

経済・環境・社会的観点からの 洋上風力発電の課題の検討

学籍番号 47-186656

指導教員 多部田 茂 教授

三木 皓貴



目次

- 研究背景
- 研究目的
- 洋上風力発電の適地選定に関する課題点の抽出
- 経済性評価
- 環境影響評価
- 社会受容性評価



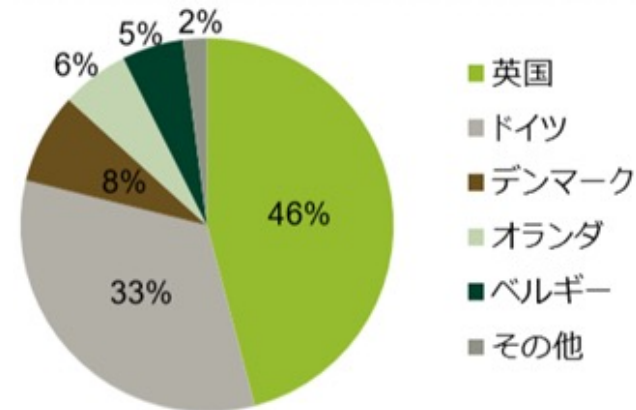
研究背景



背景 ～洋上風力発電の普及現状、利点・欠点～

- 洋上風力発電の世界での普及状況
発電容量...約20GW（ほぼ欧州）

- 洋上風力発電の日本での普及状況
既設...10台のみ　多くが実証研究施設
国内メーカーの多くが製造から撤退



出典：三井住友銀行 欧州洋上風力発電の現況

◆ 洋上風力発電のメリット・デメリット

メリット

- ・膨大な電力ポテンシャル
- ・少ない環境負荷
- ・陸上風力の技術の活用可能
- ・海外での実績あり
- ・自国産エネルギー

デメリット

- ・ハイコスト
- ・供給の不安定性
- ・漁業との共存 ・観光業
- ・周辺環境や生態系への影響
- ・景観破壊 ...etc



多くのステークホルダー...合意形成が重要



背景 ～合意形成の難しさ～

● 洋上風力発電の合意形成実例

米国での例

マサチューセッツ州の例

- ・ 事業者が独断で海域を選定
- ・ 事業者が情報の調査・収集
- 多数の訴訟
- 事業実現に至らず



ロードアイランド州の例

- ・ 利害関係者が海域選定に参画
- ・ 学術研究者が情報を調査・収集
- ・ 漁業者、観光業者などの利益優先
- 事業始動から8年で運転開始

➤ 全てのステークホルダーに配慮した建設海域の選定が円滑な合意形成に繋がる

- ・ 持続的利用と環境保全を両立
- ・ 全ステークホルダーの利益確保

海洋空間計画
(Marine Spatial Planning)



研究目的



研究目的

- 洋上風力発電の適地選定に関する各国の報告例や研究事例などの文献を調査し、重視されている点・不足している情報を整理・把握する。
- 抽出した経済面・環境面・社会面の各課題点について、シミュレーションやアンケートなどを用いて検討する。



洋上風力発電の 適地選定に関する 課題点の抽出



各国のゾーニング報告事例

● 欧州でのゾーニング

- 国主導のゾーニング・情報収集・コンサルテーション・合意形成
+ 補助金や合意形成に繋がる制度の設計

- 海洋に関する様々な情報の活用

例：イギリス...

除外地：パイプライン、系統連携、資源採掘地、養殖場、トンネル、水深制限 ...etc.

制約地：軍事区域、自然保護域、世界遺産、船舶航行地、港湾、レジャー施設 ...etc.

参照情報：海底地形、魚類産卵地、海洋哺乳類、ガス貯蔵地、鳥類生息地 ...etc

● 日本でのゾーニング

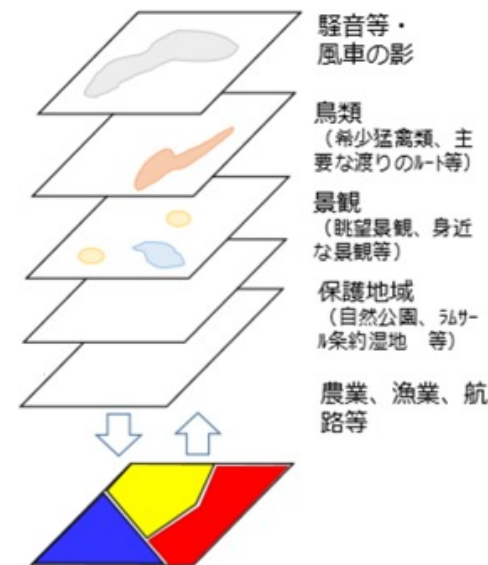
- 陸上・洋上 共用のマニュアル

→海洋情報、海生生物の情報の不足

- 「マニュアル」に過ぎない

(実際ゾーニング・合意形成を行うのは地方公共団体)

