

博士論文

浮体式洋上風力発電の安全性および  
環境影響に関する研究

塩莉 恵



## 目次

1. 序論 .....	1
1.1. 背景 .....	1
1.1.1. 近年のエネルギー情勢 .....	1
1.1.2. 再生可能エネルギー .....	4
1.1.3. 風力発電 .....	6
1.1.4. 洋上風力発電の安全性と環境影響 .....	7
1.2. 洋上風力発電の安全性に関する既往基準および先行研究 .....	7
1.3. 洋上風力発電の環境影響に関する既往基準および先行研究 .....	11
1.3.1. 日本の風力発電の環境影響に関する規制等 .....	11
1.3.2. 諸外国の風力発電の環境影響に関する規制等 .....	12
1.3.3. インタビュー調査 .....	13
1.3.4. 風力発電の環境影響に関する先行研究 .....	13
1.3.5. その他の海洋再生可能エネルギー施設に関する環境影響 .....	14
1.4. 本研究の目的 .....	14
1.5. 研究の流れ .....	15
2. 浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスク分析 .....	17
2.1. 浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの特定 .....	17
2.2. 重大リスクの原因特定 .....	17
2.2.1. 浮体への浸水に至る原因の特定 .....	17
2.2.2. 係留索の破断に至る原因の特定 .....	18
2.2.3. 係留アンカーの抜けに至る原因の特定 .....	18
2.2.4. 施設の漂流に至る原因の特定 .....	18
2.3. 重大リスクの結果推定 .....	24
2.3.1. 浮体への浸水の結果推定 .....	24
2.3.2. 係留索破断の結果推定 .....	24
2.3.3. 施設漂流の結果推定 .....	24
2.4. リスクシナリオの作成と重要シナリオの抽出 .....	28
3. 安全性に関するリスクの定量評価 .....	31
3.1. 解析条件の設定 .....	31
3.1.1. 解析対象海域と施設設置候補海域 .....	31
3.1.2. 対象とする風力発電施設 .....	31
3.2. 解析方法の概要 .....	34
3.3. 各リスクの発生確率の算出方法 .....	34
3.3.1. 船舶の漂流による風力発電施設への衝突確率 .....	34
3.3.2. 船舶の操船ミスによる風力発電施設への衝突確率 .....	39
3.3.3. 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率 .....	53

3.3.4.	操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率 .....	68
3.3.5.	設計条件を超える気象海象による風力発電施設の漂流確率 .....	68
3.3.6.	風力発電施設の漂流による沿岸施設への衝突 .....	69
3.3.7.	風力発電施設の漂流による船舶航路への侵入確率.....	72
3.3.8.	船舶航路への侵入による船舶への衝突確率.....	72
3.4.	各リスクの被害金額の算出方法 .....	74
3.4.1.	船舶の衝突による風力発電施設の被害金額.....	74
3.4.2.	風力発電施設の漂流による被害金額.....	74
3.4.3.	風力発電施設の衝突による沿岸施設の被害金額.....	74
3.4.4.	風力発電施設の衝突による航行船舶の被害金額.....	75
4.	安全性に関するリスクの計算例と施設設置位置の決定方法.....	77
4.1.	計算条件.....	77
4.1.1.	環境条件.....	77
4.1.2.	船舶の階級別出現頻度.....	83
4.1.3.	漂流船舶出現数.....	84
4.1.4.	年間船舶通航量.....	84
4.1.5.	航路幅方向の船舶通航分布 .....	85
4.1.6.	船舶航行速度の分布 .....	86
4.1.7.	沿岸施設の衝突範囲 .....	87
4.1.8.	船舶の衝突による風力発電施設の被害額 .....	88
4.1.9.	風力発電施設漂流の被害額 .....	88
4.1.10.	風力発電施設の衝突による沿岸施設の被害額 .....	88
4.1.11.	風力発電施設の衝突による通航船舶の被害金額.....	89
4.2.	計算結果.....	89
4.2.1.	個々のリスクの発生確率 .....	89
4.2.2.	シナリオごとのリスク .....	110
4.2.3.	風力発電施設漂流の原因別リスク .....	123
4.2.4.	総合リスク .....	125
4.3.	各計算条件と計算結果の関係についての考察 .....	131
4.3.1.	漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率と年間船舶通航量 .....	131
4.3.2.	操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率と航路中心からの距離...	132
4.3.3.	総合リスク分布と沿岸施設被害額 .....	138
4.4.	安全性に関するリスクを考慮した浮体式洋上風力発電施設設置位置の選定方法...	142
4.5.	モデルの不確実性 .....	143
4.6.	本章のまとめ.....	145
5.	洋上風力発電施設の環境影響に関する文献調査 .....	147
5.1.	洋上風力発電からの水中騒音とその生物への影響のレビュー [63].....	147
5.1.1.	背景雑音.....	147



5.1.2.	杭打ち時の騒音.....	147
5.1.3.	運用時の騒音.....	147
5.1.4.	その他の段階の騒音.....	148
5.2.	着床式洋上ウィンドファームの運用中の水中騒音調査結果 [70].....	151
5.3.	着床式洋上風力発電施設の運用中および建設中の水中騒音の調査例 [71].....	153
5.4.	着床式洋上ウィンドファーム建設中の水中騒音調査結果とその海産哺乳類への影響の推定 [72].....	156
5.5.	浮体式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測 [73].....	159
5.6.	着床式洋上ウィンドファームからの水中放射音の魚類への影響の推定 [74] [75] [76] [77].....	160
5.7.	洋上風力発電の海産哺乳類への影響調査例 [78] [79] [80].....	161
5.8.	洋上風力発電の魚類への影響調査例 [64] [81] [82].....	162
5.9.	騒音による魚類のストレス反応や聴覚への影響の実験例 [83].....	162
5.10.	レビュー結果のまとめ.....	163
6.	洋上風力発電施設周辺での水中音観測.....	165
6.1.	着床式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測.....	165
6.1.1.	観測日時と気海象条件.....	165
6.1.2.	主な観測機器.....	165
6.1.3.	観測方法.....	165
6.1.4.	データ解析方法.....	167
6.1.5.	解析結果.....	167
6.1.6.	観測結果の考察.....	169
6.2.	着床式洋上風力発電施設の建設中における水中音観測 [87] [88].....	172
6.2.1.	観測日時と気海象条件等.....	173
6.2.2.	観測機器.....	173
6.2.3.	観測方法.....	174
6.2.4.	観測結果.....	174
6.2.5.	当該海域における水中音伝搬特性の調査.....	179
6.2.6.	打設音の音源音圧レベル推定.....	184
6.2.7.	観測結果および音源音圧レベル推定法についての考察.....	187
6.3.	本章のまとめ.....	188
7.	施設放射音の生物影響.....	189
7.1.	実験の背景と目的.....	189
7.2.	魚類の水中音による慢性影響.....	189
7.3.	実験方法.....	190
7.3.1.	周波数と音圧の設定.....	190
7.3.2.	対象魚種.....	190
7.3.3.	実験条件.....	190

7.4.	実験結果.....	195
7.4.1.	供試魚の行動.....	195
7.4.2.	供試魚の摂餌日周リズム.....	195
7.4.3.	供試魚の摂餌量.....	195
7.4.4.	供試魚の体重変化.....	197
7.5.	実験結果についての考察.....	198
8.	結論.....	201
9.	謝辞.....	205
10.	参考文献.....	207

## 図目次

図 1-1	世界のエネルギー需要の実績と予測 [1] .....	2
図 1-2	日本の一次エネルギー供給構造の推移 [1] .....	3
図 1-3	我が国の温室効果ガス排出量の推移 [2] .....	4
図 1-4	エネルギーの概念図 [3] .....	5
図 1-5	世界の風力発電総設備容量の推移 [7].....	6
図 1-6	日本の風力発電総設備容量の推移 (JWPA 調べ, 2013 年度は推定) [8] .....	6
図 1-7	ヨーロッパの主な洋上ウィンドファーム (Offshore Wind Energy Europe HP より) .....	8
図 1-8	着床式洋上風力発電施設の基礎形式と適用条件 (NEDO 平成 20 年度 洋上風力発電実証研究 F/S 調査より) .....	8
図 1-9	ノルウェーの Statoil 社による世界初の浮体式洋上風力発電実証実験機 Hywind [18].....	9
図 2-1	浮体への浸水の原因推定 FT (雨水の侵入) .....	19
図 2-2	浮体への浸水の原因推定 FT (海水の侵入) .....	20
図 2-3	浮体への浸水の原因推定 FT (簡略化) .....	21
図 2-4	係留索破断の原因推定 FT .....	22
図 2-5	係留アンカーの抜けの原因推定 FT.....	23
図 2-6	浮体の浸水の結果推定 ET .....	25
図 2-7	1 本の係留索の機能喪失の結果推定 ET.....	26
図 2-8	浮体式洋上風力発電施設の漂流の結果推定 ET .....	27
図 2-9	本研究で抽出したリスクシナリオ .....	28
図 2-10	抽出したリスクシナリオ (詳細) .....	28
図 3-1	単純化した風力発電施設周辺海域概要図 .....	32
図 3-2	上方 (左上), 横方向(左下)と正面(右)から見たセミサブ型浮体の概要 [39].....	33
図 3-3	解析対象とするリスクシナリオ.....	35
図 3-4	$p_{11}(i, j)$ の計算フローチャート.....	38
図 3-5	$P_{cc}$ についての ET [44](一部改変) .....	42
図 3-6	衝突回避に失敗する原因についての FT [45].....	43
図 3-7	交通グループごとの年間船舶衝突件数 [43] .....	44
図 3-8	交通グループごとの年間船舶衝突件数 [45] .....	45
図 3-9	条件の違いによる Total の年間衝突件数の比較.....	45
図 3-10	野島崎沖ゲート GL3 での通航船舶の幅方向分布 [46].....	46
図 3-11	岩手沖の通航船舶の AIS 情報解析範囲とゲートの位置 .....	47
図 3-12	岩手沖ゲート 0 における通航船舶の幅方向分布.....	47
図 3-13	岩手沖ゲート 1 における通航船舶の幅方向分布.....	48
図 3-14	岩手沖ゲート 2 における通航船舶の幅方向分布.....	48

図 3-15	年間通航船舶 1000 隻・プラットフォーム幅 80 m の場合の年間衝突件数の分布形状とこれに近似した正規分布形状 .....	50
図 3-16	年間通航船舶 500 隻・プラットフォーム幅 100 m の場合の年間衝突件数の分布形状とこれに近似した正規分布形状 .....	51
図 3-17	$P_{CC}$ の計算の概念図 [43].....	51
図 3-18	アンカー点を原点とした場合の係留索の移動距離と移動に伴う索張力の変化.....	55
図 3-19	浮体の初期位置を原点とした場合の係留索の移動距離と移動に伴う索張力の変化.....	56
図 3-20	係留索の破断に至る荷重・エネルギーの考え方 .....	57
図 3-21	1 本の係留索と同一線上に荷重が加わる場合の係留索と荷重の方向.....	57
図 3-22	2 本の係留索の中間に荷重が加わる場合の係留索と荷重の方向 (左) とこの荷重による浮体の移動後の状態 (右) .....	58
図 3-23	2 本の係留索の中間に加わる荷重の大きさ $F_Y$ とそれぞれの係留索に働く張力 $T$ との関係 (海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合) .....	60
図 3-24	2 本の係留索の中間に加わる荷重の大きさ $F_Y$ と浮体の移動距離 $Y$ との関係 (海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合) .....	60
図 3-25	2 本の係留索の中間に荷重が加わる場合の係留索の破断に至る荷重・エネルギーの考え方 .....	61
図 3-26	環境外力の大きさと係留索 1 本あたりが吸収できる残りのエネルギーの関係 (海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合) .....	61
図 3-27	風速とスラスト係数の関係.....	64
図 3-28	三角形セミサブ浮体に対する海潮流の方向 (左) と断面積 (右) .....	65
図 3-29	$p_{11}(i, j)$ および $p_{13_1}(i, j)$ の計算フローチャート.....	67
図 3-30	$p_{15}(i, j)$ の計算フローチャート.....	71
図 3-31	$P_{16}(i, j)$ の計算フローチャート .....	73
図 4-1	海域 No.1 の風向別出現頻度分布 .....	77
図 4-2	海域 No.1 の風速別出現頻度分布 .....	78
図 4-3	海域 No.1 の海潮流向別出現頻度分布.....	78
図 4-4	海域 No.1 の海潮流速別出現頻度分布.....	79
図 4-5	海域 No.2 の風向別出現頻度分布 .....	79
図 4-6	海域 No.2 の風速別出現頻度分布 .....	80
図 4-7	海域 No.2 の海潮流向別出現頻度分布.....	80
図 4-8	海域 No.2 の海潮流速別出現頻度分布.....	81
図 4-9	海域 No.3 の風向別出現頻度分布 .....	81
図 4-10	海域 No.3 の風速別出現頻度分布 .....	82
図 4-11	海域 No.3 の海潮流向別出現頻度分布.....	82
図 4-12	海域 No.3 の海潮流速別出現頻度分布.....	83
図 4-13	岩手沖ゲート 0 での船舶通航分布と正規分布による近似曲線.....	85
図 4-14	野島崎沖のゲート GL3 の船舶通航分布形状に近似させたガンマ分布の確率密度と	

累積分布 [46] .....	86
図 4-15 岩手沖のゲート 0 を通航した船舶の航行速度分布 .....	86
図 4-16 野島崎沖のゲート GL3 を通航した船舶の航行速度分布 .....	87
図 4-17 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 30° で計算した $p_{11}$ の分布 .	92
図 4-18 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 10° で計算した $p_{11}$ の分布 .	92
図 4-19 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 5° で計算した $p_{11}$ の分布 ...	93
図 4-20 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 1° で計算した $p_{11}$ の分布 ...	93
図 4-21 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{11}$ の分布 .....	94
図 4-22 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{11}$ の分布 .....	94
図 4-23 正規分布で近似した岩手沖の船舶通航量分布から求めた $P_{CC}(DL)$ .....	96
図 4-24 ガンマ分布で近似した野島崎沖の船舶通航量分布から求めた $P_{CC}(DL)$ .....	96
図 4-25 正規分布で近似した岩手沖の船舶通航量分布から求めた $P_{12}(DL)$ .....	96
図 4-26 ガンマ分布で近似した野島崎沖の船舶通航量分布から求めた $P_{12}(DL)$ .....	97
図 4-27 海域 No.1 の環境条件で計算した $p_{13_1}$ の分布 .....	98
図 4-28 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{13_1}$ の分布 .....	99
図 4-29 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{13_1}$ の分布 .....	99
図 4-30 カンパチ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (5° 刻みの風向・ 海潮流向) での $p_{15}$ の分布 .....	102
図 4-31 カンパチ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・ 海潮流向) での $p_{15}$ の分布 .....	102
図 4-32 マグロ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・ 海潮流向) での $p_{15}$ の分布 .....	103
図 4-33 藻場が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布 .....	103
図 4-34 石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海 潮流向) での $p_{15}$ の分布 .....	104
図 4-35 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布 .....	105
図 4-36 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.2 の環境条件での $p_{15}$ の分布 .....	105
図 4-37 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.3 の環境条件での $p_{15}$ の分布 .....	106
図 4-38 石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布 .....	107
図 4-39 石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布 (スケ ール変更) .....	107
図 4-40 海域 No.1 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布 .....	109
図 4-41 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布 .....	109
図 4-42 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布 .....	110
図 4-43 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布...113	
図 4-44 海域 No.2 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布...113	
図 4-45 海域 No.3 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布...114	

図 4-46	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合のリスク $r_1$ の分布	114
図 4-47	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布(図 4-43 のスケールを変更して再掲)	115
図 4-48	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合のリスク $r_1$ の分布	115
図 4-49	海域 No.1 の環境条件でカンパチの生簀が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布	117
図 4-50	海域 No.1 の環境条件で藻場が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布	117
図 4-51	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布	118
図 4-52	岩手沖の年間船舶通航量を使用した場合のリスク $r_1$ の分布(海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合, 図 4-51 のスケール変更)	118
図 4-53	野島崎沖の年間船舶通航量を使用した場合のリスク $r_1$ の分布	119
図 4-54	岩手沖船舶通航分布データ(標準偏差 1.5 海里の正規分布)で計算した場合のリスク $r_7$ の分布	121
図 4-55	標準偏差 2 海里の正規分布で計算した場合のリスク $r_7$ の分布	121
図 4-56	標準偏差 3 海里の正規分布で計算した場合のリスク $r_7$ の分布	122
図 4-57	野島崎沖船舶通航分布(ガンマ分布)で計算した場合のリスク $r_7$ の分布	122
図 4-58	岩手沖の船舶通航分布と野島崎沖の船舶速度分布データを利用した場合のリスク $r_7$ の分布	123
図 4-59	船舶の漂流に起因するリスク( $r_1 \sim r_6$ )の合計 $r_{dri}(i, j)$	124
図 4-60	船舶の操船ミスに起因するリスク( $r_7 \sim r_{12}$ )の合計 $r_{mis}(i, j)$	124
図 4-61	設計時の想定を超える環境条件に起因するリスク( $r_{13} \sim r_{17}$ )の合計 $r_{env}(i, j)$	125
図 4-62	船舶の操船ミスに起因するリスク( $r_7 \sim r_{12}$ )の合計 $r_{mis}(i, j)$	126
図 4-63	海域 No.1 の環境条件による総合リスクの分布	126
図 4-64	海域 No.2 の環境条件による総合リスクの分布	127
図 4-65	海域 No.3 の環境条件による総合リスクの分布	127
図 4-66	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,1000)にある場合の総合リスクの分布	129
図 4-67	海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,20000)にある場合の総合リスクの分布	129
図 4-68	海域 No.1 の環境条件による総合リスクの分布	130
図 4-69	海域 No.2 の環境条件による総合リスクの分布	130
図 4-70	海域 No.3 の環境条件による総合リスクの分布	131
図 4-71	標準偏差と $DL_{min}$ の関係	133
図 4-72	年間船舶通航量と $DL_{min}$ の関係	133
図 4-73	標準偏差と $DL_{min}$ の関係を示す近似曲線の傾きおよびy切片と年間船舶通航量との関係	135
図 4-74	年間船舶通航量と $DL_{min}$ の関係を示す近似曲線の係数およびy切片と標準偏差との関係	135
図 4-75	形状母数と $p_{12}(i, j)$ の関係(尺度母数は 6720.42 で一定)	137
図 4-76	尺度母数と $p_{12}(i, j)$ の関係(形状母数は 1.09 で一定)	137
図 4-77	年間船舶通航量と総合リスク分布に影響を与える沿岸施設被害額の下限値の関係	139

図 4-78	沿岸施設 3 種類が 3 地点にある場合の総合リスク分布.....	141
図 4-79	漂流した風力発電施設が 3 地点にある沿岸施設 3 種類に衝突する確率の分布 ....	141
図 4-80	船舶通航分布がガンマ分布で近似される場合の総合リスク分布 .....	143
図 5-1	基礎の杭打ち時の騒音の伝搬経路.....	149
図 5-2	風車運用時の騒音の伝搬経路 [63].....	149
図 5-3	風車全基停止中と 4 号機のみ運転中の水中音の周波数特性の比較 [70] .....	152
図 5-4	風車運転中および停止中の水中音と風速の関係 [70].....	153
図 5-5	風車の出力・風速別に計測した水中音の周波数特性とアザラシ・アシカ類およびネズミイルカ属の聴覚閾値 [71].....	154
図 5-6	着床式洋上風力発電施設の建設地から 400 m 離れた地点で計測したパイル打設音の時刻歴特性 [71].....	155
図 5-7	着床式洋上風力発電施設の建設地から 400 m 離れた地点で計測したパイル打設音の周波数特性 (300 打の平均) [71].....	155
図 5-8	計測された水中音の音圧レベルの距離減衰 [71].....	156
図 5-9	着床式洋上風力発電施設の建設地から(a)100 m, (b)710 m, (c)1520 m, (d)4550 m 離れた地点で計測したパイル打設音の時刻歴特性 [72].....	157
図 5-10	着床式洋上風力発電施設の建設地から 100 m および 1520 m 離れた地点で計測した水中音の周波数特性 (3 秒間のデータより) [72].....	158
図 5-11	(a)計測された水中音の音圧レベルの距離減衰と(b)推定音源音圧レベルと打設エネルギーの関係 [72].....	158
図 5-12	各魚種の周波数別聴覚閾値 [77].....	161
図 6-1	観測の対象としたウィンド・パワーかみす洋上風力発電所(茨城県神栖市南浜地先) .....	165
図 6-2	水中音観測の様子 (右図のハイドロホンケーブルの先が左図の風車基礎付近) ...	166
図 6-3	ハイドロホンの固定方法 .....	166
図 6-4	風車の運転状況と水中音計測時間のイメージ.....	167
図 6-5	風車回転中のタワー内空中音の解析結果.....	168
図 6-6	風車回転中および停止中の水中音の解析結果の比較.....	168
図 6-7	風車停止前および再起動後の水中音の解析結果の比較.....	168
図 6-8	風車回転中の水中音に対する砕波音の影響の比較 .....	169
図 6-9	風車回転中および停止中のタワー外空中音の解析結果の比較 .....	169
図 6-10	風車回転中のタワー内空中音パワースペクトルの時間変化.....	171
図 6-11	風車回転中の水中音パワースペクトルの時間変化.....	171
図 6-12	風車停止中の水中音パワースペクトルの時間変化 .....	172
図 6-13	風車回転中のタワー外空中音パワースペクトルの時間変化.....	172
図 6-14	対象海域.....	173
図 6-15	打設地点および観測位置 .....	174
図 6-16	観測点②における水中音データの時刻歴特性.....	175

図 6-17	観測点③における水中音データの時刻歴特性.....	176
図 6-18	観測点①における打設開始前の水中音(背景雑音)平均パワースペクトル.....	177
図 6-19	観測点①における打設中の水中音平均パワースペクトル.....	178
図 6-20	観測点⑤における打設一時停止中の水中音(背景雑音)平均パワースペクトル.....	178
図 6-21	観測点⑤における打設中の水中音平均パワースペクトル.....	179
図 6-22	全観測点における水中音データの周波数特性.....	179
図 6-23	水中スピーカー再生音の音源音圧レベル推定実験の概要.....	180
図 6-24	125 Hz の音の減衰定数 $\alpha$ 推定の様子.....	182
図 6-25	拡散損失のみを考慮した 125 Hz の音の減衰曲線推定の様子.....	183
図 6-26	125 Hz の音の減衰定数 $\alpha$ 推定の様子(横軸対数).....	183
図 6-27	拡散損失のみを考慮した 125 Hz の音の減衰曲線推定の様子(横軸対数).....	183
図 6-28	各観測点における水中音データからの音源音圧レベル推定作業の例( $\alpha = 0.026$ の場合).....	185
図 6-29	減衰定数 $\alpha$ の値の違いによる 12:44 の音源音圧レベル推定結果の差( $\alpha_{\max} = 0.055$ , $\alpha_{\text{ave}} = 0.026$ , $\alpha_{\min} = 0.005$ ).....	185
図 6-30	推定音源音圧レベル(OA 値)の時間変化.....	186
図 6-31	推定音源音圧レベル(OA 値)と打撃エネルギーの時間変化.....	187
図 6-32	打撃エネルギーと推定音源音圧レベル(OA 値)との関係.....	187
図 7-1	実験条件の概要.....	191
図 7-2	暗幕の設置状況(左)と暗幕内の様子(右).....	191
図 7-3	水槽内に設置した水中スピーカー(左)とスピーカーに接続したアンプ(右) ...	192
図 7-4	環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 140 dB re 1 $\mu$ Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性.....	192
図 7-5	環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 120 dB re 1 $\mu$ Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性.....	193
図 7-6	環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 100 dB re 1 $\mu$ Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性.....	193
図 7-7	環境雑音のみの水槽内の水中音の周波数特性.....	193
図 7-8	各水槽における試験期間中の供試魚の摂餌日周リズムの変化.....	196
図 7-9	140 dB re 1 $\mu$ Pa の音を再生した水槽内の供試魚の摂餌量の変化.....	196
図 7-10	実験前後の各水槽の供試魚の体重の変化.....	197



表目次

表 1-1	温室効果ガスの排出状況 [2] .....	3
表 1-2	各種再生可能エネルギーの導入ポテンシャル [4] .....	5
表 3-1	解析対象 5MW 風車の主要目 [38] .....	32
表 3-2	解析対象セミサブ型浮体施設の主要目 [39] .....	33
表 3-3	セミサブ浮体の係留索の主要目 [17] [39] .....	34
表 3-4	原因別にみた衝突回避の失敗確率 [44] .....	44
表 3-5	年間通航船舶 1000 隻・プラットフォーム幅 80 m の場合の衝突回避失敗確率の推定 .....	52
表 3-6	年間通航船舶 500 隻・プラットフォーム幅 100 m の場合の衝突回避失敗確率の推定 .....	52
表 3-7	風向と海潮流向の差と海潮流による外力の抗力係数の関係 .....	63
表 4-1	対象海域を通航する貨物船の階級別存在比率 .....	83
表 4-2	野島崎の船舶通航分布形状に近似させたガンマ分布のパラメータ [46] .....	85
表 4-3	養殖施設の被害額算出に使用するパラメータの設定 .....	89
表 4-4	計算条件が各リスクの計算結果に与える影響 .....	90
表 4-5	船舶通航分布別の操船ミスによる年間衝突確率 $p_{12}$ の分布 .....	97
表 4-6	各海域で船舶が操船ミスによって衝突した場合の風力発電施設の漂流確率 $p_{13,2}(i,j)$ 100	
表 4-7	任意の位置における各シナリオのリスクの大きさに対する計算条件の影響 .....	111
表 4-8	漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流の影響が無視できる N の上限値 $N_{max}$ .	132
表 5-1	洋上ウィンドファーム関連の水中音源に関する利用可能な情報の概要 [63] .....	150
表 6-1	観測した水中音 <b>Over All</b> 値の時間変化 .....	176
表 6-2	各観測点における周波数ごとの水中音圧[dB re 1 $\mu$ Pa] .....	181
表 6-3	各周波数の減衰定数推定結果とその平均値 .....	182
表 6-4	各観測時刻における音源音圧レベルの推定結果 .....	186
表 7-1	実験開始前における各水槽内の供試魚の平均湿重量 .....	194
表 7-2	実験終了後における各水槽内の供試魚の平均湿重量 .....	197



## 1. 序論

### 1.1. 背景

#### 1.1.1. 近年のエネルギー情勢

世界人口の増加や発展途上国の経済発展により、エネルギー資源等の不足が深刻な問題となりつつある。平成 25 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2014） [1]によると、「世界のエネルギー需要量は、2000 年に石油換算で約 98 億トンであったものが、2011 年には 127.1 億トン（2000 年の約 1.3 倍）となり、さらに 2035 年には 169 億トン（2000 年の約 1.7 倍、2011 年の約 1.3 倍）に達すると見込まれて」おり、その増加分の大部分は中国やインドを中心とした新興国である（図 1-1）。一方、現在使用されているエネルギー資源の多くを占める化石燃料は有限の、いわゆる枯渇型の資源であり、エネルギー需要の拡大に伴う資源獲得競争のますますの激化が懸念される。

我が国の一次エネルギー自給率は非常に低く、化石燃料への依存度も高いため、これら資源の供給不安や価格の上昇・乱高下等の影響を大きく受けるという問題がある。この問題の改善のため、「エネルギー自給率を向上する取組を進めてきた結果、第一次石油ショック時の 1973 年に 9.2 %だった自給率は、2010 年には 19.9 %にまで改善」された [1]。しかし、2011 年の東日本大震災を契機に原子力発電所が停止した結果、2012 年には 6.0 %まで低下しており、その内訳は水力 1.5 %、天然ガス 0.7 %、原子力 0.1 %再生可能エネルギー等 3.1 %となっている [1]。化石燃料への依存度も、原子力発電所の停止により 2010 年度の 81.8 %から 2012 年度の 92.2 %に上昇し、第一次石油ショック時の 89.7 %を上回る水準となっている [1]（図 1-2）。

また、化石燃料は枯渇型のエネルギー資源であることに加え、温室効果ガスの排出による地球温暖化の原因となることも問題視されている。温室効果ガスは、「京都議定書の基準年の 1990 年には世界全体のエネルギー起源二酸化炭素排出量は 203 億トン」であったが、「2011 年には 300 億トン（約 1.5 倍）に増加」した [1]。我が国でも、エネルギー起源二酸化炭素の排出量は 2012 年度確定値で基準年度比 14.0 %増加している [2]。一方、「その他の温室効果ガス（非エネルギー起源二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素および代替フロン等 3 ガス）の排出量については、目標達成計画の目安の排出量を下回って」おり、全体では「温室効果ガスの総排出量は、約 13 億 4,300 万トン（二酸化炭素換算。以下同じ。）であり」、「基準年度（原則 1990 年度）比で 6.5%増加している」 [2]（表 1-1）。

「我が国における京都議定書第一約束期間中の 5 カ年平均の総排出量は、12 億 7,800 万トンであり、基準年度比で 1.4%の増加となった。これは、2008 年度後半の金融危機の影響に伴い 2009 年度にかけて総排出量が減少したものの、2010 年度以降、景気回復および東日本大震災を契機とした火力発電の増加により 3 年連続で総排出量が増加したことによる」 [2]。ただし、「総排出量に森林等吸収源および京都メカニズムクレジットを加味すると、5 カ年平均では基準年比 8.4%減となり、京都議定書の目標（基準年比 6%減）を達成することとなる」 [2]（図 1-3）。「2011 年 3 月の東日本大震災および東京電力福島第一原子力発電所事故後の我が国のエネルギーを巡る環境が国内外で大きく変化したにも関わらず、京都議定書第一約

束期間の6%削減目標を達成することができたのは、世界最高水準のエネルギー効率の維持など産業界における温暖化対策の中心的役割を担う自主行動計画が十分に高い成果を上げてきたこと、トップランナー基準に基づく機器の効率向上等の省エネ対策に不断に取り組んできたこと、代替フロン等3ガスの排出抑制や森林吸収源対策を着実に実施してきたこと等、国民各界各層が気候変動への取組に最大限の努力を行ったことによるものである。」 [2]

エネルギー白書 2014 によると、「我が国は 1973 年度の第一次石油ショック以降、自動車の燃費向上、家電の省エネルギー性能の向上、産業部門におけるエネルギー効率の向上など様々な省エネルギーの取組を進めた」ことにより、GDP 当たりの最終エネルギー消費量は 2012 年度に 0.72 百万 kJ/ 兆円に改善 (1973 年度から約 46%減少) し、「この結果、世界最高水準のエネルギー利用効率を実現して」いる [1]。

とはいえ、我が国のエネルギー自給率の低さ、化石燃料への依存度の高さは改善すべき問題であり、京都議定書第一約束期間の削減目標は達成できたものの、温室効果ガスの排出量が増加していることは事実である。このような問題を受け、化石燃料のような枯渇型のエネルギー資源から、自然エネルギーのような再生可能なエネルギーへの転換が迫られている。

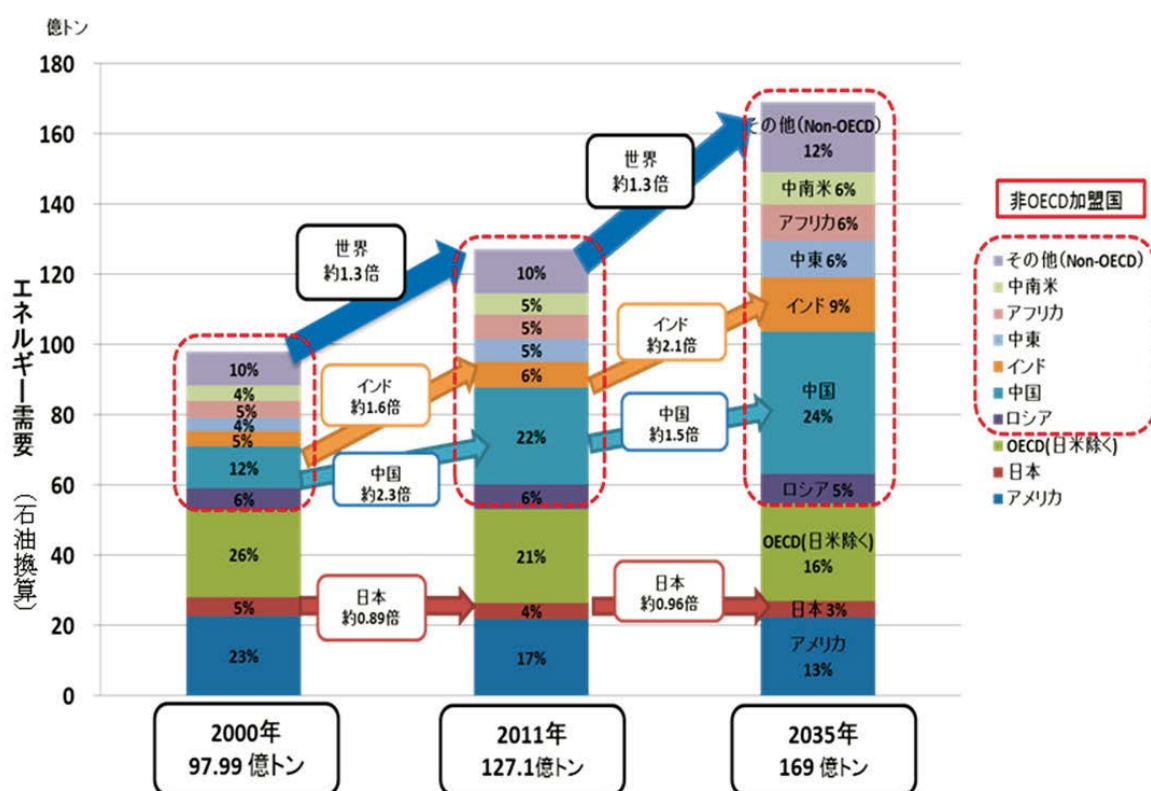


図 1-1 世界のエネルギー需要の実績と予測 [1]

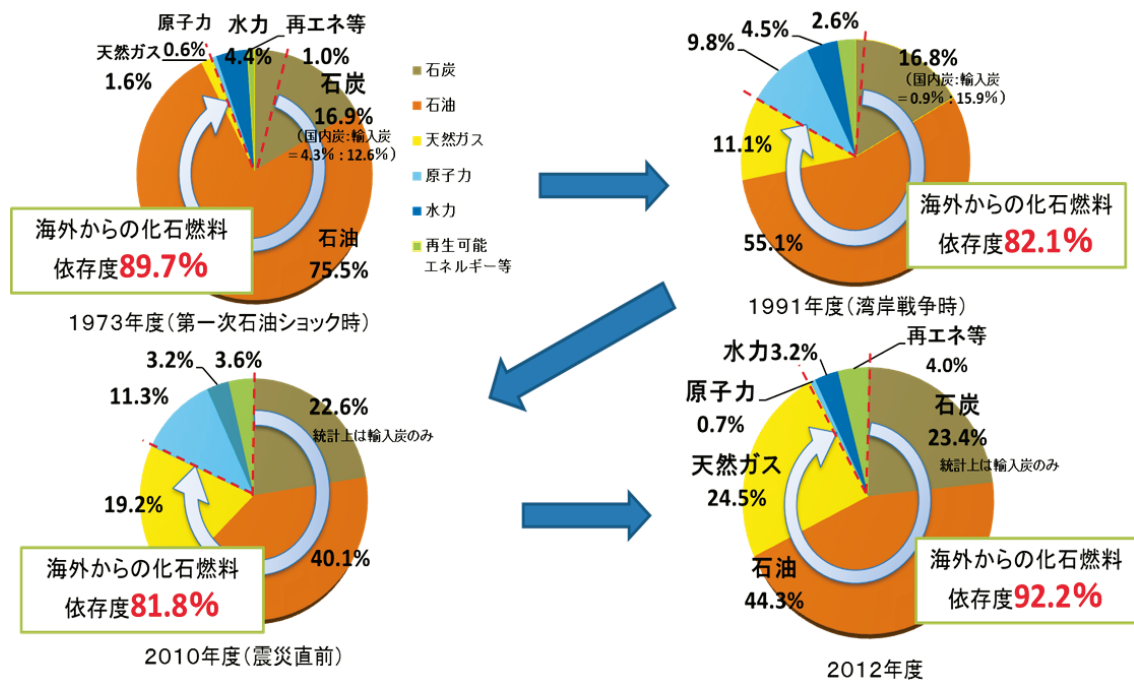
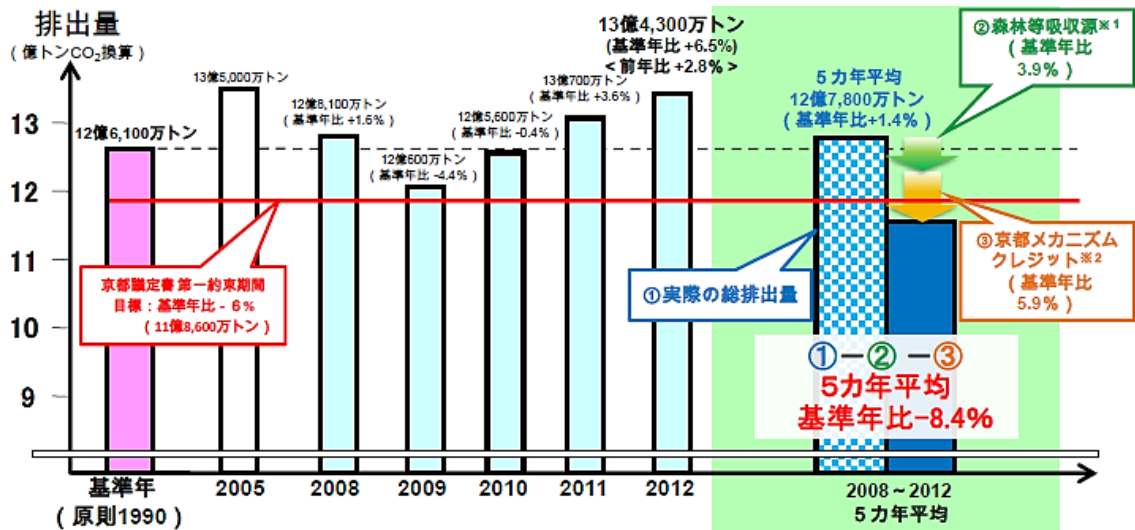


図 1-2 日本の一次エネルギー供給構造の推移 [1]

表 1-1 温室効果ガスの排出状況 [2]

(単位：百万トン)

	基準年 (括弧内は全体 に占める割合)	2012 年度実績 (確定値) (括弧内は基準 年増減)	2010 年度の目安 (括弧内は基準年増減)
エネルギー起源 二酸化炭素	1,059 (84%)	1,208 (+14.0%)	1,076~1,089 (+1.6%~+2.8%)
産業部門	482 (38%)	418 (-13.4%)	424~428 (-12.1%~-11.3%)
業務その他部門	164 (13%)	272 (+65.8%)	208~210 (+26.5%~+27.9%)
家庭部門	127 (10%)	203 (+59.7%)	138~141 (+8.5~+10.9%)
運輸部門	217 (17%)	226 (+4.1%)	240~243 (+10.3%~+11.9%)
エネルギー転換部門	67.9 (5%)	87.8 (+29.4%)	66 (-2.3%)
非エネルギー起源 二酸化炭素	85.1 (7%)	68.1 (-20.0%)	85 (-0.6%)
メタン	33.4 (3%)	20.0 (-40.1%)	23 (-32.3%)
一酸化二窒素	32.6 (3%)	20.2 (-38.0%)	25 (-24.2%~-24.0%)
代替フロン等 3 ガス	51.2 (4%)	27.3 (-46.7%)	31 (-39.5%)
合計	1,261 (100%)	1,343 (+6.5%)	1,239~1,252 (-1.8%~-0.8%)



※1 森林等吸収源: 目標達成に向けて算入可能な森林等吸収源(森林吸収源対策及び都市緑化等)による吸収量。森林吸収源対策による吸収量については、5カ年の森林吸収量が我が国に設定されている算入上限値(5カ年で2億3,830万トン)を上回ったため、算入上限値の年平均値。  
 ※2 京都メカニズムクレジット: 政府取得 平成25年度末時点での京都メカニズムクレジット取得事業によるクレジットの総取得量(9,749.3万トン) 民間取得 電気事業連合会のクレジット量(「電気事業における環境行動計画(2013年度版)」より)  
 ※3 最終的な排出量・吸収量は、2014年度に実施される国連気候変動枠組条約及び京都議定書下での審査の結果を踏まえ確定する。また、京都メカニズムクレジットも、第一約束期間の調整期間終了後に確定する(2015年後半以降の見通し)。

図 1-3 我が国の温室効果ガス排出量の推移 [2]

### 1.1.2. 再生可能エネルギー

前項において説明した背景による再生可能エネルギーへの関心の高まりに伴い、様々な新エネルギーの研究開発が進められている。資源エネルギー庁によると「再生可能エネルギーとは、法律(※)で『エネルギー源として持続的に利用することができるものと認められるもの』として、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存する熱、バイオマスが規定されて」おり、「再生可能エネルギーは、資源が枯渇せず繰り返し使え、発電時や熱利用時に地球温暖化の原因となる二酸化炭素をほとんど排出しない優れたエネルギー」である [3]。「(※) エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用および化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」 [3]。

再生可能エネルギーおよび新エネルギーの定義は図 1-4 に示すように、非化石エネルギーのうち、原子力などを除くものが再生可能エネルギーであり、そのうち、「経済性の面における制約から普及が十分でないものであって、その促進を図ることが非化石エネルギーの導入を図るため特に必要なもの」と定義されている [3]。表 1-2 は我が国の再生可能エネルギー導入ポテンシャルの試算結果 [4]であり、東京電力の 25 カ所の火力発電所の合計設備容量、約 3,869 万 kW (2011 年 3 月末現在) [5]と比較しても、大きなポテンシャルを有していることが分かる。

しかし、再生可能エネルギーの導入には多くの課題が残されている。例えば、設備コストが高い上、自然状況に左右されるなどの理由から設備利用率が低い等の理由で火力発電等の既存のエネルギーと比較すると発電コストが高い [3]。また、自然状況に左右されるため出力が不安定であり、地形等の条件から設置できる地点も限られている [3]。さらに、「再生可能エネルギーが大量に導入された場合、休日など需要の少ない時期に余剰電力が発生したり、天候などの影響で出力が大きく変動し電気の安定供給に問題が生じる可能性」があるため、

「発電出力の抑制や蓄電池の設置等の対策が必要」になる [3]。

このような課題の克服に向けて様々な研究開発が行われるとともに、コスト面での支援として国による施策が行われている。例えば「2009年11月に家庭や事業所等において太陽光で発電された電気のうち、使い切れずに余った電気の買取りを電力会社に義務づける『太陽光発電の余剰電力買取制度』が開始」された。また、2012年7月からは、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）が導入された。FITの導入により、コスト面での課題が緩和され、企業の参入が増加している。

FITの開始以降1年間（2012年7月～2013年6月）で、再生可能エネルギーの設備容量は約15%増（約3.6GW増：うち太陽光発電が3.4GW）となったが、制度認定を受けたもののうち約20GWがまだ未設置であるため、今後これらが順次導入されてくると予想されている [6]。しかし、その9割以上が太陽光発電であり、その他の再生可能エネルギーの導入にはまだまだ課題が多く残っていると考えられる。

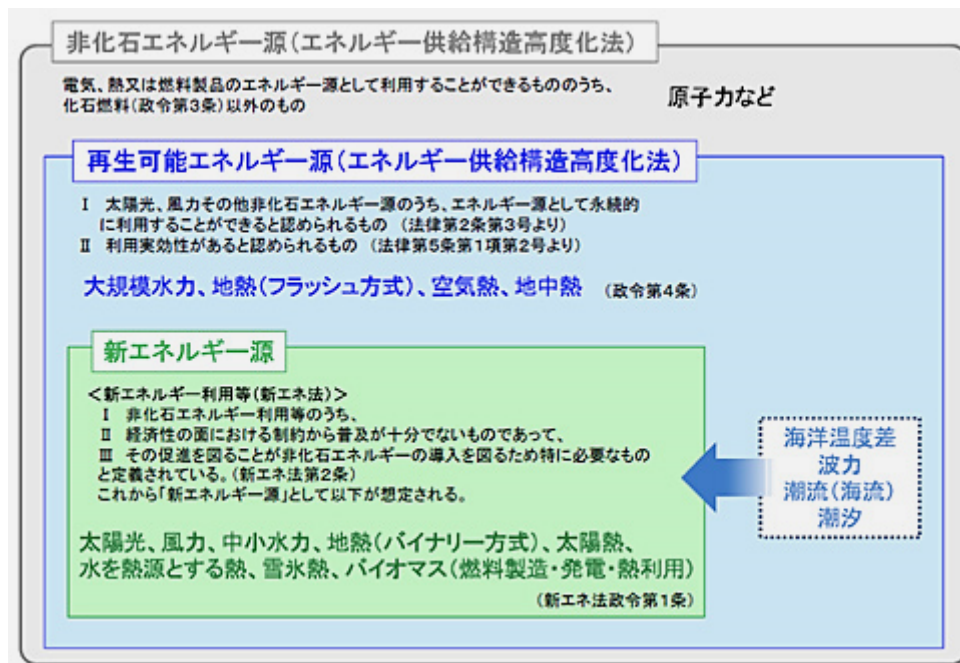


図 1-4 エネルギーの概念図 [3]

表 1-2 各種再生可能エネルギーの導入ポテンシャル [4]

	導入ポテンシャル (設備容量[万 kW])
太陽光発電 (非住宅系)	14,929
風力発電 (陸上+洋上)	185,556
風力発電 (陸上)	28,294
風力発電 (洋上)	157,262
中小水力発電	1,444
地熱発電	1,420



### 1.1.3. 風力発電

再生可能エネルギーの中でも、風力発電の導入ポテンシャルは大きく（表 1-2）、その導入への期待が高まっている。世界的にも風力発電の導入量は年々増加しており、2013年には世界全体での設備容量が30万MWを超えた [7]（図 1-5）。我が国においても同様に増加しているが、近年は新規導入量がやや減少し、ほぼ横ばい状態となっている [8]（図 1-6）。この原因として、適地の不足と事業化までの手続きの長期化が考えられる。我が国は国土面積が小さく、山岳部のような急峻な地形が多いことに加え、住宅地に近い場所では騒音や景観の問題等の懸念もあることから、陸上の適地が少ないという問題がある。近年は洋上風力発電の建設も増えているが、技術面、コスト面での課題に加え、漁業関係者等との利害関係の調整に多くの時間を要する場合が多い。さらに、2012年10月からは風力発電事業が環境影響評価法の対象になり、アセスメント手続きの複雑さにより、計画から事業化までに長い期間がかかるようになった。これがFITの開始後にも関わらず風力発電の設備容量の新規導入量が伸び悩んでいる原因とも考えられる。

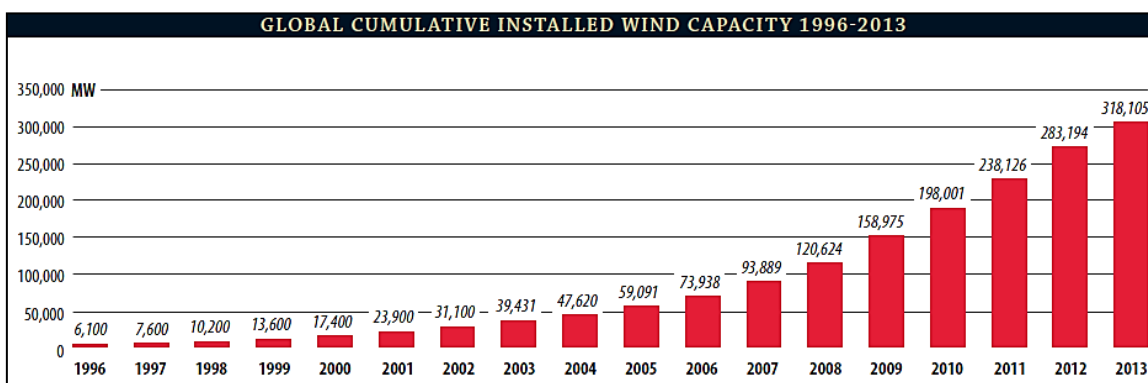


図 1-5 世界の風力発電総設備容量の推移 [7]

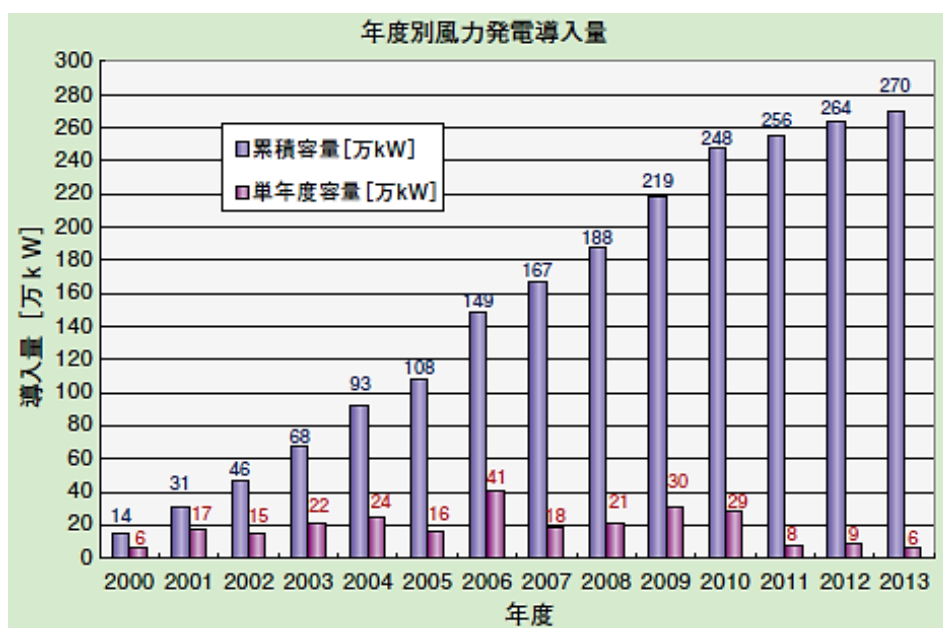


図 1-6 日本の風力発電総設備容量の推移（JWPA 調べ、2013 年度は推定） [8]



近年の風力発電事業は、発電・送電効率等の理由から、大型化・大規模化の傾向が強く、定格出力 2 MW 等の大型風車を複数基建設し、ファーム化する事業が多くなっている。

また、上述のように洋上風力発電事業も増えており、国内でも洋上に大型の風力発電施設が建設されている箇所が多く見受けられるようになってきた。しかし、洋上風力発電事業が活発なヨーロッパ諸国では遠浅海岸が多いのに対し、日本周辺海域は沿岸部から離れるとすぐに深度が増す場所が多く、ヨーロッパ諸国と同じように開発を行うことが難しい。ヨーロッパ諸国では着床式の基礎を用いた洋上風力発電施設を大規模展開し、多くのウィンドファームが建設されているが（図 1-7）、その基礎の適用条件は、種類にもよるが、水深 30 m 未満や 60 m 未満といった浅い海域でしか使用できない（図 1-8）。現在、商業的に実用化されている洋上風力発電施設は、国内外を問わず、全てこの着床式の施設である。

そこで我が国では水深の大きな海域でも建設が可能な、浮体式基礎を用いた洋上風力発電施設の実用化に向けた研究開発が活発に行われている。洋上風力発電は、沿岸部にフィヨルド地形が多く比較的水深の大きいノルウェーにおいて、2009 年に Statoil 社によって世界で初めての実証実験が行われた [9]。このときの実験機 Hywind（図 1-9）は定格出力 2.3 MW の風車（以下、2.3 MW 風車と記載、出力が異なる場合も同様。）をスパー型の浮体に搭載し、3 本の係留索で海底と固定したものであった [9]。

日本では京都大学を中心に、2.0 MW 風車搭載のスパー型浮体式洋上風力発電の 10 分の 1 模型を用いた実海域実験が行われ、これが日本で初めての浮体式洋上風力発電の実海域実験であった [10]。その後、環境省は 2010 年度から長崎県五島市枕島沖において浮体式洋上風力発電実証事業を開始し、2011 年度の 2 分の 1 サイズの小規模試験機による実海域実験を経て、2012 年度からはフルスケールの実証機（2.0 MW 風車搭載のハイブリッドスパー型浮体式洋上風力発電施設）を使った実海域実験を実施中である [11] [12]。また、経済産業省資源エネルギー庁でも 2012 年度から福島県沖において、浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業を開始し、「第 1 期実証研究事業として 2MW ダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備 1 基、浮体式洋上サブステーション、第 2 期として、7MW 浮体式洋上風力発電設備 2 基を 2015 年までに福島沖に増設」 [13]する予定である。この浮体式洋上サブステーションには世界初の浮体式洋上変電設備が設置されている [14]。

このように我が国では、浮体式洋上風力発電の実用化に向けて、これらの実証研究等を通して情報や知見を集積しているところである。

#### 1.1.4. 洋上風力発電の安全性と環境影響

上述のように洋上風力発電に関する研究開発や実証実験等が活発に進められているが、実績の少ない施設のため、安全性や環境影響に関する情報も不十分である。次節以降、海外での知見も含めたこれらの既往基準や先行研究について紹介する。

#### 1.2. 洋上風力発電の安全性に関する既往基準および先行研究

従来、洋上風力発電施設の安全性というと、施設自身の健全性の担保を指すのが一般的である。既存の安全基準として、IEC や DNV, ABS 等に発行された洋上風力発電施設に関す

る基準が存在し、その中で DNV は浮体式洋上風力発電に関する基準も発行している [15]。

一方、我が国でも国土交通省海事局により、平成 24 年 4 月 23 日に浮体式洋上風力発電施設技術基準が制定されており、これは「浮体式洋上風力発電施設の安全確保を図るべく、船舶安全法に基づき構造や設備の要件を定めた」 [16]ものである。さらにその後、平成 26 年 3 月に発行された浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドラインは、この技術基準において規定された性能要件を満たすための設計方法について、「実設計者が実務的に適用できる技術的解決策を体系的に提供するものである」 [17]。

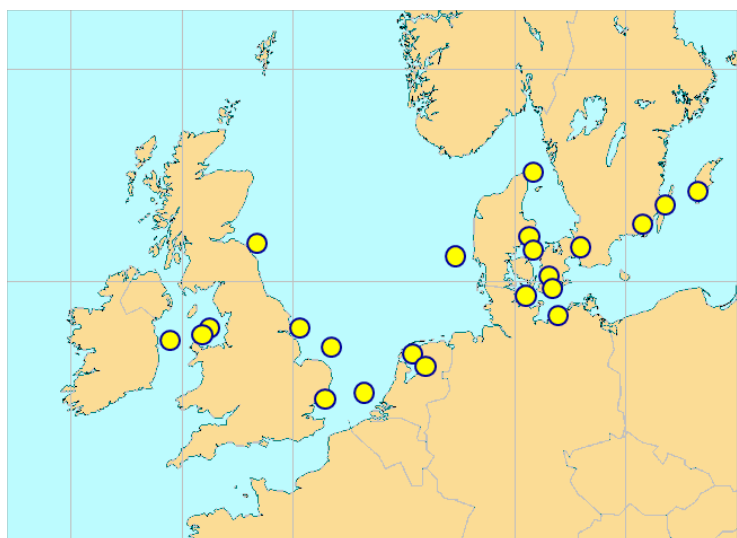


図 1-7 ヨーロッパの主な洋上windファーム (Offshore Wind Energy Europe HP より)

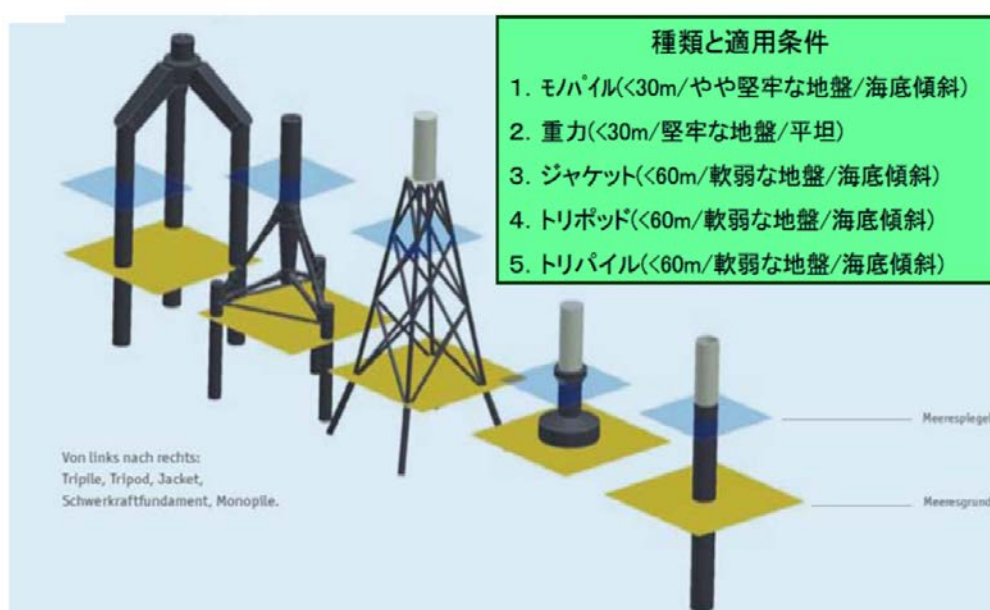


図 1-8 着床式洋上風力発電施設の基礎形式と適用条件 (NEDO 平成 20 年度 洋上風力発電実証研究 F/S 調査より)



図 1-9 ノルウェーの Statoil 社による世界初の浮体式洋上風力発電実証実験機 Hywind[18]

この技術基準および安全ガイドラインでは、施設単体の安全性の確保の観点から技術的検討がされており、疲労や腐食を含む浮体構造や係留索の強度や、損傷時および非損傷時の復原性についての検討が主である。浮体式洋上風力発電施設は風車基礎部分が浮体であるという特徴から、着床式の施設にはない浮体式特有のリスクとして、施設の転覆・沈没・漂流が考えられており、これらの事故を起こさないための技術基準とも言える。しかし、基準に則って設計・建造された施設でも、施設の転覆・沈没・漂流が“絶対に”起こらないとは言い切れない。確率が非常に低いと思われる事象でも、万が一発生した際にそれによる被害を最小化するための備えが必要である。海上技術安全研究所および東京大学は、平成 25 年 3 月に浮体式洋上風力発電施設非常時マニュアル案を発行しており、その中で、施設の転覆・沈没・漂流およびこれらにつながる可能性のある事象について、これらの発生によって想定される被害とその最小化対策の検討を行っている [19]。

このような“非常時”の検討はそれ以前にもされており、特に施設の漂流については多くの先行研究が存在する。近年のヨーロッパでの洋上風力発電の大規模化、すなわちファーム化の傾向を受けて、我が国周辺でも洋上風力発電施設を大規模展開しようとする動きが強まっている。着床式の施設については既に複数基が我が国沿岸部に立ち並ぶ光景も見られ、浮体式についても近い将来ファーム化が実現すると考えられている。浮体式の施設をファーム化した場合に懸念されているのが、ファーム内の 1 基の施設が何らかの原因で漂流を始めた場合に、ファーム内の他の施設への衝突によって連鎖的に複数基が漂流するのではないか、という連鎖衝突・漂流の問題である。ここでは、この連鎖衝突・漂流に関する先行研究を紹介する。

鈴木らは「ウィンドファームにおける浮体式風車の連鎖漂流リスクに関する研究」において、浮体式洋上風力発電の連鎖漂流事故のリスクシナリオを検討し、そのリスクを定量評価している [20]。この研究では、ウィンドファームにおける連鎖漂流のシミュレーターを開発し、供用期間の 20 年間で合計何基の施設が漂流するかを、係留索の安全率やファーム内の施設の配置を変えて検証している。ただし、初期漂流（ファーム内の最初の施設漂流）の発生確率は過去の事故を参考に、風速を指標として推測して設定している。なお、シミュレーターの開発にあたり、変動風水洞において単基の施設漂流試験および複数基の施設衝突試験を実施し、前者については計算結果との比較・検証を、後者については漂流施設の係留索への引っ掛かり方について実験結果の取り込みを行っている。

開発されたシミュレーターにより、3 種類のファーム内施設配置について計算した結果、施設の設置密度が高いほど連鎖漂流に巻き込まれる施設の数も大きくなることが分かったが、一方、海底ケーブルの費用は設置密度が高いほど少額に抑えられるため、最適な施設の配置は、連鎖漂流事故による損失とケーブル費用とのトレードオフで決まることが分かった。また、係留索の安全率が高いほど 20 年間で連鎖漂流被害を受ける施設の数も減少し、100 基の施設からなるウィンドファームの場合、安全率が 3 であれば十分安全であると結論付けている。

続いて北原は、「係留系強度モデルを用いたウィ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」において、上述の鈴木らの研究 [20]において不十分であった時系列変動風・不規則波を導入して改良した Spar 型風車漂流シミュレーターと、係留系の強度低下・ばらつきも考慮した係留系強度モデルを開発し、それらを用いてより詳細なリスクを算出し、その計算結果について評価を行っている [21]。漂流シミュレーターは鈴木らのモデルを時系列変動風・不規則波を考慮して計算できるように改良し、初期漂流確率もこれを利用して求めている。係留系強度モデルは、船舶の係留チェーンの使用年数と摩耗のデータを利用して二重指数分布関数を用いて作成された。また、重力式アンカーの強度について実験を行い、静止摩擦力と係留索の設計強度の比較を行った結果、係留索が切れずにアンカーが引きずられて風力発電施設が漂流するという事象の発生確率は非常に小さいことを確認し、施設漂流は係留索の破断によってのみ発生することとしている。

上記モデルを用いてシミュレーションを行い、供用期間 20 年の間に連鎖漂流事故に巻き込まれる施設の基数を、安全率 1.5～3.0 のそれぞれの条件について求めている。また、供用期間の半分である 10 年で全ての係留索を交換した場合についても同様に計算し、さらに、摩耗速度を 1.5 倍に設定した場合に上記の計算結果がどう変化するかについても検証している。これらの結果と経済性および社会受容性の評価結果を踏まえて、係留索の交換は行わず、安全率は 2.5 弱とするのが最適だが、摩耗速度を 1.5 倍と想定した場合には 10 年で係留索を交換し、安全率は 2.0 強とするのが最適であると結論付けている。

さらに村竹は、「浮体式洋上ウィンドファーム内での船舶衝突を考慮した風車漂流リスク評価」において、上記 2 件の研究では考慮されていなかった、船舶の衝突による施設の漂流を発端とした連鎖漂流シミュレーションモデルを作成し、この連鎖漂流リスクを評価している [22]。この研究では、漂流施設と被衝突施設の浮体同士が衝突する場合と、漂流施設の浮体

が被衝突施設の係留索に衝突する場合、および、両施設の係留索同士が衝突する場合の3種類の衝突シナリオを考え、係留索破断実験を実施し、この結果をシミュレーターに組み込んでいる。この実験結果より、係留索同士の衝突では被衝突施設の係留索は破断せず、漂流施設の浮体部と被衝突施設の係留索の衝突、または両施設の浮体同士の衝突の場合には、被衝突施設の係留索は必ず破断することが分かっている。以上により作成されたモデルを利用し、シミュレーションによる計算結果から求めた事故損害額とライフサイクルコストを比較し、係留索の安全率が2.0以上の場合には、安全率を上げて事故損害額を減らすより、安全率を下げてライフサイクルコストを減らす方が、全体として経済性が高いことが分かったと結論付けている。

ここまで、洋上風力発電の安全性に関する既往基準や、浮体式洋上風力発電の連鎖漂流・衝突に関する先行研究を3例紹介した。しかし浮体式洋上風力発電施設を設置する際に検討すべき安全性には、技術基準で考えられているような施設単体の安全性や、鈴木らの先行研究のファーム内の安全性のような、施設自身の安全性のみでなく、周辺航路や沿岸施設との位置関係を考慮に入れた、施設自身と周辺被害までを考えた安全性の検討を行う必要がある。たとえば周辺航路との位置関係によって航行船舶が風力発電施設に衝突する危険性が変化し、施設自身の安全性に関するリスクが変化する可能性がある。さらに、船舶の衝突による影響は風力発電施設へのダメージに留まらず、施設が漂流してファーム内の施設に衝突し、連鎖漂流を発生させるほか、漂流施設がファーム外に周辺被害を生む可能性もある。周辺被害として考えられる主なものは、航路への侵入によって船舶の航行に支障が生じることや船舶との衝突のほか、沿岸部の漁業施設等への衝突が挙げられる。これらは浮体式の施設に特有の問題であり、今後の浮体式洋上風力発電施設の実用化に向けてこれらの安全性に関するリスクの検討をしておくことは、周辺住民等の利害関係者との調整の観点からも重要な課題である。

### 1.3. 洋上風力発電の環境影響に関する既往基準および先行研究

風力発電の環境影響と言えば、陸上における低周波騒音やシャドーフリッカー、バードストライクやその他の動植物等の生態系への影響等が問題とされてきた(例えば [23][24][25])。洋上では、これら陸上の生態系への影響はなく、騒音やシャドーフリッカーについても陸から離れることで近隣住民への被害は軽減されると考えられるが、一方で、海産哺乳類や魚類等の海洋生態系に何らかの影響があるのではないかと懸念されている。具体的には、洋上施設に特有の問題として水中騒音や海底ケーブルからの電磁波による生態系への影響のほか、陸上と同様、バードストライクや景観の問題も考えられる。以下に、洋上風力発電の環境影響に関する国内外の既往基準や先行研究についての調査結果をまとめる。

#### 1.3.1. 日本の風力発電の環境影響に関する規制等

我が国では風力発電は、これまで一部の地方自治体が定める条例による環境影響評価の対象となっていたほか、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が策定したマニュアルによる自主的な環境影響評価が行われて来たが、第1.1.3項でも述べたように2012年10

月からは環境影響評価法の対象事業に追加され、総設備容量が1万kW以上の事業が環境影響評価法の対象となった。法による環境影響評価の対象項目は、①騒音、低周波音、②景観、③動物、植物および生態系、④シャドーフリッカーの4項目である。それぞれについて、調査手法、予測・評価手法、環境保全措置・事後調査を定めている。NEDOのマニュアルではこれらに加え、電波障害や地形および地質等の項目も対象としている。

しかし、これらの評価項目は主に陸上の風力発電施設を想定して定められており、洋上施設に関する特段の考慮はされていない。環境省の「風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書」においても、「我が国での事例は、まだ陸から非常に近い防波堤や護岸付近に建設されたものに限られており、沖合に設置した場合の環境影響についての知見は少ない状況にあることから、洋上風力発電事業の評価項目を選定するに当たっては、諸外国の事例や今後の知見の蓄積等も活用しつつ、方法書段階において、適切な絞り込みや重点化を検討すべきである。」と記述があり [26]、洋上施設に関する評価項目についての検討は今後の課題となっている。洋上施設についての評価項目として追加の必要性が考えられるものとしては、建設時の海水の濁り、水中騒音、施設の存在による影の出現や流れの変化、浮体への動植物の付着等が挙げられる。このうち、施設からの水中放射音の影響としては、魚類等の忌避やストレスによる成長への影響、臓器の損傷、海産哺乳類同士の情報伝達の妨害等が考えられる。

### 1.3.2. 諸外国の風力発電の環境影響に関する規制等

欧米諸国では、我が国に先行して風力発電が環境影響評価法の対象になっていた。例えば景観については、「風力発電所に係る環境影響評価手法についてのガイドライン等が策定されている国・地域のうち、米国、フランス、英国スコットランドおよびEUでは、景観に関する基本的な調査、予測および評価の手法として、景観の変化をフォトモンタージュ等により示すこととされている。また、米国、英国スコットランドおよびEUでは、風力発電設備の可視領域も示すこととされている」 [27]。また、騒音については、「国レベルにおける風力発電施設からの騒音に関する基準等については、ドイツ、デンマークなどでは我が国の環境基準のように騒音の基準値を定めており、フランス、ニュージーランドなどでは暗騒音レベルに一定のレベル値を加えたものを基準値として定めている。このほか、英国、オーストラリアの南オーストラリア州、カナダのオンタリオ州、ノルウェー、米国の一部の地方自治体における基準値等がある」 [28]。洋上風力発電についても、米国やフランスのように陸上風力発電と同じ規模要件を定めて環境影響評価の対象としているケースがほとんどだが、英国やオランダのように洋上風力発電に独自の規模要件を別途定めているケースもある [29]。

環境省によると、「洋上風力発電事業に係る環境影響評価に関する諸外国のガイドライン等を調べたところ、3か国(フランス、ドイツ、英国)において詳細な手法が示されていた」 [29]。このうちフランスのガイドラインでは、洋上風力発電事業の主な環境影響とそれに対する環境保全措置として、水質や海底地形・海流の変化、生態系・動物への影響や景観に対する影響と対策をまとめており、例えば水中騒音による動物への影響については、工事の制限やバブルカーテン等による騒音防止等の対策を示している [29]。

### 1.3.3. インタビュー調査

筆者は2013年2月に European Wind Energy Association (EWEA) の研究者へのインタビュー調査を行い、バードストライクや水中騒音を中心にお話を伺った。バードストライクについては、鳥類の死亡原因のうち、風力発電施設への衝突が占める割合は小さいことや、近年は施設の大型化によってハブ高さが高く、ロータ回転数の小さいものが多いため、バードストライクのリスクも減少していること、多くの鳥類は避行行動を取り、そのエネルギーロスは問題にならないと考えられていることなど、EWEA メンバー内のみで公開されている報告書をご紹介頂いた。ただし、確率的に低くても、脆弱性の高い種や絶滅危惧種等にとっては脅威となることなどから、全く無視して良いものではなく、鳥類の飛行高度や経路についての観測調査やモデリングによる推定手法も進んでいるが、これらは未だ不完全であり、更なる発展が望まれるとのことであった。

また、水中騒音については、ヨーロッパ諸国では、運転音は無視できるレベルであるとの説が一般的であり、主に着床式の基礎打設工事中の騒音が問題視されている。実際には基礎打設中の海棲生物の負傷等は報告されておらず、海棲哺乳類が騒音発生エリアを避けて移動したという確証もないとしているが、建設中の水中騒音の緩和策として、“soft start”と発生騒音レベルの低減、騒音の伝搬抑制のいくつかの手法が提案されており、中でも“bubble curtains”が低コストで効果も高いことが示されている。なお、ヨーロッパの一部の国や特定のウィンドファームでは、魚類の産卵期に考慮して打設作業およびケーブル敷設作業の時期について規制を設けたり、打設時の騒音レベルについての基準値を設けているところもある（現状ではこのような規制はドイツのみ）。ただし、騒音の測定基準や解析のガイドライン、騒音低減手法の開発および、生物に対する影響の調査は今後も更なる発展が望まれるとのことであった。

### 1.3.4. 風力発電の環境影響に関する先行研究

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)は、洋上風力発電の開発による環境影響の検証用のツールを開発した [30]。これは Cape Green Offshore Wind Project という仮想のプロジェクトを対象に、環境影響に関する情報のデータベース Zephyrus と、このデータを用いたリスク解析ツールをまとめたシステム Environmental Risk Evaluation System (ERES), および解析結果の要約や可視化のための Visualization Tools から構成されている。Zephyrus には、海域や季節による風資源の評価、海産哺乳類等の生物資源の分布、他の海洋利用との競合など、洋上風力発電の開発の環境影響に関する様々なデータが収蔵されている。ここでは、環境影響を与える Stressor と環境影響を受ける Receptor についてそれぞれカテゴリーに分類しており、ERES はこれらの Stressor と Receptor の間に起こる様々なリスクシナリオに関連する影響とリスクの解析ツールを保有している。Stressor の中には「海洋生物の妨害になる機器の音の発生」、「杭打ちによる騒音・振動」等が含まれている。また、Zephyrus は研究者、開発者、規制者、利害関係者間のコミュニケーションツールとしても活用される。

このようなデータベースやツールにはありとあらゆる環境影響に関する情報が含まれてい

と思われるが、環境影響にも様々なものが考えられ、これらを全てここでレビューするのは困難である。そこで本研究では、洋上風力発電に特有の環境影響として特に注目度の高い水中騒音について調査を行うこととする。この調査結果については、第5章において詳細に述べる。

### 1.3.5. その他の海洋再生可能エネルギー施設に関する環境影響

PNNL では、海洋エネルギー施設の騒音についても調査を行っており、メイン州の Monhegan 島を例に、洋上風車からの騒音と風速の関係や、その拡散の様子をシミュレーションによって予測し、島の住民への影響を評価した例 [31]や、潮流発電施設からの騒音が魚類に与える影響について実験調査をした例 [32] [33]などがある。後者については、European Marine Energy Center (EMEC)で試験されている OpenHydro という潮流発電機からの放射音をサンプルとして用いて、主に魚類の圧力障害について実験を行っている。ここでは、2種類の魚類にそれぞれ電極等の計測装置を設置して固定し、水槽内を泳ぎ回ることができない状態で実験を行った。この結果、魚類の聴覚閾値の変化や組織への損傷等、音の影響はないとは言えないが、回復可能なレベルであったと報告している [32] [33]。

本節では、洋上風量発電施設およびその他の海洋再生可能エネルギー施設の環境影響に関する規則・基準や先行調査・研究についてのレビュー結果を紹介した。第1.3.4項でも述べたように、環境影響には様々なものが考えられ、全てを網羅的にレビューするのは困難であるため、本研究では洋上風力発電施設に特有の環境影響であり、特に漁業関係者等の注目度が高いと考えられる「水中騒音」について、第5章において詳細にレビューすることとする。

## 1.4. 本研究の目的

上述の通り、現在、商業的に実用化されている洋上風力発電施設は、国内外を問わず、全て着床式の施設である。これらの設置位置を決定するに当たって考慮されて来たのは、主に採算性に関係する気海象、水深、離岸距離等であり、また、漁業関係者等との利害関係も重視されてきた。

浮体式の施設については我が国において、実用化を目指して実海域における実証実験の段階にある。浮体式施設の設置位置の検討においても、着床式と同様、採算性や利害関係者との調整が重視されると考えられるが、浮体式施設には、着床式にはない「漂流」のリスクが内包される。施設の漂流リスクを考慮する場合、周辺航路や沿岸施設等との位置関係による安全性の評価も必要となる。また、環境影響の評価結果も施設の設置位置に影響する可能性があり、これらの適切な評価が必要であるが、これらの明確な評価手法がないのが現状である。

既存の安全基準等は風力発電施設単基について、施設そのものの安全に関する内容が主であった。また、ファーム化を念頭に置いた先行研究についても、ファーム内の施設被害は考慮しているものの、周辺被害までを考慮したものではない。環境影響についても、国内外で基準が策定されているものの、全ての項目について影響が明確に証明されている訳ではなく、



また、その影響評価手法も確立している訳ではない。特に海外では海産哺乳類への影響が重視されており、魚類への影響に関する調査例が少ない上に、生物への慢性影響を調査した例はほとんどない（詳細は第5章参照）。

そこで、本研究では、浮体式洋上風力発電施設の設置位置の選定方法に関わる、次の2つの評価手法の検討を行う。1つ目は、周辺航路や沿岸施設との位置関係を考慮した、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの空間分布の評価手法である。従来の安全性評価では、これらの位置関係によるリスクの変化は考慮されていない。2つ目は、施設運用時の水中放射音を想定した、水中音の魚類に対する慢性影響の評価手法であり、これには、施設周辺での水中音観測結果を参考にする。従来の環境影響評価においては、水中音の魚類への慢性影響は考慮されていない。なお、本研究では単基の施設を想定してこれらの評価方法を検討するが、ここで得られた知見は、ファーム化された場合の評価にも発展可能なものと考ええる。

まず、安全性については、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスク分析によりリスクシナリオを作成し、その中から航路や沿岸施設との位置関係に着目して重要なシナリオを絞り込む。次に、これらのシナリオを構成するリスクについて、施設の設置位置によるリスクの変化を定量的に評価する方法を検討し、太平洋側の日本沿岸部を想定した仮想海域における計算例を通して、この評価方法によって施設設置位置を検討する上で重要な項目を整理する。さらに、整理した結果を考慮して、浮体式洋上風力発電施設の設置位置選定に関する方針を提案する。

一方、環境影響については洋上風力発電に特有の問題として、水中音による海棲生物への影響に着目し、これに関する文献調査を詳細に行うとともに、洋上風力発電施設周辺での水中音観測と水槽実験による魚類への慢性影響の調査を行う。水中音観測は、国内の着床式洋上風力発電施設の建設時または供用時において施設周辺で水中音を観測し、そのデータ解析によって施設からの水中放射音の音圧や周波数特性を把握する。生物影響の調査については、先行研究では考慮されていなかった魚類への慢性影響の評価を目的とし、ストレスによる成長への影響に着目して、摂餌量の観点から定量的に評価する。これらの調査を通して、洋上風力発電施設からの水中放射音の実態を把握するとともに、その生物影響の評価方法を検討し、得られた知見を整理することで、洋上風力発電施設の環境影響評価手法の検討の一助となることを目的とする。

## 1.5. 研究の流れ

まず、第2章において浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクのうち、浮体式施設に特有のリスクを重大リスクとして抽出し、リスク分析を行うことで、その原因と結果を推定する。これらの推定結果を基にリスクシナリオを作成し、それらの中から、航路や沿岸施設との関連において重要なシナリオを抽出する。第3章では、第2章で抽出された重要シナリオを構成するリスクの、施設の設置位置によるリスクの変化の定量評価方法を検討し、第4章において仮想海域における計算例を示す。また、この計算結果の考察から、周辺海域への影響を含む安全性に関するリスクを考慮した、浮体式洋上風力発電施設の設置位置選定

方法において重要な項目を整理するとともに、これを踏まえた浮体式洋上風力発電施設の設置位置選定方法に関する方針を提案する。

続いて第5章では、第1章において簡単に紹介した洋上風力発電施設の環境影響に関する先行研究・調査事例について、より詳細にレビューを行い、洋上風力発電施設からの水中音および、水中音の生物影響に関する知見を整理する。第6章では国内の洋上風力発電施設からの水中放射音の観測結果を示し、第5章のレビュー結果と比較・考察を行う。さらに第7章では、第5章のレビュー結果から先行研究に不足していると思われる、水中音の魚類に対する慢性影響に着目し、マダイ稚魚を対象に実験を行った結果を示す。また、実験結果の考察を通して、洋上風力発電施設からの水中放射音が魚類に与える影響の評価手法の1つとして提案する。

最後に第8章において本研究で得られた知見を整理し、安全性、環境影響の両側面から考えた、浮体式洋上風力発電施設の設置位置を選定する際に考慮すべきポイントをまとめて結論とする。

## 2. 浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスク分析

本章では、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクを特定し、特定されたリスクの原因と結果を推定することで、リスクの原因から結果までの一連の流れを示すリスクシナリオを作成する。なお、これらのリスク分析結果には、塩荊ら [34] [35]の発表内容および平成 24 年度の国土交通省委託事業報告書 [36]の内容の一部を含む。

### 2.1. 浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの特定

浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクには、疲労・腐食・摩耗等による構造破壊の発生や復原性の低下、台風等の厳しい気象海象条件や落雷等による構造物の破損や、船舶等の衝突による構造物および係留索の破損等が考えられる。本研究ではこれらのリスクの中で、浮体式洋上風力発電施設に特有のリスクのみを対象とすることとし、浮体への浸水、係留索の破断、係留アンカーの抜け、施設の漂流の 4 つのリスクを抽出した。これら 4 つのリスクについて、次節以降で原因の特定および結果の推定を行い、リスクシナリオを作成する。

### 2.2. 重大リスクの原因特定

前節において浮体式洋上風力発電施設特有の重大なリスクとして抽出された、浮体への浸水、係留索の破断、係留アンカーの抜け、施設の漂流について、それぞれのリスクの原因を特定するため、FTA(Fault Tree Analysis)を行う。FTA とはシステムをモデル化する手法で、トップイベントからスタートし、各イベントの生起に寄与する可能性のある全てのイベントを時間経過に遡って特定しながら進む解析方法である [37]。それ以上細かい事象に細分できないイベント（基イベント）に辿りつくまで解析を続ける。この解析によって、トップイベントとして設定した事象の発生原因特定することができ、また、その原因からどのような過程を経てトップイベントの発生に至るのかを推定することができる。

以下に、前節で特定された各リスクをトップイベントに設定して FTA を行った結果を示す。

#### 2.2.1. 浮体への浸水に至る原因の特定

浮体への浸水は、内部での結露により水滴が溜まることによるものと、浮体の亀裂等の発生で外部から水が入り込むことによるものが考えられる。さらに外部からの水の侵入は雨水の侵入と海水の侵入の 2 種類に分けられ、それぞれの原因を別々に考えていく必要がある。これらを考慮して作成した FT(Fault Tree)を図 2-1 および図 2-2 に示す。

これらの図では考えうる原因の全てを含めて解析しているが、実際には設計基準に従って製造されていればまず起こらないと考えられる現象もある。これらの現象は、図 2-1 および図 2-2 においてグレーで示された部分であり、黒字で示された部分は、設計基準等に従っても防止することが困難な、いわゆる“想定外”の事象を示している。ここでは、これらの“想定外”の事象を中心に抽出して簡略化することとし、その結果を図 2-3 に示す。この結果から、自然物や人工物の衝突および、設計時の想定を超えるような環境外力（台風等の荒天や地震・津波等）が、浮体への浸水の原因となる重要な事象であると特定された。

### 2.2.2. 係留索の破断に至る原因の特定

係留索の破断の原因として、大きく分けて疲労による破断と引張による破断が考えられる。それぞれの原因として考えられる事象を全て書き出して作成した FT が図 2-4 である。黒字およびグレー文字の区別は前項と同様であり、グレーで示した疲労・腐食・摩耗等は無視し、黒字で示した部分のみに絞ってみると、人工物の衝突および、設計時の想定を超えるような環境外力が係留索の破断の原因であると推定された。

### 2.2.3. 係留アンカーの抜けに至る原因の特定

係留アンカーの抜けの原因は、前項の係留索破断の原因でもある人工物の衝突および、設計時の想定を超えるような環境外力に加え、アンカー特有の問題として把駐力の確保失敗や喪失が考えられる。作成した FT を図 2-5 に示す。

ところで、ある係留ラインに何らかの原因で大きな力が働いた場合に、索の破断とアンカーの抜けのどちらが先に起こるのかは、索の張力とアンカーの把駐力の大小関係によって異なり、これは製品の特性や設置場所の地質等に依存すると考えられる。係留索の破断とアンカーの抜けの組み合わせを考慮することは解析をする上で複雑となり、また、どちらが起きても後の被害に大きな差はないと考えられることから、本研究ではアンカーの把駐力が索の破断張力より大きいと仮定し、“想定外”の大きな力が働いた場合にもアンカーは抜けず、係留索の破断の有無のみを判断すれば良いこととする。よって、図 2-5 の FT はこの後の解析には使用しない。

### 2.2.4. 施設の漂流に至る原因の特定

浮体式洋上風力発電施設の中の施設が漂流に至る直接的な原因は明らかに、係留索の破断または係留アンカーの抜けによって全ての係留ラインが位置保持機能を喪失することである。前項での議論の通り、本研究では係留アンカーの抜けより早く係留索が破断することとしているため、これは全ての係留索の破断として置きかえることができる。そしてこれは上述したように、人工物の衝突および、設計時の想定を超えるような環境外力が原因で発生する。現実には、各係留索が別々の原因で破断する可能性、すなわち一部は環境外力で、残りは人工物の衝突で破断するというような可能性もありうるが、これは係留索の本数と破断原因の組み合わせの問題となり少々煩雑であるため、本研究では一つの施設が漂流に至る場合、その全ての係留索の破断原因は同一であると仮定する。以上により、施設の漂流に至る原因は係留索の破断に至る原因に直結させることができるため、FT の作成は省略する。

※論理ゲートの種類 ○ ANDゲート □ ORゲート

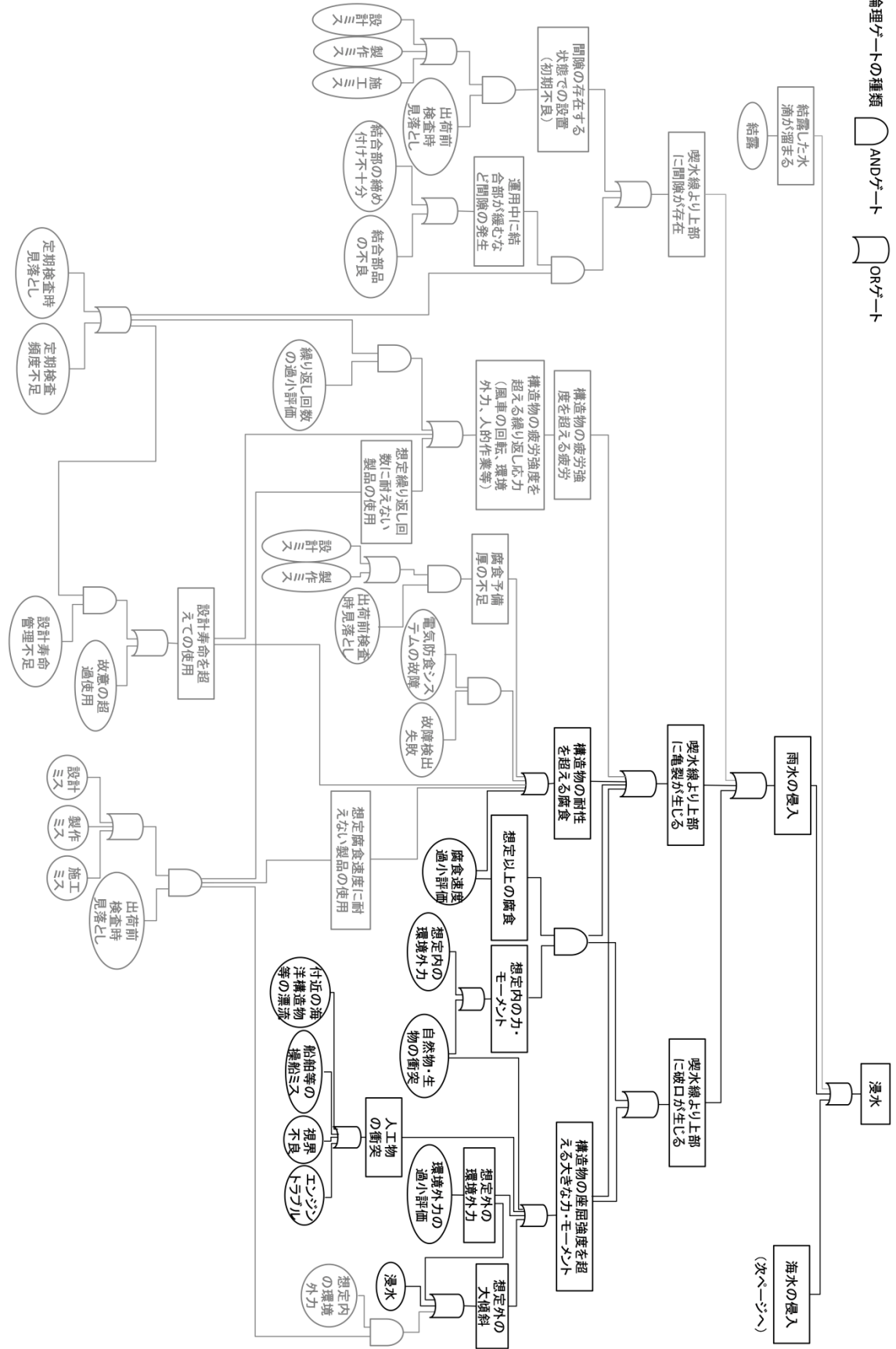


図 2-1 浮体への浸水の原因推定 FT (雨水の侵入)

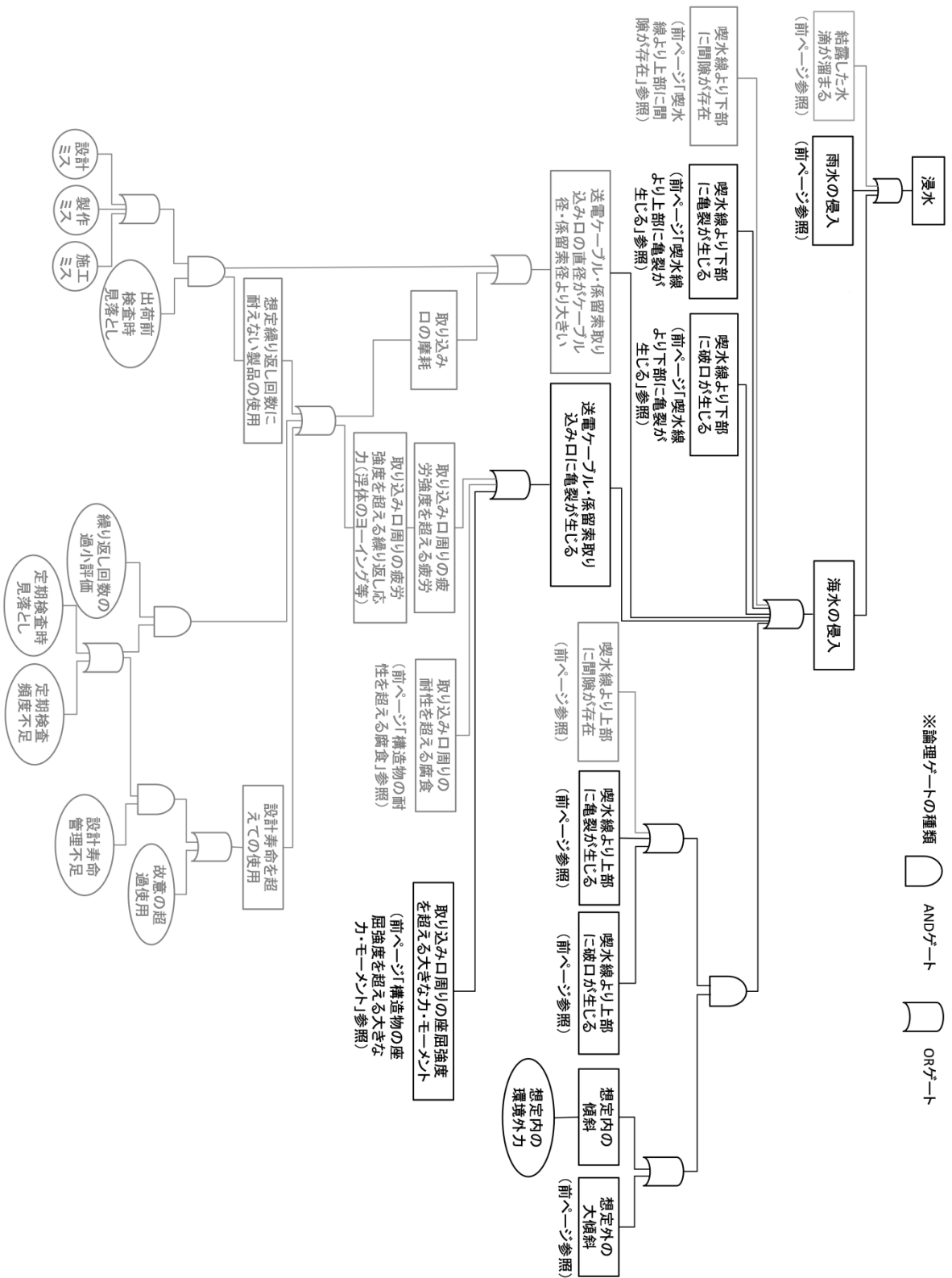


図 2-2 浮体への浸水の原因推定 FT (海水の侵入)

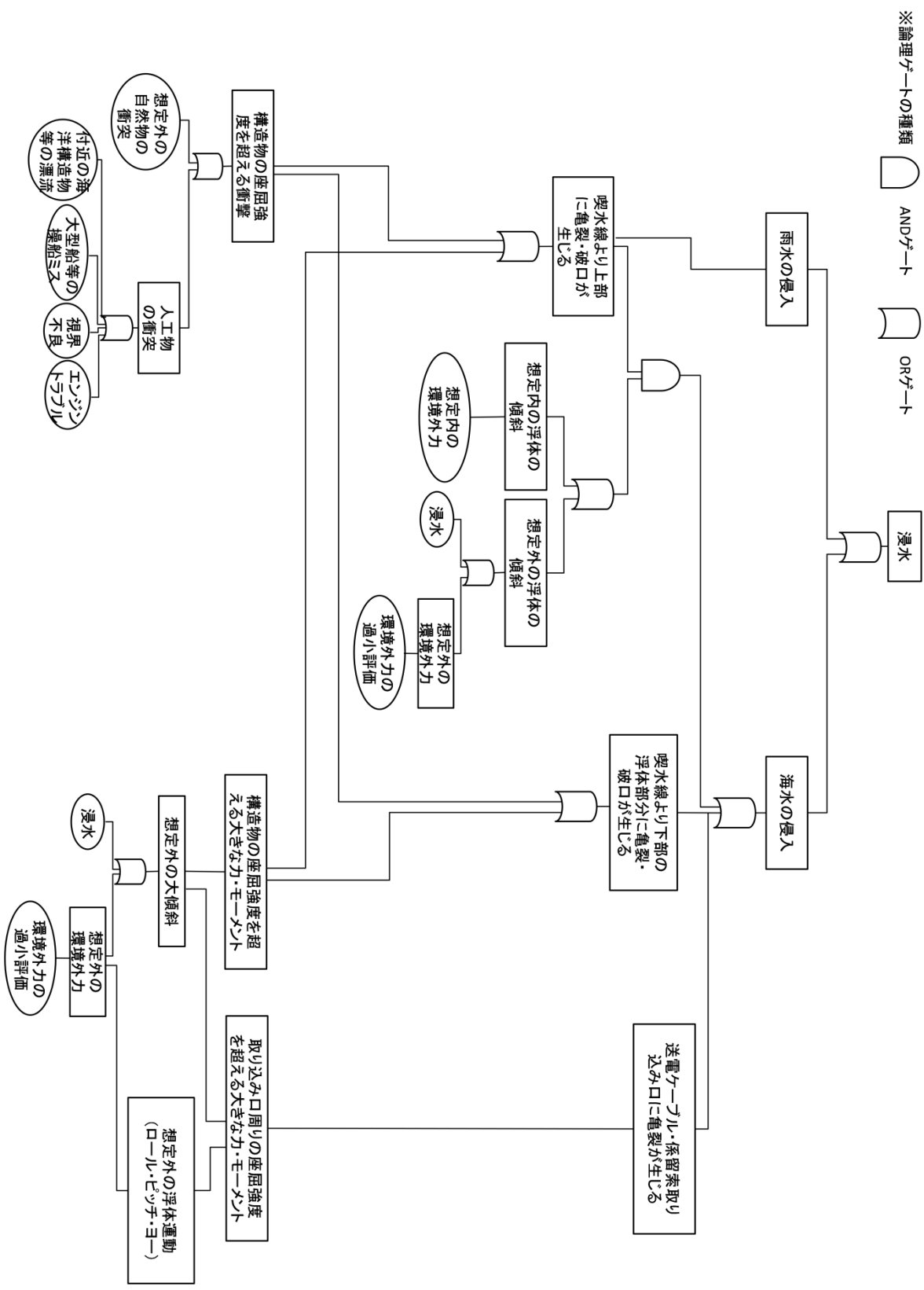


図 2-3 浮体への浸水の原因推定 FT (簡略化)

