしていただいたおかげで、この論文を書くことが出来ました。また、先生の優しさの中にも鋭い視点を垣間見ることができ、これからの人生に大きな財産になりました。

副指導教員の飯笹教授に心から感謝を申し上げます。私の至らない点を優しくも的確に指導していただきありがとうございました。また、テニスをご一緒させていただいたことは忘れられません。

輪講でお世話になった尾崎先生には専門知識を多数教わりました。いつも優しく、丁寧にご指導していただき、至らない質問にも丁寧に答えて下さり本当にありがとうございました。

また、高木教授、早稲田准教授には飲み会での席でプライベートな事についてもご教授いただき、ありがとうございました。高木教授のようにダンディで、早稲田先生のように何事にも一生懸命な男性に一步でも近づけるように頑張っていきたいです。

鈴木研究室の技師の榎本さんには、快適に研究室生活を送る根本を支えていただきました。学生の要望に丁寧に応じて下さりありがとうございました。

ネットワーク管理を行ってくださった清松氏、研究室の明るい雰囲気を作ってくださいました、和田氏、西田氏、岡氏、田村氏、ありがとうございました。特に和田さんには辛い時にも「大丈夫だよ。」と声をかけていただき、何度癒されたことか、. . . 本当にお世話になりました。

同じ修士2年の小平君、新地君、塩沢君、高辺君、高橋君、野澤君ありがとうございました。夜遅くまで残って研究してる同期の背中を見ながらたからこそ、ここまで来ることが出来ました。

修士1年の伊藤君、藤岡君、宝谷君、松田君、村竹さん、小澤君、加賀谷君、みんなと食べる夕飯は唯一の楽しみでした。

最後にここまで金銭的にも精神的にも多くの面で支えて下さった両親、兄弟、祖母に感謝を述べて、終りの言葉とさせていただきます。

2011/2/28

岡山 真也