→地方公共団体・事業者の負担が多い



出典：環境省 風力発電に係る地方公共団体によるゾーニングマニュアル（第1版）



適地選定研究事例 ～経済面～

	対象空間	経済面					
		風力	系統接続	離岸距離	底質	地形	水深
InVEST(※)	—	○	○	○		○	△
Davies et al. (2014)	イギリス-スコットランド						
Punt et al. (2009)	オランダ-EEZ全域	○					
Pınarbaşı et al. (2019)	スペイン-バスク地方周辺	○		○	○		△
Guinda et al. (2018)	スペイン-カンタブリア海						
Göke et al. (2018)	デンマーク-西バルト海	○	○				○
村井, 青野 (2009)	日本-全域	○		○			△
比江島 (2009)	日本-瀬戸内海	○					△

- 課題 コスト計算の精度向上
水深・離岸距離などに応じたコスト計算

※△...海域の制限としての利用

※InVEST...stanford大学による空間的情報評価ソフトウェア



適地選定研究事例 ～環境面～

	対象空間	環境面						
		鳥・ コウモリ	魚	底生 生物	ほ乳類	自然 保護区	水質	流れ場
InVEST	—							
Davies et al. (2014)	イギリス- スコットランド	△	△		○	○		
Punt et al. (2009)	オランダ-EEZ全 域	△	△					
Pınarbaşı et al. (2019)	スペイン- バスク地方周辺	○		○	○			
Guinda et al. (2018)	スペイン- カンタブリア海	○	○	○	○			○
Göke et al. (2018)	デンマーク- 西バルト海							
村井, 青野 (2009)	日本-全域							
比江島(2009)	日本-瀬戸内海							

- 課題 水質・流れ場の変化の評価
海生生物に対する影響の度合・空間的な情報



適地選定研究事例 ～社会面～

	対象空間	社会面					
		自然公園 観光業	航行	景観	漁場・漁業権 養殖・漁礁	海底ケーブル パイプライン	その他
InVEST	—						
Davies et al. (2014)	イギリス- スコットランド	○	○	○	○	○	開発区 CO2貯蔵
Punt et al. (2009)	オランダ-EEZ全域						
Pınarbaşı et al. (2019)	スペイン- バスク地方周辺		○	○	○	○	開発区 MPA
Guinda et al. (2018)	スペイン- カンタブリア海		○	○			
Göke et al. (2018)	デンマーク- 西バルト海	○	○	○			
村井, 青野 (2009)	日本-全域	○	○	○	○		
比江島 (2009)	日本-瀬戸内海	○	○				

- 課題 地域社会からの景観受容性に関する評価



経済性評価



経済性評価 検討対象

● 現状の課題点

- 発電賦存量...日本では例が少ない
- コスト計算...定額の場合が多い

NRELの例：系統接続や海象条件なども用いた詳細な計算

● 今回の検討対象

- 日本近海における発電賦存量の表示
- 水深と離岸距離を用いたコスト予測の計算

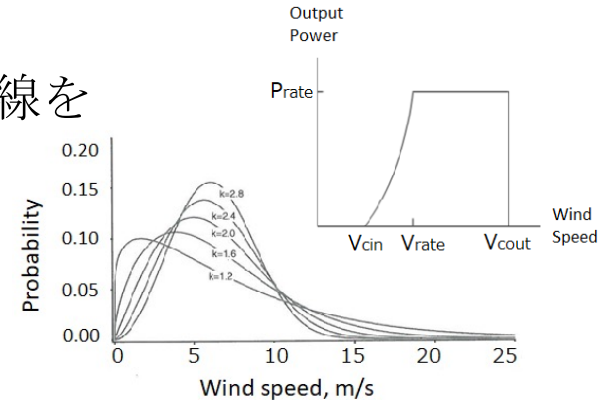
→洋上風力発電の経済性評価ツールの作成



経済性評価 計算手法 ～発電賦存量・コスト～

● 発電賦存量計算

風速の確率密度関数とタービンの出力曲線を掛け合わせ、一年間の発電賦存量を計算



出典：InVEST User Guide

● コスト計算

NRELが計算したアメリカ近海での CAPEX・OPEXの計算結果を使用

→水深と離岸距離のみを用いたコスト関数を作成

$$\begin{cases} CAPEX_{bottom} (\$/kW) = \alpha_{b0} + \alpha_{b1} * Dist + \alpha_{b2} * e^{0.0186 * Depth} \\ CAPEX_{float} (\$/kW) = \alpha_{f0} + \alpha_{f1} * Dist \end{cases}$$