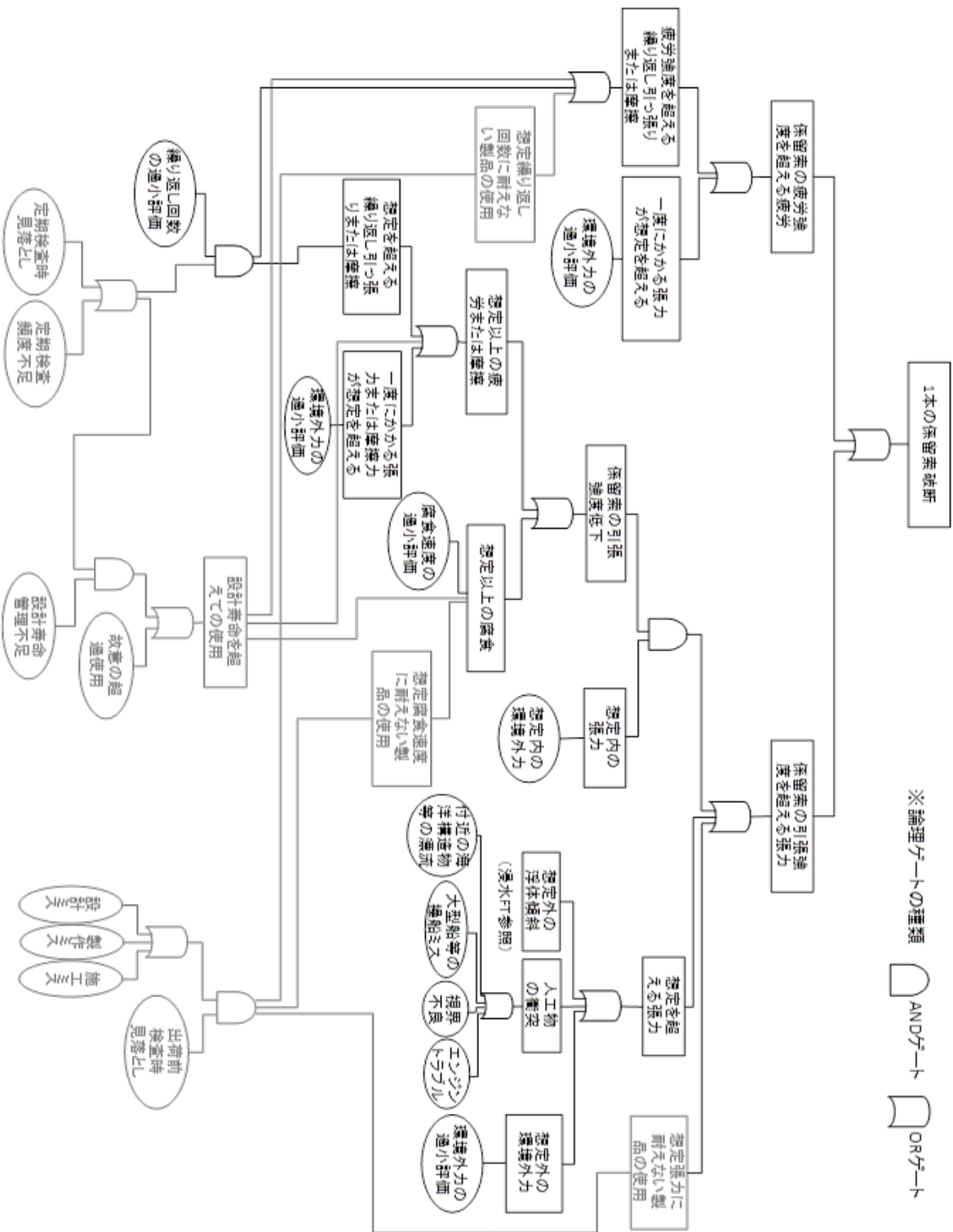


図 2-4 係留索破断の原因推定 FT



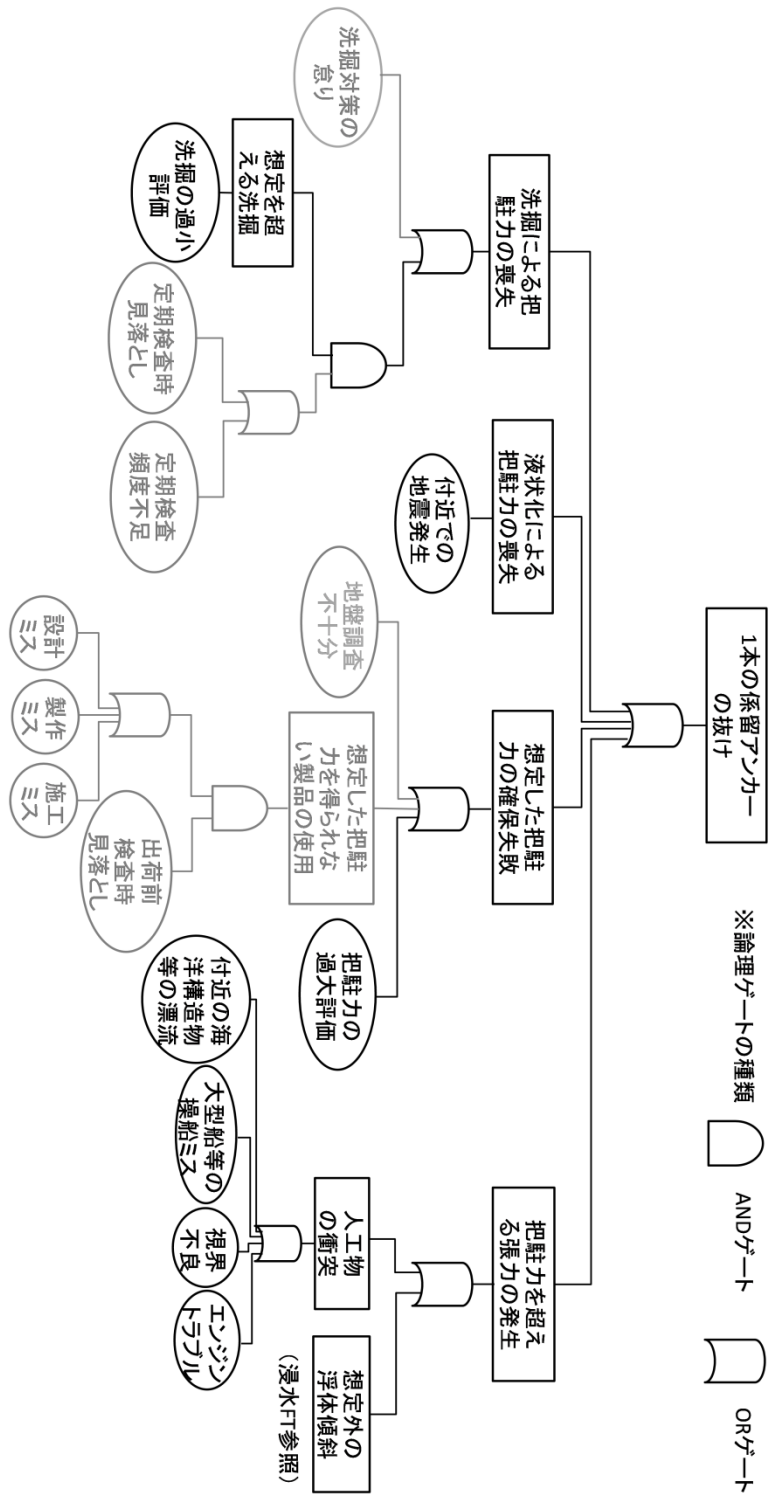


図 2-5 係留アンカーの抜けの原因推定 FT

### 2.3. 重大リスクの結果推定

前節では重大リスクの原因を特定したが、ここでは重大リスクの結果を推定するため、ETA(Event Tree Analysis)を行う。ETAもシステムをモデル化する手法であるが、FTAとは逆に、起因イベントからスタートして全ての起こりうる後続イベントを時間経過に従って辿る解析方法である [37]。

#### 2.3.1. 浮体への浸水の結果推定

浮体に浸水した場合、続いて起こり得る事象（後続事象）としては浮体の傾斜・転覆・沈没が考えられる。傾斜によって施設の更なる被害につながる可能性や、転覆・沈没により周辺船舶等に被害を及ぼす可能性がある。これらの解析結果を図 2-6 に示す。図中、四角囲みの「浸水」は起因イベントを示し、この事象からスタートして、右に行くほど時間が経過していることを示す。以降に示す ET は全てこの形式である。

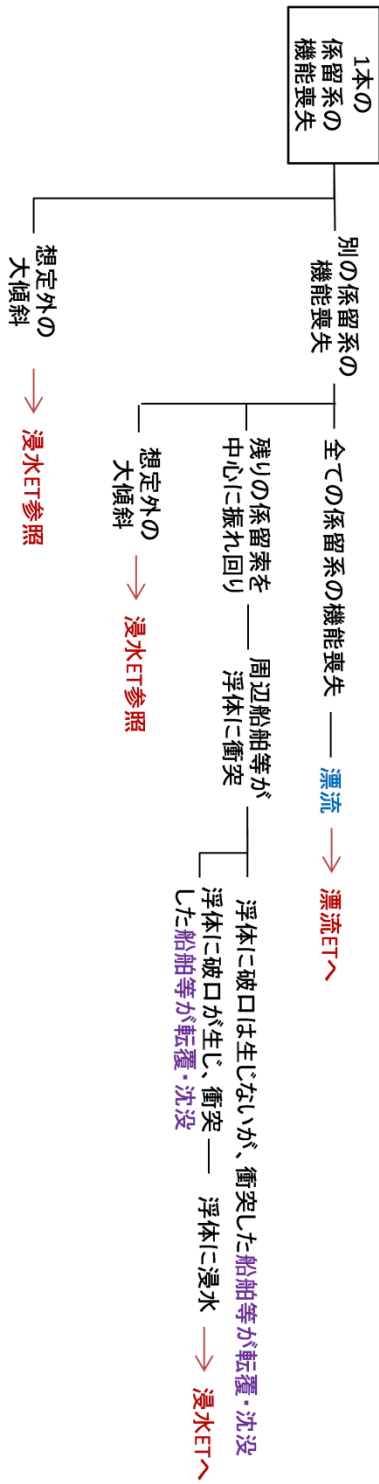
#### 2.3.2. 係留索破断の結果推定

係留索の破断については前節での議論の通り、一つの施設の全ての係留索は同一の理由で破断することとするため、1本が破断した場合には残りも全て破断して施設の漂流につながるか、一部の係留索が破断したままの状態が継続するかのどちらかが、係留索破断の直後に起こる事象である。この解析結果を図 2-7 に示す。

#### 2.3.3. 施設漂流の結果推定

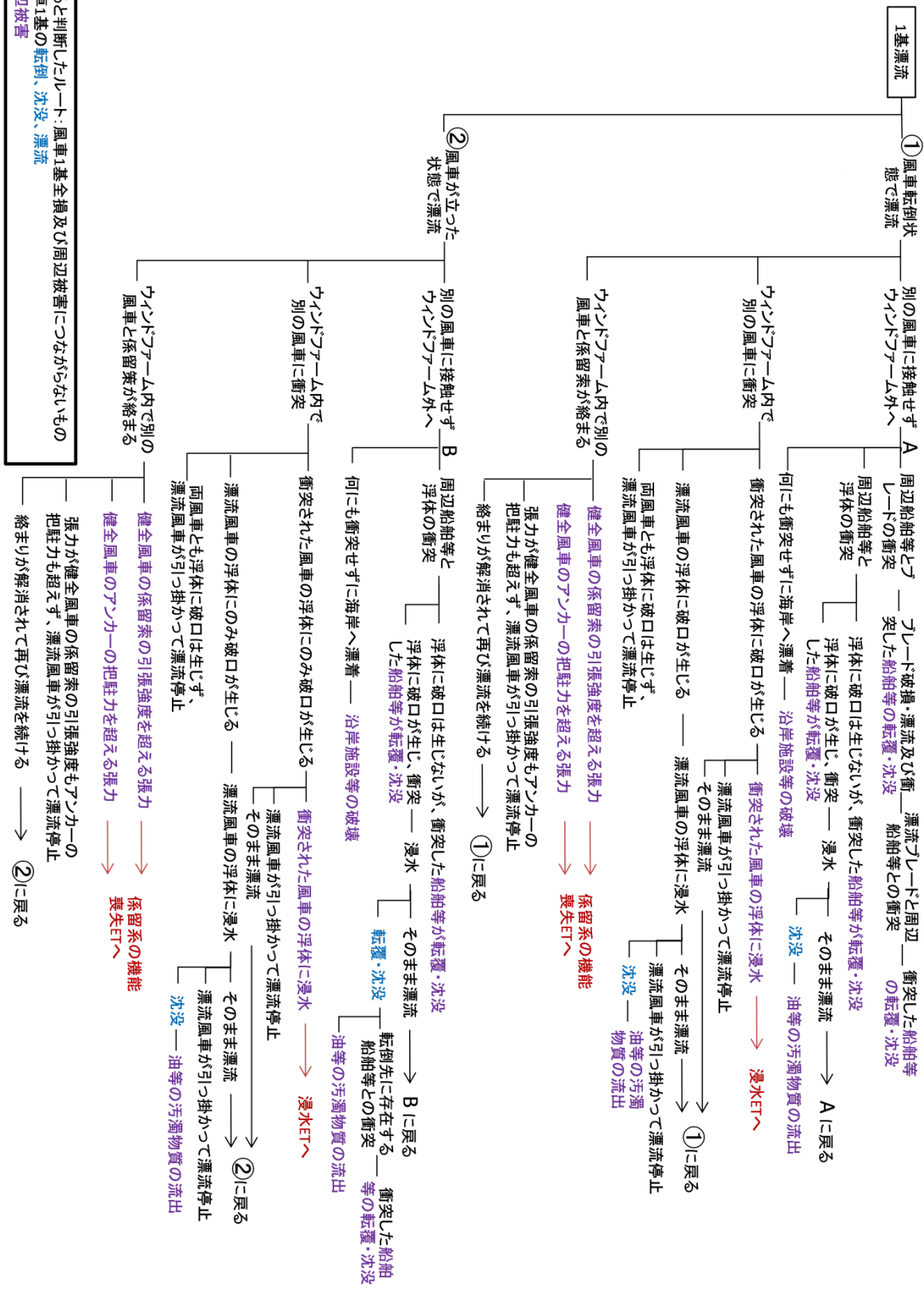
浮体式洋上風力発電施設が漂流した場合、周辺の船舶や洋上施設・沿岸施設に被害を及ぼす可能性がある。また、その施設がウィンドファームを構成する1つの施設である場合には、ファーム内の別の施設に被害を及ぼす可能性も考えられる。なお、被害は風車が立った状態で漂流する場合と、倒れた状態で漂流する場合によって異なると思われるので、それぞれ分けて解析を行った。これらの解析結果を図 2-8 に示す。





※無視できると判断したルート：風車1基全損及び周辺被害につながらないもの  
 青字：風車1基の転倒、沈没、漂流  
 紫字：周辺被害

図 2-7 1本の係留索の機能喪失の結果推定 ET



※無視できると判断したルート：風車1基全損及び周辺被害につながらないもの  
 赤字：風車1基の転倒、沈没、漂流  
 青字：周辺被害

図 2-8 浮体式洋上風力発電施設の漂流の結果推定 ET

## 2.4. リスクシナリオの作成と重要シナリオの抽出

第 2.2 節および第 2.3 節において、重大リスクの原因と結果が推定されたので、これらを組み合わせることで重大リスクの原因から結果までの一連の流れを示すことができる。これをリスクシナリオと呼ぶことにする。全てのシナリオは FT の末端からトップイベントまでの各ルートと ET のスタートイベントから最終被害のイベントまでの各ルートをつなぎ合わせることで作成されるが、ここではその中から、次章において定量評価の対象とする重要なシナリオのみを抽出し、その結果を図 2-9 に示す。この図は ET と同様、時間の経過に従って左から右に進むように示されている。

このとき、浮体式洋上風力発電施設に特有のリスクである「施設の漂流」を中心に、周辺海域に被害を及ぼすリスクを含むシナリオを重視して選定した。また、これらのシナリオについて、後続事象として何も発生しない場合があることも考慮し、より詳細に記述すると図 2-10 のようになる。

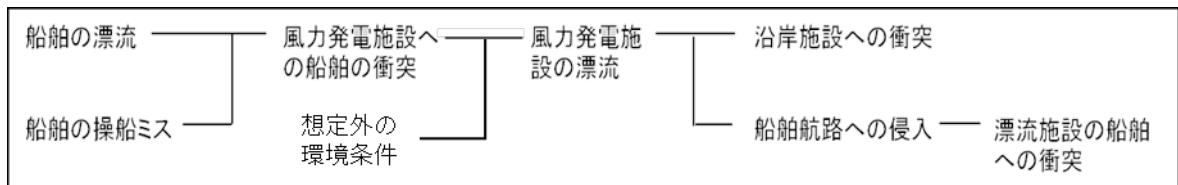


図 2-9 本研究で抽出したリスクシナリオ

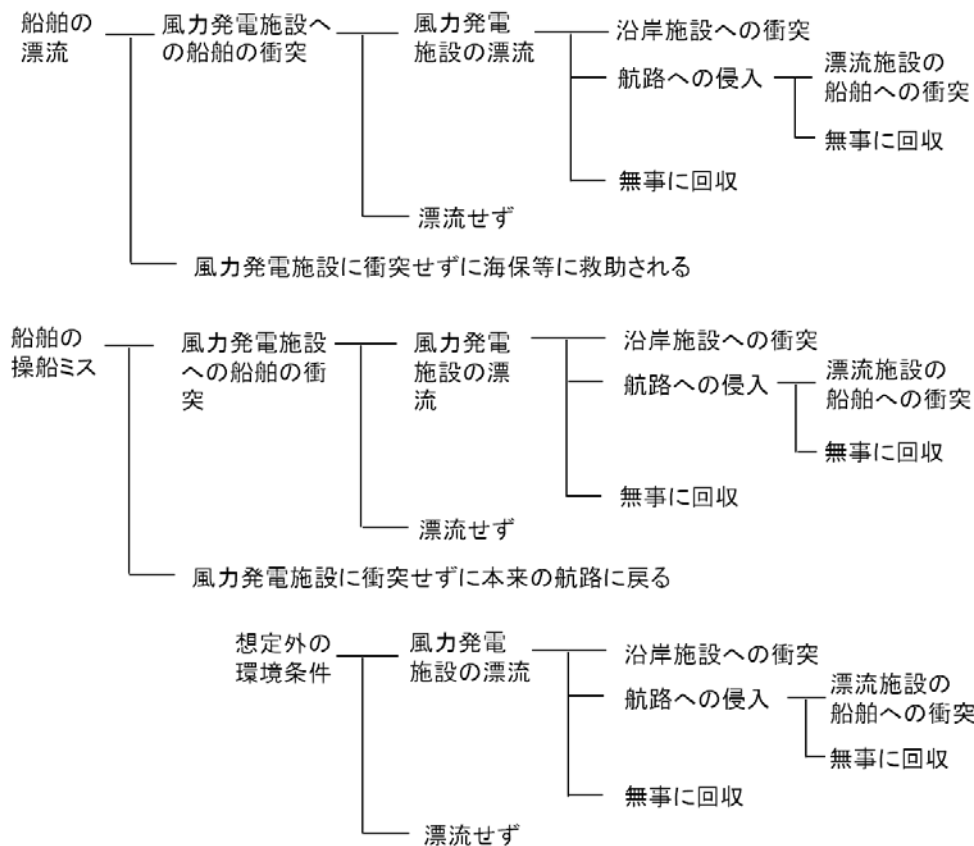


図 2-10 抽出したリスクシナリオ (詳細)

上記のシナリオを構成する要素を抽出して以下に示す。本研究では、次の第3章においてこれらの要素の発生確率（左から右に進む確率）の推定方法を検討し、さらに第4章においてその計算例を示す。

- ① 船舶の漂流 ⇒ 風力発電施設への衝突
- ② 船舶の操船ミス ⇒ 風力発電施設への衝突
- ③ 船舶の衝突 ⇒ 風力発電施設の漂流
- ④ 厳しい気象海象条件 ⇒ 風力発電施設の漂流
- ⑤ 風力発電施設の漂流 ⇒ 沿岸施設への衝突
- ⑥ 風力発電施設の漂流 ⇒ 船舶航路への侵入
- ⑦ 船舶航路への侵入 ⇒ 船舶への衝突





### 3. 安全性に関するリスクの定量評価

本章では、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの定量評価によって、施設の設置候補海域内でのリスクの空間分布を求める方法を検討する。まず第 3.1 節では解析の前提となる海域や風力発電施設の条件を設定する。続いて第 3.2 節において解析の概要を説明し、第 3.3 節においてリスクの発生確率の計算方法を、第 3.4 節ではリスクの被害額の設定方法を説明する。

#### 3.1. 解析条件の設定

本節では、解析の前提となる海域および風力発電施設に関する条件を設定する。

##### 3.1.1. 解析対象海域と施設設置候補海域

本解析の対象海域は、日本の沿岸部を含む  $10\text{ km} \times 21\text{ km}$  の仮想的な海域とする。この海域の南北と西側は閉境界で海岸線に囲まれており、東側は開境界であるが境界線上に船舶航路の中心が位置しているものとする。また、西の海岸線沿いには沿岸施設が設置されているものとする。これは太平洋側の沿岸部に多い海域を模擬して簡略化したものである。

この解析対象海域（以下、解析エリア）内において、海岸線および航路中心からそれぞれ  $1\text{ km}$  離れた位置を境界とした施設設置候補海域（以下、候補エリア）を設定する。候補エリア内（境界線含む）において風力発電施設の設置位置を  $x$  方向、 $y$  方向ともに  $1\text{ km}$  ずつ変化させ、それぞれの地点でのリスクを計算して比較する。つまり、候補エリア内の東西方向に  $9$  地点、南北方向に  $20$  地点、合計  $180$  地点を風力発電施設の設置候補地点として、各地点についてリスク解析を行い、このエリア内のリスクマップを作成する。このとき、船舶の漂流開始地点や沿岸施設の位置も  $1\text{ km}$  ごとに変化させて計算する。

この仮想海域の設定条件を図 3-1 に示す。ただし沿岸施設位置は  $a = 0$  のあらゆる場所、すなわち  $b = 1,000 \sim 20,000$  の全ての場合で検討する。

##### 3.1.2. 対象とする風力発電施設

本解析で対象とするのは、 $5.0\text{ MW}$  風車を三角形セミサブ型浮体に搭載した風力発電施設である。表 3-1 に風車の主要目、表 3-2 に浮体施設の主要目を示す。また、風車と浮体の概要を図 3-2 に示す。浮体は  $3$  本の係留索によってカタナリー方式で海底面に固定されているものとし、係留索の主要目を表 3-3 に示す。ここで、MBL（最小破断荷重）は各海域の環境条件の  $50$  年再現期待値による荷重に安全率  $2.0$  を掛けて海域別に設定した。初期張力はそれぞれの MBL の  $10$  分の  $1$  とした。各海域の環境条件については次章において説明する。

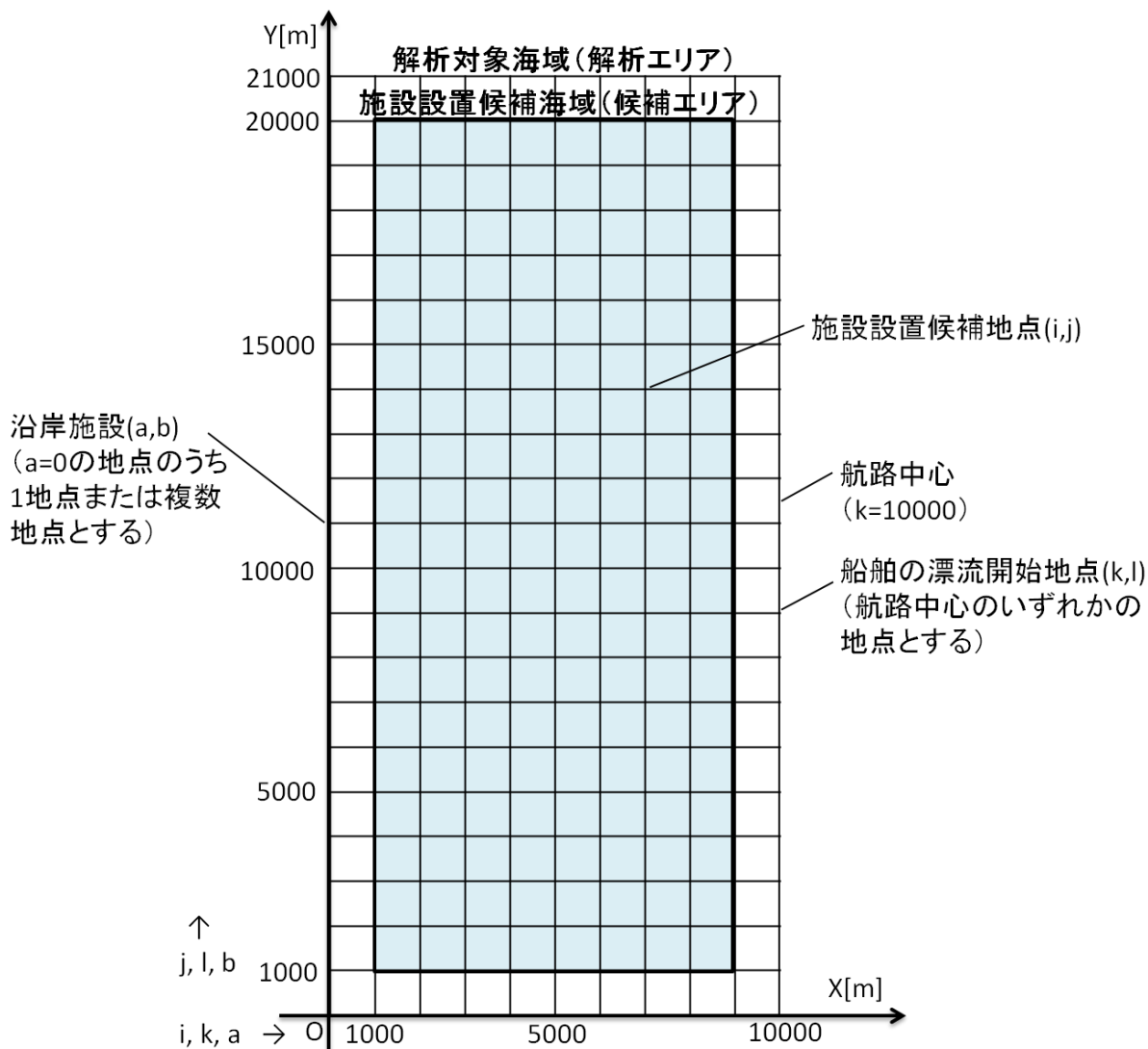


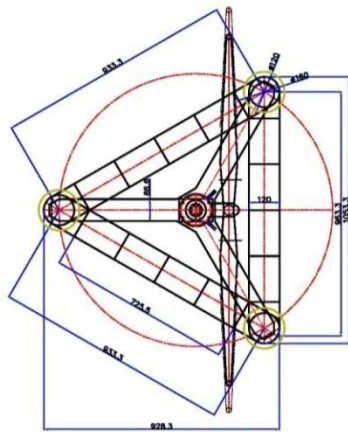
図 3-1 単純化した風力発電施設周辺海域概要図

表 3-1 解析対象 5MW 風車の主要目 [38]

ロータ径[m]	128.0
ブレード長[m]	62.5
ハブ高さ (タワー基部より) [m]	90.0
ナセル高さ[m]	4.0
ナセル長さ[m]	12.5
ナセル幅[m]	4.0
ブレード枚数[枚]	3

表 3-2 解析対象セミサブ型浮体施設の主要目 [39]

全長[m]	72.62
全幅[m]	82.00
コラム間[m]	70.00
型深さ[m]	30.00
喫水[m]	15.00
コラム幅[m]	12.00
ローハル幅[m]	12.00
ローハル高[m]	6.00
排水量 (真水) [ton]	15,582



組立概略形状図

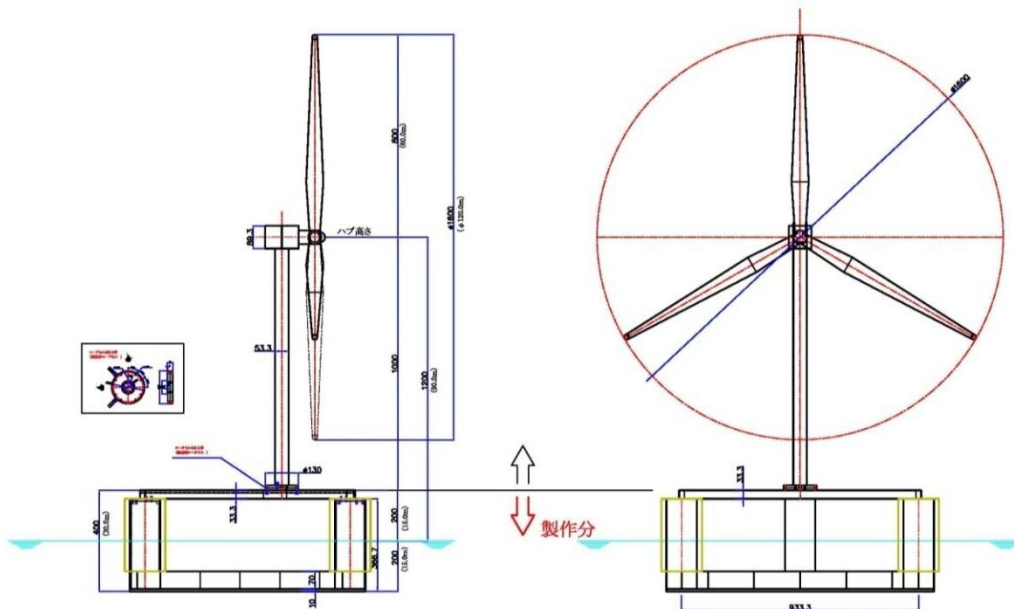


図 3-2 上方 (左上), 横方向(左下)と正面(右)から見たセミサブ型浮体の概要 [39]

表 3-3 セミサブ浮体の係留索の主要目 [17] [39]

設置水深[m]	232.50	
本数	3	
索長[m]	600.00	
ヤング率[ton/mm <sup>2</sup> ]	5.7000	
索径[mm]	138.70	
水中重量[kg/m]	365.72	
最小破断荷重(MBL)[kN]	海域 No.1	16122
	海域 No.2	8416.8
	海域 No.3	5993.5

### 3.2. 解析方法の概要

前章で抽出されたリスクシナリオについて、図 2-10 にシナリオ番号および確率変数を加えて図 3-3 に再掲する。図中、 $p_{11} \sim p_{17}$  は、左の事象から右の事象に至る確率を示す変数であり、これらに対応する被害金額を  $s_{11} \sim s_{17}$  とする。ある地点に風力発電施設を設置した場合の各シナリオの発生確率を  $p_{11} \sim p_{17}$  の組み合わせで算出し、そのシナリオを辿る過程での全ての被害金額を  $s_{11} \sim s_{17}$  から選んで合計してシナリオ発生確率に乗じることで、その地点に施設を設置した場合のリスクの大きさを定量的に求めることができる。これを対象海域内の全ての風力発電施設設置候補位置について行くと、対象海域内での施設設置によるリスクマップが作成される。

次節において各リスクの発生確率  $p_{11} \sim p_{17}$  の算出方法を、更にその次の節において各リスクの被害金額  $s_{11} \sim s_{17}$  の算出方法を説明する。

### 3.3. 各リスクの発生確率の算出方法

候補エリア内の風力発電施設設置位置の座標を  $(i, j)$ 、航路上の船舶漂流開始点の座標を  $(k, l)$ 、沿岸施設の座標を  $(a, b)$  とし、以下に各リスクの発生確率の算出方法を説明する。

#### 3.3.1. 船舶の漂流による風力発電施設への衝突確率

候補エリア内の座標  $(i, j)$  にある風力発電施設への漂流船舶の衝突確率を  $p_{11}(i, j)$  とおくと、 $p_{11}(i, j)$  は下記の式で表され、これに解析エリア内の年間漂流船舶数  $m_S$  をかけると解析エリア内における漂流船舶の風力発電施設への年間衝突数となる。

$$p_{11}(i, j) = \frac{1}{n_S} \sum_k \sum_l \sum_{\theta_w} \sum_{v_w} \sum_{\theta_c} \sum_{v_c} \sum_{is} \{ \delta_{SDW}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \times p_{SDW}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \} \quad \dots (3-1)$$

$$\text{ただし } \delta_{SDW} = \begin{cases} 1 & (\theta_R(i, j, k, l) \leq \theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \leq \theta_L(i, j, k, l)) \\ 0 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases} \quad \dots (3-2)$$

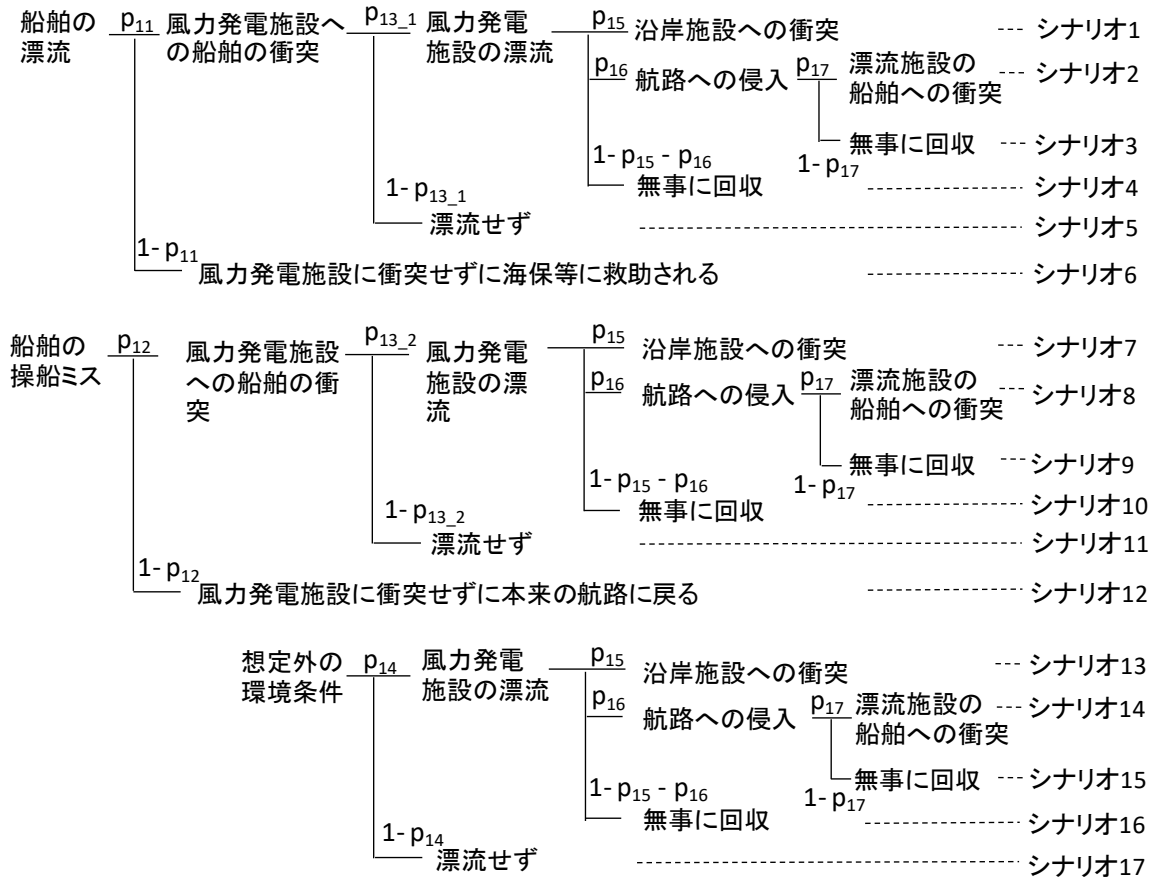


図 3-3 解析対象とするリスクシナリオ

ここで、 $n_S$  : 船舶漂流開始地点数、 $k$  : 船舶漂流開始点の  $x$  座標 ( $k = k_{min} \sim k_{max}$ )、 $l$  : 船舶漂流開始点の  $y$  座標 ( $l = l_{min} \sim l_{max}$ )、 $\delta_{SDW}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : ある環境条件 ( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ )においてある地点( $k, l$ )から漂流したサイズ  $is$  の船舶の、ある地点( $i, j$ )に設置された風力発電施設への衝突判定関数、 $p_{SDW}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : 漂流船舶のサイズが  $is$  であり、かつ漂流時の環境条件が ( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ ) である確率、 $\theta_w$  : 風向、 $v_w$  : 風速、 $\theta_c$  : 海潮流向、 $v_c$  : 海潮流速度、 $is$  : 漂流船舶の階級 (総トン数または載貨重量トン数)、 $\theta_R(i, j, k, l)$  : 船舶漂流開始地点( $k, l$ )から見た( $i, j$ )に設置された風力発電施設の右端の方角、 $\theta_L(i, j, k, l)$  : 船舶漂流開始地点( $k, l$ )から見た( $i, j$ )に設置された風力発電施設の左端の方角、 $\theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : 環境条件 ( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ ) におけるサイズ  $is$  の船舶の漂流する方角である。各変数の算出方法は以下の通りである。

- $m_S$  : 解析エリア内の年間漂流船舶数

実際に対象とする解析エリア内での年間漂流船舶数のデータが入手できる場合はこれを用いる。本研究では仮想海域を対象としているため日本沿岸域での一般的な推定値を用いることとし、推定方法等については次章において説明する。

- $n_S$  : 船舶漂流開始地点数

航路内に等間隔に漂流開始地点を設定し、その数を $n_S$ とする。本研究では仮想海域を対象としており、図 3-1 の例では  $k = 10,000, l = 1,000 \sim 20,000$  の合計 20 地点のどこかから船舶の漂流が開始すると仮定し、 $n_S = 20$  となる。この 20 地点からの船舶の漂流確率は等しいとすると、ある 1 隻の船舶が解析エリア内で漂流を開始する場合、その漂流開始地点が航路内のどの位置であるかは等確率の 20 分の 1 の確率で決まることになる。

- $\delta_{SDW}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$ : ある環境条件 $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ においてある地点 $(k, l)$ から漂流したサイズ  $is$  の船舶の、ある地点 $(i, j)$ に設置された風力発電施設への衝突判定関数
- $p_{SDW}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$ : 漂流船舶のサイズが  $is$  であり、かつ漂流時の環境条件が $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  である確率

説明の都合上、上記 2 つの説明をまとめて行う。

ある地点 $(k, l)$ から船舶が漂流したときの漂流方向が、ある地点 $(i, j)$ に設置された風力発電施設の衝突範囲内に含まれる場合、漂流船舶が風力発電施設に衝突すると判断する。衝突範囲は施設および船舶の幅を考慮して定める。船舶の漂流方向は環境条件と船舶のサイズによって変化し、 $(i, j)$ と $(k, l)$ の位置関係によって衝突と判定されるかどうか異なるので、 $(i, j)$ と $(k, l)$ 、風向 $\theta_w$ 、風速 $v_w$ 、海潮流向 $\theta_c$ 、海潮流速度 $v_c$ 、船舶サイズ $is$ の関数として $\delta_{SDW}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$ と表すことができる。ただし、波漂流力は風や海潮流による漂流力と比べて小さいので無視することとする。また、風や海潮流については定常状態のみを考える。

船舶の漂流方向については、船体が受ける風抗力と、風漂流力による船体の移動によって生じる流体抗力のつり合いから、定常状態での風による船舶の漂流ベクトルが計算され、これに海潮流による漂流ベクトルを合成することで求められる。これら抗力は投影面積に比例するため、船舶の形状と大きさによって異なる。小型船の衝突による風力発電施設への影響は小さいと考えられるため、ここでは大型船の代表として貨物船を考える。

上記で計算された漂流ベクトルの方向 $\theta$ が、 $(i, j)$ に設置された風力発電施設の左端の方角 $\theta_L$ と右端の方角 $\theta_R$ の間にある場合、船舶が風力発電施設に衝突すると判断され $\delta_{SDW} = 1$ となる。一方、漂流方向がこれらの間にない場合は $\delta_{SDW} = 0$ となる。

このときの環境条件の組み合わせの出現頻度および、そのサイズの船舶の存在割合を全て掛け合わせることで、この条件の発生確率が求められ、これが $p(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$ となる。

この計算を全ての環境条件および船舶サイズの組み合わせで行い、風力発電施設に衝突する条件の発生確率を積算して行くと、ある地点 $(k, l)$ から漂流した船舶がある地点 $(i, j)$ に設置された風力発電施設に衝突する確率となる。さらに、同一の風力発電施設設置位置 $(i, j)$ について、全ての船舶漂流開始地点 $(k, l)$ からの衝突確率を合計して漂流開始地点数 $n_S$ で除した値が、その地点 $(i, j)$ における漂流船舶の衝突確率となる。これを全ての風力発電施設設置候補地点 $(i, j)$ について行えば、施設設置位置による漂流船舶衝突確率の違いを示すことができる。

以下に計算手法の詳細を示す。

#### <計算条件>

- 波漂流力，風による吹送流は無視する。
- 風と海潮流の速度と方向を考慮して対地漂流方向と対地漂流速度(以下では単に漂流方向，漂流速度と表記)を計算する。
- 風と海潮流の速度と方向の計算時においては，定常漂流状態のみを考慮する。
- 定常漂流状態において漂流船舶の長手方向が風向きに直交するように漂流すると仮定する。漂流方向は風下側とし，風による漂流ベクトルの方向は風速ベクトルの方向と同一とする。また，この状態において海潮流による漂流力が働いても船舶の向きが変わることはないとは仮定する。
- 海潮流による漂流ベクトルは海潮流のベクトルとほぼ同一と仮定する。

#### <計算方法>

計算のフローを図 3-4 に示し，以下にその説明を行う。

ある地点(i, j)に風力発電施設を設置した場合の漂流船舶衝突確率 $p_{11}(i, j)$ の計算手順は以下の通りとなる。

- まず 1 つの風力発電施設設置位置(i, j)と 1 つの船舶漂流開始地点(k, l)を 1 対 1 で考える。
- 上記の方法で計算した漂流方向が(i, j)に設置された風力発電施設設置の左端方角から右端方角の範囲に含まれている場合，(k, l)から漂流し始めた船舶は(i, j)にある風力発電施設に衝突すると判定される ( $\delta = 1$ )。
- 衝突と判定された場合，そのときの計算条件(風向，風速，海潮流向，海潮流速度，船舶サイズ)の発生確率 $p_{SDW}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$ を計算する。(以下の全ての出現頻度を掛け合わせるとその条件の発生確率となる。)
- 全ての計算条件で上記の計算を行い，衝突と判定された条件の発生確率を合計すると，(k, l)から漂流し始めた船舶の，(i, j)にある風力発電施設への衝突確率が求められる。
- 上記の作業を，船舶漂流開始地点(k, l)の位置のみを変えて繰り返し行い，それらの合計を $n_S$ で除して平均化し， $m_S$ をかけることで，ある地点(i, j)に風力発電施設を設置した場合の漂流船舶衝突確率が求められる。
- さらに上記の作業を(i, j)の位置を変えて行くと，施設設置位置の違いによる漂流船舶衝突リスクの差を空間的に把握できる。

#### <漂流方向・速度の計算方法>

まず，船舶の空中部に働く風抗力と，この力によって漂流する際に水中部に働く流体抗力を算出し，両者のつり合いによって風による漂流速度を求める [40]。

風抗力 $\vec{F}_w$ と流体抗力 $\vec{F}_{dw}$ (どちらも大きさの単位は N) をそれぞれ以下のように表す。

$$\vec{F}_w = \frac{1}{2} \rho_a A_{as} C_{Dw} \vec{V}_w |\vec{V}_w| \quad \dots (3-3)$$

$$\vec{F}_{dw} = \frac{1}{2} \rho_w A_{ws} C_{Ddw} \vec{V}_{dw} |\vec{V}_{dw}| \quad \dots (3-4)$$

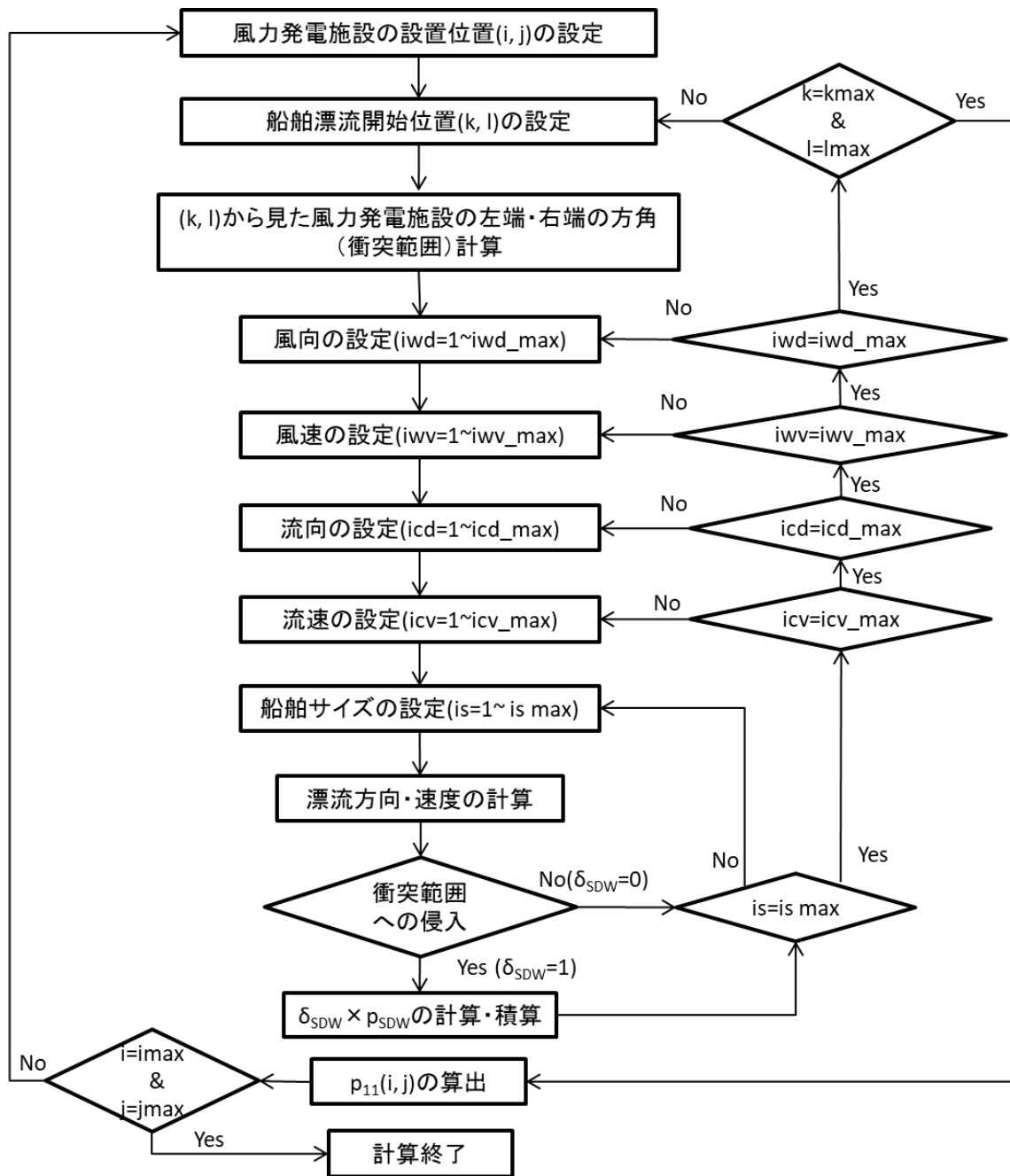


図 3-4  $p_{11}(i, j)$  の計算フローチャート

ここで、 $\rho_a$  は空気密度  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ， $\rho_w$  は海水密度  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ， $A_{as}$  は船舶の空中部投影面積  $[\text{m}^2]$ ， $A_{ws}$  は船舶の水中部投影面積  $[\text{m}^2]$ ， $C_{Dw}$  は風抗力の抗力係数  $[-]$ ， $C_{Ddw}$  は風によって漂流する船舶が受ける流体抗力に対する抗力係数  $[-]$ ， $\vec{V}_w$  は風速， $\vec{V}_{dw}$  は吹送流速に対する漂流の相対速度（対水速度）である（ $\vec{V}_w$  と  $\vec{V}_{dw}$  の大きさの単位は  $\text{m}/\text{s}$ ）。

風速が与えられている状態では、これら 2 つの力のつり合いから相対速度  $\vec{V}_{dw}$  が算出され、これは吹送流速  $\vec{v}_d$  と対地漂流速度  $\vec{v}_w$ （どちらも大きさの単位は  $\text{m}/\text{s}$ ）との関係で下記のように表される。



$$\vec{V}_{dw} = \vec{v}_d - \vec{v}_w \quad \dots (3-5)$$

しかし、吹送流速度は複雑なので、計算条件の通りここでは無視することにする。  
従って、漂流速度 $\vec{v}_w$ は $\vec{V}_{dw}$ と同じ大きさで向きが真逆のベクトルとなる。すなわち、

$$\vec{v}_w = -\vec{V}_{dw} \quad \dots (3-6)$$

である。

次に、海潮流による漂流ベクトル $\vec{v}_c$  (大きさの単位は m/s) を求め、上記で求めた風による漂流ベクトル $\vec{v}_w$ と合成することで、風と海潮流を考慮した漂流ベクトル $\vec{v}$  (大きさの単位は m/s) を求めることができる。しかし、計算条件の通り、海潮流による漂流ベクトル $\vec{v}_c$ は海潮流速ベクトル $\vec{V}_c$  (大きさの単位は m/s) とほぼ同一であると仮定するため、ここでは以下のように近似する。

$$\vec{v}_c = \vec{V}_c \quad \dots (3-7)$$

以上より、風による漂流ベクトル $\vec{v}_w$ と海潮流による漂流ベクトル $\vec{v}_c$ を合成することで、風と海潮流を考慮した漂流速度 $\vec{v}$ を求めることができる。

$$\vec{v} = \vec{v}_w + \vec{v}_c = -\vec{V}_{dw} + \vec{V}_c \quad \dots (3-8)$$

求められた漂流ベクトル $\vec{v}$ の大きさ $|\vec{v}|$ が漂流速度であり、ベクトル $\vec{v}$ の向きが漂流方向である。

ここで、各抗力係数は上野らの実験結果 [41]より、船舶の長手方向に対して  $90^\circ$  の方向から風が吹いている場合の風抗力係数を  $C_{Dw} = 0.1$ 、このとき船舶の水中部が受ける流体抗力の抗力係数を  $C_{Ddw} = 0.8$  と定める。このとき、風抗力と流体抗力はそれぞれ、 $\frac{1}{2}\rho_a L^2 V_w^2$  と  $\frac{1}{2}\rho_w L d V_{dw}^2$  で無次元化されているので、 $A_{as} = L^2, A_{ws} = Ld$  となる。ここで  $L$  は船舶の長手方向長さ[m]、 $d$  は船舶の喫水[m]であり、以下の回帰式により船舶サイズから変換できる [42]。

$$L = 8.7338 \times (is)^{0.2945} \quad \dots (3-9)$$

$$d = \begin{cases} 0.3935 \times (is)^{0.3238} & (is \leq 30000 \text{ DWT}) \\ 0.3754 \times (is)^{0.3233} & (is \geq 30000 \text{ DWT}) \end{cases} \quad \dots (3-10)$$

### 3.3.2. 船舶の操船ミスによる風力発電施設への衝突確率

操船ミスにより航路から逸脱して(i, j)にある風力発電施設に衝突する確率を $p_{12}(i, j)$ とする。この確率の算出方法について、既存のモデル等を参照しながら以下に検討を行う。

### 3.3.2.1. 既存のモデル

この確率の求め方については、まず Haugen ら [43]によって開発されたモデルと、これを引用した Vinnem [44]の著書を基に以下に説明する。

船舶の洋上プラットフォームへの衝突確率は、次のように表される [44] [43]。ただし、これらの式等で使用されている  $i, j, k, l$  等の記号は本研究で使用しているものとは関連しない。

$$P_{CPP} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^n N_{ijk} \sum_{l=1}^4 P_{CC,ijkl} P_{FSIR,jkl} P_{FPPIR,jkl} \quad \dots (3-11)$$

ここで、 $P_{CPP}$ ：年間衝突件数、 $N_{ijk}$ ：年間船舶通航量、 $P_{CC,ijkl}$ ：航路  $i$  を通航中の船種  $j$ 、サイズ  $k$ 、交通グループ  $l$  の船舶が、プラットフォームを認識した時点（一般的に 12 nm 手前）で衝突コースにいる確率、 $P_{FSIR,jkl}$ ：船舶が衝突回避行動を取らない確率、 $P_{FPPIR,jkl}$ ：プラットフォームが衝突回避行動を取らない確率である。ただし、本研究の対象は洋上風力発電施設であり、基本的に無人なので、 $P_{FPPIR,jkl}$ は無視することとする。

$P_{CC}$ は以下のように表される [43]。

$$P_{CC} = P[x_p < x < x_p + D_c] = \int_{x_p}^{x_p + D_c} f_{LD}(x) dx \quad \dots (3-12)$$

ただし、これは船舶の航行計画によって異なり、4つのグループに分類される。この分類は以下のとおりで、①～④を交通グループと呼び、上記では  $l$  で表されている。

- ① プラットフォームの存在を知らずに航行する (Unknown vessels)
- ② プラットフォームの存在を知ってはいるが無計画に航行する (Non-planning vessels)
- ③ プラットフォームの避航計画を立てて航行する (Avoidance planning vessels, AP)
- ④ プラットフォームを目印にして航行する (Position-fixing planning vessels, PFP)

①の船舶の割合について、プラットフォームの存在を知っている確率  $P_K$  は、その設置からの時間の経過に従って上昇する。6ヶ月経てば 80%以上になるとされる [43]。

また、③の船舶の割合  $P_{AP}$  は、以下の式のようになる [43]。

$$P_{AP} = p_{AP} \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_{SD}(|x|)] f_U(x) dx \quad \dots (3-13)$$

ここで、 $p_{AP}$ ：進行方向真つすぐの方向に風力発電施設がある場合に避航計画が適用される確率、 $F_{SD}(|x|)$ ：安全な通過距離の分布、 $f_U(x)$ ：障害物がないときの交通量の横分布である。 $p_{AP}$ は船舶サイズに従って急激に増加し、15,000 DWT 以上になると 90%以上が避航計画を利用する（利用した方が良い状況の場合）。 $F_{SD}$ は船舶形状・船舶長さ・船舶サイズの3つのパラメータによるワイブル分布が適用できる。

さらに、④の船舶の割合 $P_{\text{PFP}}$ は、以下の式のようになる [43]。

$$P_{\text{PFP}} = p_{\text{PFP}} \int_{-\infty}^{\infty} f_U(x) \cdot F_{\text{PFP},1}(|x|) \cdot [1 - F_{\text{PFP},2}(|x|)] dx \quad \dots (3-14)$$

ここで、 $p_{\text{PFP}}$  : PFP が適用される最大の割合、 $f_U(x)$  : 障害物がないときの交通量の横分布、 $F_{\text{PFP},1}(|x|)$  : PFP が適用される際の最小距離の CDF (cumulative distribution function, 累積分布関数)、 $F_{\text{PFP},2}(|x|)$  : PFP が適用される際の最大距離の CDF である。 $p_{\text{PFP}}$  は 0.15 が用いられ、これは船舶サイズの影響を受けるが、 $P_{\text{AP}}$  の場合よりその影響は小さく、また定量化が困難であることから、ここではサイズの違いを考慮しないこととする。

典型的な例として、最小通過距離は約 2~3 nm で 3 パラメータのワイブル分布であり、PFP が適用される最大距離はもっとばらつきが大きく、平均を 15 nm とするガウス分布の、裾野の部分を切り取った形になる。ただし、GPS が普及した現在では PFP を適用する船舶は少ないと思われる [44]。

以上の $P_K$ 、 $P_{\text{AP}}$ 、 $P_{\text{PFP}}$ を用いて、各グループ ( $l=1\sim 4$ ) がプラットフォームを認識した時点で衝突コースにいる確率 $P_{\text{CC},ijkl}$ は以下のように書き直すことができる [44]。

$$P_{\text{CC},ijk1} = (1 - P_K) F_{D,1} F_{NS} \quad \dots (3-15)$$

$$P_{\text{CC},ijk2} = P_K (1 - P_{\text{AP}}) (1 - P_{\text{PFP}}) F_{D,2} F_{NS} \quad \dots (3-16)$$

$$P_{\text{CC},ijk3} = P_K P_{\text{AP}} F_{D,3} F_{NS} \quad \dots (3-17)$$

$$P_{\text{CC},ijk4} = P_K (1 - P_{\text{AP}}) P_{\text{PFP}} F_{D,4} F_{NS} \quad \dots (3-18)$$

ここで、 $F_{D,l}$  ( $l = 1\sim 4$ ) : 各グループ ( $l=1\sim 4$ ) について、プラットフォームの方向に向かっている船舶の割合、 $F_{NS}$  : いわゆる”Shielding factor”，船舶の航行方向に対して他の構造物などに隠れて保護されている状態による影響である。

図 3-5 はこの  $P_{\text{CC}}$  の場合分けを ET で表したもので、各分岐点において YES であれば右側に、NO であれば左側に進み、それぞれの確率を求めることで、上記の①~④の割合が求められる。

一方、 $P_{\text{CC},ijkl}$  のうち、 $F_{D,1\sim 4}$  を求めるのに必要な交通の横分布 $f_{LD}(x)$ は以下のように表される [43]。

理想はスタート地点からゴール地点までの最短ルートを通航することだが、操船者の好みと外的要因が加わり、ばらつきが生じる。先行モデルではこのばらつきをガウス分布で表しており、これは規制のない水面では正しいが、洋上プラットフォームのような障害物がある場合、交通グループによって異なる。

#### ① Unknown vessels

プラットフォームを認識するまでは何も制約がないときの船舶通航分布と同じ。この分布はガウス分布に従うと考えられる。操船者の好みや外的要因、さらにはその組み合わせもガウス分布に従うと考えられる。(プラットフォームが十分に見える距離を通るが、

それ以上は近づかない。)

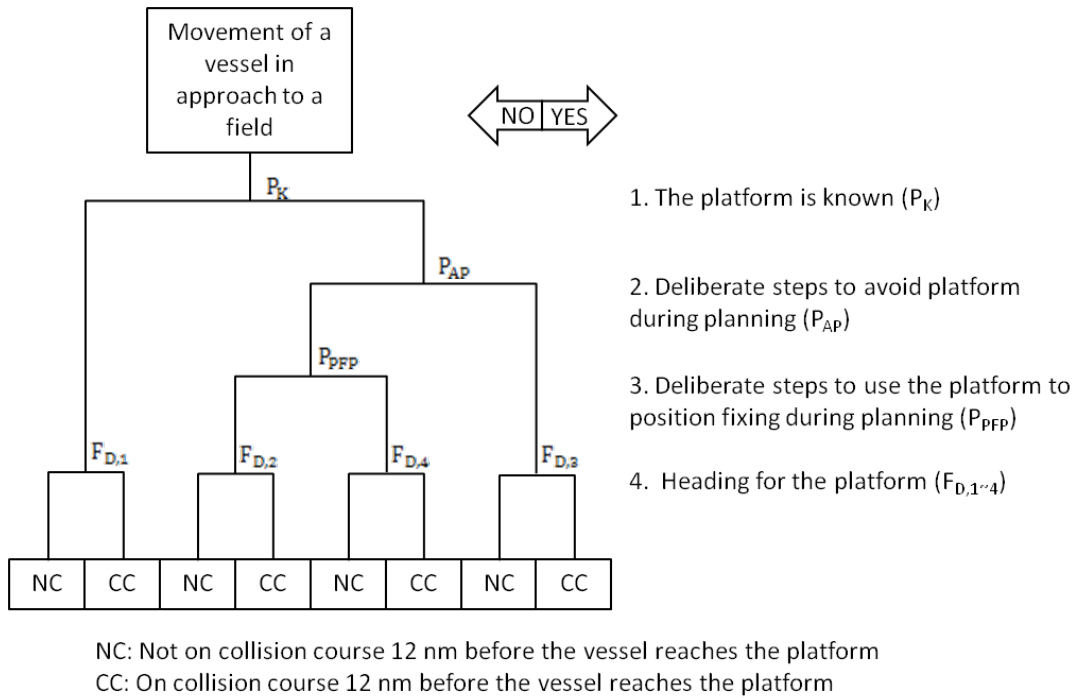


図 3-5 P<sub>CC</sub> についての ET [44](一部改変)

② Non-planning vessels

プラットフォームを認識するまでは何もしないので、存在を知らないのと同じであり、①と同様に考えられる。

③ Avoidance planning vessels, AP

プラットフォームを横切る時の安全な最小距離は操船者の好みによる。究極の目的はできるだけ早く・安くゴールに到着することなので、安全な距離になるまではできるだけ距離を大きく取るが、それ以上は時間・コストがかかるので離れない。

④ Position-fixing planning vessels, PFP

プラットフォームが十分見える距離まで近づくが、それ以上は近づかない。これが PFP の下限となる。

以上のどのグループについても大部分は航路の中央線を通る。航路がプラットフォームにとっても近い場合は AP の影響が大きく、ガウス分布からのばらつきが大きくなる。逆にプラットフォームから離れるほど AP の影響は小さくなり、PFP の影響が明確になってくる。

また、P<sub>FSIR,jkl</sub> は以下のように考える [44] [43]。

このリスクは大きく分けて以下の 3 つの原因によって起こると考えられる。

- i. 見張りが何もしない
- ii. 見張りが間違った行動を取る
- iii. 機器故障

上記のうち、i が最も重要で、ii は船舶同士の衝突においては重要だが、プラットフォームは動かないので、この場合は ii を無視しても良い。重大な failure mode は図 3-6 のように FTA を実施することでヒューマンエラーも機器故障も合わせて表現できる。ヒューマンエラーには以下の様な原因が考えられる。

- ・見張り不在
- ・見張りはいるが、他の仕事に追われている
- ・見張りはいるが、事故や病気で見張れない
- ・見張りはいるが、疲れていて居眠りをしている
- ・見張りはいるが、酔っ払っている
- ・レーダーが効果的に使えていない（視界不良時に限る）

これらは交通グループと船のサイズに依存する。大型船ほどより性能の良い機器を積んでおり、また、乗組員もよく訓練されてモチベーションも高いので、これらのリスクが小さいと思われる [43]。そのほか、当時の海域の視認性や、航路上のほかの制限要因等にも影響を受け、避航の仕方にも個人差がある [44]。

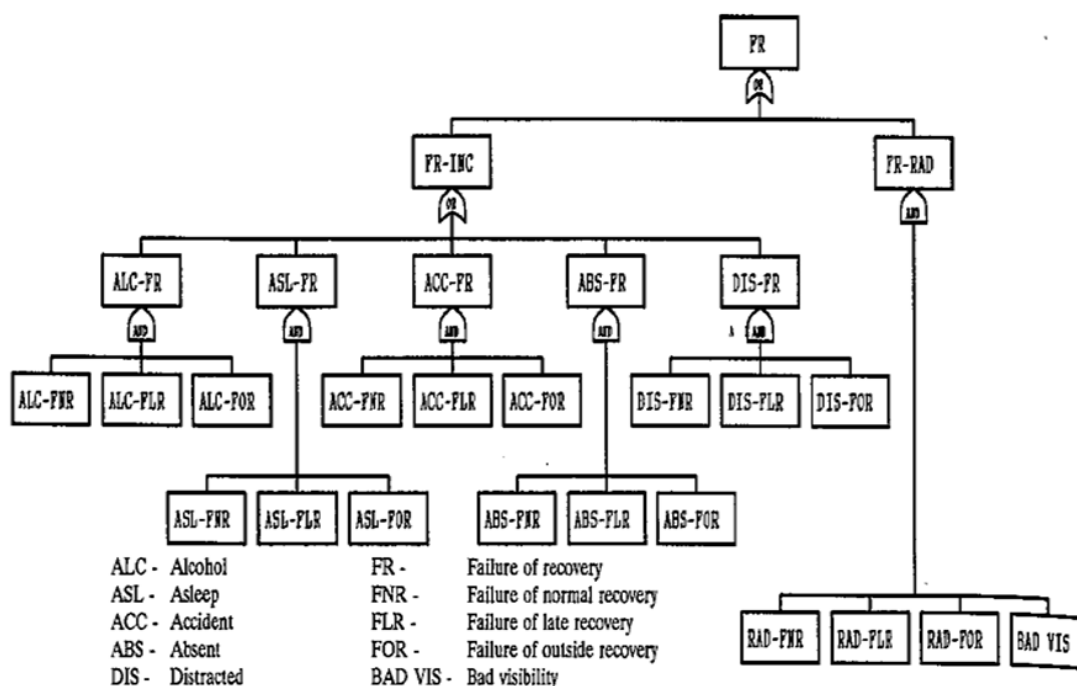


図 3-6 衝突回避に失敗する原因についての FT [45]

Failure of recovery の確率は表 3-4 のようなサンプルが記載されている [44]。これによると、ヒューマンエラーのうち、最も衝突回避に失敗する確率が高い原因は居眠りであり、また、レーダー故障が発生すると、どのヒューマンエラーよりも衝突回避の失敗確率が高くなる事が分かる。しかしこれらは、各原因が発生した際にプラットフォームに衝突する確率を意味するため、各原因の発生確率を求める必要があるが、これらの発生確率を求めるのは困難と思われる。

表 3-4 原因別にみた衝突回避の失敗確率 [44]

Failure Mode	Probability
Alcohol	$1.1 \times 10^{-4}$
Asleep	$2.3 \times 10^{-3}$
Accident	$1.2 \times 10^{-5}$
Absent	$9.5 \times 10^{-4}$
Distracted	$9.5 \times 10^{-4}$
Radar	$9.8 \times 10^{-3}$

図 3-7 は典型的な北海の航路についての計算例で、年間 1000 隻の船舶が通航する。船舶サイズの分布も北海の平均的なものを使用している。プラットフォームの直径は 80 m で、航路からの距離を様々に変えて計算した結果を示している。また、図 3-8 は年間 500 隻の船舶が通航する航路についての計算例で、プラットフォームの直径は 100 m である。図 3-7 と同様にプラットフォームと航路のセンターラインとの距離を変えて計算した結果を示している。図 3-7 は縦軸が対数軸になっているため、図 3-8 との比較がしにくい。そこで両者の比較のために各グラフの「Total」の数値を読み取って同一軸で表したものを図 3-9 に示す。

図 3-9 より、年間 1000 隻の場合と比べて年間 500 隻通航の場合は、プラットフォームと航路の中心との距離が 0 m のときの Total の衝突件数が約半分になっている。つまり、1 隻あたりの衝突確率で考えるとほぼ同じと考えられる。また、プラットフォームの直径が大きい場合の方が、小さい場合より横軸方向の分布の幅が大きい、つまりプラットフォームから航路までの距離が離れた場所での衝突確率が大きい、この原因はプラットフォーム幅の違いによるものとは断定できない。

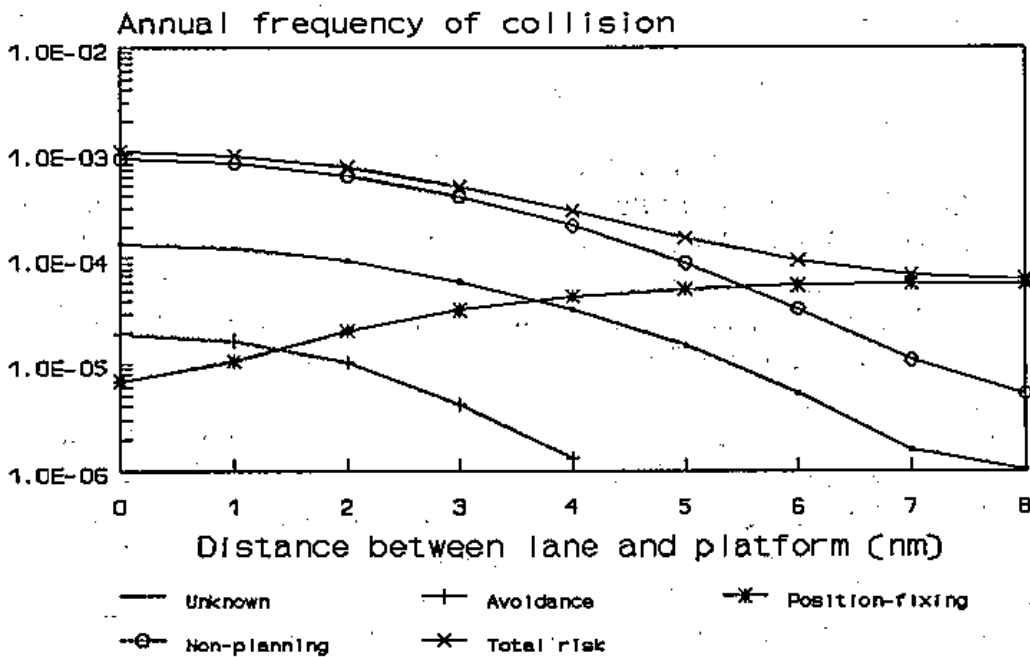


図 3-7 交通グループごとの年間船舶衝突件数 [43]

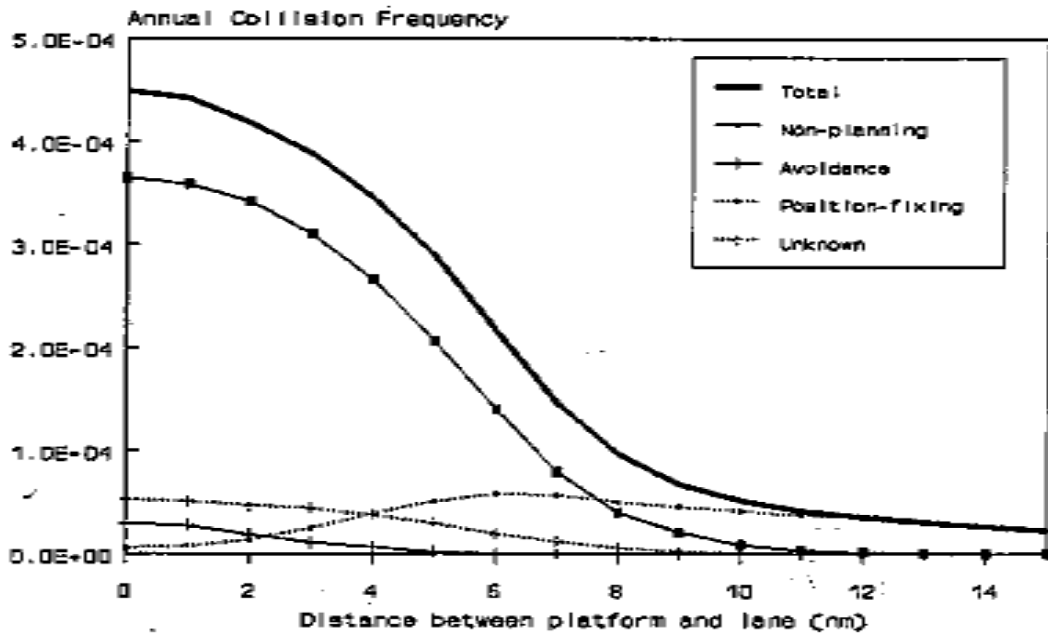


図 3-8 交通グループごとの年間船舶衝突件数 [45]

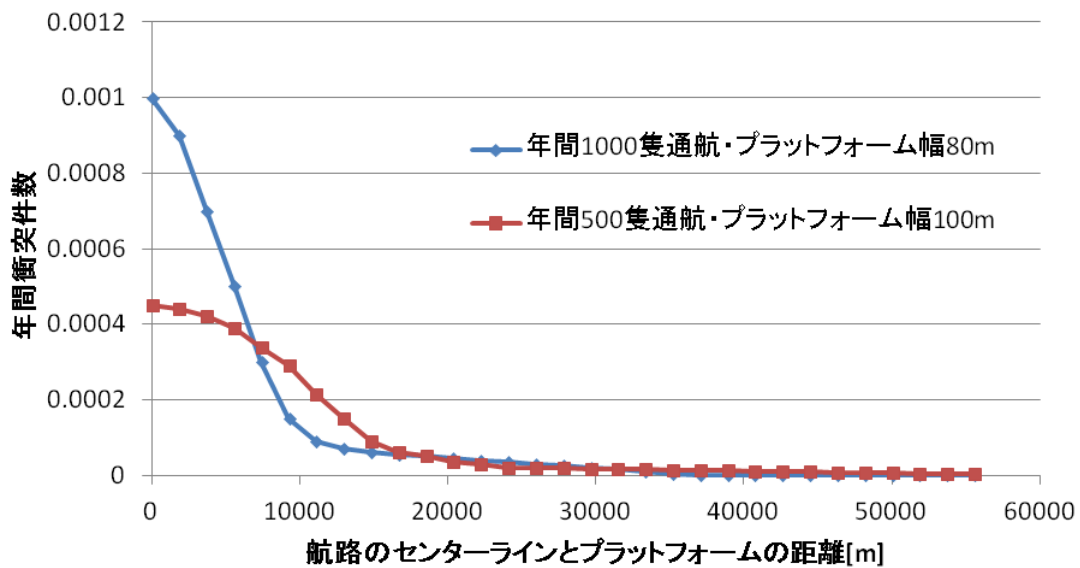


図 3-9 条件の違いによる Total の年間衝突件数の比較

### 3.3.2.2. 本研究への適用

ここまで紹介してきた確率の求め方の中には、 $F_{SD}$ や $F_{PP,1}$ などの求め方が分からない関数が含まれているため、このまま使用することができない。そこで、計算条件が同様であれば図 3-7 や図 3-8 の計算結果をそのまま使用できると考え、日本周辺海域での計算条件について以下に考察する。

まず、Haugen らのモデル [43] では、何も障害物がない海域での船舶通航分布はガウス分布で近似できるとしている。そこで、日本周辺海域における通航船舶の AIS 情報を利用し、

数ヶ所の船舶通航分布を確認することにする。

### (1) 野島崎沖

伊藤ら [46]によると、野島崎から御宿までの航路を通航する船舶の AIS 情報の解析結果から、航路の幅方向の船舶通航分布形状は、正規分布で近似するのは難しいが、ガンマ分布による近似であればほぼ表現可能であることが示されている（図 3-10）。

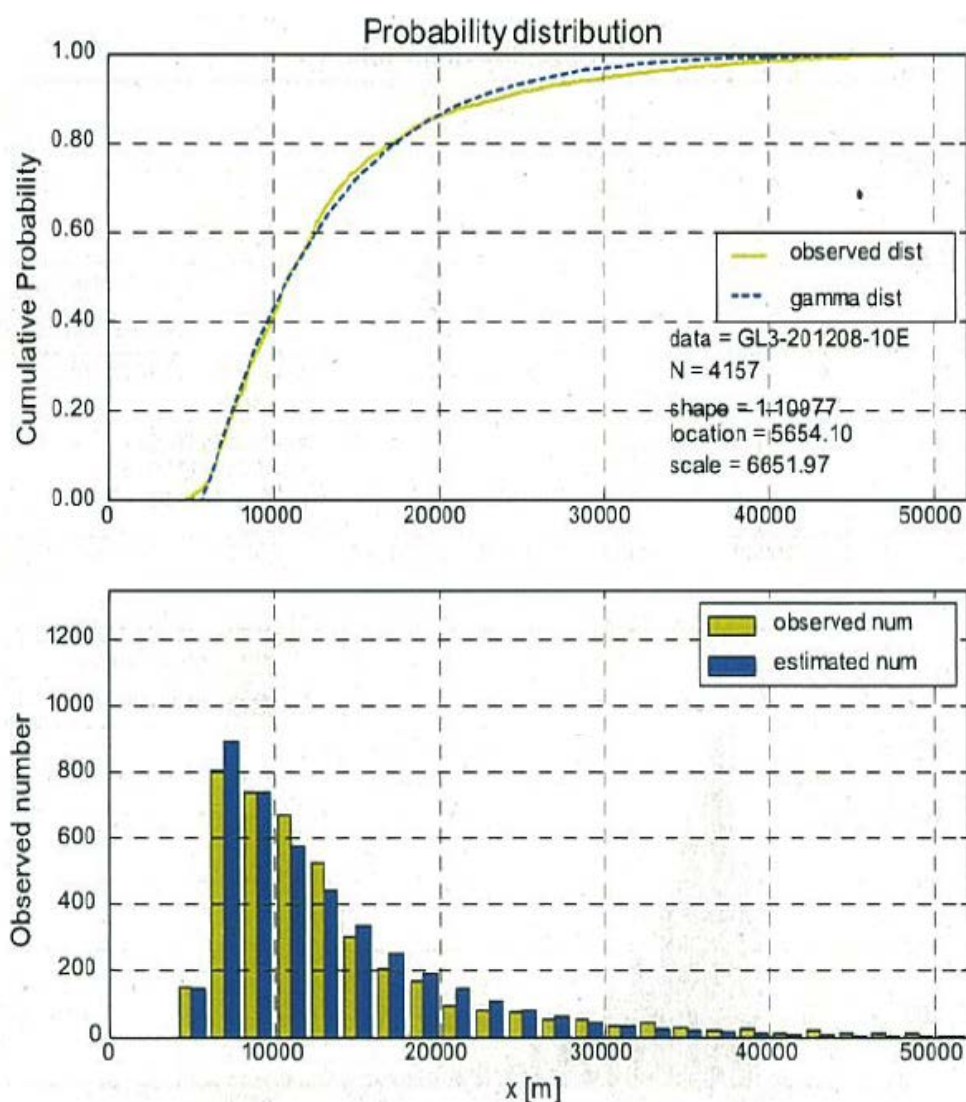


図 3-10 野島崎沖ゲート GL3 での通航船舶の幅方向分布 [46]

### (2) 岩手沖

図 3-11 の赤枠内を 2014 年 1 月の 1 ヶ月間に通航した船舶の AIS 情報の解析データ \* [47] を利用し、この図中の 3 本のゲートを通じた船舶の、航路幅方向の分布を図 3-12 から 図

\* 東洋信号通信社から購入したものを"Ship Traffic Counter ver.1.0"（開発者：海上技術安全研究所 伊藤博子，財団法人ソフトウェア情報センター登録番号：P 第 1 0 2 0 8 号 - 1，登録日：H25.3.28）で解析した。



3-14 に示す。ただし各ゲートの原点は陸側とする。図 3-11 の赤枠内の南西部に位置する牡鹿半島沖から Gate 2 の原点までは、陸側に緩やかにカーブしており、この内部に設定した Gate 0 と Gate 1 での船舶通航分布は正規分布に近い形状をしているが、Gate 2 での分布は野島崎と同様のガンマ分布に近い形状をしている。

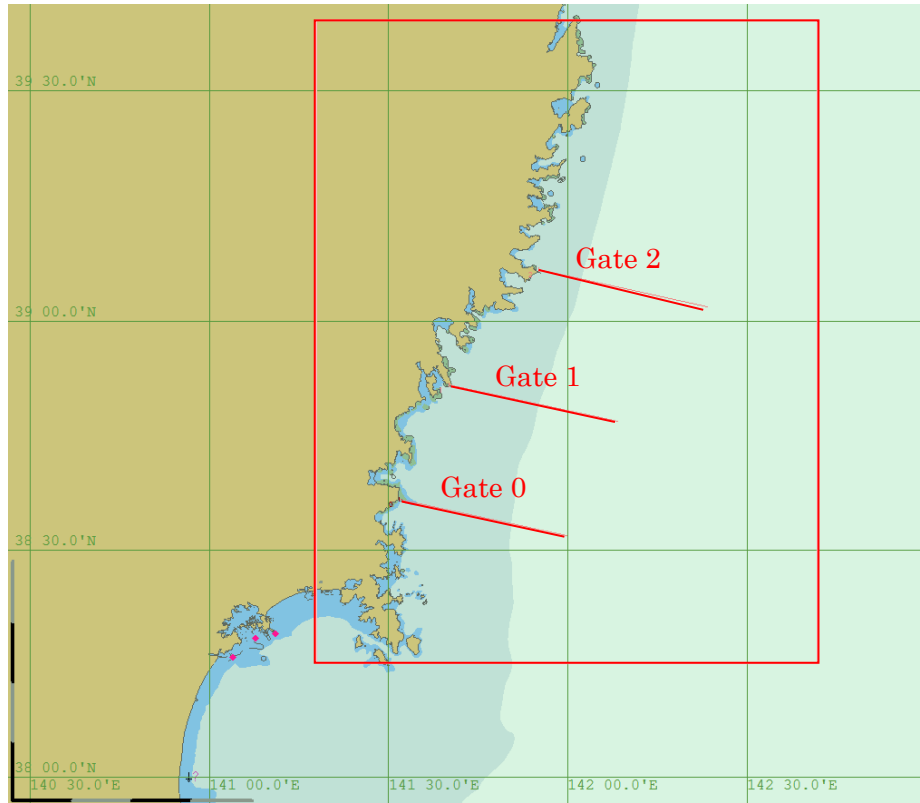


図 3-11 岩手沖の通航船舶の AIS 情報解析範囲とゲートの位置

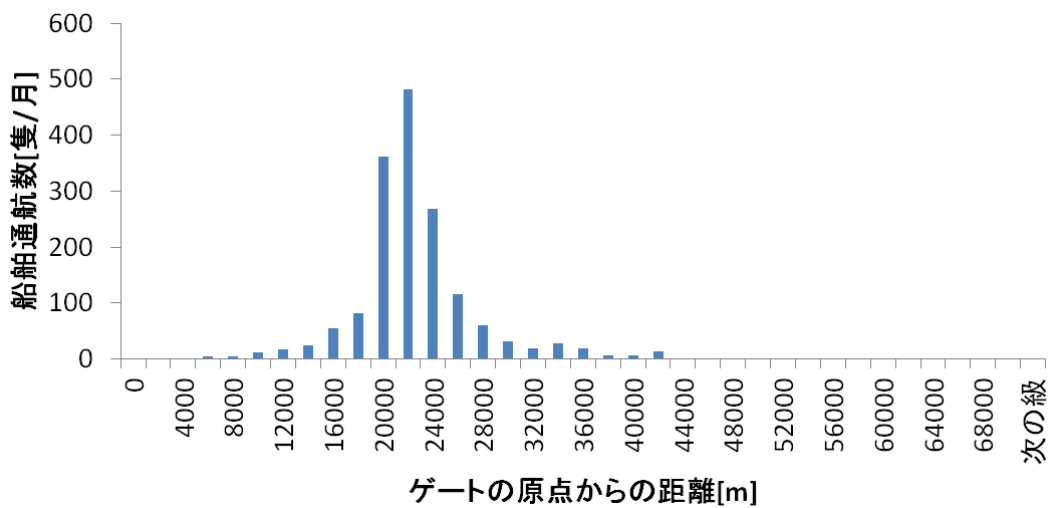


図 3-12 岩手沖ゲート 0 における通航船舶の幅方向分布

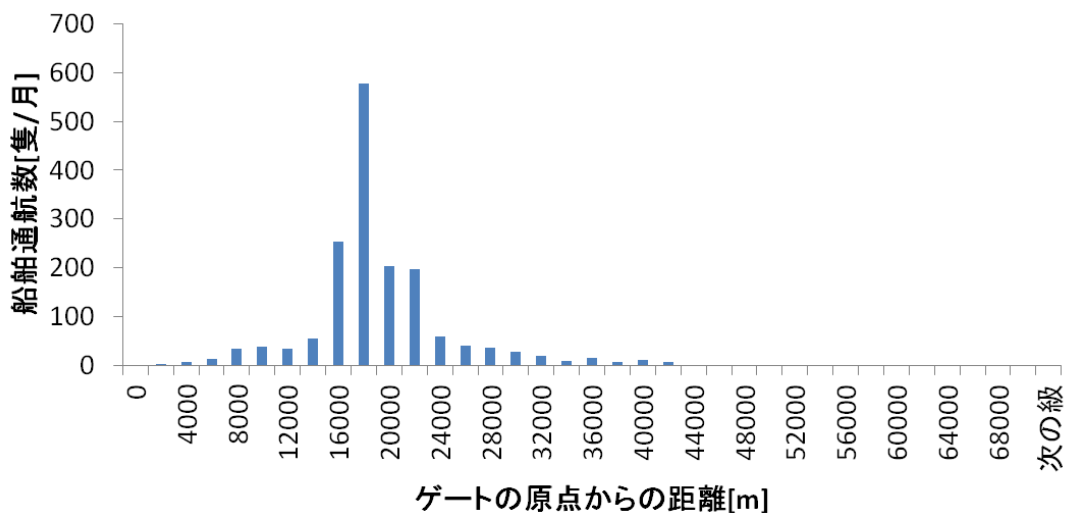


図 3-13 岩手沖ゲート 1 における通航船舶の幅方向分布

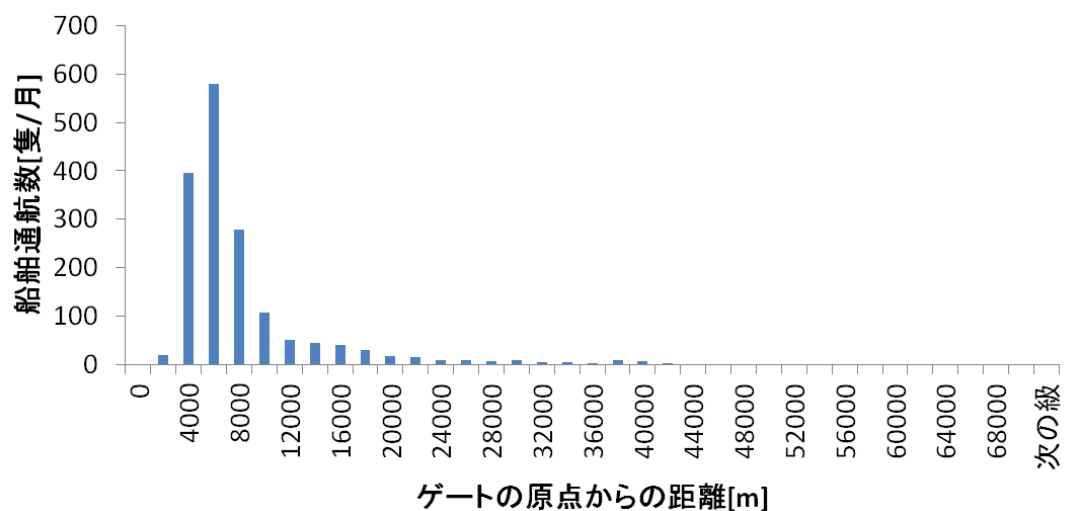


図 3-14 岩手沖ゲート 2 における通航船舶の幅方向分布

これらデータの分析結果から、海に向かって凹形状の海岸を原点とするゲートにおける船舶の航路幅方向分布は正規分布に近いが、凸形状の海岸を原点とするゲートの場合はガンマ分布に近くなる傾向があるように思われる。船舶事故ハザードマップ [48]における船舶通航量の分布を見ても同様な傾向が確認できる。ただし、凹形状の海岸においてもその内部に主要な港がある場合はこの限りではない。

以上により、海に向かって凹形状かつ主要港の少ない海岸では、Haugen ら [43]が仮定しているような正規分布の通航船舶分布が見られる可能性が高いが、船舶事故ハザードマップ [48]における船舶通航量の分布を日本周辺海域全体で見ると、この条件を満たす海域は少なく、正規分布で近似できる海域は日本周辺海域では主流ではないと考えられる。

従って、日本周辺海域で Haugen ら [43]が提案するモデルを利用して計算する場合、Haugen ら [43]が示す計算結果の場合とは条件が異なる可能性があり、この計算結果をそのまま本研究に適用できないことになる。

そこで本研究では、以下の手順で $P_{CPP}(= N \times p_{12})$ を求めることにする。

年間衝突件数 $P_{CPP}$ を求める式(3-11)を簡略化すると、下記のように示すことができる。

$$P_{CPP}(D_L) = N \times P_{CC}(D_L) \times P_{FSIR} \quad \dots (3-19)$$

ここで、 $N$ ：年間船舶通航数、 $D_L$ ：航路の中心からプラットフォームまでの距離、 $P_{CC}$ ：風力発電施設の 12 nm 手前において船舶が施設への衝突コースにいる確率 (全ての交通グループについての確率を合計したものとす)、 $P_{FSIR}$ ：衝突コースにいる船舶が衝突回避に失敗する確率であり、 $P_{CC}$ は $D_L$ に依存する。また、 $P_{CC}$ や $P_{FSIR}$ は、船種や船のサイズに依存せず、エリア内には航路が 1 本しかないと仮定している。なお、 $P_{FSIR}$ は風力発電施設の場合は基本的に無人であるからここでは無視した。

各変数の算出方法を下記に示す。

- $P_{CC}$ ：風力発電施設の 12 nm 手前において船舶が施設への衝突コースにいる確率

風力発電施設の 12 nm 手前での船舶通航分布は施設の有無に影響されないと仮定し、対象とする海域の航路幅方向の船舶通航分布を利用して求める。ただし、 $P_{CC}$ は $D_L$ の関数であり、 $D_L$ は本研究の解析対象エリア内にある風力発電施設設置位置(i, j)の中心から航路中心までの距離とし、(i, j)の位置に応じて変化させる。また、プラットフォーム幅は本研究の解析対象である三角形セミサブ型浮体の幅、82 m を用いる。

- $P_{FSIR}$ ：衝突コースにいる船舶が衝突回避に失敗する確率

この確率の算出には、ヒューマンエラーと機器故障の発生確率および発生した時のプラットフォームへの衝突確率を求めなければならない。後者については表 3-4 を参考にすることができるが、前者の各エラーの発生確率を推定するのは困難であるため、本研究ではこれらを別々に求めるのではなく、図 3-7 および図 3-8 を基に $P_{FSIR}$ を求めることを考える。以下にその推定方法を示す。

この式において $P_{FSIR}$ は、プラットフォームの 12 nm 手前で衝突コースにいる船舶が衝突回避に失敗する確率であるから、この段階では、もはや交通グループによる違いは小さくなっている [44]。また、これは $D_L$ とは関係なく発生すると考えられるので、全ての $D_L$ について $P_{FSIR}$ は一定と仮定すると、図 3-7 および図 3-8 の年間衝突件数 $P_{CPP}$ が $D_L$ によって変化しているのは $P_{CC}$ の変化のみによるものと考えられる。 $P_{CC}$ は交通グループによって分布形状が異なるが、Total の分布形状を見るとほぼ正規分布に近いと考えられるので、これらの図の分布形状に近似できるように標準偏差を調整し、正規分布のグラフを作成すると、図 3-7 の場合は標準偏差 2.5、図 3-8 の場合は標準偏差 4.5 と推定された (図 3-15、図 3-16)。

以上により求められた正規分布が、それぞれの場合における船舶通航分布であると仮定すると、これを利用して図 3-7 および図 3-8 における $P_{CC}$ の推定が可能となる。図 3-17 に示すように、 $P_{CC}$ は船舶通航分布のグラフにおいて、プラットフォームが設置されている幅に分布する船舶の数として計算される。上記で推定した船舶通航分布を利用し、プラットフォー

ムの位置を1海里ずつ移動してそれぞれの位置での $P_{CC}$ を求め、これらの値と年間船舶通航数 $N$ 、図3-7または図3-8から読み取った $P_{CPP}$ を利用して、 $P_{FSIR}$ を求めることができる。

この計算結果を図3-7の条件について示したのが表3-5、図3-8の条件について示したのが表3-6である。どちらの場合においても、 $D_L$ が小さい範囲では $P_{FSIR}$ がほぼ一定値になっているが、 $D_L$ が大きい場所では $P_{FSIR}$ が大きめに推定されている。この理由として、図3-7および図3-8のPosition-Fixingの衝突確率の影響が考えられる。これらの分布を見ると、 $D_L$ が大きくなるにつれて衝突確率が大きくなっており、正規分布には遠い分布形状をしているが、それ以外の交通グループの分布を見ると、 $D_L$ が大きくなるにつれて衝突確率が小さくなっていくことが分かる。また、図3-7および図3-8においてTotalの分布に占めるNon-Planningの割合が大きいことが確認できる。HaugenらのモデルにおいてNon-Planningの船舶通航分布は正規分布で仮定されているので、この分布の割合が大きいTotalの分布も正規分布に近い形状をしていると推定されるが、 $D_L$ が大きい範囲ではPosition-Fixingの影響により衝突件数が増加しているとみられる。

以上の考察結果から、 $D_L$ が大きい場所では $P_{CPP}$ の分布が正規分布から遠くなるため、これを正規分布で仮定して推定した $P_{FSIR}$ の値は採用すべきではないことが分かり、 $D_L$ の小さい範囲での $P_{FSIR}$ の推定値を採用するのが適当であると考えられる。 $D_L$ の小さい範囲での $P_{FSIR}$ の推定値はほぼ一定になっていることから、本研究では、この範囲での推定値の平均を $P_{FSIR}$ として利用することとし、 $P_{FSIR} = 1.76 \times 10^{-4}$ とする。

以上の手法により、 $P_{CC}(D_L)$ および $P_{FSIR}$ が求められ、これらと対象海域の年間船舶通航量を掛け合わせることで $P_{CPP}(D_L)$ が求められる。

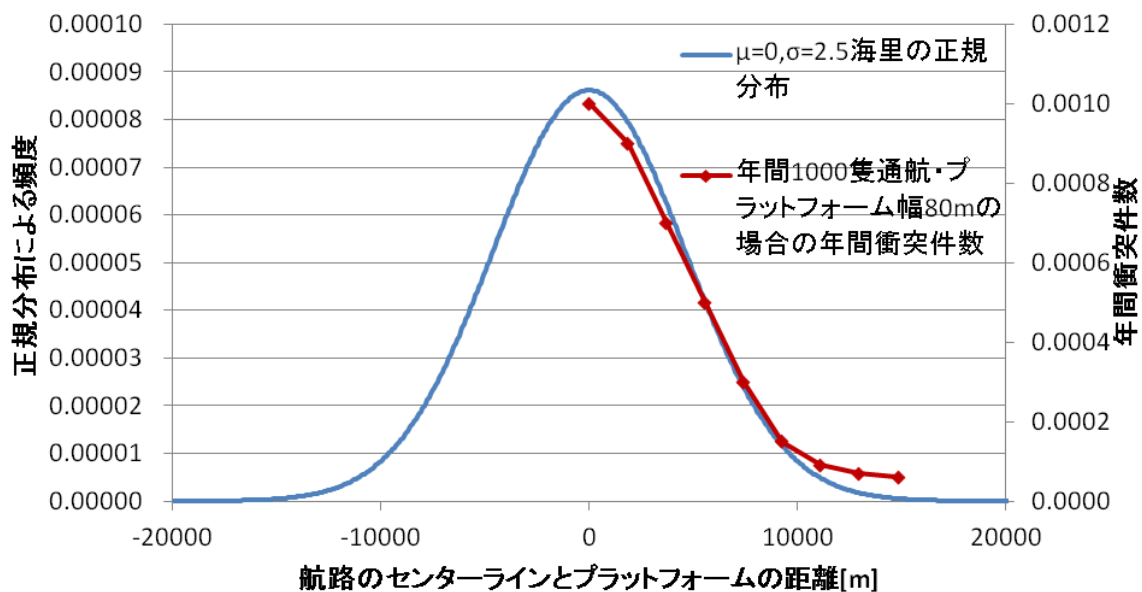


図3-15 年間通航船舶1000隻・プラットフォーム幅80mの場合の年間衝突件数の分布形状とこれに近似した正規分布形状（年間衝突件数は図3-6から読み取ってグラフを作成）

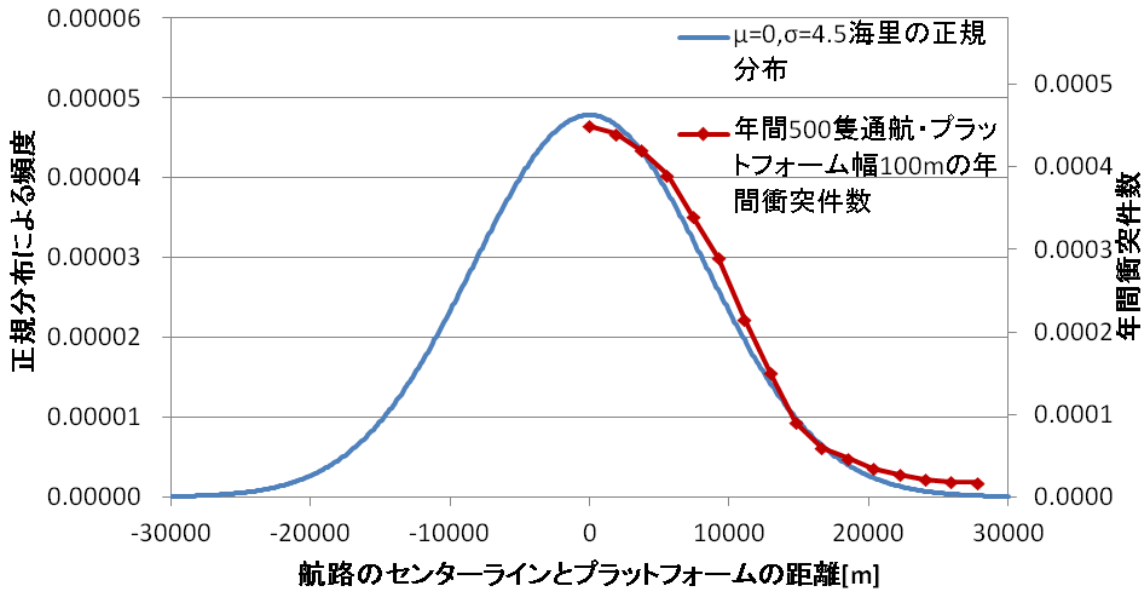


図 3-16 年間通航船舶 500 隻・プラットフォーム幅 100 m の場合の年間衝突件数の分布形状とこれに近似した正規分布形状（年間衝突件数は図 3-7 から読み取ってグラフを作成）

