

令和元年(第19回)海上技術安全研究所研究発表会

浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性基準 合理化に関する検討

海洋先端技術系 中條 俊樹、羽田 絢、藤原 敏文
構造安全評価系 山田 安平、小森山祐輔、越智 宏
特別研究主幹 井上 俊司



- * 船舶安全法に基づき構造や設備の要件を定めた浮体式洋上風力発電施設技術基準が国土交通省海事局より発行(平成26年)。浮体式風力発電施設(FOWT)の実現を安全面から支援。
- * 海上技術安全研究所を中心に、同基準・安全ガイドラインを作成。
- * IEC61400-3-2の発効予定のドラフト…一定の条件下では損傷時復原性の確保が不要の記載あり。
- * 浮体式風力発電施設(FOWT)の多くは浮体規模が小さく、防水区画の設置は設計・建造において、コスト面で不利になる可能性。
- * 損傷時復原性の確保不要 ⇒ 経済性向上
- * 一方で、損傷時復原性の確保が不要となる条件が不明確。

- IEC61400-3-2の解釈に関して、損傷時復原性の確保が不要となる条件を明確にすること。
 - * IECドラフトに示されている確率論的な手法を用いて、損傷時復原性の要不要を検討する手法の提示。
 - * その際に、基準の安全性レベルが低下していないことを定量的に示す具体的な手法の提示。

- 損傷時復原性において想定される損傷の原因
 - * 船舶等との衝突
 - * 係留系に働く大張力による係留索取り付け部の破損
 - * 腐食・疲労等による亀裂
 - * etc.
- 既存の安全ガイドラインにおいて、船舶等との衝突では、損傷時復原性以外（主に防水区画の設置）の対応策がない。
- 他の損傷に対しては、複数の手段で対応可能。
- 船舶等との衝突については、損傷時復原性の確保が不要となる場合に、別途安全対策が必要と考えられる。

- * 復原性の喪失原因：船舶との衝突
- * 浮体に損傷時復原性が無い場合に、衝突により全損（沈没・転覆）に至る現象の安全性レベルが、一般的な構造損傷による全損の安全性レベルを下回らないことを示す。
- * 損傷時復原性が無い：防水区画がなく、浸水が浮体内部全体に拡大



- * $PS \geq PT = P1 \times P2$ を満たす場合に損傷時復原性の確保を不要とできる
 - * P1: 衝突確率
 - * P2: 衝突による全損確率
 - * PS: 目標損傷確率 = 一般的な構造損傷による全損に対応する安全レベル相当の発生確率

損傷時復原性確保の要不要判定の手順

FOWT設置海域の
航行船舶調査

- AIS (Automatic Identification System) データ (緯度・経度) から想定される浮体設置位置と個々の船舶の距離を求める。
- 衝突確率 (P_1) を求める。