$$\begin{cases} OPEX_{bottom} (\$/kW) = \beta_{b0} + \beta_{b1} * \ln(Dist) \\ OPEX_{float} (\$/kW) = \beta_{f0} + \beta_{f1} * \ln(Dist) \end{cases}$$

係数	切片:0	離岸距離:1	水深:2
CAPEXbottom	2.52×10^3	1.37×10^1	1.00×10^3
CAPEXfloat	5.85×10^3	1.28×10^1	-
OPEXbottom	1.22×10^2	8.04	-
OPEXfloat	4.34×10^1	1.82×10^1	-

CAPEX: 初期設備投資 OPEX: 運営・整備費
 bottom: 着床式 float: 浮体式
 Dist: 離岸距離 Depth: 水深

● LCOE (均等化発電原価)

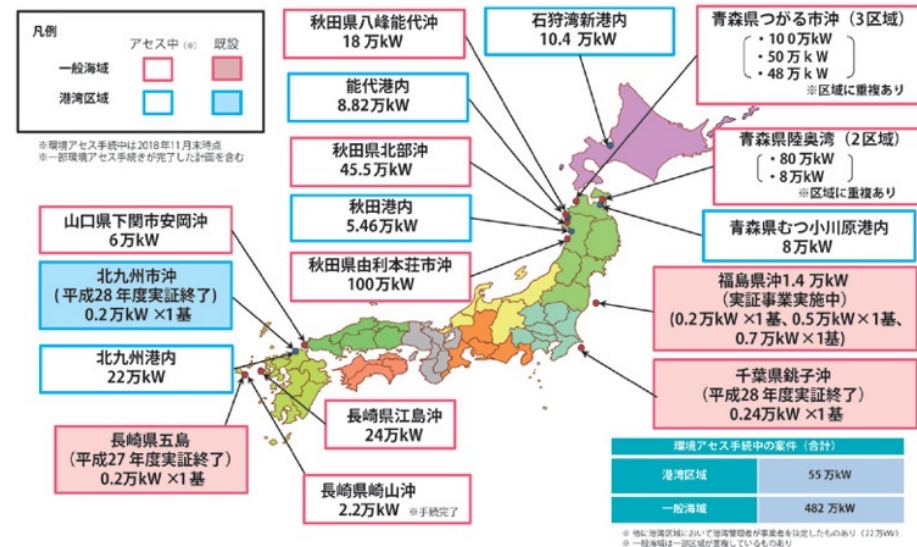
$$LCOE (\$/kWh) = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX}{(1+i)^t} + \frac{D \times CAPEX}{(1+i)^T}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