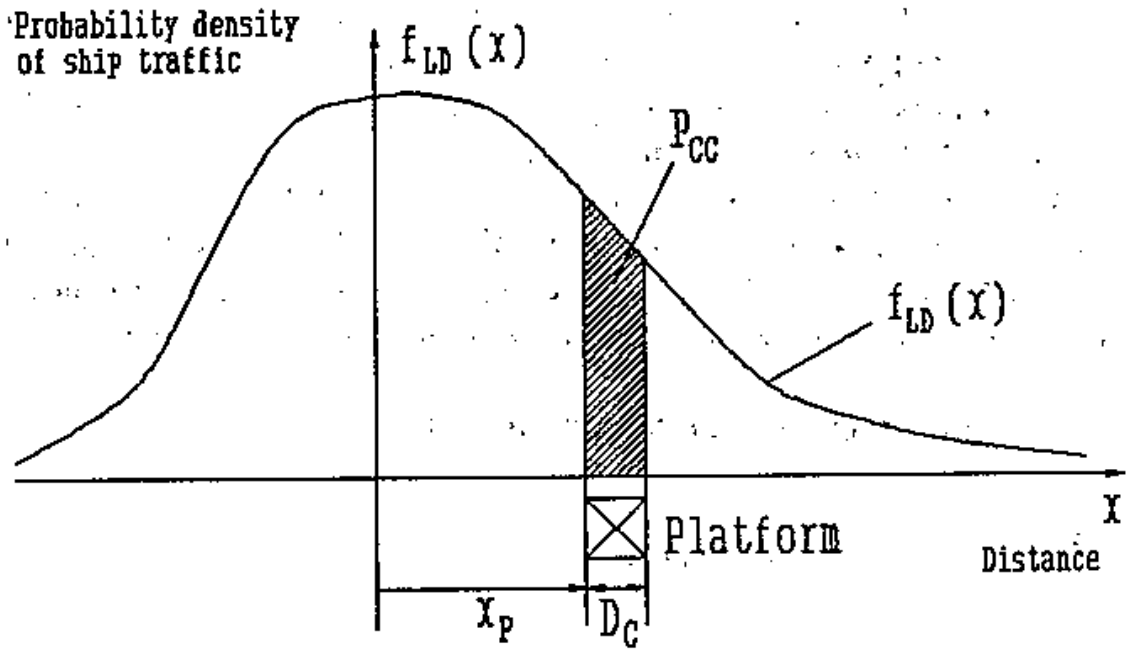


図 3-17  $P_{cc}$  の計算の概念図 [43]

表 3-5 年間通航船舶 1000 隻・プラットフォーム幅 80 m の場合の衝突回避失敗確率の推定

航路と 施設の 距離 $D_L$ [nm]	航路に近い方 の施設端まで の累積分布 $P(x < D_L)$	航路から遠い 方の施設端ま での累積分布 $P(x < D_L + 80)$	12 nm 手前で衝突 コースにいる確率 $P_{CC} = P(D_L < x < D_L + 80)$	衝突回避失 敗確率 $P_{FSIR}$	年間衝突件 数 $P_{CPP}$
0	0.500	0.507	$6.89 \times 10^{-3}$	$1.45 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-3}$
1	0.655	0.662	$6.34 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-4}$	$9.00 \times 10^{-4}$
2	0.788	0.793	$4.97 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-4}$	$7.00 \times 10^{-4}$
3	0.885	0.888	$3.32 \times 10^{-3}$	$1.51 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-4}$
4	0.945	0.947	$1.89 \times 10^{-3}$	$1.59 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$
5	0.977	0.978	$9.17 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-4}$
6	0.992	0.992	$3.79 \times 10^{-4}$	$2.37 \times 10^{-4}$	$9.00 \times 10^{-5}$
7	0.997	0.998	$1.34 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-4}$	$7.00 \times 10^{-5}$
8	0.999	0.999	$4.01 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-5}$

表 3-6 年間通航船舶 500 隻・プラットフォーム幅 100 m の場合の衝突回避失敗確率の推定

航路と 施設の 距離 $D_L$ [nm]	航路に近い方 の施設端まで の累積分布 $P(x < D_L)$	航路から遠い 方の施設端ま での累積分布 $P(x < D_L + 80)$	12 nm 手前で衝突 コースにいる確率 $P_{CC} = P(D_L < x < D_L + 80)$	衝突回避失 敗確率 $P_{FSIR}$	年間衝突件 数 $P_{CPP}$
0	0.5	0.505	$4.79 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-4}$
1	0.588	0.593	$4.66 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$4.40 \times 10^{-4}$
2	0.672	0.676	$4.33 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-4}$	$4.20 \times 10^{-4}$
3	0.748	0.751	$3.82 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-4}$	$3.90 \times 10^{-4}$
4	0.813	0.816	$3.21 \times 10^{-3}$	$2.12 \times 10^{-4}$	$3.40 \times 10^{-4}$
5	0.867	0.869	$2.57 \times 10^{-3}$	$2.26 \times 10^{-4}$	$2.90 \times 10^{-4}$
6	0.909	0.911	$1.95 \times 10^{-3}$	$2.20 \times 10^{-4}$	$2.15 \times 10^{-4}$
7	0.940	0.942	$1.41 \times 10^{-3}$	$2.12 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-4}$
8	0.962	0.963	$9.75 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-4}$	$9.00 \times 10^{-5}$
9	0.977	0.978	$6.40 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$6.00 \times 10^{-5}$
10	0.987	0.987	$4.00 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-5}$
11	0.993	0.993	$2.38 \times 10^{-4}$	$2.94 \times 10^{-4}$	$3.50 \times 10^{-5}$
12	0.996	0.996	$1.35 \times 10^{-4}$	$4.46 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-5}$
13	0.998	0.998	$7.25 \times 10^{-5}$	$5.52 \times 10^{-4}$	$2.00 \times 10^{-5}$
14	0.999	0.999	$3.72 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-5}$
15	0.999	0.999	$1.81 \times 10^{-5}$	$1.98 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-5}$

### 3.3.3. 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率

ある地点(i, j)にある風力発電施設に漂流船舶が衝突した場合の風力発電施設漂流確率を  $P_{13\_1}(i, j)$  とおくと、下記の式で表される。この確率は、環境外力や船舶の衝突速度に依存するため、 $p_{11}(i, j)$  の計算と切り離すことができないので、これらを同時に計算し、 $p_{13\_1}(i, j)$  のみの確率を求めるにはこれを  $p_{11}(i, j)$  で除せば良い。

$$P_{13\_1}(i, j) = \frac{1}{p_{11}(i, j)} \frac{1}{n_s} \sum_k \sum_l \sum_{\theta_w} \sum_{v_w} \sum_{\theta_c} \sum_{v_c} \sum_{is} \{ \delta_{WD1}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \times p_{WD1}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \} \quad \dots (3-20)$$

ただし、

$$\delta_{WD1} = \begin{cases} 1 & \left( E_{all} \leq \left\{ E_{envf}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c) + E_{envs}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \right. \right. \\ & \left. \left. + E_{envd}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) + E_{ds}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is) \right\} \right) \dots (3-21) \\ 0 & \text{(上記以外の場合)} \end{cases}$$

ここで、 $\delta_{WD1}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  においてある地点(k, l)から漂流したサイズ is の船舶の、ある地点(i, j)にある風力発電施設への衝突かつ施設の漂流判定関数、 $p_{WD1}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : 漂流船舶のサイズが is であり、かつ漂流時の環境条件が  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  である確率、 $E_{all}$  : 施設の全係留索が吸収可能なエネルギー [kJ]、 $E_{envf}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  で風力発電施設が受ける環境外力のエネルギー [kJ]、 $E_{envs}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  のとき (k, l) から漂流したサイズ is の船舶が (i, j) に設置された風力発電施設に衝突した後、施設と一体になったまま船体が受け続ける環境外力のエネルギー [kJ]、 $E_{envd}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  でサイズ is の船舶が衝突してきたとき、風力発電施設と漂流船舶が受け続ける環境外力による、船舶衝突後の浮体移動に伴うエネルギー [kJ]、 $E_{ds}(i, j, k, l, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c, is)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  のとき (k, l) から漂流したサイズ is の船舶が (i, j) に設置された風力発電施設に衝突した後、両者が一体となって移動する際の運動エネルギー [kJ] である。これらの変数の算出方法を以下にまとめて説明する。

漂流船舶の衝突判定は3.3.1での説明の通りであり、そこで衝突と判定された場合にのみ、施設の漂流判定に進む。船舶衝突による荷重が係留索の最小破断荷重を超過した時、風力発電施設の係留索が破断し、3本とも破断すると施設の漂流に至る。このとき、3本の係留索が切れる原因は同一とし、自然条件のみによる破断と船舶の衝突による破断の複合は考えない。

漂流船舶の衝突時に係留索が受ける荷重は、衝突エネルギー  $E_{ds}$  によって浮体が移動することによる荷重のほかに、衝突後の船舶が浮体と一体となったまま船体に受け続ける環境外力  $F_{envs}$  や、風力発電施設自身が受ける環境外力  $F_{envf}$  が考えられる。また、船舶衝突後に浮体が移動している間に浮体には環境外力による荷重  $(F_{envs} + F_{envf})$  が加わり続けているため、

浮体の移動に伴うエネルギーには、 $E_{envd}$ が含まれている。これらの荷重・エネルギーを各条件において計算し、漂流の有無を判定する。

係留索は一方の端を風力発電施設の浮体に取り付けられ、もう一方は海底にアンカーで固定されており、この2点の距離によって係留索に働く張力は変化する。そこで、以下のように係留索張力の計算を行う。

カテナリー係留索の張力計算式 [49]を用いると、 $x$ 方向（水平方向）および $z$ 方向（鉛直方向）の索張力 $T_x$ および $T_z$ は下記ようになる。ただし、「係留索は一方の端 A 点でアンカーにより海底に固定され、他方の端 B 点で浮体に取り付けられている」 [49]。このとき、 $X$ はアンカーの地点を基準 ( $X=0$ ) にした水平方向（直線 AB と平行な方向）の浮体変位であり、その他の変数は表 3-3 のパラメータの通りである。

索が海底でたるんだ状態

$$T_x = 0 \quad \dots (3-22)$$

$$T_z = WZ \quad \dots (3-23)$$

AB 間の一部は海底を這い、他の部分は懸垂線を描く状態

$$\begin{aligned} T_x^6 + EA \left(5 - \frac{2X}{S}\right) T_x^5 + (EA)^2 \left\{10 - \frac{8X}{S} + \left(\frac{X}{S}\right)^2\right\} T_x^4 + (EA)^3 \left\{10 - \frac{12X}{S} + 3\left(\frac{X}{S}\right)^2\right\} T_x^3 \\ + (EA)^4 \left(1 - \frac{X}{S}\right) \left(5 - \frac{3X}{S}\right) T_x^2 + (EA)^5 \left(1 - \frac{X}{S}\right)^2 T_x - \frac{2WZ^3(EA)^5}{9S^2} = 0 \quad \dots (3-24) \end{aligned}$$

$$T_z = \sqrt{\frac{2WZT_x}{\left(1 + \frac{T_x}{EA}\right)}} \quad \dots (3-25)$$

AB 間全体が海底から持ち上がり、懸垂線を描く状態

$$\begin{aligned} T_x^5 + EA \left(3 - \frac{X}{S}\right) T_x^4 + (EA)^2 \left(3 - \frac{2X}{S}\right) T_x^3 + \left\{(EA)^3 \left(1 - \frac{X}{S} - \frac{1}{2}\left(\frac{Z}{S}\right)^2\right) - \frac{EAW^2S^2}{24}\right\} T_x^2 \\ - \frac{(EA)^2W^2S^2}{12} T_x - \frac{(EA)^3W^2S^2}{24} = 0 \quad \dots (3-26) \end{aligned}$$

$$T_z = \frac{ZT_x}{S\left(1 + \frac{T_x}{EA}\right)} + \frac{WS}{2} \quad \dots (3-27)$$



上記の①と②の状態の間の境界 $X_1$ （海底での索のたるみがなくなるときの  $X$ ）

$$X_1 = S - Z + \frac{WZ^2}{2EA} \quad \dots (3-28)$$

上記の②と③の状態の間の境界 $X_2$ （索の海底を這う部分がなくなるときの  $X$ ）

$$X_2 = S + \frac{WS^3}{2ZEA - WS^2} - \frac{(2ZEA - WS^2)^2}{6S(EA)^2} \quad \dots (3-29)$$

上記の式を表 3-3 のパラメータを用いて解き、 $X$  の変化に伴う  $T_x$  の変化を計算した結果を図 3-18 に示す。ここで、索張力  $T$  は  $T_x$  と  $T_z$  の二つの力の合力である。係留索の破断は  $T \geq MBL$  となったときに発生するが、船舶の衝突時に風力発電施設に働く環境外力および船舶衝突による荷重はほぼ水平方向にのみ働くので、 $T \approx MBL$  となるとき  $X$  および  $T_x$  の値を読み取り、 $X$  が初期位置からこの位置まで移動するために必要となるエネルギーを  $T_x$  の積分によって求めると、係留索の破断に必要なエネルギーとなる。しかし船舶の衝突による破断の判定をする際、環境外力は力で与えるのに対し、船舶の衝突による荷重はエネルギーで与えるため、それぞれ別に考える必要がある。この考え方の説明に当たり、図 3-18 の横軸を初期位置からの移動量  $X$  [m]、縦軸を初期張力からの水平方向張力の増加分  $F_x$  [kN] として描き直したものを、図 3-19 に示し、これを利用して係留索の破断に至る荷重・エネルギーの考え方を図 3-20 に示す。ただし、本研究の設定では  $MBL$  は環境条件によって異なる。ここでは海域 No.1 の環境条件を用いて計算した例を示す。

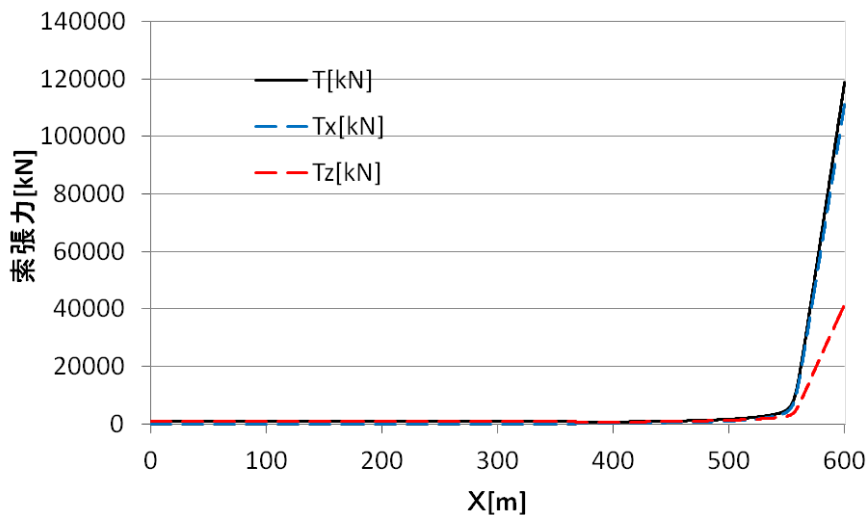


図 3-18 アンカー点を原点とした場合の係留索の移動距離と移動に伴う索張力の変化  
 (ここでの  $X$  は、解析対象エリアの  $X$  とは異なり、アンカー位置から浮体の係留索取り付け点を結んだ方向を指す。)

図 3-20 において、 $T \approx MBL$  となるときに  $T_x$  を  $T_{XMBL}$ 、このときの荷重を  $F_{XMBL}$ 、初期張力を  $T_{ini}$  とおくと、 $F_{XMBL} = T_{XMBL} - T_{ini}$  となり、このときの初期位置からの移動量を  $X_{MBL}$  とおく。まず、初期状態に環境外力のみが働いている状態を考え、環境外力による荷重を  $F_{env}$ 、この力による浮体の移動量を  $X_{env}$  とおく。

次に浮体が  $X_{env}$  の位置から  $X_{MBL}$  まで移動するのに必要なエネルギーを求め、船舶衝突によるエネルギーと比較する。ただし、上記の初期張力と環境外力のみが働いている状態で浮体が  $X_{env}$  の位置に停止していても、環境外力は働き続けていると考えられるので、船舶衝突によるエネルギーで浮体が移動し始めた場合、その移動に伴うエネルギーには環境外力によるエネルギーも含まれていると考えられる。従って、船舶衝突によるエネルギーと比較するのは、この環境外力によるエネルギーを差し引いた、図 3-20 のオレンジ色で塗りつぶされた面積で示されるエネルギー  $E_b$  である。(この  $E_b$  の下の長方形部分  $E_{envd}$  が、船舶衝突エネルギーによって浮体が移動し始めたあとの環境外力による浮体の移動エネルギーを表している。) この  $E_b$  の 3 倍を超えるエネルギーが船舶の衝突によって発生すると、風力発電施設の漂流に至ると仮定する。

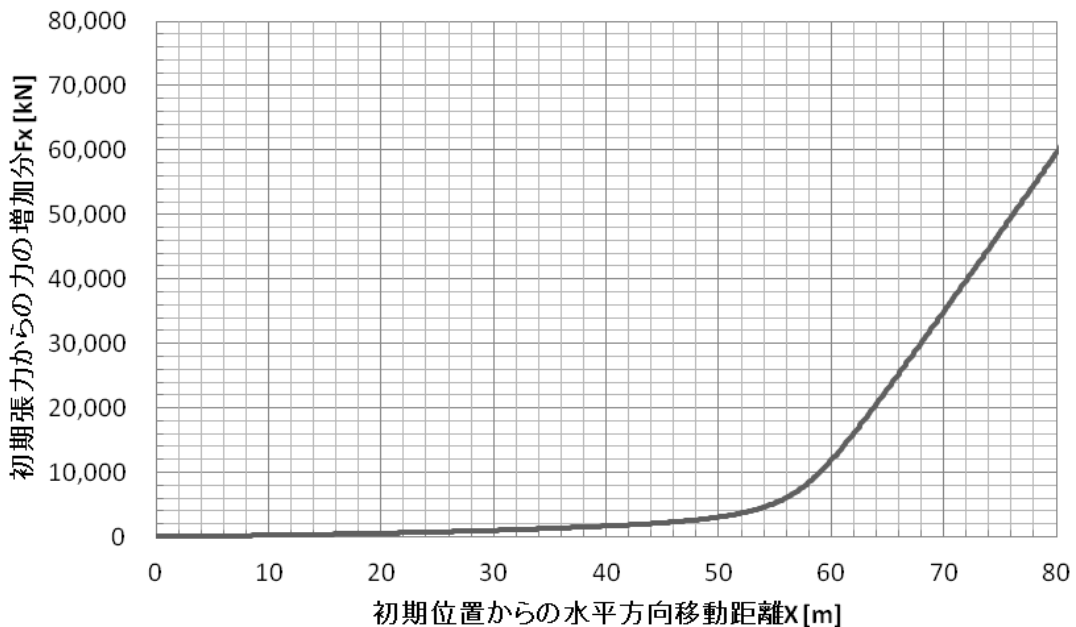


図 3-19 浮体の初期位置を原点とした場合の係留索の移動距離と移動に伴う索張力の変化

ここで、浮体のどの方向から外力が加わるかによって係留索の破断に必要なエネルギーが変化するのではないかと疑問が出てくる。本研究では 3 本係留を仮定しており、このうちの 1 本に沿った方向に荷重が加わる場合と、2 本の間位置から荷重が加わる場合でどのように相違があるか、以下に検証を行う。

(1) 1 本の係留索と同一線上に荷重が加わる場合

この場合の係留索と荷重の方向を図 3-21 に示す。

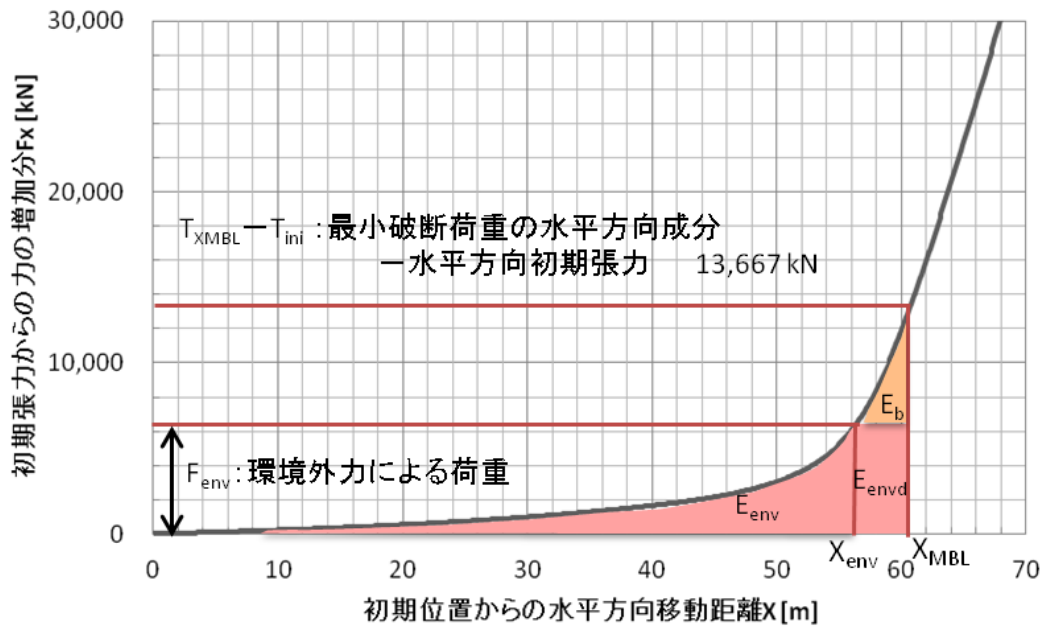


図 3-20 係留索の破断に至る荷重・エネルギーの考え方 (図 3-19 の一部を拡大して作成, 破断荷重や初期張力は海域 No.1 の環境条件を用いて設定したもの)

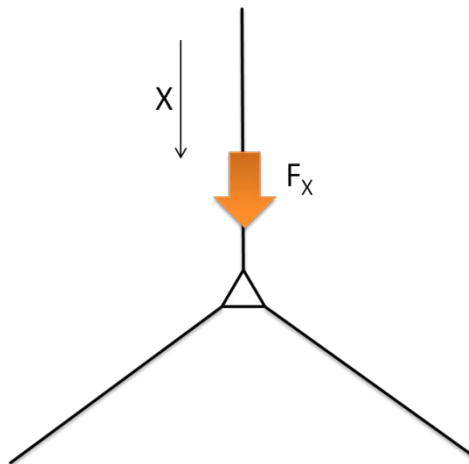


図 3-21 1本の係留索と同一線上に荷重が加わる場合の係留索と荷重の方向

この場合は、1本の係留索について、アンカー点と浮体への取り付け点を結ぶ直線上での移動のみを考えれば良いので、上記の方法で $E_b$ を求めれば良い。一例として環境外力による荷重を $F_{env} = 1,000$  [kN]として計算すると、この荷重により図 3-21 の上部の係留索には初期張力から 1,000 kN の張力が増加し、このとき浮体の初期位置からの水平方向移動量は $X_{env} = 30.3$  [m]と求められる。また、この位置に至るまでの浮体移動に必要なエネルギーは $E_{env} = 12,617$  [kJ]となる。

次に、この状態から船舶の衝突によるエネルギー $E_{ds}$ が加わると、 $F_{env} = 1,000$  [kN]の力が働き続けたまま浮体が移動し始めるので、もし係留索破断に至る浮体位置 $X_{MBL} = 60.9$  [m]まで浮体が移動した場合には、この環境外力による移動エネルギーとして、

$$E_{\text{envd}} = F_{\text{env}} \times (X_{\text{MBL}} - X_{\text{env}}) = 1,000 \times (60.9 - 30.3) = 30,600 \text{ [kJ]} \quad \dots (3-30)$$

が働くことになる。一方、単に浮体移動距離が $X_{\text{MBL}}$ になるまでの初期位置からの移動に必要なエネルギーを求めると、 $E_X(X_{\text{MBL}}) = 119,475 \text{ [kJ]}$ となり、このエネルギーから上記のエネルギーを全て引くと、

$$E_b = E_X(X_{\text{MBL}}) - E_{\text{env}} - E_{\text{envd}} = 119,475 - 12,617 - 30,600 = 76,258 \text{ [kJ]} \quad \dots (3-31)$$

が残るので、船舶の衝突によるエネルギーがこれを超えると図 3-21 の上部の係留索 1 本が破断することになる。

(2) 2 本の係留索の間に荷重が加わる場合

この場合の係留索と荷重の方向を図 3-22 に示す。

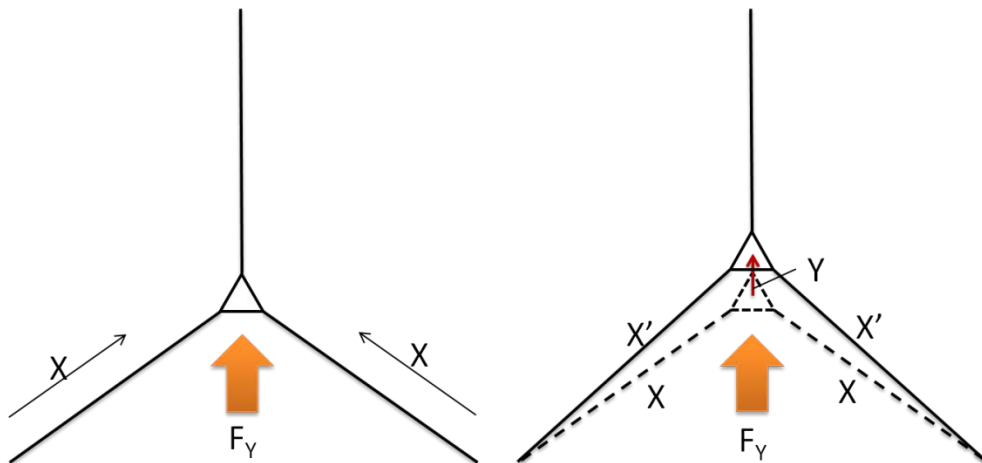


図 3-22 2 本の係留索の間に荷重が加わる場合の係留索と荷重の方向（左）とこの荷重による浮体の移動後の状態（右）

この場合、浮体の移動方向は浮体と係留アンカーをつなぐ方向と同一ではないので、2 本の係留索への力の配分と、その力によるそれぞれの係留索の水平方向長さの変化を求める必要がある。図 3-22 の右図のように、荷重 $F_Y$ によって浮体が移動した後の状態を考え、初期状態での 2 本の係留索のアンカーから浮体までの水平方向距離が  $X$ 、荷重 $F_Y$ による移動後の距離が  $X'$ 、荷重 $F_Y$ が加わる方向での浮体移動距離を  $Y$  とすると、 $X$  と  $Y$  の間の角度は 120 度なので、 $X'$  と  $Y$  はどちらかが分かればもう一方も余弦定理により計算可能となる。

$Y$  方向に $F_{\text{env}}[\text{kN}]$ の力が働いて浮体が  $Y[\text{m}]$ 移動したとき、移動後の係留索に働く張力  $T$  は、浮体の水平方向移動距離  $X'[\text{m}]$ に対する張力と考えれば良い。この張力は手前側の係留索 2 本に等しく働くので、 $T$  から初期張力 $T_{\text{ini}}$ を引いた力の  $Y$  方向成分の 2 倍が $F_{\text{env}}$ と釣り合うことになる。以上の関係を利用し、 $F_Y$  と  $T$  の関係を示したのが図 3-23 であり、 $Y$  と  $F_Y$  の

関係を示したのが図 3-24 である。2 本の係留索が破断するときの荷重 $F_{Y_{MBL}}$ は図 3-23 から求められ、 $T = T_{X_{MBL}}$ となるとき $F_{Y_{MBL}} = 17,390$  [kN]となり、このときの Y は 106.5 m である。

先に示した 1 本の係留索と同一線上に荷重が加わる場合と同様に、一例として $F_{env} = 1,000$  [kN]の場合を考えると、図 3-24 よりこのときの浮体の移動量は $Y_{env} = 52.0$  [m]と求められる。また、この位置に至るまでの浮体移動に必要なエネルギーは $E_{env} = 20,768$  [kJ]となる。

次に、この状態から船舶の衝突によるエネルギー $E_{ds}$ が加わると、 $F_{env} = 1,000$  [kN]の力が働き続けたまま浮体が移動し始めるので、もし係留索破断に至る浮体位置 $Y_{MBL} = 106.5$  [m]まで浮体が移動した場合には、この環境外力による移動エネルギーとして、

$$E_{envd} = F_{env} \times (Y_{MBL} - Y_{env}) = 1,000 \times (106.5 - 52.0) = 50,300 \text{ [kJ]} \quad \dots (3-32)$$

が働くことになる。一方、単に浮体移動量が $Y_{MBL}$ になるまでの初期位置からの移動に必要なエネルギーを求めると、 $E_Y(Y_{MBL}) = 238,777$  [kJ]となり、このエネルギーから上記のエネルギーを全て引くと、

$$E_b = E_Y(Y_{MBL}) - E_{env} - E_{envd} = 238,777 - 20,768 - 50,300 = 167,709 \text{ [kJ]} \quad \dots (3-33)$$

が残るので、船舶の衝突によるエネルギーがこれを超えると図 3-22 の下部の係留索 2 本が破断することになる。

この結果を先に示した 1 本の係留索と同一線上に荷重が加わる場合と比べてみると、約 2 倍のエネルギーになっている。このことから、船舶の衝突による係留索 1 本あたりの破断に必要なエネルギーはどちらの場合もほぼ同じであることが示された。さらに、それぞれの場合に $F_{env}$ の大きさを変えて検討した結果を図 3-26 に示す。これらの図から、 $F_{env}$ が大きい範囲では、同じ大きさの環境外力が働いたとき係留索 1 本あたりが吸収できる残りのエネルギーは後者の方がやや大きい、両方の場合においてほぼ同じ結果が得られることが分かった。

以上の検討結果より、1 本の係留索に沿った方向に荷重が加わる場合と、2 本の間から荷重が加わる場合では、係留索の破断に必要なエネルギーは大きく変わらないことが示されたので、本研究では荷重の加わる方向に関わらず、全ての条件について同じ評価方法を用いて風力発電施設の漂流を判定することにする。

ただし、ここでは環境外力や船舶の衝突による荷重が全て同一方向から加わることを前提としているが、実際には各荷重が別々の方向から加わる場合もあり、また、荷重の加わる方向も 1 本の係留索に沿った方向や 2 本の係留索のちょうど中間ではなく、2 本の間どちらか一方の係留索に近い場所から加わることもあるため、本来はより詳細な解析を行う必要がある。しかし、このような詳細な係留索の挙動を解析するためのプログラムは、既に数多く存在するため、本研究ではこれを詳細に解くことはせず、上記の検討により、簡易的な解析法として全方向について同じ評価方法を用いることを提案する。

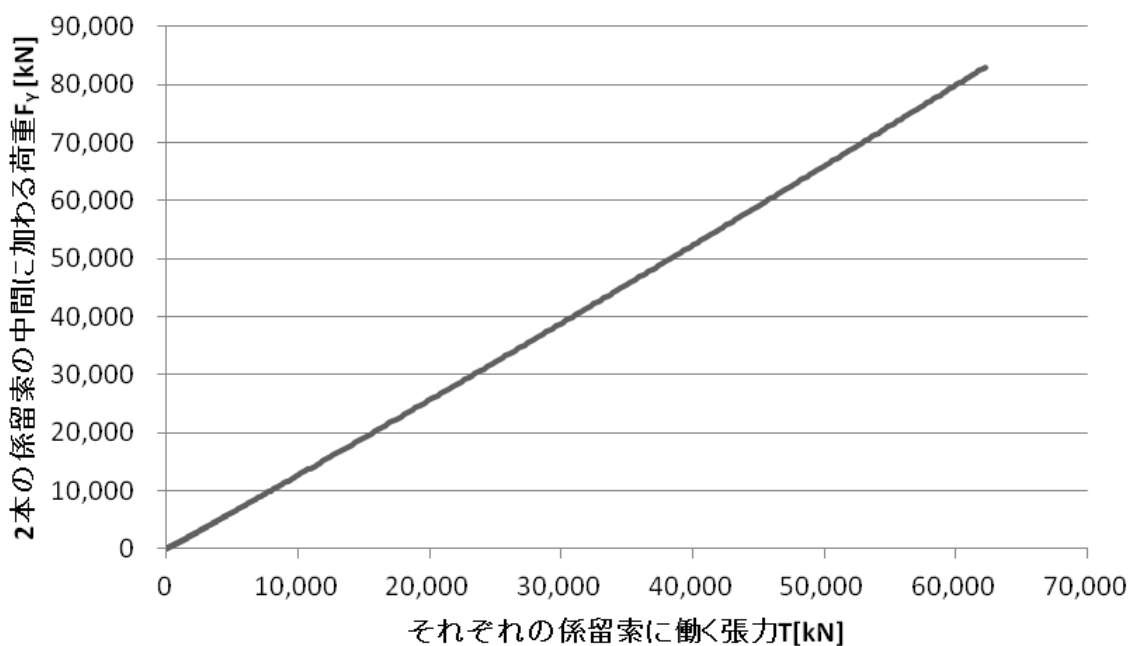


図 3-23 2本の係留索の中間に加わる荷重の大きさ $F_Y$ とそれぞれの係留索に働く張力 $T$ との関係（海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合）

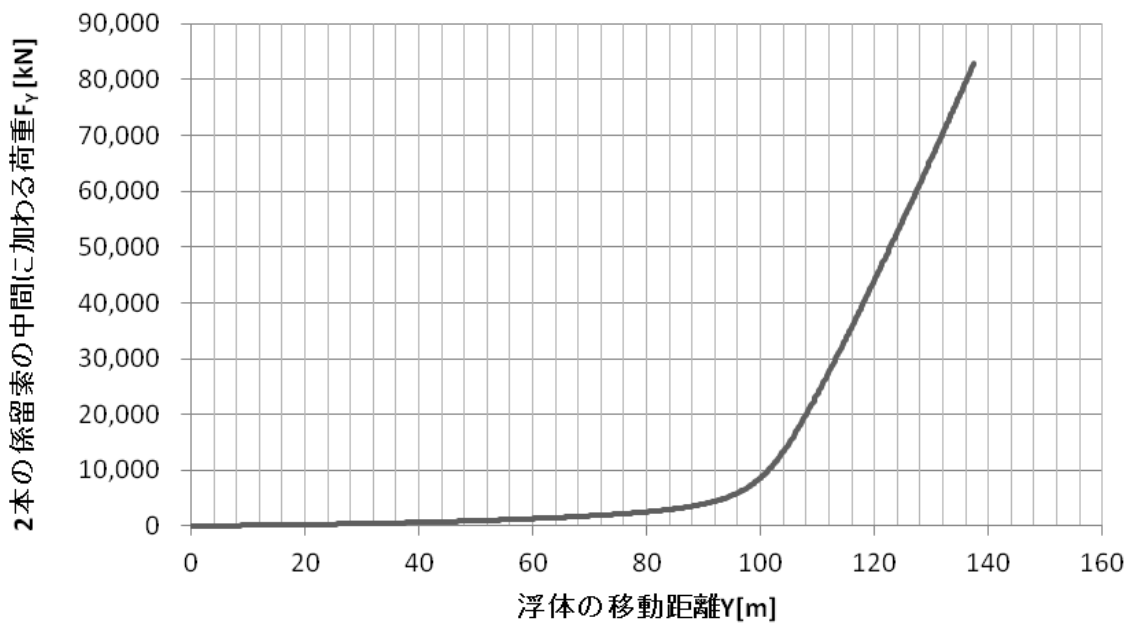


図 3-24 2本の係留索の中間に加わる荷重の大きさ $F_Y$ と浮体の移動距離 $Y$ との関係（海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合）

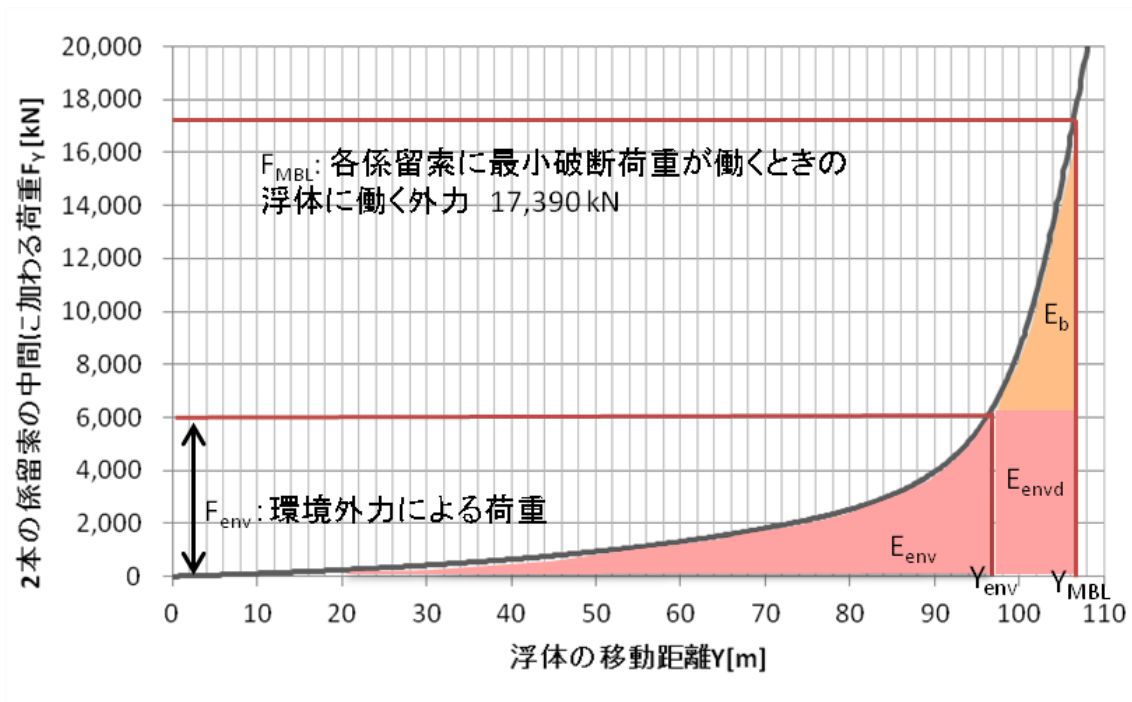


図 3-25 2本の係留索の中間に荷重が加わる場合の係留索の破断に至る荷重・エネルギーの考え方 (図 3-24 の一部を拡大して作成, 海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合)

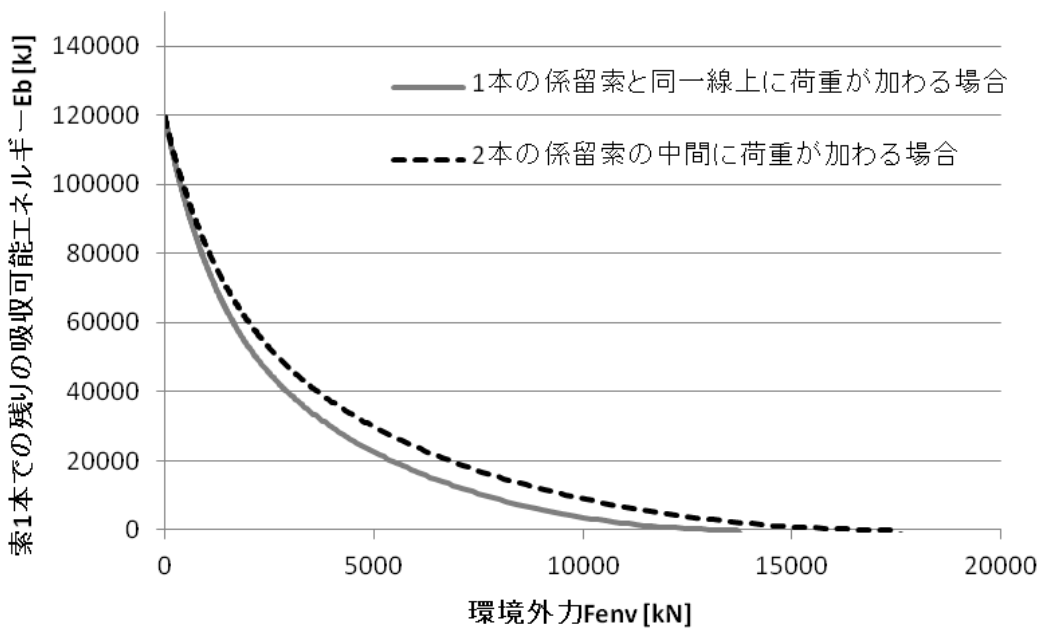


図 3-26 環境外力の大きさと係留索1本あたりが吸収できる残りのエネルギーの関係 (海域 No.1 の環境条件を用いて設定した場合)

漂流船舶が風力発電施設に衝突した際の各荷重やエネルギーの算出方法を以下に説明する。上述の通り、係留索に働く荷重には、衝突エネルギーによって浮体が移動することによる荷重、衝突後の船舶が浮体と一体となったまま船体に受け続ける環境外力、風力発電施設自身が受ける環境外力の3種類が考えられる。このうち、2つ目および3つ目の荷重を合わせたものが $F_{env}$ である。 $F_{env}$ のうち、2つ目を $F_{envs}$ 、3つ目を $F_{envf}$ とおく。また、1つ目の運動エネルギーは上述の通り $E_{ds}$ で表され、それぞれ以下に計算方法を示す。

#### < $F_{envs}$ の計算方法>

漂流船舶の場合、推進力や操縦能力を失っていると考えられるため、風力発電施設に衝突した後も両者が一体となって環境外力を受け続ける可能性が高い。従って、この場合は衝突によって与えられる運動エネルギーだけでなく、船舶が受け続ける環境外力も考慮する必要がある。 $p_{SDW}$ の計算方法の説明においても述べたように、漂流方向は風の吹く向きと同一であり、船舶の長手方向に対して直角に風を受けて漂流することとしているので、漂流後もそのままの状態でも風を受け続けると仮定する。このとき、船舶は風力発電施設に接触しているため、その位置をほぼ固定されているので、風で押されることによって発生する逆向きの流体抗力は発生しないと考える。また、海潮流によって発生する抗力も受け、その抗力係数は風向と海潮流向の差、つまり船舶の長手方向に対する海潮流の方向によって変化する。

風による抗力 $\vec{F}_{ws}$ は、 $p_{SDW}$ の計算時と同様に

$$\vec{F}_{ws} = \frac{1}{2} \rho_a L^2 C_{Dw} \vec{V}_w |\vec{V}_w| \quad \dots (3-34)$$

で表され、船舶の長手方向に対して垂直に働くので $C_{Dw} = 0.1$ である [41]。

一方、海潮流による抗力 $\vec{F}_{cs}$ は、風によって漂流する船舶が受ける流体抗力と同様に、

$$\vec{F}_{cs} = \frac{1}{2} \rho_w L d C_{Dc} \vec{V}_c |\vec{V}_c| \quad \dots (3-35)$$

と表される。抗力係数 $C_{Dc}$ は上野らの実験結果 [41]を参考に、表 3-7 のように定める。表中に記載のない角度の抗力係数は内挿して使用する。

以上の手順で求めた $\vec{F}_{ws}$ と $\vec{F}_{cs}$ を合成すると、衝突後の船舶が受け続ける環境外力が求められる。

#### < $F_{envf}$ の計算方法>

風力発電施設自身が受ける環境外力も考慮する必要がある。船舶が受ける環境外力と同様に風と海潮流による抗力を考慮すると、まず風抗力 $\vec{F}_{wf}$ は、

$$\vec{F}_{wf} = \frac{1}{2} \rho_a A_{af} C_{Dwf} \vec{V}_w |\vec{V}_w| \quad \dots (3-36)$$

で表される。ここで、 $A_{af}$ は風力発電施設の空中部投影面積[m<sup>2</sup>]、 $C_{Dwf}$ は風抗力の抗力係数[-]



であるが、これらは風力発電施設の各部によって異なる。つまり、風車のロータ部、タワー部、ナセル部があり、それぞれについて投影面積と抗力係数を求めて合計する必要がある。

表 3-7 風向と海潮流向の差と海潮流による外力の抗力係数の関係

風向と海潮流向の差 $ \theta_w - \theta_c $	抗力係数 $C_{Dc}$
0° or 180°	0.80
10° or 170°	0.80
20° or 160°	0.75
30° or 150°	0.75
40° or 140°	0.65
50° or 130°	0.60
60° or 120°	0.40
70° or 110°	0.20
80° or 100°	0.050
90°	0.0

よって、風抗力と抗力係数の積は

$$A_{af}C_{Dwf} = A_rC_{Tr} + A_tC_{Dt} + A_nC_{Dn} \quad \dots (3-37)$$

と表される。ここで、 $A_r$ ：ロータ面の面積[m<sup>2</sup>]、 $C_{Tr}$ ：ロータ面のスラスト係数[-]、 $A_t$ ：タワー部の投影面積[m<sup>2</sup>]、 $C_{Dt}$ ：タワー部の抗力係数[-]、 $A_n$ ：ナセル部の投影面積[m<sup>2</sup>]、 $C_{Dn}$ ：ナセル部の抗力係数[-]である。ただし、風車はダウンウィンド型であるため、常に風向に対してロータ面が直交しているため、風抗力は風向によって変化しない。

タワー部の太さは NREL 報告書 [50]より、最も細いナセル付近が 3.87 m、最も太い根もとの部分が 6.0 m とする。本来は太さの変化を考慮して正確な面積を求めるべきだが、ここでは簡単のため太さは均一で 5.0 m とする。また、ナセル部は表 3-1 の通り、(L)12.5 [m] × (B)4.0 [m] × (H)4.0 [m]であるが、これはタワーの幅とほぼ同じのため、タワー部と一緒に長方形の一部として抗力を計算することとする。よって、

$$A_t + A_n = (87.6 + 4.0) \times 5.0 = 458 \quad \dots (3-38)$$

となる。また、抗力係数は、

$$C_{Dt} = C_{Dn} = 1.2 \quad \dots (3-39)$$

とする。一方、ロータ面の風抗力についてはカットイン風速未満、風車回転中、カットアウト風速を超える場合の 3 通りで考える必要がある。まず、風車のカットイン風速未満の場合

は $A_r$  = ブレードの幅×長さ×枚数,  $C_{Tr} = 1.1$  (正方形板の抗力係数 [51]) とし, ブレード幅は回転中心からの距離によって変化するが, ここでは NREL 報告書 [50]を基に平均値として 3.4 m に設定した。ブレード長さは表 3-1 の通り 62.5 m であるから,

$$A_r = 3.4 \times 62.5 \times 3 = 637.5 \quad \dots (3-40)$$

となる。次に風車回転中の $A_r$ については, 表 3-1 の通りロータ径が 128.0 m であるから, 明らかに $A_r = 12,868$  である。このとき, 風車はブレードピッチコントロールを行っているため,  $C_{Tr}$ は風速によって異なるので,

$$C_{Tr} = C_{Tr}(V_{wi}) \quad \dots (3-41)$$

と表される。風速 $V_w$ と $C_{Tr}$ の関係を, 図 3-27 に示す。これを基に風速ごとにスラスト係数を設定する。

最後に, 風車のカットアウト風速を超える場合はフェザリング状態と考え,  $A_r$  = ブレードの翼厚×長さ×枚数,  $C_{Tr} = 0.005$  [52]とした。翼厚も回転中心からの距離によって変化し, 中心に近い部分は断面が円形であるのに対し, 翼端では扁平になっている。本来は翼を細かく分割し, 各要素で翼厚を変化させて積分して $A_r$ を求めるべきであるが, 詳細なデータがなく, また, フェザリング時は抗力係数も小さく, 風車の風抗力全体に対する寄与度も小さいため, 本研究では平均で 1.0 m と仮定した。つまり,

$$A_r = 1.0 \times 62.5 \times 3 = 187.5 \quad \dots (3-42)$$

と定める。

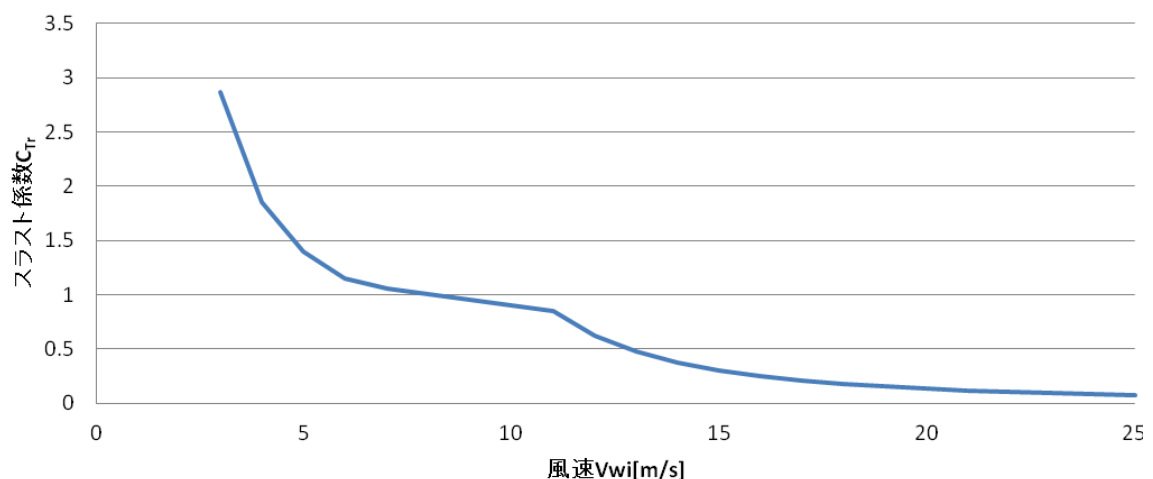


図 3-27 風速とスラスト係数の関係  
(NREL 報告書 [50]を参考に作成)

次に、海潮流による抗力 $\vec{F}_{cf}$ [N]は、

$$\vec{F}_{cf} = \frac{1}{2} \rho_w A_{wf} C_{Dcf} \vec{V}_c |\vec{V}_c| \quad \dots (3-43)$$

と表される。ここで、 $A_{wf}$ ：浮体の水中部投影面積[m<sup>2</sup>]、 $C_{Dcf}$ ：海潮流による抗力の抗力係数である。本研究で対象とする三角形セミサブ型浮体は図 3-2 の通り、正面から見た場合と真横から見た場合で投影面積が異なる。真横から見た場合の角度を  $0^\circ$ 、正面から見た場合の角度を  $90^\circ$  とすると、これらの  $180^\circ$  反対方向から見た場合の投影面積はそれぞれ等しいはずなので、 $0^\circ$  のときと  $180^\circ$  のとき、 $90^\circ$  のときと  $270^\circ$  のときの投影面積がそれぞれ等しくなる。さらに、対象浮体は正三角形のため、 $60^\circ$  ごとに同じ投影面積になることを考慮すると、 $30^\circ$  ごとに 2 種類の投影面積が交互に現れることになり、図 3-28 のように、左の図において青矢印で示される角度からの投影面積は右上図、オレンジ矢印で示される角度からの投影面積は右下図のようになる。

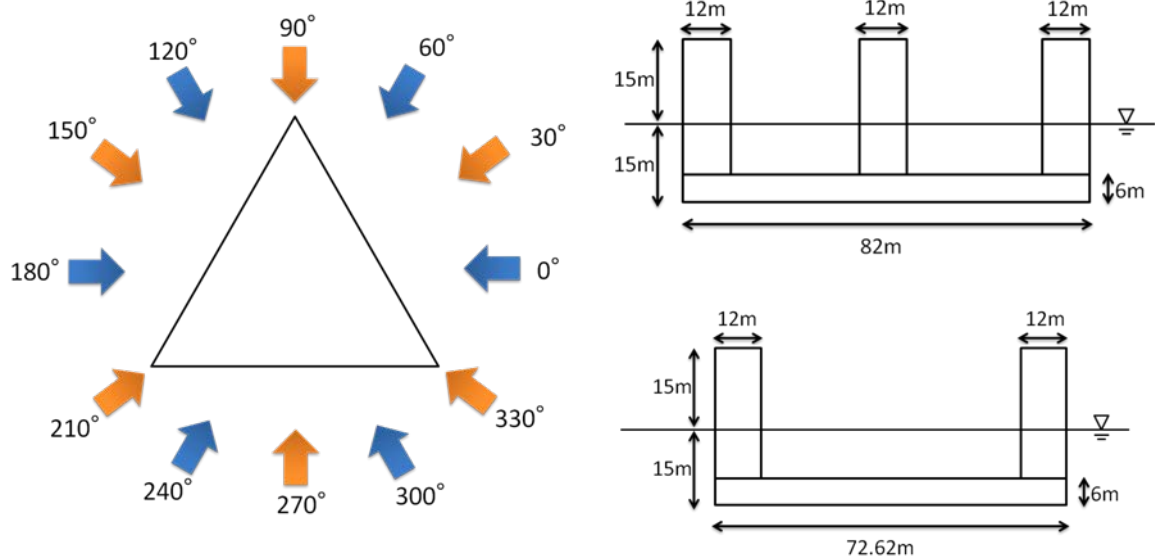


図 3-28 三角形セミサブ浮体に対する海潮流の方向（左）と断面積（右）  
 (右上：左図でオレンジの矢印の方向から海潮流が入射する場合，右下：左図で青矢印の方向から海潮流が入射する場合)

この図から、海潮流による抗力の働く投影面積は

$$A_{wf} = \begin{cases} 6 \times 82 + (15 - 6) \times 12 \times 3 = 816 & (\theta_c = 0^\circ + 60^\circ n \ (n = 0, 1, \dots, 5)) \\ 6 \times 72.62 + (15 - 6) \times 12 \times 2 = 652 & (\theta_c = 30^\circ + 60^\circ n \ (n = 0, 1, \dots, 5)) \end{cases} \quad \dots (3-44)$$

と表される。 $30^\circ$  より小さい間隔で海潮流向を与える場合は、最も近い角度の場合の投影面積を使うことにする。また、抗力係数は船舶と同様に  $C_{Dcf} = 0.8$  とする。

以上により風力発電施設自身が受ける風抗力と海潮流による抗力が求められるので、これらを合成して風力発電施設自身が受ける環境外力が求められる。

<E<sub>ds</sub>の計算方法>

船舶衝突時の運動エネルギーを求めるには船舶の質量（排水量） $m$ [kg]と速度[m/s]が必要になるが、船舶の質量は $p_{SDW}$ の計算時にパラメータとして用いた船舶の階級から、以下の回帰式 [42]を用いて変換できる。

$$m = 1.1389 \times is \quad \dots (3-45)$$

また、船舶の漂流速度  $v$ [m/s]も、 $p_{SDW}$ の計算時にそれぞれの環境条件と船舶サイズで求められているので、これらを用いて運動エネルギーが計算できる。施設との衝突後の運動エネルギーは、運動量保存則を用いて衝突後に両者が一体となって移動する速度  $V$ [m/s]を求め、これと両者の合計質量を用いて求めることができる。

運動量保存則より衝突前の運動量と衝突後の運動量は釣り合うから、

$$m(1 + a_m)v = \{m(1 + a_m) + M(1 + A_M)\}V \quad \dots (3-46)$$

$$V = \frac{m(1+a_m)}{m(1+a_m)+M(1+A_M)}v \quad \dots (3-47)$$

となる。ここで、 $a_m$ ：船舶の付加質量係数[-]（漂流の場合は船側からの衝突なので0.4とする [53]）、 $A_M$ ：風力発電施設の浮体の付加質量係数[-]（3本の円柱と考えて1.0とする [54]）、 $M$ ：風力発電施設の質量[kg]である。

求められた衝突後の速度  $V$ を下記の式に代入すると衝突後の運動エネルギーが求められる。

$$E_{ds} = \frac{1}{2}\{m(1 + a_m) + M(1 + A_M)\}V^2 \quad \dots (3-48)$$

この運動エネルギーが $E_b$ の3倍より大きい場合、風力発電施設が漂流すると判断される。

このとき、船舶の質量  $m$  と漂流速度  $v$ 、および環境外力は変数であるため、 $p_{SDW}$ と同時に計算する必要がある。 $p_{SDW}$ の計算方法の説明で述べたように、船舶サイズの存在割合と環境外力の発生頻度を組み合わせて船舶漂流速度を求め、施設に衝突すると判断された場合にのみ $p_{WD1}$ の計算に進み、施設への衝突後の運動エネルギーと船舶が受け続ける環境外力を計算して施設の漂流の有無を判断する。漂流すると判断された場合、このときの環境条件の組み合わせの出現頻度と船舶サイズの存在割合を掛け合わせることで、この条件の発生確率が求められ、これが $p_{WD1}$ となる。施設漂流確率を漂流船舶が衝突した場合の条件付き確率として求めるには、上記で求められた確率を $p_{11}$ で割る必要があり、これを $p_{13_1}$ とする。

$p_{11}$ と $p_{13_1}$ を同時に求める計算フローを図 3-29 に示す。

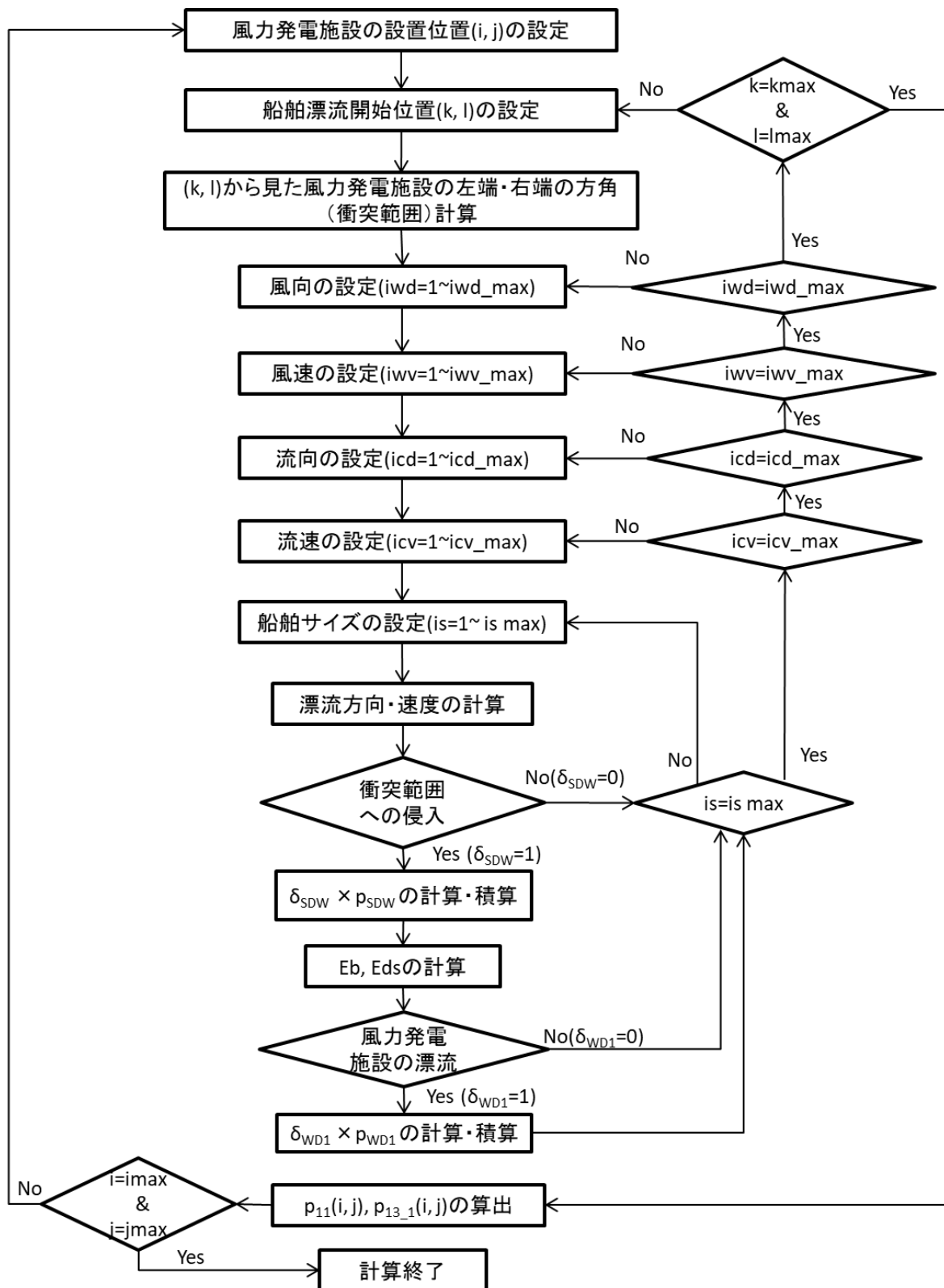


図 3-29  $p_{11}(i, j)$  および  $p_{13,1}(i, j)$  の計算フローチャート

### 3.3.4. 操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率

操船ミスにより船舶が衝突した場合の風力発電施設漂流確率を $P_{13,2}(i,j)$ とおくと、

$$P_{13,2}(i,j) = \sum_{\theta_w} \sum_{v_w} \sum_{\theta_c} \sum_{v_c} \sum_{is} \{ \delta_{WD2}(i,j,\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v) \times p_{WD2}(\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v) \} \quad \dots (3-49)$$

ただし、

$$\delta_{WD2} = \begin{cases} 1 & (E_{all} \leq \{E_{envf}(\theta_w,v_w,\theta_c,v_c) + E_{envd}(i,j,k,l,\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v) + E_{ds}(i,j,\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v)\}) \\ 0 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases} \quad \dots (3-50)$$

ここで、 $\delta_{WD2}(i,j,\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v)$  : ある環境条件 $(\theta_w,v_w,\theta_c,v_c)$ においてサイズ  $is$  の船舶がある地点 $(i,j)$ に設置された風力発電施設に、操船ミスにより速度  $v$  で衝突した場合の施設漂流判定関数、 $p_{WD2}(\theta_w,v_w,\theta_c,v_c,is,v)$  : 操船ミスにより衝突する船舶のサイズが  $is$ 、衝突時の航行速度が  $v$  であり、かつ衝突時の環境条件が  $(\theta_w,v_w,\theta_c,v_c)$  である確率、 $v$  : 操船ミスにより風力発電施設に衝突する船舶の航行速度である。これを含む $P_{13,2}(i,j)$ の計算方法を以下に示す。

操船ミスによる船舶の衝突時における風力発電施設の漂流の有無は、船舶の衝突による運動エネルギーと風力発電施設自身が受ける環境外力によって判断される。前項の漂流船舶の衝突の場合と異なる点としてまず、船舶が衝突後も受け続ける環境外力を考慮する必要がないことが挙げられる。これは、操縦不能になっていると思われる漂流船舶の場合には衝突後も施設から離れることが困難であるのに対し、操船ミスにより衝突した船舶は操縦が可能であると思われるので、その後直ちに施設から離れることができると考えたためである。

また、衝突時の運動エネルギーについても、操船ミスの場合は船舶自身が速力を持っているという点と衝突面が船首になる点が、漂流船舶の衝突の場合とは異なる。前者については航行速度の分布に関するデータがあればこれを利用し、各速力の割合を衝突速度の割合として利用する。後者については、上述の通り、船舶の付加質量係数 $a_m$ は船首の場合 0.1 [53]となるので、これを利用して運動エネルギーを計算する。

### 3.3.5. 設計条件を超える気象海象による風力発電施設の漂流確率

ある地点 $(i,j)$ に設置された風力発電施設の設計条件を超える気象海象による漂流確率を $P_{14}(i,j)$ とおき、この確率の求め方について以下に考察する。

施設漂流の原因のひとつに、設計時の想定を超える気象海象条件による係留索の破断が考えられる。設計時には 50 年再現期待値による荷重を推算し、これに安全率 2.0 (準静的解析の場合) を乗じて係留索の破断強度を決めることになっており [17]、表 3-3 に示した MBL もこの基準に従って簡易的に算出したものであるが、この破断強度を超える環境外力の発生

確率を求めることは困難である。例えば次章で説明する環境条件のうち、海域 No.1 の風速出現頻度から推定された 50 年再現期待値は 37.53 m であるのに対し、100 年再現期待値は 39.98 m であり、再現期間が大きくなっても風速はそれほど大きくならない。波と海潮流も同様の推定結果を用いて係留索に働く荷重を計算したところ、100 年再現期待値による荷重でも係留索の破断には至らず、それ以外の海域の環境条件についても同様であった。このとき利用した再現期待値の推算結果は、20 年分の予報値から推定したものであり、100 年よりさらに長い再現期間の極値を推定するには限界がある。そのため、係留索の破断荷重を超える環境条件の再現期間を求める、すなわち 1 年間発生確率を求めることは困難である。

以上の理由により、係留索が環境条件によって破断する確率を正確に求めることは困難であるため、ISO の基準 [55]により、年間  $10^{-4}$  の確率で破断すると仮定する。風力発電施設は 3 本の係留索で係留されており、これらが全て破断するとその施設は漂流するが、1 本の係留索が破断した状態での残りの係留索の破断確率は健全状態における確率と異なると思われる、これを正確に評価することは困難である。しかし、係留索の破断に至るような環境条件がある程度の継続時間をもって施設に作用する場合、全ての係留索にこの外力が働くことになり、1 本の索破断後には残りの索にかかる張力が増し破断しやすくなっていると推測されることから、年間  $10^{-4}$  の確率で施設漂流が発生すると仮定することとする。また、本研究では施設の設置候補海域内で環境条件が同一であると仮定しているため、この確率は全ての地点(i, j)で等しいことになる。

なお、3 本の係留索が破断する原因は同一とし、自然条件と船舶の衝突の複合は考えない。よって、以下のように設定する。

$$P_{14}(i, j) = 1.0 \times 10^{-4} \quad \dots (3-51)$$

### 3.3.6. 風力発電施設の漂流による沿岸施設への衝突

ある地点(i, j)に設置された風力発電施設が漂流した場合の沿岸施設への衝突確率を  $P_{15}(i, j)$  とおくと、 $P_{15}(i, j)$  は下記の式で表される。

$$P_{15}(i, j) = \sum_{\theta_w} \sum_{v_w} \sum_{\theta_c} \sum_{v_c} \sum_{is} \{ \delta_{WDF}(a, b, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \times p_{WDF}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \} \quad \dots (3-52)$$

ただし、

$$\delta_{WDF} = \begin{cases} 1 & (\theta_R(a, b, i, j) \leq \theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \leq \theta_L(a, b, i, j)) \\ 0 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases} \quad \dots (3-53)$$

ここで、 $\delta_{WDF}(a, b, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : ある環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  においてある地点(i, j)から漂流した風力発電施設の、ある地点(a, b)に存在する沿岸施設への衝突判定関数、 $p_{WDF}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : 漂流時の環境条件が  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  である確率、 $\theta_R(a, b, i, j)$  : ある地点(i, j)から見た(a, b)にある沿岸施設の右端の方角、 $\theta_L(a, b, i, j)$  : ある地点(i, j)から見た(a, b)

にある沿岸施設の左端の方角， $\theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ ：環境条件  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  における風力発電施設の漂流方向である。各変数の算出方法は以下の通りである。

- $\delta_{WDF}(a, b, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ ：ある地点(i, j)から漂流した風力発電施設の，ある地点(a, b)に存在する沿岸施設への衝突判定関数
- $p_{WDF}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ ：漂流時の環境条件が  $(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  である確率

説明の都合上，上記 2 つの説明をまとめて行う。

ある地点(i, j)から漂流を開始した風力発電施設の漂流方向が，ある地点(a, b)に存在する沿岸施設の衝突範囲内に含まれる場合，漂流施設が沿岸施設に衝突すると判断される。衝突範囲は風力発電施設の浮体幅および沿岸施設の幅を考慮して，沿岸施設の種類ごとに定める。沿岸施設の幅については後述する。風力発電施設の漂流方向は当該海域の環境条件によって変化し，(i, j)と(a, b)の位置関係によって衝突と判定されるかどうか異なるので，(i, j)と(a, b)，風向 $\theta_w$ ，風速 $v_w$ ，海潮流向 $\theta_c$ ，海潮流速度 $v_c$ の関数として $\delta_{WDF}(a, b, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ と表すことができる。ただし，波漂流力は風や海潮流による漂流力と比べて小さいので無視することとする。また，風や海潮流については定常状態のみを考える。

風力発電施設の漂流方向については，風力発電施設が受ける風抗力と，風漂流力による施設浮体の移動によって生じる流体抗力のつり合いから，定常状態での風による施設の漂流ベクトルが計算され，これに海潮流による漂流ベクトルを合成することで求められる。これら抗力は投影面積に比例するが，これは風力発電施設の各部によって異なる。

上記で計算された漂流方向が(a, b)に存在する沿岸施設の左端と右端の方向の間にある場合は風力発電施設が沿岸施設に衝突すると判断され， $\delta_{WDF} = 1$ となる。一方，漂流方向がこれらの間にない場合は $\delta_{WDF} = 0$ となる。

このときの環境条件の組み合わせの出現頻度を全て掛け合わせることで，この条件の発生確率が求められ，これが $p_{WDF}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$ となる。

この計算を全ての環境条件の組み合わせで行い，沿岸施設に衝突する条件の発生確率を積算して行くと，ある地点(i, j)から漂流した風力発電施設がある地点(a, b)に存在する沿岸施設に衝突する確率となる。これを全ての風力発電施設設置候補地点(i, j)について行えば，施設設置位置による沿岸施設への衝突発生確率の違いが把握できる。

これらの計算のフローを図 3-30 に示すとともに，計算方法を以下に説明する。

計算方法は $p_{SDW}$ の場合とほぼ同じだが，漂流物が船舶ではなく風力発電施設であり，漂流の開始地点および衝突先も異なる。後者は単にそれぞれの座標を変更するだけで良いが，前者は投影面積や抗力係数を，対象とする風力発電施設に合わせて変更する必要がある。

風車の風抗力は， $P_{13,1}(i, j)$ および $P_{13,2}(i, j)$ の計算過程で説明したように，

$$\vec{F}_{wf} = \frac{1}{2} \rho_a A_{af} C_{Dwf} \vec{V}_w |\vec{V}_w| \quad (\text{再掲}) \quad \dots (3-54)$$



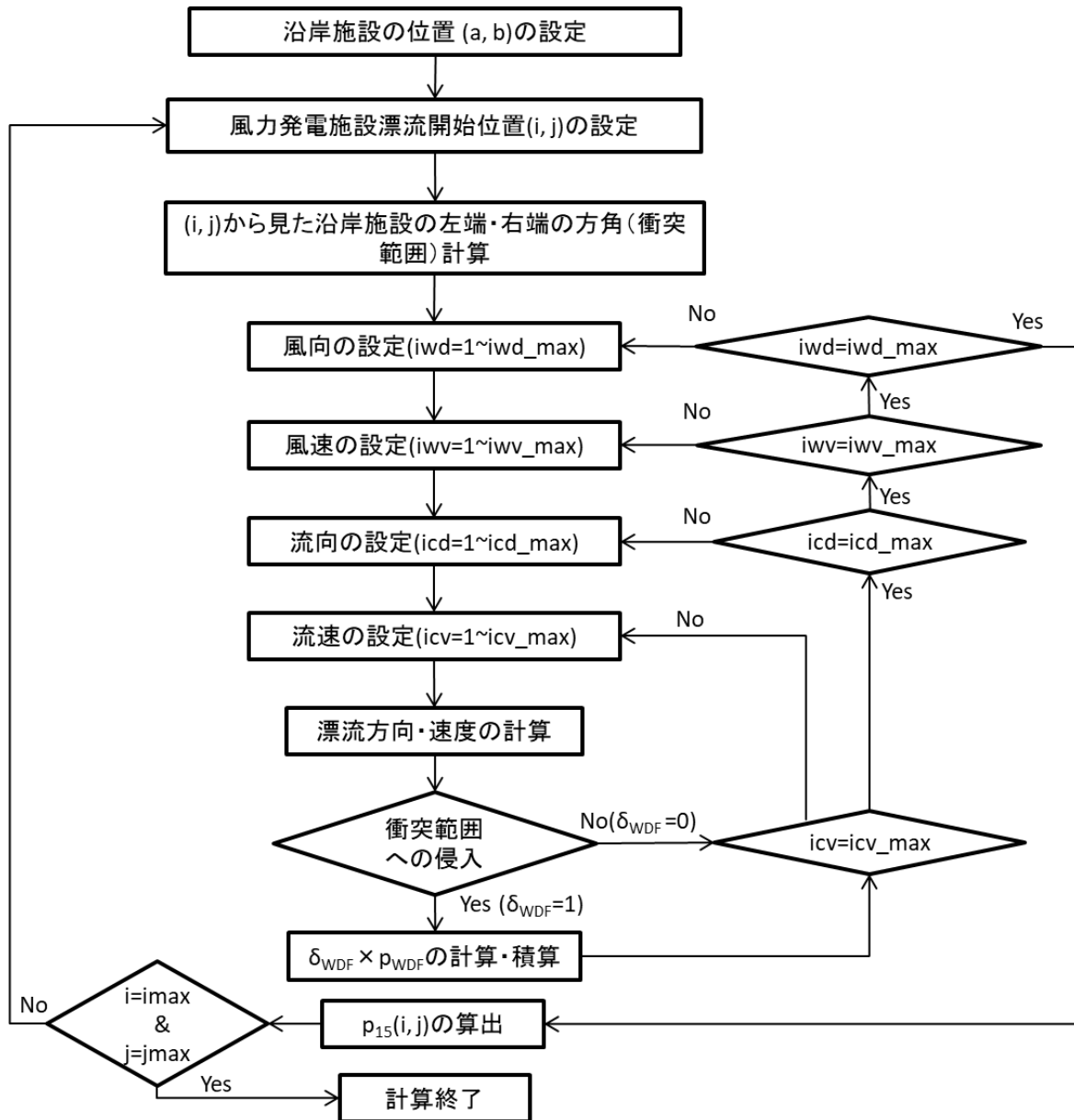


図 3-30  $p_{15}(i,j)$ の計算フローチャート

と表される。また、風によって風力発電施設が漂流することにより水中部が受ける流体抗力は  $p_{SDW}$  の場合と同様に、

$$\vec{F}_{dwf} = \frac{1}{2} \rho_w A_{wf} C_{Ddw} \vec{V}_{dw} |\vec{V}_{dw}| \quad \dots (3-55)$$

と表される。ただし  $A_{wf}$  は風力発電施設の浮体の水中部投影面積であり、式(3-44)で表される。

$\vec{F}_{wf}$  および  $\vec{F}_{dwf}$  の 2 つの力のつり合いから  $\vec{V}_{dw}$  を算出し、この逆方向のベクトルが風による漂流ベクトルとなる。これと海潮流による漂流ベクトル（海潮流ベクトルと同一）を合成して、風力発電施設の漂流ベクトルが求められる。このベクトルの向きが、(a, b) に設置された沿岸施設の、(i, j) から見た左端の方角から右端の方角の間に含まれる場合、漂流した風力発

電施設の沿岸施設への衝突が発生すると判断される。

なお、沿岸施設が複数ある場合は、衝突する施設によって被害が異なるため、それぞれへの衝突確率を別々に算出しておく。

### 3.3.7. 風力発電施設の漂流による船舶航路への侵入確率

ある地点(i, j)に設置された風力発電施設が漂流した場合に、これが航路に侵入する確率を  $P_{16}(i, j)$  とおくと、 $P_{16}(i, j)$  は下記の式で表される。

$$P_{16}(i, j) = \sum_k \sum_{\theta_w} \sum_{v_w} \sum_{\theta_c} \sum_{v_c} \sum_{is} \{ \delta_{WDR}(k, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \times p_{WDR}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \} \quad \dots (3-56)$$

ただし、

$$\delta_{WDR} = \begin{cases} 1 & (\theta_R(k, lmin, i, j) \leq \theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c) \leq \theta_L(k, lmax, i, j)) \\ 0 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases} \quad \dots (3-57)$$

ここで、 $\delta_{WDR}(k, i, j, \theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : ある環境条件( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ )においてある地点(i, j)から漂流した風力発電施設の、 $x = k$  の直線上に位置する航路への侵入判定関数、 $p_{WDR}(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : 漂流時の環境条件が( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ )である確率、 $\theta_R(k, lmin, i, j)$  : (i, j)から見た航路の右端の方角、 $\theta_L(k, lmax, i, j)$  : (i, j)から見た航路の左端の方角、 $\theta(\theta_w, v_w, \theta_c, v_c)$  : 環境条件( $\theta_w, v_w, \theta_c, v_c$ )における風力発電施設の漂流方向である。ただし  $lmin$  および  $lmax$  は、それぞれ航路の南端および北端の  $y$  座標である。

漂流方向の計算方法は  $P_{15}(i, j)$  と同じであり、漂流先が沿岸施設ではなく航路になるという点異なる。ただし、航路への侵入の場合は1つの座標の方向への漂流で考えるのではなく、航路の南端から北端までの範囲に漂流した場合に侵入と判定する。つまり、本研究での航路と風力発電施設設置位置の設定では、風力発電施設の漂流開始地点(i, j)から見た航路の南端(k, 1)の方向が $\theta_R(k, lmin, i, j)$ 、北端(k, lmax)の方向が $\theta_L(k, lmax, i, j)$ となる。

この計算のフローを図 3-31 に示す。

### 3.3.8. 船舶航路への侵入による船舶への衝突確率

航路に風力発電施設が航路に侵入した場合の、施設と航行船舶との衝突確率を  $P_{17}$  とおき、以下にその求め方について考察する。

航路侵入後の船舶との衝突確率は航路上のどの断面に侵入したかによって確率が異なる可能性があるが、ここでは簡単のため、解析対象エリア内では同一航路内のどの位置に侵入しても同じ確率で船舶に衝突すると仮定する。

通常、航路内に風力発電施設が侵入しても、船舶が障害物に気付いて避航すると考えられるが、見張り不十分や視界不良、レーダー・GPS等の機器故障等によって衝突してしまう可能性はある。また、風力発電施設が漂流すると、電源供給ができなくなり、航空障害灯の消灯によって夜間は目視での確認が困難になることが予想される。

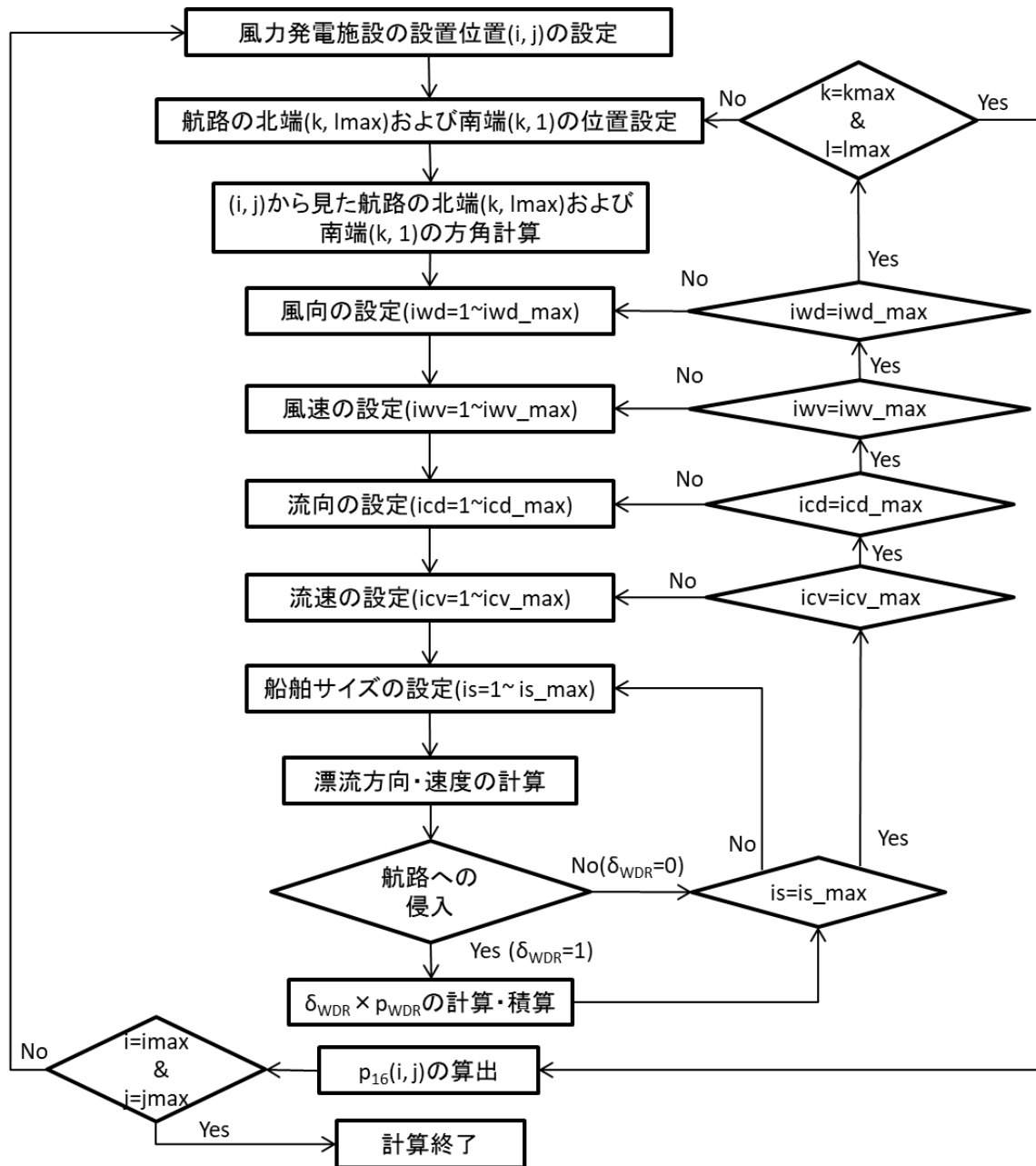


図 3-31  $P_{16}(i,j)$ の計算フローチャート

この状態では、風力発電施設が固定されておらず、通常の船舶のように移動している状態のため、これを通常の船舶と考えることで、この確率を船舶同士の衝突確率に近似することとする。船舶同士の衝突確率について、小田野ら [56]がまとめた 500 トン以上の船舶同士の衝突確率は  $7.4 \times 10^{-4}$  であり、本研究ではこれを航路に侵入した風力発電施設と船舶との衝突確率と考えることとする。

よって、以下のように設定する。ただし  $P_{17}$  は  $(i,j)$  に依存しない。

$$P_{17} = 7.4 \times 10^{-4} \quad \dots (3-58)$$

### 3.4. 各リスクの被害金額の算出方法

以下に、各リスクの被害金額の算出方法を説明する。

#### 3.4.1. 船舶の衝突による風力発電施設の被害金額

風力発電施設の建設等にかかった費用は、運用後の売電収入によって賄われるように計算されているはずである。従って、衝突による被害を考える際、浮体への亀裂や破口の発生による修理費用のほか、修理期間中に売電収入が得られなくなることに對する損害が大きいと考えられる。よって、この被害額 $s_{11}$ [万円]は以下のように売電収入の計算式として定める。

$$s_{11} = WP \times R_W \times 24 \times I_c \times T_W \quad \dots (3-59)$$

ここで、 $WP$ ：風車の定格出力[kW]、 $R_W$ ：設備利用率、 $I_c$ ：売電価格[万円/kWh]、 $T_W$ ：修理期間[日]を示す。なお、売電価格は固定価格買い取り制度（FIT）による 36 円/kWh とする。

#### 3.4.2. 風力発電施設の漂流による被害金額

前項と同様に売電収入が得られなくなることによる損害として考え、漂流の場合は施設的全損として、残りの供用期間で得られるはずであった売電収入を被害額として算出する。この被害額 $s_{13}$ [万円]は以下の式で表される。

$$s_{13} = WP \times R_W \times 24 \times 365 \times I_c \times T_r \quad \dots (3-60)$$

ただし、 $T_r$ は残りの供用期間[年]である。

#### 3.4.3. 風力発電施設の衝突による沿岸施設の被害金額

対象海域内の沿岸部で衝突による被害を受けそうな施設を選び、その被害額を推定して設定する。本研究は漁業施設、藻場等の生態系サービス、石油備蓄基地に着目し、これらの被害額の推定方法を以下に述べる。

##### 3.4.3.1. 生簀等の漁業施設

風力発電施設の衝突による生簀等の漁業施設の被害額を $s_{15f}$ [万円]とおくと、以下の式で表すことができる。

$$s_{15f} = V_a N_a + m_f V_f N_f N_a \quad \dots (3-61)$$

ここで、 $V_a$ ：生簀 1 台の金額[万円/台]、 $N_a$ ：生簀台数[台]、 $m_f$ ：生簀内の魚類 1 匹あたりの出荷時の質量[kg/匹]、 $V_f$ ：生簀内の魚類の出荷時金額[万円/kg]、 $N_f$ ：生簀 1 台で飼育する魚類の匹数[匹/台]である。

### 3.4.3.2. 藻場等の生態系サービス

風力発電施設が沿岸部に衝突することによって、衝突先の海底地形が変化したり、海底に生息していた動植物に損傷を与える可能性がある。動物は逃避が可能であるため、直接的な損傷は受けにくいと考えられるが、海底地形の変化による生息環境の悪化や、海底に生息する植物の損傷によって藻場に生息する生物が減少するなどの被害が考えられる。

本研究ではこれらの金額換算手法自体を詳細に検証することはしないが、比較的定量評価がしやすい藻場の生態系サービスとしての価値を考えることにする。この被害額を $s_{15sw}$ [万円]とおくと、以下の式で表すことができる。

$$s_{15sw} = \frac{V_{sw}R_{dy}A_{sw}}{10,000} \quad \dots (3-62)$$

ここで、 $V_{sw}$ ：単位面積あたりの藻場の生態系サービスとしての価値[ドル/ha/年]、 $R_{dy}$ ：ドルから円への換算係数、 $A_{sw}$ ：被害を受ける藻場面積[ha]である。

### 3.4.3.3. 石油備蓄基地

日本国内にはいくつかの石油備蓄基地があり、原油国の政情不安や原油価格の高騰などのリスクに備えている。その中でも長崎県の上五島には、石油備蓄船を利用した備蓄基地があり、洋上に設置されている。このような施設に風力発電施設が衝突すると、施設の損傷によって石油が流出する恐れがある。ここでは回収コストおよび石油による海洋汚染の代表例として藻場へのダメージを考える。藻場へのダメージはすぐには回復しないものと考えられるため、原状回復までにかかる期間も考慮する。

海洋流出油の回収コスト $C_o$ [ドル]は、データベースから求められた以下の回帰式 [57]を用いて表すことができる。

$$C_o = 42301.0 \times (V_o \times 0.85)^{0.7233} \quad \dots (3-63)$$

ここで、 $V_o$ ：石油流出量[kL]であり、これに0.85を乗じているのは流出量の単位をkLからトンに変換するためである。これを万円に換算し、上述の藻場の生態系サービスへのダメージを合わせて、石油備蓄基地に風力発電施設が衝突した際の被害額 $s_{150}$ [万円]を表すと下記のようになる。ただし、 $Y_R$ は原状回復までにかかる期間[年]である。

$$s_{150} = (C_o + V_{sw}A_{sw}Y_R) \frac{R_{dy}}{10,000} \quad \dots (3-64)$$

### 3.4.4. 風力発電施設の衝突による航行船舶の被害金額

風力発電施設が漂流して航路に侵入し、貨物船に衝突した場合、船体の損傷に加え、貨物の破損や輸送の遅延が生じる可能性がある。貨物については、ほとんどの場合、海運会社は

海上保険に加入しており、貨物の破損等に対する補償が受けられることが多いと考えた。一方、船体が損傷すると、修理が終わるまでの期間、貨物の輸送ができなくなり、用船料収入が得られなくなる。これらを比較すると、後者の損害の方が大きいと考え、本研究では船舶の修理期間の不稼働損失のみを考慮し、その期間の用船料の8割を風力発電施設の事業者が負担することになると仮定する。この金額を $s_{17}$ [万円]とおくと、以下の式で表すことができる。

$$s_{17} = \frac{0.8V_{SU}R_{dy}T_S}{10,000} \quad \dots (3-65)$$

ここで、 $V_{SU}$ ：貨物船の用船料[ドル/日]、 $T_S$ ：船舶の修理期間[日]である。

#### 4. 安全性に関するリスクの計算例と施設設置位置の決定方法

本章では前章で示した計算方法に従って、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクを定量評価した例を示し、その結果の考察を通して施設設置位置の決定方法の検討を行う。まず第 4.1 節において計算条件を設定し、それらの条件で試算を行った結果を第 4.2 節に示すとともに計算結果の考察を行う。第 4.3 節では計算条件と計算結果の関係性について考察を行い、これらの考察結果を踏まえて第 4.4 節で施設設置位置の決定方法を提案する。さらに第 4.5 節で、本研究で使用したモデルの不確実性の検証・考察を行った上で、最後に第 4.6 節で本章のまとめを行う。

##### 4.1. 計算条件

解析対象海域や風力発電施設、解析対象海域の環境条件や船舶の階級別出現頻度、漂流発生確率、年間船舶通航量を下記のように設定する。

###### 4.1.1. 環境条件

環境条件には、海上技術安全研究所のデータベース<sup>†</sup>を利用し、太平洋側の海域を数ヶ所選定し、その特徴が異なる 3 海域をサンプルとして計算に使用した。これらの 3 海域を海域 No.1～海域 No.3 と表す。以下に各海域の風向、風速、海潮流向、海潮流速の出現頻度分布を示す。なお、ここでの風向、流向は、風が吹いてくる方向および海潮流が流れてくる方向を指す。また、これらのデータは真北を 0° して時計回りに 360° で風向を示しているので、方角の計算時には注意が必要である。

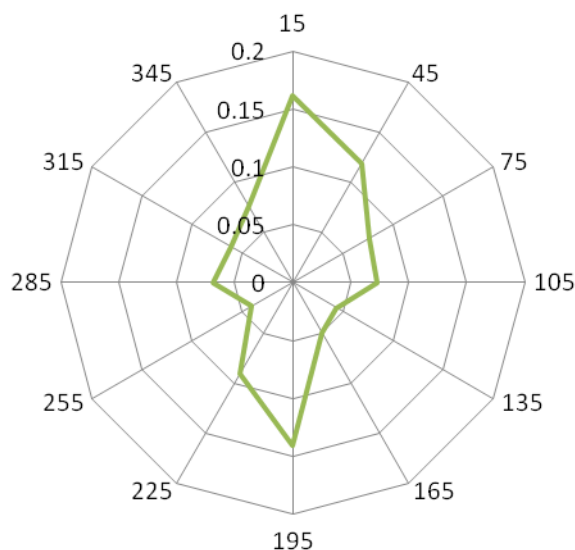


図 4-1 海域 No.1 の風向別出現頻度分布

<sup>†</sup> 海上技術安全研究所では、日本気象協会から購入した波浪推算データと、海洋研究開発機構から購入した JCOPE2 再解析データを利用し、統計処理等を行うことで 20 年間分の気海象統計データベースを整備している。データベースの詳細は参考文献 [93] を参照されたい。