目標損傷確率
(PS) と比較

- 目標損傷確率 (PS) を下回れば ($PS \geq P_1$)、損傷時復原性の確保が不要。
- 上回れば、衝突影響を評価。

$PS < P_1$

衝突影響の評価

- 衝突により破口が発生するか評価する。評価手法は、FEM解析等を活用。
- 全損確率 (P_2) を求める。

$PS \geq P_1$

目標損傷確率
(PS) と比較

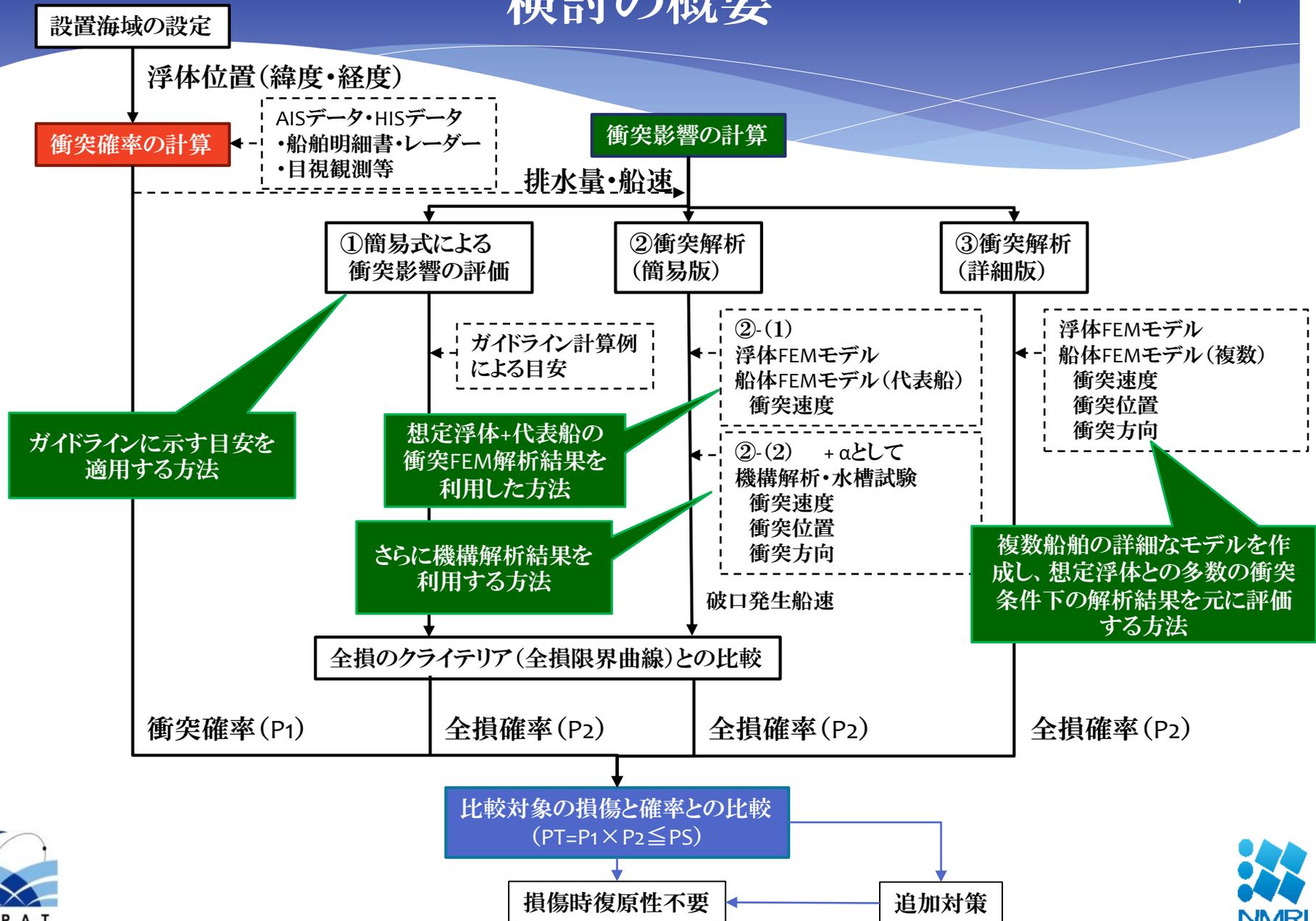
- 衝突確率と全損確率の結合確率 (PT) が目標損傷確率を下回れば ($PS \geq PT = P_1 \times P_2$)、損傷時復原性の確保不要。
- 上回れば、衝突エネルギーを軽減する追加対策を検討。

$PS \geq PT = P_1 \times P_2$

損傷時復原性不要

必要に応じ追加対策

検討の概要



●航行船舶の調査

- * 浮体設置海域周辺の航行船舶を調査し、衝突確率を計算。
- * 調査海域…浮体周辺の±10海里を基本。
- * 調査データ…AISデータから、位置情報を使用。衝突影響の評価には船速・排水量を使用する。基本的に1年間のデータを使用。
- * ※AIS非搭載船(主に小型船)…目視観測やレーダ観測、港湾統計等を組み合わせて位置情報・船速・排水量を求める。

●衝突確率の計算

- * 個船ごとの接近率を求める。
- * 浮体周辺の年間船舶数分を足し合わせ、年間接近率を求める。
- * 避航失敗確率(P_C)をかけ、年間衝突確率を計算する。