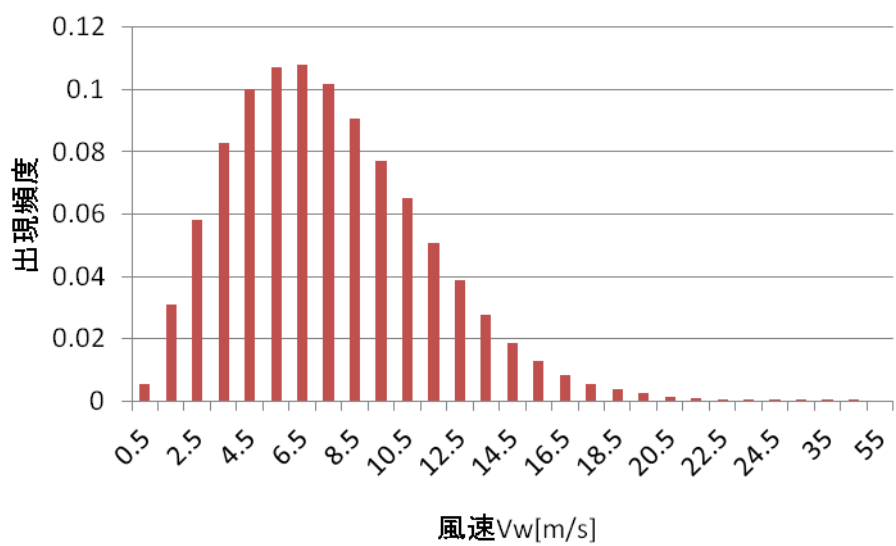


図 4-2 海域 No.1 の風速別出現頻度分布

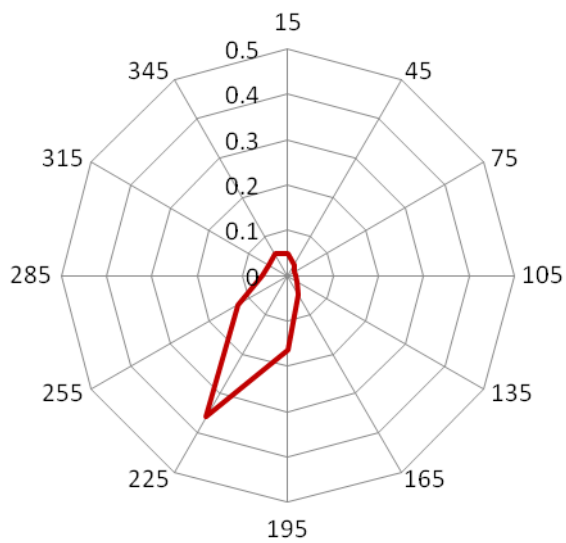


図 4-3 海域 No.1 の海潮流向別出現頻度分布



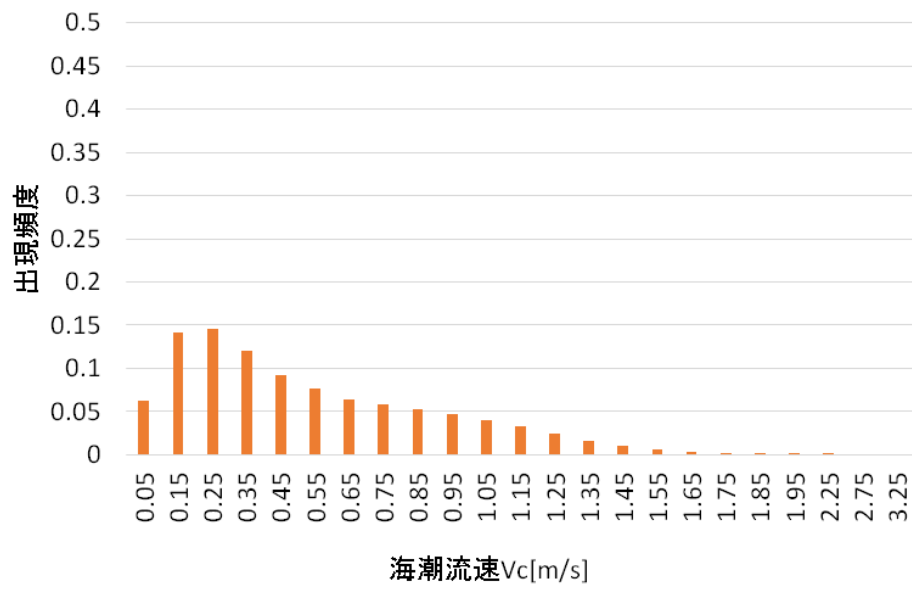


図 4-4 海域 No.1 の海潮流速別出現頻度分布

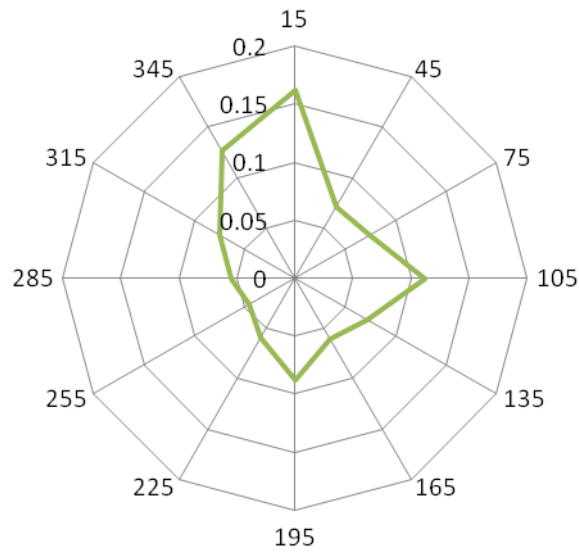


図 4-5 海域 No.2 の風向別出現頻度分布

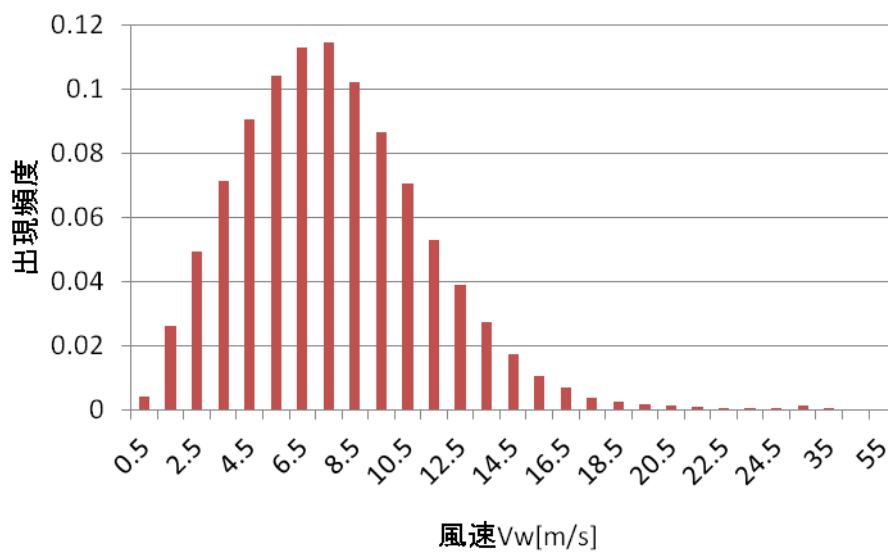


図 4-6 海域 No.2 の風速別出現頻度分布

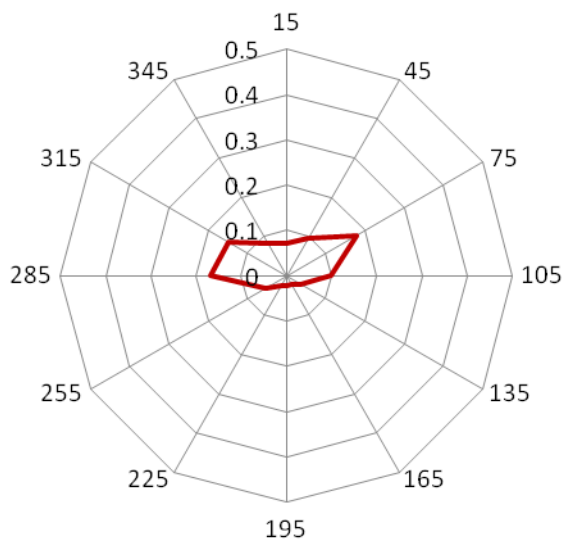


図 4-7 海域 No.2 の海潮流向別出現頻度分布

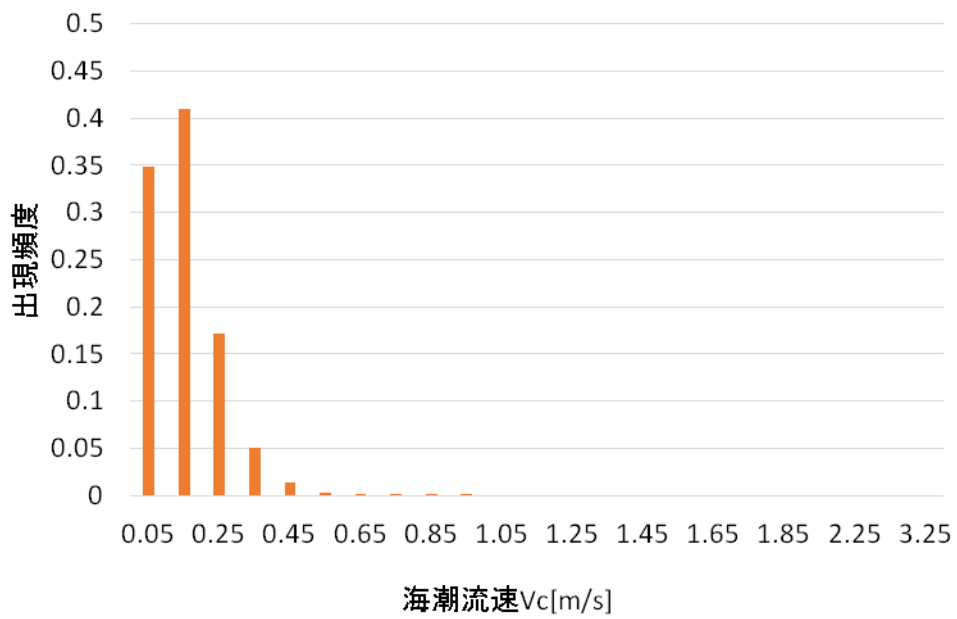


図 4-8 海域 No.2 の海潮流速別出現頻度分布

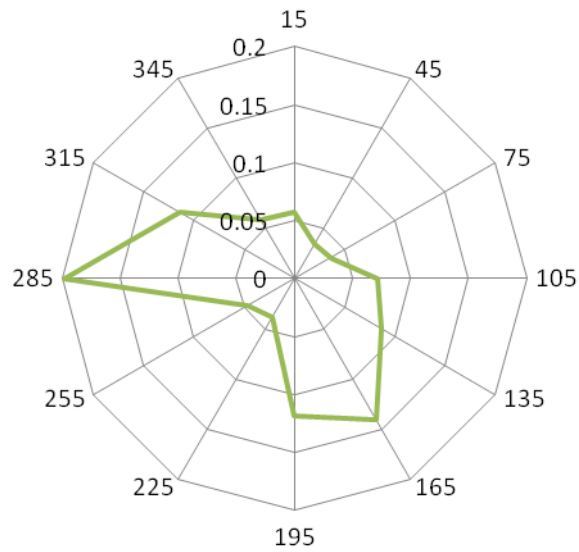


図 4-9 海域 No.3 の風向別出現頻度分布

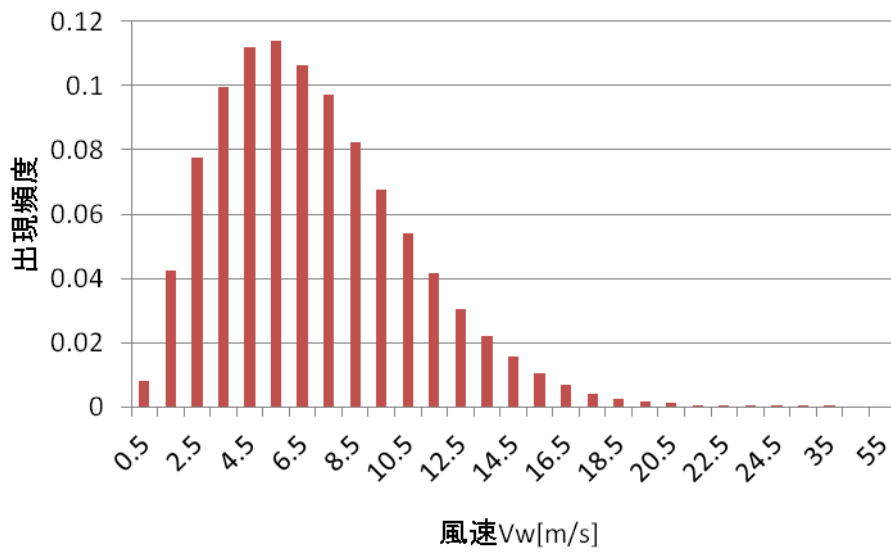


図 4-10 海域 No.3 の風速別出現頻度分布

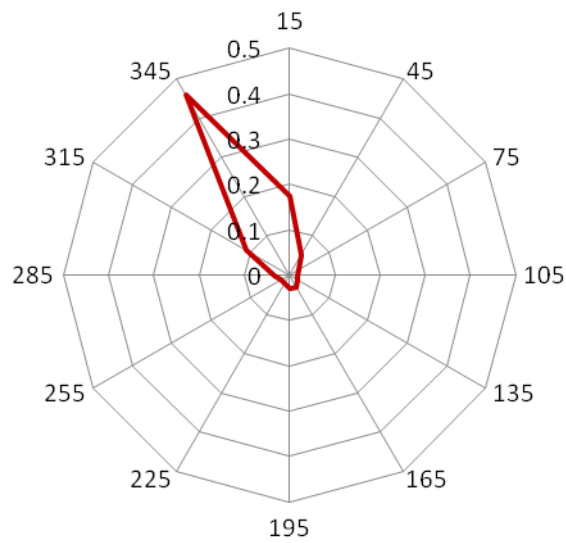


図 4-11 海域 No.3 の海潮流向別出現頻度分布

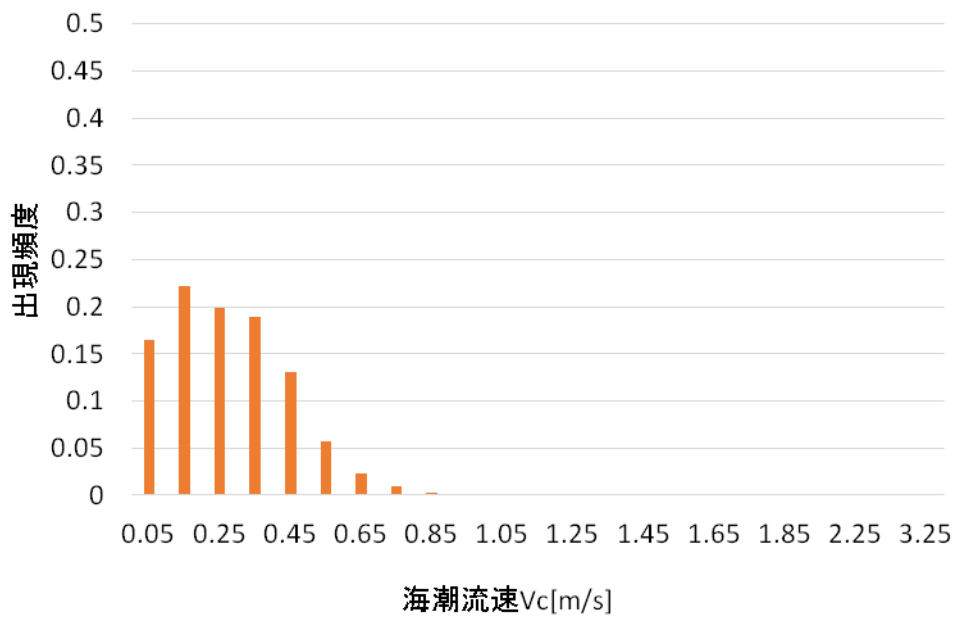


図 4-12 海域 No.3 の海潮流速別出現頻度分布

#### 4.1.2. 船舶の階級別出現頻度

ここでは船舶の種類は全て貨物船であると仮定して解析する。貨物船の階級別出現頻度は、高橋ら [42]の調査において対象とされた貨物船の階級別割合を参考に、表 4-1 のように定める。

表 4-1 対象海域を通航する貨物船の階級別存在比率

階級 (DWT) (以上) ~ (未満)	階級の代表値 (DWT)	存在比率
0~500	250	0.013
500~1,000	750	0.023
1,000~2,000	1,500	0.079
2,000~3,000	2,500	0.073
3,000~5,000	4,000	0.162
5,000~10,000	7,500	0.154
10,000~15,000	12,500	0.027
15,000~30,000	22,500	0.115
30,000~50,000	40,000	0.118
50,000~100,000	75,000	0.166
100,000~200,000	150,000	0.065
200,000~300,000	250,000	0.005

#### 4.1.3. 漂流船舶出現数

海上保安庁 [58]によると、平成 25 年に起こった海難事故のうち、機関故障は 359 隻で発生しており、そのうち貨物船は 44 隻であった。機関故障を起こした船舶が全て漂流すると仮定し、これらが日本の領海面積である 430,000 km<sup>2</sup>における年間発生数と考えると（実際に船舶が航行している海域はほとんど沿岸域に集中しているため）、単位面積当たりの発生数は貨物船に限れば $1.02 \times 10^{-4}$ 隻/km<sup>2</sup>/年と推定される。これに解析対象エリアの面積を乗じれば、この海域内での年間漂流船舶出現数が求められる。本研究では対象エリアを 10 km × 21 km の 210 km<sup>2</sup>としており、このエリア内を航行する船舶は全て貨物船と仮定しているの  
で、年間漂流船舶出現数 $m_S$ は $2.14 \times 10^{-2}$ 隻/年と設定する。

ただし、次項において年間船舶通航量を 2 通りに設定するため、これらの設定に合わせて漂流船舶出現数も変化するの  
が妥当と考えられる。そこで、基準となる年間船舶通航量を 15,000 隻として、漂流船舶出現数は年間船舶通航量に比例すると仮定し、下記の式で定めることにする。

$$m_S = 2.14 \times 10^{-2} \times \frac{N}{15,000} \quad \dots (4-1)$$

ここで、N は年間船舶通航数であり、この式において、上記で求めた出現数を 15,000 で割っているのは、上記の漂流船舶出現数は年間船舶通航数が 15,000 隻の場合の数値であると仮定しているためである。これは、次項で設定する年間船舶通航数が比較的交通量の多い海域のデータであるため、これらの値より少なめの値を基準値としている。

#### 4.1.4. 年間船舶通航量

岩手沖と野島崎沖の船舶通航分布データを基に、それぞれの海域における船舶の年間通航量を推定する。ここで使用する船舶通航分布データも、第 3.3.2.2 目において利用したものと同様、AIS 情報の解析データ [47]を利用して得られたものである（データの詳細は 46 ページの注釈参照）。以降、本論文で取り扱う AIS 情報の解析データについては全て同様である。

岩手沖では 2014 年 1 月 1 日から同月 31 日までの 31 日間に北航および南航合わせて 1,612 隻の船舶が通航した。よって、これを 1 年間の通航量に変換すると、

$$1,612 \div 31 \times 365 = 18,980 \text{ (隻)} \quad \dots (4-2)$$

と推定される。

一方、野島崎沖では、2012 年 8 月 1 日から同年 10 月 31 日の 92 日間に 8,027 隻の船舶が通航したので、1 年間の通航量は、

$$8,027 \div 92 \times 365 = 31,846 \text{ (隻)} \quad \dots (4-3)$$

と推定される。

本研究ではこれら 2 種類のデータを用いて計算を行う。

#### 4.1.5. 航路幅方向の船舶通航分布

正規分布で近似できる船舶通航分布と、ガンマ分布で近似できる船舶通航分布の例として、本研究では岩手沖と野島崎沖の AIS 情報解析データ [47] を利用する（データの詳細は 46 ページの注釈参照）。正規分布で近似するデータとして、岩手沖ゲート 0 での 2014 年 1 月の 1 ヶ月間の船舶通航分布データを利用した（第 3.3.2.2 目参照）。このデータの陸からの距離の平均値は 21,550.6 m で、標準偏差を 1.5 nm (2,778 m) に設定したときにこのデータの分布によく合うことが分かった（図 4-13）。

一方、ガンマ分布で近似するデータには野島崎沖での船舶通航分布データを利用するが、これは伊藤ら [46] がその論文中で示したゲート GL3 でのデータにフィッティングした結果を用いることにする。このフィッティングによって求められたガンマ分布のパラメータを表 4-2 に示し、このパラメータを用いて作成した確率密度と実際のデータを合わせて図 4-14 に示す。

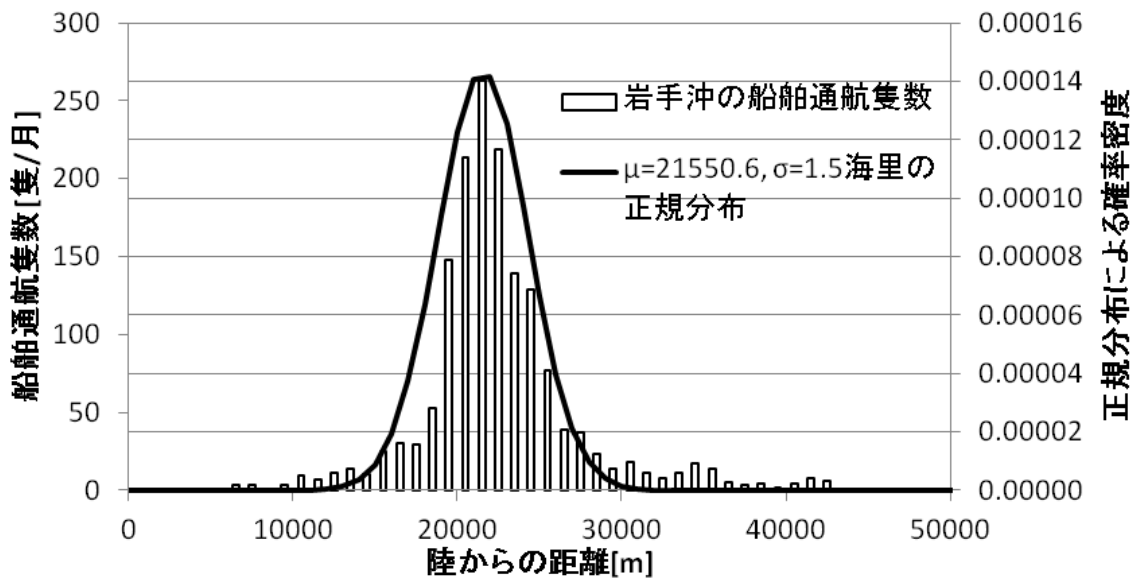


図 4-13 岩手沖ゲート 0 での船舶通航分布と正規分布による近似曲線  
 (正規分布へのフィッティングのため、図 3-12 よりも横軸の刻み幅を細かくした)

表 4-2 野島崎の船舶通航分布形状に近似させたガンマ分布のパラメータ [46]

パラメータ	値
位置母数	5733.3
形状母数	1.0872
尺度母数	6720.4

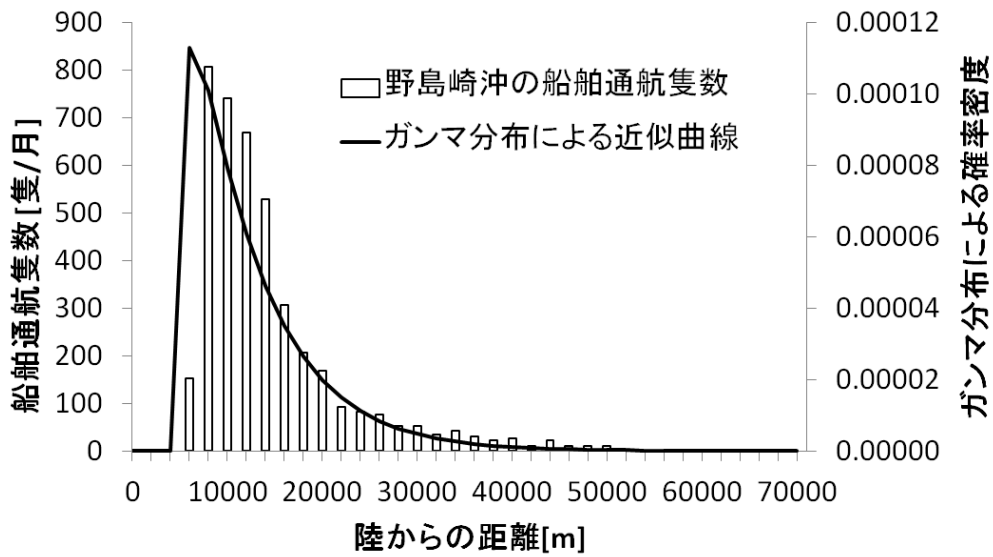


図 4-14 野島崎沖のゲート GL3 の船舶通航分布形状に近似させたガンマ分布の確率密度と累積分布 [46]

#### 4.1.6. 船舶航行速度の分布

岩手沖と野島崎沖での AIS 情報解析データ [47]を基に（データの詳細は 46 ページの注釈参照），それぞれの海域における船舶の航行速度の分布を求め，本研究の計算例で使用する。

岩手沖のゲート 0 および，野島崎沖のゲート GL3 を通航した船舶の航行速度を 1 knot 刻みでヒストグラムにしたものを図 4-15 と図 4-16 に示す。

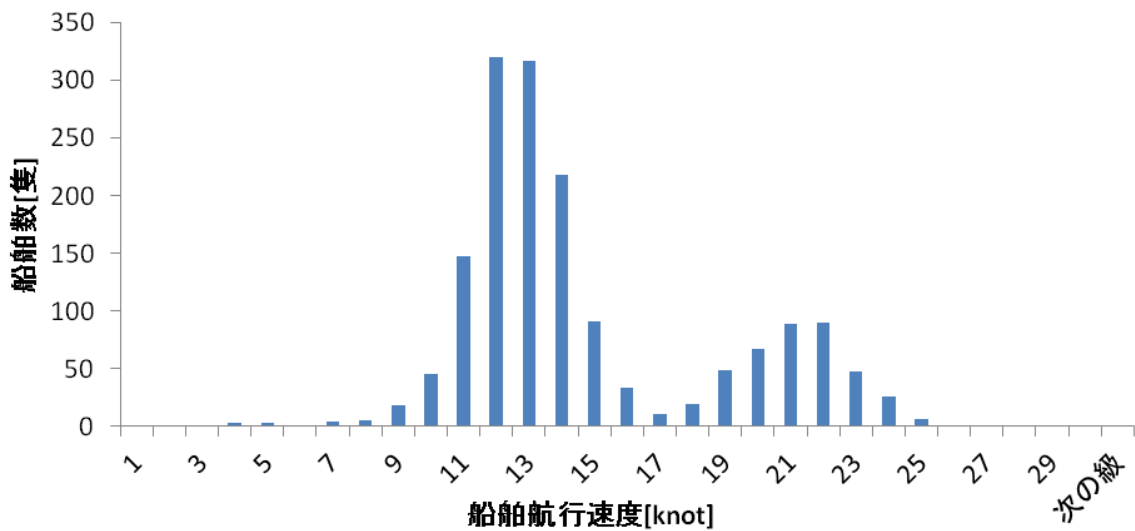


図 4-15 岩手沖のゲート 0 を通航した船舶の航行速度分布



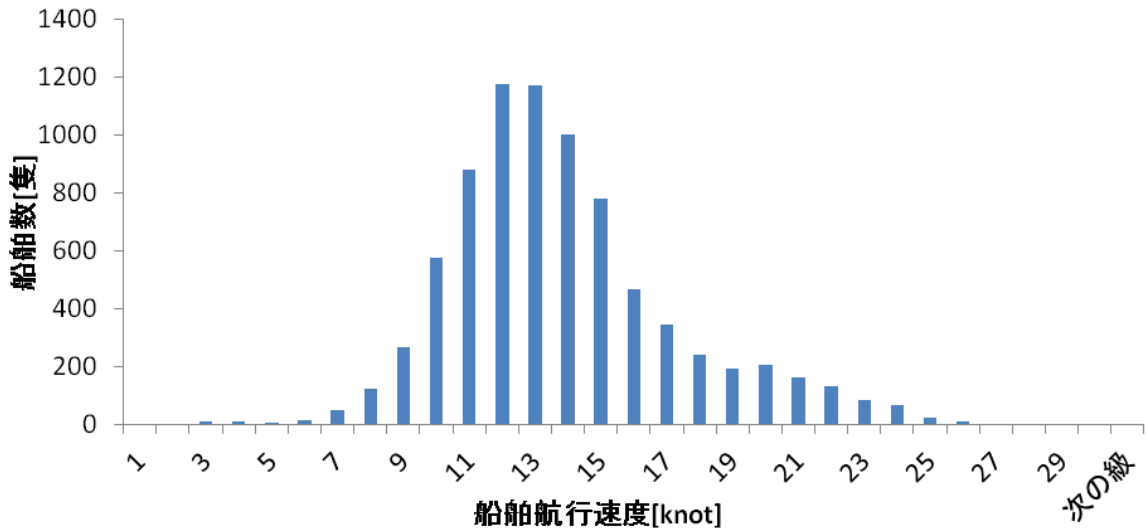


図 4-16 野島崎沖のゲート GL3 を通航した船舶の航行速度分布

#### 4.1.7. 沿岸施設の衝突範囲

第 3.3.6 項において述べたように、漂流した風力発電施設の沿岸施設への衝突範囲は、風力発電施設の浮体幅と沿岸施設の幅を考慮して、沿岸施設の種類ごとに決める。沿岸施設の幅は以下のように設定した。

- ◇ カンパチ生簀 : 1 台あたり 8 m×8 m, x 方向に 2 列, y 方向に 10 列の合計 20 台配置  
⇒適当な間隔を空けて配置し, 全体で x 方向に 20 m, y 方向に 160 m とする
- ◇ マグロ生簀 : 1 台あたり直径 17 m, x 方向に 2 列, y 方向に 3 列の合計 6 台配置  
⇒適当な間隔を空けて配置し, 全体で x 方向に 50 m, y 方向に 120 m とする
- ◇ 藻場 : 約 200 ha の藻場を想定  
⇒仮に x 方向に 1,000 m, y 方向に 2,000 m とする。
- ◇ 石油備蓄基地 : 上五島の石油備蓄船 390 m×97 m×5 隻を想定  
⇒適当な間隔を空けて配置されており, 全体で x 方向に 400 m, y 方向に 750 m と推定

それぞれの沿岸施設は座標(a, b)に、上記で設定した幅を持って存在していると考え。x 方向の幅を Bx, y 方向の幅を By とおくと、沿岸施設位置の座標は海岸線上に設定しているため a=0 であり、沿岸施設は海岸線より海側に存在するため、沿岸施設の東端の x 座標は、

$$0+Bx = Bx \quad \dots (4-4)$$

となる。また、y 方向の幅は b を中心に左右対称に設定し、沿岸施設の北端および南端の y 座標はそれぞれ、

$$\begin{cases} b + B_y/2 & (\text{北端}) \\ b - B_y/2 & (\text{南端}) \end{cases} \quad \dots (4-5)$$

と表すことができる。

漂流した風力発電施設の衝突範囲は、漂流開始地点(i, j)から見た沿岸施設の左端と右端の頂点の座標に、風力発電施設の浮体幅  $B_f$  を考慮して設定する。

#### 4.1.8. 船舶の衝突による風力発電施設の被害額

船舶の衝突による風力発電施設の被害は、衝突速度によって被害の程度が異なると考えられるが、その被害が浮体への亀裂の発生であろうと破口の発生であろうと、損傷した部分の板を交換するという作業としては変わらず、修理にかかる期間や費用にも大きな差は出ないと予想される。ただし修理期間については修理用のドックの空き状況や工場の状態にも左右されるため、繁忙期には長期にわたり修理ができず、その間の売電収入も得られなくなる可能性がある。

従って、この被害金額の算出には、衝突速度による被害の程度の問題ではなく、修理期間のばらつきの問題を重視する必要がある。しかしこれは被害発生時の状況によるもので、予測が困難であることから、修理期間を1週間(7日)、1ヶ月(30日)、半年(183日)の3段階に設定し、それぞれの場合に得られなくなる売電収入を平均したものを、この被害金額として用いる。つまり、式(3-59)の $T_w$ について、以下のように定める。

$$T_w = \frac{7 + 30 + 183}{3} \quad \dots (4-6)$$

また、設備利用率は洋上での風況と今後の技術革新を見込んで、ここでは $R_w = 0.4$ として計算する。

#### 4.1.9. 風力発電施設漂流の被害額

この被害額は、残りの供用期間によって変化するが、ここでは式(3-60)において $T_r = 10$ としたときの計算例を示すこととする。

#### 4.1.10. 風力発電施設の衝突による沿岸施設の被害額

##### 4.1.10.1. 生簀等の漁業施設

生簀はカンパチ養殖用とマグロ養殖用の2種類を考え、式(3-61)中の各変数は、表4-3のように設定した[59]。生簀の台数は、ここではそれぞれ20台および6台に設定して計算例を示すこととする。

##### 4.1.10.2. 藻場等の生態系サービス

藻場・干潟の生態系サービスは、全ての生態系のなかでトップクラスの1.9~2.3万ドル/ha/

年 [60]と推算されている。ここではこの平均値として 2.1 万ドル/ha/年を使用し、被害を受ける面積は、風力発電施設の浮体を真上から見た時の三角形の外接円の面積と仮定して計算例を示すこととする。すなわち、式(3-62)において、 $V_{SW} = 21,000$  [ドル/ha],  $A_{SW} = 1.58$  [ha] とする。また、 $R_{dy} = 117.63$  (2014 年 12 月 11 日現在のドル円相場) とした。

表 4-3 養殖施設の被害額算出に使用するパラメータの設定

	カンパチ養殖	マグロ養殖
生簀サイズ	8 m×8 m×8 m	直径 17 m, 深さ 6 m
生簀金額 $V_a$ [万円/台]	400	500
出荷時の質量 $m_f$ [kg/匹]	3.00	30.0
出荷時の金額 $V_f$ [万円/kg]	0.0800	0.360
収容匹数 $N_f$ [匹/台]	5,000	500

#### 4. 1. 10. 3. 石油備蓄基地

上五島の石油備蓄船には 1 隻あたり 88 万 kL の石油が貯蔵され、これが 5 隻係留されている [61]。ここではこのうち 1 隻に風力発電施設が衝突し、備蓄船内部の石油が全て流出する場合を考えることとする。すなわち、式(3-63)において、 $V_o = 880,000$  とする。また、石油の流出によって汚染される藻場の面積は 200 ha であり、原状回復までに 10 年かかると考え、式(3-64)において、 $A_{SW} = 200, Y_R = 10$  とする。

#### 4. 1. 11. 風力発電施設の衝突による通航船舶の被害金額

ここでは PANAMAX 型ばら積み貨物船の 2014 年 12 月 11 日現在の用船料 8,179 ドル/日 [62]を使用し、式(3-65)において $V_{SU} = 8,179$ とした場合の計算例を示すこととする。なお、修理期間のばらつきについては風力発電施設の修理期間と同様に考えた。

### 4. 2. 計算結果

#### 4. 2. 1. 個々のリスクの発生確率

$p_{11}(i,j) \sim p_{17}(i,j)$ の確率は、それぞれに含まれる計算条件の影響を受けて変化する。これらの条件には、候補エリア内の全ての座標での計算結果に同じ影響を与えるものと、候補エリア内の座標によってその影響の受け方が異なるものがある。前者の場合は候補エリア内のリスク分布の形状は変化せず、その値のみが変化するが、後者の場合は各座標での値の変化率が異なるため、その大小関係が変化することもあり、全体の分布形状が変わることになる。これらの関係をまとめたのが表 4-4 であり、表中、○は明確な影響を与えることを、△はわずかに影響を与える、または間接的に影響を与えることを、×は影響を与えないことを示す。本研究では、実際に計算条件を変化させながらその計算結果への影響を確認し、表 4-4 と相違がないことを確認した。ただし、船舶サイズ分布については本研究では 1 通りの条件のみに設定しているため、この分布の違いによる確率の変化の検証は行っていない。なお、 $p_{14}(i,j)$  および  $p_{17}(i,j)$  は定数で与えているため、表への記載は省略した。

これらの中で、 $p_{11}(i,j)$ 、 $p_{12}(i,j)$ 、 $p_{16}(i,j)$ は候補エリア内の各座標の航路との位置関係によってその確率が変化し、 $p_{15}(i,j)$ は沿岸施設との位置関係によって変化する。一方、 $p_{13,1}(i,j)$ は座標による差が小さく、 $p_{13,2}(i,j)$ は全ての座標で同一値となる。これら 2 つの確率は船舶のサイズと衝突速度によって変化するため、航路や沿岸施設との位置関係とは無関係である。

以上の検討結果の詳細を以下に示す。なお、以下の図は全てメッシュ状の分布図としており、x 方向、y 方向のいずれも 1,000 m 刻みで表示しているが、実際に計算された確率はそれぞれのメッシュの中心に風力発電施設を設置した場合の確率である。従って、この 1,000 m × 1,000 m の範囲のどこに風力発電施設を設置しても同じ確率になるということを示したのではない。以下、リスクの空間分布についても同様である。

表 4-4 計算条件が各リスクの計算結果に与える影響

(左：確率の空間分布形状への影響の有無，右：任意の座標(i, j)における確率の大きさへの影響の有無を示す。)

	環境条件	船舶通航分布	船舶速度分布	船舶サイズ分布	沿岸施設の場所	沿岸施設の種類
$p_{11}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×
$p_{12}$	× ×	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×
$p_{13,1}$	△ ○	× ×	× ×	△ ○	× ×	× ×
$p_{13,2}$	× ○	× ×	× ○	× ○	× ×	× ×
$p_{15}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	○ ○	△ ○
$p_{16}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×

#### 4.2.1.1. 船舶の漂流による風力発電施設への衝突確率 $p_{11}(i,j)$

ある座標(i, j)に風力発電施設があるとき、 $p_{11}(i,j)$ は環境条件によってのみ変化する。また、風力発電施設の位置が変化すると、漂流開始地点と目標地点（風力発電施設の位置）の位置関係が変化するので $p_{11}(i,j)$ も変化する。さらに、計算時の風向や海潮流向の刻み幅によってその計算精度が変化すると思われる。この刻み幅の影響を検証するため、図 4-17 から図 4-20 に海域 No.1 の環境条件での $p_{11}(i,j)$ を、風向および海潮流向の刻み幅を 30°、10°、5°、1° の 4 種類に設定して計算した結果を示す。

これらの結果から、30° 刻みの風向、海潮流向で計算した場合が最も $p_{11}(i,j)$ が大きく、刻み幅が小さくなるほど $p_{11}(i,j)$ が小さく推定されていることが分かる。また、全体の傾向として東西方向では航路から離れるほど $p_{11}(i,j)$ が小さくなるが、30° 刻みの場合や 10° 刻みの場合には、一部の地点でこの傾向が逆転しており、5° 刻みや 1° 刻みの場合と比べて $p_{11}(i,j)$ の分布が滑らかでないことが分かる。南北方向については、30° 刻みの場合には候補エリア内の北西の海域で顕著に $p_{11}(i,j)$ が小さくなっており、これは海域 No.1 の風の条件が南東より北東からの風の頻度が高いためと考えられる。しかし、そのほかの刻み幅での計算結果を見るとこのような顕著な差はなく、候補エリアの南北方向中心が最も $p_{11}(i,j)$ が大きく、この中心から南北に離れて行くにつれて $p_{11}(i,j)$ が小さくなる傾向がある。つまり、東西方向の分

布の特徴と合わせると、候補エリア内の南北方向の中心かつ航路に最も近い東の地点で  $p_{11}(i,j)$  が最大になり、この地点から離れるほど  $p_{11}(i,j)$  が減少することになる。この特徴は環境条件の方向の刻み幅が小さいほど明確に示されている。このように環境条件の方向の刻み幅によって  $p_{11}(i,j)$  の分布に違いが生じた理由として、以下のように考察する。

風向や海潮流向の刻み幅が大きいと、風や海潮流による漂流方向の刻み幅および、これらを合成した船舶の漂流方向の刻み幅も大きくなる。本研究の設定では、衝突先の風力発電施設の幅が 82 m と比較的小さく、衝突範囲はこの幅と衝突する船舶の長手方向長さによって決まっており、小型船舶ほど衝突範囲も狭いため、十分な精度で漂流方向を計算しないと衝突確率が正しく計算できない。

例えば 30° 刻みの場合、ある船舶漂流開始地点と風車設置位置の位置関係において、風速、海潮流向、海潮流速をそれぞれ 1 つの条件で固定し、風向のみを 12 通りに変化させた場合、1 つの条件で衝突と判定されればこの風速・海潮流向・海潮流速の条件では 12 分の 1 の確率で衝突となる。一方、1° 刻みで風向を変化させる場合、30° 刻みの場合に衝突と判定された風向と全く同一の風向では衝突と判定されても、その前後の風向では衝突と判定されない場合、同じ条件でも衝突確率は 360 分の 1 になる。また、その逆のケースとして、刻み幅が大きいことによりいずれの風向でも衝突範囲からわずかに漂流方向がずれ、その風速、海潮流向、海潮流速の条件では衝突確率は 0 となり、全体としても衝突確率  $p_{11}(i,j)$  が小さく推定される可能性もある。

以上の様な理由で、風向・海潮流向の刻み幅が大きいと全体的に衝突確率  $p_{11}(i,j)$  を過大評価してしまうことや、航路からの距離によって  $p_{11}(i,j)$  が滑らかに変化しなくなることが考えられるため、環境条件が関係する計算をする場合にはその風向・海潮流向の刻み幅を十分に小さくすることで、その計算の精度を上げる必要がある。この刻み幅は、候補エリアと航路との距離や風力発電施設の幅、漂流船舶のサイズ分布などによって最適な大きさが変化すると考えられるので、その都度最適な刻み幅を決定する必要がある。本研究では 1° 刻みの場合において十分な精度が得られていると考え、これ以上小さい刻み幅での計算は省略し、 $p_{11}(i,j)$  の計算については全て風向・海潮流向を 1° 刻みにして計算するものとする。

次に、海域 No.1～No.3 の環境条件での  $p_{11}(i,j)$  の計算結果を比較する。図 4-21、図 4-22 はそれぞれ、海域 No.2 と No.3 の環境条件での  $p_{11}(i,j)$  の計算結果であり、これらを図 4-20 と比較すると、これら 3 海域の中では海域 No.2 が最も漂流船舶が衝突しやすい環境条件であることが分かる。この理由としては、図 4-1 から図 4-12 に示した各海域の環境条件を見ても分かるように、海域 No.2 では風向・海潮流向ともに東の方向からの出現頻度が高いため、船舶漂流開始地点  $(k, l)$  から風力発電施設設置位置  $(i, j)$  への漂流頻度が高くなっていることが考えられる。

また、上述の通り航路からの距離が大きくなるほど衝突確率が小さくなるのは、同じ大きさの施設を異なる地点に設置した場合、船舶の漂流開始地点からの距離が遠くなるほど、衝突と判定される角度が小さくなるためである。

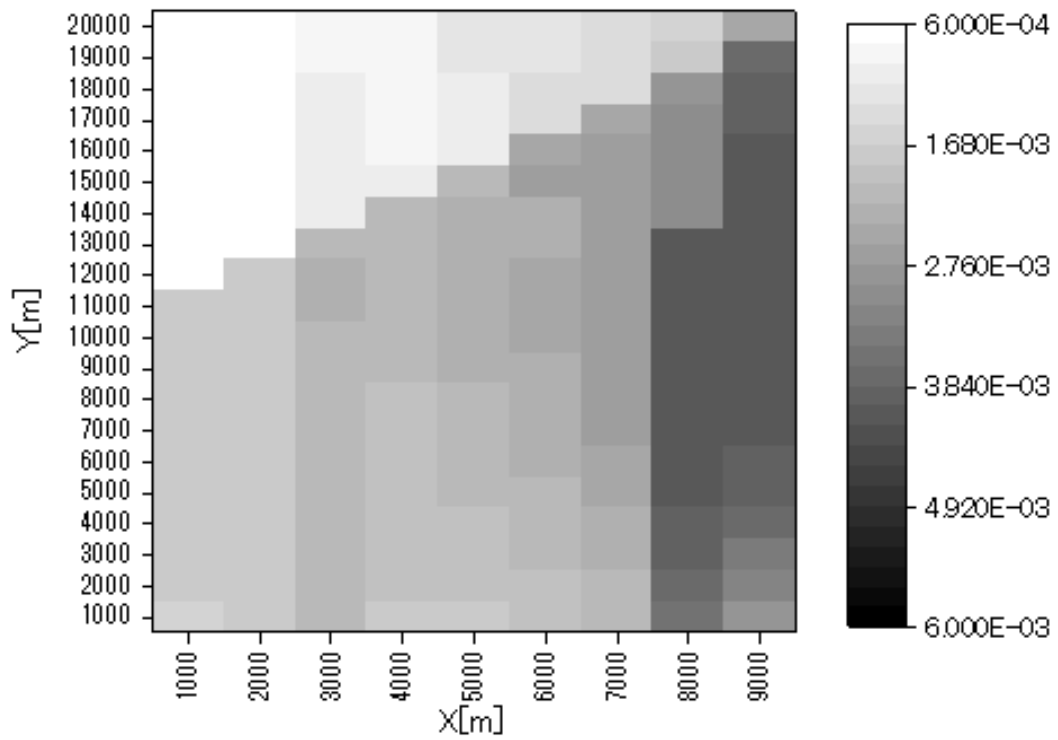


図 4-17 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 30° で計算した $p_{11}$ の分布

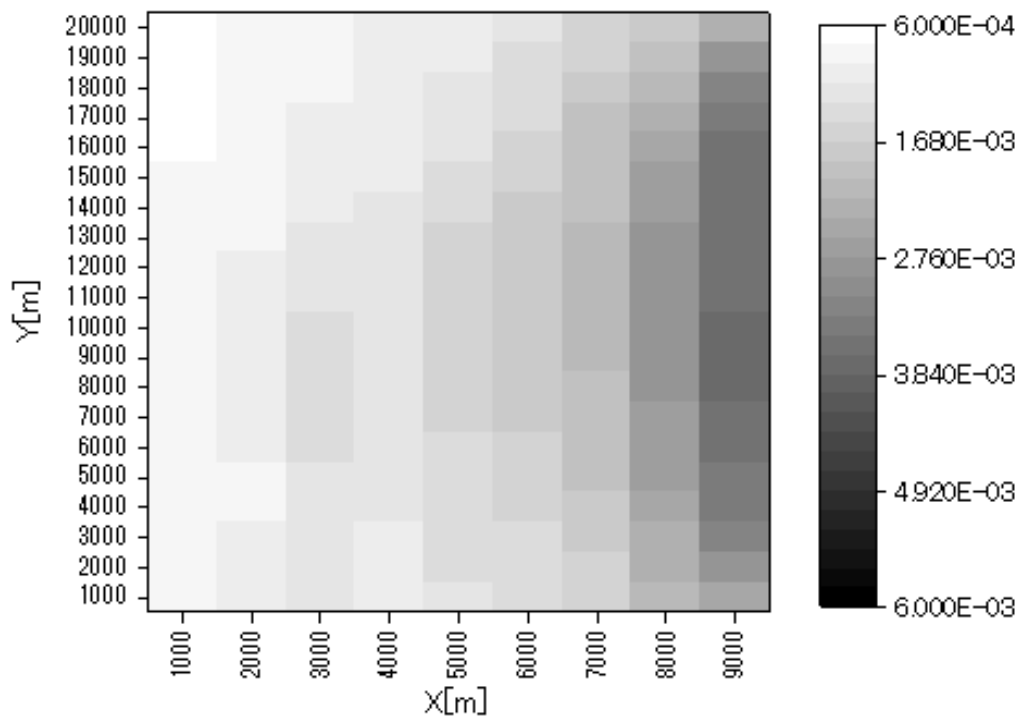


図 4-18 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅 10° で計算した $p_{11}$ の分布

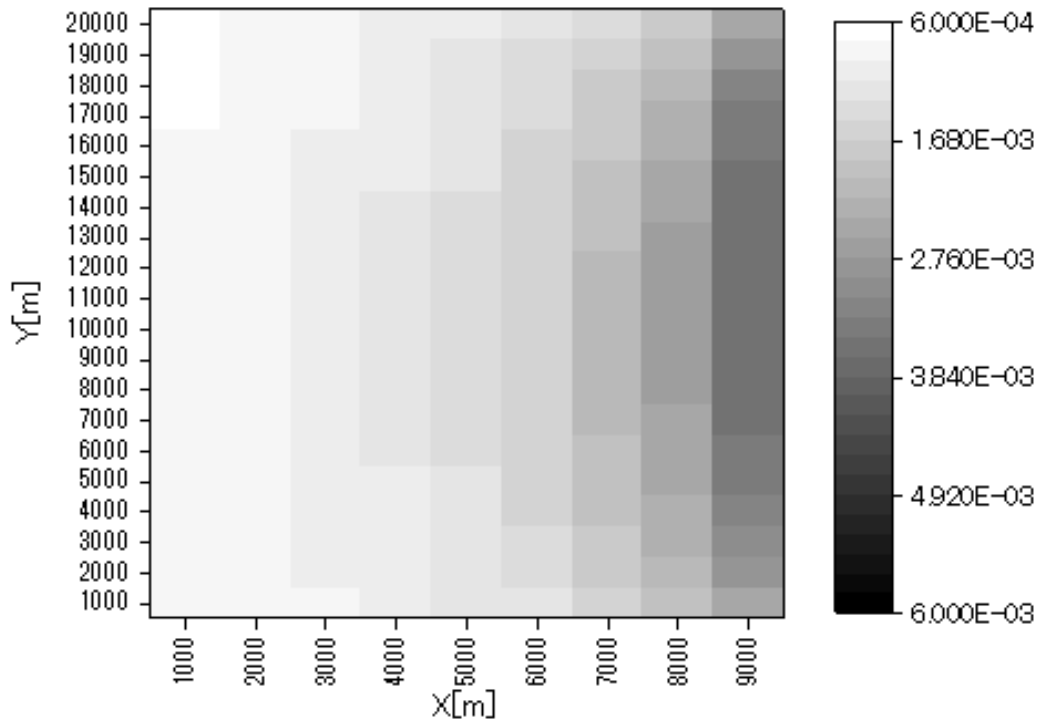


図 4-19 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅  $5^\circ$  で計算した  $p_{11}$  の分布

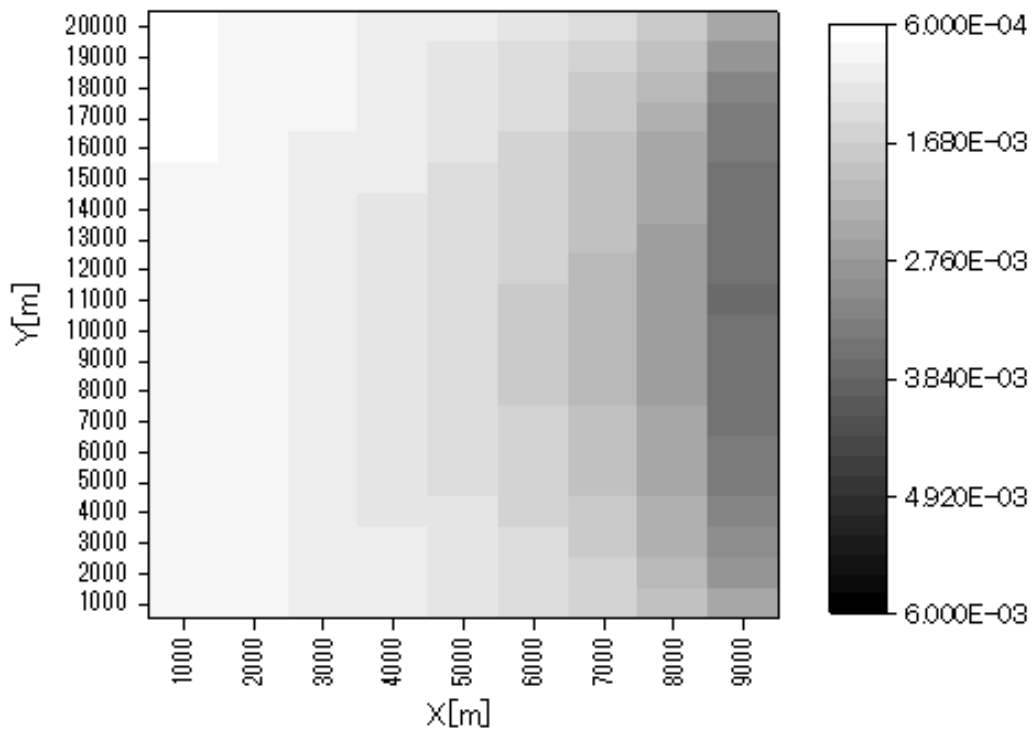


図 4-20 海域 No.1 の環境条件において風向・海潮流向刻み幅  $1^\circ$  で計算した  $p_{11}$  の分布

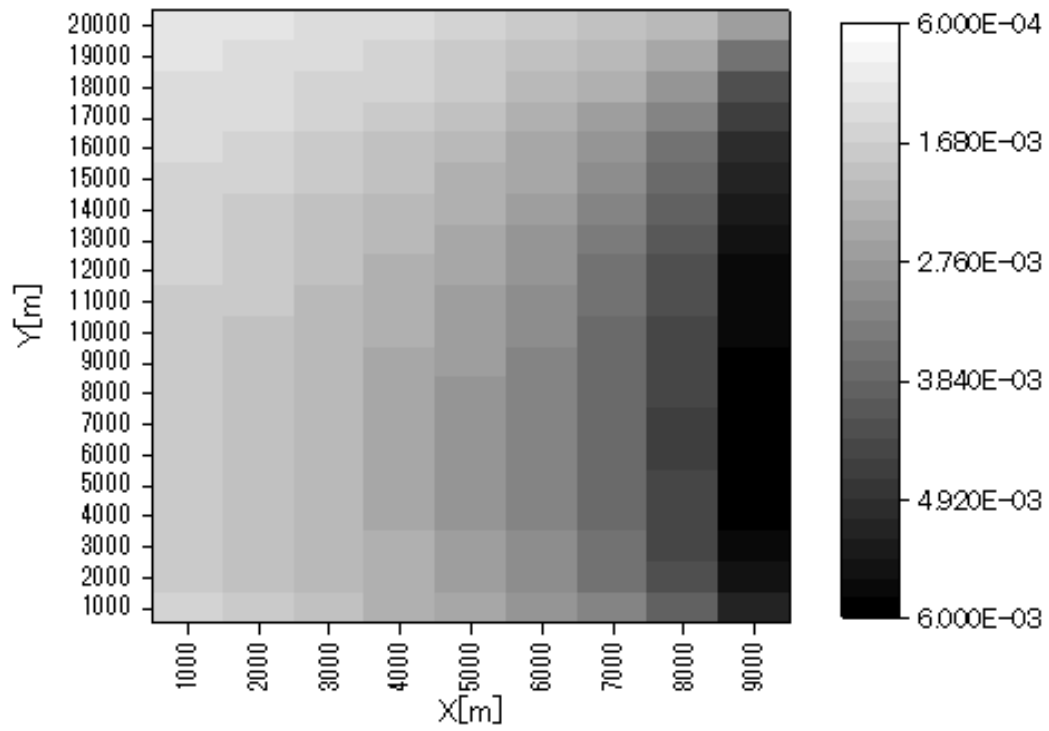


図 4-21 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{11}$ の分布

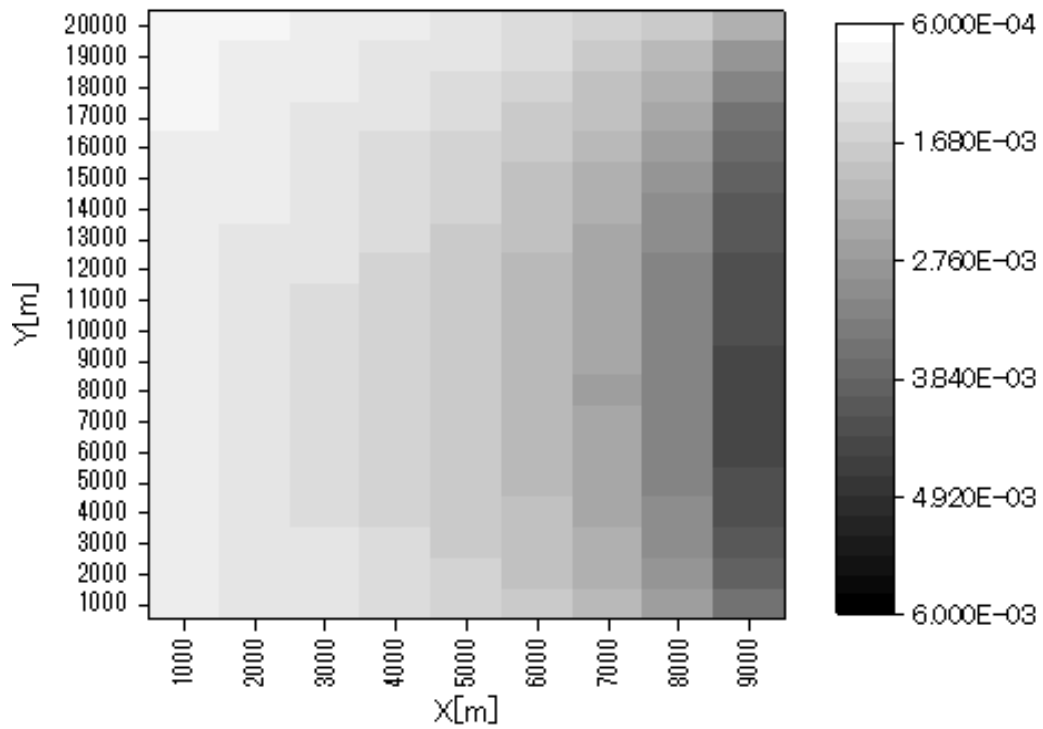


図 4-22 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{11}$ の分布



#### 4.2.1.2. 船舶の操船ミスによる風力発電施設への衝突確率 $p_{12}(i,j)$

ある座標 $(i, j)$ に風力発電施設がある場合、 $p_{12}(i,j)$ は航路幅方向の船舶通航分布によってのみ変化する。また、風力発電施設の位置による $p_{12}(i,j)$ の変化は、航路との距離によってのみ変化するため、 $x$ 座標が同じ場合はこの確率も同じである。よって、 $p_{12}(i,j)$ を $p_{12}(i)$ と書き直す。

前項で作成した岩手沖および野島崎沖の船舶通航分布の近似曲線を利用し、プラットフォーム幅を 82 m にして $P_{CC}(D_L)$ を求めた結果を図 4-23 と図 4-24 に示す。さらに、これらの $P_{CC}(D_L)$ に、3.3.2.2 において求めた $P_{FSIR}$ を掛け合わせると、1 隻の船舶に対する年間衝突確率として $p_{12}(D_L)$ が求められる。これらの分布を図 4-25 および図 4-26 に示す。

岩手沖の分布については、航路中心はゲート上で船舶が通過した地点の陸からの距離の平均（正規分布の頂点の位置）として設定し、図 4-23 の横軸はこの航路中心を原点として陸の方向（左）にマイナス、沖の方向（右）にプラスの値を取るよう設定したものである。本研究の計算例では航路中心を  $k = 10,000$  [m]としているので、図 4-23 の原点がこの位置に当たる。

一方、野島崎沖の分布についてはガンマ分布での近似のため、平均の位置と最も通航頻度の高い位置が一致しない。図 4-24 では平均の位置を原点として岩手沖と同様に作成しているが、最も多くの船舶が通航するのはこの位置から陸側に 7000 m ほど移動した地点である。ガンマ分布の場合の「航路中心」の定義が不明確なため、これを明確に定めるのは難しい。そこで、本研究では野島崎沖データの離岸距離と通航頻度をそのまま使用することにする。つまり、図 4-26 における $D_L = 0$ の位置（平均の位置）を仮に「航路中心相当」として、 $k = 10,000$  [m]にはこだわらず、 $k$ に実際の平均離岸距離を設定することにする。

$p_{12}(D_L)$ を $p_{12}(i)$ に変換するには、 $D_L$ を  $x$ 座標に変換すれば良い。岩手沖の場合、 $D_L$ は航路中心の  $k$  と風力発電施設設置位置 $(i, j)$ の  $x$ 座標  $i$  との距離を意味するので、 $k$ を $D_L = 0$ の地点としたときの風力発電施設の位置が $D_L$ だから、

$$D_L = (i - k)dx \quad \dots (4-7)$$

と表され、この関係を用いて $p_{12}(i)$ に変換することができる。一方、野島崎沖の場合も航路中心相当として設定した  $k$  の値を用いて同様に変換することができる。

以上により、本研究の風力発電施設設置候補エリア内での $p_{12}(i)$ を求めると表 4-5 のようになる。表中では、岩手沖および野島崎沖の船舶通航分布を利用した場合と、岩手沖データ（正規分布）の標準偏差を 2 nm および 3 nm に変化させた場合の計算結果を比較している。なお、野島崎沖のデータでは図 4-26 における $D_L = 0$ の位置の離岸距離が約 13 km のため、候補エリア内の  $x$ 座標の範囲では  $i = 5,000$  以下の地点では船舶が通航せず、衝突確率も 0.00 となっている。

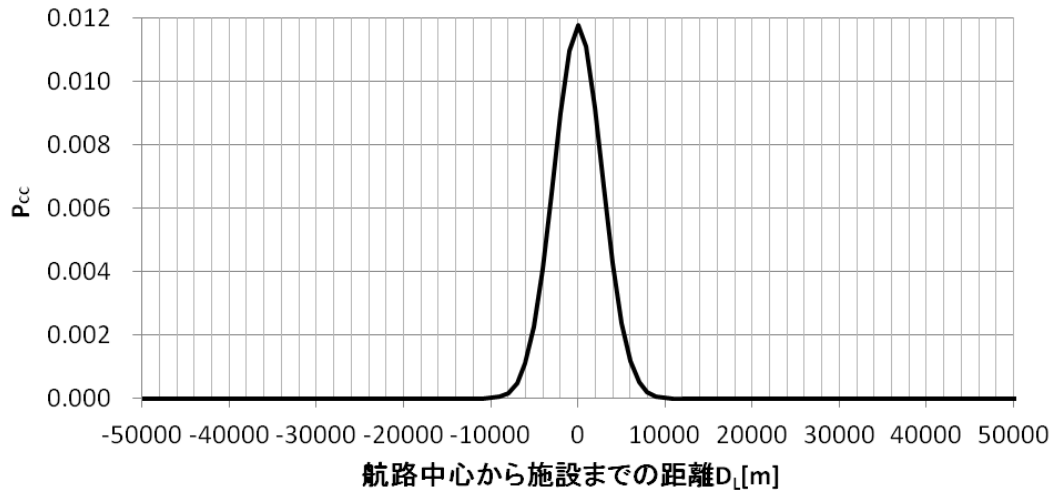


図 4-23 正規分布で近似した岩手沖の船舶通航量分布から求めた $P_{Cc}(D_L)$

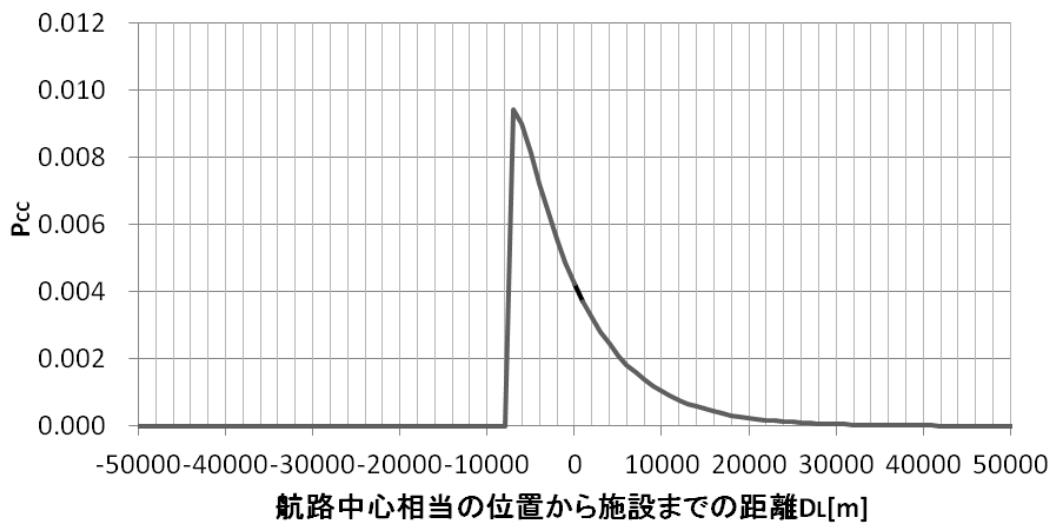


図 4-24 ガンマ分布で近似した野島崎沖の船舶通航量分布から求めた $P_{Cc}(D_L)$

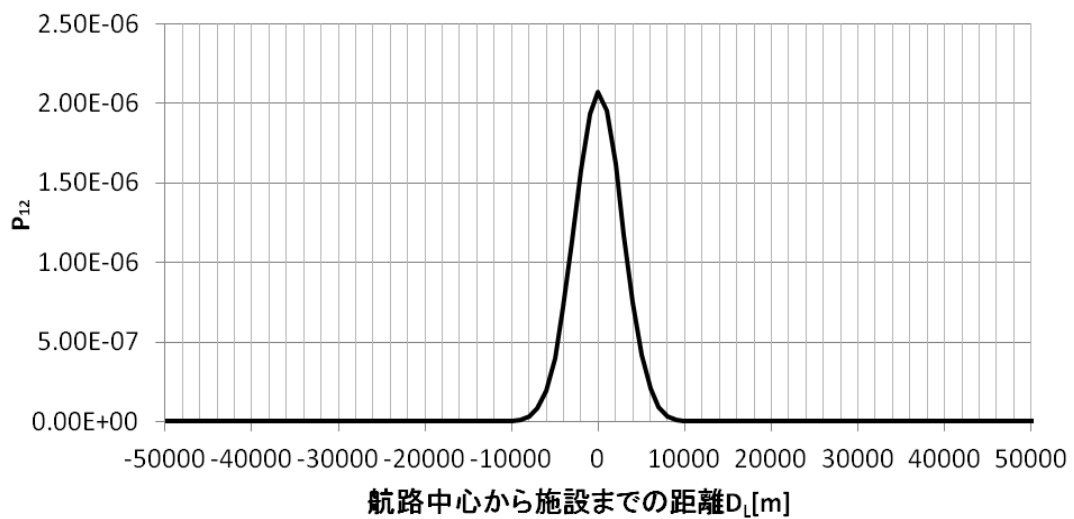


図 4-25 正規分布で近似した岩手沖の船舶通航量分布から求めた $P_{12}(D_L)$

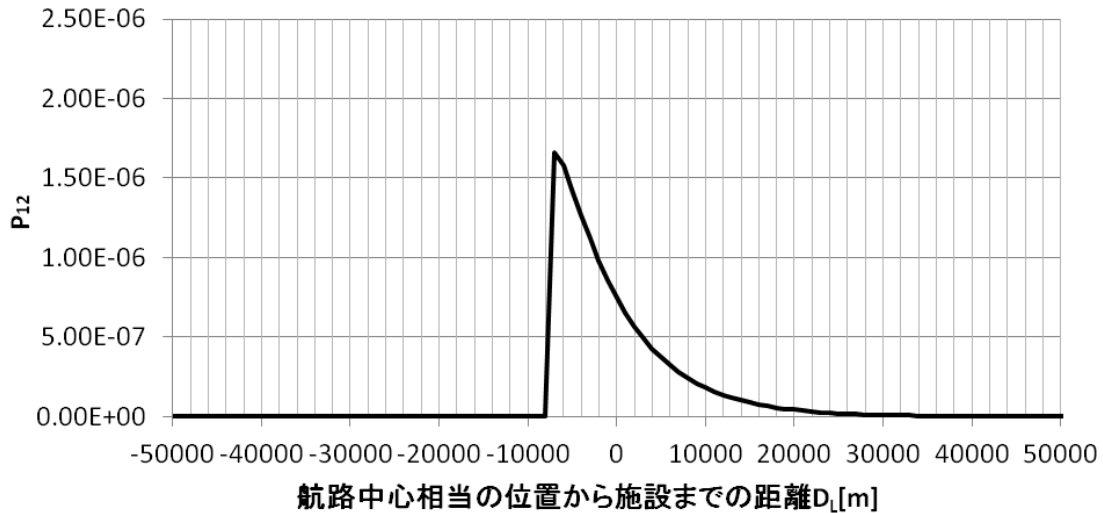


図 4-26 ガンマ分布で近似した野島崎沖の船舶通航量分布から求めた $P_{12}(D_L)$

表 4-5 船舶通航分布別の操船ミスによる年間衝突確率 $p_{12}$ の分布

風車設置位置 の x 座標	1 隻あたりの年間衝突確率 $p_{12}$			
	岩手沖分布 ( $\sigma=1.5$ )	$\sigma=2.0$	$\sigma=3.0$	野島崎沖分布
1,000	$1.09 \times 10^{-8}$	$8.12 \times 10^{-8}$	$2.79 \times 10^{-7}$	0.00
2,000	$3.28 \times 10^{-8}$	$1.51 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-7}$	0.00
3,000	$8.66 \times 10^{-8}$	$2.61 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-7}$	0.00
4,000	$2.01 \times 10^{-7}$	$4.19 \times 10^{-7}$	$5.78 \times 10^{-7}$	0.00
5,000	$4.10 \times 10^{-7}$	$6.25 \times 10^{-7}$	$6.91 \times 10^{-7}$	0.00
6,000	$7.35 \times 10^{-7}$	$8.67 \times 10^{-7}$	$8.00 \times 10^{-7}$	$1.63 \times 10^{-6}$
7,000	$1.16 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$8.95 \times 10^{-7}$	$1.61 \times 10^{-6}$
8,000	$1.60 \times 10^{-6}$	$1.34 \times 10^{-6}$	$9.71 \times 10^{-7}$	$1.46 \times 10^{-6}$
9,000	$1.94 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-6}$

#### 4.2.1.3. 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率 $p_{13,1}(i,j)$

これは漂流船舶が風力発電施設に衝突した場合に施設が漂流する条件付き確率を表しており、ある座標 $(i, j)$ に風力発電施設がある場合、環境条件および船舶のサイズと漂流速度によって $p_{13,1}(i,j)$ が変化する。また、風力発電施設の位置 $(i, j)$ が変化すると、その位置での $p_{11}(i,j)$ の計算時に衝突と判定されたケースの環境条件および船舶サイズの条件によって、 $p_{13,1}(i,j)$ も変化する。従って、 $p_{13,1}(i,j)$ の計算精度は、 $p_{11}(i,j)$ の計算精度に依存する。海域 No.1～No.3 の環境条件での計算結果を図 4-27 から図 4-29 に示す。これらは全て  $1^\circ$  刻みの風向および海潮流向で計算した。なお、これら 3 海域の計算結果はそれぞれ値の分布範囲が異なるため、コンターのスケールを統一していない。

これらの 3 海域の計算結果は全て  $10^{-3}$  のオーダーで、確率の大きい順に海域 No.1, No.3, No.2 となっている。これらの差の原因の一つは各海域の風速や海潮流速の違いによるものと

考えられる。特に海潮流速の違いに着目すれば、海域 No.1 の環境条件ではかなり速度の大きい範囲まで分布が広がっているのに対し、海域 No.3 の環境条件ではこれよりやや低速域に分布が集中、海域 No.2 ではさらに低速域への集中度が高くなっている。これが船舶漂流速度の差につながり、風力発電施設に衝突した際の施設漂流確率の差となっていると考えられる。

一方、同一の環境条件下における各設置候補位置の確率の差は小さく、これは全ての位置で同一の環境条件であり、衝突してくる漂流船舶のサイズと速度の分布もほぼ同じたためである。微少なながら差が出るのは、それぞれの位置によって衝突と判定される場合の船舶サイズと環境条件の組み合わせが異なるためと考えられる。

以上により、船舶が衝突した場合に、衝突された風力発電施設が漂流に至るか否かは、どこに風力発電施設を設置しても大きく変化しないことが予想される。

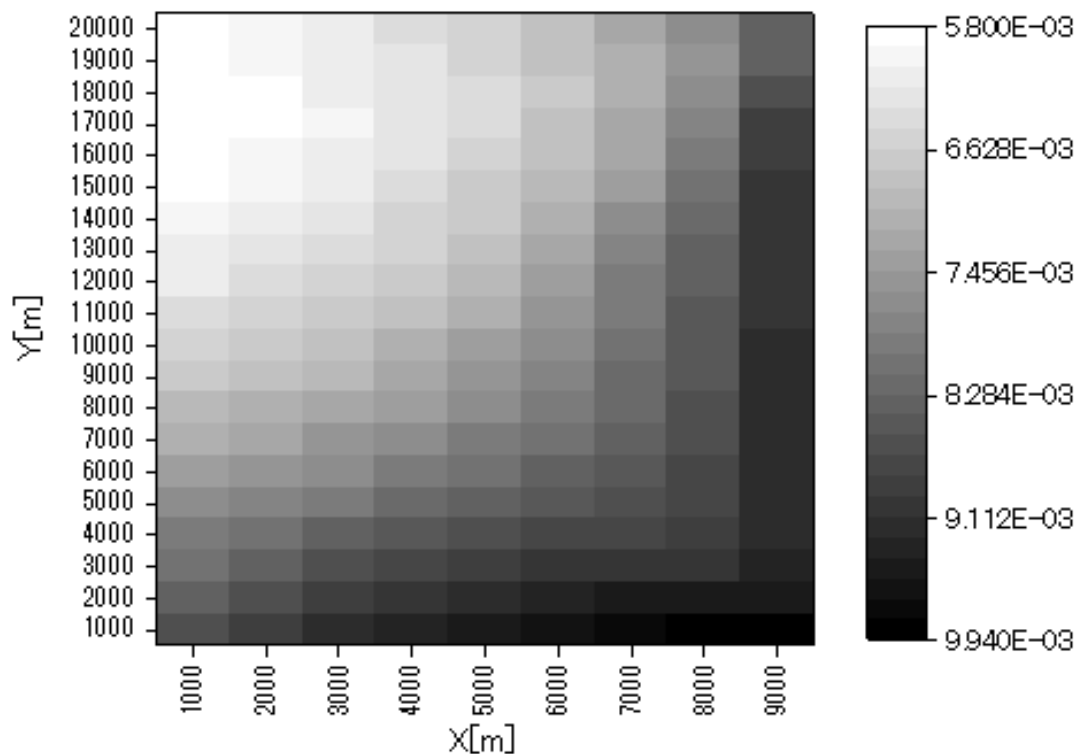


図 4-27 海域 No.1 の環境条件で計算した $p_{13_1}$ の分布

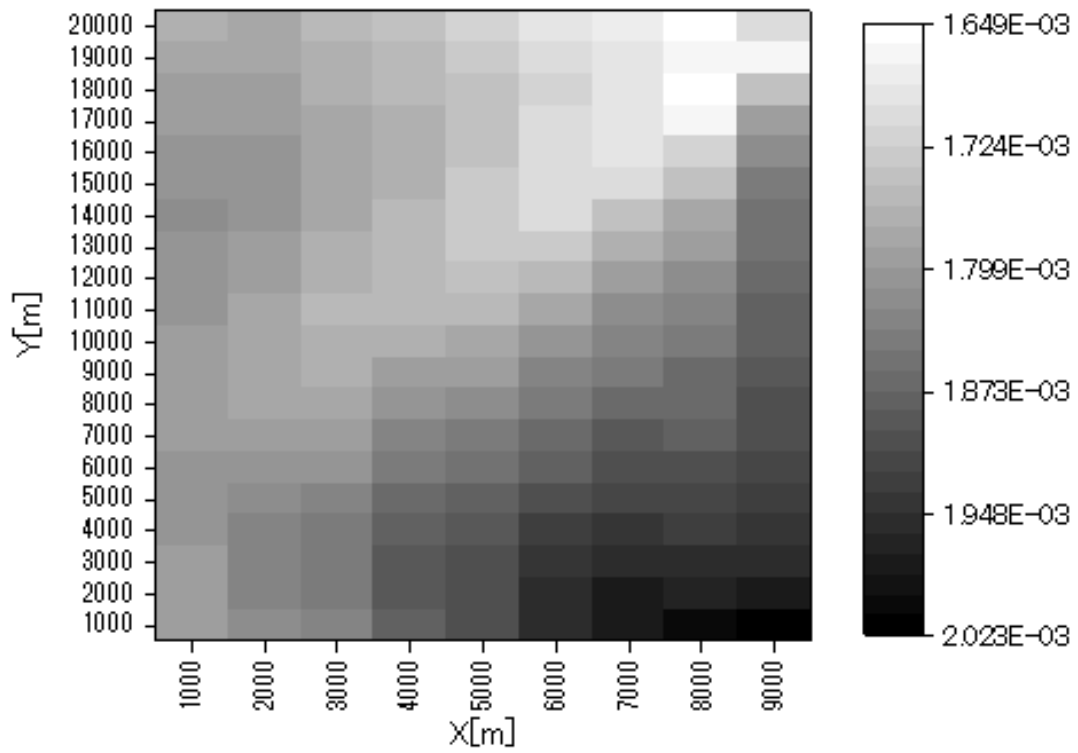


図 4-28 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{13,1}$ の分布

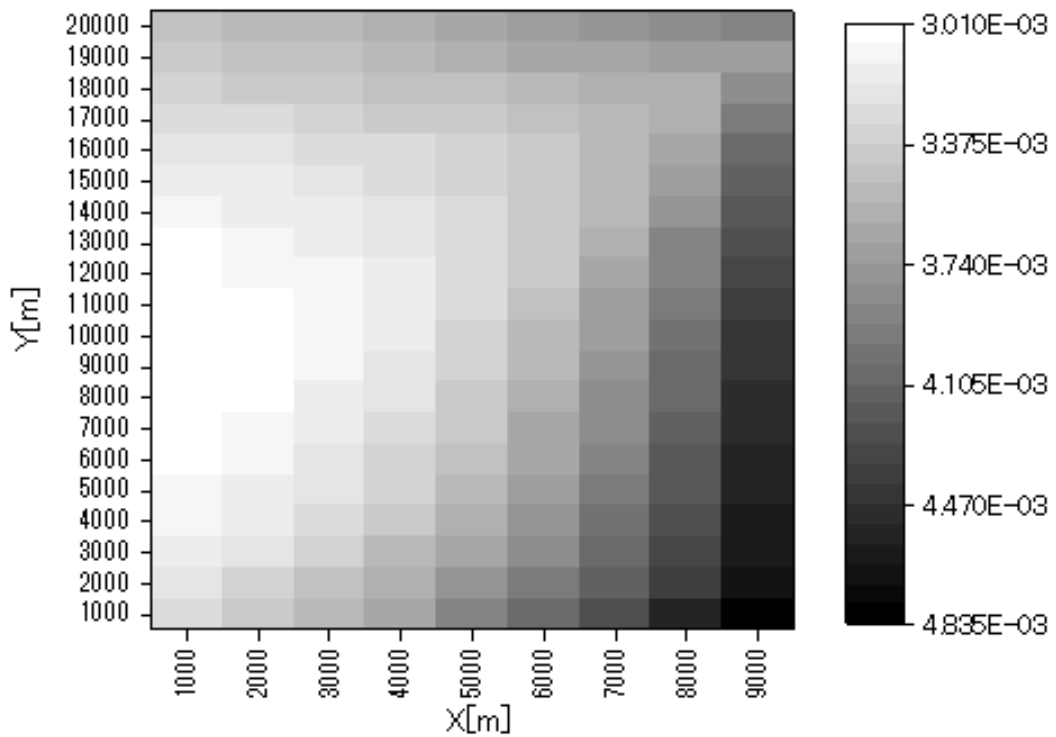


図 4-29 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{13,1}$ の分布

#### 4.2.1.4. 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率 $p_{13,2}(i,j)$

これは船舶が操船ミスによって風力発電施設に衝突した場合に施設が漂流する条件付き確率を表しており、海域 No.1~No.3 の環境条件によって風力発電施設が受ける環境外力と、船舶の衝突エネルギーによって漂流確率 $p_{13,2}(i,j)$ が決まる。後者は衝突速度によって変化し、これは航行速度のままと考え、岩手沖および野島崎沖を航行する船舶の航行速度分布を使用して、海域 No.1~No.3 の環境条件と組み合わせて計算した結果を表 4-6 に示す。この確率は同一の環境条件かつ同一の船速分布であれば風力発電施設の設置位置 $(i, j)$ に関わらず一定値となるため、空間分布は示さない。また、この確率の計算に用いる環境条件の風向および海潮流向は、風および海潮流による環境外力の計算にのみ使用され、 $p_{11}(i,j)$ のような漂流方向の計算に使われる訳ではないため、 $1^\circ$  刻みの精度は必要ないと考え、 $5^\circ$  刻みで計算を行った。

計算結果の表より、海域による差は小さく、どの海域で船舶が操船ミスによって衝突しても漂流する確率はほぼ一定であることが分かる。これは施設の漂流に必要なエネルギーのうち、衝突エネルギーが占める割合が大きく、環境外力の寄与が小さいことによるものと考えられる。また、岩手沖の船舶の航行速度分布を使用した場合の計算結果が、野島崎沖の場合より若干値が大きくなっているのは、岩手沖の船舶の航行速度分布には高速域にもピークがあるためと考えられる（図 4-15 参照）。

表 4-6 各海域で船舶が操船ミスによって衝突した場合の風力発電施設の漂流確率 $p_{13,2}(i,j)$

	海域 No.1	海域 No.2	海域 No.3
岩手沖船速分布	0.426	0.438	0.440
野島崎沖船速分布	0.414	0.424	0.427

#### 4.2.1.5. 風向・海潮流環境条件による風力発電施設の漂流発生確率 $p_{14}(i,j)$

この確率は上述の通り、 $10^{-4}$ で統一しているため、確率分布の表示は省略する。

#### 4.2.1.6. 風力発電施設の漂流による沿岸施設への衝突確率 $p_{15}(i,j)$

ある座標 $(i, j)$ に風力発電施設がある場合、 $p_{15}(i,j)$ は環境条件および沿岸施設の場所および種類によって変化する。また、風力発電施設の位置 $(i, j)$ を変化させたとき、 $p_{15}(i,j)$ は沿岸施設との位置関係によって変化する。以下にそれぞれの条件について確率の大きさおよび分布への影響を検証する。なお、沿岸施設の大きさによっては、 $p_{15}(i,j)$ の計算に使用する環境条件の風向および海潮流向の刻み幅は十分に細かくする必要があると思われる。そこで、上記の検証に先立ち、まずはこれらの刻み幅の影響を検証する。

##### (1) 沿岸施設の種類と風向・海潮流向の刻み幅の影響

風向および海潮流向の刻み幅を $5^\circ$ として海域 No.1 の環境条件を使用し、沿岸施設の位置を固定して 5 種類の施設全てについて計算した。一例として図 4-30 にカンパチの養殖生簀が $(0, 1000)$ にある場合の計算結果を示す。5 種類の沿岸施設について比較すると、沿岸施設

の種類が養殖生簀の場合には図 4-30 のように確率の空間分布が滑らかにならないことが分かった。一方、沿岸施設の種類が藻場や石油備蓄基地の場合には分布が滑らかになった。

これらの差は、沿岸施設の大きさの違いによるものと思われ、養殖生簀は本研究で設定した沿岸施設の中で最も海岸線方向の距離（y 方向の長さ）が短く、これが最大なのは藻場、次いで石油備蓄基地となっている。つまり、施設の y 方向の距離がある程度長い場合に空間分布が滑らかになっていることが分かり、本研究の計算条件ではその境界が、カンパチ養殖生簀の 160 m と石油備蓄基地の 750 m の間に存在すると推測される。施設の y 方向距離が短いと確率の空間分布が滑らかにならないのは、これらの計算に利用した風向・海潮流向の刻み幅の設定が  $5^\circ$  であるため、漂流先の被衝突施設が小さい場合には衝突範囲が狭く、十分な精度で衝突確率を計算できていないことによると思われる。（風向・海潮流向の刻み幅と計算精度については第 4.2.1.1 目を参照。）

そこで、風向・海潮流向の刻み幅を  $1^\circ$  にして同様の計算を行った結果を図 4-31 から図 4-34 に示す。ただし、養殖生簀の場合とそれ以外の場合で確率の値の分布幅が異なるため、コンター図のスケールを統一していない。図 4-31 を図 4-30 と比較すると、 $p_{15}(i,j)$  の空間分布が大きく変化し、滑らかになっている。マグロの養殖生簀の場合も同様に滑らかな分布になり、それ以外の沿岸施設についてはさらに滑らかになった。さらに、養殖生簀への衝突確率は、候補エリア内の最大値と最小値の差が小さくなり、(i, j) の位置による確率のばらつきが小さくなっていることが分かる。以上により、 $p_{15}(i,j)$  の計算には風向および海潮流向を  $1^\circ$  刻みにした環境条件を用いることが適切と判断した。以降の検証には  $1^\circ$  刻みでの計算結果を用いる。

また、沿岸施設の種類は空間全体の確率の大きさにも影響を及ぼし、沿岸施設が大きいほど衝突確率も大きくなっていることが分かる。一方、沿岸施設の種類による  $p_{15}(i,j)$  の空間分布の違いを比較すると、いずれも候補エリア内の南西の位置で最も  $p_{15}(i,j)$  が大きくなっており、沿岸施設の種類の違いは  $p_{15}(i,j)$  の空間分布にはそれほど大きな影響を与えないと考えられる。

これらの結果から、沿岸施設との位置関係や環境条件が同一でも、沿岸施設の大きさによって風力発電施設の衝突確率の大きさが大きく変わることを、および沿岸施設の種類による確率分布への影響は小さいことが確認できた。

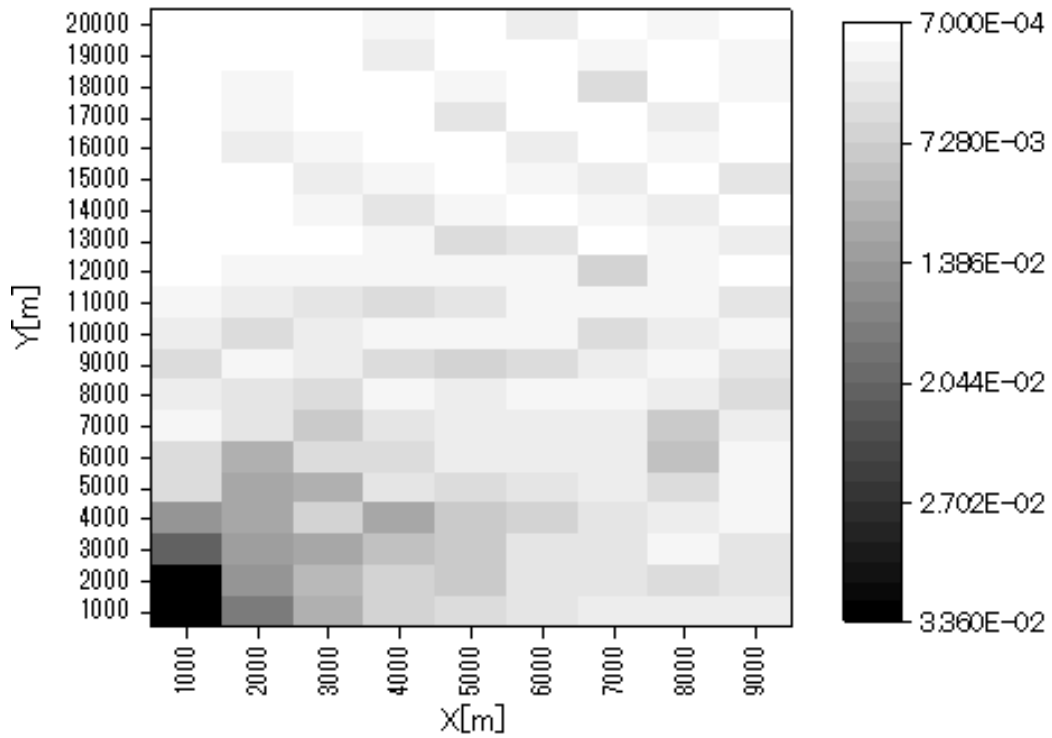


図 4-30 カンパチ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (5° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布

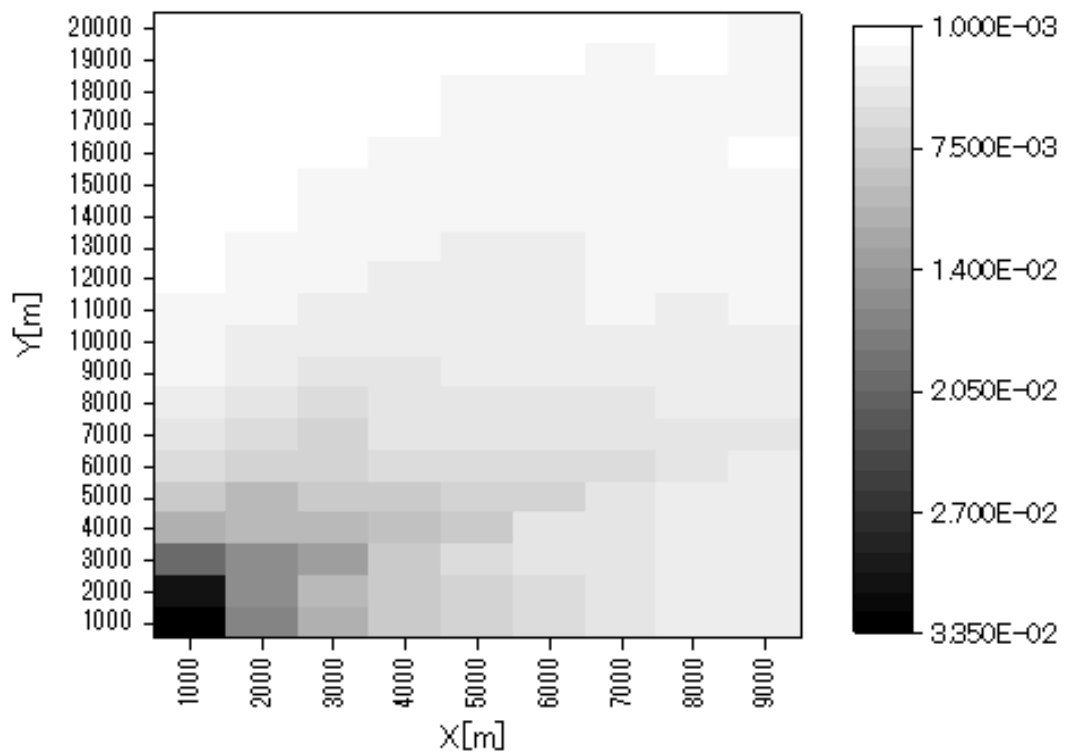


図 4-31 カンパチ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布



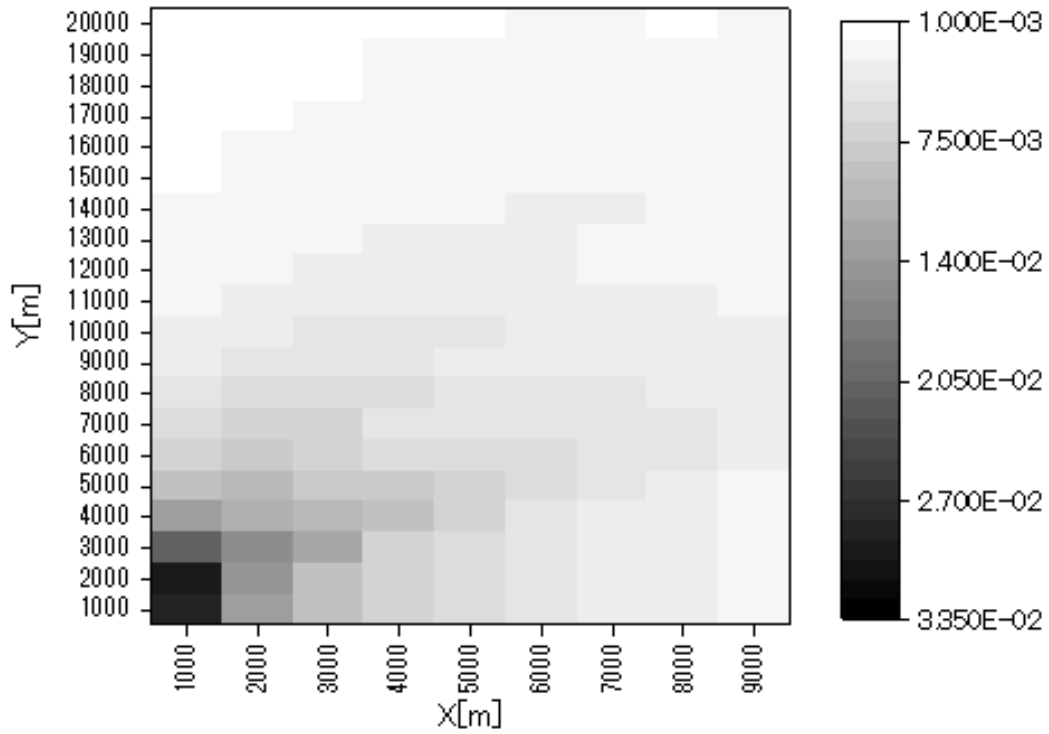


図 4-32 マグロ養殖生簀が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布

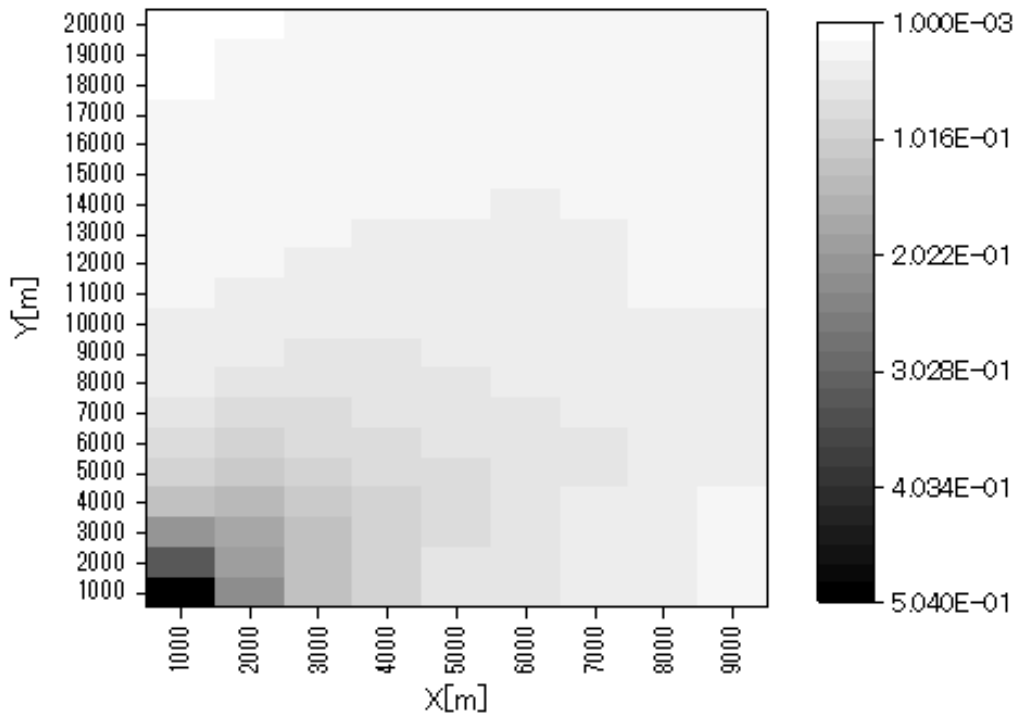


図 4-33 藻場が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布

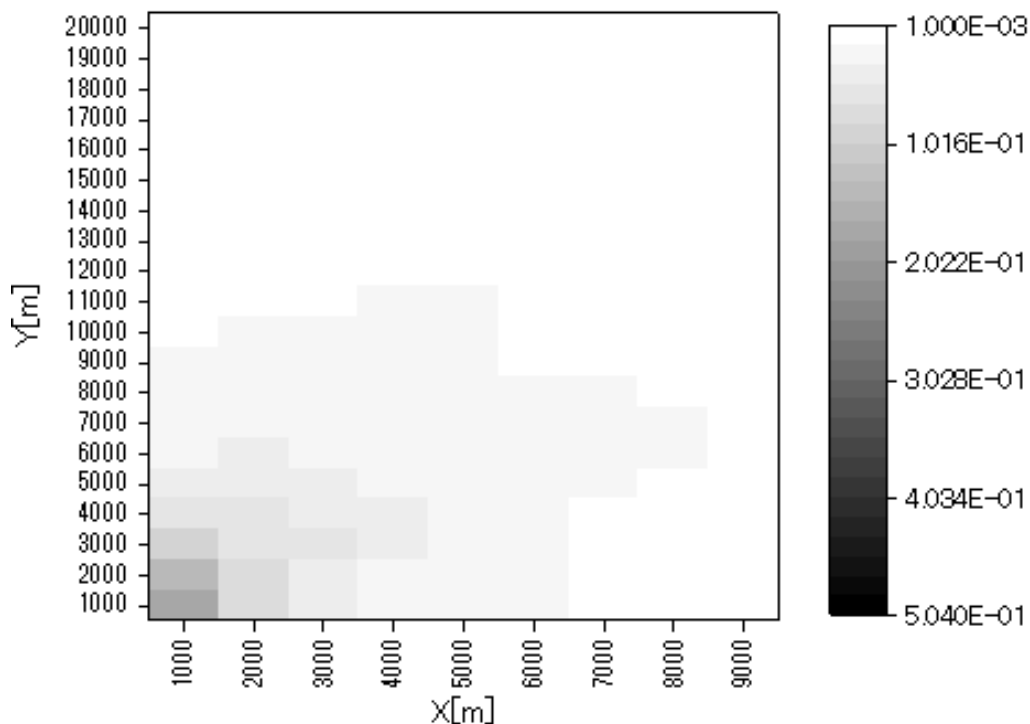


図 4-34 石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件 (1° 刻みの風向・海潮流向) での $p_{15}$ の分布

## (2) 環境条件の違いによる影響

ここでは例として、沿岸施設の種類が石油備蓄基地である場合について、沿岸施設の位置を $(a, b) = (0, 10000)$ とし、環境条件を海域 No.1~No.3 の3通りで計算した結果を図 4-35 から図 4-37 に示す。環境条件の風向および海潮流向は全て 1° 刻みである。

石油備蓄基地が座標(0, 10000)にある場合、いずれの環境条件でも沿岸施設に近い位置 $(i, j) = (1000, 10000)$ で $p_{15}(i, j)$ が最大となっているが、南北方向の分布を見ると、海域 No.1 の環境条件では北側、海域 No.3 の環境条件では南側において $p_{15}(i, j)$ が高く、海域 No.2 の環境条件では中心付近と北西の2ヶ所に $p_{15}(i, j)$ が大きい海域がある。海域 No.1 の風向は南東よりも北東からの頻度が高く、海潮流向は南東と北東の頻度に大きな差がないため、この風向の頻度の影響がリスクの南北差に表れていると思われる。海域 No.2 の風向は東南東からの頻度が高く、海潮流向は東北東からの頻度が高いため、図 4-36 のように $p_{15}(i, j)$ の大きい海域が2ヶ所になったと考えられる。海域 No.3 の環境条件では北東よりも南東からの風の頻度が高いため、 $p_{15}(i, j)$ の分布が図 4-37 のようになったと考えられる。

一方、候補エリア内全体の確率の大きさを比較すると、海域 No.3 がほかの2海域と比べて小さいことが分かる。これは海域 No.3 の環境条件は、西からの風が卓越しており、海潮流も北北西からの流れが卓越しているのに対し、風力発電施設から見た沿岸施設の方向は西の方であるため、相対的にこの方向への漂流確率が小さくなっていることが原因と考えられる。

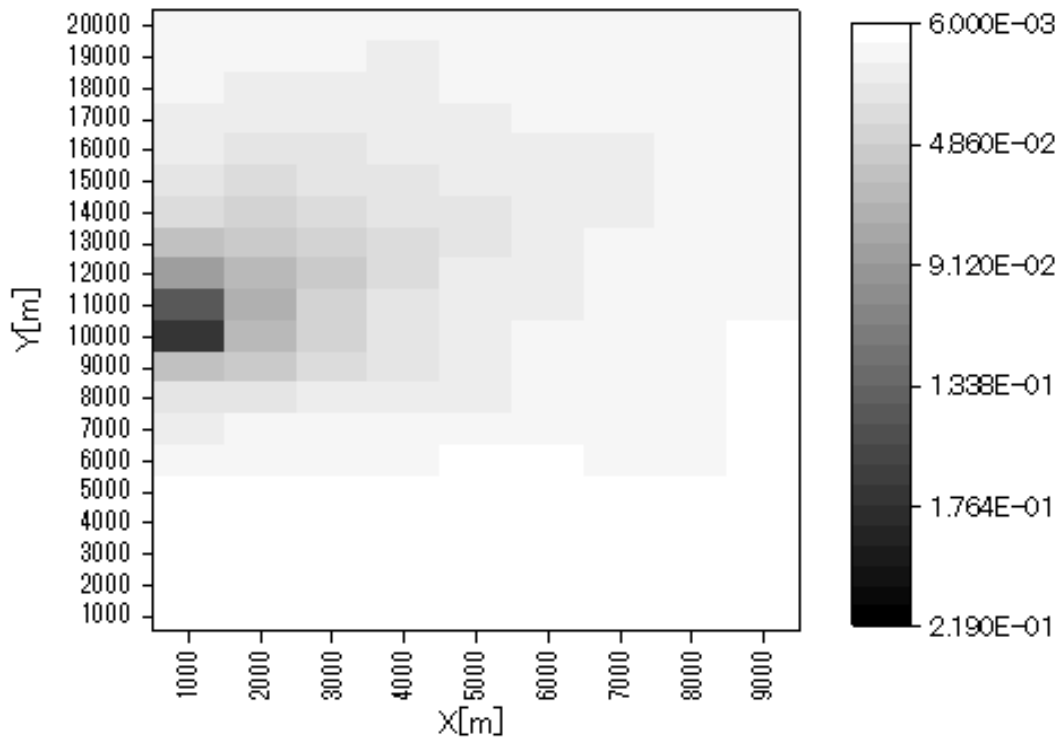


図 4-35 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布

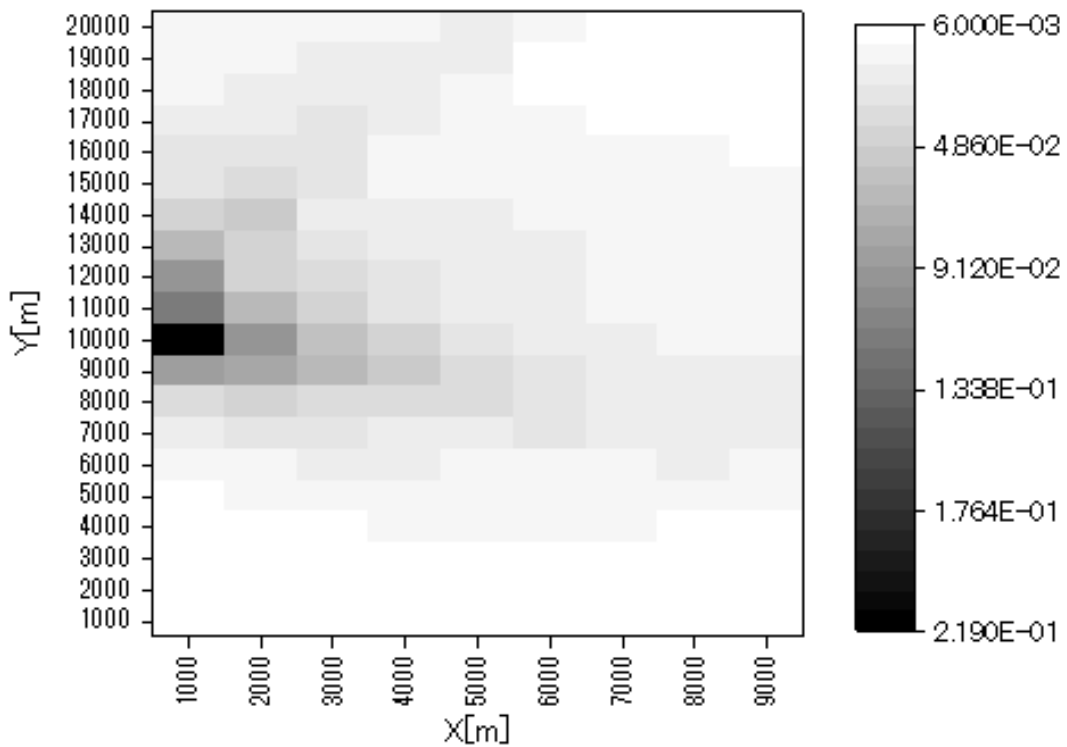


図 4-36 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.2 の環境条件での $p_{15}$ の分布

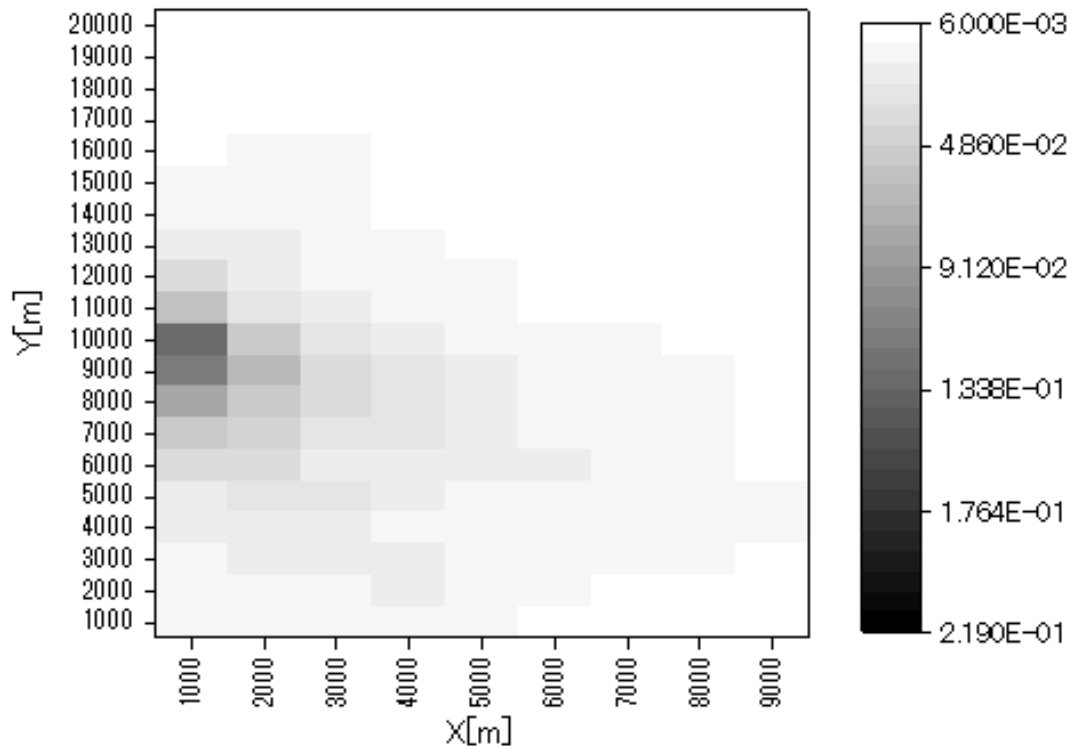


図 4-37 石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合の海域 No.3 の環境条件での $p_{15}$ の分布

### (3) 沿岸施設の位置の影響

図 4-38 に、石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での計算結果を示す。また、石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合の計算結果 (図 4-34) のスケールを変更して図 4-39 に示す。

これらを石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合 (図 4-35) の計算結果と比べると、いずれの場合も石油備蓄基地に最も近い位置で $p_{15}(i, j)$ が最大となっていることが分かる。しかし、 $p_{15}(i, j)$ の空間分布を比較すると、石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合や(0, 10000)には候補エリアの広い範囲に $p_{15}(i, j)$ の大きい位置が分布しているのに対し、(0, 20000)に石油備蓄基地がある場合には $p_{15}(i, j)$ の大きい範囲が狭く、 $p_{15}(i, j)$ の小さい海域が多い。

これは、海域 No.1 の環境条件では北東からの風の方が南東からの風より頻度が高く、石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合は候補エリア内のいずれの位置から風力発電施設が漂流した場合においても沿岸施設に衝突する確率が小さくなるためと考えられる。逆に南東からの風が卓越している海域 No.3 の環境条件による計算結果では、これらとは逆の傾向が見られ、沿岸施設が(0, 20000)にある場合の衝突確率が大きくなる。

以上により、各海域の環境条件および沿岸施設の種類と位置によって、 $p_{15}$ の大きさおよび空間分布が変化することが分かった。

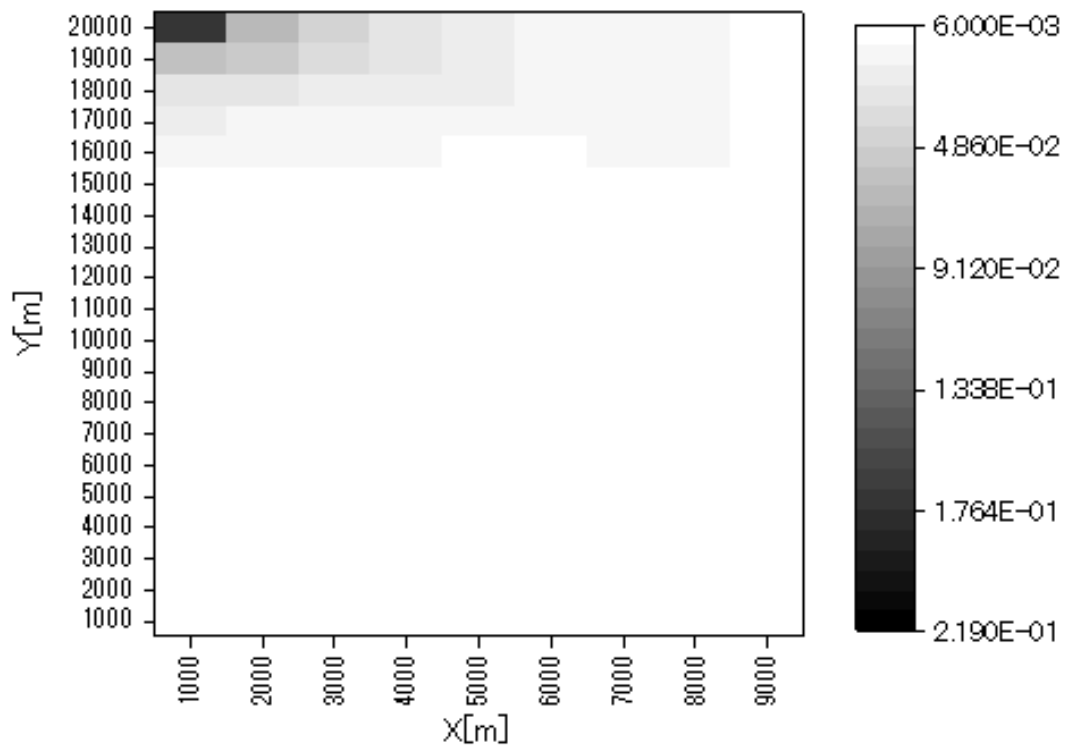


図 4-38 石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布

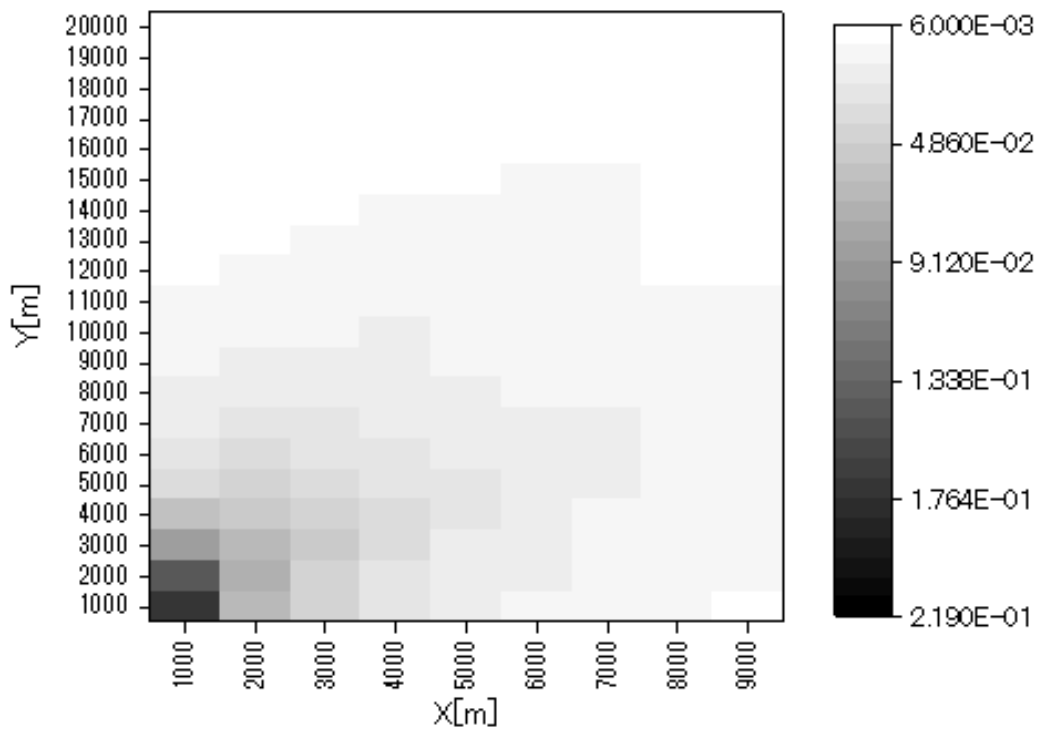


図 4-39 石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合の海域 No.1 の環境条件での $p_{15}$ の分布 (スケール変更)

#### 4.2.1.7. 風力発電施設の漂流による航路への侵入確率 $p_{16}(i,j)$

ある座標 $(i,j)$ における $p_{16}(i,j)$ の値の大きさは環境条件によって変化する。風力発電施設の位置 $(i,j)$ を変化させたとき、 $p_{16}(i,j)$ は航路との位置関係によって変化する。図 4-40 から図 4-42 に海域 No.1~No.3 の環境条件で計算した $p_{16}(i,j)$ の分布を示す。なお、この確率は航路全体への侵入への侵入確率であり、侵入と判定される範囲が広いため、 $1^\circ$  刻みの風向や海潮流向を用いた計算精度は必要ないと判断し、 $5^\circ$  刻みでの計算結果を示す。

これら 3 通りの環境条件での計算結果を比較すると、いずれの場合も $p_{11}(i,j)$ と同様、航路に近い位置から風力発電施設が漂流した場合の侵入確率が高くなっているが、海域 No.2 の場合はほかの 2 海域に比べて全体的に確率が低くなっている。この原因は、ほかの 2 海域では西側からの海潮流が卓越しているのに対し、海域 No.2 では東方向からと西方向からの海潮流の出現頻度がほぼ同一であることが考えられる。これに加え、海域 No.2 では東側からの風が卓越しているために、風力発電施設の東側に位置する航路への侵入確率が小さくなったものと考えられる。

また、各環境条件での計算結果について、 $p_{16}(i,j)$ の空間分布を比較すると、海域 No.1 の環境条件では候補エリアの南側でやや $p_{16}(i,j)$ の値が大きく、海域 No.2 および No.3 の環境条件では逆に、候補エリア内の北側で $p_{16}(i,j)$ の値が大きくなっている。これは海域 No.1 の環境条件では南西からの海潮流が卓越しているのに対し、海域 No.2 および No.3 の環境条件では、南西より北西からの風および海潮流が卓越しているためと考えられる。

なお、本研究では航路長さを有限に設定して航路への侵入判定を行っているため、航路から離れた位置からの漂流では航路への侵入確率 $p_{16}(i,j)$ が小さく、また、候補エリア内の南北方向中心付近からの $p_{16}(i,j)$ が大きくなっている。一方、航路が無限延長まで続いている場合は、東方向に漂流した場合は全て侵入と判定されることになり、航路からの距離や南北方向の座標に関係なく、同一環境条件下では全ての $(i,j)$ に対して同一の確率となると考えられる。

しかし、本研究でこのように設定したのは、実際の太平洋側海域における船舶の航跡 [48]を見ると、陸から海に凸の形状になっている場所（半島や岬のような場所）どうしを順に結んだルートに多くの船舶が通航しているのが分かる。これは時間や燃料の節約のため、なるべく最短ルートを通ろうとするためと考えられる。本研究で考えているような東に航路があり西に沿岸施設がある海域は、実際の海域で考えると、陸から海に凸になっている 2 つの地点を結ぶように航路が存在し、この航路と海岸線に囲まれた海域の条件に近い。従って、本研究では航路を無限延長まで考えることはせず、対象海域の北端と南端がそれぞれ航路の北端と南端であると考えて計算した。

#### 4.2.1.8. 航路に侵入した風力発電施設が航路内の船舶に衝突する確率

この確率は船舶どうしの衝突確率に近似して $7.4 \times 10^{-4}$ /年 [56]で一定値としているため、確率分布は表示しない。

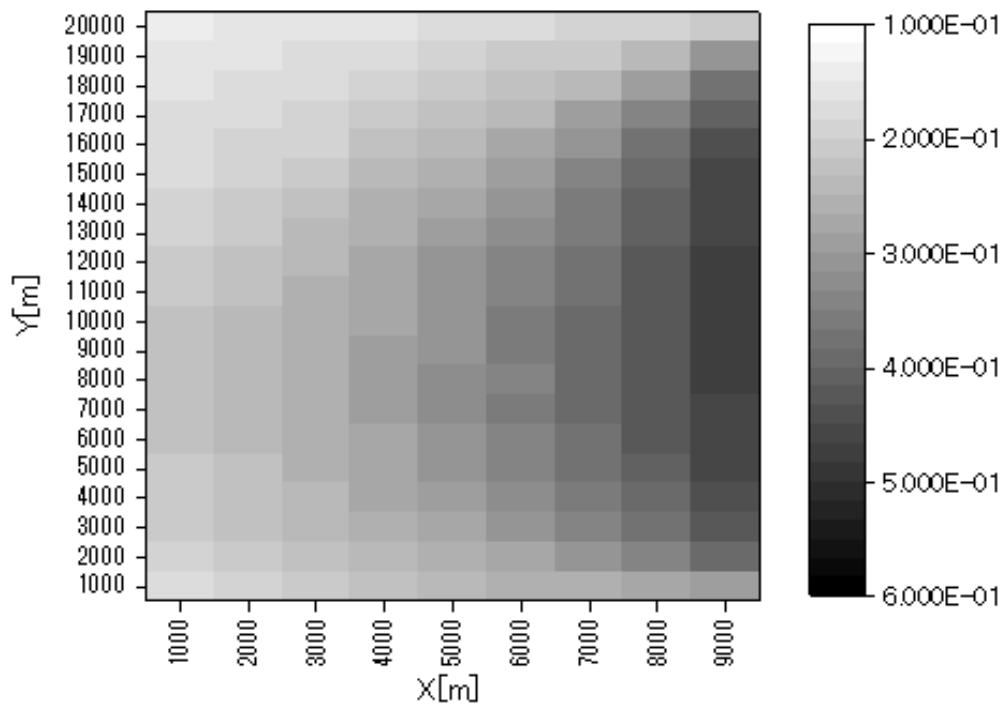


図 4-40 海域 No.1 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布

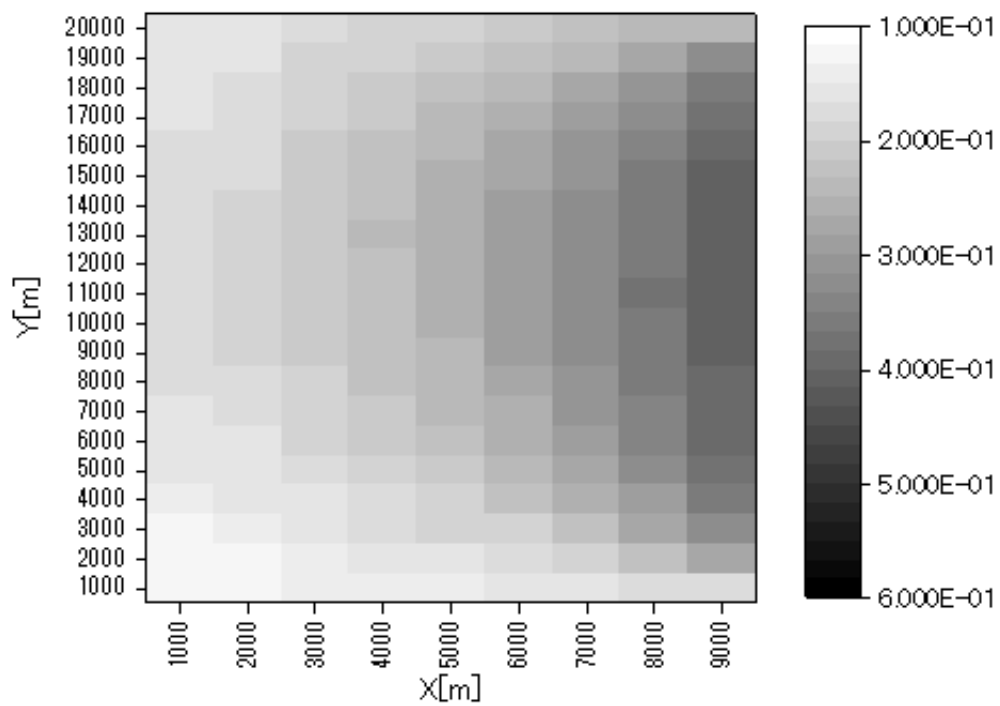


図 4-41 海域 No.2 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布

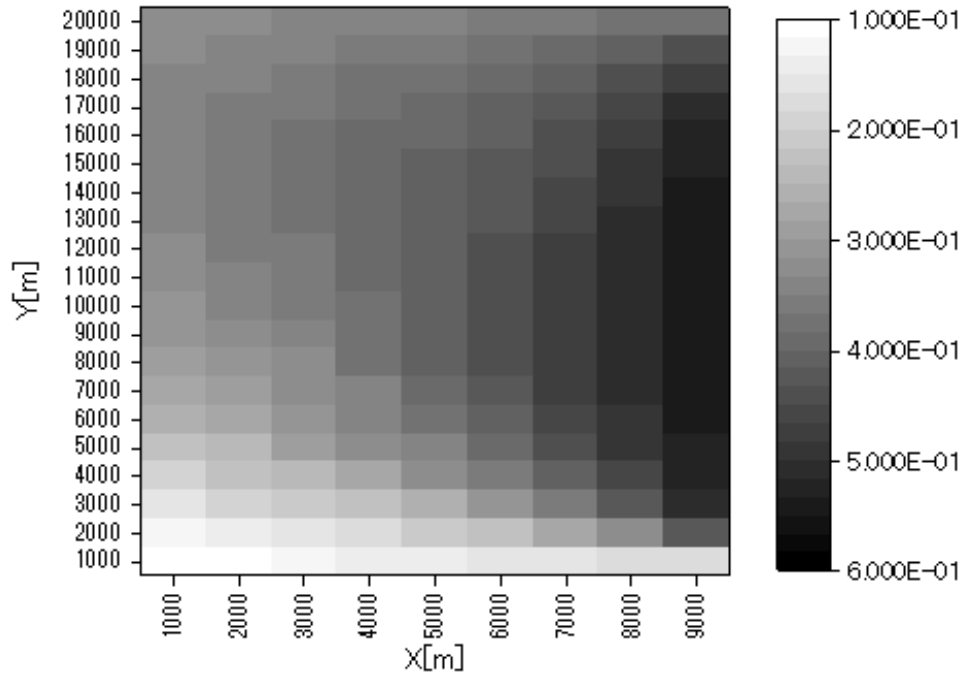


図 4-42 海域 No.3 の環境条件で計算した $p_{16}$ の分布

#### 4.2.2. シナリオごとのリスク

図 3-3 の各リスクの組み合わせによって 17 通りのシナリオができ、これらの各シナリオについて、シナリオ全体のリスクの大きさをそれぞれ  $r_1 \sim r_{17}$  で表すと下記のように定義できる。ただし、 $m_S$  は漂流船舶の年間出現数、 $N$  は船舶の年間通航量である。

$$r_1 = m_S \times p_{11} \times p_{13,1} \times p_{15} \times (s_{13} + s_{15}) \quad \dots (4-8)$$

$$r_2 = m_S \times p_{11} \times p_{13,1} \times p_{16} \times N \times p_{17} \times (s_{13} + s_{17}) \quad \dots (4-9)$$

$$r_3 = m_S \times p_{11} \times p_{13,1} \times p_{16} \times (1.0 - p_{17}) \times s_{13} \quad \dots (4-10)$$

$$r_4 = m_S \times p_{11} \times p_{13,1} \times (1.0 - p_{15} - p_{16}) \times s_{13} \quad \dots (4-11)$$

$$r_5 = m_S \times p_{11} \times (1.0 - p_{13,1}) \times s_{11} \quad \dots (4-12)$$

$$r_6 = m_S \times (1.0 - p_{11}) \times 0.0 \quad \dots (4-13)$$

$$r_7 = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times p_{15} \times (s_{13} + s_{15}) \quad \dots (4-14)$$

$$r_8 = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times p_{16} \times N \times p_{17} \times (s_{13} + s_{17}) \quad \dots (4-15)$$

$$r_9 = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times p_{16} \times (1.0 - p_{17}) \times s_{13} \quad \dots (4-16)$$

$$r_{10} = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times (1.0 - p_{15} - p_{16}) \times s_{13} \quad \dots (4-17)$$

$$r_{11} = N \times p_{12} \times (1.0 - p_{13,2}) \times s_{11} \quad \dots (4-18)$$

$$r_{12} = N \times (1.0 - p_{12}) \times 0.0 \quad \dots (4-19)$$

$$r_{13} = p_{14} \times p_{15} \times (s_{14} + s_{15}) \quad \dots (4-20)$$

$$r_{14} = p_{14} \times p_{16} \times N \times p_{17} \times (s_{14} + s_{17}) \quad \dots (4-21)$$

$$r_{15} = p_{14} \times p_{16} \times (1.0 - p_{17}) \times s_{14} \quad \dots (4-22)$$

$$r_{16} = p_{14} \times (1.0 - p_{15} - p_{16}) \times s_{14} \quad \dots (4-23)$$

$$r_{17} = (1.0 - p_{14}) \times 0.0 \quad \dots (4-24)$$



これらの各シナリオを構成するリスクの発生確率は、表 4-4 に示したように、環境条件、船舶通航分布、船舶速度分布、船舶サイズ分布、沿岸施設の場所と種類によって変化する。また、各シナリオのリスクも、それを構成するリスクの発生確率に影響を受けるため、 $p_{11} \sim p_{17}$ のいずれをシナリオに含むかによって各シナリオのリスクが影響を受ける計算条件も決まることになる。ただし、各シナリオには $p_{11} \sim p_{17}$ のリスクの発生確率のみでなく、それらの被害額や年間船舶通航量、年間漂流船舶出現数等も含まれるようになり、リスクの大きさに影響する計算条件の種類も表 4-4 と比べて増加し、複雑化する。

そこで、計算条件の差による計算結果の差の比較に先立ち、各シナリオのリスク値 $r_1 \sim r_{17}$ が、どの計算条件に影響を受けるのかを整理したのが表 4-7 である。表 4-4 において各計算条件による影響を受けると判断されたリスクが含まれているシナリオについては、その計算条件がシナリオ全体のリスク値にも影響があることを示している。ただし、年間漂流船舶出現数は年間船舶通航量に比例する設定となっているため、この表では省略した。また、 $r_6$ 、 $r_{12}$ 、 $r_{17}$ については、何の被害にも至らないシナリオのリスク値であるため、全て 0 であるから、どの計算条件の影響も受けないものとして除外した。

表 4-7 任意の位置における各シナリオのリスクの大きさに対する計算条件の影響

(左：リスクの空間分布への影響の有無，右：任意の座標(i, j)におけるリスク値への影響の有無を示す。○：影響あり，△：影響はあるが小さい，×：影響なし，◎：シナリオ中の2つ以上の変数またはパラメータに影響あり。)

	環境条件	年間船舶通航量	船舶通航分布	船舶速度分布	船舶サイズ分布	沿岸施設の場所	沿岸施設の種類
$r_1$	○ ○	× ○	× ×	× ×	△ ○	○ ○	△ ◎
$r_2$	○ ○	× ◎	× ×	× ×	△ ○	× ×	× ×
$r_3$	○ ○	× ○	× ×	× ×	△ ○	× ×	× ×
$r_4$	○ ○	× ○	× ×	× ×	△ ○	○ ○	△ ○
$r_5$	○ ○	× ○	× ×	× ×	△ ○	× ×	× ×
$r_6$	—	—	—	—	—	—	—
$r_7$	○ ○	○ ○	○ ○	× ○	× ○	○ ○	△ ◎
$r_8$	○ ○	○ ◎	○ ○	× ○	× ○	× ×	× ×
$r_9$	○ ○	○ ○	○ ○	× ○	× ○	× ×	× ×
$r_{10}$	○ ○	○ ○	○ ○	× ○	× ○	○ ○	△ ○
$r_{11}$	× ○	○ ○	○ ○	× ○	× ○	× ×	× ×
$r_{12}$	—	—	—	—	—	—	—
$r_{13}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×	○ ○	△ ◎
$r_{14}$	○ ○	× ○	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×
$r_{15}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×	× ×
$r_{16}$	○ ○	× ×	× ×	× ×	× ×	○ ○	△ ○
$r_{17}$	—	—	—	—	—	—	—

いずれのシナリオについても、被害額の設定によって計算結果が大きく変わる。例えば沿岸施設の種類によってその被害額も異なるため、風力発電施設の沿岸施設への衝突を含むシナリオのリスク値は、沿岸施設の種類によって変化する。一方、残りの被害額の設定は、風力発電施設や船舶の不稼働損失で考えており、沿岸施設のように多種多様に変化するものではなく、そのときの売電価格や用船料、修理期間によって一意に決まるものであるため、表 4-7 では省略した。

この表より、最も多くの計算条件に影響を受けるシナリオのリスクは、 $r_7$ および $r_{10}$ であることが分かる。ただし、 $r_7$ は沿岸施設の種類の差によって風力発電施設の衝突確率とこれによる被害額の両面から影響を受ける。ここでは、各計算条件が $r_7$ の空間分布や値の大きさによりにどのように影響をあたえるのかを検証する。しかし、 $r_7$ は操船ミスによる船舶の衝突を発端に、風力発電施設が漂流し、沿岸施設に衝突するというシナリオのリスクであり、このシナリオに含まれる $p_{12}(i,j)$ は、特に標準偏差が小さい場合には航路からの距離の影響を非常に強く受ける。そこで、まず $p_{12}(i,j)$ を含む $r_7 \sim r_{12}$ は除外し、残りのリスクの中で最も多くの計算条件の影響を受ける $r_1$ の変化を各計算条件で比較・考察し、このリスクに含まれない計算条件についてのみ、 $r_7$ の検証によって明らかにする。ただし前項と同様、船舶サイズ分布は本研究で 1 条件しか扱っていないので、ここでも検証は省略する。

#### 4.2.2.1. 計算条件の差による $r_1$ の計算結果への影響

##### (1) 環境条件の差による影響

図 4-43 から図 4-45 は、環境条件のみを海域 No.1~No.3 のものに変化させ、その他の計算条件を全て統一した場合の $r_1$ の計算結果である。年間船舶通航量、船舶通航分布、船舶速度分布は全て岩手沖のデータを使用した。これらの図ではいずれも、沿岸施設に最も近い位置(1, 10000)で $r_1$ が最大値を取るが、それぞれの図における $r_1$ の南北差を見ると、海域 No.1 の環境条件では北側でやや大きく、残りの 2 海域の環境条件では南側の方が大きいことが分かる。特に海域 No.3 では南北の差が顕著に現れている。これら空間分布の特徴は $p_{15}(i,j)$ の分布と同様である。また、候補エリア内の $r_1$ の最大値は $p_{15}(i,j)$ の場合と同様、海域 No.3 のリスクがほかの 2 海域と比べて小さい。

以上の比較結果のように、リスクの空間分布は $p_{15}(i,j)$ と同様に陸側で最大値を取る特徴があるが、候補エリアの中心部に比べて航路側のリスクが高くなっているのは、 $p_{11}(i,j)$ や $p_{13,1}(i,j)$ の、航路側での確率が大きい特徴が現れているためと考えられる。

##### (2) 沿岸施設の位置の差による影響

沿岸施設の位置以外の条件は統一し、沿岸施設の位置による $r_1$ の空間分布およびリスク値の大きさへの影響を検証する。図 4-46 から図 4-48 は、沿岸施設の位置をそれぞれ(0, 1000)、(0, 10000)、(0, 20000)に変化させた場合の計算結果である。これらの空間分布の特徴については、上記(1)の考察時に述べたのと同様、 $p_{15}(i,j)$ の分布の影響を大きく受けていると思われる。また、沿岸施設への衝突確率の高い位置を除くと、全体的に航路側のリスクが大きくなっており、これも上記(1)での考察と同様、 $p_{11}(i,j)$ や $p_{13,1}(i,j)$ の影響であると考えられる。

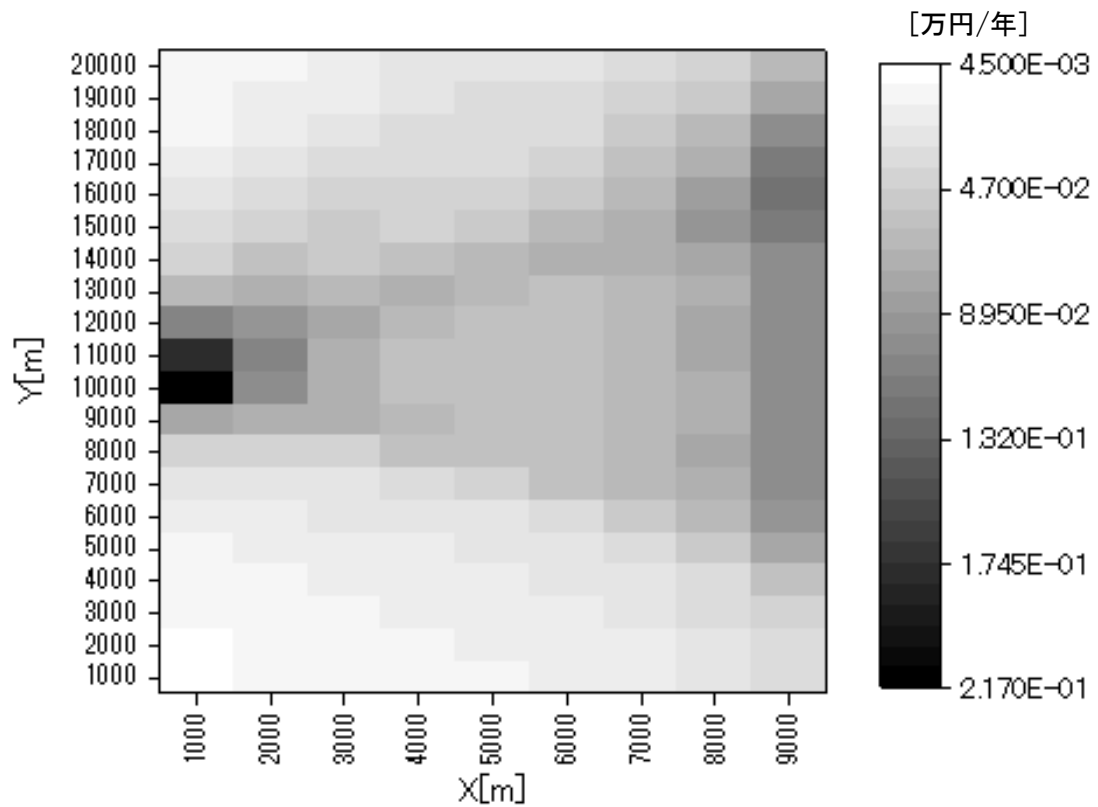


図 4-43 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が $(0,10000)$ にある場合のリスク $r_1$ の分布

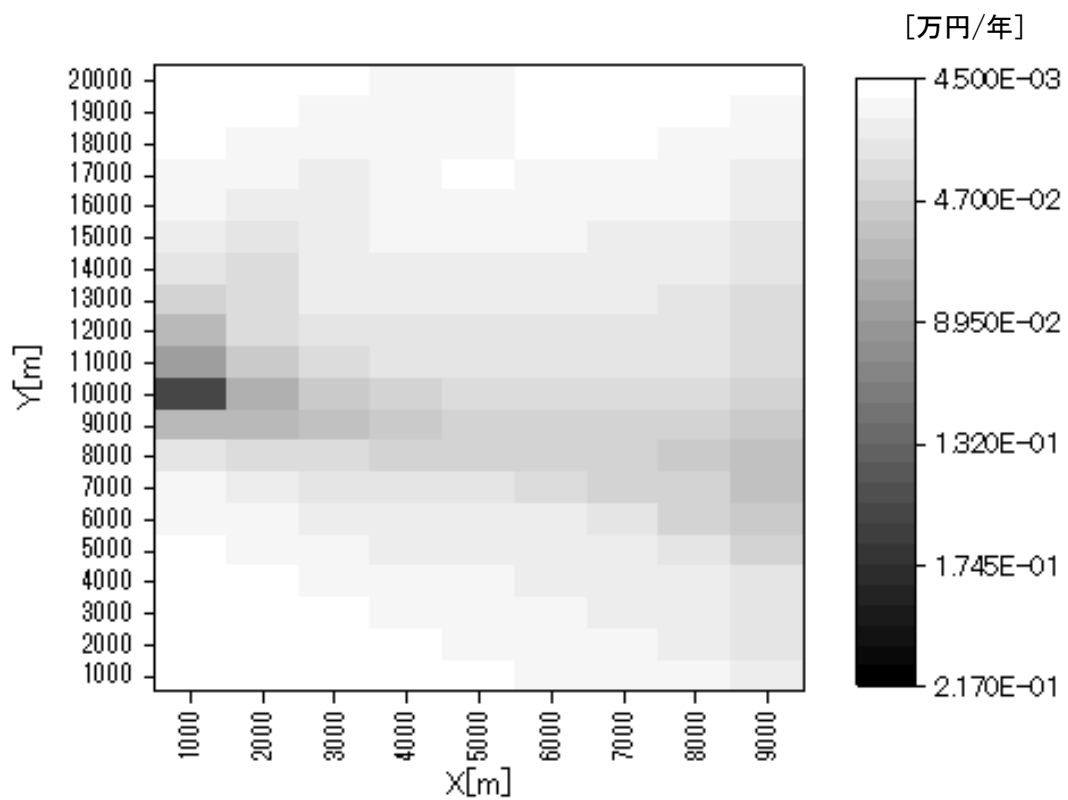


図 4-44 海域 No.2 の環境条件で石油備蓄基地が $(0,10000)$ にある場合のリスク $r_1$ の分布

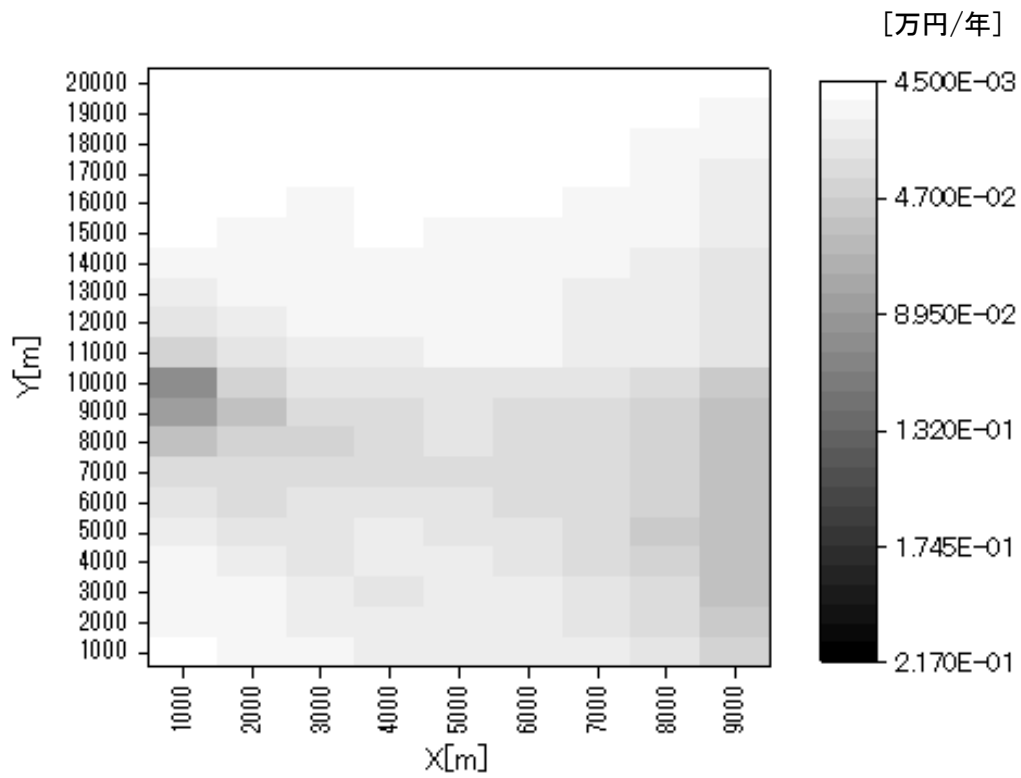


図 4-45 海域 No.3 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

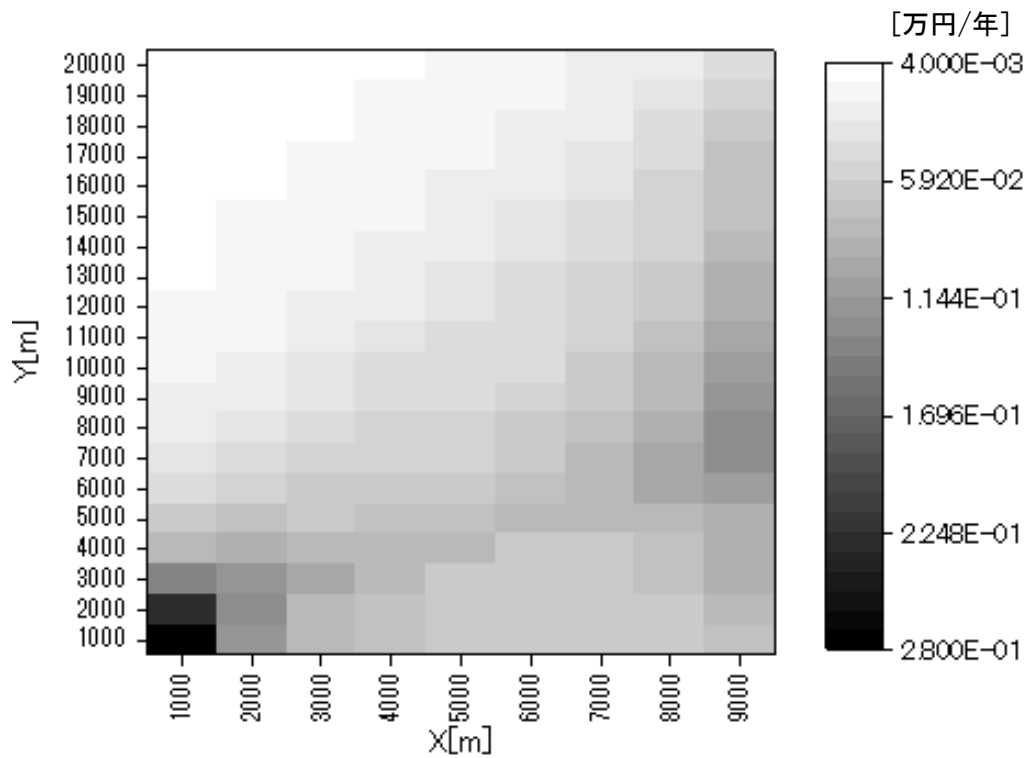


図 4-46 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 1000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

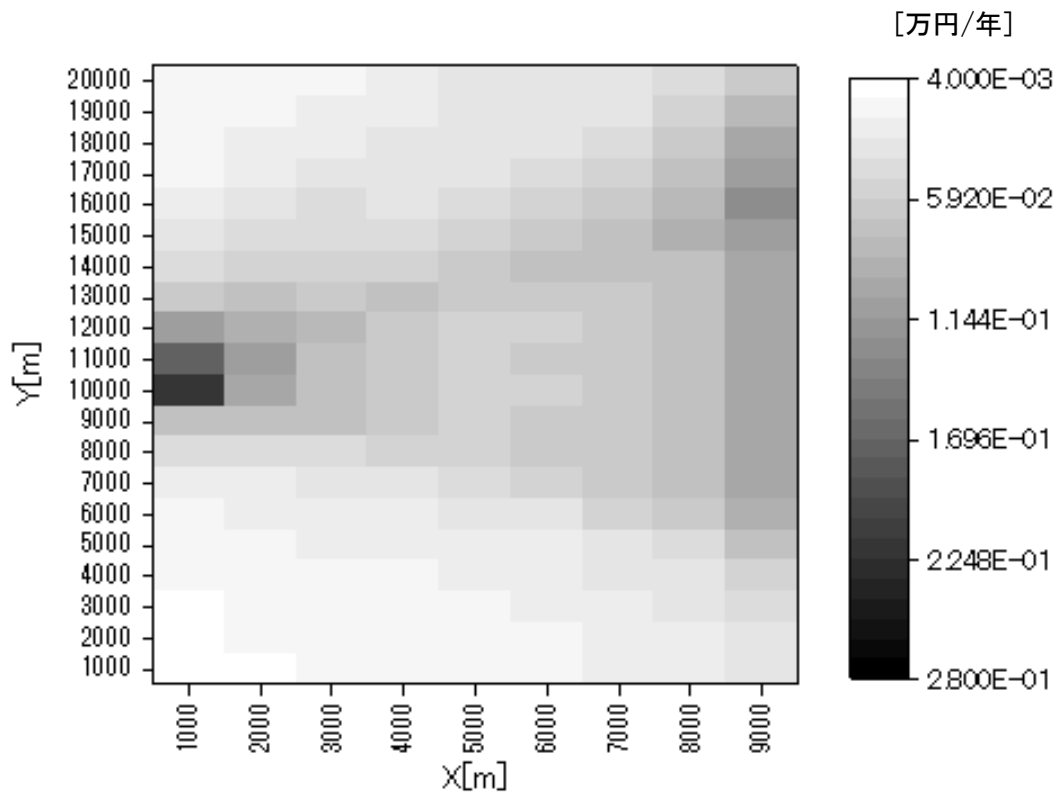


図 4-47 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布(図 4-43 のスケールを変更して再掲)

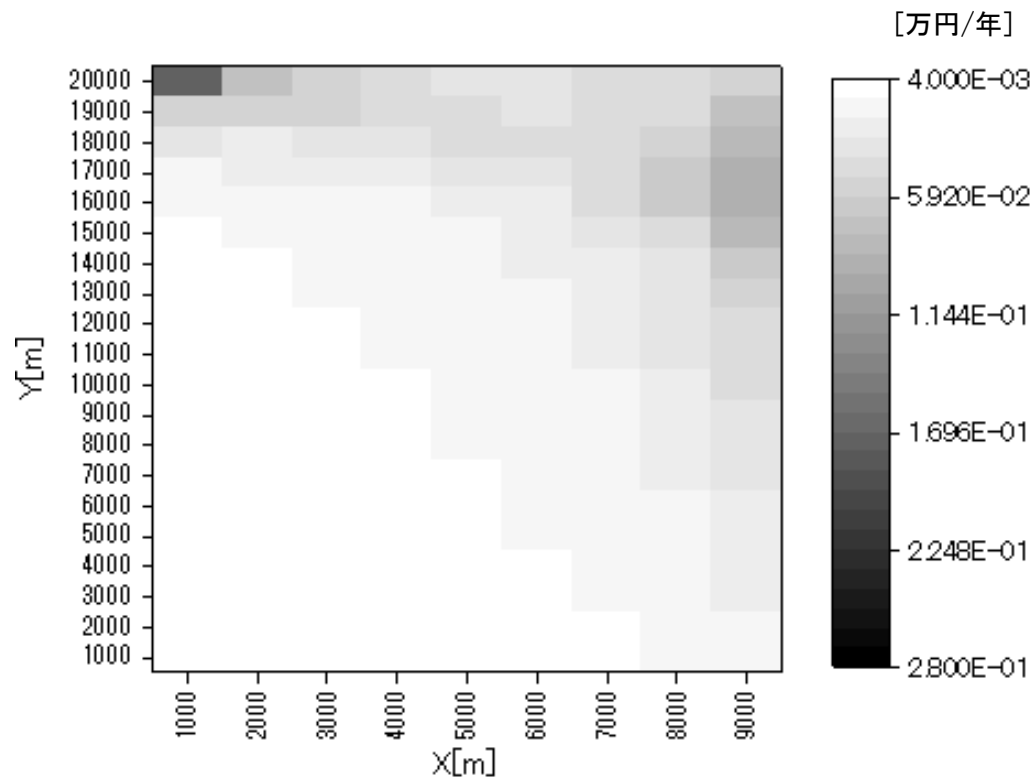


図 4-48 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0, 20000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

### (3) 沿岸施設の種類の差による影響

沿岸施設の種類のみに変化させ、その他の条件を統一して計算した結果を図 4-49 から図 4-51 に示す。ただし、それぞれのリスクの分布範囲が大きく異なるため、コンターのスケールは統一していない。図 4-49 はカンパチの生簀、図 4-50 は藻場、図 4-51 は石油備蓄基地に設定した場合の計算結果であり、いずれも候補エリア内の分布形状は類似しているのに対し、その値は大きく異なる。それぞれの沿岸施設の風力発電施設の衝突による被害額は、32,000 万円、402 万円、9,313,905 万円であり、衝突確率が同じ場合、被害額に比例してリスクも大きくなる。しかし、本研究では、沿岸施設のサイズを考慮して衝突範囲を設定しているため、同じ座標に沿岸施設がある場合でも衝突範囲が異なり、衝突確率も異なる。衝突範囲の y 方向の幅はそれぞれ、160 m、2000 m、750 m であり、x 方向の幅にも依存するが、これらと衝突確率は正の相関関係にある。つまり、衝突確率は藻場、石油備蓄基地、カンパチ生簀の順に、衝突時の被害額は石油備蓄基地、カンパチ生簀、藻場の順に大きく、これらを含むリスク $r_1$ の大きさは、石油備蓄基地、藻場、カンパチ生簀の順となった。

また、これまでの考察内容と同様、 $p_{11}(i,j)$ や $p_{13,1}(i,j)$ の影響で航路側のリスクが大きくなっているが、航路に最も近い位置のリスクと沿岸施設に最も近い位置のリスクを比較した場合、前者は沿岸施設の種類に関わらず一定であるのに対し、後者は沿岸施設の種類によって変化するため、両者の大きさの差が沿岸施設によって変化する。これら 3 種類の沿岸施設の中では、藻場や石油備蓄基地の場合は沿岸施設に最も近い位置のリスクの方が相対的に大きく、 $r_1$ への寄与度が高い。カンパチの養殖生簀の場合も沿岸施設に最も近い位置の方がリスクが大きいが、航路に最も近い位置でのリスクとの差は他の 2 種類と比べて小さく、 $r_1$ への寄与度が相対的に小さい。

以上のように、沿岸施設の種類によって衝突確率 $p_{15}(i,j)$ や衝突時の被害額 $s_{15}$ が変化するので、これらの変化によって $r_1$ も大きく変化し、また、被害額の大きさによって沿岸施設に近い海域と航路側海域のリスクの大きさの比が変化することが分かった。

### (4) 年間船舶通航量の差による影響

リスク $r_1$ の計算式には、漂流船舶の年間出現数が含まれており、これは年間船舶通航量に比例するように設定している。ここでは、年間船舶通航量のみを変化させ、その他の計算条件を統一して検証する。図 4-52 および図 4-53 は、それぞれ岩手沖および野島崎沖の年間船舶通航量を使用して計算した $r_1$ の空間分布である。これらを比較すると、空間分布の形状は類似しており、主にリスク値のみが変化していることが分かる。野島崎沖は岩手沖より年間船舶通航量が多いため、岩手沖の年間船舶通航量を用いた場合より全体的にリスクが大きくなっている。なお、 $r_1$ の計算式から、 $r_1$ は年間船舶通航量に比例すると考えられる。

以上、(1)~(4)の検証により、下記のことが分かった。

- 環境条件や沿岸施設の位置の違いは、リスク $r_1$ の大きさおよび分布形状に大きく影響する。
- 沿岸施設の種類の差によるリスク $r_1$ の分布形状への影響は小さく、 $r_1$ の大きさへの影響は大きい。

- 年間船舶通航量の差はリスク $r_1$ の分布形状には影響せず、 $r_1$ の大きさによりのみ影響する。 $(r_1$ は年間船舶通航量に比例する。)

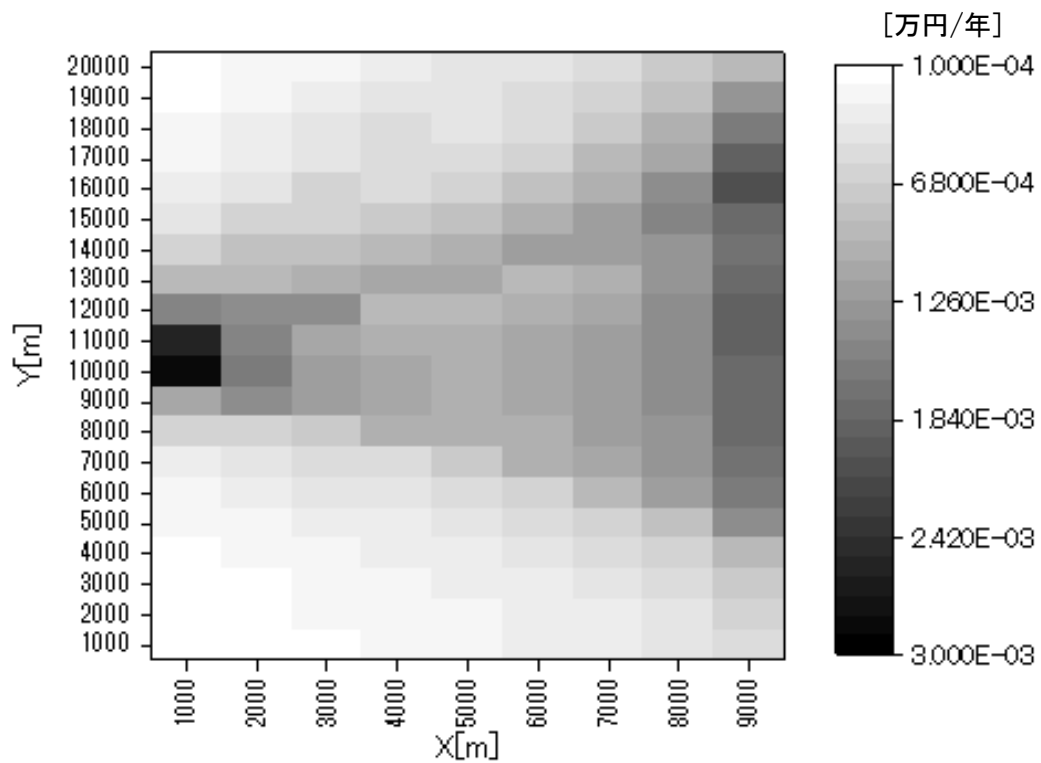


図 4-49 海域 No.1 の環境条件でカンパチの生簀が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

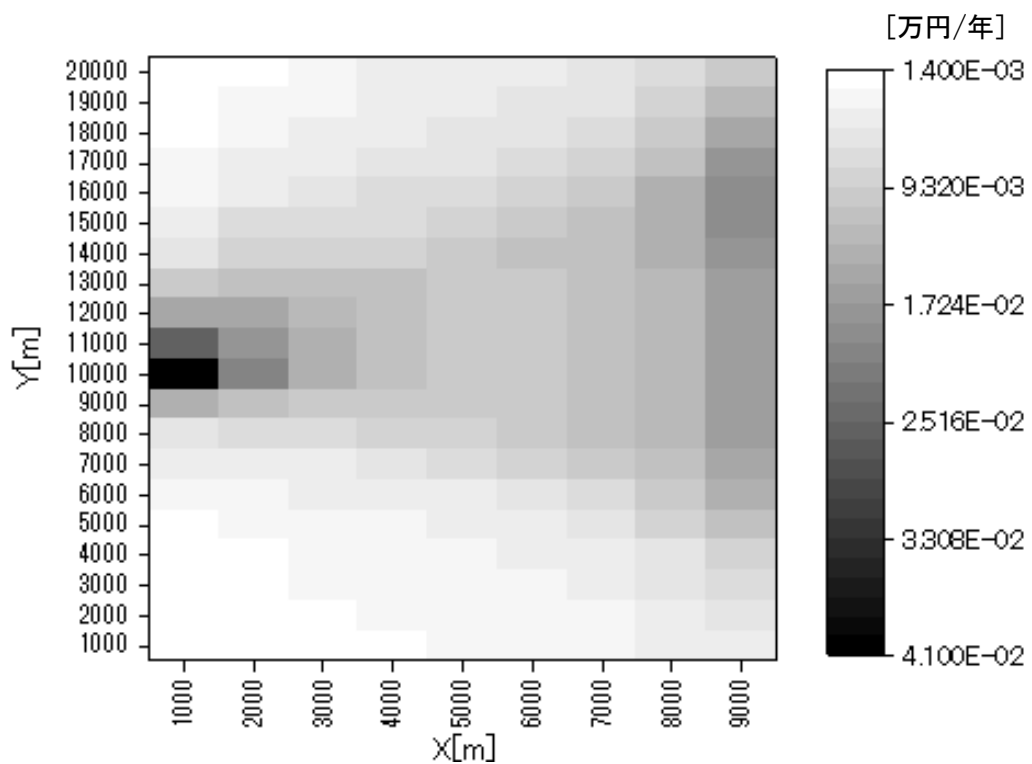


図 4-50 海域 No.1 の環境条件で藻場が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

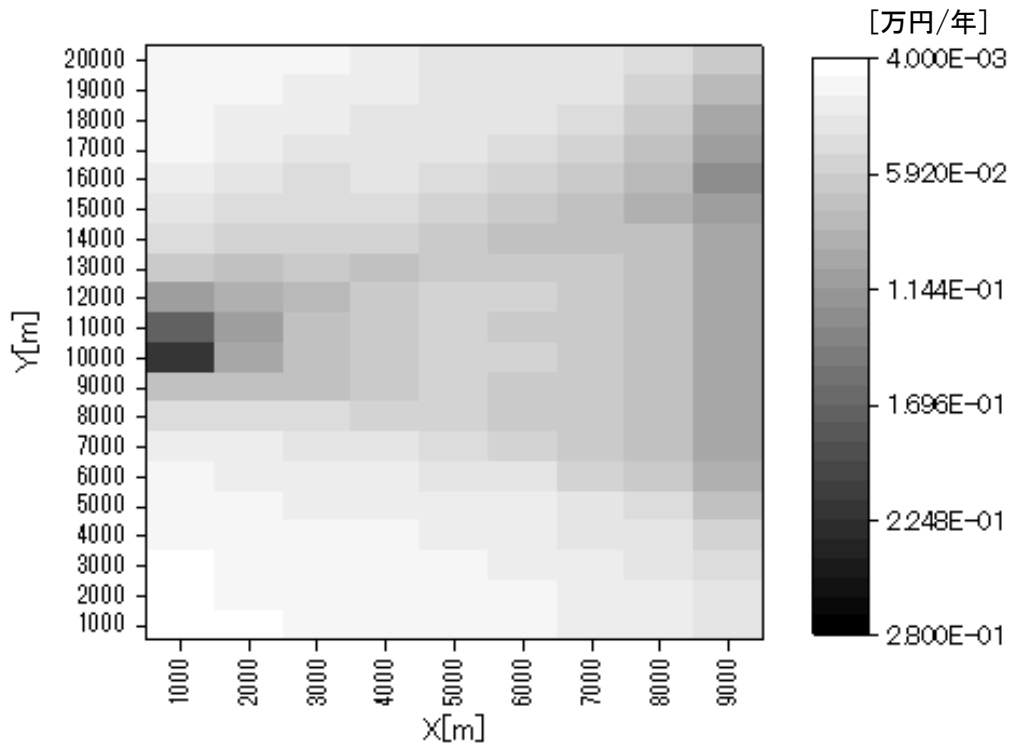


図 4-51 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合のリスク $r_1$ の分布

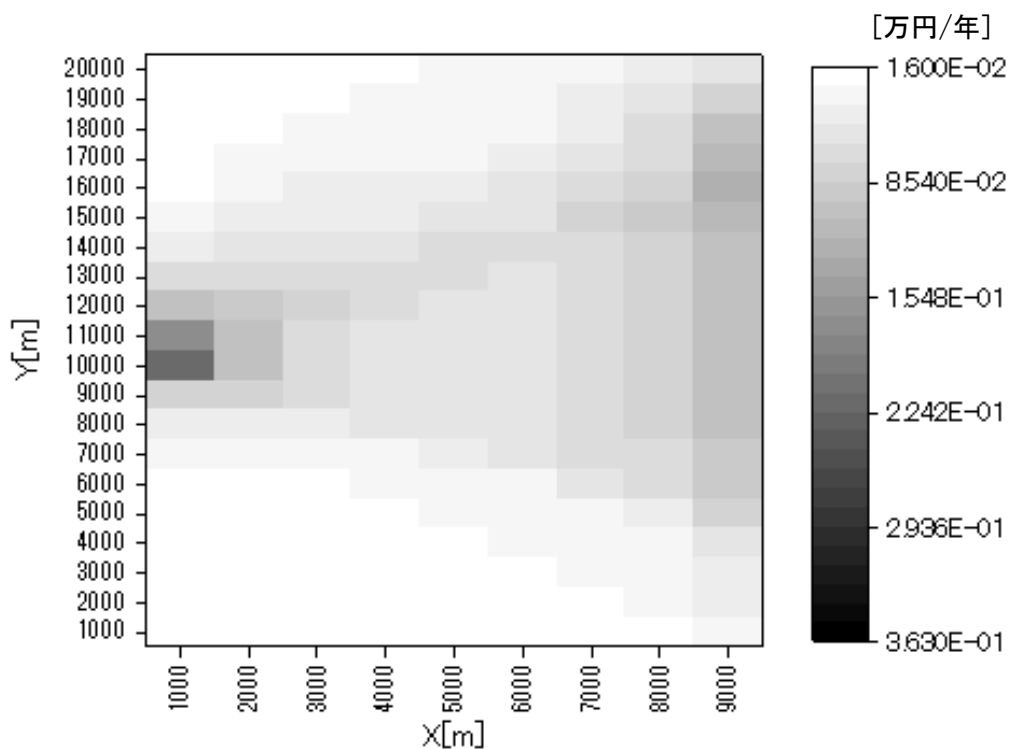


図 4-52 岩手沖の年間船舶通航量を使用した場合のリスク $r_1$ の分布 (海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合, 図 4-51 のスケール変更)



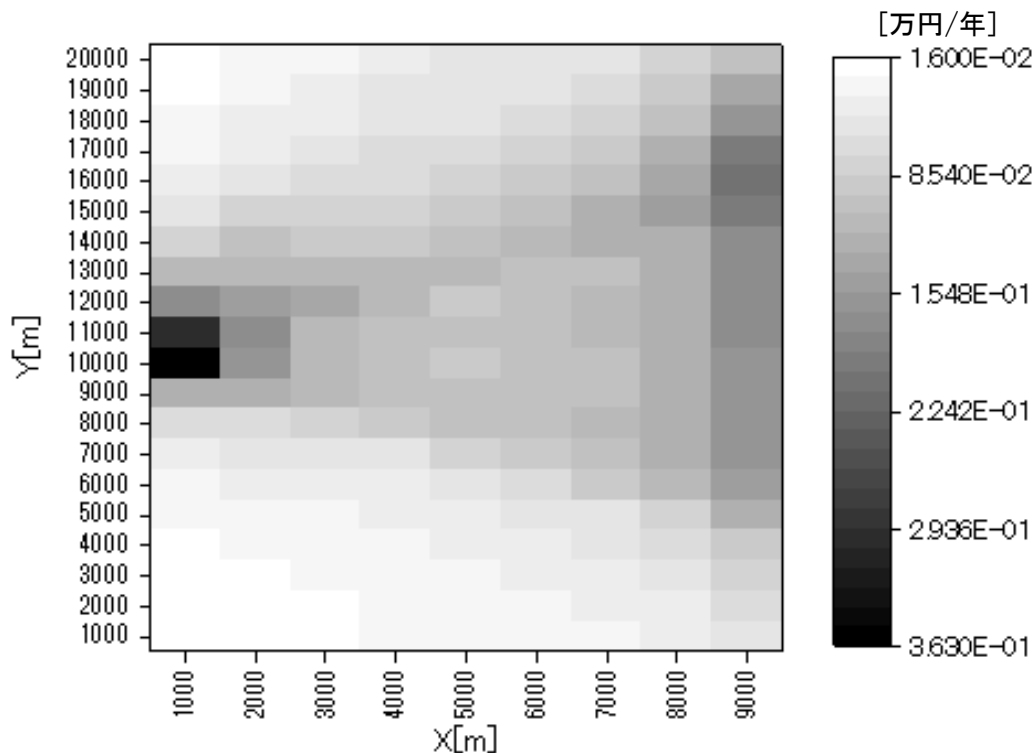


図 4-53 野島崎沖の年間船舶通航量を使用した場合のリスク $r_1$ の分布  
(海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,10000)にある場合)

#### 4.2.2.2. 計算条件の差による $r_7$ の計算結果への影響

次に、上記の検証において $r_1$ のリスクシナリオに含まれていないために検証の対象とならなかった船舶通航分布および船舶速度分布について、リスク $r_7$ への影響を検証する。

##### (1) 船舶の航路幅方向通航分布の差による影響

年間船舶通航量と船舶速度分布を岩手沖のデータに統一し、船舶通航分布のみを変化させた場合の $r_7$ の計算結果を比較する。その他の計算条件も全て統一している。図 4-54 は岩手沖の航路幅方向通航分布データを正規分布（標準偏差 1.5 海里）で近似したデータを示し、図 4-55 および図 4-56 はその標準偏差を 2 海里および 3 海里にした場合の $r_7$ の分布を示している。

これらの計算結果の比較から、標準偏差が大きくなるほど航路から遠い陸側の海域におけるリスク $r_7$ の値が大きくなり、逆に航路側の海域では小さくなることで、航路からの距離による差が小さくなっていることが分かる。また、沿岸施設の影響についてみると、沿岸施設に近い位置のリスク $r_7$ の大きさは、図 4-54 では航路側と比べて非常に小さいが、図 4-56 では沿岸施設に最も近い位置でリスク $r_7$ の値が最大となっている。このことから、船舶の通航分布の標準偏差が変化することによって、リスク $r_7$ の分布に対する沿岸施設の影響度が変化することが分かった。

一方、図 4-57 は船舶通航分布のみを野島崎沖のデータに変更して計算した $r_7$ の分布である。ガンマ分布の性質から、本研究の設定では、 $i = 5000$  以下の位置では操船ミスによる船舶衝突確率 $p_{12}(i,j)$ は 0.0 となるため、この確率を含む $r_7$ も 0.0 となっている。また、 $i = 6000$

以上の位置では東に行くほど $p_{12}(i,j)$ の値が小さくなっており、本研究での1000 m刻みの計算条件では $i=6000$ の位置にリスクの最大値が現れている。

以上の検証結果から、 $r_7$ の空間分布は $p_{12}(i,j)$ の空間分布に強く影響を受けていることが分かり、船舶通航分布による影響が大きいことが分かった。

一方、南北方向のリスクの大きさの差に着目すると、いずれの計算結果も沿岸施設への衝突確率 $p_{15}(i,j)$ の大きい位置でのリスク $r_7$ の値が大きくなっている。つまり、エリア内の北側と南側ではリスクが小さく、南北方向の中心付近のリスクが大きいことが分かる。このことからリスク $r_7$ の空間分布は、 $r_1$ と同様に $p_{15}(i,j)$ の影響を強く受けていることが分かった。

## (2) 船舶の速度分布の差による影響

年間船舶通航量、船舶通航分布を岩手沖のデータに統一し、船舶速度分布のみを変化させた場合の $r_7$ の計算結果を比較する。その他の計算条件も全て統一している。図4-58は野島崎沖の船舶速度分布データを利用した場合の $r_7$ の分布を示しており、これを図4-54と比較すると、わずかに野島崎沖のデータを使用した計算結果の方がリスク値が小さいが、それほど大きな差はなく、空間分布もほとんど変化がない。リスク値のわずかな差の原因は、岩手沖のデータでは高速域の割合が野島崎沖のデータに比べて大きく、 $p_{13,2}(i,j)$ が大きくなるためと考えられるが、 $r_7$ に含まれるほかの確率の寄与が大きいため、その差が小さく表れたと考えられる。

なお、船舶通航分布を野島崎沖のデータに変更して同様の比較を行った場合も、上記と同様、岩手沖の船舶速度分布を使用した場合の計算結果の方がややリスク値が大きくなったが、それほど大きな変化ではなく、空間分布にもほとんど変化はなかった。

以上の考察結果から、以下のことが分かった。

- 船舶の航路幅方向の通航分布はリスク $r_7$ の空間分布および値に大きな影響を与える。
- 正規分布の場合には航路中心から離れるほど候補エリア内のリスク $r_7$ が小さくなる。ただし、標準偏差が小さいときには航路からの距離による影響が顕著に現れるが、標準偏差が大きいときにはその影響が小さくなる。
- 沿岸施設への衝突確率 $p_{15}(i,j)$ の空間分布は、リスク $r_7$ の空間分布に大きく影響し、航路からの距離による影響が小さい場合には沿岸施設に最も近い位置でのリスク $r_7$ が最大になる。
- ガンマ分布の場合には航路中心の定義が不明確であり、野島崎沖での陸からの距離と船舶通航数の関係をそのまま適用したため、本研究での設定では $i=5000$ 以下の位置ではリスク $r_7$ が0.0となり、 $i=6000$ 以上の位置でのリスク $r_7$ を比べると、陸に近い位置の方がリスク $r_7$ が大きくなる。仮に航路中心を陸からの距離の平均値と考えた場合、航路中心から陸側に行くほどリスクが大きくなり、沖側に行くほどリスクが小さくなることになる。これはガンマ分布の特徴である。
- 船舶速度分布の高速域の割合が大きくなると $r_7$ は微増した。これは $p_{13,2}(i,j)$ の影響であるが、 $r_7$ に含まれる他のリスクの影響が大きく、変化は小さい。ただし、速度にもっと大きな差があれば $r_7$ にも大きな変化が表れる可能性がある。

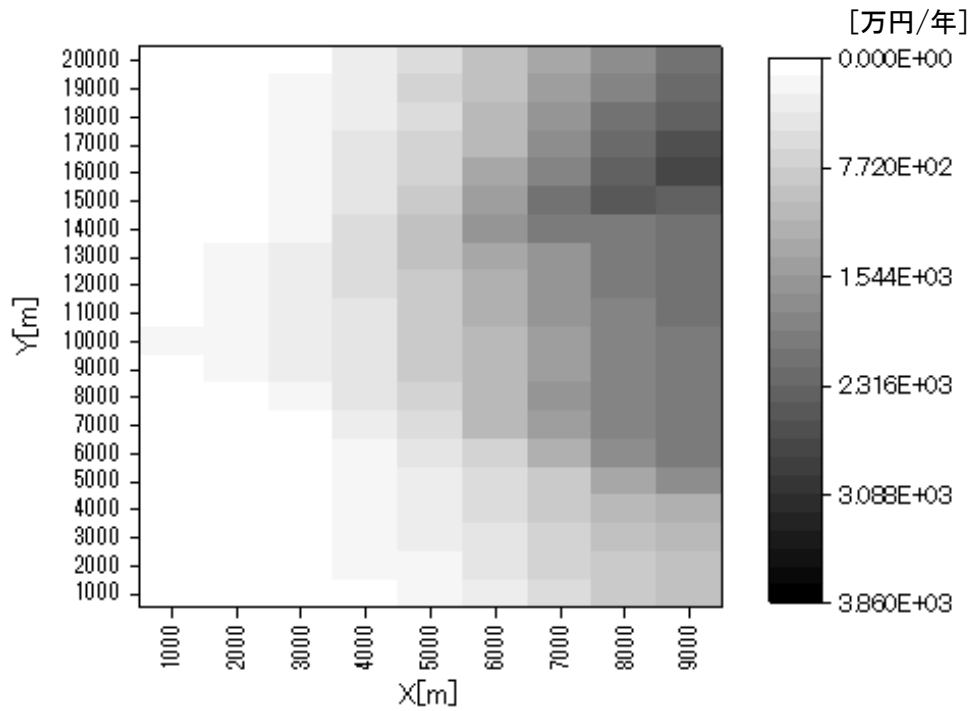


図 4-54 岩手沖船舶通航分布データ (標準偏差 1.5 海里の正規分布) で計算した場合のリスク  $r_7$  の分布

(年間船舶通航量, 船舶速度分布は岩手沖のデータを使用, 石油備蓄基地が(0,1000)にある場合)

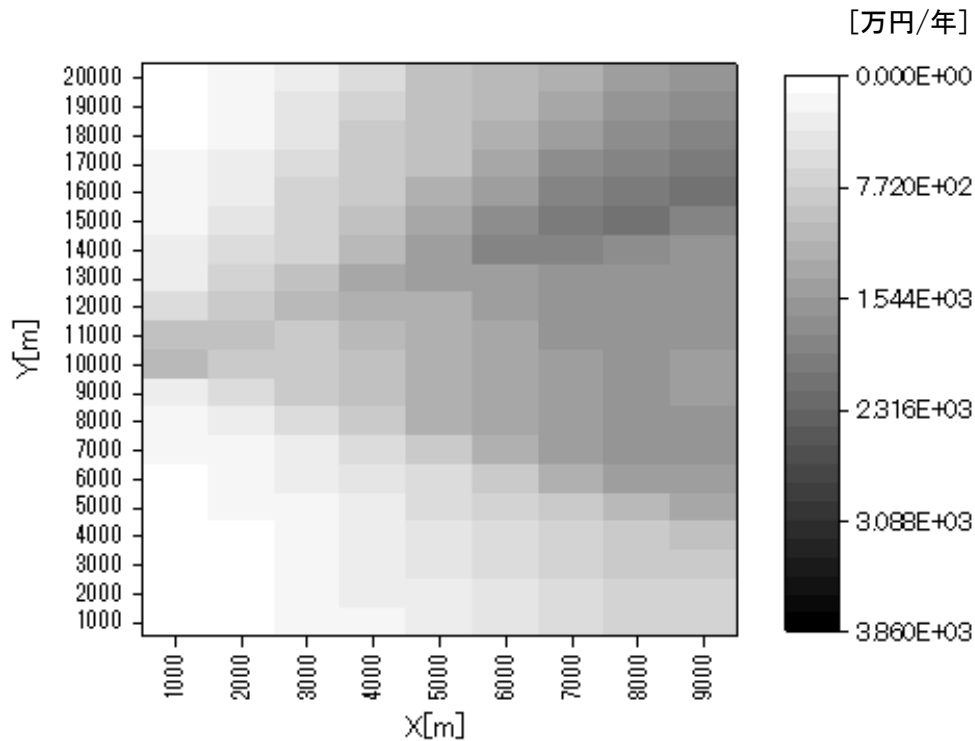


図 4-55 標準偏差 2 海里の正規分布で計算した場合のリスク  $r_7$  の分布

(年間船舶通航量, 船舶速度分布は岩手沖のデータを使用, 石油備蓄基地が(0,1000)にある場合)

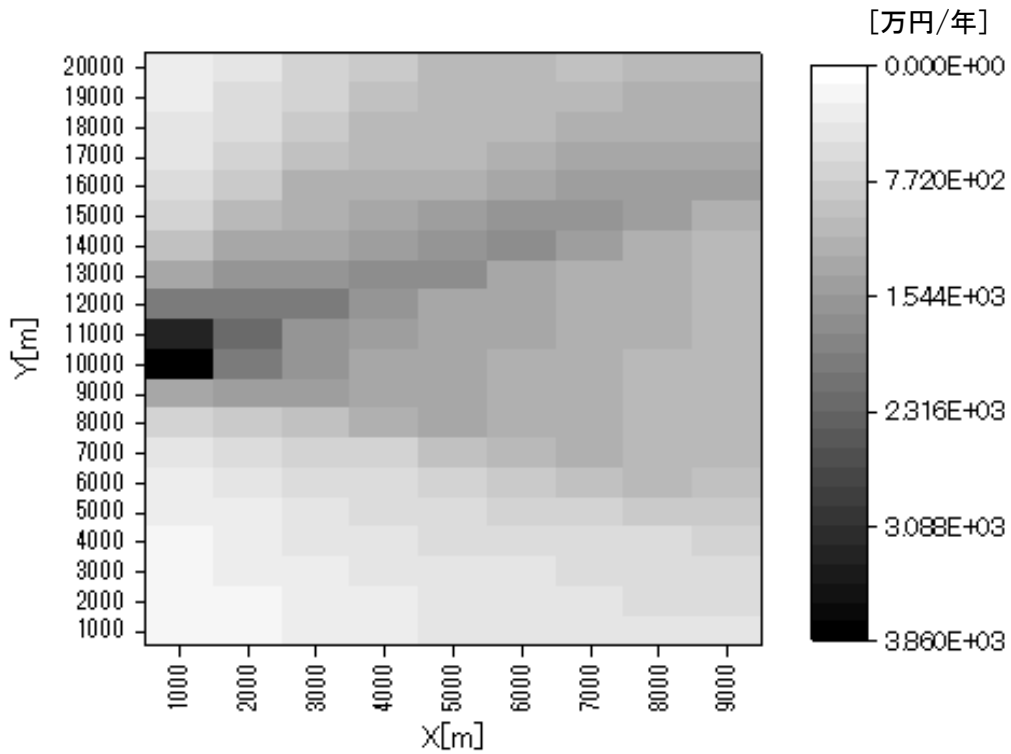


図 4-56 標準偏差 3 海里の正規分布で計算した場合のリスク $r_7$ の分布  
(年間船舶通航量, 船舶速度分布は岩手沖のデータを使用, 石油備蓄基地が(0,1000)にある  
場合)

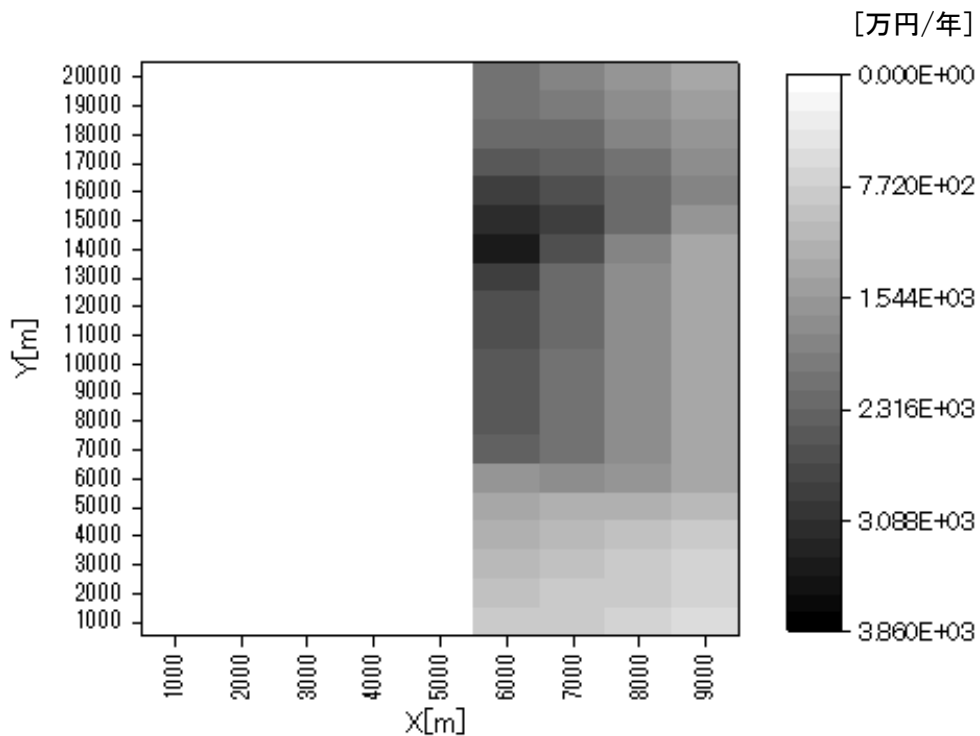


図 4-57 野島崎沖船舶通航分布 (ガンマ分布) で計算した場合のリスク $r_7$ の分布  
(年間船舶通航量, 船舶速度分布は岩手沖のデータを使用, 石油備蓄基地が(0,1000)にある  
場合)

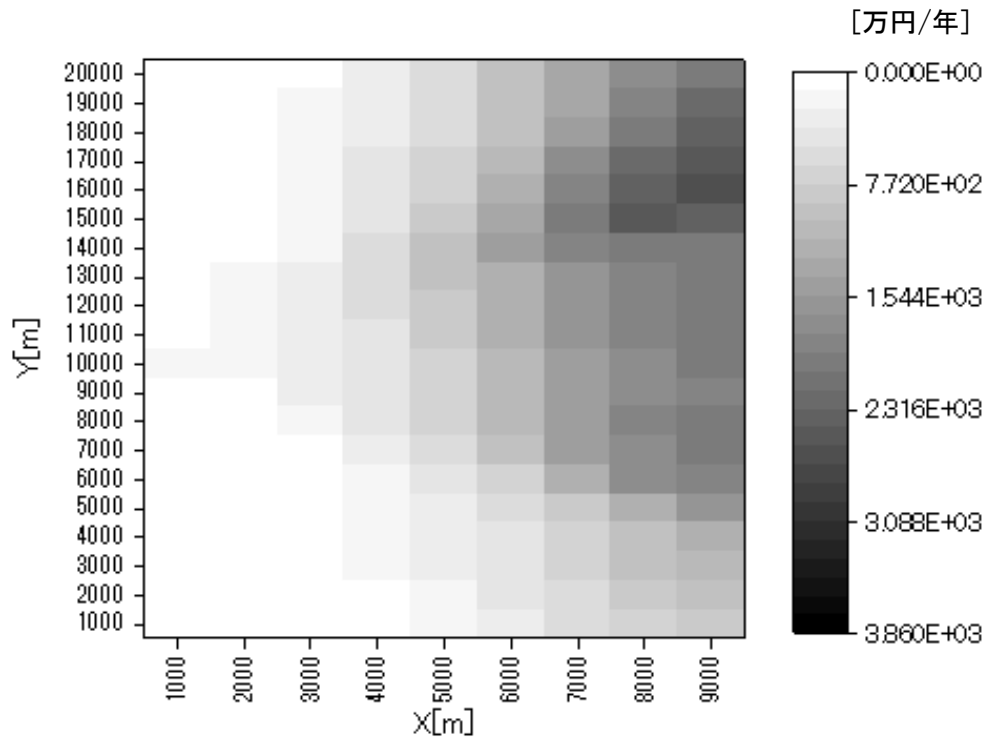


図 4-58 岩手沖の船舶通航分布と野島崎沖の船舶速度分布データを利用した場合のリスク  $r_7$  の分布

(年間船舶通航量は岩手沖のデータを使用，石油備蓄基地が(0,1000)にある場合)

#### 4.2.3. 風力発電施設漂流の原因別リスク

本研究で取り扱っている風力発電施設の漂流の原因は，船舶の漂流または操船ミスによる風力発電施設への衝突と，設計時の想定を超える環境条件の3種類である。本研究で作成したリスクシナリオをこれら3つの原因別に合計した結果を図 4-59 から 図 4-61 に示す。これらはいずれも海域 No.1 の環境条件を，船舶通航分布，年間船舶通航量，船舶航行速度分布は全て岩手沖のデータを使用し，沿岸施設の種類は石油備蓄基地で，その位置は(0, 10000)であると仮定した場合の計算結果である。

いずれの場合も，航路からの距離が大きくなるほどリスク値が小さくなるのが分かる。その中でも，船舶の操船ミスに起因するリスク (図 4-60) は特に航路からの距離による影響が強く，航路に最も近い位置と最も遠い位置ではこのリスクに 100 倍以上の差がある。

一方，設計時の想定を超える環境条件を原因とするリスク (図 4-61) は，船舶とは無関係に，全ての海域において等確率で風力発電施設の漂流が発生するため，他の2つの原因によるリスク分布と比べると航路からの距離による影響が小さく，沿岸施設への衝突確率  $p_{15}(i, j)$  の空間分布の影響が大きくなっている。また，候補エリア内のリスク値のばらつきが小さく，全ての位置で同じオーダーになっているのが特徴である。

また，リスク値の大きさで比べると，操船ミスが原因で発生するリスク値がもっとも大きく，総合リスクへの寄与が大きいと考えられる。そのため，総合リスク  $r$  の空間分布も航路からの距離に大きく依存することが予想される。

以上により，本研究の設定条件では船舶の操船ミスによるリスク値が最大で，次いで環境

条件によるリスク値が大きく、最も値が小さいのは船舶の漂流によるリスクであることが分かった。

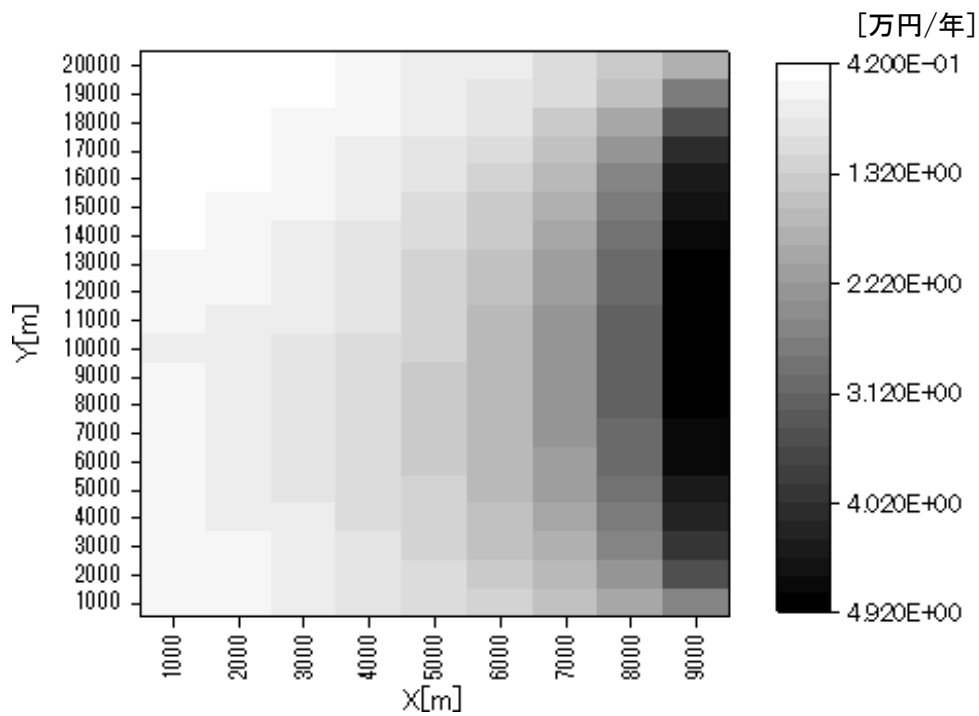


図 4-59 船舶の漂流に起因するリスク ( $r_1 \sim r_6$ ) の合計  $r_{dri}(i,j)$   
(岩手沖の船舶通航分布を使用)

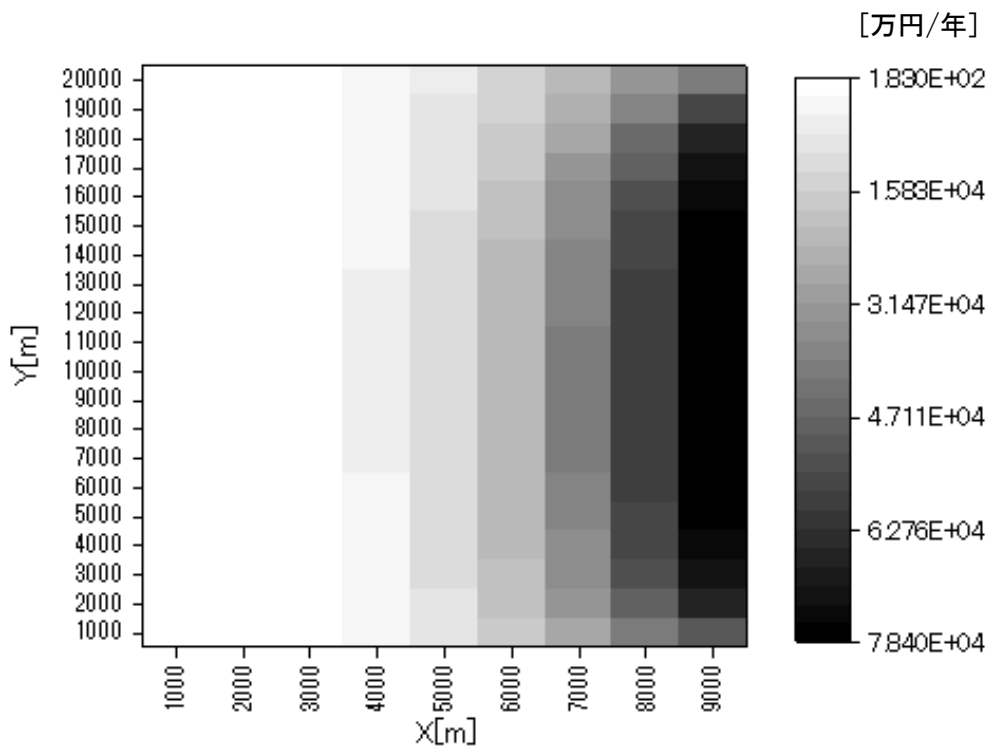


図 4-60 船舶の操船ミスに起因するリスク ( $r_7 \sim r_{12}$ ) の合計  $r_{mis}(i,j)$   
(岩手沖の船舶通航分布を使用)

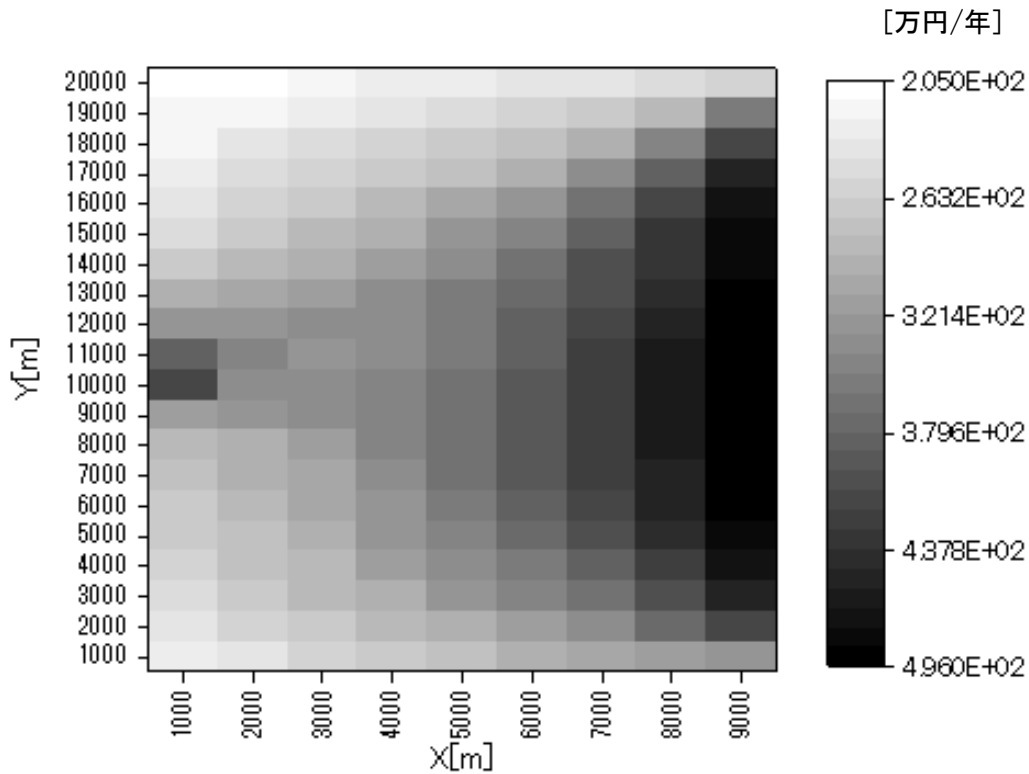


図 4-61 設計時の想定を超える環境条件に起因するリスク ( $r_{13} \sim r_{17}$ ) の合計  $r_{env}(i,j)$   
(岩手沖の船舶通航分布を使用)

さらに、船舶通航分布がガンマ分布の場合についても考察する。船舶の漂流および想定を超える環境条件を原因とするリスクには、船舶通航分布の違いは影響しないため省略し、船舶の操船ミスの原因とするリスクの分布のみを図 4-62 に示す。この結果から、リスク値が 0 にならない海域のうち、東西方向および南北方向のいずれにおいても、中心付近の位置でのリスクが大きいことが分かるが、いずれも同じオーダーであり、その差は小さい。上述の通り、 $r_7(i,j)$ は陸に近い方がややリスクが大きいく、 $r_{10}(i,j)$ や $r_{11}(i,j)$ も同様であるが、 $r_8(i,j)$ および $r_9(i,j)$ は陸から遠い方がリスクが大きいく、これらを合計した $r_{mis}(i,j)$ の分布ではエリアの中心付近でリスクが最大になったと思われる。

#### 4.2.4. 総合リスク

上記の図 4-59 から 図 4-61 を合計した総合リスク $r$  (各シナリオのリスクの合計) の分布を図 4-63 に示す。また、図 4-64 および図 4-65 は、環境条件のみをそれぞれ海域 No.2 および No.3 に変更した場合の総合リスクの分布である。環境条件以外の条件は統一されており、船舶通航分布、年間船舶通航量、船舶速度分布は全て岩手沖のデータを利用し、沿岸施設については石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合とした。

全体の傾向としては、沿岸施設との距離の影響より航路中心からの距離の影響が大きく、航路からの距離が近いほど総合リスクが大きいく、航路から離れるにつれて小さくなることを確認できる。この特徴は、前項で検討した 3 つの原因別リスクの中で最も値のオーダーが大きい $r_{mis}(i,j)$ とよく似ていることが分かる。図 4-63 から図 4-65 は衝突確率および衝突時の

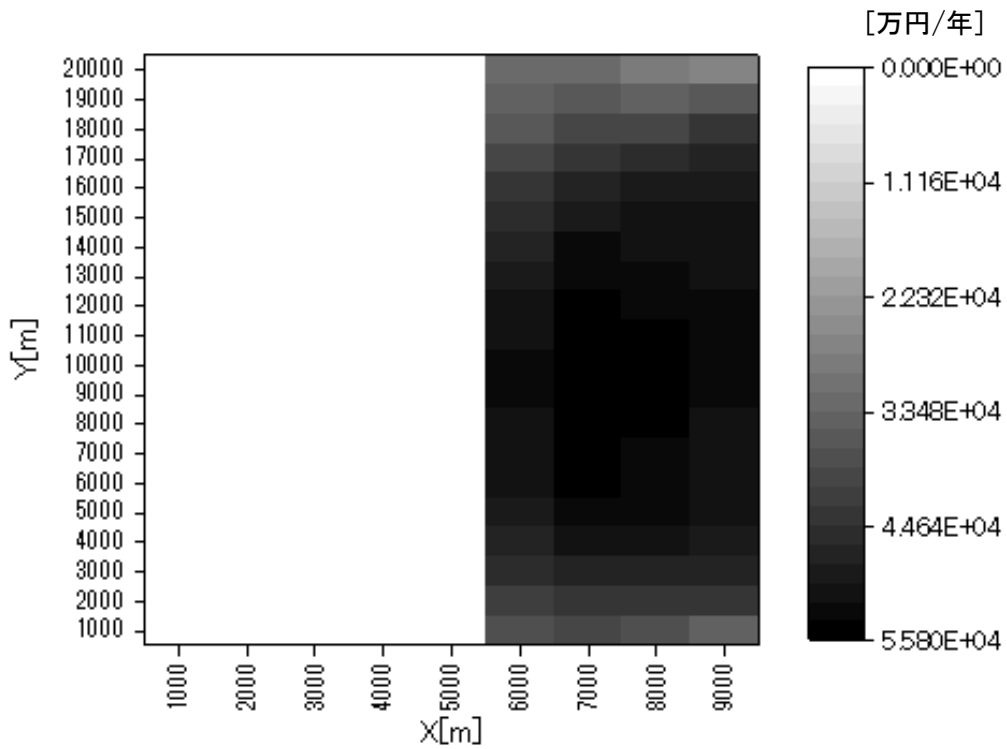


図 4-62 船舶の操船ミスに起因するリスク ( $r_7 \sim r_{12}$ ) の合計  $r_{\text{mis}}(i,j)$   
 (野島崎沖の船舶通航分布を使用)