浮体周辺の年間船舶数

$$P1 \approx \sum_{i=1}^N (n_{gi}) \times P_C$$

個船ごとの浮体への接近率

- * 年間衝突確率が目標損傷確率を下回れば、損傷時復原性の確保が不要。

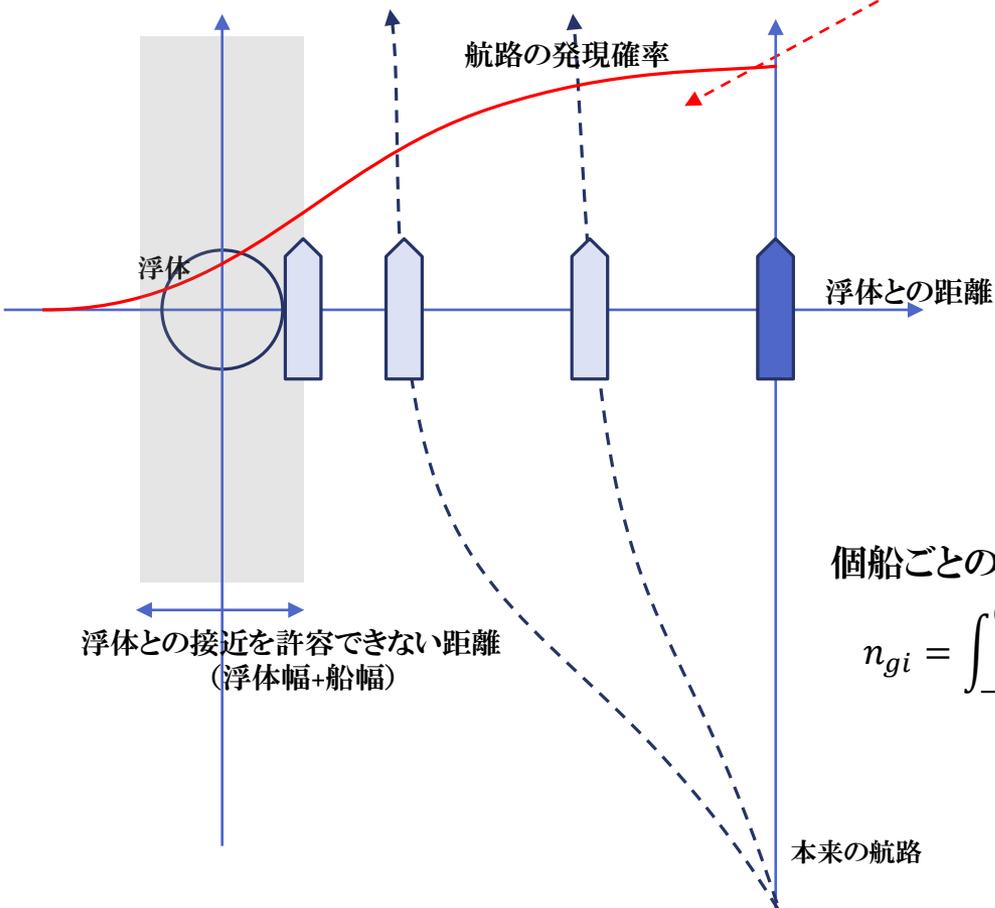
$$PS \geq P1$$

- * 年間衝突確率が目標損傷確率を上回れば、衝突影響を評価。

検討の流れ－衝突確率P1の計算

* 衝突確率の前提条件

船舶の通過位置が航路を外れる確率が正規分布に従うとする



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

平均値: 個船と浮体との距離

標準偏差: 本来の航路に対するばらつき
既存ウインドファーム周辺の航行
船舶データから推定

個船ごとの浮体への接近率

$$n_{gi} = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} f(x_i) dx = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i-\mu_i)^2}{2\sigma^2}} dx$$

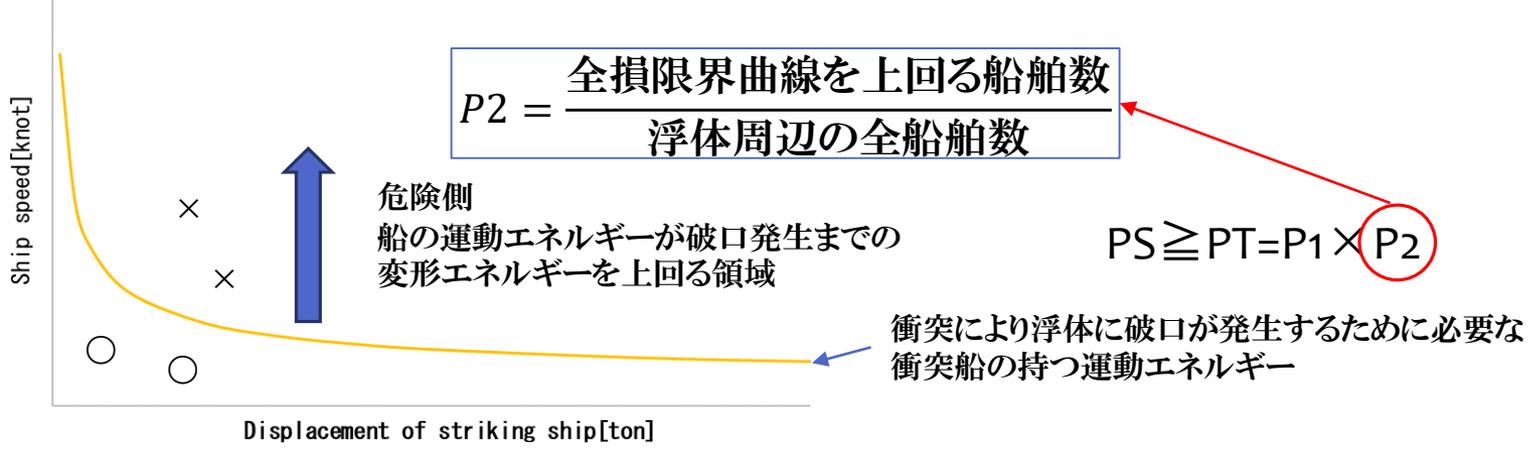
船幅 浮体幅

●衝突影響の定義

- * 防水区画が無いことを前提。
- * 破口発生＝全損とする。
- * 係留系への影響は無視できると仮定 ← 水槽試験において確認。

●全損確率 (P2) の計算 (②簡易版)

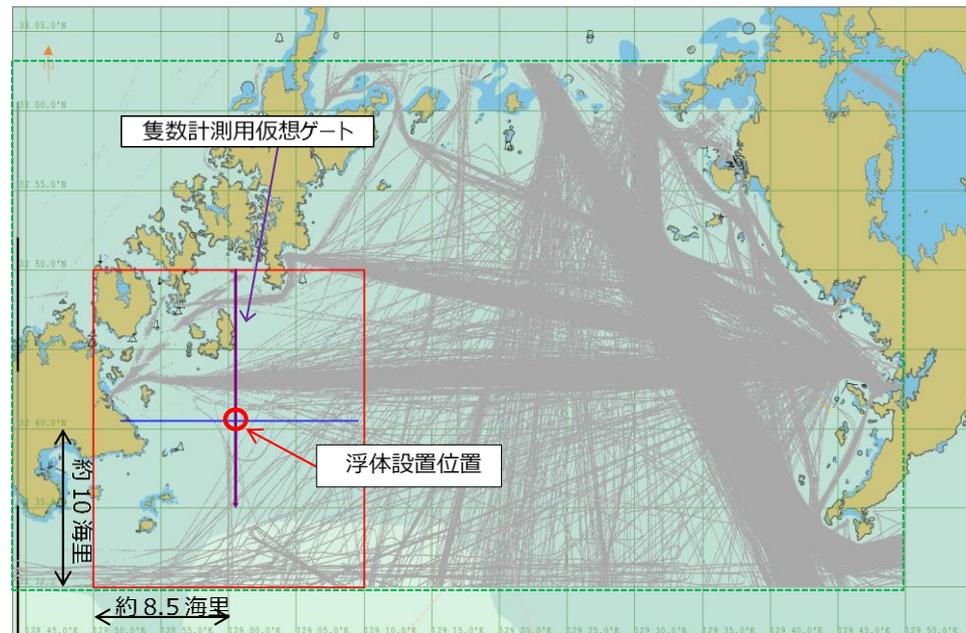
- * 想定浮体と衝突船 (代表船) によるFEM解析等を用い、衝突により浮体に破口が生じるために必要な、衝突船の持つ運動エネルギーを求める。
- * この運動エネルギーを全損限界曲線として、浮体周辺の船舶に対し、個船ごとの運動エネルギーが曲線を上回るかどうかの全損判定を行い、全損確率を計算する。すべての船舶に共通として近似的に全損判定。



全損限界曲線のイメージ



- 浮体設置海域を仮定し、試解析を実施。
- * 浮体設置海域…長崎県西方海域
- * 航行船舶の解析海域…浮体周辺の約±10海里
- * 目標損傷確率 (PS)…ISO19904-1, DNVGL-ST-0119等を参考に 10^{-4} とした
- * 想定浮体:D=12mのスパーク型