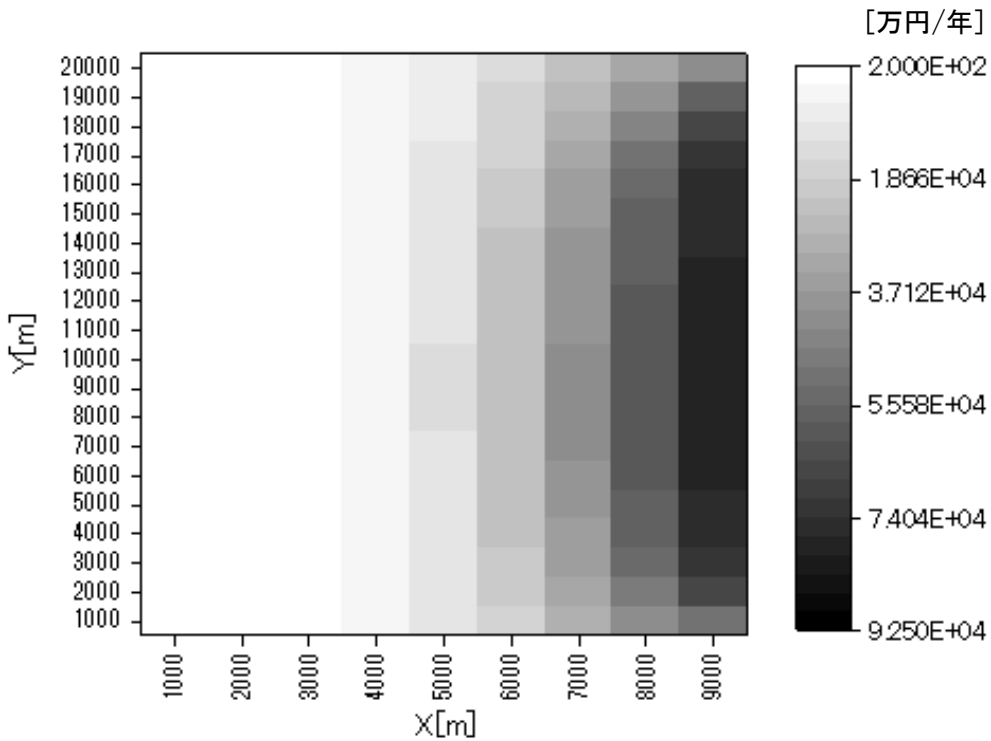


図 4-63 海域 No.1 の環境条件による総合リスクの分布  
 (岩手沖の船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用し, 石油備蓄基地が(0,10000)  
 の位置にある場合)



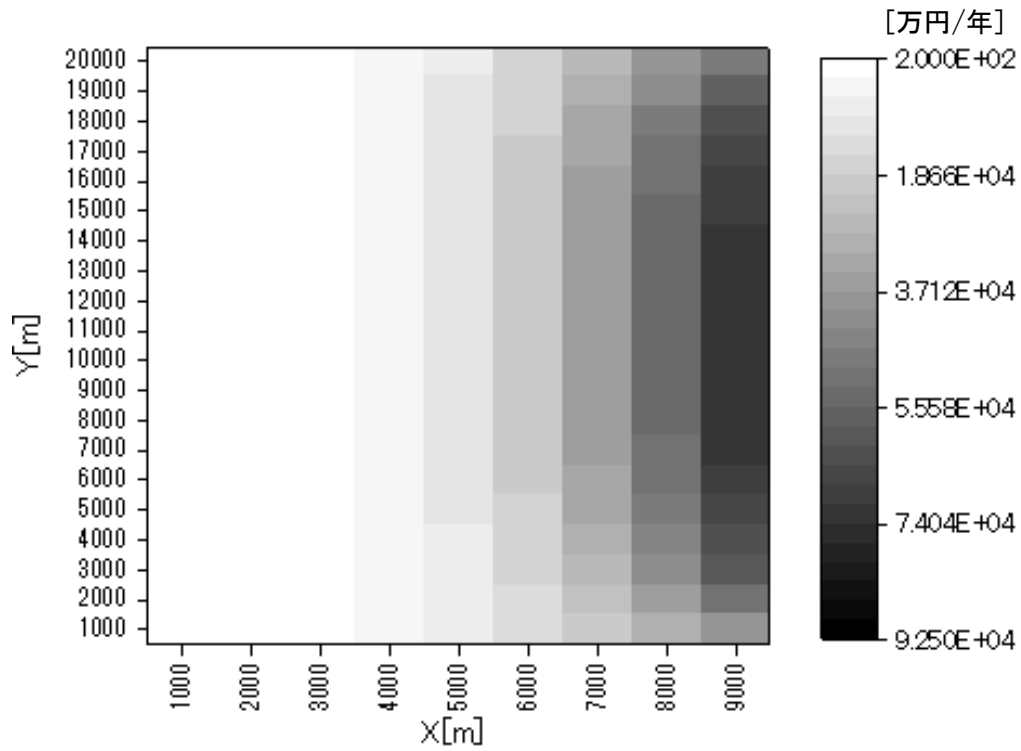


図 4-64 海域 No.2 の環境条件による総合リスクの分布  
 (岩手沖の船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用し, 石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合)

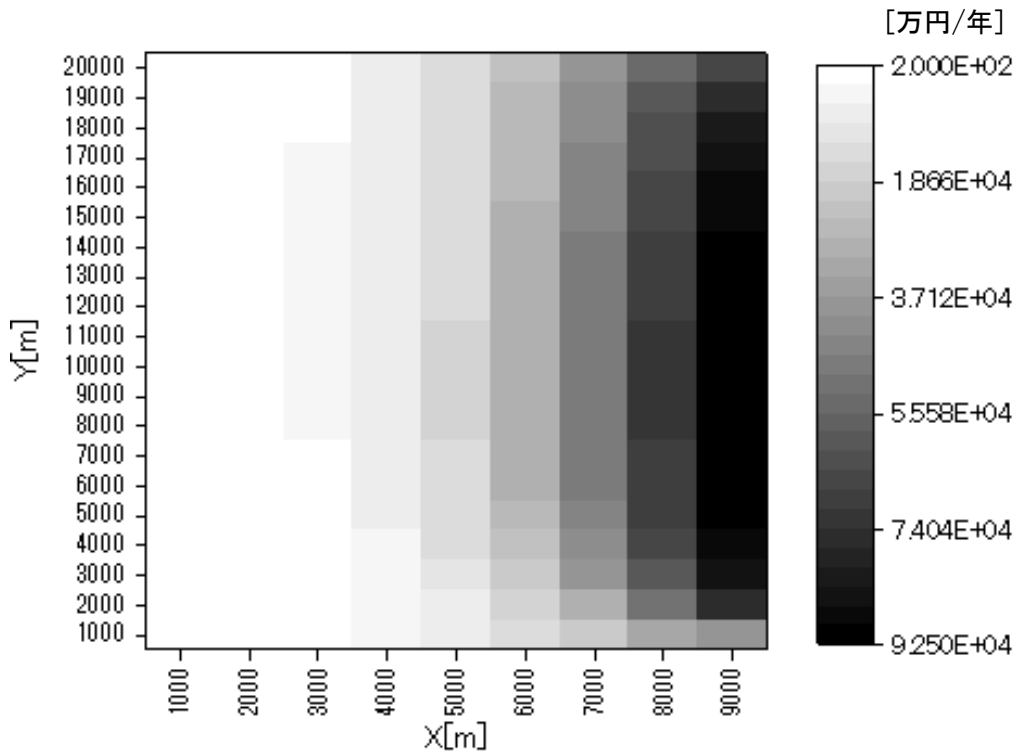


図 4-65 海域 No.3 の環境条件による総合リスクの分布  
 (岩手沖の船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用し, 石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合)

被害額の面から最もリスクの大きい石油備蓄基地を候補エリアの近くに置いた場合の結果であるが、沿岸施設の種類を変更しても、航路中心に近い方が総合リスクが大きいという傾向は変わらなかった。

また、石油備蓄基地の位置を(0,1000)、(0,20000)に変化させた場合、リスクの分布形状に若干の変化があるものの、全体としては大きな変化はなかった(図 4-66、図 4-67)。同様に沿岸施設の種類を変化させた場合にも全体への影響は小さいことが分かった。以上の考察により、岩手沖の船舶通航分布データを用いた場合の総合リスクの空間分布およびリスク値の大きさは、航路との位置関係が支配的であり、沿岸施設の位置や種類による影響は小さいことが分かる。

次に、上記の計算条件のうち、船舶通航分布のみを野島崎沖のデータに変更した場合の計算結果について、図 4-68 から図 4-70 に示す。これも $r_{\text{mis}}(i,j)$ と同様の分布をしており、 $i \geq 6000$  のエリア内の中央部でリスクが大きくなっている。

なお、正規分布で近似した岩手沖データを使用した場合も、ガンマ分布で近似した野島崎沖のデータを使用した場合も、環境条件の違いによる総合リスクの値の大きさは、大きい方から海域 No.3, No.1, No.2 の順であった。これを各確率 $p_{11}(i,j) \sim p_{17}(i,j)$ の大きさと関連付けて考えると、最も値のオーダーの大きい $p_{16}(i,j)$ も海域 No.3, No.1, No.2 の順になっており、総合リスクの大きさはこの影響を受けていると考えられる。さらに、いずれの場合も海域 No.3 の環境条件での計算結果において、南端部のリスクがかなり小さくなっていることが分かる。この特徴も $p_{16}(i,j)$ と共通しており、これは海域 No.3 の環境条件では風・海潮流ともに南西からの頻度が非常に低いことによると考えられる。

以上により、船舶通航分布が正規分布の場合とガンマ分布の場合のいずれについても、環境条件や沿岸施設の位置・種類に関わらず、航路からの距離との関係が支配的であることが分かった。ただし沿岸施設を、より衝突確率が高く被害金額の大きいものに設定した場合には、沿岸施設への衝突確率の高い座標 $(i, j)$ において周囲よりリスクが大きくなる可能性がある。しかし、航路は1本のライン上に分布しているのに対し、沿岸施設は点として存在しているため、その影響が及ぶ範囲が航路の場合と比べて狭いという特徴がある。また、同様の理由により、沿岸施設の方向に風力発電施設が漂流していく確率が環境条件と沿岸施設位置によって大きく変わるため、候補エリア内のリスク分布に対する沿岸施設からの距離の影響度合いも大きく変わるのに対し、航路の場合にはどのような環境条件でもリスクが航路からの距離に強く依存するという相違がある。

以上の考察結果より、風力発電施設の設置位置を決定する際にはまず、航路からの距離をなるべく離し、風力発電施設の漂流確率が十分に低くなるエリアを絞り込み、その中から、万が一漂流した場合にも沿岸施設への衝突リスクが小さい位置を選択するという手順が合理的であると考えられる。

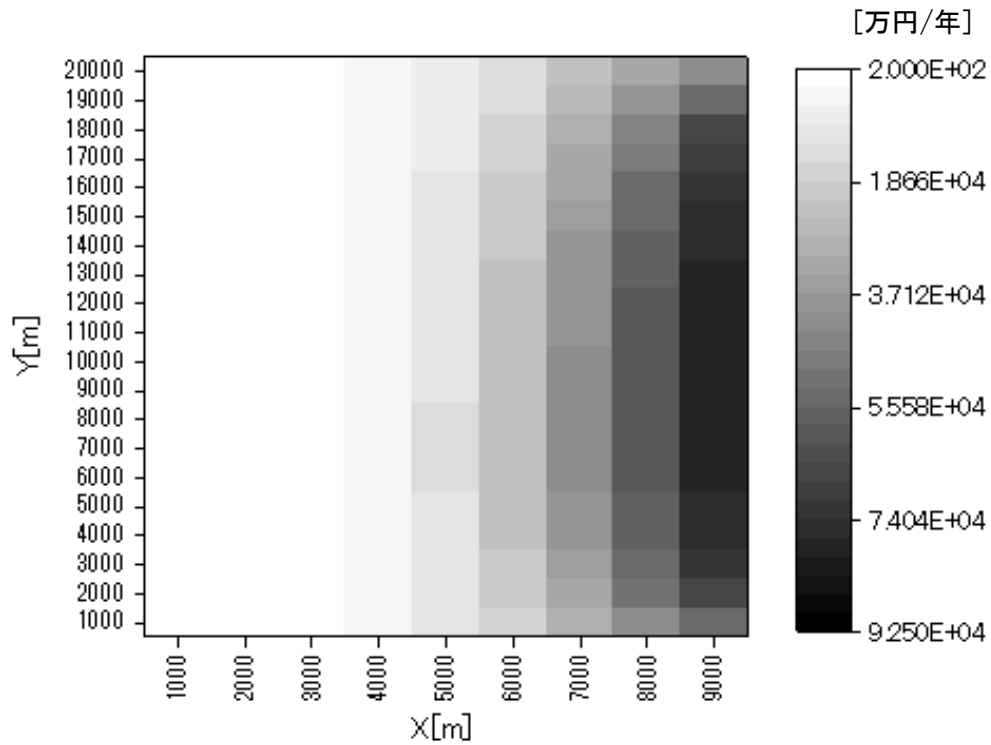


図 4-66 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,1000)にある場合の総合リスクの分布  
(岩手沖の船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用)

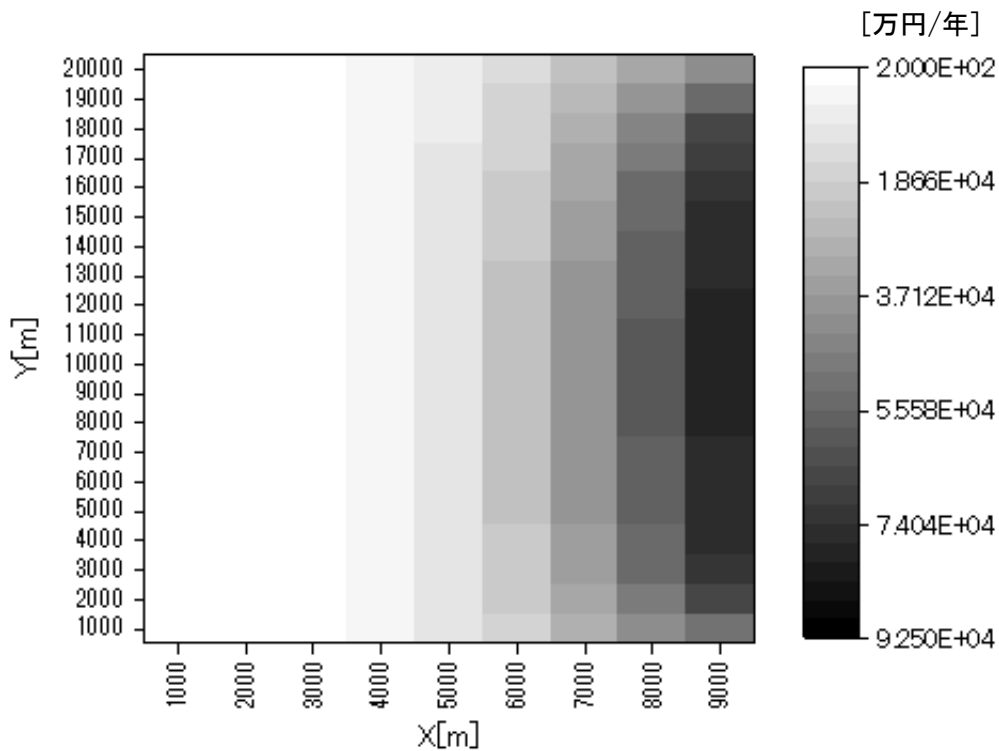


図 4-67 海域 No.1 の環境条件で石油備蓄基地が(0,20000)にある場合の総合リスクの分布  
(岩手沖の船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用)

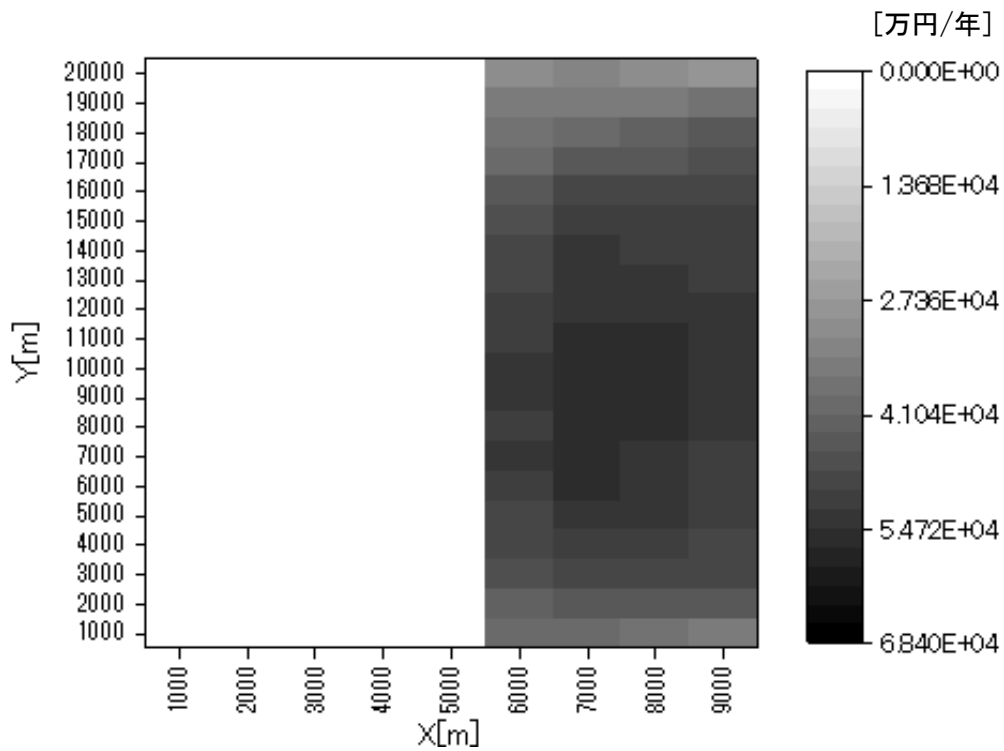


図 4-68 海域 No.1 の環境条件による総合リスクの分布  
 (野島崎沖の船舶通航分布, 岩手沖の年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用し, 石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合)

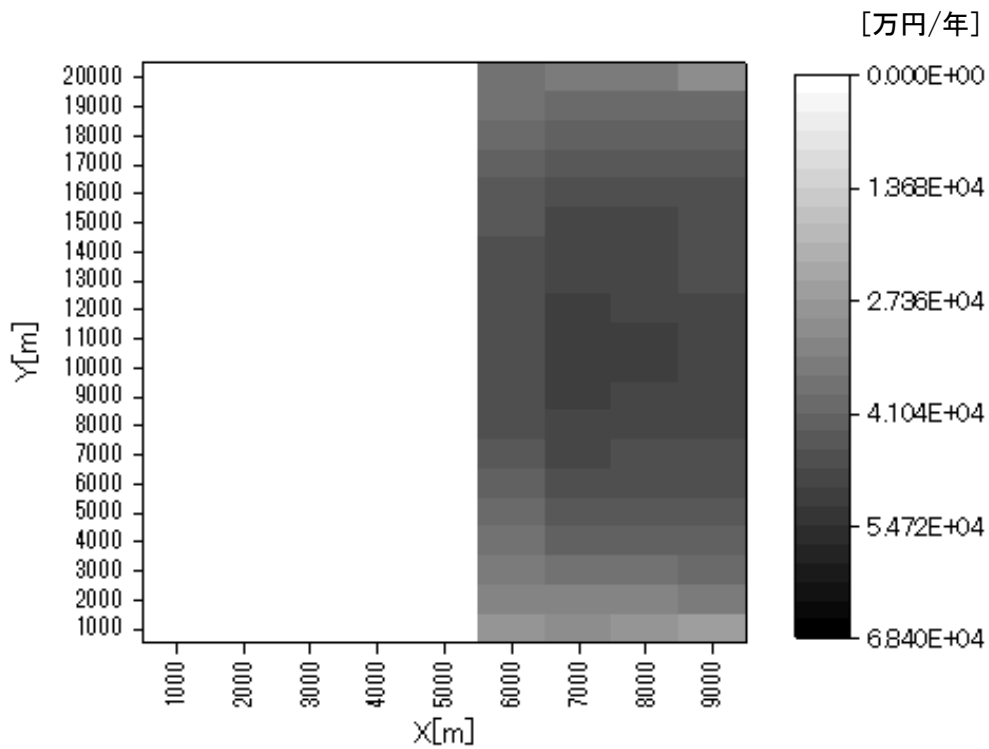


図 4-69 海域 No.2 の環境条件による総合リスクの分布  
 (野島崎沖の船舶通航分布, 岩手沖の年間船舶通航量, 船舶速度分布を使用し, 石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合)

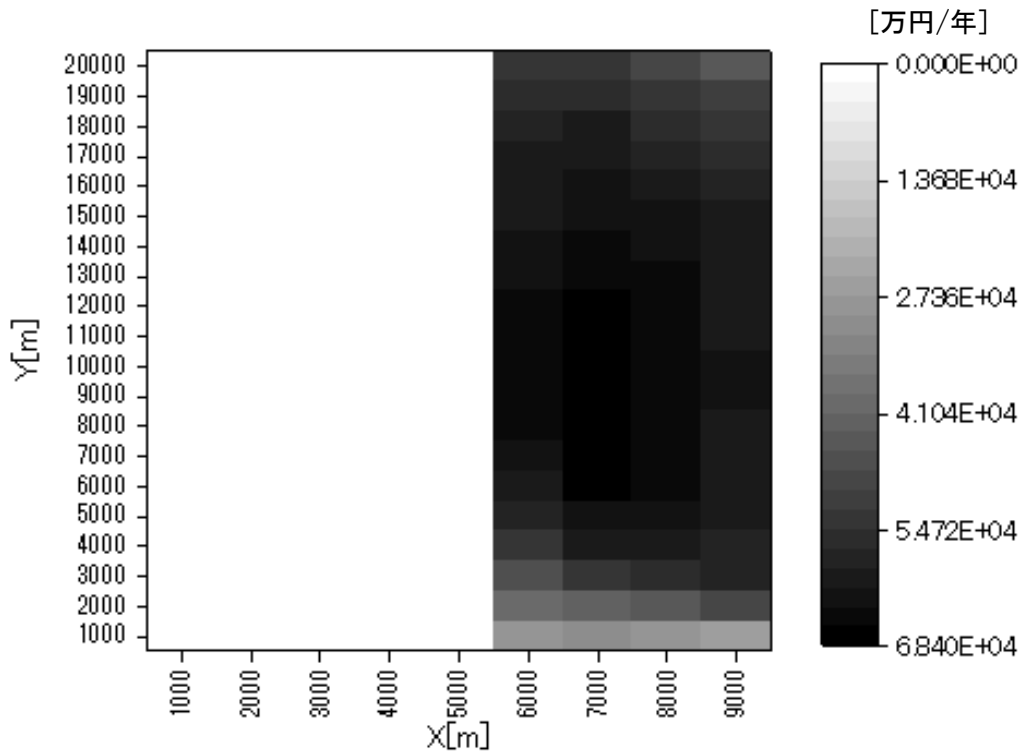


図 4-70 海域 No.3 の環境条件による総合リスクの分布

(野島崎沖の船舶通航分布，岩手沖の年間船舶通航量，船舶速度分布を使用し，石油備蓄基地が(0,10000)の位置にある場合)

#### 4.3. 各計算条件と計算結果の関係についての考察

本節では，各計算条件がリスクの計算結果に与える影響について検証する。

##### 4.3.1. 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率と年間船舶通航量

漂流船舶の出現数 $m_S$ は年間船舶通航量  $N$  に比例する設定となっているため，漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率も  $N$  に比例する。この確率が環境条件による風力発電施設の漂流確率 $p_{14}(i,j)$ より 1 オーダー以上小さい場合，漂流船舶の衝突の影響は十分に小さいと判断することとする。つまり，

$$m_S(N) \times p_{11}(i,j) \times p_{13_1}(i,j) \times 10 \leq p_{14}(i,j) \quad \dots (4-25)$$

の条件を満たす場合，漂流船舶の衝突の影響が無視できることとする。

上記の条件を満たす  $N$  の上限値を $N_{\max}$ とし，各環境条件について $N_{\max}$ を求めた結果，表 4-8 のようになった。 $p_{11}(i,j)$ と $p_{13_1}(i,j)$ のそれぞれの最大値どうしを掛け合わせた値の大きさは，大きい順に No.1, No.3, No.2 となっており， $N$  の値が同一の場合，風力発電の漂流のしやすさもこの順になる。 $N_{\max}$ は漂流しにくい条件のときほど大きくなるため，表 4-8 に示す通り， $N_{\max}$ の大きさは海域 No.2, No.3, No.1 の順になったと考えられる。

なお，これら 3 つの環境条件のいずれについても，岩手沖または野島崎沖の年間船舶通航量より 1 オーダー大きい。これらは日本周辺海域の中でも比較的交通量の多い海域であるた

め、日本周辺海域であれば、漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率は、環境条件による漂流確率より十分に小さく、総合リスクへの影響度も小さいため、ある海域への風力発電施設の設置にあたっては、漂流船舶の影響を考慮しなくてもそれほど影響はないと考えられる。

表 4-8 漂流船舶の衝突による風力発電施設の漂流の影響が無視できる N の上限値  $N_{\max}$

環境条件	$N_{\max}$
海域 No.1	245,000
海域 No.2	716,000
海域 No.3	410,000

#### 4.3.2. 操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率と航路中心からの距離

操船ミス船舶の衝突確率  $p_{12}(i,j)$  は航路中心からの距離  $D_L$  によって変化し、船舶通航分布が正規分布で近似されるとき、 $D_L$  が大きいほど  $p_{12}(i,j)$  は小さくなる。前項と同様に、操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流確率が、環境条件による風力発電施設漂流確率  $p_{14}(i,j)$  より 1 オーダー以上小さい場合、操船ミス船舶の衝突による影響は十分に小さいと判断することとする。つまり、

$$N \times p_{12}(i,j) \times p_{13,2}(i,j) \times 10 \leq p_{14}(i,j) \quad \dots (4-26)$$

の条件を満たす場合、操船ミス船舶の衝突の影響が無視できることとする。

##### 4.3.2.1. 船舶通航分布が正規分布で近似できる場合

上記の条件を満たす  $D_L$  の下限値を  $D_{L_{\min}}$  とすると、 $D_{L_{\min}}$  は年間船舶通航量  $N$ 、被衝突物である浮体の幅  $B_f$ 、船舶通航分布の標準偏差  $\sigma$ 、環境条件、船舶速度分布に依存する。 $B_f$  および  $\sigma$  は  $p_{12}(i,j)$  の値に影響を与え、環境条件、船舶速度分布は  $p_{13,2}(i,j)$  の値に影響を与える。いま、環境条件および船舶速度分布については  $p_{13,2}(i,j)$  が最大となる時の条件を用いることとし、海域 No.3 の環境条件および岩手沖の船舶速度分布を用いた場合の  $p_{13,2}(i,j) = 0.440$  を使用して検証を行う。残りのパラメータは  $N$ 、 $B_f$ 、 $\sigma$  の 3 つであり、 $D_{L_{\min}}$  をこれらの関数として  $D_{L_{\min}}(N, B_f, \sigma)$  と表す。しかし、これら 3 つのパラメータを 1 つの式に表すことが困難なため、これらのうち 1 つを固定して残りの 2 つのパラメータで  $D_{L_{\min}}$  の定式化を行う。

まず、本研究の設定である  $B_f = 82.0$  [m] に固定して、残りの 2 つのパラメータを変化させ、各パラメータと  $D_{L_{\min}}$  の関係から、 $D_{L_{\min}}(N, 82.0, \sigma)$  の式を導く。図 4-71 および図 4-72 は、 $N$  を 18,980 (岩手沖の年間船舶通航量) や 31,846 (野島崎沖の年間船舶通航量) のほか、100,000, 500,000, 1,000,000 の合計 5 種類に設定し、 $\sigma$  を 1~5 の 0.5 刻みに設定して、これら 2 つのパラメータの組み合わせと  $D_{L_{\min}}(N, 82.0, \sigma)$  の関係を検証した結果である。

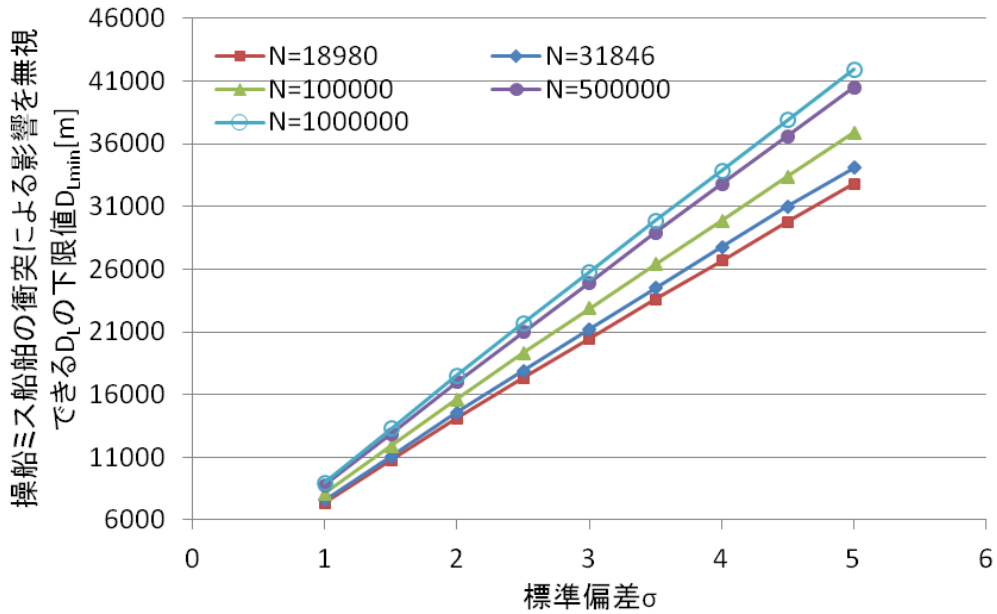


図 4-71 標準偏差と  $D_{Lmin}$  の関係

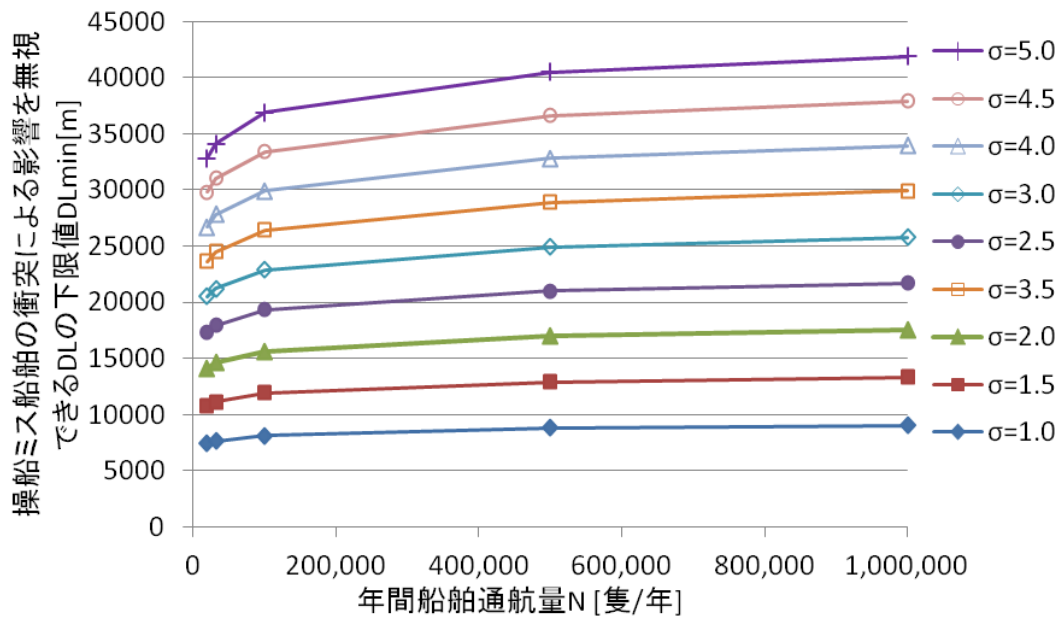


図 4-72 年間船舶通航量と  $D_{Lmin}$  の関係

図 4-71 より、 $\sigma$ と  $D_{Lmin}$  は線形の関係にあると考えられ、これらの近似曲線の傾きを  $a_1$ ,  $y$  切片を  $b_1$  とおくと、 $N$  が大きくなるほど  $a_1$  も大きくなるが、 $b_1$  は逆に小さくなり、これらの関係は対数式で近似される。これらの関係を図 4-73 に示し、それぞれの近似曲線の式を下記に示す。

$$a_1(N) = 471 \ln N + 1729 \quad \dots (4-27)$$

$$b1(N) = -68 \ln N + 1962 \quad \dots (4-28)$$

一方、図 4-72 より、 $N$  と  $D_{L_{min}}$  の関係式は対数で表されると考えられ、これらの近似曲線の対数部の係数を  $a2$ 、 $y$  切片を  $b2$  とおくと、 $N$  が大きくなるほど  $a2$  および  $b2$  も大きくなり、これらの関係は線形に近似できる。これらの関係を図 4-74 に示し、それぞれの近似曲線の式を下記に示す。

$$a2(\sigma) = 471 \sigma - 68 \quad \dots (4-29)$$

$$b2(\sigma) = 1729 \sigma + 1962 \quad \dots (4-30)$$

これらの係数等を用いると、 $D_{L_{min}}$  は以下のように示すことができる。

$$D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma) = a1(N) \sigma + b1(N) \quad \dots (4-31)$$

または

$$D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma) = a2(\sigma) \ln N + b2(\sigma) \quad \dots (4-32)$$

つまり、それぞれ代入して、

$$D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma) = (470 \ln N + 1729) \sigma + (-68 \ln N + 1962) \quad \dots (4-33)$$

または

$$D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma) = (470\sigma - 68) \ln N + (1729 \sigma + 1962) \quad \dots (4-34)$$

と表され、これら 2 式は展開するといずれも

$$D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma) = 470 \ln N \cdot \sigma + 1729 \sigma - 68 \ln N + 1962 \quad \dots (4-35)$$

となることが分かる。この式を用いることで、洋上風力発電事業を行おうとする海域における年間船舶通航量と船舶通航分布の標準偏差が分かれば、航路中心から何メートル以上離して設置すれば操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流リスクが無視できるレベルに低減できるかを検証することができる。

例えば岩手沖のデータ、 $N = 18,980$ 、 $\sigma = 1.5$ を用いた場合、 $D_{L_{min}}(18980, 82.0, 1.5) = 10,800$  と算出されるが、本研究の設定では、航路中心から陸までの距離が 10,000 m であり、上記の距離以上の距離を確保して風力発電施設を設置するのは不可能である。よって、この条件では、操船ミス船舶の衝突による風力発電施設の漂流リスクが無視できる海域は、本研究で候補エリアとしたような海岸線と航路中心の間の海域には存在せず、航路から沖に向かって離れた場所に設置するしかない、ということになる。ただし、岩手沖は年間船舶通航量が比較的多い海域であり、 $N$  がより小さい海域であれば候補エリア内に  $D_{L_{min}}$  以上の距離を確保して風力発電施設を設置できる位置ができる可能性が高い。



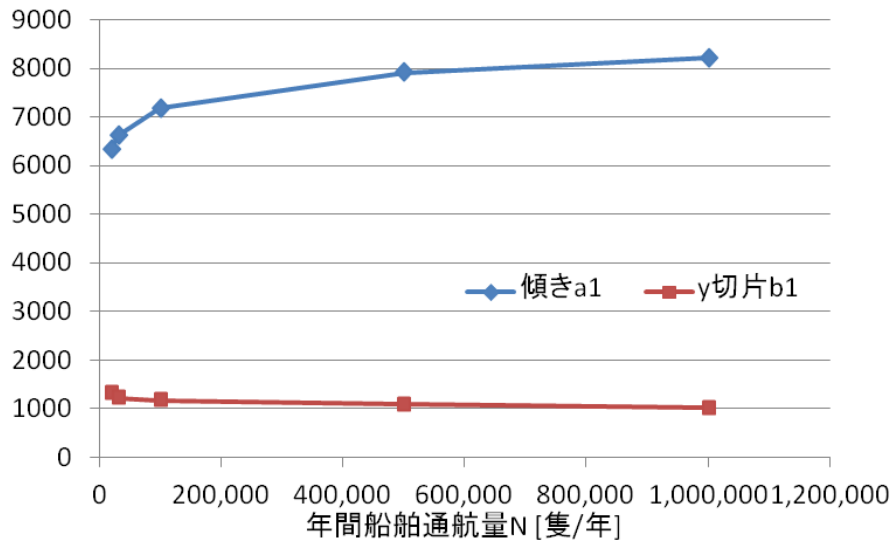


図 4-73 標準偏差と $D_{L_{min}}$ の関係を示す近似曲線の傾きおよびy切片と年間船舶通航量との関係

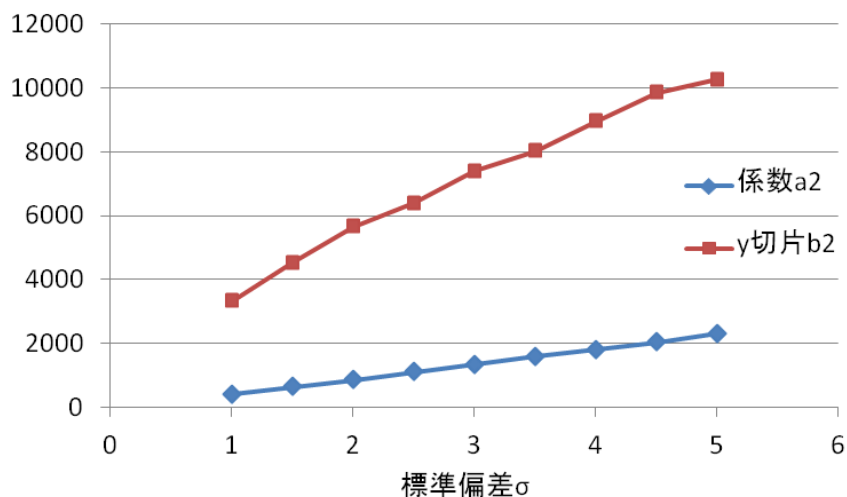


図 4-74 年間船舶通航量と $D_{L_{min}}$ の関係を示す近似曲線の係数およびy切片と標準偏差との関係

また、本研究で対象とした風力発電施設はセミサブ型浮体を使用しており、その幅  $B_f$  が 82.0 m であるが、スパーク型浮体を使用した施設の場合など、 $B_f$  がより小さい場合には操船ミス船舶の衝突確率も低減されるため、 $D_{L_{min}}$  も小さくなると考えられ、このような場合にも、候補エリア内に $D_{L_{min}}$ 以上の距離を確保できる位置ができると考えられる。

例えば  $B_f = 10$  [m]、 $\sigma = 1.0$  の場合、岩手沖と同じ  $N = 18,980$  の場合でも、 $D_{L_{min}} = 6,300$  であり、候補エリア内でこれ以上離れた距離に風力発電施設を設置することが可能となる。このように、 $B_f$  および $\sigma$ の値を変化させて $D_{L_{min}}$ との関係を検証することも可能であり、 $N$ の値を岩手沖のデータである 18,980[隻/年]に固定して、上記の $D_{L_{min}}(N, 82.0, \sigma)$ の式の求め方と同様に行うと、以下のように求められた。

$$D_{L_{\min}}(18980, Bf, \sigma) = 571\sigma \cdot \ln Bf - 75 \ln Bf + 3716\sigma + 1755 \quad \dots (4-36)$$

さらに、船舶通航分布の標準偏差 $\sigma$ を1.5に固定して、残りのパラメータを変化させて検証した場合も同様に行い、 $N$ および $Bf$ と $D_{L_{\min}}$ の関係から定式化すると、

$$D_{L_{\min}}(N, Bf, 1.5) = -40 \ln Bf \cdot \ln N + 817 \ln N + 1132 \ln Bf - 531 \quad \dots (4-37)$$

と求められた。

以上で求められた式を用いることで、操船ミス船舶の衝突リスクを無視できる風力発電施設設置位置を決めることができる。なお、ここでは上述の通り、 $p_{13,2}(i,j)$ に最大値である0.440を用いているが、 $p_{13,2}(i,j)$ の値が小さくなると式(4-26)の条件を満たす $p_{12}(i,j)$ の最大値が大きくなるため、 $D_{L_{\min}}$ の値は小さくなる。ただし、 $p_{13,2}(i,j)$ の最小値は0.414であり、この差による $D_{L_{\min}}$ への影響は小さく、100 m 前後の差が生じるのみであった。これは、本研究の設定における風力発電施設設置位置の検証の刻み幅より小さいため、この影響はほとんどないと考えられる。

#### 4.3.2.2. 船舶通航分布がガンマ分布で近似できる場合

上記と同様に式(4-26)の条件を満たす $D_L$ の下限値を $D_{L_{\min}}$ とすると、正規分布の場合と同様に、 $D_{L_{\min}}$ は年間船舶通航量  $N$ 、被衝突物である浮体の幅  $Bf$ 、環境条件、船舶速度分布に依存するが、正規分布の場合と異なる点は、船舶通航分布の標準偏差 $\sigma$ に代わり、形状母数 $\alpha$ と尺度母数 $\beta$ の2つのパラメータが関連することである。これら2つのパラメータと $N$ および $Bf$ が $p_{12}(i,j)$ の値に影響を与える。環境条件と船舶速度分布については正規分布の場合と同様、海域 No.3 の環境条件および岩手沖の船舶速度分布を用いた場合の $p_{13,2}(i,j) = 0.440$ を使用して、残りのパラメータ  $N$ 、 $Bf$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ の4つについて、 $D_{L_{\min}}$ との関係を検証することとする。

図 4-75 は形状母数 $\alpha$ と $p_{12}(i,j)$ の関係を、図 4-76 は尺度母数 $\beta$ と $p_{12}(i,j)$ の関係を示した図である。形状母数および尺度母数はどちらも、それらの値が大きくなるほどガンマ分布の形状がなだらかになり、逆に小さい場合にはピークが鋭くなる。また、形状母数はその値が大きくなるほどピークの位置が右にずれる。これらの特徴に関連して $p_{12}(i,j)$ も同様の変化をしている。

ところで、これらのグラフ形状より、式(4-26)の条件を満たす範囲は2つ存在する可能性があることが予想される。なぜなら、野島崎沖のデータを利用して求めた $p_{12}(i,j)$ のグラフ ( $\alpha = 1.09$ ,  $\beta = 6720.42$ ) の場合、航路中心として設定した位置はピーク位置より右（沖側）にあり、航路中心から左（陸側）に移動する過程でピークを超えるため、航路中心より左の範囲内に式(4-26)の条件を満たす $p_{12}(i,j)$ の上限値が2つ存在する可能性があるためである。

このような特徴から、ガンマ分布の場合、一概に「航路中心から何 m 以上離れれば操船ミス船舶の衝突リスクを無視できる」とは言えないことが分かる。一方で、ガンマ分布の特徴

から、ピークの左側に確率が 0.0 になる位置があるため、航路中心からこの位置まで離れば確実に操船ミス船舶の衝突リスクを回避できることになる。従って、船舶通航分布がガンマ分布で近似される場合には、 $D_{L_{min}}$  を求めることはしないこととする。

ただし、形状母数の値が大きい場合にはピーク位置が航路中心より右に移動するため、航路中心から左に離れる場合、単純にその距離の増加によって  $p_{12}(i, j)$  が減少することになり、正規分布の場合と同様に  $D_{L_{min}}$  を求めることが可能となる。また、ピーク位置と航路中心位置との関係は位置母数  $m$  によっても変化するので、対象とする海域の船舶通航分布データをガンマ分布で近似した場合は、これらのパラメータの特徴を考慮して  $D_{L_{min}}$  を求めることが適切かどうかを判断すべきである。

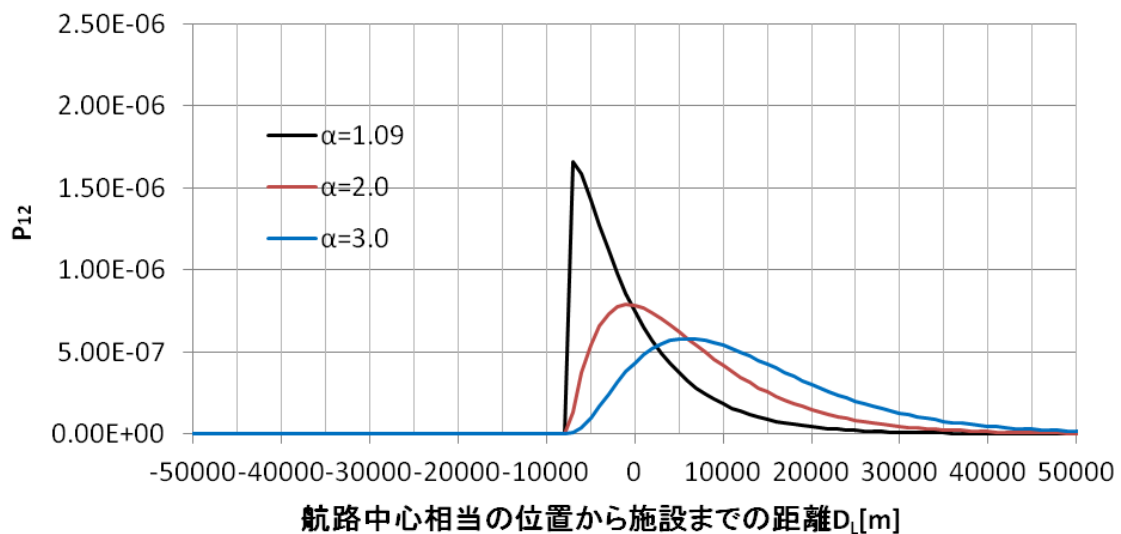


図 4-75 形状母数と  $p_{12}(i, j)$  の関係 (尺度母数は 6720.42 で一定)

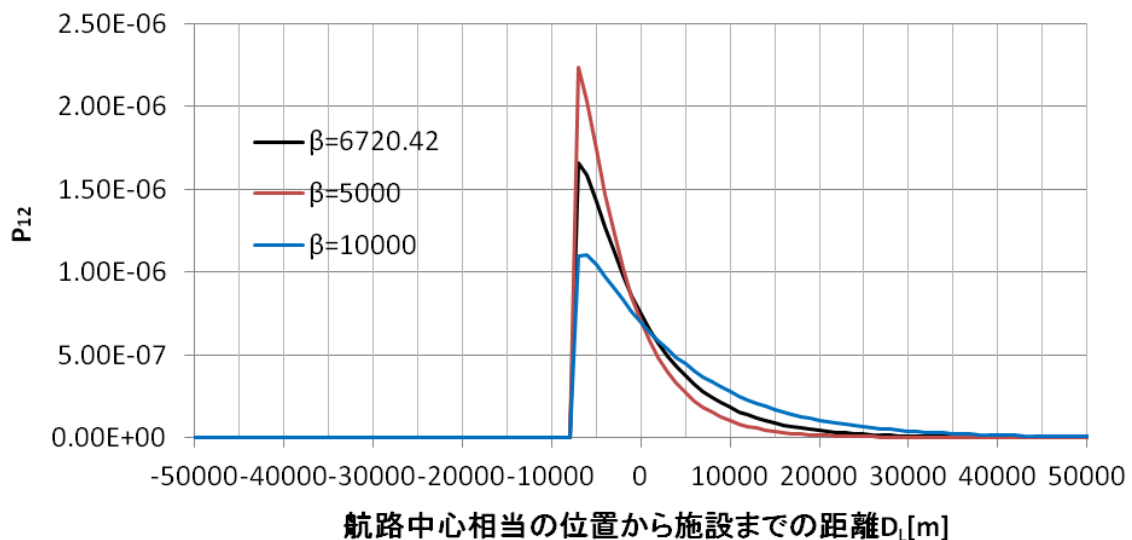


図 4-76 尺度母数と  $p_{12}(i, j)$  の関係 (形状母数は 1.09 で一定)

### 4.3.3. 総合リスク分布と沿岸施設被害額

第 4.2.4 項で示した通り、総合リスクの分布形状は、操船ミス船舶の衝突確率や漂流した風力発電施設の航路への侵入など、航路と関連するリスクの影響を大きく受けており、沿岸施設と関連するリスクの影響は小さい。特に船舶通航分布が正規分布で近似できる場合、ほとんど航路からの距離によって総合リスクの分布が決まってしまう。

しかし、沿岸施設の被害額がより大きい場合、または沿岸施設が対象エリア内に複数ある場合には、沿岸施設への衝突リスクの総合リスクへの寄与度が上昇し、総合リスクの分布形状においても沿岸施設への衝突リスクの分布形状の影響が確認できるようになる可能性がある。ここでは、これらの影響について以下のように検証する。

#### 4.3.3.1. 単独施設の被害額

本研究で設定した沿岸施設のうち、被害額が最も大きいのは石油備蓄基地であり、その額は約 931 億 3907 万円である。この金額は、石油備蓄船 1 隻分の 88 万 kL の石油が流出した際の海洋流出油回収コストと、流出した石油が周辺の藻場 200 ha を汚染し、原状回復まで 10 年かかると仮定した場合に失われる生態系サービスの価値を金額換算したものの合計金額として計算している。この金額設定では、沿岸施設への衝突リスクは航路に関連するリスクと比べて小さく、総合リスクの分布形状がほとんど航路との距離によって決まってしまうが、より大きな被害額の設定の場合には、沿岸施設への衝突リスクの影響が総合リスクの分布にも現れる可能性がある。そこで、ここでは総合リスクの分布形状に影響を及ぼす沿岸施設被害額の下限値を求めることとする。

総合リスクの分布形状に影響を及ぼすかどうかの判断基準としては、沿岸施設に最も近い位置でのリスクが、その右隣りの位置でのリスクより大きいこととする。つまり、沿岸施設に最も近い＝航路から最も遠い位置でのリスクが、その右隣り＝航路からの距離が少し小さい位置のリスクより大きいということは、航路からの距離が大きくなることに逆らってリスクが大きくなることを意味し、沿岸施設への衝突リスクの影響が航路に関連するリスクに埋もれず、総合リスクの分布に影響を与えていることになるためである。

航路に関連するリスクの影響度は、その航路の年間船舶通航量  $N$  と関連しており、 $N$  が大きいほどその影響度も大きくなる。よって、総合リスクの分布に影響を及ぼす沿岸施設被害額の下限値も  $N$  によって変化すると考えられるため、この下限値を  $s_{15\min}(N)$  と表すこととし、 $N$  と  $s_{15\min}$  の関係を検証した。図 4-77 にその結果を示し、以下に得られた近似曲線の式を示す。

$$s_{15\min}(N) = 0.3879 N^{1.8563} \quad \dots (4-38)$$

例えば岩手沖の年間船舶通航量 18,980 隻／年の場合、約 3,003 億円の施設が単独で存在すると総合リスク分布に沿岸施設への衝突リスクの影響が現れることになる。これは本研究で設定した石油備蓄基地の被害額より 1 オーダー大きい、石油備蓄船が複数隻破損した場合や、より広範囲の藻場が汚染された場合にはこの金額に達する可能性は十分にあり、また、

本研究では考慮していない、石油そのものの損害を補償する場合や、藻場以外の生態系、例えば周辺漁場の汚染等の被害などを考慮することにより、被害額はさらに上昇する可能性がある。

一方、船舶通航分布がガンマ分布の場合には、 $p_{12}(i,j)=0.0$ となる海域においては沿岸施設への衝突リスクの影響がはっきりと現れるため、上記のような検討は不要と考える。

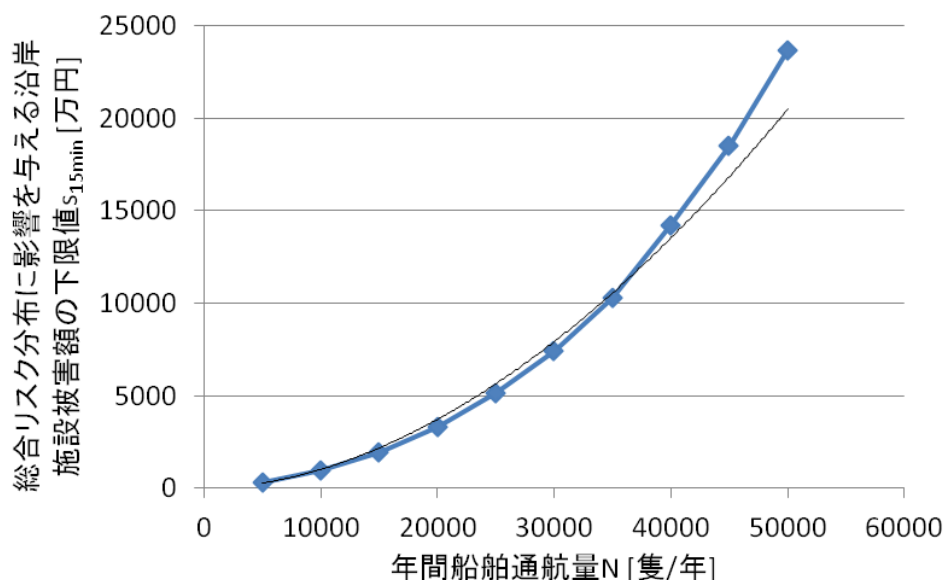


図 4-77 年間船舶通航量と総合リスク分布に影響を与える沿岸施設被害額の下限値の関係 (黒線は近似曲線)

#### 4.3.3.2. 複数施設の場合

単独の施設ではその被害額および衝突確率が小さく、航路関連のリスクと比べて小さくなってしまっても、沿岸施設が複数ある場合には、それらの施設への衝突リスクの合計が総合リスクの分布に影響が大きくなり、航路関連リスクに埋もれずに総合リスク分布に影響を与えられる可能性がある。

そこで、対象エリア内に沿岸施設を3種類設置した場合の総合リスク分布について検証する。一例として、藻場が(0, 1000)、石油備蓄基地が(0, 10000)、カンパチの養殖生簀が(0, 15000)にある場合を考え、関連する数式を以下の様に変更した。

$$r_1 = m_s \times p_{11} \times p_{13,1} \times \{p_{15,1,3} \times (s_{13} + s_{15,3}) + p_{15,10,4} \times (s_{13} + s_{15,4}) + p_{15,15,1} \times (s_{13} + s_{15,1})\} \quad \dots (4-39)$$

$$r_4 = m_s \times p_{11} \times p_{13,1} \times (1 - p_{15,1,3} - p_{15,10,4} - p_{15,15,1} - p_{16}) \times s_{13} \quad \dots (4-40)$$

$$r_7 = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times \{p_{15,1,3} \times (s_{13} + s_{15,3}) + p_{15,10,4} \times (s_{13} + s_{15,4}) + p_{15,15,1} \times (s_{13} + s_{15,1})\} \quad \dots (4-41)$$

$$r_{10} = N \times p_{12} \times p_{13,2} \times (1 - p_{15,1,3} - p_{15,10,4} - p_{15,15,1} - p_{16}) \times s_{13} \quad \dots (4-42)$$

$$r_{13} = p_{14} \times \{p_{15,1,3} \times (s_{14} + s_{15,3}) + p_{15,10,4} \times (s_{14} + s_{15,4}) + p_{15,15,1} \times (s_{14} + s_{15,1})\} \dots (4-43)$$

$$r_{16} = p_{14} \times (1 - p_{15,1,3} - p_{15,10,4} - p_{15,15,1} - p_{16}) \times s_{14} \quad \dots (4-44)$$

ただし、 $p_{15,1,3}$ の2つ目の添え字1は沿岸施設の位置が(0, 1000)であることを示しており、(0, 10000)の場合は10、(0, 15000)の場合は15としている。また、3つ目の添え字は沿岸施設の種類を示しており、1：カンパチの養殖生簀、2：マグロの養殖生簀、3：藻場、4：石油備蓄基地とする。

これらの数式を用いて計算した、複数施設が対象エリア内にある場合の総合リスクの分布を図4-78に示す。ただし、船舶通航分布、船舶速度分布は全て岩手沖のデータを使用し、海域No.1の環境条件を用いた。また、図4-79には、上記と同じ条件で計算された3つの沿岸施設への衝突確率のみを示す。これは、 $r_1$ 、 $r_7$ および $r_{13}$ の式に含まれる、 $p_{15,1,3} + p_{15,10,4} + p_{15,15,1}$ の空間分布を示したものである。

図4-78より、単独施設として(0, 10000)に石油備蓄基地がある場合(図4-63)と比べて分布形状にはほとんど変化がないことが分かる。詳細に比較したところ、エリア内の多くの場所においてリスクの大きさに変化がなかったが、石油備蓄基地が設置されている位置(0, 1000)の周辺海域ではリスクの増加が認められるところもあり、増加率の最大値は(1000, 10000)における1.21倍であった。一方、新たに追加した藻場やカンパチの養殖生簀の周辺海域では総合リスクの増加は認められず、むしろわずかに減少した。この理由については次のように考えられる。

式(4-39)から式(4-44)に示すように、 $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ については沿岸施設の追加によってリスク値が増加するのみであるが、 $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ については、逆に沿岸施設の増加によって減少する。総合リスクはこれらのリスクの合計であるから、 $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ の増加量と $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ の減少量のバランスによって、ある位置での総合リスクの増減が決まることになる。総合リスクが増加した場所では増加量が減少量より多く、総合リスクが減少した場所では減少量が増加量より多かったということになる。

また、3つの施設を考慮した $p_{15}(i,j)$ の分布を示した図4-79においては、石油備蓄基地のある(0, 10000)の周辺海域のみでなく、新たに藻場を追加した(0, 1000)の周辺海域でも $p_{15}(i,j)$ の値が大きくなっていることが分かる。しかし、カンパチの養殖生簀を追加した(0, 15000)の周辺海域は、他2種類の沿岸施設周辺海域と比べて $p_{15}(i,j)$ の値が小さい。これは施設の大きさが小さいために、漂流した風力発電施設の衝突確率が小さいためと考えられる。

図4-79に関する考察と上記の考察結果を踏まえると、藻場の追加によって、その周辺海域では漂流した風力発電施設の衝突確率が増加しているが、その被害額の小ささから、 $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ の増加量を $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ の減少量が上回り、総合リスクの増加率で見ると減少という結果

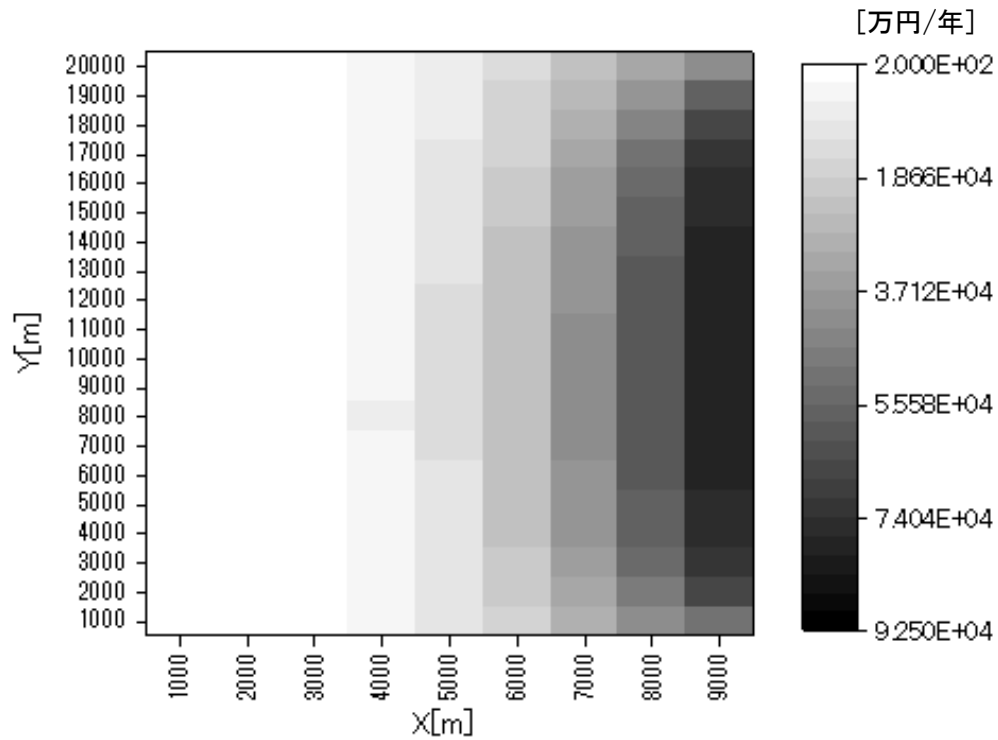


図 4-78 沿岸施設 3 種類が 3 地点にある場合の総合リスク分布  
 (藻場が(0, 1000) , 石油備蓄基地が(0, 10000), カンパチの養殖生簀が(0, 15000)にあり,  
 船舶通航分布, 年間船舶通航量, 船舶速度分布は全て岩手沖のデータ, 環境条件は海域 No.1  
 を使用した場合)

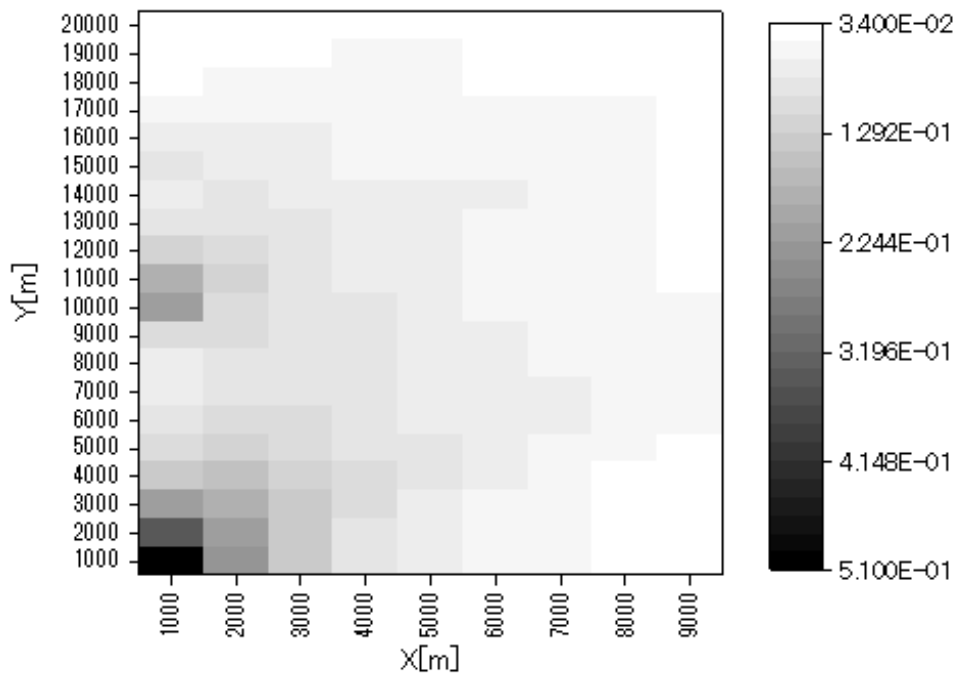


図 4-79 漂流した風力発電施設が 3 地点にある沿岸施設 3 種類に衝突する確率の分布  
 (計算条件は図 4-78 と同じ)

になったと推測される。また、カンパチの養殖生簀については、施設の小ささから、風力発電施設の衝突確率が小さく、その被害額も小さい。よって、この施設の周辺海域においては、 $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ の増加量が小さく、 $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ の減少量も小さいが、総合的には後者の減少量の方が前者の増加量を上回り、総合リスクの減少につながったと考えられる。ただし、最も減少率が大きかった位置(1000, 15000)においても、その減少率は0.986倍である。

一方、石油備蓄基地の周辺海域で総合リスクが増加した理由としては、次のように考えられる。元々、この海域では石油備蓄基地への衝突確率が高く、 $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ の値は小さいため、他の2施設への衝突確率が追加されても、その減少率は小さい。一方、その衝突確率と被害額の大きさから、 $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ の値は元々大きい、そこに他の2施設への衝突確率が加わり、さらに大きくなった。石油備蓄基地の周辺海域は、対象エリアの南北方向の中心に近く、他の2施設への衝突確率も比較的大きいと考えられる。以上により、この海域では $r_1$ 、 $r_7$ 、 $r_{13}$ の増加量が $r_4$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{16}$ の減少量を上回り、総合リスクは増加となったと考えられる。

以上の考察により、沿岸施設が複数地点に設置されている場合の総合リスク分布への影響が明らかになったが、その影響は小さく、単独の沿岸施設の場合と比べても総合リスクの分布にはほとんど変化が生じないことが分かった。

従って、本項での検証結果より、沿岸施設が対象エリア内に単独で存在する場合も、複数存在する場合も、総合リスクの分布形状に対する沿岸施設への衝突リスクの影響度が小さいことが分かり、航路関連のリスクの影響度の大きさが改めて確認された。

#### 4.4. 安全性に関するリスクを考慮した浮体式洋上風力発電施設設置位置の選定方法

前章の計算方法を踏まえた本章での検討結果から、安全性に関するリスクを考慮した洋上風力発電施設設置位置は、以下の方針で選定することが望ましいと考える。

「まずは航路中心から離れた、航路関連のリスクの影響が十分に小さくなる海域に絞り、次にその海域内で沿岸施設への衝突リスクの小さい位置を選ぶ。ただし、沿岸施設への衝突リスクの空間分布は環境条件に大きく依存するため、当該海域の環境条件を考慮して定量的に評価することが望ましい。」

第4.2.3項において示した通り、風力発電施設の漂流原因別に見ると、船舶の漂流や、風車設計時の想定を超える環境条件の発生に起因するリスクの影響と比べて、船舶の操船ミスに起因するリスクの影響が最も大きいことが分かった。また、第4.3.3項において、航路に関連するリスクと沿岸施設への衝突リスクを比較すると前者の影響が圧倒的に大きいことを示した。これらのことから、周辺海域への影響の観点から浮体式洋上風力発電施設の設置に適した位置を決めるに当たり、最も影響の大きいリスクは「操船ミスによる船舶の衝突」であることが分かる。

しかし、船舶通航分布がガンマ分布で近似される海域では、航路中心からある一定の距離で急激に船舶の通航量が減少し、航路関連のリスクが総合リスクにほとんど影響しなくなる。図4-80は、船舶通航分布がガンマ分布で近似される場合の総合リスク分布のうち、陸から



の距離が 5,000 m 以内の範囲のみを示したものである。陸からの距離が 6,000 m 以上になると航路に関連するリスクが支配的となり、沿岸施設への衝突リスクの影響がほとんど見えなくなってしまうが（例えば図 4-68）、この範囲では航路に関連するリスクが急激に小さくなり、沿岸施設への衝突リスクの空間分布が明確に確認できる。

日本沿岸域ではこのようにガンマ分布で近似できる船舶通航分布を持つ海域が多いため、航路に関連するリスクが急激に減少する位置より陸側の海域の中から、沿岸施設への衝突確率の小さい位置を選ぶ方法が適切であると考えられる。以上により、本研究では、上記の方針を浮体式洋上風力発電施設の設置位置選定手法として提案する。この方針は、洋上風力発電事業の有力海域として考えられている、太平洋側の日本沿岸部の多くの海域において共通して利用可能なものであることから、日本沿岸部で浮体式洋上風力発電事業を行う場合の、一般的な適地選定の指針を示すことができたと考える。

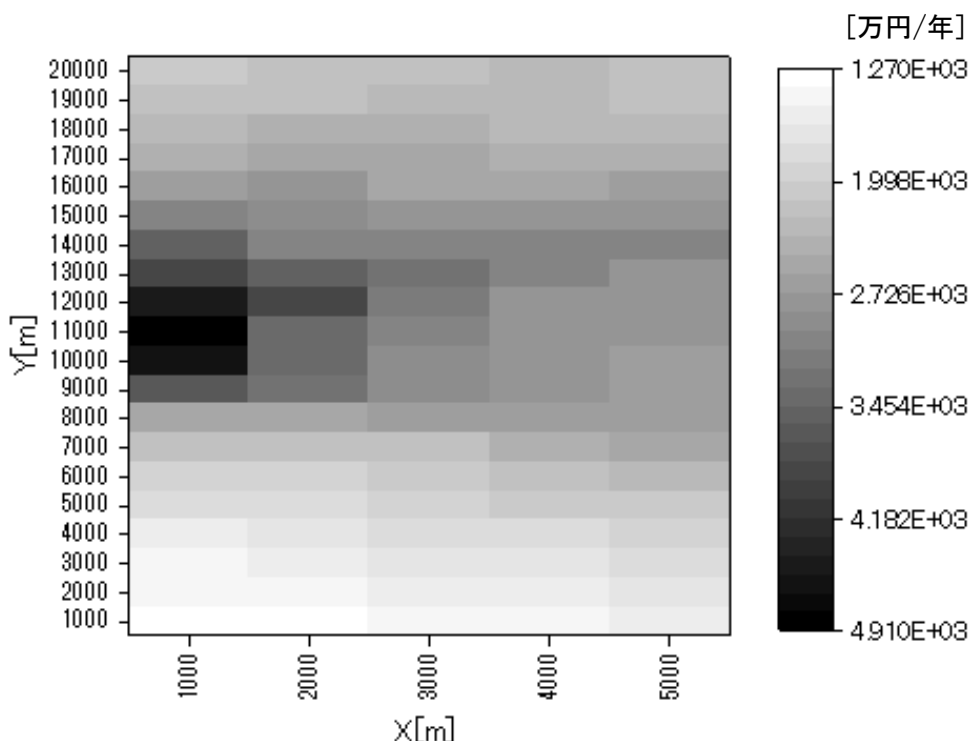


図 4-80 船舶通航分布がガンマ分布で近似される場合の総合リスク分布  
(陸からの距離 5000 m 以内の範囲，海域 No.1 の環境条件，岩手沖の船速分布，沿岸施設位置(0, 10000)に石油備蓄基地がある場合)

#### 4.5. モデルの不確実性

本研究で構築した洋上風力発電施設の設置位置検討のためのモデルには、利用可能なデータの不足等による不確実性が多く含まれている。モデルの更なる改良に必要なデータとしては、以下のようなものが挙げられる。

- ① 漂流船舶出現確率
- ② 船舶の操船ミス発生確率

- ③ 設計時の想定を超える環境条件による風力発電施設漂流確率
- ④ 漂流施設と航行船舶の衝突確率
- ⑤ 風力発電施設被害額（修理にかかる費用および期間）
- ⑥ 沿岸施設被害額

これらのデータを取得することが計算結果の信頼性を向上させるために必要だが、容易には取得できないものが多い。ここでは、これらの不確実性が本研究で得られた知見にどれだけ影響するかを考察する。

図 4-59 から図 4-61 に示す通り、風力発電施設の漂流原因別に見たリスクの合計の大きさは、船舶の漂流に起因するリスクが最も小さく数万円オーダーであり、設計時の想定を超える環境条件に起因するリスクは数百万円オーダー、船舶の操船ミスに起因するリスクが最も大きく、数億円オーダーとなっている。しかし、これらのリスクには上述のデータ不足による不確実性が含まれており、場合によってこれら 3 つに分類したリスクの大小関係が変化する可能性も考えられる。

そこで、これらの不確実性が 3 つのリスクの大小関係に与える影響を検証する。船舶の漂流や操船ミスの発生確率は、本研究での設定値が実際の確率と比べて過大であるか過小であるか不明であり、これらが原因で洋上風力発電施設に衝突・漂流に至る確率も、実際の確率と比べて過大か過小か不明である。一方、設計時の想定を超える環境条件による洋上風力発電施設の漂流確率は、過大評価である可能性が高い。なぜなら、本研究で設定した $10^{-4}$ は、ISO の基準 [55] で 1 本の係留索が 1 年間に破断する確率の上限として定められているものであるため、実際には $10^{-4}$ 以下になるように設計されていると考えられるためである。また、施設の漂流は 3 本の係留索が破断することで発生するため、1 本の破断確率よりは小さい可能性が高い。

以上を踏まえ、設計時の想定を超える環境条件による風力発電施設の漂流確率を仮に 1 オーダー小さくした場合を考えて、このリスクと、船舶の漂流に起因するリスクを比較することで不確実性の検証を行う。後者のリスクは 3 つの中でリスクが最小のため、仮に 1 オーダー大きくした場合を考え、前者のリスクを 1 オーダー小さくした場合と比べると、それぞれの最大値はオーダーが同じになるが、最小値で比べると、まだなお後の方がリスクが小さい。つまり、海域全体で考えると前者のリスクの方が大きいことになり、それぞれのリスクのオーダーを互いに近づける方に 1 オーダーずつ変化させたとしても、これらの 2 つのリスクの大小関係は変化しないことが分かった。

一方、3 つの中で最もリスクの大きい、船舶の操船ミスに起因するリスクについては、元々その値が、設計時の想定を超える環境条件に起因するリスクより 2 オーダー大きいため、後者のリスクが過大評価であることを考慮して 1 オーダー下げた場合、両者の差がより大きくなるのみで、両者の大小関係には影響しない。

以上の検証結果より、上記①～③の不足データに関する不確実性が、風力発電施設の漂流原因別に 3 つに分類されるリスクの大小関係に与える影響は小さいと推定されることが分かった。また、④⑤は風力発電施設の設置位置によらず一定であるため、施設設置位置の検討

には大きな影響を与えず、⑥については第 4.3.3 項において検証したとおり、総合リスク分布に与える影響は小さい。従って、これらの不確実性はいずれも、本研究で得られた知見には大きな影響を与えないが、これらの不足しているデータの収集やより正確な推定方法の検討は今後の課題である。

また、本研究では定常状態の環境条件を想定して漂流方向等の計算に使用したが、実際の海域では漂流物の漂流中に風向等が変化し、漂流方向が変化する可能性もある。そのため、漂流開始時に予測された漂流先と、実際に数十分、数時間後に漂着する場所が必ずしも一致するとは限らず、このような評価を正確に行うためには、非定常状態を考慮した計算が必要となる。非定常状態の計算においては、同じ条件で漂流を開始する場合でも、漂流中の環境条件の変化の仕方は複数通りあるため、モンテカルロ等の手法により複数回のシミュレーションを実施して統計的に検討する必要がある。

#### 4.6. 本章のまとめ

本章では、仮想海域を対象に、周辺航路や沿岸施設との位置関係を考慮した、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの定量評価を試行した。その評価結果を基に、浮体式洋上風力発電施設が設計時の想定を超える環境条件によって漂流する確率を基準とし、船舶の漂流に起因するリスクを無視できる年間船舶通航量の上限值を環境条件ごとに求めた。また、同様に、船舶の操船ミスに起因するリスクが無視できる航路中心からの距離を、年間船舶通航量、浮体幅、標準偏差の関数として定式化した。なお、この定式化は船舶通航分布が正規分布で近似できる場合に限る。さらに、航路関連リスクと沿岸施設への衝突リスクの大小関係の検証のため、総合リスク分布に沿岸施設への衝突リスクの分布の影響が現れるときの沿岸施設被害額の最小値を、年間船舶通航量の関数として求めるための定式化を行った。

これらの結果を踏まえ、安全性に関するリスクを考慮した洋上風力発電施設設置位置の選定における方針を提案した。この方針は、洋上風力発電事業の有力海域として考えられている、太平洋側の日本沿岸部の多くの海域において共通して利用可能なものであることから、日本沿岸部で浮体式洋上風力発電事業を行う場合の、一般的な適地選定の指針を示すことができたと考える。



## 5. 洋上風力発電施設の環境影響に関する文献調査

第1章では、洋上風力発電に関する環境影響とその評価に関する既往基準等を簡単に説明した。本研究では、様々な環境影響の中から、洋上風力発電に特有の問題として水中騒音を取り上げることとし、本章において洋上風力発電施設からの水中騒音およびこれによる海棲生物への影響についての文献調査結果を示す。

### 5.1. 洋上風力発電からの水中騒音とその生物への影響のレビュー [63]

Nedwellら [63]は、ウィンドファームのライフサイクルを建設準備、建設、運用、撤去の4段階に分類し、各段階で発生する水中騒音について利用可能な情報を整理している。

この報告書ではまず、洋上ウィンドファームの基礎、風車、ナセル、ブレード、補助的構造物についてそれぞれ説明し、そのライフサイクルについて説明した後、水中の背景雑音およびライフサイクルの各段階において発生する水中音についての情報を整理している。ただし、この報告書では基礎は着床式のみ、設置水深30 m未満を対象としている。ここでは、この報告書の中から数種類の水中音について抜粋し、以下に紹介する。

#### 5.1.1. 背景雑音

背景雑音について考える音源についての情報を紹介した後、「新たな音源を海洋環境に導入することの影響を正確に評価するためには、背景雑音に関する知見が必要である」ことや、「背景雑音は時間と空間によって大きさも周波数も異なるため、ウィンドファームに関連する騒音が背景雑音に紛れることもあれば、背景雑音より十分大きくなることもあるので、背景雑音の評価は重要である」こと、また、「浅海域の背景雑音に関する知見やモデルは深海域に比べて非常に少なく、十分な開発がされていない」という問題点についてまとめている。

#### 5.1.2. 杭打ち時の騒音

杭打ち時の騒音の発生・伝搬メカニズムについては十分な文献がないが、騒音は図5-1に示す3通りの経路によって水中に入射・伝搬すると考えられ、図中(1)の経路は入射角や音響インピーダンスの差などの理由から寄与度が低く、(2)の経路が最も寄与度が高いこと、(3)の経路では海底地質の方が水中より音速が大きいため、(2)の経路より速く伝搬すると考えられることについて説明している。その後、風車および風車以外の基礎の杭打ち時における水中音およびその生物影響に関する文献を紹介し、これらの観測結果が、海棲生物にとってほぼ影響がないもの [64]から忌避 [65] [66]や死に至るもの [67]まで多岐にわたることや、その影響因子は杭の直径、地質や水深、生物の種類や大きさが考えられるが、特に生物影響については文献が少なく、合理的な評価には更なる研究が必要である、とまとめている。

#### 5.1.3. 運用時の騒音

運用時の騒音についても図5-2に示すように、杭打ち時の騒音の伝搬と同様、空中、水中、地中からの経路が考えられるが、運用中の場合には様々な音源が考えられる。例えば風車の回転に伴うブレードの空力音、いわゆる風切り音や、ナセル内で発生する機械音、また、ブ

レードも含めた構造物全体の周辺空気の動きや通過する波による流体力学的な力によって発生する構造物の振動が考えられる。特に構造物の振動は空中、水中、地中のいずれの経路からも入射の可能性があるが、これも杭打ち時と同様、水中経路からの入射の寄与度が最も高いと考えられると説明している。さらに、これらの音の発生・伝搬メカニズムから、観測される音は風速や音速プロファイル、水深、海面粗度や海底地質に影響を受けると考えられると述べている。

運用中の騒音についての情報は非常に少ないが、1 MW 未満の比較的小さい風車の運用中の水中騒音を背景雑音と比較した例（元の文献は見つからず）や、これら風車のタワー振動と陸上の2 MW 風車のタワー振動を計測し、2 MW 風車を洋上に設置した場合の水中音レベルをシミュレーションによって予測した例 [68]を紹介している。このシミュレーション結果を利用してネズミイルカとアザラシの行動への影響を実験調査した結果、逃避行動は確認されたが恐怖心を抱いている様子はなかったと報告されている。また、強風時にウィンドファーム付近でターボットという魚種が逃避行動を起こしたという逸話について検証した結果、この原因は水中騒音ではないと結論付けられていることを紹介している [69]。

これらの限られた情報からではあるが、風車運用中の水中騒音は周波数も音圧レベルも低く、音圧レベルは風速と共に上昇するが、同時に背景雑音レベルも上昇し、背景雑音との差はほぼ一定に保たれるため、環境に調和するのではないかとまとめている。

#### 5.1.4. その他の段階の騒音

この報告書では、洋上ウィンドファームのライフサイクル中のその他の段階で発生する騒音についても調査しており、表 5-1 のようにまとめている。また、報告書の最後で筆者の意見として、洋上ウィンドファームに関連する騒音源として環境影響の大きいと思われるものの順位を示しており、最も環境リスクが高いのは爆破を伴う基礎の撤去、次いで基礎の杭打ちおよび地質調査、続いてドリルによる穴あけ、岩の設置（洗掘対策やケーブル保護のため）、ケーブル敷設、ダイバーの使用する道具類、最後に船舶や機器類および風車の運用としている。ただし上記の順位の評価には累積的な影響は考慮していない。

最後のまとめとして、「いずれの海域においても騒音およびその生物影響の両方の調査を行うべきであり、これらの情報がなければ合理的な環境影響評価はできない」こと、また、「受け入れられない影響が出そうな場合はその低減方法検討し、必要に応じて実行するべきである」と述べている。

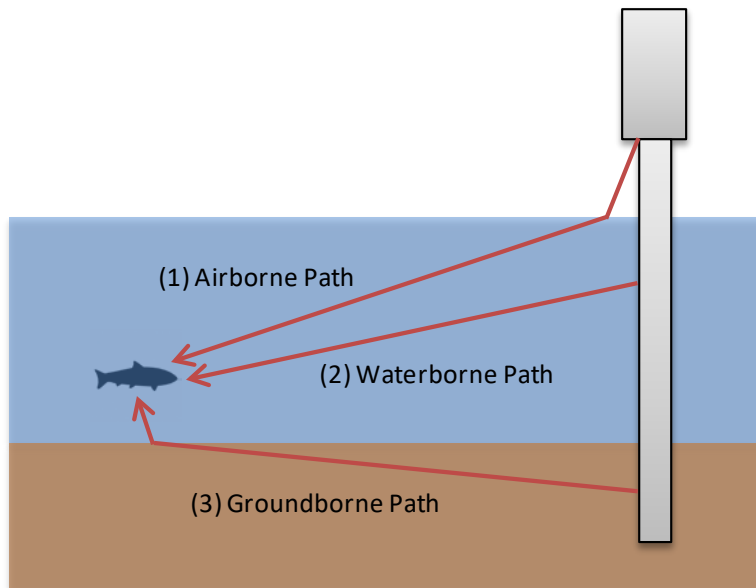


図 5-1 基礎の杭打ち時の騒音の伝搬経路  
(Nedwell ら [63]を参考に作成)

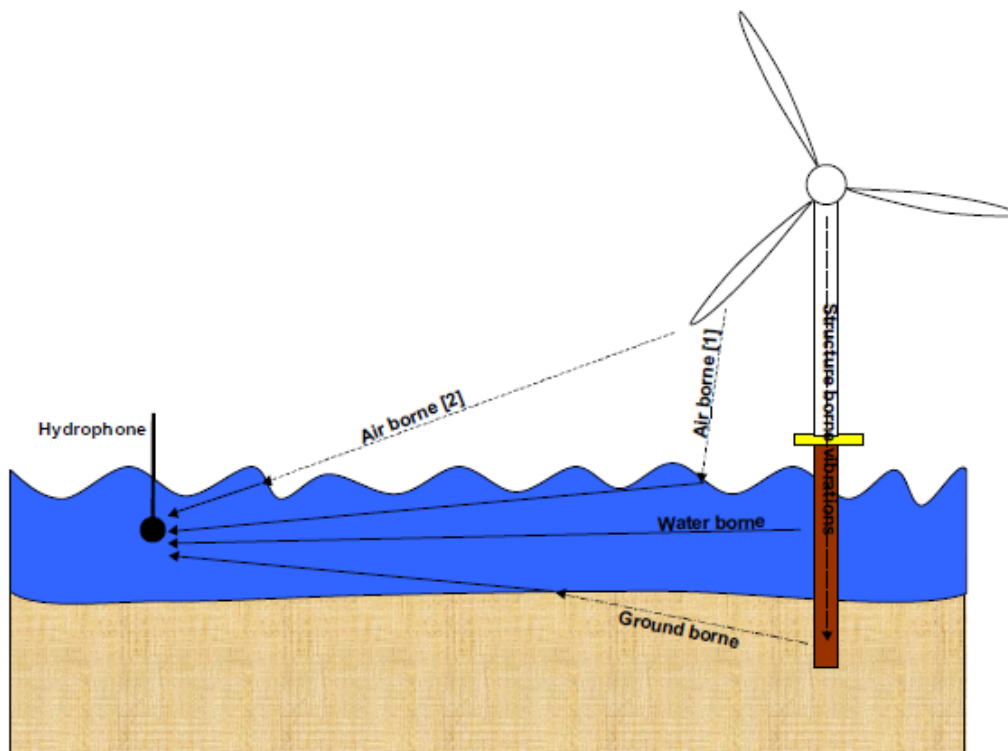


図 5-2 風車運用時の騒音の伝搬経路 [63]

表 5-1 洋上ウィンドファーム関連の水中音源に関する利用可能な情報の概要 [63]

Windfarm related noise source	Measurement quantity	Source Level		State of knowledge		Behavioural response
		Min	Max	SL & TL		
Background Noise	SPL	Highly variable. Frequency dependent.		Good knowledge of deep water ambient noise. Poor knowledge of shallow water ambient noise.		Concern about the effects of increasing background noise on marine wildlife.
Shipping and Machinery	Linear SPL dBht( <i>Salmo salar</i> )	152 30	192 60	Poor for small craft, otherwise realltively good.		Mixed observations including attraction and avoidance.
Geophysical Survey	Linear Peak SPL Peak dBht( <i>Gadus morhua</i> ) Peak dBht( <i>Orcinus orca</i> ) Peak dBht( <i>Phocoena phocoena</i> )	215 142 159 144	260 195 216 203	Good for airguns, very poor for typical windfarm survey sources such as boomers and sparkers.		Some cetacean airgun avoidance observations.
Pile Driving	Linear Peak SPL SEL Peak dBht( <i>Salmo salar</i> )	192 210 40	261 215	Limited set of measurements with a large variation in results. SL possibly related to pile diameter.		Observation of harbour porpoise disturbance, no reaction from caged trout, fish mortality evidence.
Drilling	Linear SPL	145	191	Several deep water measurements. Large range of levels. No shallow water measurements.		Reported response to playback tests. Cetacea avoid when received level is high.
Gravity Foundation Installation	n/a	n/a	n/a	No available measurements.		No available observations.
Dredging	Peak spectral energy (80-200Hz)		177	Some shallow water measurements of suction and hopper dredgers.		Mixed reactions. Cetacea avoid when received level is high.
Rock Laying	Linear SPL	Within background.		One inconclusive measurement.		No available observations.
Trenching	dBht( <i>Orcinus orca</i> ) dBht( <i>Phocoena phocoena</i> ) dBht( <i>Phoca vitulina</i> ) dBht( <i>Gadus morhua</i> ) dBht( <i>Limanda limanda</i> ) dBht( <i>Salmo salar</i> )	150 120 100 75 50 50		One measurement of pipe trenching. No available measurements of windfarm cable laying, which will be significantly different.		No available observations.
Turbine Structure Installation	n/a	n/a	n/a	No available measurements.		No available observations.
Wind Turbines	Peak spectral energy (16 Hz)	142	153	Two measurements available for low power (<1MW) individual turbines.		Very little knowledge. Porpoise behavioural reponse to playback experiments.
Blast	Linear SPL dBht( <i>Gadus morhua</i> ) dBht( <i>Limanda limanda</i> ) dBht( <i>Phoca vitulina</i> ) dBht( <i>Phocoena phocoena</i> ) dBht( <i>Orcinus orca</i> )		272 191 169 190 207 213	Verified empirical models for peak pressure and impulse available.		Well used near source blast injury model available. Some cetacean avoidance observations.
Jet Cutting	n/a	n/a	n/a	No available measurements.		No available observations.
Diver Tools	Peak SPL Average SPL		200 161	One set of measurements available covering: drills, wrenches, bolt guns, grinder and jackhammer.		No available observations.



## 5.2. 着床式洋上ウィンドファームの運用中の水中騒音調査結果 [70]

この報告書は2002年11月から2003年2月まで、スウェーデンの南東海岸沿いに設置されている Utgrungen ウィンドファーム周辺海域において、Ingemansson Technology AB によって行われた水中音の調査結果について示したものである。この調査の目的は、(1)風車1基からの水中放射音の特性、(2)風車からの騒音発生メカニズム、(3)周波数ごとの距離減衰の様子、(4)風速による音圧レベルの変化、(5)複数基の風車からの相互干渉と全体の音場への影響、(6)船舶の航行によるファーム内の音圧レベルへの影響を明らかにすることである。このウィンドファームは1.5 MW 風車7基から構成され、陸からの距離は12.5 km、設置水深は4~10 m である。水中音計測はこのファーム内の4号機を対象に行われた。

調査では、ハイドロホンは4号機からの距離83 m、160 m、463 mの3地点に海底から1 mの位置に設置し、83 m地点のハイドロホンは Burns Electronics の CR-3DC、残り2地点は Bruel&Kjaer の 8101 を使用した。また、風車タワーには水面から8 m および25 m 上部にそれぞれ2つの加速度計を設置し、タワー断面の法線方向および接線方向の振動を計測した。水面から8 mに設置したのはPCBの356B18, tri axial, 25 mに設置したのは Endevco の 61-500 であった。なお、ハイドロホンおよび加速度計での記録周波数帯は1 Hz から2000 Hz で、サンプリング周波数は個々の風車を制御した計測時には10 kHz、船舶航行による影響の調査時には5 kHz (ただし海面上8 mに設置した加速度計は2.5 kHz) としている。

風車単基および複数基からの放射音の影響を調査するため、まず7基全てを運転させた状態から調査対象の4号機のみを停止し、それから隣接する風車から順に1基ずつ停止していき、全て停止した状態から4号機のみ運転を再開した後、停止の場合と同じ順に1基ずつ運転再開して全基が運転状態になるまでを1セットとし、各風速条件について1セットずつ計測された。風速条件は、4 m/s、8 m/s、12 m/s の3通りにおいて、水中音およびタワーの振動を計測予定であったが、風速4 m/s の計測は海面の凍結のため実施されなかった。ただし、それ以前に記録されていた風車全基が運転中の長期観測データがあり、これを代替として使用することにした。

上記の目的(1)~(6)についての調査結果は以下のとおりである。ただし、(6)については本研究との関連性が低いため省略する。

### (1) 風車1基からの水中放射音の特性

4号機のみ運転状態での水中音と全ての風車が停止している状態での水中音の計測結果を比較した結果、3 Hz 以上の周波数帯において風車運転中の水中音圧レベルの上昇が確認された。図5-3は風車4号機から83 m地点のハイドロホンで計測した、風速14 m/sの条件におけるそれぞれの場合の水中音データの周波数特性である。最も音圧レベルの高い周波数は約175 Hz で125 dB re 1  $\mu$ Pa、背景雑音との差は40 dB re 1  $\mu$ Pa 以上であり、その約2倍、3倍、4倍の周波数付近にも比較的大きなピークが現れた。また、175 Hz に次いで背景雑音との差が大きかったのは、約32 Hz で約106 dB re 1  $\mu$ Pa、背景雑音との差は約30 dB re 1  $\mu$ Pa、続いて約60 Hz で約107 dB re 1  $\mu$ Pa、背景雑音との差は約25 dB re 1  $\mu$ Pa であった。また風車の運転時水中音および背景雑音の両方に50 Hz のピークが出現し、これは交流電流の周

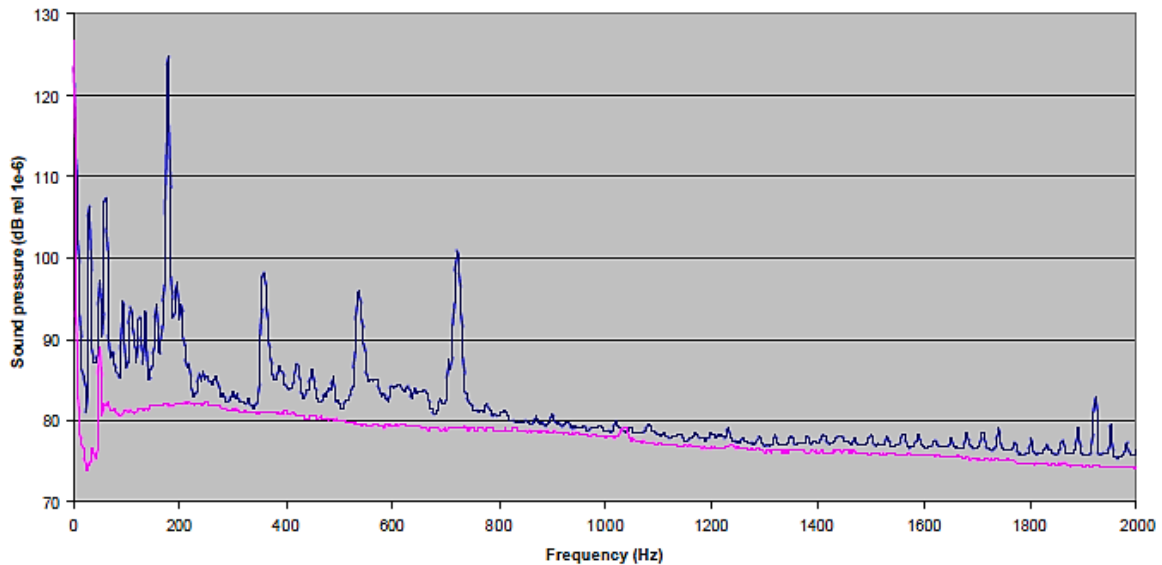


図 5-3 風車全基停止中と 4 号機のみ運転中の水中音の周波数特性の比較 [70]  
(ピンク：停止中，青：4 号機運転中)

波数であると説明している。

## (2) 風車からの騒音発生メカニズム

上記の水中音計測結果を風車タワーの振動計測結果と比較した結果，水中音計測データに見られたほとんどのピーク周波数はタワーの振動計測データでも確認できた。このことから，水中音のピーク周波数はタワー振動に由来していることが分かり，また，タワー振動は主にギアボックスから発生していると述べている。さらに，各周波数の音源について，ギアボックスの各ステージの基本周波数とその高調波であることを示している。

## (3) 周波数ごとの距離減衰の様子

浅海域では水深が一定で減衰影響がなければ円筒拡散のみの影響で距離の増加によって減衰するが，実際には海底面による音の減衰や水深の変化の影響がある。そこでこの報告書では，この調査において設置された 3 つのハイドロホンでの計測結果より，当該海域の実際の減衰特性を推定している。4 号機のみ運転時の各地点のハイドロホンで計測したデータについて，各周波数の音圧レベルの変化を検証した結果，円筒拡散では距離が 2 倍になると音圧レベルが 3 dB re 1  $\mu$ Pa 低下するのに対し，この海域では各周波数の平均で約 4 dB re 1  $\mu$ Pa 低下していることが分かったと述べている。

## (4) 風速による音圧レベルの変化

図 5-4 は風車 4 号機から 83 m 地点のハイドロホンで計測した，各風速条件での風車運転中および停止中の水中音計測データの周波数特性である。この図から，風速が大きいときには水中音の音圧レベルも上昇しているが，同時に背景雑音のレベルも上昇していること，また，風速によって風車の回転速度が変化するため，水中音の卓越周波数も変化していること

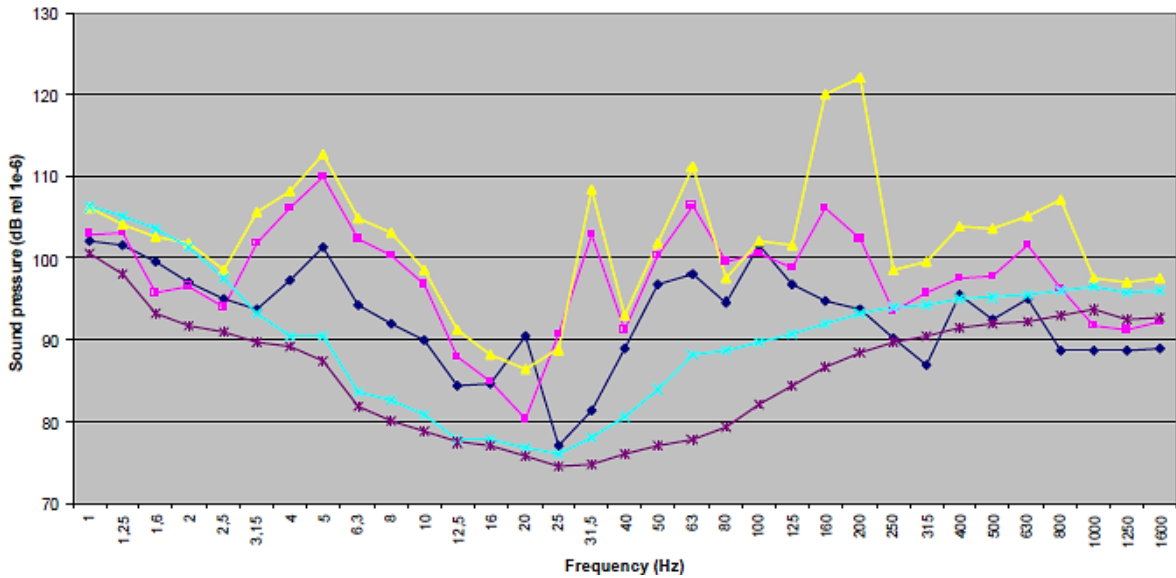


図 5-4 風車運転中および停止中の水中音と風速の関係 [70]

(青：風速 4 m/s・風車運転中，ピンク：風速 8 m/s・風車運転中，黄色：風速 13 m/s・風車運転中，紫：風速 8 m/s・風車停止中，水色：風速 13 m/s・風車停止中)

が明らかになったと述べている。

#### (5) 複数基の風車からの相互干渉と全体の音場への影響

各地点に設置したハイドロホンによる、風車全基の運転状態から 1 基ずつ停止し、全基停止するまでの水中音の変化を検証したところ、4 号機に最も近い地点のハイドロホンでの計測データでは、4 号機の停止によって水中音圧が急激に低下し、その後、1 基ずつ停止するにつれて徐々に音圧も低下して行く様子が確認された。このことから、複数の風車による相互干渉影響が存在すると考えられると述べている。

この報告書では最後に今後の課題として、魚類は音圧よりも水粒子の加速度に敏感なので、計算による予測および計測によってこの加速度の特性を検証したい、また、複数基の風車からの放射音の相互作用についてより詳細に調査したい、さらに、ギアボックス内の音源の隔離やタワーの設計変更による騒音低減方法について検証したいと述べている。

### 5.3. 着床式洋上風力発電施設の運用中および建設中の水中騒音の調査例 [71]

Betke ら [71]は、ドイツ環境省の事業として着床式洋上風力発電施設の運用中および建設中の水中騒音を計測した結果を報告している。図 5-5 は定格出力 1.5 MW の着床式洋上風力発電施設から 110 m の距離に設置したハイドロホン (Reson TC 4032) によって計測された水中音の周波数特性と、アザラシ・アシカ類およびネズミイルカ属の聴覚閾値を示した図である。この図から、風車の出力によって放射される水中音が変化していることが分かり、これは異なる 2 セットの歯車の周波数による変化と推測されている。また、アザラシ・アシカ類およびネズミイルカ属の聴覚特性と比較すると、風車運用中の水中音は「これら生物の聴

覚器官に損傷を与えるレベルではないが、聴覚閾値を越えているため「その行動には何らかの影響を与えるかもしれない」と考察されている。

なお、この研究では運用中の風車タワーの壁面の振動も同時に計測しており、陸上の沿岸部に設置されている 2~2.5 MW の風車タワーの振動が図 5-5 の計測対象とした洋上風車のタワー振動より大きいという結果が得られたため、「これらの大型風車を洋上に設置した場合、図 5-5 より大きな水中音が発生する可能性がある」と考察されている。

さらにこの研究では、風車基礎の杭打ち時に発生する水中騒音の計測も行っており、図 5-6 と図 5-7 はそれぞれ、着床式洋上風力発電施設の建設地から 400 m 離れた地点で計測したパイル打設音の時刻歴および周波数特性を示したものである。また、図 5-8 は各地点で計測された音圧レベルの距離による減衰の様子を示したものであり、これは球面拡散（距離が 2 倍になると 6 dB re 1  $\mu$ Pa 減衰）と円筒拡散（距離が 2 倍になると 3 dB re 1  $\mu$ Pa 減衰）の中間に位置し、距離が 2 倍になると 4.5 dB re 1  $\mu$ Pa 減衰していると推測されている [71]。

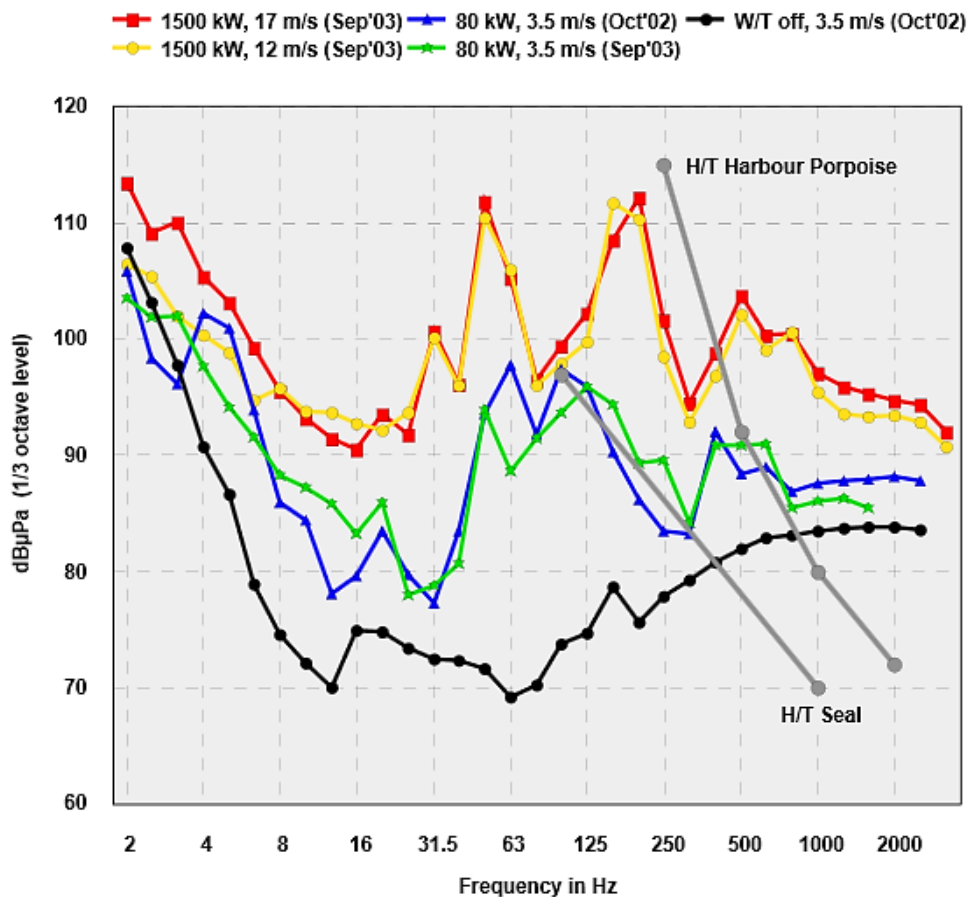


図 5-5 風車の出力・風速別に計測した水中音の周波数特性とアザラシ・アシカ類およびネズミイルカ属の聴覚閾値 [71]

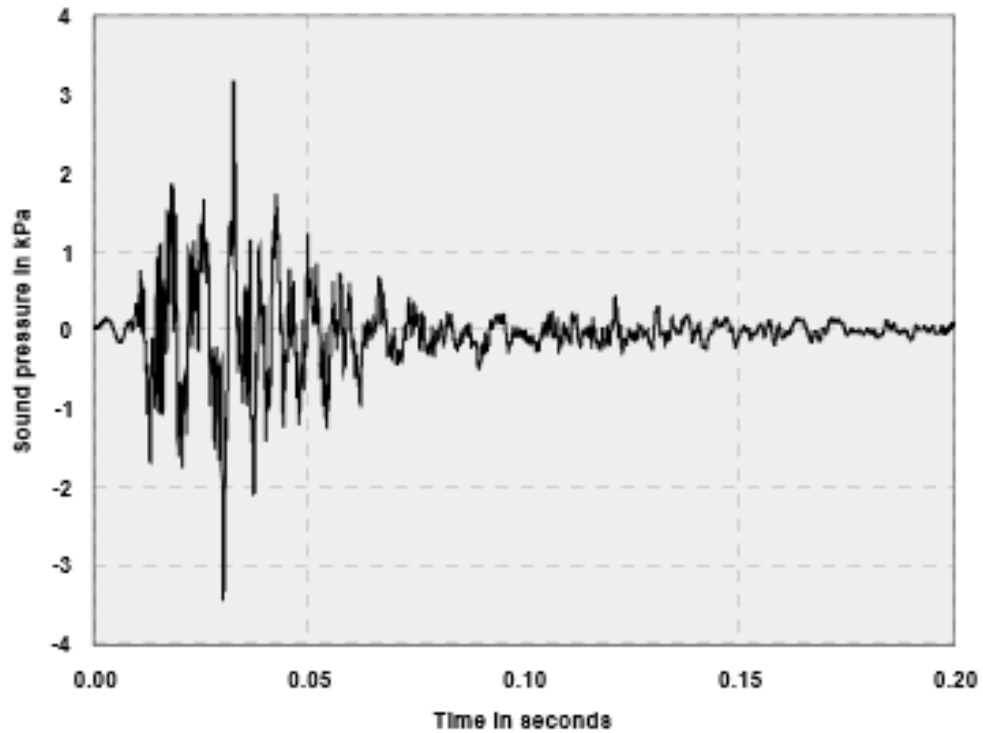


図 5-6 着床式洋上風力発電施設の建設地から 400 m 離れた地点で計測したパイル打設音の時刻歴特性 [71]

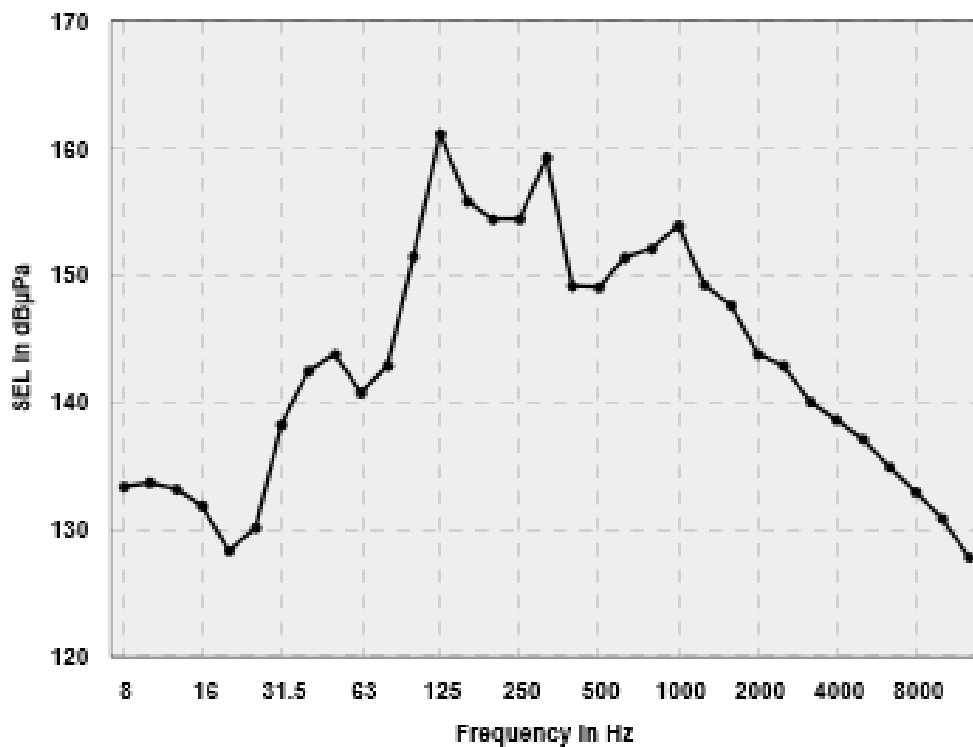


図 5-7 着床式洋上風力発電施設の建設地から 400 m 離れた地点で計測したパイル打設音の周波数特性 (300 打の平均) [71]

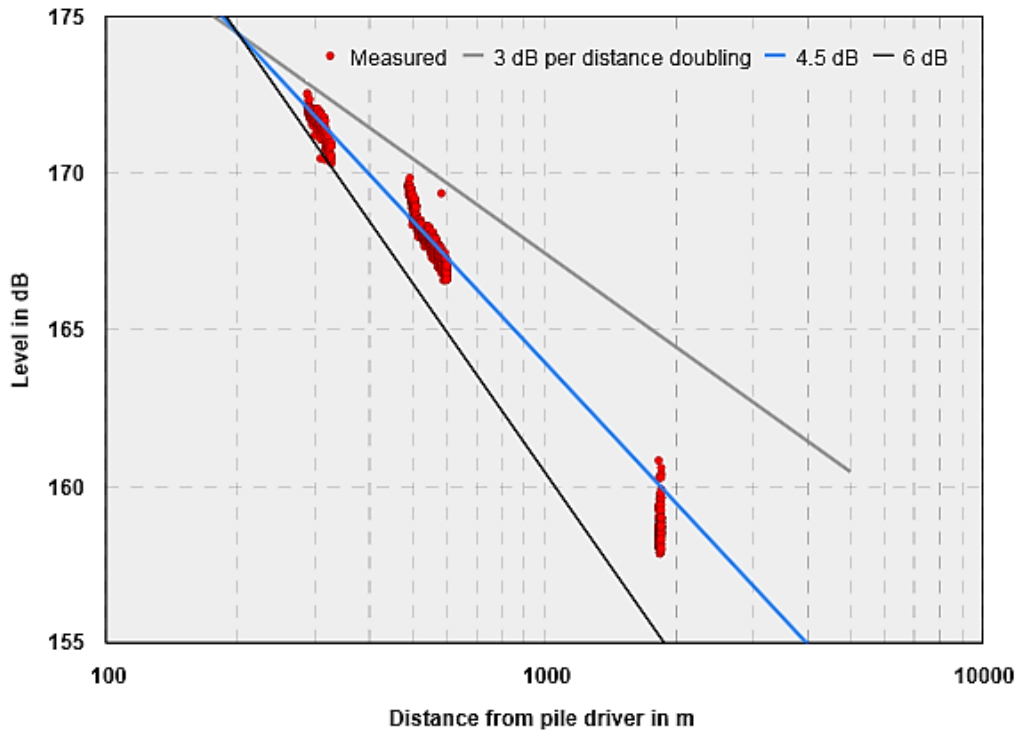


図 5-8 計測された水中音の音圧レベルの距離減衰 [71]

#### 5.4. 着床式洋上ウインドファーム建設中の水中騒音調査結果とその海産哺乳類への影響の推定 [72]

Bailey ら [72]は、英国の風車基礎の杭打ちによる水中騒音の調査を実施し、調査結果を海産哺乳類の聴覚特性と比較することでその影響を評価している。図 5-9 および図 5-10 はそれぞれ、風車基礎の杭打ち中にハイドロホン (Brüel and Kjaer, 8104, 8105) で計測した水中音の時刻歴および周波数特性である。図 5-11(a)は計測された水中音の音圧レベルの距離減衰の様子を示しており、減衰曲線は以下のように推定されている。

$$\text{SPL}(r) = 250 - 20 \log r - 0.0004 r \quad \dots(5-1)$$

ただし、 $\text{SPL}(r)$ は音源からの距離  $r$ [m]における音圧レベル[dB re 1 $\mu$ Pa]である。

ところで、打設は20分間の“Soft start”期間を設けており、1打あたり63 kJから開始し、徐々に増加して200～400 kJになったと報告されている。この“Soft start”期間中のそれぞれの打設音について、推定された減衰曲線を用いて音源音圧レベルを推定した結果と打設エネルギーの関係を示したのが図 5-11 (b)である。この図より、音源音圧レベルと打設エネルギーは正比例の関係にあることが分かった。

さらにこの研究では、これらの推定結果を基に海産哺乳類への影響を評価している。海産哺乳類への影響としては、重大なものから順に、(1)聴覚の損傷または永久的な聴覚閾値の変化 (PTS: Permanent Threshold Shift), (2)一時的な聴覚閾値の変化 (TTS: Temporary Threshold Shift), (3)行動阻害, (4)可聴, となっており、今回の打設音の音源および距離減

衰の推定結果から、クジラやイルカなどの鯨類では音源から 5 m、アザラシやオットセイなどのひれ足類では 20 m 以内に接近すると PTS が発症すると考えられ、TTS はそれぞれ 10 m と 40 m 以内で発症すると考えられる。また、強い拒否行動を起こすのはネズミイルカ類で 20 km 以内、ひれ足類で 14 km 以内、バンドウイルカは 50 km 以内、ミンククジラは 40 km 以内と推定される。可聴範囲はこれら全種について最も敏感な 10 kHz の音であれば、音源から 70 km 離れて背景雑音に紛れるまで認知可能であると推定されている。

“Soft start” は開発者の環境保護計画のキーとなる手法であり、この研究を通して、“Soft start” によって水中音レベルが徐々に上昇していることを示すことに成功した。この手法によって海棲生物にとって有害なレベルになる前に警告を出し、これら生物が泳ぎ去ることができると考えられるが、これを検証した例はこれまでにないとのことである。さらなる環境影響低減策としてバブルカーテンの導入があるが、この研究対象海域は水深が大きく設置が困難であったと述べている。また、海棲生物の聴覚や行動に関する情報はまだ十分にはなく、これらの情報の充実により水中騒音についての理解も深まると述べている。

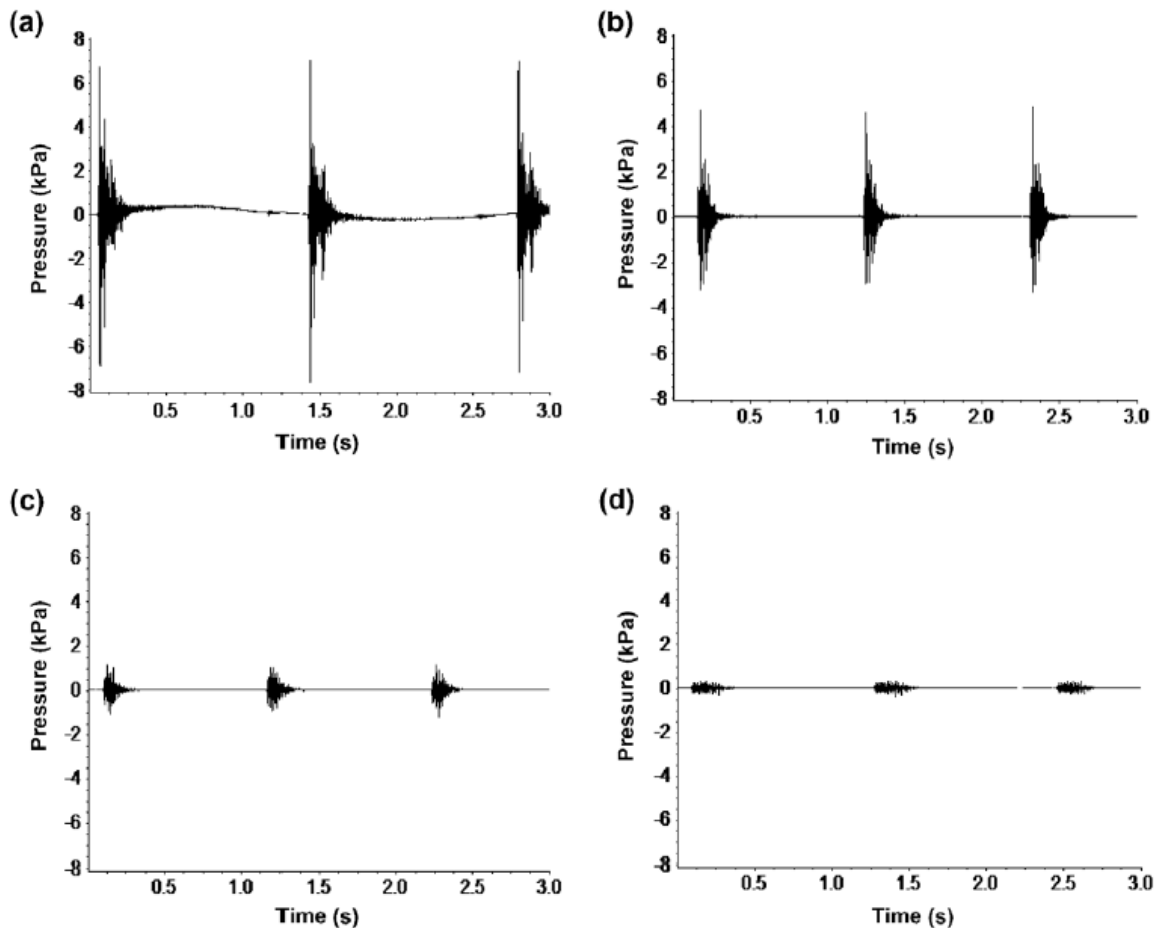


図 5-9 着床式洋上風力発電施設の建設地から(a)100 m, (b)710 m, (c)1520 m, (d)4550 m 離れた地点で計測したパイル打設音の時刻歴特性 [72]

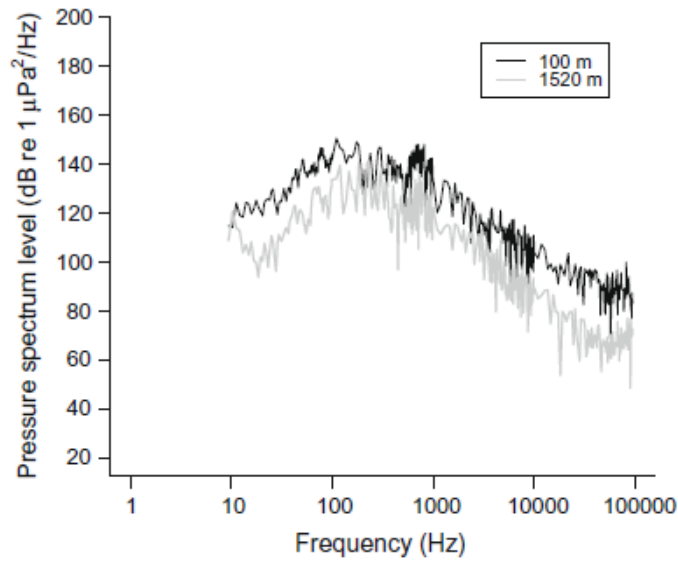


図 5-10 着床式洋上風力発電施設の建設地から 100 m および 1520 m 離れた地点で計測した水中音の周波数特性 (3 秒間のデータより) [72]

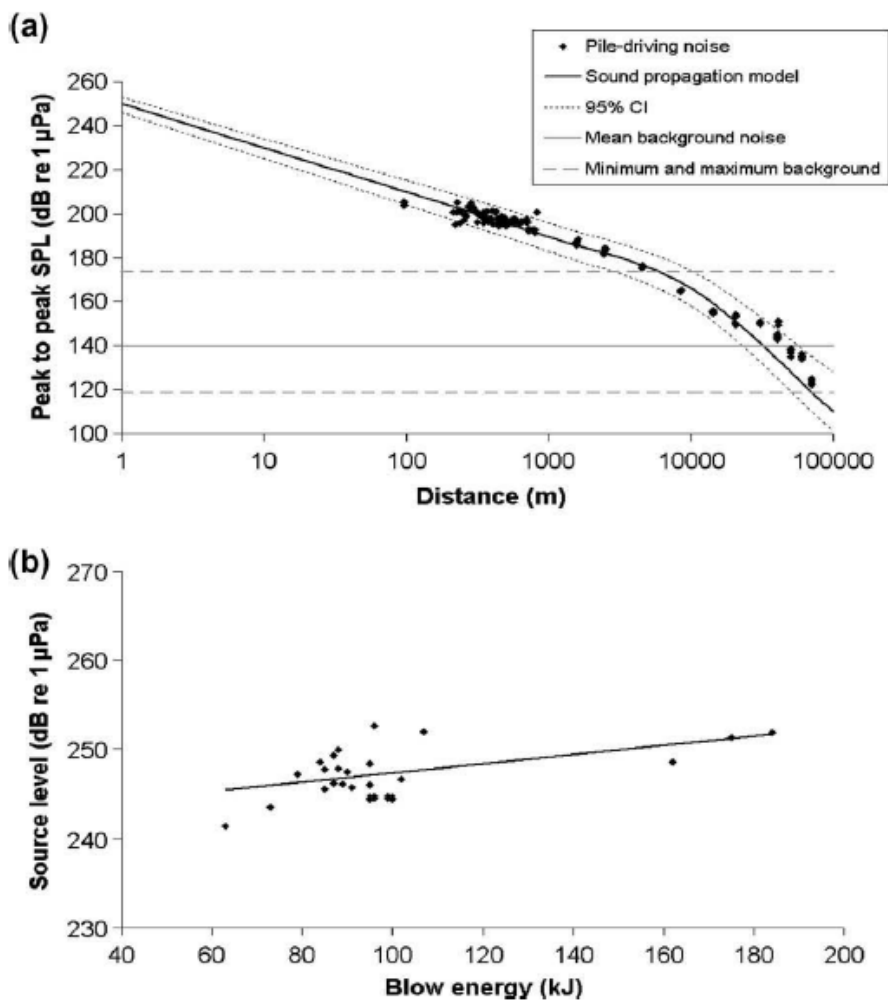


図 5-11 (a)計測された水中音の音圧レベルの距離減衰と(b)推定音源音圧レベルと打設エネルギーの関係 [72]



## 5.5. 浮体式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測 [73]

第1章でも述べたように、環境省は長崎県五島市杵島沖において浮体式洋上風力発電実証事業を実施しており、2013年度からフルスケールの実証機（2.0 MW 風車搭載のハイブリッドスパーク型浮体式洋上風力発電施設）を使った実海域実験を実施中である。この実証機周辺海域への水中放射音の伝搬状況把握のため、環境省委託業務の一部として、実証機の浮体振動および周辺海域の水中音観測が実施された。

### (1) 観測日時と風速

- ・観測日時：2014年2月21日～22日
  - ・風速：5.1～5.4 m/s（2月21日）、1.8～2.3 m/s（2月22日）
- ※風速はナセル風速計による平均値

### (2) 観測方法

実証機からの水中放射音の調査は、実証機の東西南北の各方向に、実証機からの距離を変えて、各地点で風車稼働時と非稼働時のそれぞれにおいて5分間水中音を計測した。ただし、2月22日に実施した南北ラインの計測は、風速が低かったため、風車稼働時の水中音は計測できなかった。

振動計測は、予め実証機浮体内部に設置した加速度計により計測し、水中音の観測と同時に記録した。加速度計は浮体鋼製部内壁に4台設置した。設置位置は4台全てについて喫水面から15 mであり、同一円周上に90度ごとに1台ずつ配置されている。

### (3) 観測結果

風車稼働時および非稼働時の時間別・周波数別の音圧スペクトルから、以下の特徴が確認された。

#### <風車稼働時>

- ・30 Hz 付近に基本周波数を持つ2種類の高調波が発生し、風車の回転に伴い周波数が変化している。
- ・基本周波数60Hzの高調波が発生し、第2高調波（120 Hz）の音圧が最も高い。

#### <非稼働時>

- ・基本周波数120Hzの高調波が発生し、基本周波数（120Hz）の音圧が最も高い。

また、水中音と浮体振動の同時測定結果から、稼働時・非稼働時の差を見ると、水中音と浮体振動は同様の傾向を示している。また、浮体振動に現れている線スペクトルは、60Hz間隔と120Hz間隔の水中音に対応している。これらから、浮体振動が水中音の発生源になっていることが分かった。

## 5.6. 着床式洋上ウィンドファームからの水中放射音の魚類への影響の推定 [74][75][76][77]

Kikuchi [74]は洋上ウィンドファームの建設準備中、建設中、運用中の水中放射音に関するデータおよび魚類の聴覚特性に関するデータを整理し、これら水中音が魚類の聴覚器官や行動に影響を及ぼす範囲について考察を行っている。

この研究ではまず、運用中に発生する水中音の音源および伝搬経路について、ロータの回転による風切り音やナセル内の機器の振動の一部が空中に放射され、これらの音が水中に入射するルートや、ナセルからの振動がタワーと基礎を介して海底から海水中に放射されるルート、ナセルからの振動がタワーの下部から水中に伝搬するルートが考えられることを紹介し、この中で最後のルートの影響が最も大きいと紹介している。また、魚類の水中音に対する反応について、聴覚閾値、TTS、PTS について説明し、魚類が TTS を発症する音圧レベルが哺乳類や鳥類と比べて低いことを示すとともに、魚類の聴覚に損傷を与えた実験結果や魚類の音からの逃避行動に関する調査結果、および音による魚類の血中ストレス物質の変化に関する実験結果を紹介している。

これらを踏まえた上で、海洋の背景雑音、建設前および建設中の水中騒音、運用中の水中騒音、魚類の聴覚に関するデータを紹介し、音源からの距離による魚類への影響を上述の Bailey ら [72]と同様に可聴範囲、行動に影響がある範囲、TTS の発症する範囲、PTS の発症する範囲の 4 つのカテゴリーに分類できることを述べている。また、TTS や PTS は建設中の施設に接近した場合に発生し得ることや、運用中の騒音でも聴覚に優れた魚類であれば 4 km 以内、通常の聴覚を持つ魚類でも 1 km 程度以内で聴覚閾値を越え、魚類の行動またはストレスに影響する可能性があるとして述べている。

最後に結論として、洋上ウィンドファームの運用中の水中音の調査例は未だ少なく、また、水中音の魚類への影響については海産哺乳類に比べて、これまでほとんど注目されてこなかったが、この研究で示すように洋上ウィンドファームからの水中放射音は魚類にも影響を及ぼす可能性があることを主張するとともに、洋上ウィンドファームを水中騒音のデータベースに含めることで EU は首尾一貫した効率の良い環境政策の枠組みを維持できると助言している。

また、Wahlberg ら [75]も同様に、風車運用中の水中騒音と魚類の聴覚特性についてレビューし、その影響の推定を行っている。

Gill ら [76]も風力発電施設の建設中および運用中の魚類等の沿岸域生物の、騒音、電磁場、衝突等の直接的影響および食物連鎖の変化や再生産への影響等の間接的影響についてレビューを行い、その影響低減法について検討している。

Thomsen ら [77]はマコガレイ (Dab)、タイセイヨウサケ (Atlantic Salmon)、タイセイヨウタラ (Atlantic Cod)、タイセイヨウニシン (Atlantic Herring)、タイヘイヨウニシン (Pacific Herring) の聴覚閾値を文献により調査し、図 5-12 のようにまとめた上で、洋上風力発電の建設中および運用中の水中音に関する文献調査結果を示し、それぞれの音に対する各魚種の反応や身体的損傷の発生の有無を、風力発電施設からの距離に関連付けて考察している。(海産哺乳類についても同様の調査を行っている。)

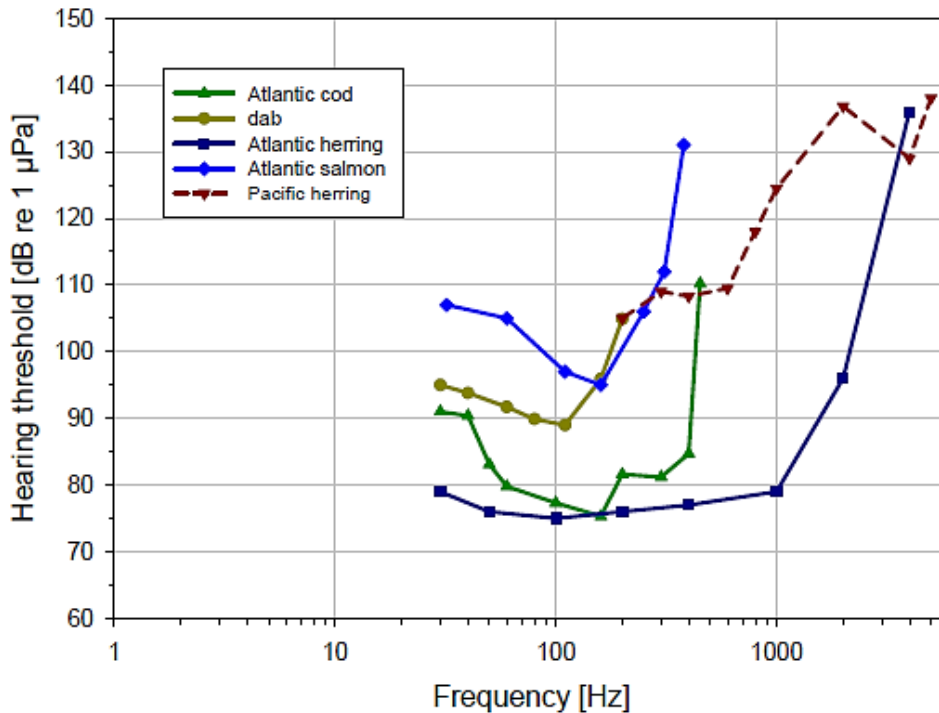


図 5-12 各魚種の周波数別聴覚閾値 [77]

### 5.7. 洋上風力発電の海産哺乳類への影響調査例 [78] [79] [80]

ここまで紹介した文献は、洋上風力発電の建設中または運用中に発せられる水中音の調査結果と、海棲生物の聴覚特性に関する文献調査結果を基に、これらの水中音が海棲生物に影響を与えるかどうかを推定したものがほとんどであり、実際に生物の行動等を調査したものではなかった。以下では、実際に施設を建設する前後で生物の数等を観測した結果を紹介する。ただし、これらは施設の建設や運用による変化を示すことにはなるが、その原因が水中音とは言い切れないことに注意が必要である。

Teilmann ら [78]は、世界初の大規模洋上ウィンドファーム、バルト海の Nysted Offshore Wind Farm (2.3 MW 風車 72 基) において、その建設前から建設中、運用中にかけて 10 年以上に渡るネズミイルカ属への影響の調査を行った。ファーム内およびファームから 10 km 東に離れた対照エリアで、ネズミイルカ属のエコーロケーション活動をモニタリングしたところ、ウィンドファーム内ではその建設前と比べてネズミイルカ属のエコーロケーション活動がはっきりと減少しており、現在も完全には回復していないことが分かった。この回復について Teilmann ら [78]は、ネズミイルカ属の慣れまたは、漁獲量の減少や人工漁礁効果による環境の富化によるものと考えられると述べている。

また、Thompson ら [79]はスコットランドの北東部における 5 MW の洋上風力発電施設 2 基の建設中において、クジラ類が基礎の杭打ちによる騒音に反応を示すかどうか、音響モニタリングによって調査した。その結果、長期的には劇的な変化はなかったが、建設地から 1~2 km の範囲でネズミイルカが短期的な擾乱反応を示したことが報告されている。

さらに、Skeate ら [80]は洋上ウィンドファームの建設によるアザラシおよびハイイロアザラシへの影響を調査している。その結果、建設前の 2002 年および 2003 年に比べると、建

設中の 2004 年は、餌の捕獲等のために一時的に上陸するアザラシの数がかなり減少し、建設後の 2005 年および 2006 年の調査結果では回復しつつあるが元の水準には達していない。一方、ハイイロアザラシについて同様に調査した結果、上記の結果とは逆に 2004 年の建設中に増加し、建設後もその数を維持している。この結果から、ウインドファームの建設によってこれら 2 種の間には何らかの相互作用が働いたと考えられる。しかし、ハイイロアザラシがより広い範囲で増殖し続けていることを考えると、ウインドファームの建設に関係なく増加した可能性もあり、今回得られた限られたデータだけでは、これらの変化の要因がウインドファームの建設かどうかを断定することはできないと述べている。

#### 5.8. 洋上風力発電の魚類への影響調査例 [64] [81] [82]

魚類についても海産哺乳類と同様、ここまでで紹介したように、水中音の調査結果と魚類の聴覚特性の文献を照らし合わせて反応の有無を推定したものが多く、実際に施設の建設による魚類への影響を調査した例は少ないが、以下の様なものが存在する。

Nedwell ら [64]は杭打ち工事中に発生する水中騒音に対する魚類への影響を評価するため、杭打ち地点からの距離を変えて、籠に入れたトラウトサーモンの反応や行動を観察した。この工事では、径の異なる複数本のパイルを、“impact piling” と呼ばれる衝撃による杭打ち方法と、“vibro piling” と呼ばれる振動による杭打ち方法の 2 種類の方法で設置した。観察の結果、トラウトサーモンはいずれのパイル径のどちらの方法による打設中においても、驚いた反応や活動レベルの変化もなく、身体的な損傷も生じなかったと報告されている。

Perrow ら [81]は、コアジサシ（日本環境省でもレッドリストの危急種として指定されている鳥類）の餌となる魚類に対する洋上風力発電の影響を調査した。表面のトロール漁法による魚類の量の調査を洋上風力発電施設 30 基の建設前と建設後に実施した結果、建設前の 2002 年および 2003 年に比べて、施設が建設された 2004 年以降、ニシンの量がかかなり少なくなっていることが確認された。これは冬季の産卵期におけるモノパイル基礎の打設が原因ではないかと考えられている。餌となるニシンの減少によって、コアジサシの餌の取得率も低下していることが確認されている。

Hvidt ら [82]は Horns Rev Offshore Wind Farm において、水中音響モニタリングによる魚群の探知を行い、ウインドファームの存在による影響を調査した。その結果、風車の基礎付近とその対象海域の間で、統計的には差が認められなかったと報告されている。

#### 5.9. 騒音による魚類のストレス反応や聴覚への影響の実験例 [83]

Scholik ら [84]は、ファットヘッドミノー（コイ科の淡水魚）の聴覚に対する水中雑音の影響を調査した。ファットヘッドミノーを 0.3~4.0 kHz のホワイトノイズ (142 dB re 1 $\mu$ Pa) に暴露し、聴覚脳幹反応プロトコルを用いて計測したオーディオグラムを、雑音に暴露していないファットヘッドミノーのオーディオグラムと比較した結果、計測した 8 つの周波数のうち 5 つの周波数の聴覚閾値がかかなり高くなっていたことが分かった。また、その回復は、雑音への暴露期間や周波数によって異なることが分かったと報告されている。

Hastings ら [85]はアストロノータス（スズキ目の魚類）の聴覚器官に対する低周波音の

影響を実験調査した。周波数を 60 Hz または 300 Hz の 2 種類, 負荷サイクルを 20 % または連続の 2 種類, 音圧レベルを 100, 140, 180 dB re 1 $\mu$ Pa の 3 種類, 暴露期間を 1 日または 4 日で行った結果, 300 Hz, 180 dB re 1 $\mu$ Pa の連続音に 4 日間暴露された魚類にのみ, 聴覚器官に小さな損傷が確認されたと報告されている。

Smith ら [83] は, 背景雑音を大きくすることによる金魚のストレスと聴覚に対する短期および長期影響を実験評価した。110~125 dB re 1 $\mu$ Pa と, 160~170 dB re 1 $\mu$ Pa の 2 種類の雑音に金魚を暴露し, 血しょうコルチゾールとグルコース濃度を計測することで身体的ストレスを検証, 聴覚脳幹反応を使って聴覚能力を検証した。その結果, 長期的には身体的ストレスへの影響は現れなかったが, 短期的には血しょうコルチゾール濃度の上昇が確認された。聴覚能力への影響は, 10 分間の雑音への暴露によって聴覚閾値の変化が起こり, 24 時間まではほぼ比例して聴覚閾値の変化が起こり, 最大で約 28 dB re 1 $\mu$ Pa 上昇した。それ以上長時間の暴露では聴覚閾値の変化は増加せず, 聴覚損失は 24 時間以内に最大値に漸近することが分かった。また, 21 日間雑音に暴露した金魚でも 14 日間の回復期間によって元の聴覚閾値まで回復したと報告されている。

## 5. 10. レビュー結果のまとめ

本章では, 洋上風力発電施設の環境影響のうち, 施設からの水中放射音とその生物影響に焦点を絞り, 先行研究・調査事例を整理した。その結果, 施設からの水中放射音の調査や生物の水中音に対する反応を調査した例はいくつかあるものの, 両者を別々に調査したものが多く, つまり, 施設放射音の調査結果を生物の聴覚特性に関する文献と照らし合わせて, 聴覚可能かどうか, または聴覚に損傷が起こるかどうかを推測したものが多く, 生物実験を行う際に施設放射音の周波数特性や音圧レベルの調査結果を踏まえて実施している例はほとんどない。

また, 洋上風力発電施設の設置海域において, 施設設置前後の生物の様子を観測した例もあるが, その変化が施設からの水中音によるものであるかどうかは明確になっていない。特に海外では海産哺乳類への影響が重視されており, 魚類への影響に関する調査例が少ないが, 我が国では漁業権が強く, このような海洋開発を行う場合, 漁業関係者との調整が非常に重要となる。

以上の結果を踏まえ, 本研究では, 第 6 章において国内の洋上風力発電施設について運用中および建設時の水中音観測を行い, 施設からの水中放射音の周波数特性および音圧レベルを明らかにし, 第 7 章において, この調査結果を参考にしつつ, 施設運用中を想定して設定した水中音に魚類を連続的に暴露して摂餌行動や成長への影響を評価する実験を行うことで, 施設放射音の魚類への慢性影響の評価手法を提案する。



## 6. 洋上風力発電施設周辺での水中音観測

本章では、国内の着床式および浮体式洋上風力発電施設について、運用時や建設時に発生する水中放射音を観測した結果を紹介する。

### 6.1. 着床式洋上風力発電施設の供用時における水中音観測

ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所（茨城県神栖市南浜地先，図 6-1）の 1 号機デッキ上にて水中音と空中音の同時計測を実施した。詳細を以下に示す。

#### 6.1.1. 観測日時と気象条件

- ・観測日時：平成 23 年 9 月 27 日 15:10～16:00
- ・気象条件：晴れ，気温 20 °C，風向 北北東（1 号機のログより），平均風速 10.4 m/sec，うねり波高約 3～4 m（目視）

#### 6.1.2. 主な観測機器

- ・ハイドロホン（オキシテック，OST2130）：1 台
- ・ハイドロホン用アンプ（オキシテック，OST4300）：1 台
- ・騒音計（RION，NL-15）：1 台
- ・リニア PCM レコーダー（SONY，PCM-M10）：1 台



図 6-1 観測の対象としたウィンド・パワーかみす洋上風力発電所（茨城県神栖市南浜地先）

#### 6.1.3. 観測方法

ハイドロホンを水深約 3 m に，騒音計をデッキ床上約 1.5 m（水面から約 10 m）にそれぞれ設置した（図 6-2）。風車の運転中および停止中における放射音を連続観測し，さらにタワー内の空中音も観測した。水中音および空中音のデータ記録条件はサンプリング周波数 48 kHz，16 bit とし，水中音はハイドロホンからアンプを介して，空中音は騒音計から直接リ

ニア PCM レコーダーに録音した。水中音観測については、ハイドロホンの波浪による揺れを低減するため、ハイドロホンを錘付きロープに固定した(図 6-3)。現場の水深が 3 m~5 m 程度のため、ハイドロホンが水深約 3 m に設置できるように水中に降下した。

水中音および空中音(タワー外)の計測は風車の回転中から開始し、約 10 分後に風車の停止に入り、完全に停止した時点から約 5 分後に再起動させた。再起動後、定格速度まで戻った時点からさらに約 3 分後に計測を終了した。この一連の変化を連続記録した。その計測時間のイメージを図 6-4 に示す。一方、風車タワー内の空中音計測は、これらの計測終了後に約 5 分間計測した。

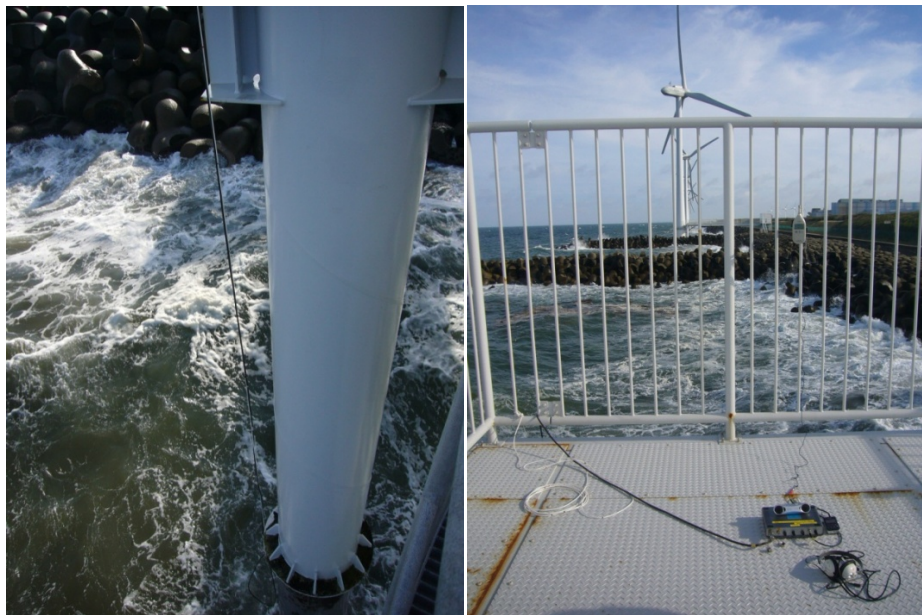


図 6-2 水中音観測の様子(右図のハイドロホンケーブルの先が左図の風車基礎付近)

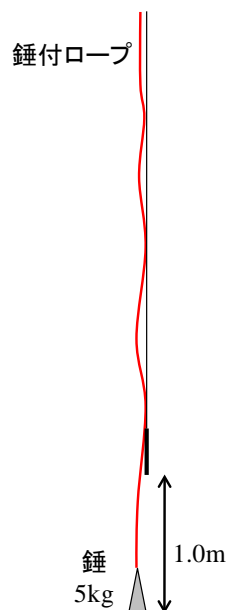


図 6-3 ハイドロホンの固定方法



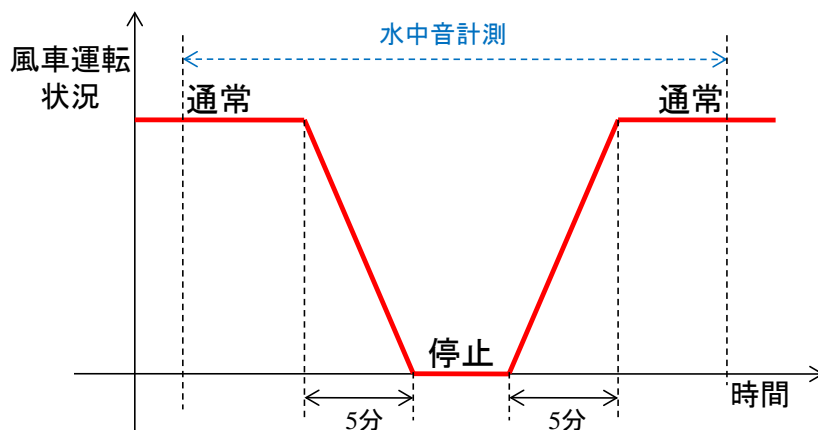


図 6-4 風車の運転状況と水中音計測時間のイメージ

#### 6.1.4. データ解析方法

上記の観測において記録した水中音および空中音のデータについてスペクトル解析を行った。観測データには砕波音が混入するなどしており定常音ではないため、ここでは 30 秒間のデータの平均スペクトルを算出した。1 度にフーリエ変換するデータ数は  $65,536 (= 2^{16})$  個 (約 1.365 秒間) であり、これを 1 秒ごとに解析して 30 秒間の平均とした (つまり 0.365 秒間ずつ重複して解析している)。周波数分解能は約  $0.732\text{Hz} (= 48,000/65,536)$  である。なお、低周波音に着目しているため、2 kHz 未満を解析対象とした。

風車回転中のタワー内空中音、風車の回転中および停止中における水中音、空中音のスペクトル解析結果を次項に示す。

#### 6.1.5. 解析結果

風車回転中のタワー内の空中音データ解析結果から 8, 30, 100, 150 Hz 付近にピーク周波数が確認された (図 6-5)。また、風車回転中および停止中の水中音データ解析結果を比較すると、風車回転中は全体的にレベルが高く、風車停止中の水中音には含まれていない、30, 80, 145 Hz 付近の 3 つのピーク周波数が現れており (図 6-6)、30 および 145 Hz については、上述の通りタワー内空中音にも近い周波数のピークが含まれている。これらのピークは風車停止後に再起動したあとも、再び同じ周波数に出現した (図 6-7)。なお、これらの水中音観測データは、砕波音が大きい場合には全体の音圧レベルが上がることでピーク周波数の音圧レベルを超えてしまい、これらのピークが見えなくなることが分かった (図 6-8)。風車停止中には東日本の電源周波数である 50 Hz のピークが確認できたが、ほかに目立ったピークは確認されなかった。この周波数は風車内の電気設備から発生していると考えられるため、風車の回転中および停止中のいずれにおいても発生していると考えられるが、風車回転中には低周波域全体の音圧レベルが上昇したため、このピークがはっきりと確認できなかったと推測される。

一方、タワー外における空中音観測データの解析結果を見ると、防風スクリーンを装着しない状態での空中音データからは明確なピークは確認できなかったが、防風スクリーン装着

後のデータでは約 380 Hz のピークが出現した (図 6-9)。ただし、この周波数の音源は特定できていない。

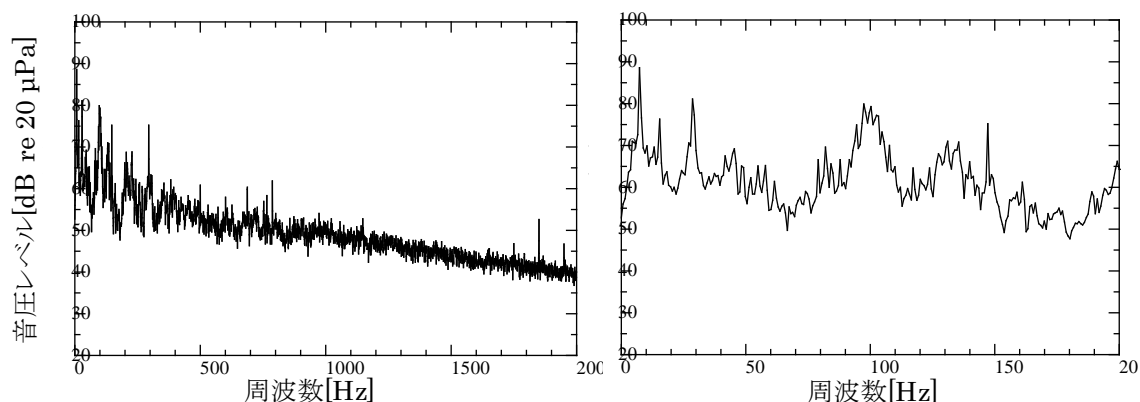


図 6-5 風車回転中のタワー内空中音の解析結果  
(音圧レベルの基準値は 20  $\mu$  Pa, 右図は左図の横軸拡大)

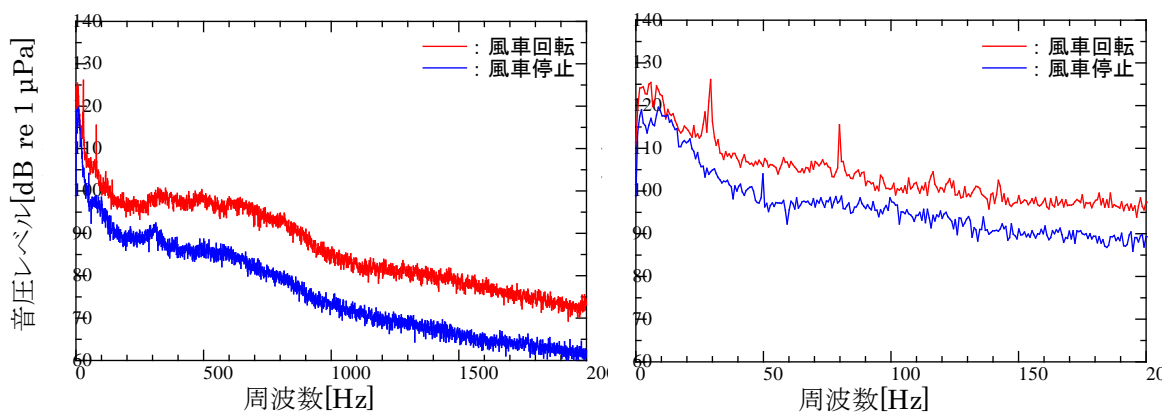


図 6-6 風車回転中および停止中の水中音の解析結果の比較  
(音圧レベルの基準値は 1  $\mu$  Pa, 右図は左図の横軸拡大)

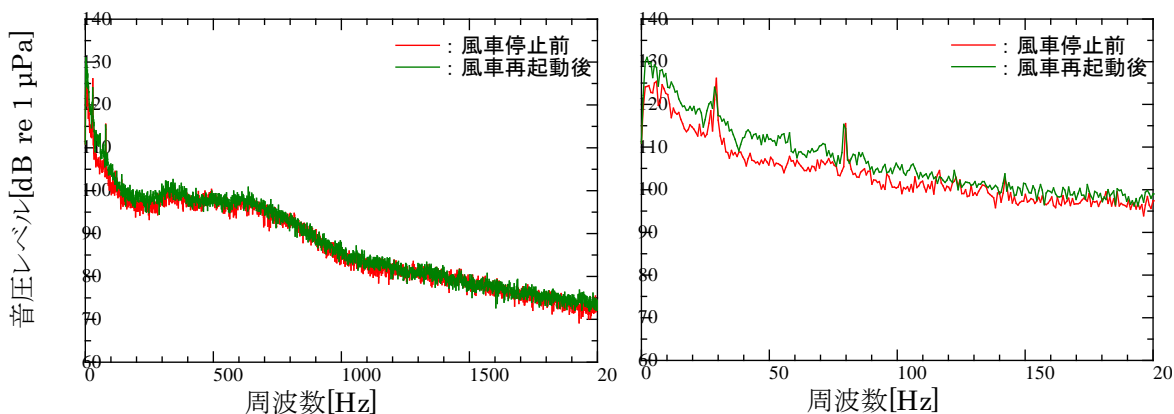


図 6-7 風車停止前および再起動後の水中音の解析結果の比較  
(音圧レベルの基準値は 1  $\mu$  Pa, 右図は左図の横軸拡大)

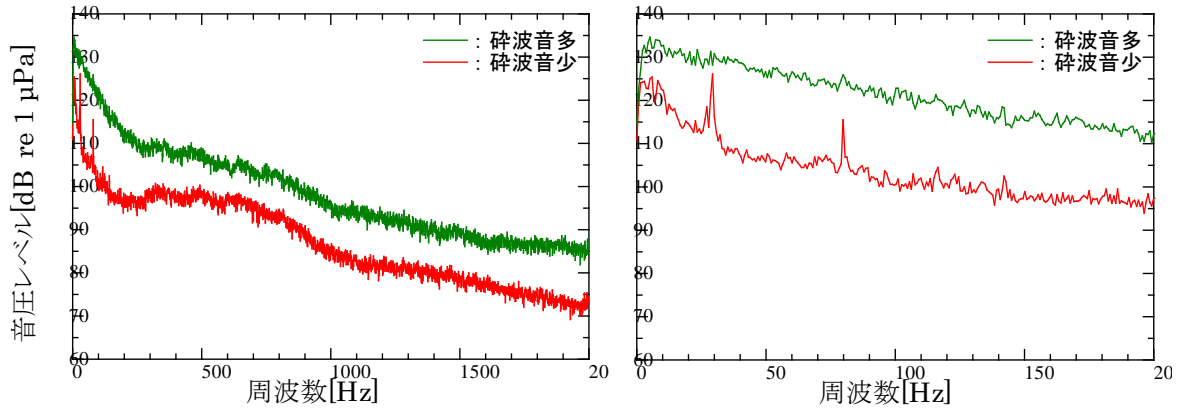


図 6-8 風車回転中の水中音に対する碎波音の影響の比較  
(音圧レベルの基準値は  $1 \mu\text{Pa}$ , 右図は左図の横軸拡大)

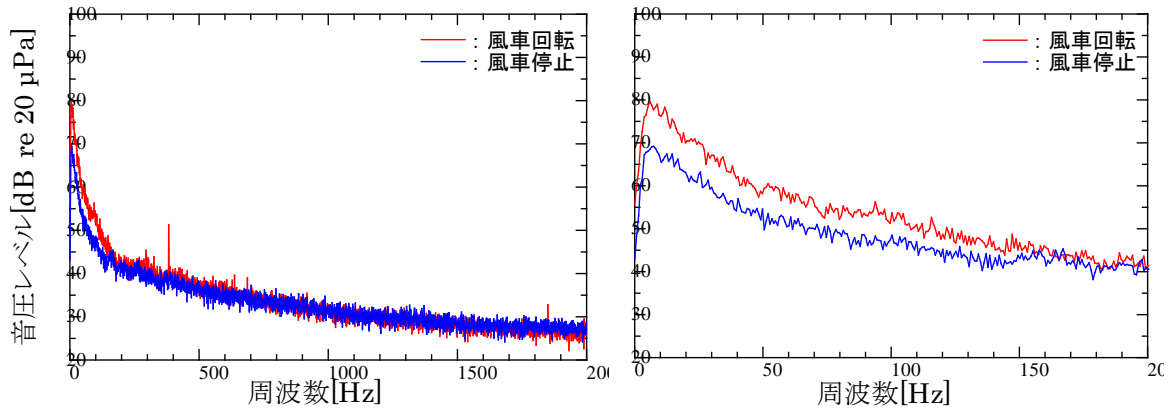


図 6-9 風車回転中および停止中のタワー外空中音の解析結果の比較  
(音圧レベルの基準値は  $20 \mu\text{Pa}$ , 右図は左図の横軸拡大)

また、これらの空中音および水中音のパワースペクトルの時間変化を図 6-10 から図 6-13 に示す。図 6-10 および図 6-11 より、上記で議論してきた周波数の音は、瞬間的に発生したのではなく、安定して発生し続けていることが分かる。このことから、これらの音源は碎波音のような一次的なものではなく、風車内で連続的に発生している機械音のようなものであることが推測される。さらに、図 6-12 から、風車停止中は常にこれらの周波数の連続音が消えていることが確認でき、図 6-13 からは、風車タワー外の空中にこれらの音がほとんど漏れていないことが確認できる。

#### 6.1.6. 観測結果の考察

これらの解析結果から、風車回転中は停止中と比べて施設周辺の水中音の音圧レベルが高く、タワー外の空中音観測データでは低周波域の音圧レベルだけが高いことが分かった。それぞれのデータについて周波数に着目してみると、水中音については  $30 \text{ Hz}$  と  $145 \text{ Hz}$  付近にピークがあるという点でタワー内空中音と共通しているが、タワー外空中音には共通の周波数にピークは確認できない。この結果から、タワー内に存在するピーク周波数の音は、タ

ワーの外部には伝わりにくく、タワー内から基礎を介して水中に伝搬する可能性が高いことが予想される。これは前章の調査結果 [63] [70]でも示されているように、風力発電施設からの水中放射音の伝搬経路は空中からの寄与度が低く、構造物を介して水中に伝搬する経路が主であることを裏付けるデータである。

共通ピークが現れた周波数について風車メーカーに問い合わせたところ、30 Hz は発電機の定格速度、140~150 Hz は冷却ファンの回転速度に対応していることが分かった。Ingemansson Technology AB の調査結果 [70]においても、約 32 Hz のピークが出現しており、この音源をギアボックスからの発生音と推定している。しかし、水中音観測データについて砕波音の影響を検証したところ、砕波音が大きいときにはこれらの共通周波数のピークは砕波音に隠れてしまうことが分かり、風車からの水中放射音の大きさは砕波音と比べて小さく、その影響は限定的であることが予想される。

これらの結果は、風車運転中の水中音は周波数および音圧レベルが低いという Nedwell ら [63]の調査結果と一致する。また、Ingemansson Technology AB の報告書 [70]や Betke ら [71]の報告においても、風車の運転によって音圧レベルが上昇するのは低周波域が主であり、音圧レベルもさほど大きくないことが分かる (図 5-3 および図 5-5)。なお、これら 2 つの報告は観測対象の風車の定格出力が 1.5 MW であり、かつ、水中音計測点の風車からの距離がそれぞれ 83 m と 110 m であるために、本研究の観測条件 (定格出力 2 MW, 風車基礎の直近で計測) と比べてやや低い音圧レベルが計測されていると考えられる。例えば 30 Hz 付近の周波数の音圧レベルは本研究では約 125 dB であるのに対し、Ingemansson Technology AB の報告書 [70]では 32 Hz が約 106 dB, Betke ら [71]の報告では 31.5 Hz が約 100 dB となっている。ただし、背景雑音との差を比較すると、それぞれ約 20 dB, 約 30 dB, 約 26 dB となっており、本研究での観測結果が最も背景雑音との差が小さいことになる。

さらに、浮体式施設の運用時 [73]と比べても観測結果に類似性が確認でき、風車運転中にのみ 30 Hz 付近にピークが現れている点で共通している。これらのことから、着床式か浮体式かに関わらず、風車の運転中に 30 Hz 前後の周波数の水中音が発生していたことが分かる。

そのほか、一般的に風車の騒音源として着目される周波数は、風車回転数、タワーとブレードとの空力的干渉から発生するブレード周波数 (風車回転数×翼数) である。本章の観測対象とした風車の諸元 [86]より、前者は 0.18~0.33 Hz 程度、後者は 0.56~0.98 Hz 程度である。しかしハイドロホンの特性上、20 Hz 未満の周波数は計測できないため、本観測ではこれらの周波数を確認できなかった。また、風車の風切り音なども一般的に風車からの騒音源として考えられているが、その周波数等は明確になっていない。このような周波数不明音については、水中音への影響を直接評価することはできないが、上述の通り、タワー外空中音データと水中音データに共通する周波数ピークが見られないことから、風車の風切り音のような空中で発生した音が水中に侵入している可能性は低いと考えられる。

一方、風車停止中の水中音に関しては、本章の観測においては東日本の交流電流の周波数である 50 Hz のピークが確認された。Ingemansson Technology AB による報告書 [70]においても、交流電流ノイズとして 50 Hz のピークが風車運転中および停止中に共通して現れている。本研究で風車運転中にこの周波数ピークが明確に確認できなかったのは、風車の運転



または背景雑音の変化による影響でこのピークが隠れたためと考えられる。このことから、風車停止中に放射される水中音の影響も非常に小さいことが予想できる。

以上の考察結果から、洋上風力発電施設からの水中放射音は、タワーおよび基礎を介して水中に伝播している可能性が高いこと、および、風車運転中および停止中のどちらにおいても音圧レベルが低く、砕波音等の背景雑音に紛れるレベルであり、これらの影響は限定的と推定された。また、前章での文献調査の結果との比較により、海外の着床式洋上風力発電施設の運用時の水中放射音観測結果との類似性が確認できた。

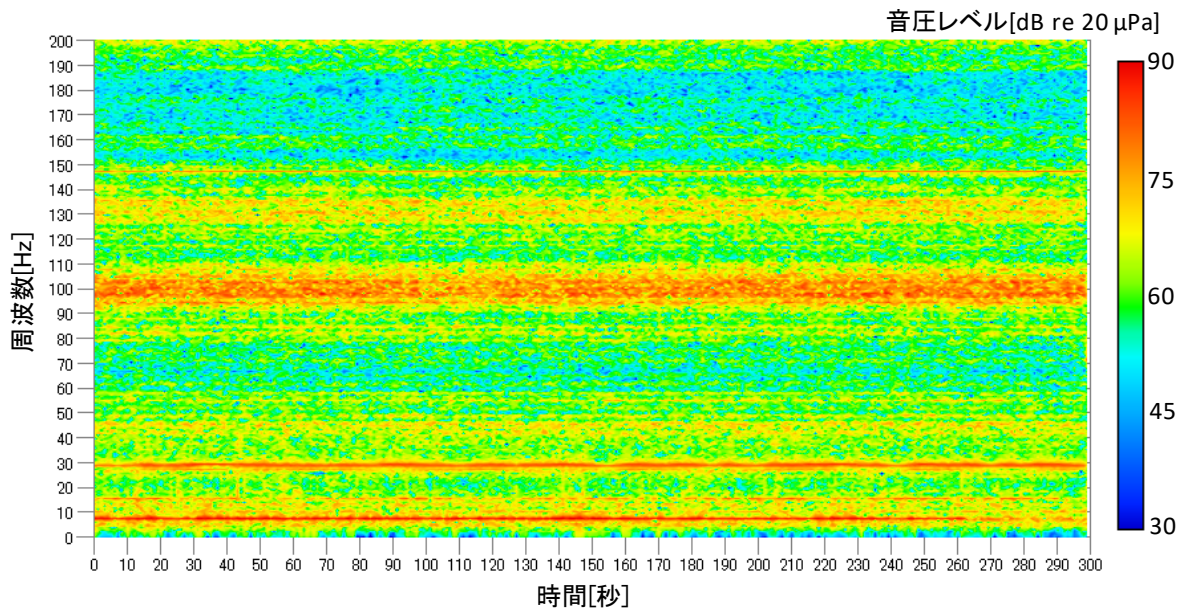


図 6-10 風車回転中のタワー内空中音パワースペクトルの時間変化

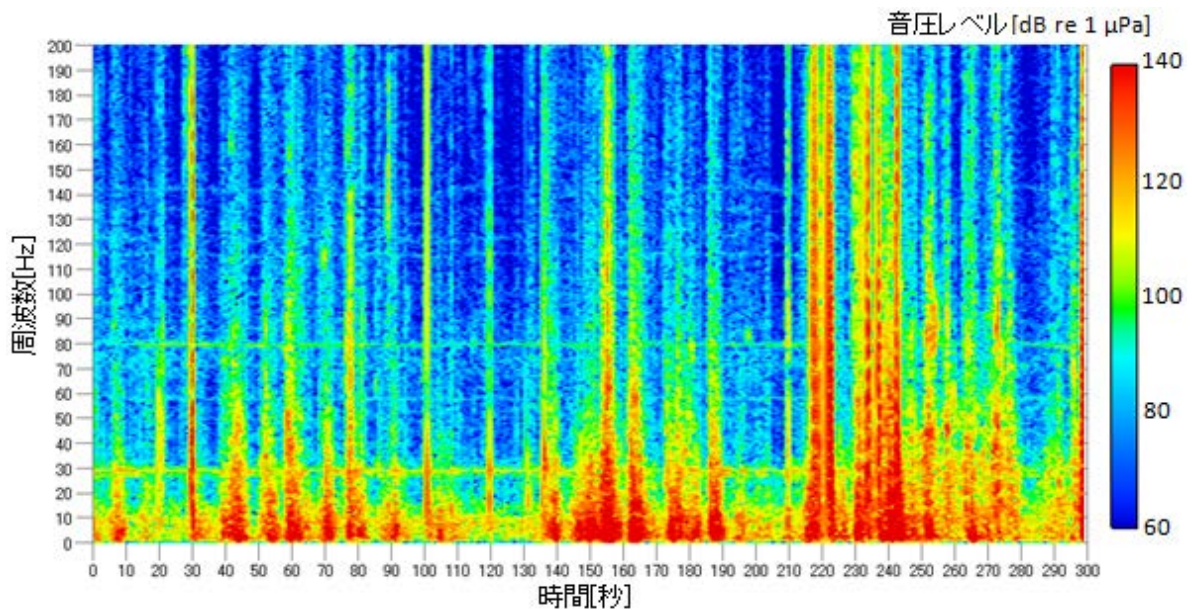


図 6-11 風車回転中の水中音パワースペクトルの時間変化



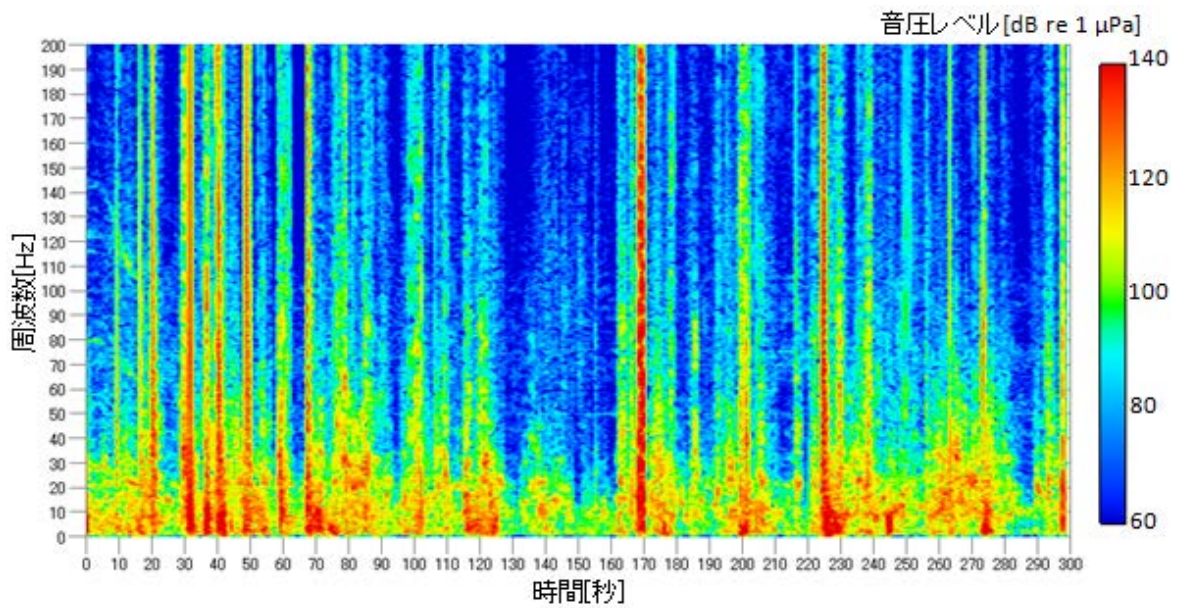


図 6-12 風車停止中の水中音パワースペクトルの時間変化  
(風車停止の途中, 123 秒付近で完全停止)

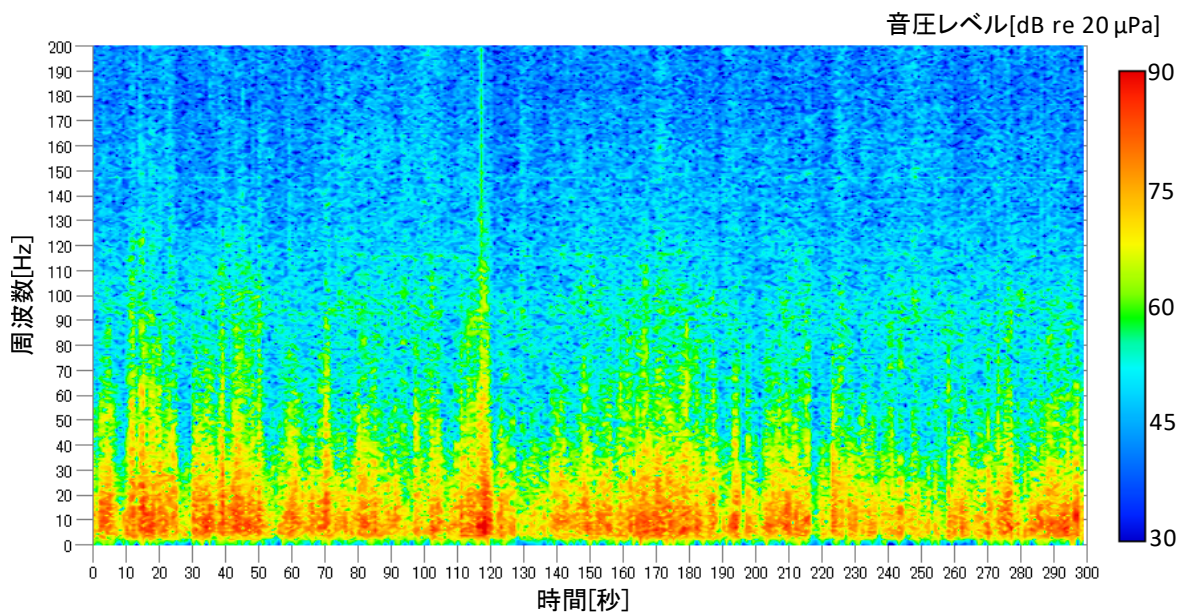


図 6-13 風車回転中のタワー外空中音パワースペクトルの時間変化  
(風車再起動の途中, 107 秒付近で定格運転再開)

## 6.2. 着床式洋上風力発電施設の建設中における水中音観測 [87] [88]

平成 24 年 6 月に, 前節の施設に隣接した沿岸部に建設中であったウィンド・パワーかみす第 2 洋上風力発電所 7 号機 (図 6-14, 図 6-15) のモノパイル基礎打設時における水中放射音の観測を行い, その時刻歴特性や周波数特性を調査した。また, 水中スピーカーを用いて当該海域における水中音伝搬特性を調査し, これらの調査結果から, 建設時水中放射音の音源音圧レベルを推定した。なお, 本節の内容は主に塩荊ら [87] の発表内容に基づくが, 一

部の計測結果について考察し直した Shiokari et al. [88]の内容を含んでいる。

### 6.2.1. 観測日時と気象条件等

- ・観測日時：平成24年6月18日12:30頃～14:00頃
- ・気象条件：晴れ，風向 南東，風速 4.6 m/s（気象庁，銚子，13:00），有義波高約 1.0 m（港湾局）
- ・満潮時刻と満潮時の潮位：2:03・225 cm，16:36・210 cm（気象庁，銚子）
- ・干潮時刻と干潮時の潮位：9:31・107 cm，21:28・181 cm（気象庁，銚子）
- ・月齢：28.1（国立天文台，水戸，正午）

### 6.2.2. 観測機器

本観測では，以下の機器を使用した。これらの機器は全て乾電池で駆動可能であり，ハイドロホンによる計測音をリニアPCMレコーダーに記録した。GPSロガーとレーザー距離計は相対距離計測のために用いた。

- ・ハイドロホン（オキシーテック，OST2130）：2台
- ・ハイドロホン用アンプ（オキシーテック，OST4300）：2台
- ・リニアPCMレコーダー（SONY，PCM-M10）：1台
- ・GPSロガー：2台
- ・レーザー距離計：1台



図 6-14 対象海域

（電子国土(<http://cyberjapan.jp/>)のデータに加筆。●付近が本観測の現場。）

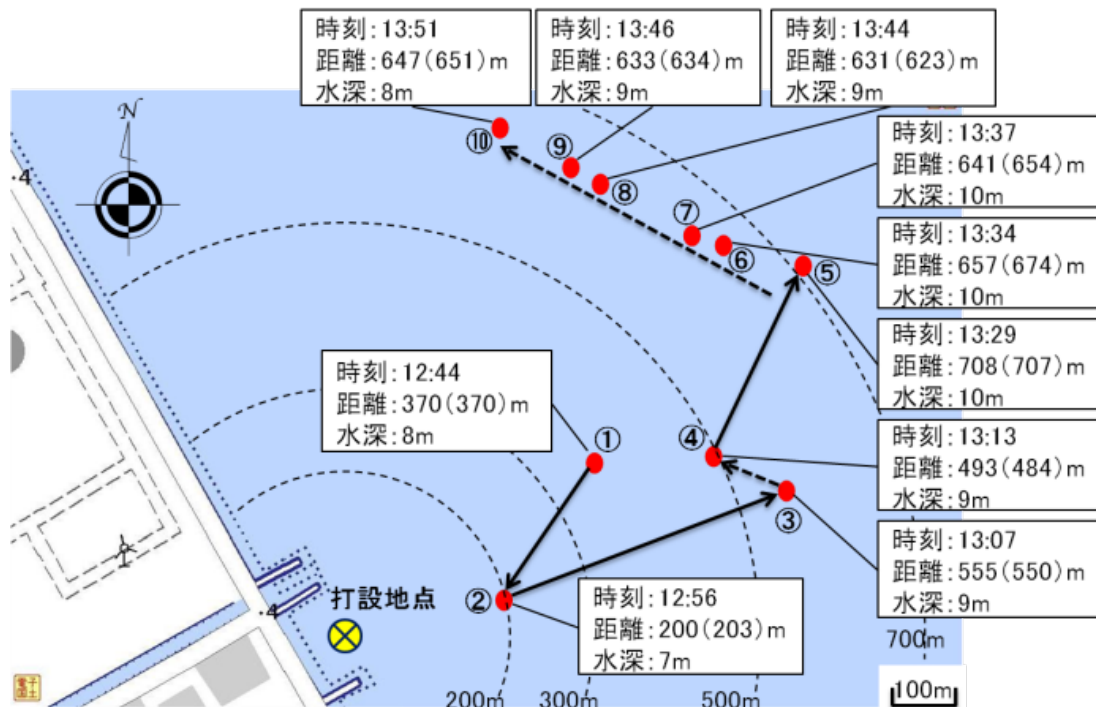


図 6-15 打設地点および観測位置

(電子国土(<http://cyberjapan.jp>))のデータに加筆。図 6-14 の●付近の拡大図。各点の位置は GPS ロガーの緯度経度データより、打設地点からの距離は緯度経度から算出、カッコ内はレーザー距離計による参考値。水深は航海用電子海図 AlphaMap Pro のデータより、観測点②の水深を 7 m、⑤の水深を 10 m とし、その他は内挿によって求めた。)

### 6.2.3. 観測方法

打設音の距離減衰の様子を捉えるため、打設地点からの距離を変えて複数地点で観測を行った。打設地点から 300 m, 200 m, 500 m, 700 m の順に目標とする距離を変えて移動し、各地点で数分間観測した。ただし、観測中は観測船自体が発する水中音の混入防止を目的とし、観測船をブラックアウトさせたため、風・波・潮流によって観測船が観測中に移動しており、必ずしも目標とする距離では観測ができていない。実際に観測を行った地点と打設地点の位置関係を図 6-15 に示す。これらの観測点を便宜上、計測時間の順に観測点①～⑩とする。移動の軌跡を示す矢印の実線は意図的な移動、点線は風・波・潮流による意図せぬ移動を意味する。

水中音伝搬状況の深度による差を比較するため、ハイドロホンは 2 セット用意し、観測地点の水深も考慮して、ハイドロホンの水深がそれぞれ 3 m と 5 m になるように設置した。ハイドロホンが波や潮流に流されるのを防ぐため、錘付きロープ 1 本にハイドロホン 2 台を固定し、ロープを観測船の舷側クリートに固縛した (図 6-3 と同様)。

リニア PCM レコーダーの記録設定は、WAVE 形式、サンプリング周波数 48kHz、分解能 16bit とし、2 台のハイドロホンからアンプを介して記録を行った。

### 6.2.4. 観測結果



#### 6.2.4.1. 時刻歴特性

観測点②, ④, ⑥, ⑦においては観測音がハイドロホンの受波感度レベルを超過（レベルオーバー）しており、波形の振幅の上下が一部切れている。一例として観測点②および③における観測データをそれぞれ図 6-16 および図 6-17 に示す。これらのデータから、前章での調査結果 [71] [72] と比べるとやや音圧が小さいことが分かる。

全観測点での観測データの波形を見ると、打設の時間間隔について、観測点①および②での観測時には6秒間で6回、それ以降は6秒間に5回の打設音の波形が現れており、それぞれ約0.95秒と1.2秒の間隔で発生していることが分かった。これは作業船の打設作業ログからも確認することができた。

観測点①および②における打設音の波形では、打設音発生直後からそれぞれ約0.2秒間および約0.08秒間は振幅が大きい状態が続いている。これは打設開始直後であったことから、モノパイル打設直後の残響により発生音の残存時間が長くなったと考えられる。それ以降は減衰が早くなっており、振幅も徐々に小さくなった。

なお、水深3mに設置したハイドロホンによるデータは、水深5mに設置したハイドロホンによるデータに比べて振幅がやや小さいが、波形には大きな違いはなかった。両者の若干の差について、詳細な検討は今後の課題であるが、次節に示す周波数特性でも大きな差はなく、Over All (OA) 値での両ハイドロホンのデータの差は平均3.3 dB re 1  $\mu$ Pa, 最大で5.1 dB re 1  $\mu$ Pa であり(表 6-1), 以下で検討する距離減衰に対しては無視できる差と判断した。ここでは、大きめの音圧が出ている水深5mに設置したハイドロホンのデータで以下の議論を進めることとする。

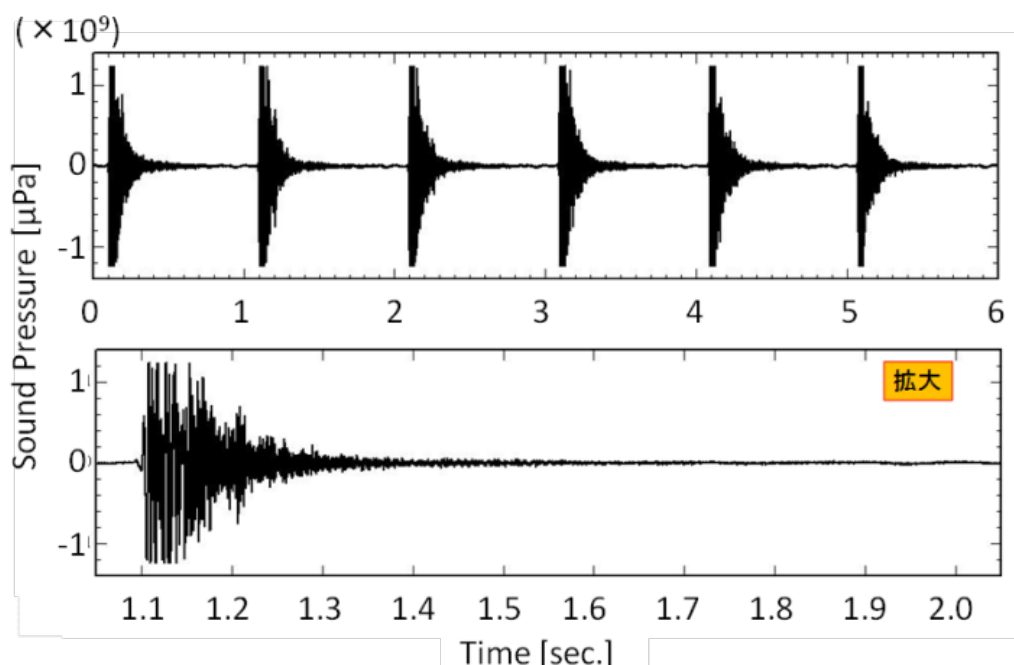


図 6-16 観測点②における水中音データの時刻歴特性  
(ハイドロホン水深5m, 下図は上図の横軸方向拡大)

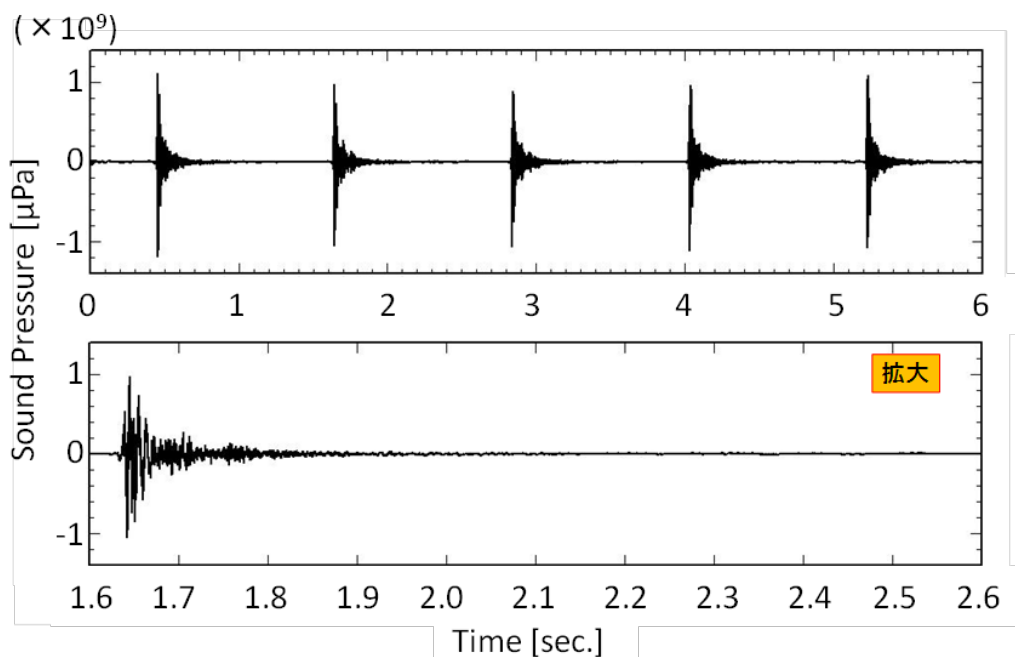


図 6-17 観測点③における水中音データの時刻歴特性  
(ハイドロホン水深 5m, 下図は上図の横軸方向拡大)

表 6-1 観測した水中音 Over All 値の時間変化

観測点 番号	時刻	打設地点から の距離[m]	打設有無	Over All 値[dB re 1 μPa]	
				ハイドロホン 水深 3m	ハイドロホン 水深 5m
-	12:39	393	無	125.5	128.1
①	12:44	370	有	<b>157.5</b>	<b>159.5</b>
-	12:49	333	無	132.4	132.8
②	12:56	200	有	<b>162.3</b>	<b>164.7</b>
③	13:07	555	有	<b>153.3</b>	<b>157.4</b>
④	13:13	493	有	<b>155.3</b>	<b>159.7</b>
-	13:20	785	無	132.3	132.6
⑤	13:29	708	有	<b>151.5</b>	<b>155.9</b>
⑥	13:34	657	有	<b>152.8</b>	<b>156.4</b>
⑦	13:37	641	有	<b>154.5</b>	<b>158.5</b>
-	13:42	633	無	131.9	137.0
⑧	13:44	631	有	<b>153.0</b>	<b>157.2</b>
⑨	13:46	633	有	<b>151.6</b>	<b>155.8</b>
⑩	13:51	647	有	<b>147.2</b>	<b>151.4</b>
-	13:54	663	無	129.7	133.7
-	13:55	668	無	128.2	131.4

#### 6.2.4.2. 周波数特性

モノパイル基礎打設中の水中音観測データについて、1 打ごとのスペクトル解析を行い、連続 30 打の平均パワースペクトルを算出した。観測点①における打設開始前の水中音（背景雑音）および打設中の水中音の解析結果をそれぞれ図 6-18 と図 6-19 に、観測点③における打設一時停止中の水中音（背景雑音）と打設時の水中音の解析結果をそれぞれ図 6-20 と図 6-21 に示す。また、全観測点における打設中の水中音の解析結果をまとめて図 6-22 に示す。打設中の平均パワースペクトルでは、全ての観測点において 100 Hz 以上の周波数帯の音圧レベルが上昇していた。打設開始直後の観測点①および②では約 111 Hz、約 217 Hz、約 318 Hz のピーク周波数が現れており、これらは 111 Hz を基本周波数とする基本波とその第二・第三高調波と考えられる。その後、観測点③以降ではこれらのピークが不明瞭であったり、周波数が多少移動しているところもあるが、全ての観測点においてこれらの周波数付近の音圧レベルが高くなっていることが確認できた。このことから、打設音の基本周波数は約 111 Hz であったことが推測される。前章での調査結果においても、Betke ら [71] の計測結果には 125 Hz 付近に、Bailey ら [72] の計測結果でも 100 Hz 周辺にピークが確認できることから、この周波数帯が打設音の基本周波数であることが推測される。

また、全観測点でのデータに共通して約 670 Hz のピーク周波数が現れたが、これは音圧レベルが小さいことから、打設音ではなく、打設に伴って発生する機械音のようなものではないかと考えられる。なお、観測点④以降では観測点①～③のデータと比べて、800～1600 Hz の周波数成分のパワーが小さくなる傾向があったが、この理由については不明である。

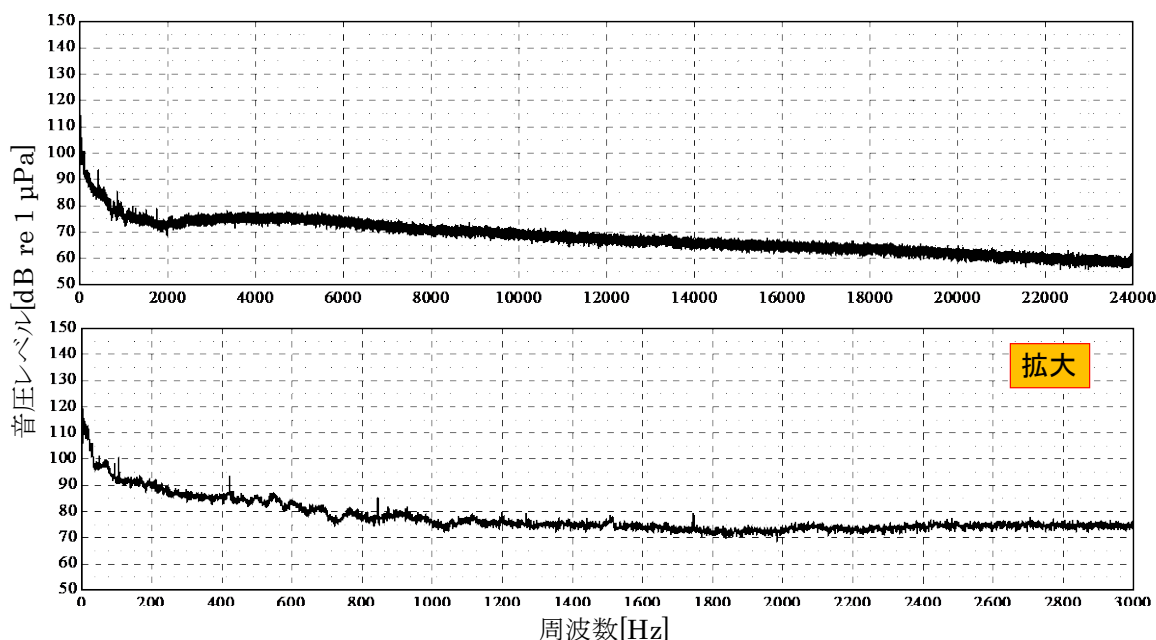


図 6-18 観測点①における打設開始前の水中音(背景雑音)平均パワースペクトル  
(12:39 頃, 370 m(目標 300 m), ハイドロホン水深 5 m, 30 秒間平均, 下図は上図の横軸拡大。)

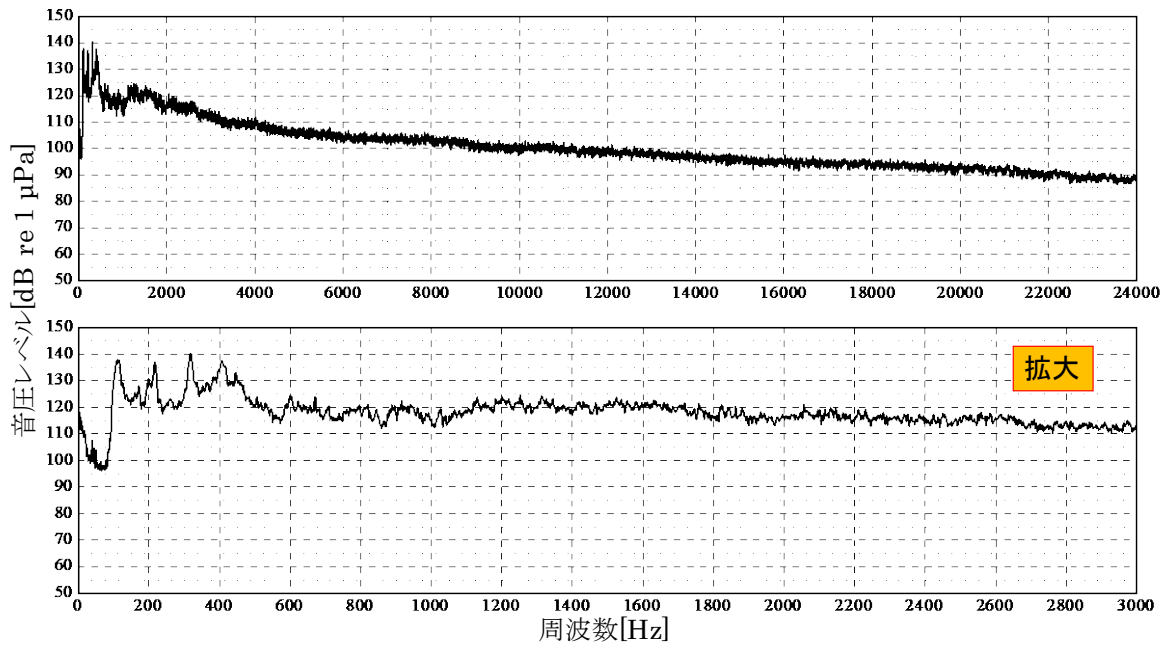


図 6-19 観測点①における打設中の水中音平均パワースペクトル  
(12:44 頃, 370 m(目標 300 m), ハイドロホン水深 5 m, 30 打平均, 下図は上図の横軸拡大。)

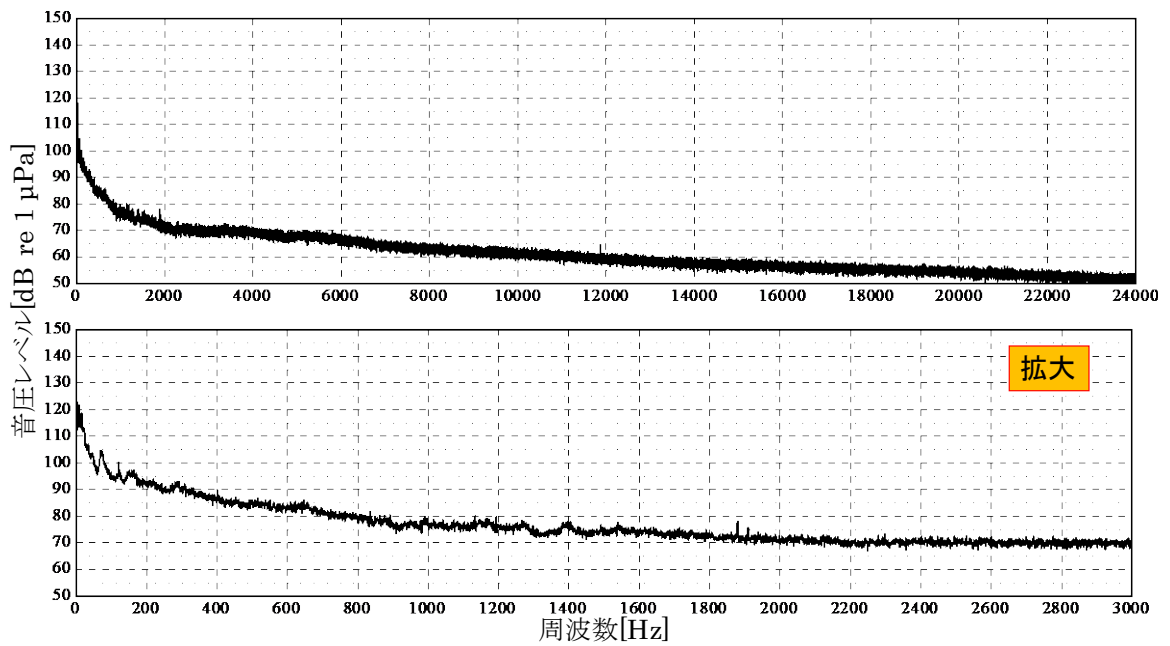


図 6-20 観測点⑤における打設一時停止中の水中音(背景雑音)平均パワースペクトル  
(13:20 頃, 708 m(目標 700 m), ハイドロホン水深 5 m, 30 秒間平均, 下図は上図の横軸拡大。)