●衝突確率の計算結果

- * 浮体周辺の船舶航行情況：N=4386隻(2018年1月1日～2018年12月18日)
※データ取得の都合上、ほぼ1年間のデータを使用。
- * 船舶航路の標準偏差： $\sigma = 700\text{m}$ (ウインドファーム設置後の福島沖ウインドファーム周辺のAISデータから解析)
- * μ ：個々の船舶と浮体の距離(浮体設置海域のAISデータから解析)
- * 避航失敗確率 $P_C = 10^{-3.7} \doteq 2.0 \times 10^{-4}$ ※
- * 年間衝突確率 $P1 = 7.5 \times 10^{-5} < 10^{-4}$

$$n_{gi} = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} f(x_i) dx = \int_{-0.5(B+D)}^{0.5(B+D)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i-\mu_i)^2}{2\sigma^2}} dx$$

浮体周辺の船舶データより計算

$$P1 \approx \sum_{i=1}^N (n_{gi}) \times P_C$$

衝突影響評価法の適用

設置海域の設定

浮体位置(緯度・経度)

衝突確率の計算

- AISデータ・HISデータ
- 船舶明細書・レーダー
- 目視観測等

衝突影響の計算

排水量・船速

①簡易式による
衝突影響の評価

②衝突解析
(簡易版)

③衝突解析
(詳細版)

ガイドライン計算例
による目安

想定浮体+代表船の
衝突FEM解析結果を
利用した方法

- ②-(1) 浮体FEMモデル
船体FEMモデル(代表船)
衝突速度
- ②-(2) + α として
+機構解析・水槽試験
衝突速度
衝突位置
衝突方向

- 浮体FEMモデル
船体FEMモデル(複数)
衝突速度
衝突位置
衝突方向

破口発生船速

全損のクライテリア(全損限界曲線)との比較

衝突確率(P1)

全損確率(P2)

全損確率(P2)

全損確率(P2)

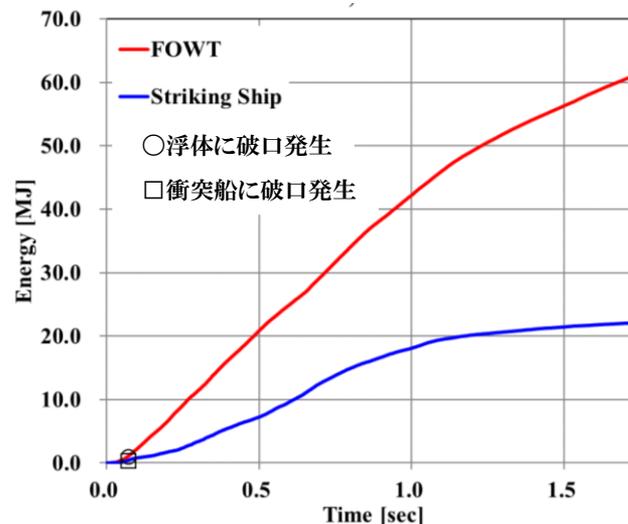
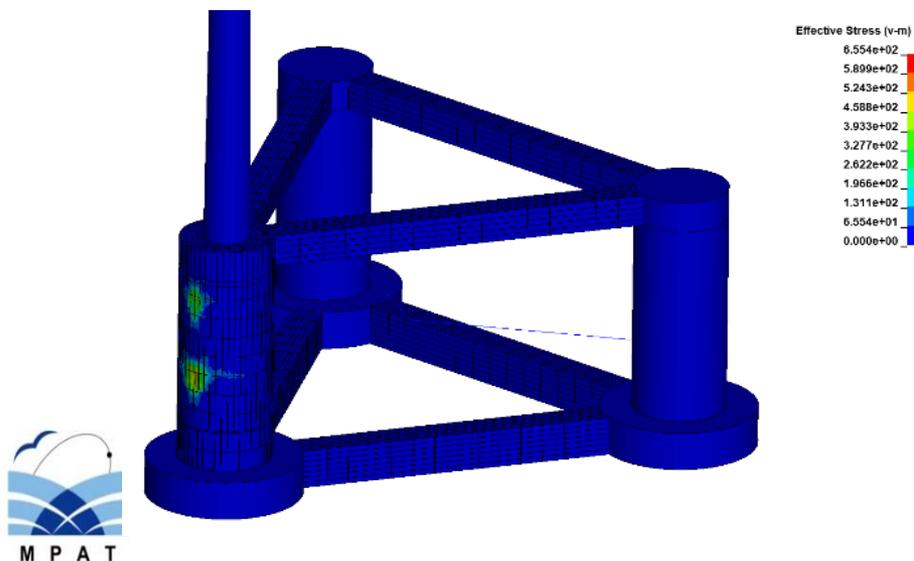
比較対象の損傷と確率との比較
($PT=P1 \times P2 \leq PS$)

損傷時復原性不要

追加対策



- 浮体形式、浮体構造を仮定し、試解析を実施。
 - * 浮体形式…3本コラムセミサブ型(排水量約10000ton)
 - * 浮体構造…防水区画なし、コラム内部にデッキなし
 - * 衝突船…バラ積み船(排水量約10000ton)を代表船とした
 - * 衝突箇所…風車タワー支持コラムへの正面衝突を仮定
 - * 目標損傷確率(PS)… 10^{-4} とした
 - * 1.5knotの限界衝突速度が推定された。
 - * 変形エネルギーの船と浮体の比率は3:7であった。



●衝突影響評価手法(簡易版) (②-(1))の適用例

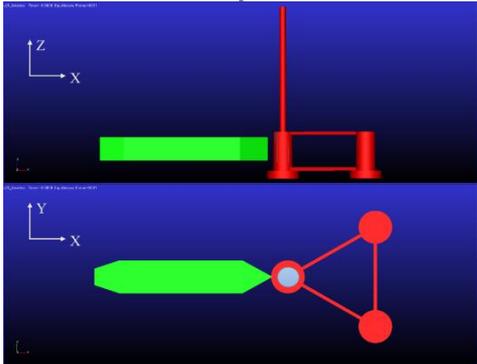
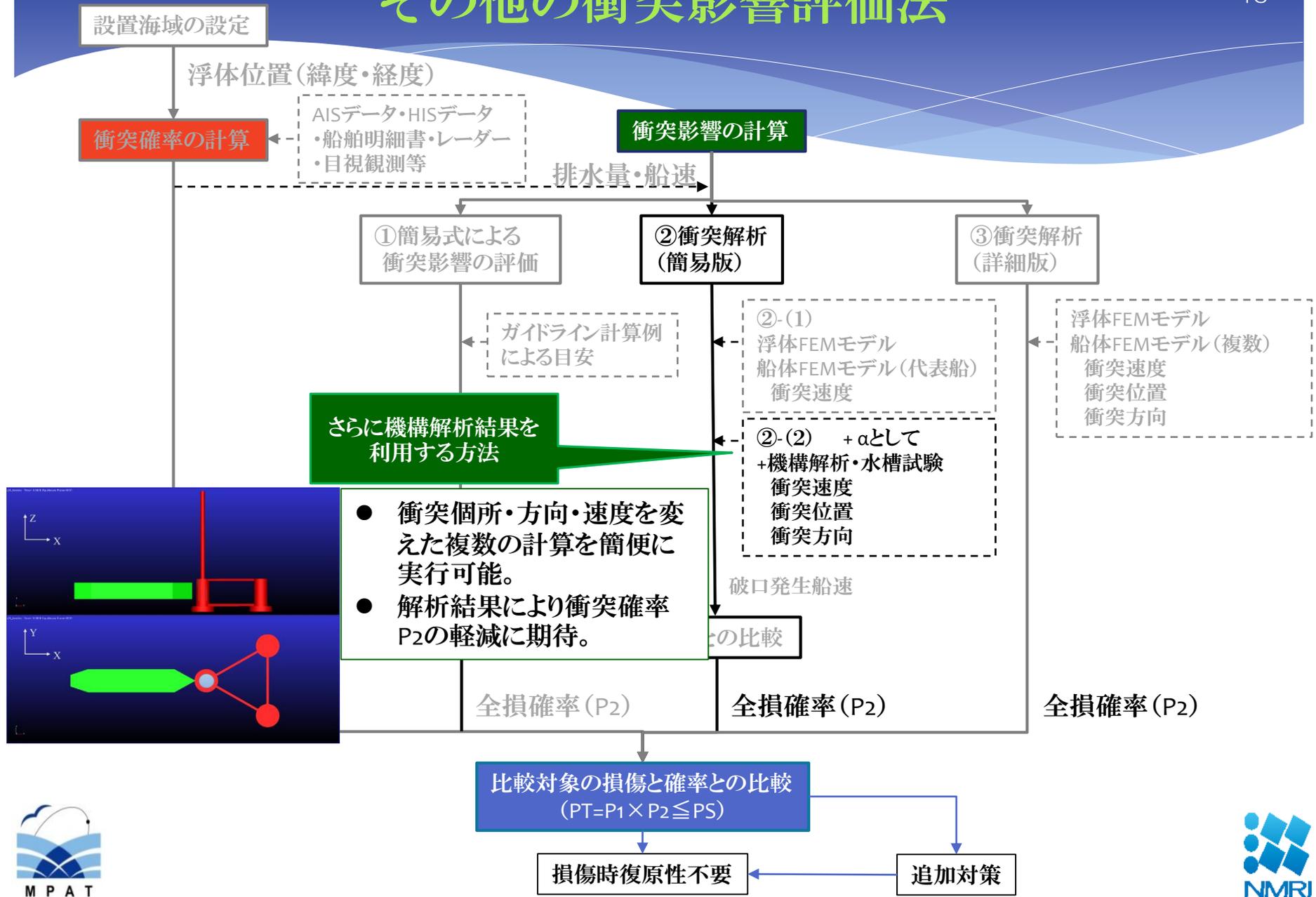
- * FEM解析結果から全損限界曲線を作成
- * AISデータからFOWT周辺の航行船舶データ(船速・排水量)を取得し、全損限界曲線と比較することで全損確率P2を計算可能。