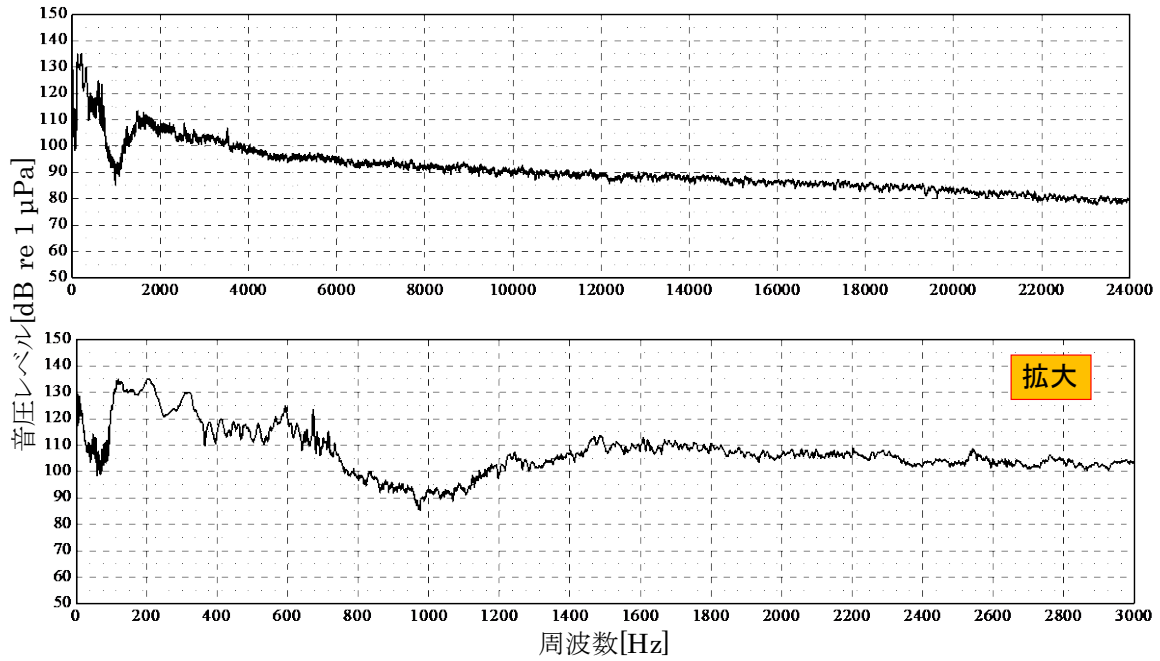


図 6-21 観測点⑤における打設中の水中音平均パワースペクトル  
(13:29 頃, 708 m(目標 700 m), ハイドロホン水深 5 m, 30 打平均, 下図は上図の横軸拡大。)

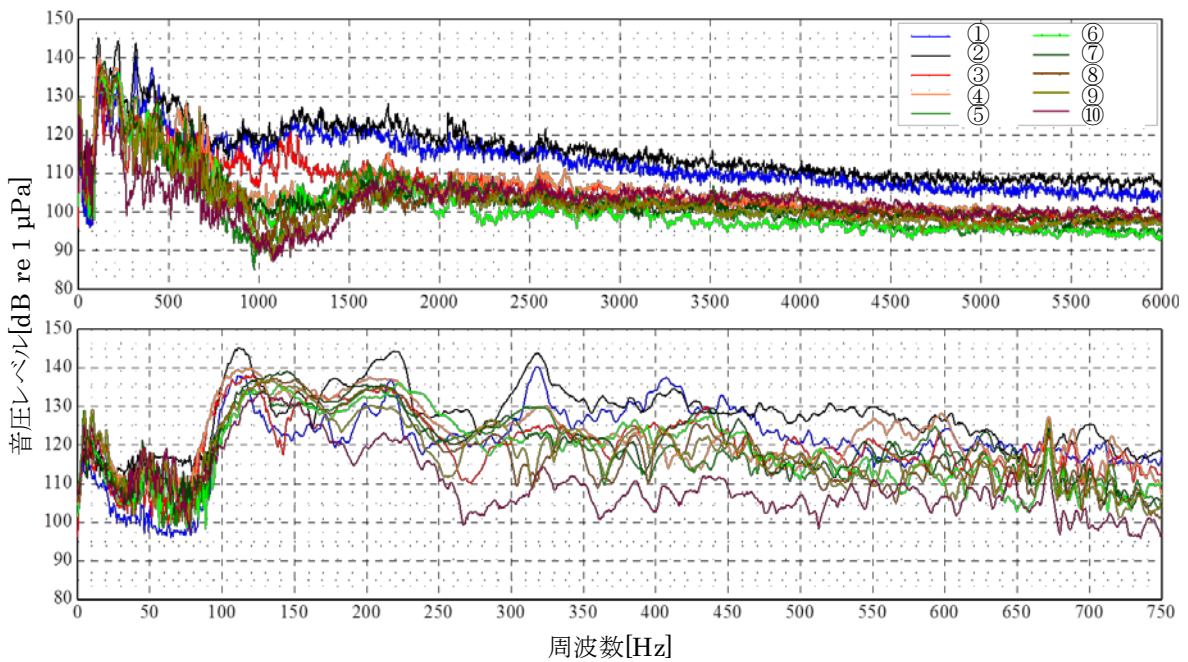


図 6-22 全観測点における水中音データの周波数特性  
(ハイドロホン水深 5 m, 各地点 30 打の平均, 下図は上図の横軸方向拡大, 凡例の番号は観測点番号を示す。)

### 6.2.5. 当該海域における水中音伝搬特性の調査

打設地点の周辺海域における水中音の伝搬特性を調査するため、打設音の観測前日、打設

地点付近で作業船より水中スピーカーを水深約 1 m に降下し、予め準備していた模擬音源(単一周波数音)を再生した。このスピーカー降下地点から約 100 m および約 300 m 離れた地点で観測船より hidroホンを降下し、スピーカーからの再生音を収録した。打設音の観測時と同様に、hidroホン設置水深は 3 m と 5 m、観測中は観測船をブラックアウトした。

なお、この作業船は船体から 4 本のレグを出して自己昇降が可能であり、本観測時にも船体は海面より上部に出ているため、スピーカーから放射された水中音が船体に反射することはない。また、レグによる反射は小さく無視できるものと考えた。

観測の後日、海上技術安全研究所の落下試験水槽内において、hidroホンとスピーカーの距離を 1 m に設定して実験を行い、これを音源音圧レベルの基準として上記の観測データと合わせ、水中音伝搬特性の評価に用いた。このとき使用した水槽の大きさは 25 m × 15 m、底面は深さが 1.5 m ~ 3.0 m である。hidroホンとスピーカーは水深 1.5 m 側に、図 6-23 に示すように設置した。水槽壁面や底面からの反射が懸念されるので、反射の影響が少なくなるように水中音の再生時間を短く設定した。観測した波形は作成したものと同一の単一周波数波形を示し、位相遅れ等の反射波の影響と思われる波形が混入していなかったことから、本実験においても反射の影響はほとんどないと考えられる。

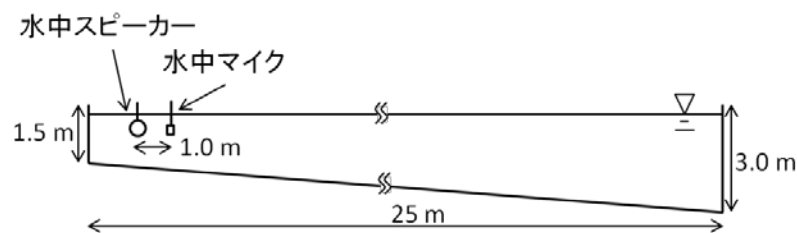


図 6-23 水中スピーカー再生音の音源音圧レベル推定実験の概要

この調査に水中スピーカーを用いた理由は、次の通りである。前章で紹介した Ingemansson Technology AB [70] は風車運転中の水中音観測データを利用し、各観測点での共通のピーク周波数に着目して距離による減衰量を推定している。しかし本研究の打設中の水中音観測データでは打設の進行に伴い音源が変化していることもあり、Ingemansson Technology AB [70] の調査結果のように全ての観測点でピーク周波数がぴったり一致しない。よって、複数のピーク周波数を含む打設時の観測音より、単一周波数の人工的な音源で明確に背景雑音と区別できる方が良いと考えた。また、水中スピーカーが音源であれば、打設音の計測と異なり、1 m の距離にも接近して音源音圧を計測することができるという利点もある。以上により、本研究では当該海域の水中音伝搬特性の調査のために水中スピーカーを用いて単一周波数音を発生させ、これを当該海域の複数地点で計測することにした。

上記の観測および実験によって得られたデータを表 6-2 に示す。このうち、スピーカーからの距離 1 m において計測したデータを音源音圧レベルとして設定し、このレベルからの減衰を計算した。減衰の計算式を以下の式(6-1)に示す。

$$p(r) = p_0 - TL(r) \quad \dots\dots (6-1)$$

ここで、 $r$  は音源からの距離[m]を表わし、 $p(r)$ は距離  $r$  における音圧レベル[dB re 1  $\mu$ Pa]、 $p_0$ は音源音圧レベル[dB re 1  $\mu$ Pa]、 $TL(r)$ は距離  $r$  に到達するまでの音圧レベルの減衰量[dB re 1  $\mu$ Pa]を示す。

$TL(r)$ を伝搬損失 (Transmission Loss) といい、以下のように表わされる [89]。

$$TL(r) = 10 \log r + \alpha r \quad \dots (6-2)$$

式(6-2)の第1項は拡散損失を表わし、当該海域は水深が浅いため円筒拡散が適切であると判断した。 $\alpha$ は減衰定数であり、これを含む第2項は海水中のイオン等による吸収損失を示すものである。

表 6-2 各観測点における周波数ごとの水中音圧[dB re 1  $\mu$ Pa]

(距離は目標値であり、カッコ内は実際の観測中の GPS ロガーによる音源との相対距離)

周波数[Hz] 距離[m]	125	250	500	1000
1	139~153	130~140	119~138	139~146
100 (125~127)	115~124	113~116	105~108	106~113
300 (276~289)	101~109	103~107	100~102	109~113

減衰定数を求めるためによく用いられる Thorp の式 [90]や Schulkin and Marsh の式 [91]等では、適用できる水深や周波数域が限定的であり、また、これらは海水中のイオン等による吸収のみを考慮しているが、当該海域は水深が浅く、海面や海底面による吸収の影響が大きいと考えられるため、これらの実験式をそのまま用いることはできない。

そこで、本研究ではこの減衰定数に海水中のイオン等による吸収損失のみでなく、海面や海底面での吸収による損失を含めた形で推定することとし、減衰定数をパラメータとして変化させ、当該海域の伝搬特性の表現に適した減衰定数を推定する。ただし音源音圧レベル(スピーカーからの距離 1 m における計測値)にもばらつきがあるため、これを計測値の範囲内で 1 dB re 1  $\mu$ Pa ずつ変化させ、減衰定数と同様にフィッティングパラメータとして利用する。

図 6-24 は 125 Hz の音源について、約 100 m および約 300 m 地点で計測された水中音圧データに合うように減衰定数を調整した結果である。最小二乗法により、減衰曲線上の理論値と各計測点 4 回分の計測値との誤差の合計が最小になるときの減衰定数を求めた。他の周波数音源についても同様に推定した。各周波数の減衰定数推定結果を表 6-3 に示す。このとき、水中音圧レベルは前章で示したデータと同じく水深 5 m に設置した hidroホンのデータを用いた。

なお、前章で紹介した Ingemansson Technology AB [70]の調査結果でも、距離が 2 倍になった場合の減衰量が各周波数の平均で約 4 dB re 1  $\mu$ Pa であり、Betke ら [71]の調査結果でも約 4.5 dB re 1  $\mu$ Pa と、いずれも円筒拡散による理論値の 3 dB re 1  $\mu$ Pa より大きいこと

が報告されている。これらの推定は式(6-2)の右辺第1項、つまり拡散損失のみを考慮しており、上記の 4 dB re 1  $\mu$ Pa や 4.5 dB re 1  $\mu$ Pa といった数値の算出は、この第1項の係数を変化させることを意味する。しかし、図 5-8 を見ると、遠方のデータほど理論値との差が大きくなっていることが分かる。これは Bailey ら [72] も同様の調査結果を示しており (図 5-11(a))、このとき推定された減衰直線の式(5-1)には本研究と同様に式(6-2)の第2項を考慮している。これらのことから、拡散損失による減衰のみを考慮しては、浅海域での水中音の減衰を適切に評価することができないと考えられる。

以上の理由から、本研究では式(6-2)の第2項、吸収損失を考慮して当該海域の水中音減衰曲線を推定することとした。この結果得られた推定結果の図 6-24 は、拡散損失のみを考慮して推定した場合の図 6-25 よりも計測結果を良く表現できている。この理由として、拡散損失のみでは音源からの距離  $r$  が大きくなるにつれて 1 m あたりの減衰量が小さくなるのに対し、吸収損失による減衰項は  $r$  に比例して減衰するようになっているためと考えられる。つまり、計測値は  $r$  が大きくなると拡散損失による減衰よりも急激に音圧レベルが低下しており、これを拡散損失のみで表現するのは難しいが、 $r$  に比例する吸収損失項を考慮したことでこの表現が容易になったと考えられる。参考に、図 6-24 と図 6-25 の横軸を対数で表示したグラフを図 6-26 と図 6-27 にそれぞれ示す。これらはそれぞれ、Bailey ら [72] の示す図 5-11 [71] と、Betke らの示す図 5-8 と類似していることが分かる。

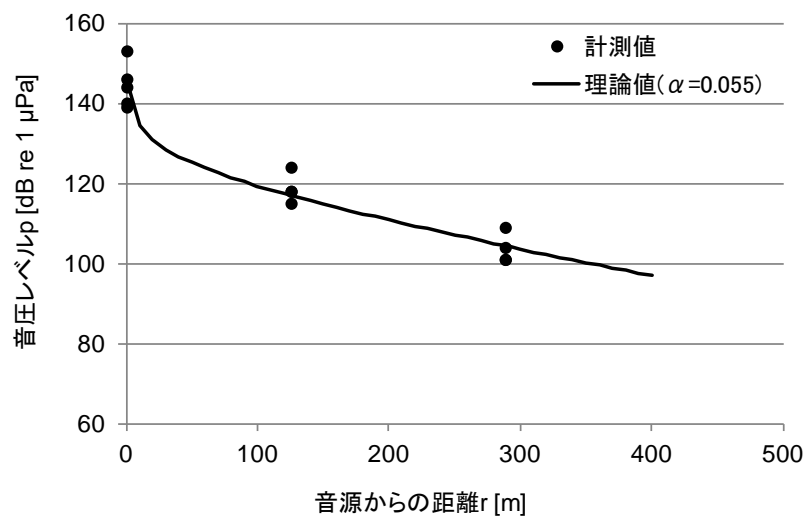


図 6-24 125 Hz の音の減衰定数  $\alpha$  推定の様子

表 6-3 各周波数の減衰定数推定結果とその平均値

周波数[Hz]	減衰定数[dB re 1 $\mu$ Pa/m]
125	0.055
250	0.017
500	0.005
1000	0.026
全周波数平均	0.026



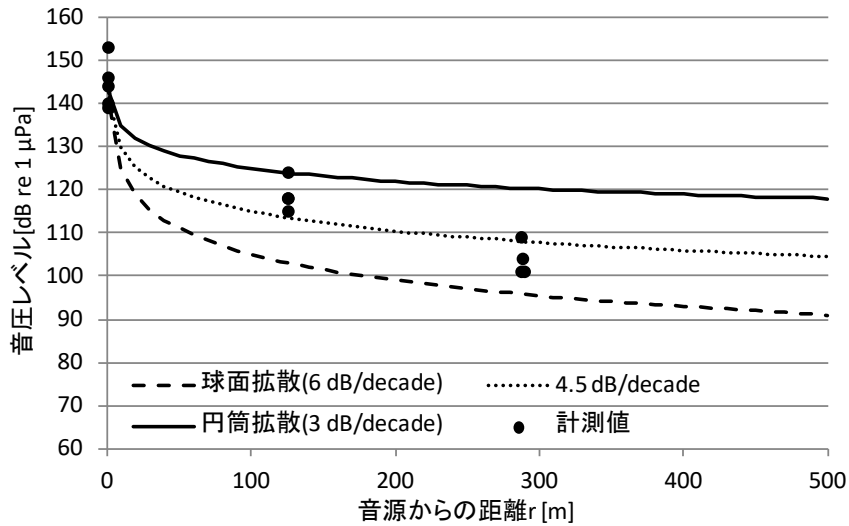


図 6-25 拡散損失のみを考慮した 125 Hz の音の減衰曲線推定の様子

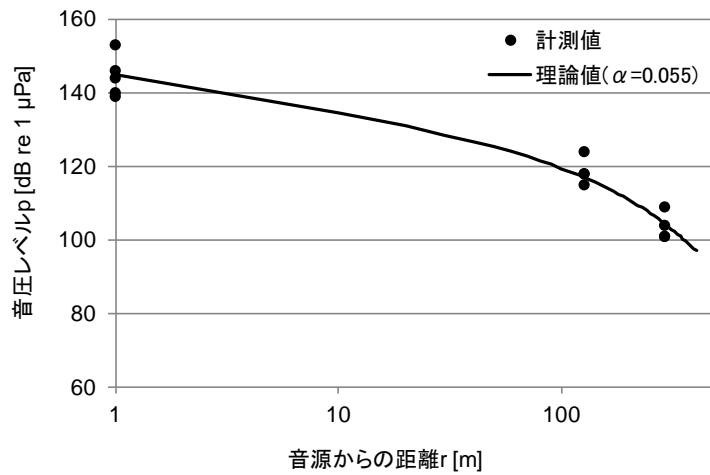


図 6-26 125 Hz の音の減衰定数  $\alpha$  推定の様子 (横軸対数)

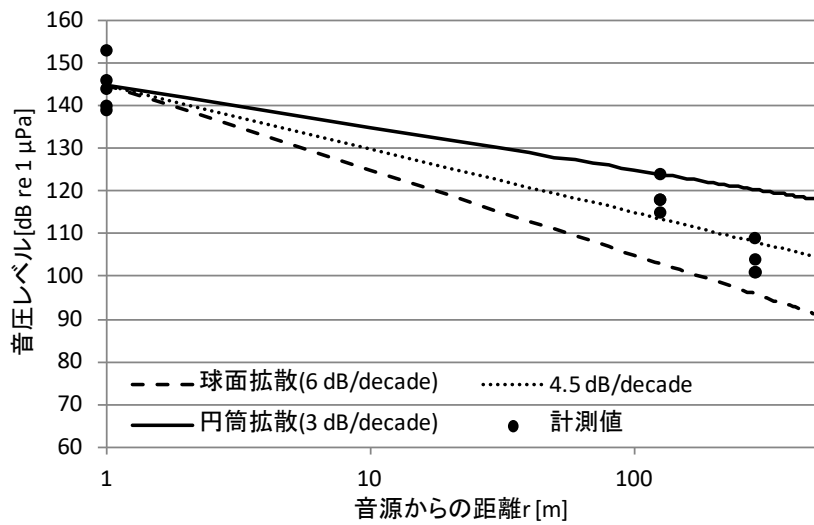


図 6-27 拡散損失のみを考慮した 125 Hz の音の減衰曲線推定の様子 (横軸対数)

## 6.2.6. 打設音の音源音圧レベル推定

### 6.2.6.1. 推定手法

前章で推定された減衰定数の全周波数平均値 $\alpha_{ave}$ を式(6-2)の $\alpha$ に代入して TL を求め、これを式(6-1)に代入することで減衰曲線の式を得る。この式の $p_0$ を変化させ、減衰曲線が任意の観測点における水中音圧のデータに合うように調整することで、その観測時刻における打設地点での音源音圧レベル $p_0$ が推定される。これを全観測点のデータについて行う。

ここで、Betke ら [71]による図 5-8 や Bailey ら [72]による図 5-11(b)のように、全ての観測データを一つの減衰曲線にフィッティングするのではなく、個々のデータに対して先に求めた減衰曲線をフィッティングし、各観測時刻における音源音圧レベルを推定したのは、本観測の対象であるモノパイル基礎の打設音は、打設の進行に伴い時間変化していると考えたためである。打設音の変化に伴う音源音圧レベルの変化については Bailey ら [72]も検討しており、本研究と同様、各時刻の観測データに減衰曲線をフィッティングして音源音圧レベルの推定を行っているが、Bailey ら [72]が用いた減衰曲線は打設音の観測データを基に推定されたものであるのに対し、本研究では水中スピーカーで再生した既知の音源の観測データを基に推定した点が異なる。Bailey ら [72]の手法では、音源音圧レベルが変化している中で観測された複数地点の音圧レベルを基に減衰曲線を推定しているため、その推定結果には多くの不確実性を伴うが、本研究の手法では既知の変化しない音源を対象に行った観測データを基に減衰曲線を推定しているため、より正確に減衰曲線の推定ができると考えられる。

図 6-28 は表 6-1 のデータのうち、水深 5 m に設置したハイドロホンによる打設中の水中音データの Over All (OA)値を点で示し、前章で推定された減衰曲線を利用して各点の観測時刻における音源音圧レベルの推定を行っている様子の一部である。この推定手法には減衰定数の違いによる不確実性を伴うため、前章で算出した全周波数の平均値 $\alpha_{ave}$ のみでなく、全ての推定結果の中の最大値 $\alpha_{max}$  (125 Hz のデータから推定された 0.055) および最小値 $\alpha_{min}$  (500 Hz のデータから推定された 0.005) についても同様の音源音圧レベル推定作業を行った。図 6-29 は 12:44 の計測データについて、減衰定数を最大値、平均値、最小値の 3 通りに変化させ、音源音圧レベルの推定結果にどの程度の差が現れるかを示したものである。音源からの距離が大きくなるほど減衰定数の違いによる推定結果の差も大きくなり、最大で約 35 dB re 1  $\mu$ Pa の差が生じた (表 6-4)。

### 6.2.6.2. 音源音圧レベルの推定結果と考察

上記の手順で各観測時刻における音源音圧レベルの OA 値を推定した。表 6-4 および図 6-30 にその結果を示す。これらの図表より、音源音圧レベルは打設開始から徐々に大きくなり、打設終了前には少し小さくなったことが分かる。この結果とハイドロホンのレベルオーバーの発生を関連付けて考察すると、この音源音圧レベルの時間変化の理由として、打設開始直後はモノパイルが海底に深く貫入していなかったため水中に放射される音が小さく、観測点①ではハイドロホンのレベルオーバーが発生しなかったが、その後、貫入深度が深くなるにつれ徐々に放射音が大きくなり、観測点②、④、⑥、⑦での計測時にはレベルオーバーが発生したと考えられる。

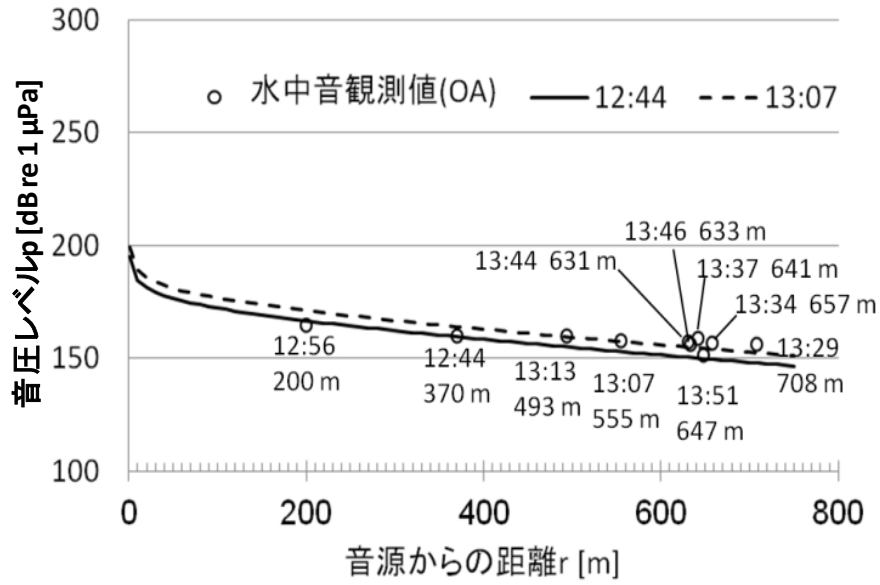


図 6-28 各観測点における水中音データからの音源音圧レベル推定作業の例 ( $\alpha = 0.026$  の場合)

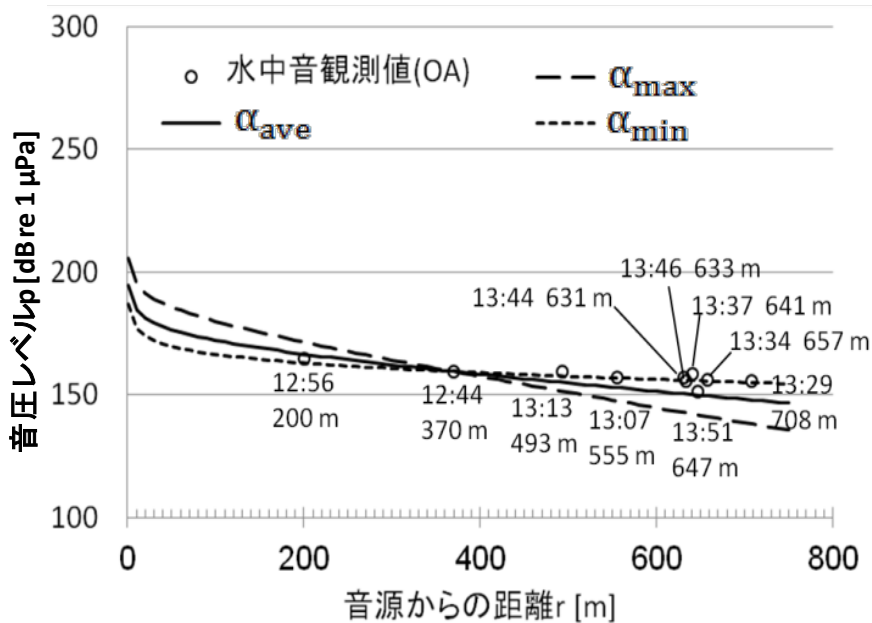


図 6-29 減衰定数  $\alpha$  の値の違いによる 12:44 の音源音圧レベル推定結果の差 ( $\alpha_{\max} = 0.055$ ,  $\alpha_{\text{ave}} = 0.026$ ,  $\alpha_{\min} = 0.005$ )

また、貫入深度だけではなく、打設位置の高さによる影響も考えられ、開始直後には海面との距離が大きく水中に伝わる音が小さかったが、しばらく経過してモノパイルが海底に深く入ると打設位置が低くなり、海面との距離も小さくなるので、水中に伝わる音も大きくなった可能性も考えられる。

一方、以降で検証するように打設時の打撃エネルギーの変化も関係していると考えられる。

表 6-4 各観測時刻における音源音圧レベルの推定結果

計測時刻	距離[m]	推定音源音圧レベル(OA 値)[dB re 1 μPa @1 m]		
		$\alpha_{\max}$ (0.055)	$\alpha_{\text{ave}}$ (0.026)	$\alpha_{\min}$ (0.005)
12:44	370	205.5	194.8	187.0
12:56	200	198.7	192.9	188.7
13:07	555	215.4	199.3	187.6
13:13	493	213.7	199.4	189.1
13:29	708	223.3	202.8	187.9
13:34	657	220.7	201.7	187.9
13:37	641	221.8	203.2	189.8
13:44	631	219.9	201.6	188.4
13:46	633	218.6	200.3	187.0
13:51	647	215.1	196.3	182.7

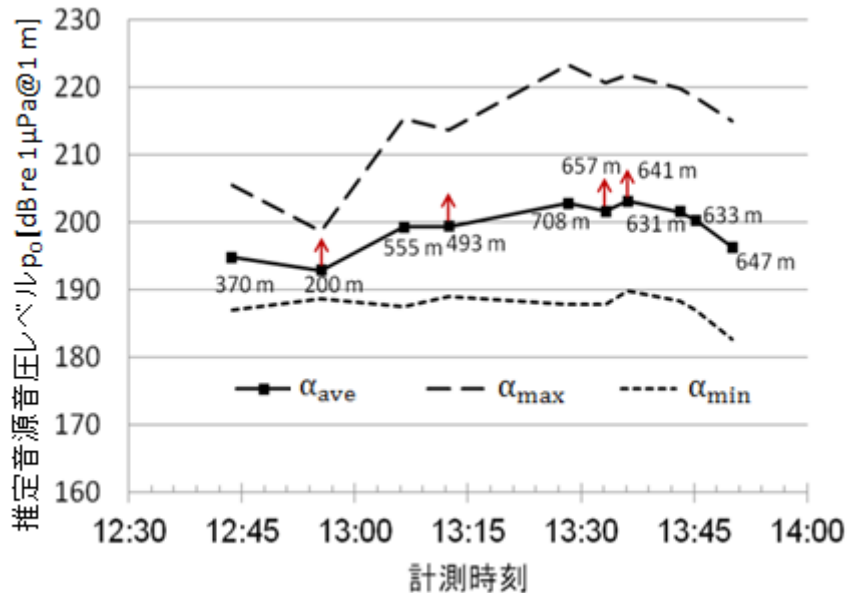


図 6-30 推定音源音圧レベル (OA 値) の時間変化

(図中、上向き矢印が記入されている点は、ハイドロホンのレンジオーバーが発生した観測点であり、実際の音圧は観測値より高い可能性がある。)

### 6.2.6.3. 推定音源音圧レベルと打撃エネルギーとの関係

上記で求めた推定音源音圧レベル (OA 値) と、打設作業船で記録された油圧ハンマーの打撃エネルギーとの関係を検証する。図 6-30 の推定音源音圧レベルの時間変化に打設ログから得られた打撃エネルギーの時間変化を追加したものを図 6-31 に示す。ここで打撃エネルギーの時系列データは、水中音の観測時刻に合わせてログから抽出した。

図 6-31 から、推定音源音圧レベルと打撃エネルギーは同様の時間変化を辿っていることが分かる。特に相関が強いと思われる $\alpha_{\text{ave}}$ と $\alpha_{\max}$ による推定音源音圧レベルと打撃エネルギー

一との相関を調べた結果を図 6-32 に示す。この図より、 $\alpha_{ave}$ および $\alpha_{max}$ ともに打撃エネルギーと正の相関関係があることが確認できた。この結果は Bailey ら [72]の報告内容とも一致するが、打撃エネルギーに対する音源音圧レベルは、本研究の方が小さく、これは上述の減衰曲線推定方法の違いや、対象海域の水深や海底地質等の違い、また、打設に使用したハンマーやパイルの材質・形状等の違いによる影響ではないかと考えられる。

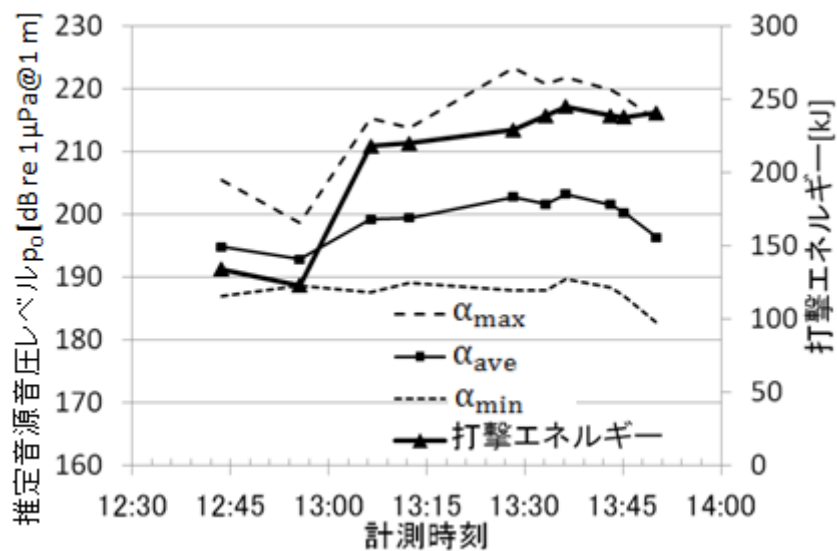


図 6-31 推定音源音圧レベル (OA 値) と打撃エネルギーの時間変化

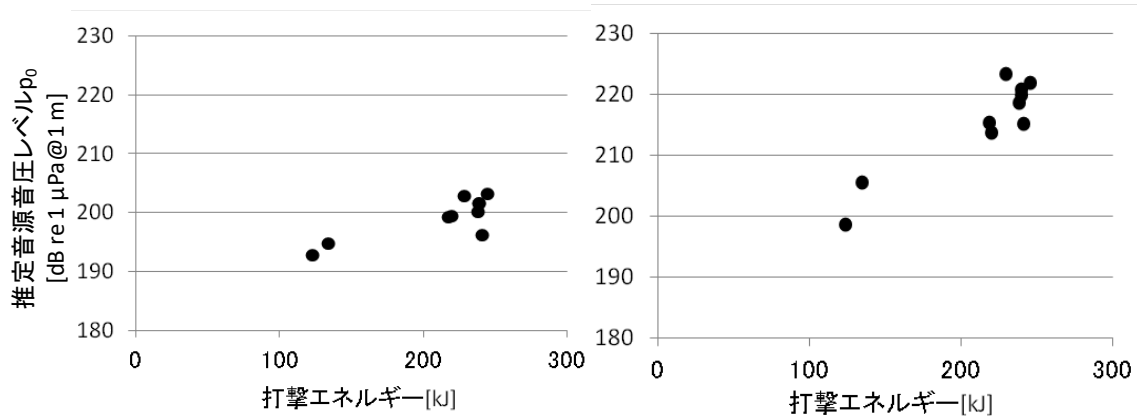


図 6-32 打撃エネルギーと推定音源音圧レベル (OA 値) との関係 (左は減衰定数として $\alpha_{ave}$ を使用した場合、右は $\alpha_{max}$ を使用した場合)

### 6.2.7. 観測結果および音源音圧レベル推定法についての考察

ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所7号機の建設中における水中放射音の観測およびそのデータ解析により、モノパイル打設による水中放射音の時刻歴特性および周波数特性を明らかにした。打設中は全ての観測点において100 Hz以上の周波数帯の音圧レベルが上昇し、約111 Hzを基本周波数とする基本波とその第二・第三高調波が現れた。このこと

から、打設音の基本周波数は約 111 Hz であったことが推測される。

また、水中スピーカーを用いた単一周波数音の観測による当該海域における水中音伝搬特性の推定を行い、当該海域における水中音の吸収損失による距離減衰は、周波数によって差はあるが、平均で 0.026 dB re 1  $\mu$ Pa/m であると推定された。さらに、推定された減衰曲線を利用した建設時水中放射音の音源音圧レベルの推定と、この推定音源音圧レベルと打設時の打撃エネルギーとの相関関係を捉えることができた。この結果、本観測時のモノパイル打設による音源音圧レベルは概ね 182.7 dB re 1  $\mu$ Pa~223.3 dB re 1  $\mu$ Pa 程度であったと推定された。

以上の観測・推定結果は、Betke ら [71]および Bailey ら [72]による報告内容と比較して妥当な結果であると思われる。Betke ら [71] がモノパイル打設時の水中音観測データに減衰曲線をフィッティングした結果(図 5-8)において、図の横軸および減衰曲線を延長して音源からの距離が 1m のときの音圧レベルを推定すると、約 215 dB re 1  $\mu$ Pa@1 m であることが分かる。また、Bailey ら [72]は式(5-1)から分かるように、音源音圧レベルを 250 dB re 1  $\mu$ Pa@1 m と推定している。よって、本研究で推定した音源音圧レベルの範囲は、海外事例と比べても妥当なものであると考えられる。

なお、ここで推定された減衰定数の数値そのものは当該海域においてのみ有効なものであるが、この推定手法はどの海域においても適用可能なものであり、減衰定数の推定手法が提案できたと言える。

### 6.3. 本章のまとめ

本章では国内の着床式洋上風力発電施設を対象とした建設時および運用時の水中放射音に関する調査を行い、海外の既往文献と比較・考察を行った。本研究の調査結果は、海外での調査結果と比較しても妥当なものであり、国内施設からの水中放射音の実態を把握することができたと考えられる。本研究において、国内外の着床式施設周辺の水音場が類似していることが示されたことにより、着床式の施設に関しては、国内の環境基準等の検討の際に、洋上風力先進国の環境対策の知見を参考にすることが可能であるということが示されたことになる。

また、前章で参照した浮体式施設の運用時水中音観測結果との比較から、着床式・浮体式に関わらず、施設運用中に発生する音の特徴は類似していることが分かった。

## 7. 施設放射音の生物影響

本章では、水中音の生物影響についての実験について説明する。これは主に塩苺ら [92] の発表内容の一部であるが、ここではその実験の内容についてより詳細に示すとともに、実験結果について考察し直すこととする。

### 7.1. 実験の背景と目的

現在の我が国の環境影響評価法で評価項目として不足している、洋上風力発電に特有の環境影響のうち、施設放射音による海棲生物への影響の評価方法を確立するには、施設放射音が魚類等の海棲生物に与える影響を実験等によって調査し、許容可能なレベルを判断することにより基準値を設ける必要がある。

第5章において紹介したように、基礎の杭打ち工事中および風車運用中の水中騒音による生物影響については、風車基礎以外の杭打ち工事中の情報も含めていくつかの文献があるが、その数は未だ少なく、基準として設定するための情報としては不十分である。特に生物種に関しては、哺乳類への影響について検証したものに比べて魚類への影響を検証したものが少ない。また、現在のところ浮体式施設は実用化されておらず、諸外国での調査例も全て着床式施設に関するものである。これら諸外国では、運用中の水中騒音は音圧レベルが低く、環境への影響は小さいとして、主に基礎の杭打ち工事中の水中騒音に関する影響の評価に主眼を置いている。

しかし、我が国では今後、浮体式施設の大規模展開を目指して研究開発を進めており、工事中には着床式のような大きな音は発生しないと考えられることから、浮体式の施設に関しては諸外国の環境影響評価法で設定されている基準をそのまま準用することは適切ではない。また、運用中の水中放射音のレベルについては、前章でも述べた通り、背景雑音と比べてそれほど大きなものではないため、海棲生物への影響は限定的と考えられるが、影響がないことを証明した研究例はない。

なお、前章で述べたように、着床式・浮体式に関わらず、施設運用中に発生する音の特徴は類似していると考えられる。

そこで本研究では、着床式・浮体式のいずれについても水中放射音は同様の特徴を有していると考え、洋上風力発電施設運用時の水中放射音が魚類に与える影響を、水槽実験によって評価する方法を試みた。次節以降にその内容を述べる。

### 7.2. 魚類の水中音による慢性影響

本研究では、1種類の単一周波数音について、音圧を変えて複数の水槽内で再生し、これらの水槽における魚類の摂餌行動や成長率の変化を、水中音による慢性影響として評価する実験を行った。実際の施設周辺海域での観測音のように複数の周波数音を含む音ではなく、単一周波数音を用いた理由は、複数の周波数を含む音では実験によって何らかの影響が確認できた場合に、その影響がどの周波数による影響であるかを判断することが困難であるため、まずは単一周波数音での影響を評価しようと考えたためである。単一周波数音での実験方法を確立することで、今後、異なる周波数での実験や、複数の周波数を組み合わせた実験等へ

の拡張における基礎を作ることができる。

また、慢性影響を評価項目として選定したのは、以下の理由による。

まず、逃避行動や聴覚への影響は、魚類の聴覚特性の研究等によってある程度既往の知見があるが、成長への影響等の慢性影響を評価したものはほとんどない。また、逃避行動は施設の設置直後には発生する可能性があるが、時間の経過に伴い「慣れ」が生じるため、その影響は小さいと考えられる。さらに、既往の知見から風車運転中の水中放射音の音圧レベルは聴覚に障害を生じさせるレベルではないと考えられることに加え、もし聴覚に影響を及ぼす可能性があっても魚類が施設周辺から逃避することで回避可能と考えた。特に魚類の「慣れ」については、施設に生物が付着することで沖合では貴重な餌場となる可能性もあり、多少の水中音が発生していてもレベルがそれほど大きくなければ餌の確保を優先し、慣れてくると逃避行動を起こさないばかりか、逆に謂集効果が得られる可能性もある。しかし、このような状態において魚類に何の影響もないとは言い切れず、小さいながらもストレスを感じていた場合、その蓄積によって摂餌行動や体重の増加率（成長率）に影響を及ぼす可能性が考えられる。このような理由により、本研究ではこれらの慢性影響に着目して実験を行った。

### 7.3. 実験方法

#### 7.3.1. 周波数と音圧の設定

第5章および第6章で示したような風力発電施設の運転時放射音に関する既往の調査結果を参考に、本実験では仮に100 Hzの単一周波数音を使用することとし、音圧を3段階に設定した。観測結果では、より低周波の音が観測されていたが、実験に使用したアンプおよびスピーカーの特性上、100 Hz未満の音を発生させることが難しいことから、本実験では100 Hzを使用することとした。風力発電施設を140 dB re 1  $\mu$ Pa@1 mの点音源と仮定した場合、この音の球面拡散での減衰を考えると、音源からの距離10 mで120 dB re 1  $\mu$ Pa、100 mで100 dB re 1  $\mu$ Paまで減衰することになる。本実験ではこれらの3つの音圧を使用することにした。

#### 7.3.2. 対象魚種

本研究では、マダイ *Pagrus major* の稚魚を対象に実験を行った。マダイは水産有用種であり、種苗生産技術が確立されているため実験に用いる個体を集めることが比較的容易であること、また、マダイの摂餌生態が後述の自発摂餌装置を使用した実験に適していることから、本研究の対象魚種に選定した。本実験で使用したマダイ稚魚の詳細については次項において説明する。

#### 7.3.3. 実験条件

図7-1に実験条件の概要を示し、以下に各条件の説明を行う。

##### 7.3.3.1. 環境条件

実験水槽には600 L円形水槽を4基使用し、海水500 Lを注水した。海水は9 L/min.で常



時注水し続け、水槽内の海水量が一定になるようにオーバーフローさせた。水深は約 60 cm、水温は 25°C で一定に設定した。外部からの光は遮光幕によって遮断し、光条件は 30 W 蛍光灯照明で 12 時間点灯、12 時間消灯のリズムで制御した。なお、明期開始と終了のそれぞれ 30 分間は徐々に光量を変化させ、薄明、薄暮を再現した。この暗幕の設置状況と暗幕内の様子を図 7-2 に示す。

### 7.3.3.2. 音の条件

4 基全ての水槽内には水面直下に水中スピーカー (Fostex, US300) を取り付けた。このうち 1 台のスピーカーはダミーであり音は再生しない。一方、音を再生する 3 台のスピーカーには車載用アンプ (TOA, CA-407SD) を接続し、SD カードに収録した音を再生できるようにした。これらのスピーカーおよびアンプの設置状況を図 7-3 に示す。音のデータは前項で設定した 100 Hz の単一周波数音を、それぞれ 100 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m, 120 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m, 140 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m で再生されるように作成した。なお、実験は遮音空間において実施するのではなく、環境雑音内にこれらの単一周波数音を加える形式とした。これは、

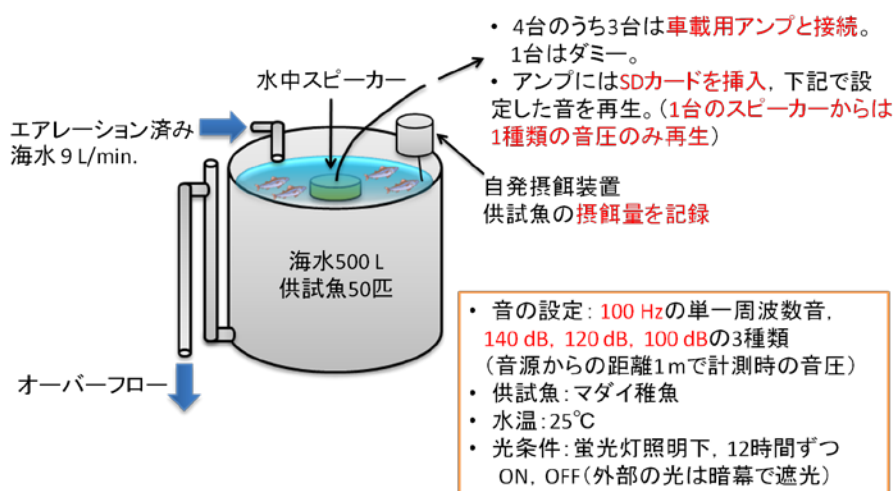


図 7-1 実験条件の概要



図 7-2 暗幕の設置状況 (左) と暗幕内の様子 (右)



図 7-3 水槽内に設置した水中スピーカー（左）とスピーカーに接続したアンプ（右）

実際の海中でも環境雑音が存在し、そこに人工的な音加わることの影響を評価するためである。

図 7-4 から図 7-6 はそれぞれ、100 Hz の単一周波数音を 140 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m, 120 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m, 100 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m の音圧レベルで再生した水槽内の水中音の周波数特性を、図 7-7 は環境雑音のみの水槽内の水中音の周波数特性を示す。これらのデータは水深約 40 cm, 水中スピーカーの中心からの水平距離で約 30 cm の位置で、ハイドロホン（システムインテック, SH20K）を用いて計測した。データの記録方法等は前章の水中音観測と同様の設定で、ハイドロホンのアンプを介してリニア PCM レコーダー（SONY, PCM-M10）に記録した。

水中音の拡散損失は、距離が 2 倍になると球面拡散の場合で 6 dB re 1 $\mu$ Pa, 円筒拡散の場合で 3 dB re 1 $\mu$ Pa であり、水面直下に水中スピーカーを設置した本実験の条件ではこれらの 2 つの損失量の間の値となることが推測される。本実験での設定音圧レベルは音源からの距離を 1 m としたときの値であり、図 7-4 から図 7-7 は音源から 50 cm 未満の距離での計測

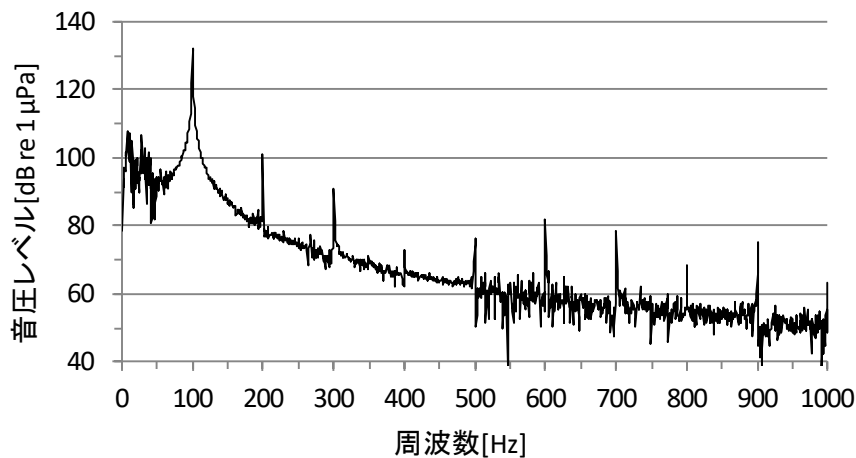


図 7-4 環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 140 dB re 1  $\mu$  Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性

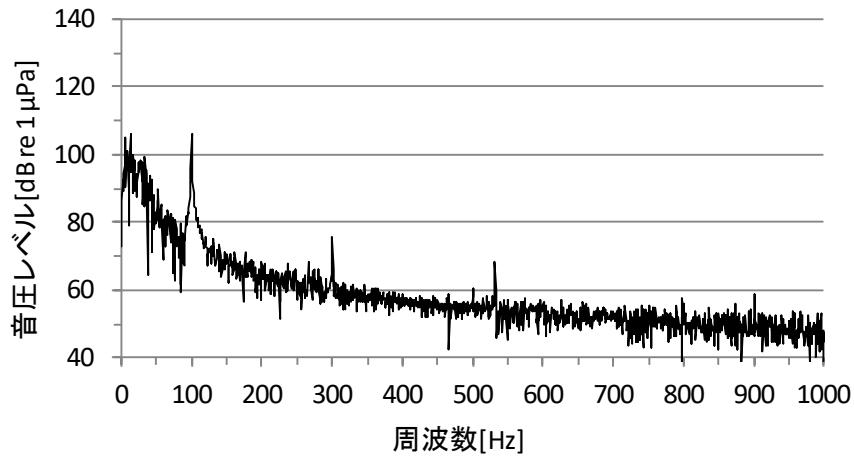


図 7-5 環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 120 dB re 1  $\mu$  Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性

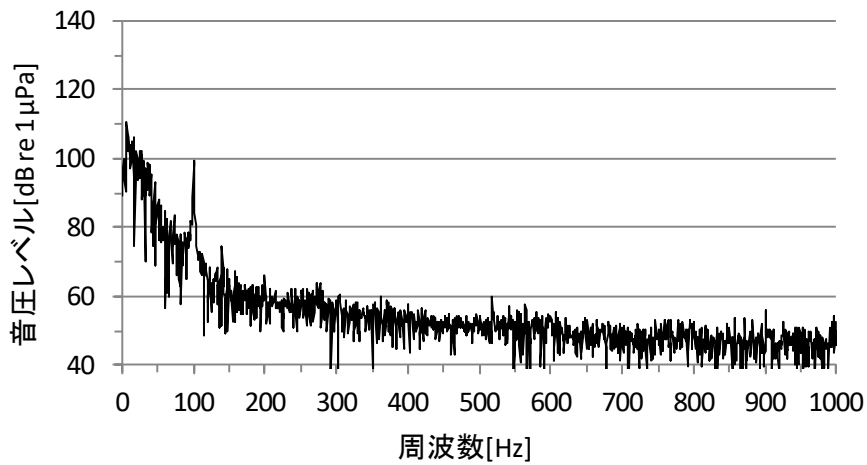


図 7-6 環境雑音に 100 Hz の単一周波数音を 100 dB re 1  $\mu$  Pa @1 m で加えた水槽内の水中音の周波数特性

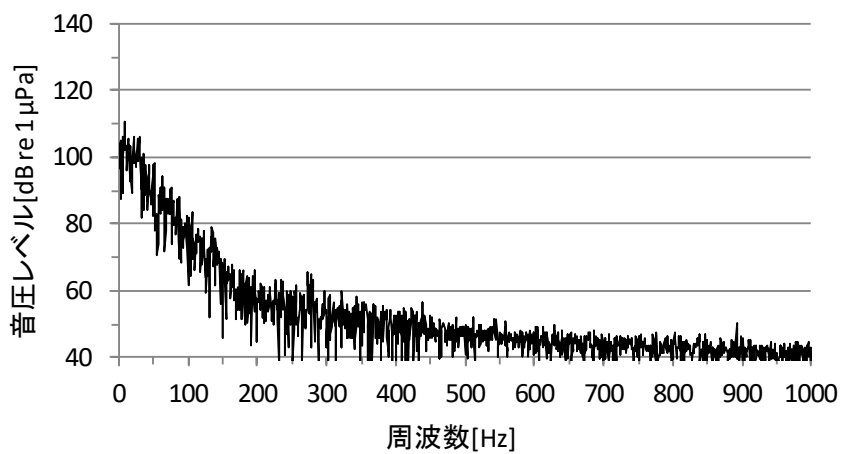


図 7-7 環境雑音のみの水槽内の水中音の周波数特性

データなので、本来は設定音圧レベルより 3~6 dB 大きい値が計測されるべきである。しかし、これらの図から、むしろ設定音圧レベルより小さい値が計測されていることが分かり、これは水槽内の音波の反射による影響と考えられ、複数の反射波が直接波とぶつかり合うことで音波の打ち消し等が生じ、このような計測結果になったのではないかと推測される。

### 7.3.3.3. 供試魚と摂餌に関する条件

上記の条件に設定した水槽に、それぞれ 50 匹の供試魚を収容した。供試魚は各水槽で体重に偏りが出ないように選別した。実験開始前における各水槽内の供試魚の平均湿重量を表 7-1 に示す。

各水槽には自発摂餌装置を設置し、供試魚が餌を欲するとき自発的に摂餌が行えるようにした。一度の作動により装置から給餌される量は  $0.057 \pm 0.0048$  [g] (各水槽の平均±標準偏差) であり、供試魚が装置を作動させた時刻はイベントデータロガー (Onset Computing, HOBO EVENT) により記録された。

本実験に使用した自発摂餌装置は、自動給餌機 (松阪製作所, さんし郎) とこれに接続した自発摂餌スイッチから構成されている。自発摂餌スイッチは、マイクロスイッチ (オムロン, 5GL-SS) のアクチュエーターにステンレスバネ線を接続し、このバネ線の先端に釣り糸 (よつあみ, ケプラート 10 号) を取り付けて製作した。装置の仕組みとしては、供試魚が自発摂餌スイッチの釣り糸を咥えて引っ張ることにより、下方へ約 50 mN 以上の負荷がかかると自動給餌機が作動し一定量の飼料が給餌される仕組みとなっている。給餌機の中には市販の養魚用ペレット (日清丸紅飼料, おとひめ EP-1, 粗タンパク 48%, 粗脂肪 13%, 粗繊維 2%, 粗灰分 17%) を入れた。

表 7-1 実験開始前における各水槽内の供試魚の平均湿重量

水槽の音の条件	平均湿重量±標準偏差 [g]
環境雑音 + 100 Hz / 140 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	6.90±1.55
環境雑音 + 100 Hz / 120 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	6.94±1.48
環境雑音 + 100 Hz / 100 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	6.92±1.40
環境雑音のみ	6.91±1.38

### 7.3.3.4. 実験期間と各期間の実施内容

実験期間は次の通りである。(日付は全て 2013 年)

- 調整期間：9 月 10 日～16 日 (7 日間)
- 試験期間：9 月 17 日～11 月 10 日 (55 日間)
  - ・ 期間① (音の再生前のデータ取得期間)：9 月 17 日～10 月 6 日 (20 日間)
  - ・ 期間② (音の再生中のデータ取得期間)：10 月 7 日～10 月 24 日 (18 日間)
  - ・ 期間③ (音の再生後のデータ取得期間)：10 月 25 日～11 月 10 日 (17 日間)

調整期間中は、供試魚の実験水槽への馴致、並びに適正な餌サイズの選定、自発摂餌装置一作動当たりの給餌量の設定を行い、残餌が発生しないことを確認した。

7 日間の調整期間を経て試験を開始し、まず期間①において、いずれの水槽内でも水中スピーカーから音を再生せず、環境雑音のみの状態で 20 日間摂餌行動を記録した。その後、期間②において、3 基の水槽では上述の設定のように 18 日間音を再生し続けた状態で供試魚の摂餌行動を記録し、最後に音の再生を停止し、期間③として 17 日間同様に記録を行った。以上の実施内容により、音の再生によって供試魚の摂餌量や摂餌リズムに変化が生じるかどうかを確認した。また、実験前後に各水槽のマダイ稚魚の平均湿重量を計測し、体重変化への影響も確認した。なお、音は 18 日間の再生期間中を通して常に再生されていた。

#### 7.4. 実験結果

実験によって得られた結果を、供試魚の行動、摂餌日周リズム、摂餌量、体重変化の観点から以下に整理する。

##### 7.4.1. 供試魚の行動

期間①において、供試魚はいずれの水槽内においてもほとんどの個体が水面近くをランダムな方向に定位、遊泳しており、水中スピーカー周辺に定位している場合も多く観察された。その後、音の再生を開始すると、140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の水槽内では音の再生直後に供試魚が水槽底に向かって突進し、水槽底付近で停止と遊泳を繰り返し、約 1 時間は水面近くにほとんど近付かなかった。その後も期間②の間は、ほとんどの供試魚が水槽内の緩やかな水流に対抗して遊泳しており、水中スピーカー周辺に定位することはなかった。一方、120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m および 100 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の音を再生した水槽内では、音の再生による供試魚の顕著な行動変化は観察されず、環境雑音のみの水槽内と比べてもほとんど変化がなかった。

##### 7.4.2. 供試魚の摂餌日周リズム

図 7-8 に①～③の各期間における供試魚の摂餌日周リズムを示す。供試魚の摂餌日周リズムはほとんどが明期に見られ、明期開始から 2 時間後および終了 1 時間前にわずかなピークが確認された。140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の水槽では、音の再生開始から約 1 時間にわたり摂餌要求が認められなくなったが、その後再び摂餌要求を開始し、翌日には安定した摂餌要求が認められた。他の水槽では音の再生に伴う摂餌要求への顕著な影響は認められなかった。結果として、140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の水槽での音の再生直後を除くと、いずれの水槽においても試験期間を通して供試魚の摂餌日周リズムに顕著な変化は認められなかった。

##### 7.4.3. 供試魚の摂餌量

実験開始時における供試魚 1 尾あたりの摂餌量は 0.65～0.75 g/day 程度であり、実験開始から 10 日目まではいずれの水槽内においても摂餌要求回数は増加する傾向が認められた。10 日目以降の摂餌量は日により変動しつつも一定の水準で推移し、実験終了前の 10 日間における平均摂餌量は 1.0～1.5 g/day の範囲であった。

試験期間中の 1 日あたり・供試魚 1 尾あたりの摂餌量の変化を図 7-9 に示す。全て 9 月

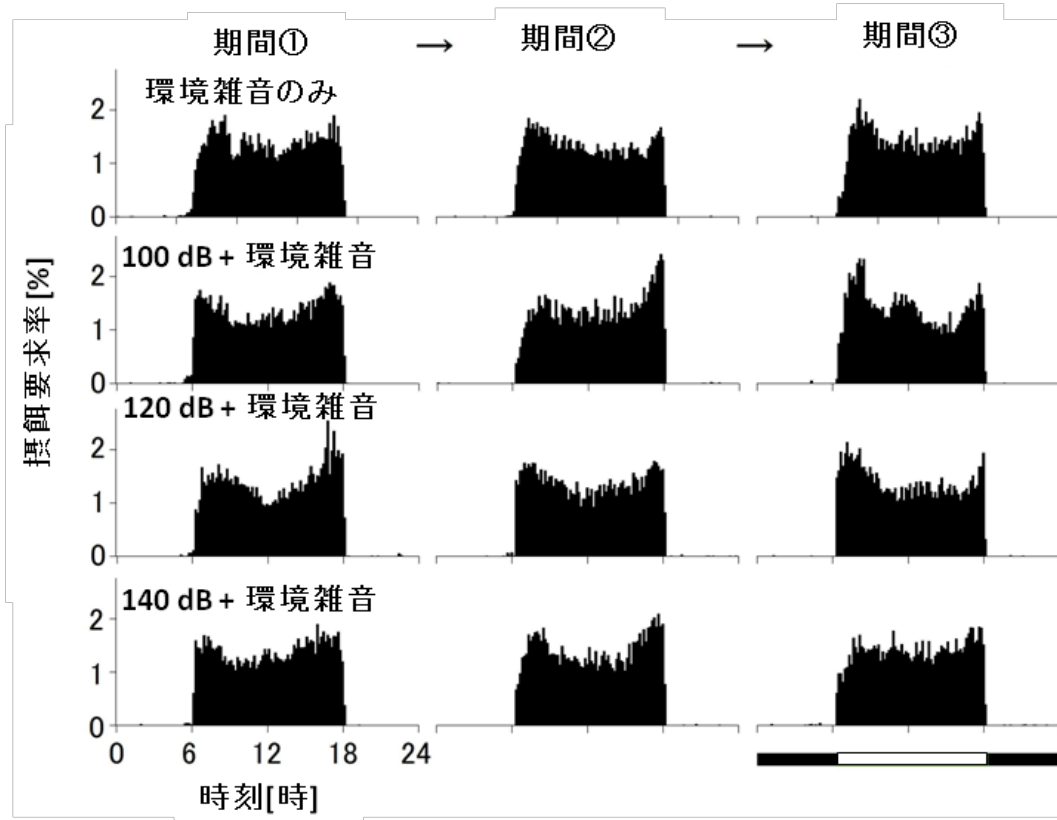


図 7-8 各水槽における試験期間中の供試魚の摂餌日周リズムの変化  
 (グラフは1日の摂餌要求量を100とした場合の10分間あたりの摂餌要求率を示す。図の右下の白黒のバーは明暗周期を示し、白の期間は明期、黒の期間は暗期を示す。)

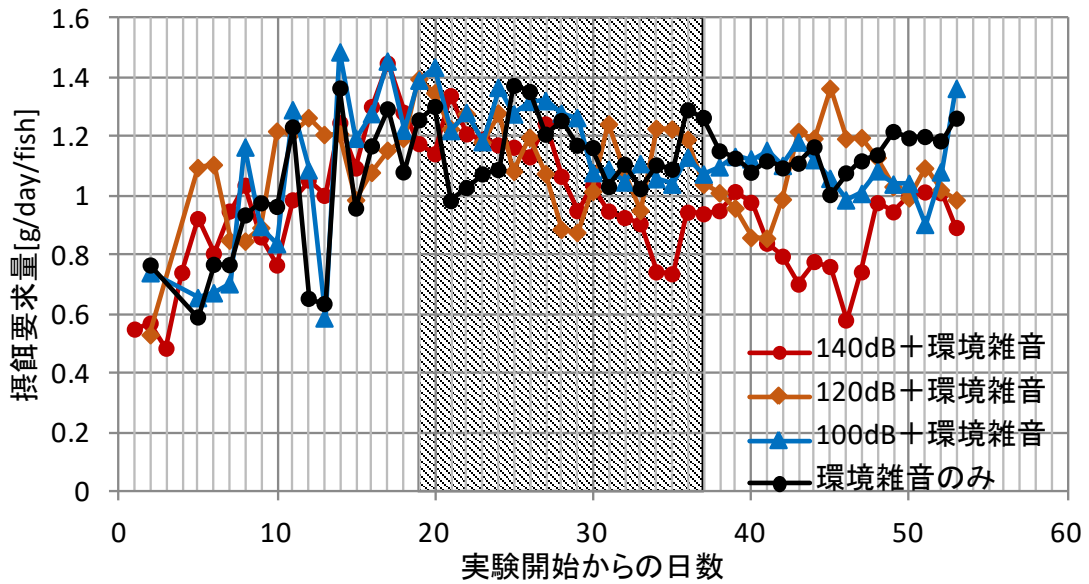


図 7-9 140 dB re 1  $\mu$ Pa の音を再生した水槽内の供試魚の摂餌量の変化  
 (網掛け部分は音の再生期間)

18日から11月9日の期間中のデータを示しており、試験期間の初日と最終日のデータは半日分しかないため除いてある。図中、網掛けした部分は3基の水槽で100 Hzの単一周波数音を再生していた期間②を示す。120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m, 100 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 mの音を再生した水槽および環境雑音のみの水槽内での供試魚の摂餌量は、期間②の音の再生中においてもほぼ音の再生開始前の水準を維持しており、期間③に入っても変化は認められなかった。一方、140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 mの音を再生した水槽では期間②において音の再生を開始した後、次第に摂餌量が減少する傾向が認められ、音の再生停止後においても、期間③の8日目までは減少傾向があり、以降増加に転じた。しかし、他水槽における同期間の摂餌量と比較すると、上記の変化による差はそれほど大きな差ではなかった。

なお、各水槽において自発摂餌装置のトラブルにより給餌が正常に行われなかった日のデータは除外して表示しており、120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 mの水槽ではグラフの1, 3, 4日目のデータ、100 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 mの水槽では48, 49日目のデータ、環境雑音のみの水槽では20日目のデータが除外されている。

#### 7.4.4. 供試魚の体重変化

実験終了時の各水槽のマダイ稚魚の平均湿重量を表 7-2 に示し、表 7-1 と表 7-2 の比較から、実験前後における各水槽の稚魚の平均体重の変化を図 7-10 に示す。この結果から、

表 7-2 実験終了後における各水槽内の供試魚の平均湿重量

水槽の音の条件	平均湿重量±標準偏差 [g]
環境雑音 + 100 Hz / 140 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	50.83±9.35
環境雑音 + 100 Hz / 120 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	49.73±11.64
環境雑音 + 100 Hz / 100 dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	53.71±8.93
環境雑音のみ	54.10±11.27

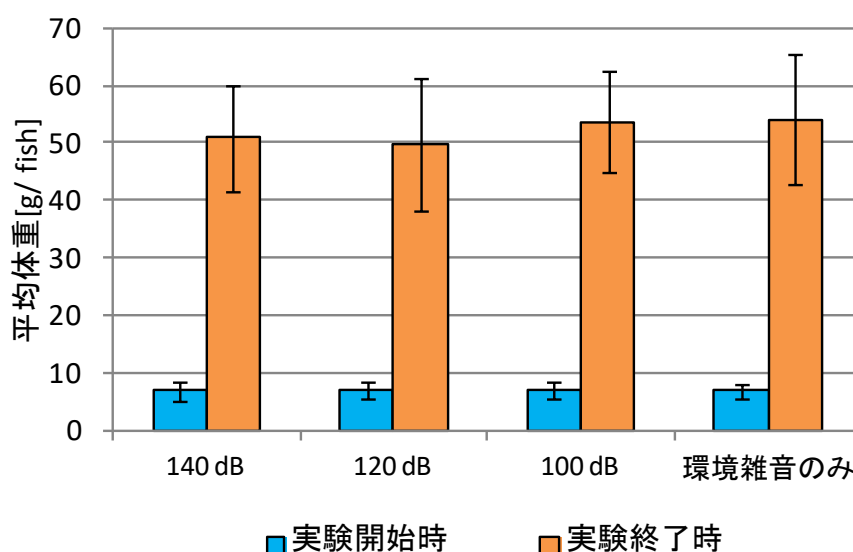


図 7-10 実験前後の各水槽の供試魚の体重の変化 (エラーバーは標準偏差)



140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m および 120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の音を再生していた水槽の稚魚は、100 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の音を再生していた水槽および環境雑音のみの水槽の稚魚と比べて実験終了時の体重がやや軽く、成長が遅いことが分かる。しかし、この結果について「各水槽の供試魚の体重の平均値は全て等しい」という帰無仮説を立てて Z 検定を行った結果、棄却域を 10 %にした場合でも棄却されず、この実験結果からは有意差なしと判断された。

## 7.5. 実験結果についての考察

本実験では、100 Hz の単一周波数音を 100 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m または 120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m で再生した場合、その水槽内の供試魚の行動、摂餌日周リズム、摂餌量について、環境雑音下で飼育した供試魚との間にほとんど差は認められなかった。一方、140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m で再生した場合には、再生開始直後に水槽内の供試魚の行動に顕著な変化が現れ、摂餌行動も停止したが、これらの顕著な変化は数時間後には収まった。しかし音の再生前の期間①と同じ状態に戻ったわけではなく、行動、摂餌量ともに多少変化が残っており、摂餌量は期間②以降減少傾向が見られた。体重の変化については、140 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m または 120 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m の水槽内の供試魚において、環境雑音のみの水槽内の供試魚より成長が遅れているように見えたが、統計的な有意差は確認できなかった。

以上の結果から、今回の実験では人工的に加えた 100 Hz 単一周波数音の音圧レベルの違いによる魚類の行動および摂餌行動への影響が確認できたが、体重の変化、すなわち成長率への明確な影響は確認されなかった。しかし、摂餌行動の変化が起こっているということは、成長への影響が起こる可能性も否定できず、水中音の周波数や音圧レベルの設定、実験期間や実験開始時の供試魚の成長段階、供試魚の数等の実験条件を変更することで体重の変化にも有意差が確認される可能性はある。周波数については、実験機材の制約により 100 Hz の音を使用したが、機材を変更し、観測において確認されたような、より低い周波数の音を使用することで、今回の実験結果とは異なる影響が確認できる可能性がある。また、供試魚の成長段階については、魚類の成長に伴い音への感受性も変化することが考えられ、今回の実験より早い成長段階の、より成長率の高い時期に実験をすることにより、体重の変化が現れやすくなる可能性も考えられる。

また、第 5 章において紹介した海外文献は、魚類の成長への影響を調査したものではないため本実験の結果と直接比較することはできないが、これらの文献で調査された聴覚閾値への影響と成長への影響を関連付けて調査することは意義のあるものと考えられ、上述の実験条件と同様に、今後の課題として検討したい。

このような実験で魚類の成長に明確な影響が出た場合、実験結果を基に水中放射音に関する環境影響評価の基準値を決めるとすれば、洋上風力発電施設からの発生音の音圧レベルを、影響が現れない音圧レベル以下に抑えるべき、というように基準を定めることができる。

なお、実海域においては施設からの放射音を感知した魚類が逃避することも可能であるが、本実験は水槽内という閉鎖空間で実施されたことに留意する必要がある。ただし、適切な生息環境が施設近傍に限られる場合や、付近に養殖施設等が存在する場合、また、上述したように魚類が逃避するレベルではない場合や音に慣れた状態でも自覚のないストレスを感じて



いたり、施設への付着生物等の好影響の方が大きく多少のストレスを我慢している場合の慢性影響評価には、今回のような実験手法は有用であると考えられる。ただし、本実験のように水槽という閉鎖的な空間で水中音を設定した場合、7.3.3.2 で述べたように、直接波と反射波のぶつかり合いによって音波の打ち消しが生じ、実際の海域より音の減衰が大きくなってしまうという課題があるため、実験手法の確立にはこの問題の克服も必要となる。



## 8. 結論

本研究では、前半部分（第2章～第4章）において、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクのうち、浮体式施設に特有のリスクを重大リスクとして抽出し、FTA（Fault Tree Analysis）およびETA（Event Tree Analysis）の手法を用いて各リスクの原因と結果を推定した。また、これらの推定結果を利用して、各リスクの原因から結果の一連の流れを示すリスクシナリオを作成し、これらの中から、航路や沿岸施設との位置関係に着目して重要なシナリオを絞り込んだ。次に、これらのシナリオを構成するリスクについて、施設の設置位置によるリスクの変化を定量的に評価する方法を検討し、太平洋側の日本沿岸部を想定した仮想海域における計算例を通して、この評価方法によって施設設置位置を検討する上で重要な項目を整理した。

その結果、風力発電施設の漂流原因別では、船舶の漂流や、風車設計時の想定を超える環境条件の発生に起因するリスクの影響と比べて、船舶の操船ミスに起因するリスクの影響が最も大きく、また、航路に関連するリスクと沿岸施設への衝突リスクを比較すると前者の影響が圧倒的に大きいことを明らかにした。これらのことから、周辺海域への影響の観点から浮体式洋上風力発電施設の設置に適した位置を決めるに当たり、最も影響の大きいリスクは「操船ミスによる船舶の衝突」であることが分かった。

しかし、船舶通航分布がガンマ分布で近似される海域では、航路中心からある一定の距離で急激に船舶の通航量が減少し、航路関連のリスクが総合リスクにほとんど影響しなくなるため、沿岸施設への衝突リスクの空間分布が明確に現れる。日本沿岸域ではこのようにガンマ分布で近似できる船舶通航分布を持つ海域が多いため、航路に関連するリスクが急激に減少する位置より陸側の海域の中から、沿岸施設への衝突確率の小さい位置を選ぶ方法が適切であると考えられる。以上により、本研究では、以下の方針を浮体式洋上風力発電施設の設置位置選定方法として提案した。

「まずは航路中心から離れた、航路関連のリスクの影響が十分に小さくなる海域に絞り、次にその海域内で沿岸施設への衝突リスクの小さい位置を選ぶ。ただし、沿岸施設への衝突リスクの空間分布は環境条件に大きく依存するため、当該海域の環境条件を考慮して定量的に評価することが望ましい。」

この方針は、洋上風力発電事業の有力海域として考えられている、太平洋側の日本沿岸部の多くの海域において共通して利用可能なものであることから、日本沿岸部で浮体式洋上風力発電事業を行う場合の、一般的な適地選定手法の指針を示すことができたと考える。

一方、本研究の後半部分（第5章～第7章）ではまず、洋上風力発電に特有の問題として水中音による海棲生物への影響に着目し、洋上風力発電施設の環境影響に関する先行研究・調査事例について、海外の事例を中心に文献調査を行い、洋上風力発電施設からの水中音およびその生物影響に関する知見を整理した。その結果、施設からの水中放射音の調査や生物の水中音に対する反応を調査した例はいくつかあるものの、両者を別々に調査したものが多く、生物実験を行う際に施設放射音の周波数特性や音圧レベルの調査結果を参考にして実施している例はほとんどないことが分かった。施設からの水中放射音の魚類への影響について

述べた文献もあるものの、別の文献で推測された生物の聴覚特性を観測音と比較して、観測音がその生物の可聴範囲かどうか、または聴覚に損傷を生じるかどうかなどを推測したものに留まる。また、特に海外では海産哺乳類への影響が重視されており、魚類への影響に関する調査例が少ないことや、生物の成長への影響等、慢性影響に関する実験例はほとんどないことが明らかとなった。

上記の調査結果を踏まえ、国内の着床式洋上風力発電施設の運用時および建設時における施設周辺の水中音観測を行い、そのデータ解析によって国内の施設からの水中放射音の音圧レベルや周波数特性に関する知見を得た。また、既知音源を用いた当該海域での水中音減衰特性の調査方法と減衰曲線の推定方法および、これを利用した対象音の音源音圧レベルの推定手法を確立した。これらの調査結果は海外の調査結果と比較しても妥当な結果であり、また、浅海域の水中音減衰曲線の推定については先行研究で示されているものより正確な手法を提案した。本研究において、国内外の着床式施設から発生する水中音の音圧レベルや周波数帯の類似性が示されたことにより、洋上風力先進国で策定されている基準や、水中騒音対策として取り入れられているバブルカーテン等の対策に関する知見を、国内の着床式施設に関する環境基準等の検討時に参考にするのが可能であるということが示された。

魚類への影響の調査については、施設運用時を想定した水中音のマダイ稚魚への慢性影響を評価する水槽実験を行った。本実験は、先行研究では考慮されていなかった慢性影響の評価を目的とし、ストレスによる成長への影響に着目して、摂餌量と体重変化の観点から定量的に評価するものである。その結果、人工的に加えた 100 Hz 単一周波数音の音圧レベルの違いによるマダイ稚魚の行動および摂餌行動への影響が確認されたが、体重の変化、すなわち成長率への明確な影響は確認されなかった。しかし、摂餌行動の変化が起こっているということは、成長への影響が起こる可能性も否定できず、水中音の周波数や音圧レベルの設定、実験期間や実験開始時の供試魚の成長段階、供試魚の数等の実験条件を変更することで体重の変化にも有意差が確認される可能性はある。

今回の実験方法は、魚類が施設から逃避してしまう場合の影響については適切に評価できないが、適切な生息環境が施設近傍に限られる場合や、付近に養殖施設等が存在する場合の評価には有効と考えられる。また、上述の通り、魚類が逃避するレベルではない場合や、音に慣れた状態でも自覚のないストレスに晒されていたり、施設への付着生物等による集魚効果の方が大きく、多少のストレスを感じながらも我慢している状態にある場合も考えられ、このような状態での慢性影響評価には有用な手法であると考えられる。ただし、本実験のように水槽という閉鎖的な空間で水中音を設定した場合、直接波と反射波のぶつかり合いによって音波の打ち消しが生じ、実際の海域より音の減衰が大きくなってしまいう課題があるため、実験手法の確立にはこの問題の克服も必要となる。

このような実験で魚類の成長に明確な影響が出た場合、実験結果を基に水中放射音に関する環境影響評価の基準値を決めるとすれば、洋上風力発電施設からの発生音の音圧レベルを、影響が現れない音圧レベル以下に抑えるべき、というように基準を定めることができる。洋上風力発電施設の設置位置の選定において上記のような実験結果を参考にする場合、水産有用種や希少種等の重要な魚類の生息に適した海域や、養殖施設等の設置海域から、洋上風力

発電施設をどれだけ離して設置すべきか、という観点で施設設置位置の選定に役立てることができる。

ここまで述べてきたように、本研究では周辺航路や沿岸施設等との位置関係による、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの空間分布の推定手法を検討し、施設の設置位置を選定する際に重要となる項目を整理して、その選定方針を提案した。また、これまで情報が不足していた水中音の魚類への慢性影響の実験による評価手法を検討し、実験結果から新たな知見を得ることができた。浮体式洋上風力発電施設の設置位置を選定する際には、従来考慮していた事項に加え、本研究で示したような、周辺航路や沿岸施設等との位置関係を考慮して安全性に関するリスクの空間分布を定量的に評価した結果や、水中音による魚類への慢性影響を含めた、環境影響評価の結果を踏まえて検討すべきであると考ええる。

本研究で示した、浮体式洋上風力発電施設の安全性に関するリスクの空間分布の推定手法や、水中音観測および生物実験による慢性的な環境影響評価の手法は、今後、浮体式洋上風力発電の安全性および環境影響の評価とその評価結果に基づく施設設置位置の検討において、有用な手段になると考えられる。



## 9. 謝辞

指導教員の多部田茂 教授には、先生のご専門外の内容を含む研究にも関わらず、長期にわたりご丁寧にご指導頂き、心より御礼申し上げます。

副査の高木健 教授、鈴木英之 教授、浅田昭 教授、北澤大輔 准教授には、ご多忙中にも関わらず、本論文の予備審査会や個別説明・相談に応じて頂き、感謝申し上げます。

本研究の第 2 章の内容は、国土交通省委託事業の成果報告書である「平成 24 年度「浮体式洋上風力発電施設の安全確保及び国際標準化のための研究開発」報告書」に記載の研究成果の一部を含み、海上技術安全研究所の國分健太郎様、井上俊司様との共同研究「浮体式洋上風力発電施設の漂流に係るリスクシナリオの検討」、および、中條俊樹様との共同研究「浮体式洋上風力発電施設の漂流リスク分析と漂流シミュレータ」の内容を含む。これらの共著者の皆様に感謝申し上げます。

第 2 章および第 3 章においては、リスク解析全般について海上技術安全研究所の伊藤博子様にご指導いただいた。また、第 3 章において使用した AIS 情報の解析データは、伊藤博子様と高梨恵美子様にご提供いただいたものである。これらのご指導およびデータのご提供に感謝申し上げます。

第 4 章において使用した気象・海象データは、谷口友基様にご提供頂いた。また、ご提供頂いたデータに関するご指導を頂き、厚く御礼申し上げます。

第 6 章第 1 節の着床式施設を対象とした観測では、株式会社ウィンド・パワーの小佐々誠様にお世話になり、海上技術安全研究所の今里元信様、宮田修様と共同で実施した。第 6 章第 2 節は、東光電気工事株式会社の岡野雅史様、海上技術安全研究所の今里元信様、宮田修様との共同研究で実施し、本論文には、共著で執筆した「着床式洋上風力発電施設の建設時における水中放射音の調査」等の内容を含む。

第 7 章の実験は、海上技術安全研究所の今里元信様、海洋生物環境研究所の島隆夫様、長谷川一幸様との共同研究により実施し、共著論文「洋上風力発電施設からの水中放射音の環境影響評価手法の提案および実験例」の内容を本論文に含む。

第 6 章および第 7 章の共同研究者および関係者の皆様に心より感謝申し上げます。特に今里元信様には、これらの観測および実験の全てを通して水中音データの解析にご尽力いただき、厚く御礼申し上げます。

また、海上技術安全研究所の井上俊司様、石田茂資様、藤原敏文様には、全体を通して相談に応じて頂き、また、ご丁寧なご指導を賜り、心より感謝の意を表す。その他、本論文の執筆にご理解・ご協力を頂いた海上技術安全研究所の職員の皆様に御礼申し上げます。





## 10. 参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁, “平成 25 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2014),” 2014.
- [2] 地球温暖化対策推進本部, “京都議定書目標達成計画の進捗状況,” 2014.
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “なっとく! 再生可能エネルギー,” [オンライン]. Available: [http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/renewable/outline/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/outline/). [アクセス日: 16 2 2015].
- [4] 株式会社エックス都市研究所, アジア航測株式会社, パシフィックコンサルタンツ株式会社, 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社, “平成 22 年度環境省委託事業 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書,” 2011.
- [5] 東京電力株式会社, “火力発電について,” [オンライン]. Available: [http://www.tepco.co.jp/solution/power\\_equipment/thermal\\_power/index-j.html](http://www.tepco.co.jp/solution/power_equipment/thermal_power/index-j.html). [アクセス日: 30 5 2015].
- [6] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版,” 2014.
- [7] Global Wind Energy Council, “GLOBAL WIND REPORT ANNUAL MARKET UPDATE 2013,” 2013.
- [8] 認定 NPO 法人 環境エネルギー政策研究所, “自然エネルギー白書 2014,” 2014.
- [9] Statoil, “Hywind Demo,” Statoil, [オンライン]. Available: <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Pages/HywindPuttingWindPowerToTheTest.aspx?redirectShortUrl=http%3a%2f%2fwww.statoil.com%2fhywind>. [アクセス日: 16 2 2015].
- [10] 宇都宮智昭, “浮体式洋上風力発電用ハイブリッドスパーの実証実験,” 風力エネルギー Vol. 33, No. 4, 一般社団法人 風力エネルギー学会, 2009.
- [11] GOTO FOWT, “GOTO FOWT Floationg Offshore Wind Turbine,” [オンライン]. Available: <http://goto-fowt.go.jp/>. [アクセス日: 17 2 2015].
- [12] 宇都宮智昭, 佐藤郁, 白石崇, 乾悦郎, 石田茂資, “浮体式洋上風力発電の実用化に向けて—五島市梶島における実証事業—,” 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 70(2), pp. I\_1-I\_6, 2014.
- [13] Fukushima Offshore Wind Consortium, “福島洋上風力コンソーシアム,” [オンライン]. Available: <http://www.fukushima-forward.jp/>. [アクセス日: 17 2 2015].
- [14] 福島洋上風力コンソーシアム, “福島復興浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業 - 第 1 期実証研究事業 -, ” [オンライン]. Available: <http://www.fukushima-forward.jp/pdf/pamphlet4.pdf>. [アクセス日: 17 2 2015].

- [15] Det Norske Veritas AS, “Design of Floating Wind Turbine Structure, Offshore Standard DNV-OS-J103,” 2013.
- [16] 国土交通省海事局, “浮体式洋上風力発電施設の普及促進についてー 安全確保のため技術基準を制定ー, ” [オンライン]. Available: <http://www.mlit.go.jp/maritime/safetyenv/yojyofuryoku/fukyusokushin.html>. [アクセス日: 13 2 2015].
- [17] 国土交通省海事局, 独立行政法人海上技術安全研究所, 国立大学法人東京大学, “浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン,” 2014.
- [18] Statoil, “Hywind by Statoil The floating wind turbine,” [オンライン]. Available: [http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Downloads/Hywind\\_nov\\_2012.pdf](http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Downloads/Hywind_nov_2012.pdf). [アクセス日: 16 2 2015].
- [19] 海上技術安全研究所, 東京大学, “別添10 浮体式洋上風力発電施設非常時マニュアル案,” 著: 平成24年度「浮体式洋上風力発電施設の安全確保及び国際標準化のための研究開発」報告書, 2013.
- [20] 鈴木英之, 栗本優, 北原悠, 福本幸成, “ウィンドファームにおける浮体式風車の連鎖漂流リスクに関する研究, 風力エネルギー Vol. 33(2009) No. 3, p.96-103,” 一般社団法人 日本風力エネルギー学会, 2009.
- [21] 北原悠, “係留系強度モデルを用いたウィ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,” 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 H21 年度修士論文, 2009.
- [22] 村竹美音, “浮体式洋上ウィンドファーム内での船舶衝突を考慮した風車漂流リスク評価,” 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24年度修士論文, 2013.
- [23] 中尾徹, “風力発電の環境影響,” 電気学会誌, Vol.31, No.7, pp.422-423, 2011.
- [24] 小川主水, 佐藤建吉, “風力発電用風車の日影による環境影響シミュレーション,” [オンライン]. Available: <http://www.eureka.tu.chiba-u.ac.jp/shadow.pdf>. [アクセス日: 11 6 2015].
- [25] 日下賢一, 佐藤建吉, “風力発電における低周波騒音・振動についての調査～“風車病”の解消のために～, ” [オンライン]. Available: <http://www.eureka.tu.chiba-u.ac.jp/study/windpower/kusaka.pdf>. [アクセス日: 11 6 2015].
- [26] 環境省総合環境政策局, “風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書,” 2011.
- [27] 環境省総合環境政策局環境影響評価課, “諸外国における風力発電所に係る環境影響評価について (景観関連), ” 第2回風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会配布資料 3-4, 2010.

- [28] 環境省総合環境政策局環境影響評価課, “諸外国における風力発電所に係る環境影響評価について(騒音・低周波音関連),” 第3回風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会配布資料3-4, 2010.
- [29] 環境省総合環境政策局環境影響評価課, “洋上風力発電に関する環境影響評価について,” 第5回風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会配布資料3, 2011.
- [30] R. Anderson, A. Copping and F. V. Cleve, "Environmental Risk Evaluation System (ERES) for Offshore Wind," Mock-Up of ERES Fiscal Year 2010 Progress Report, Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [31] P. Aker, A. Jones, A. Copping, “Offshore Wind Turbines Estimated Noise from Offshore Wind Turbine, Monhegan Island, Maine,” Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [32] M. Halvorsen, T. Carlson, A. Copping, “Effects of Tidal Turbine Noise on Fish, Task2.1.3.2: Effects on Aquatic Organisms: Acoustics/Noise - Fiscal Year 2011 Progress Report,” Pacific Northwest National Laboratory, 2011.
- [33] M. Halvorsen, T. Carlson, A. Copping, “Laboratory Evaluation of the Effects of Turbine Noise on Fish,” Pacific Northwest National Laboratory, Recent Developments in Research on the Environmental Effects of MHK Technologies, 2013.
- [34] 塩莉恵, 國分健太郎, 井上俊司, “浮体式洋上風力発電施設の漂流に係るリスクシナリオの検討,” 日本船舶海洋工学会, 平成24年秋季講演会講演論文集, 2012.
- [35] 塩莉恵, 中條俊樹, “浮体式洋上風力発電施設の漂流リスク分析と漂流シミュレータ,” 海上技術安全研究所研究発表会講演集, PS pp.55-56, 2013.
- [36] 海上技術安全研究所, 東京大学, “別添1 リスク解析による事故シナリオの作成,” 著: 平成24年度「浮体式洋上風力発電施設の安全確保及び国際標準化のための研究開発」報告書, 2013.
- [37] M. G. Stewart, R. E. Melchers, 技術分野におけるリスクアセスメント, 酒井信介監訳, 小林英男, 小川武史, 佐々木哲也ほか共訳, 森北出版社, 2003.
- [38] 4C Offshore, “Offshore Wind Turbine: G128-5.0 MW, Gamesa,” [オンライン]. Available: <http://www.4coffshore.com/windfarms/turbine-gamesa-g128-5.0-mw-tid76.html>. [アクセス日: 12 11 2014].
- [39] 海上技術安全研究所, 東京大学, “平成23年度「浮体式洋上風力発電施設の安全性に関する研究開発」報告書,” 2013.
- [40] 土門明, 泉宮尊司, 石橋邦彦, “風, 波と流れによる漂流物の抗力係数および漂流予測に関する研究,” 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I\_1031-I\_1036, 2012.
- [41] 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,” 日本造船学

会論文集 Vol.192, pp.103-111, 2002.

- [42] 高橋宏直, 後藤文字, 安部智久, “統計解析による船舶諸元に関する研究—船舶の主要緒元の計画基準(案)—,” 国土技術政策総合研究所研究報告第28号, 2006.
- [43] S. Haugen and T. Moan, "Probabilistic evaluation of Frequency of collision between ships and offshore platforms," International association for civil engineering reliability and risk analysis, sixth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering mexico city, mexico, pp.977-984, 1991.
- [44] J.-E. Vinnem, "Collision Risk Modelling," in *Offshore Risk Assessment Vol 1 Principles, Modelling and Applications of QRA Studies, Third Edition*, H. Pham, Ed., Springer, 2014, pp. 313-367(Chap.9).
- [45] S. Haugen and T. Moan, "Frequency of collision between ships and platforms," OMAE - Vol.2, Safety and Reliability, ASME, pp.389-365, 1992.
- [46] 伊藤博子, 矢加部文, “沿海海域における船舶交通流のモデル化について,” 日本船舶海洋工学会論文集第19号, pp.235-244, 2014.
- [47] 伊藤博子, 高梨恵美子, “私信,” 2014.
- [48] 船舶事故ハザードマップ, “<http://jtsb.mlit.go.jp/hazardmap/>,” 国土交通省運輸安全委員会, [オンライン]. Available: <http://jtsb.mlit.go.jp/hazardmap/>. [アクセス日: 15 12 2014].
- [49] 庄司邦昭, “係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 造船学会論文集第138号,” 1975.
- [50] S. B. W. M. a. G. S. J. Jonkman, “Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development,” Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.
- [51] 牛山泉, 風力エネルギーの基礎, オーム社, 2005.
- [52] 石原孟, 本田明弘, 吉田茂雄, 久保典男, “第4章 風荷重の評価,” 著: 風力発電設備支持構造物構造設計指針・同解説[2010年版], 石原孟, 編, 土木学会, 2010, pp. 77-150.
- [53] I. E. Commission, “IEC 61400-3 International Standard Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines,” Geneva, Switzerland, 2009.
- [54] 今井功, 流体力学(前編), 裳華房, 1976.
- [55] International Standard Organization, “Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures -Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units,” ISO 19901-7:2013(E), Switzerland, 2013.
- [56] 小田野直光, 澤田健一, 望月宙充, 平尾好弘, 浅見光史, “放射性輸送物の海上輸送におけるリスク評価に関する研究—リスク評価のための海難事故データの整備—,” 海上技術安全研究所報告第10巻第3号, pp.93-106, 2010.

- [57] 金湖富士夫, “FSA 関連,” 海上技術安全研究所報告第 12 巻第 4 号, pp.31-42, 2012.
- [58] 海上保安庁, “海難の現況と対策について (平成 25 年度版),” 2014.
- [59] 独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所, “沖合養殖の実態に関する調査,” 2007.
- [60] 小路淳, “藻場の生態系サービスの経済的価値評価: 魚類生産の「原単位」から「日本一」を探る,” 環境省.
- [61] 上五島石油備蓄株式会社, “石油備蓄施設,” [オンライン]. Available: <http://www.kamigoto.co.jp/facility/index.html>. [アクセス日: 19 1 2015].
- [62] “マリンネット,” マリンネット株式会社, [オンライン]. Available: <http://www.marine-net.com/CMMNMN01.do>. [アクセス日: 12 12 2014].
- [63] J. Nedwell, D. Howell, “A review of offshore windfarm related underwater noise sources. Report No.544 R 0308,” Collaborative Offshore Wind Energy Research Into the Environment, 2004.
- [64] J. Nedwell, A. Turnpenny, J. Langworthy, B. Edwards, “Measurements of underwater noise during piling at the Red Funnel Terminal, Southampton, and observations of its effect on caged fish.,” Subacoustech Ltd., 2003.
- [65] K. Engell-Sørensen, P. H. Skyt, “Evaluation of the Effect of Noise from Offshore Pile-Driving on Marine Fish,” Bio/consult as, Johs. Ewaldsvej 42-44, DK-8230 Åbyhøj, Tech Rep. 1980-1-03-1- rev. 2. to: SEAS, Slagterivej 25, DK-4690 Haslev..
- [66] J. Tougaard, J. Carstensen, O. D. Henriksen, H. Skov, J. Teilmann, “Short-term effects of the construction of wind turbines on harbour porpoises at Horns Reef,” Technical Report to Techwise A/S, HME/362-02662, Hedeselskabet, Roskilde., 2003.
- [67] San Francisco - Oakland Bay Bridge, Pile Installation Demonstration Project, “Fisheries Impact Assessment,” PIDP EA 01208, Caltrans Contract 04A0148, Task Order 205.10.90, PIDP 04-ALA-80-0.0/0.5, 2001.
- [68] S. Koschinski, B. M. Culik, O. D. Henriksen, N. Tregenza, G. Ellis, C. Jansen, G. Kathe, “Behavioural reactions of free-ranging porpoises and seal to the noise of a simulated 2MW windpower generator,” MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, Vol. 265, pp.263-273, 2003.
- [69] K. Engell-Sorensen., “Possible effects of the offshore windfarm at Vindeby on the outcome of fishing,” Tech. Rep. 1920-03-001 rev. 2., Bio/consult A/S report to SEAS, 2002.
- [70] Ingemansson Technology AB, “Utgrunden off-shore wind farm - Measurements of underwater noise,” 2003.
- [71] K. Betke, M. S.-v. Glahn, R. Matuschek, “Underwater noise emissions from offshore wind turbines,” Proceedings of CFA/DAGA, 2004.

- [72] H. Bailey, B. Senior, D. Simmons, J. Rusin, G. Picken , T. M. Paul, “Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals,” Elsevier Ltd., *Marine Pollution Bulletin* 60, pp.888-897, 2010.
- [73] 戸田建設株式会社, 株式会社日立製作所, 芙蓉海洋開発株式会社, 国立大学法人京都大学, 独立行政法人海上技術安全研究所, “平成25年度環境省委託事業 平成25年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書,” 2014.
- [74] R. Kikuchi, “Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region,” Elsevier Ltd., *Marine Pollution Bulletin* 60, pp.172-177, 2010.
- [75] M. Wahlberg , H. Westerberg, “Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms,” *Marine ecology. Progress series*, vol. 288, pp. 295-309, 2005.
- [76] A. B. Gill, “Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone,” *Journal of Applied Ecology*, Volume 42, Issue 4, pp. 605-615, 2005.
- [77] F. Thomsen, K. Lüdemann, R. Kafemann , W. Piper, “Effects od offshore wind farm noise on marine mammals and fish,” biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd., 2006.
- [78] J. Teilmann , J. Carstensen, “Negative long term effects on harbour porpoises from a large scale offshore wind farm in the Baltic - evidence of slow recovery,” *Environmental Research Letters* 7, 045101, pp.1-10, 2012.
- [79] M. P. Thompson, L. David, B. Tim, S. Dave, R. Jan , B. Helen, “Assessing the responses of coastal cetaceans to the construction of offshore wind turbines,” *Marine Pollution Bulletin* 60, pp.1200-1208, 2010.
- [80] E. R. Skeate, M. R. Perrow , J. J. Gilroy, “Likely effects of construction of Scroby Sands offshore wind farm on a mixed population of harbour Phoca vitulina and grey Halichoerus grypus seals,” *Marine Pollution Bulletin* 64 pp.872-881, Elsevier Ltd., 2012.
- [81] M. R. Perrow, J. J. Gilroy, E. R. Skeate , M. L. Tomlinson, “Effects of the construction of Scroby Sands offshore wind farm on the prey base of Little tern *Sternula albifrons* at its most important UK colony,” *Marine Pollution Bulletin* 62, pp.1661-1670, Elsevier Ltd., 2011.
- [82] C. B. Hvidt, S. B. Leonhard, M. Klastrup , J. Pedersen, “Hydroacoustic Monitoring of Fish Communities at Offshore Wind Farms, Horns Rev Offshore Wind Farm Annual Report 2005,” 2006.
- [83] M. E. Smith, A. S. Kane , A. N. Popper, “Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*),” *The Journal of Experimental Biology* 207,

pp.427-435, The company of Biologists, 2004.

- [84] A. R. Scholik , H. Y. Yan, “Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish,” *Hearing Research*, Volume 152, Issues 1-2, pp.17-24, 2001.
- [85] M. C. Hastings, A. N. Popper, J. J. Finneran , P. J. Lanford, “ Effects of low-frequency underwater sound on hair cells of the inner ear and lateral line of the teleost fish *Astronotus ocellatus*,” *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.99 No.3, pp.1759-1766, 1996.
- [86] 株式会社 日立製作所, “諸元 風力発電システム HTW2.0-80 ,” 株式会社 日立製作所 , [ オ ン ラ イ ン ]. Available: [http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/products/htw2000\\_80/specification/index.html](http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/products/htw2000_80/specification/index.html). [アクセス日: 9 3 2015].
- [87] 塩莉恵, 今里元信, 宮田修, 岡野雅史, “着床式洋上風力発電施設の建設時における水中放射音の調査,” *日本沿岸域学会, 沿岸域学会誌*, Vol.26, No.1, pp.81-90, 2013.
- [88] M. Shiokari, M. Imasato, O. Miyata , M. Okano, “Survey on the Underwater Noise from the Bottom Fixed Offshore Wind Turbine during Construction,” *The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers & Royal Institution of Naval Architects, Proceedings of the International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy*, 2013.
- [89] 鎌田弘志, “ソーナー入門,” *海洋音響の基礎と応用第 4 章*, 海洋音響学会編, 成山堂書店, 2004.
- [90] W. Thorp, “Analytic description of the low frequency attenuation coefficient,” *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.33, pp.334-340,1961.
- [91] M. Schulkin , H. Marsh, “Sound absorption in seawater,” *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.34, pp.864-86, 1962.
- [92] 塩莉恵, 今里元信, 島隆夫, 長谷川一幸, “洋上風力発電施設からの水中放射音の環境影響評価手法の提案および実験例,” 第 24 回海洋工学シンポジウム講演要旨集, 2014.
- [93] 谷口友基, 石田茂資, 井上俊司 , 高田篤, “海洋エネルギーポテンシャルの新しい評価法,” 第 24 回海洋工学シンポジウム講演要旨集, 2014.