$$P2 = \frac{\text{全損限界曲線を上回る船舶数}}{\text{浮体周辺の全船舶数}}$$

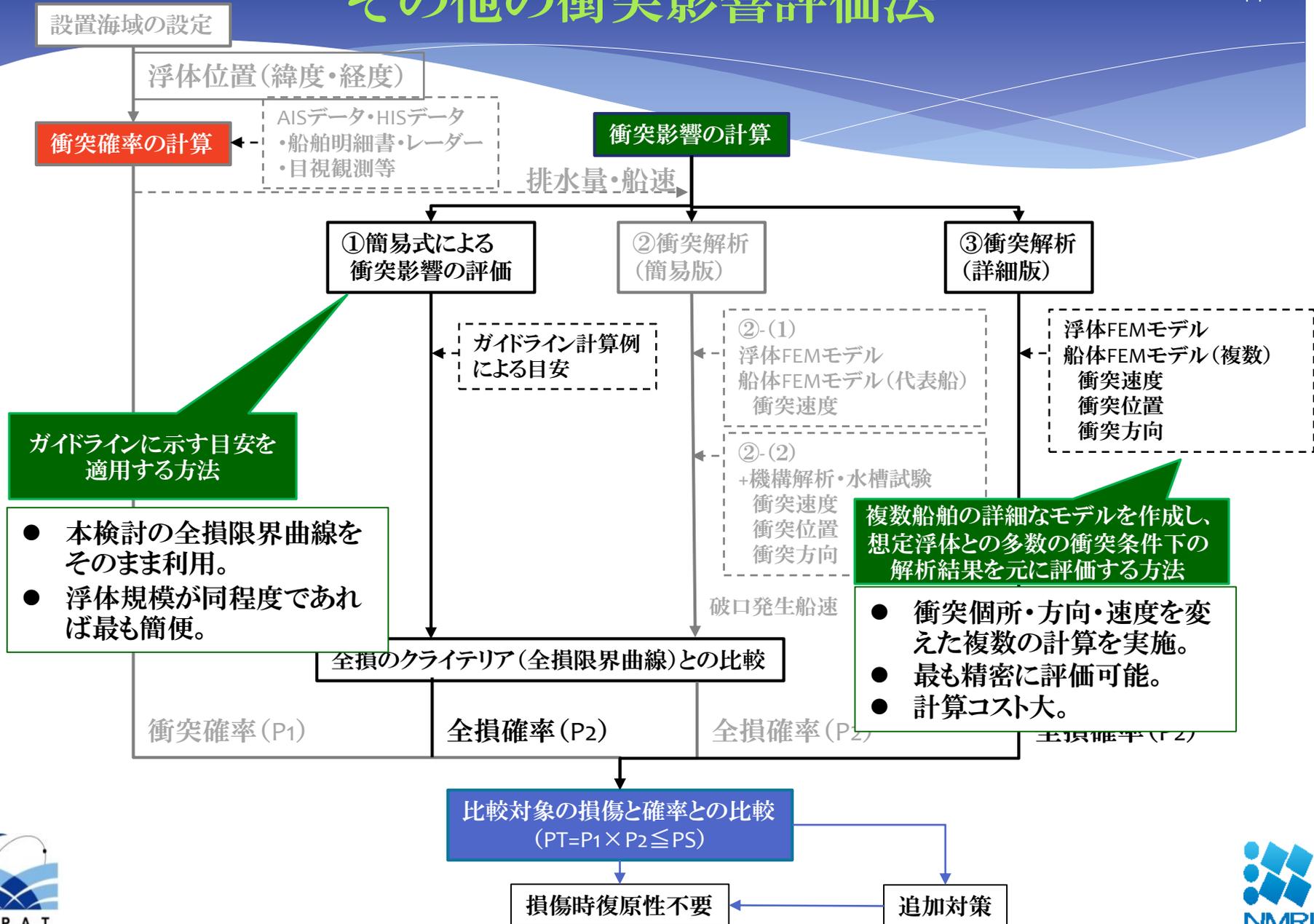


セミサブ型浮体(排水量10000ton)とバラ積み船(排水量10000ton)の
衝突FEM解析結果から作成した全損限界曲線

その他の衝突影響評価法



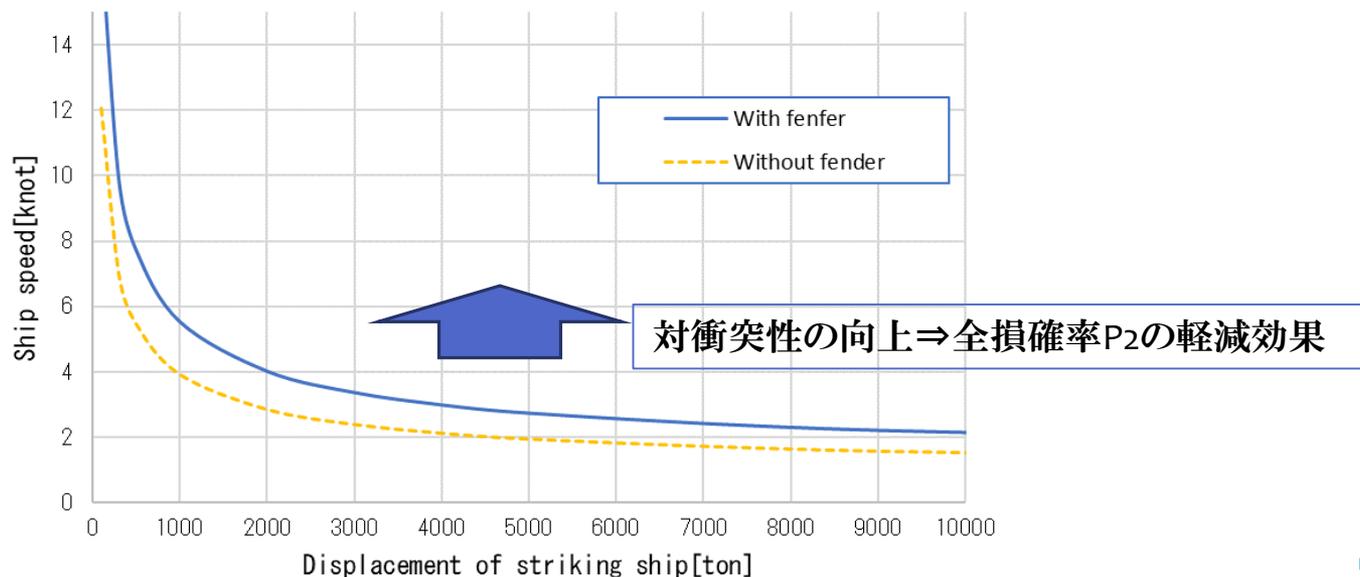
その他の衝突影響評価法



●衝突による浮体への影響を軽減する追加対策の検討事例

* 追加対策の例：防舷材、設計変更、高強度部材の使用、etc.

* 防舷材を使用した場合の検討事例として、防舷材が吸収するエネルギーを2MJと仮定した場合の全損限界曲線を作成



- IECドラフトに示された損傷時復原性の確保の不要について、国内への適用に必要な条件を検討。

- * 損傷時復原性の確保を不要とするための条件を明確化。
- * 損傷時復原性が無い場合の船との衝突における安全性レベルを確率論的に評価する手法を提示。
- * 提示した手法に基づき、試解析を実施。
- * 浮体設置海域、浮体形式、浮体構造を仮定し、衝突確率計算、衝突影響評価を実施。得られた結果を目標損傷確率と比較。
- * 提示した手法により、確率論的な考え方に基づき衝突確率、衝突影響を評価可能であることを示した。

謝辞

- 本研究は、国土交通省海事局の請負研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。
- 本研究におけるAISデータの解析には当所海洋リスク評価系の伊藤博子氏、三宅里奈氏にご尽力いただいた。ここに深く感謝申し上げます。