D: 廃業コスト率
 i: 割引率
 T: 廃業コスト率
 Et: 発電賦存量



経済性評価 計算条件

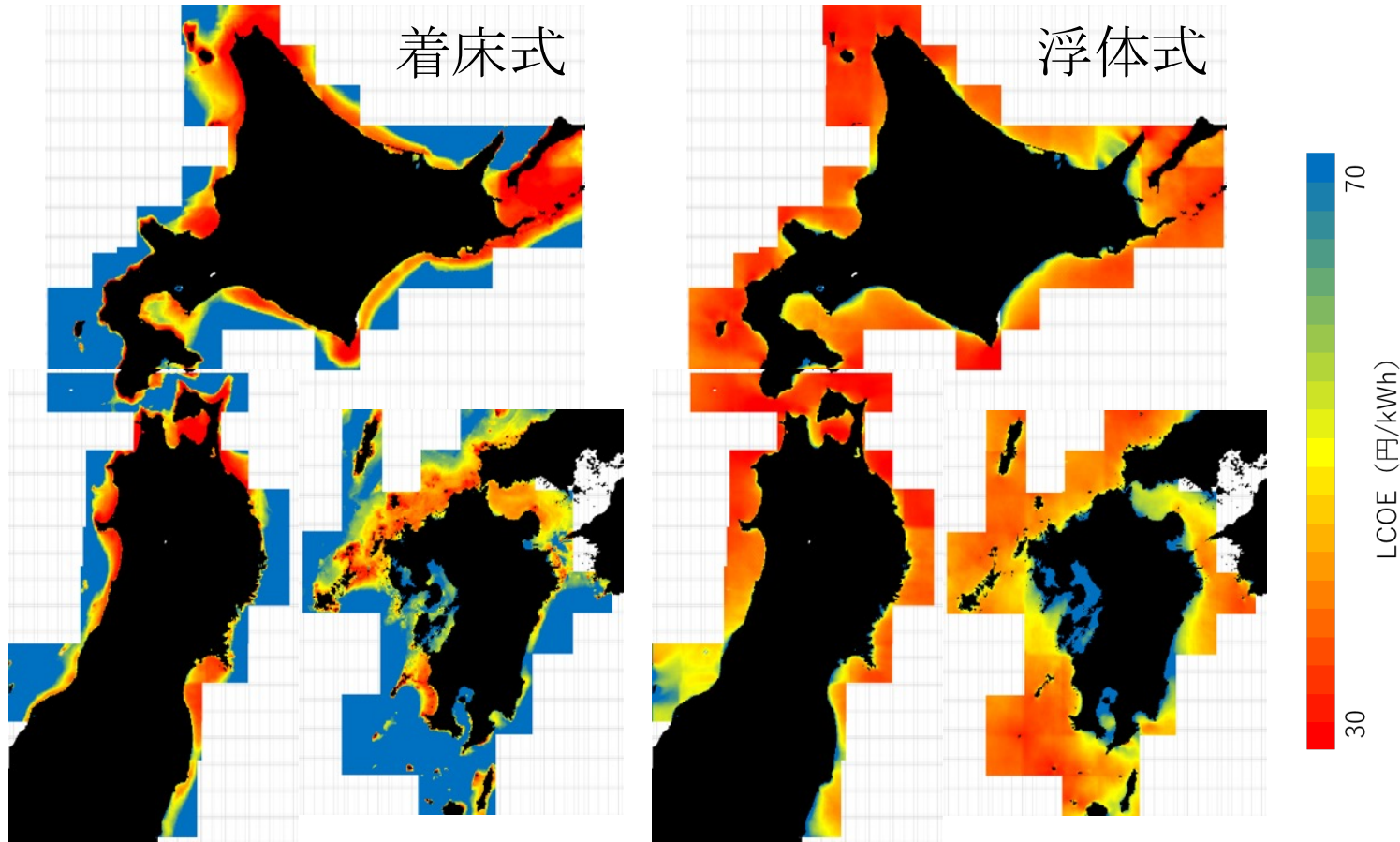
- 対象海域：北海道・東北・九州（洋上風力発電建設地・候補地周辺）
- 水深データ：JODC 500mメッシュ水深データ
- 風況データ：NEDO 局所風況マップ
- タービン：V105 3.6MW
 - 定格出力：3.6MW
 - ハブ高さ：84m
 - カットイン風速：3m/s
 - 定格風速：12.5m/s
 - カットアウト風速：25m/s



出典：経済産業省 資源エネルギー庁 HP



経済性評価 計算結果 ~LCOE~



LCOEが同程度になる海域における分析
 →水深56m程度でLCOEの値が入れ替わる

水深	北海道	東北	九州
標本数	2687	1962	999
平均	56.84	56.36	56.25
変動係数	0.0365	0.0340	0.0359



環境影響評価



環境影響評価 検討対象

- 現状の課題点
 - 水質や流れ場の変化が考慮されていない
 - シミュレーションによる将来予測があまり行われていない
 - 生態系への影響自体が考慮されていない
- 今回の検討対象
 - 洋上風力発電施設周辺の海況を予測する数値モデルの開発
 - 海中構造物と付着生物の存在による環境の変化の考察
 - 海中構造物による流れ場の変化
 - 付着生物による水質の変化



環境影響評価 計算手法

- 物理モデル・生態系モデル

→MEC modelを使用

(静水圧近似の海洋モデル、ネスティング格子の活用)

- 海中構造物・付着生物モデル

- 構造物との境界条件 ...non-slip condition ($v=0$)

- 付着生物量の時間変化

$$\frac{\partial ADH}{\partial t} = B_{101} - B_{102} - B_{103}$$

B_{101} : 餌料の摂食

B_{102} : 呼吸・排泄

B_{103} : 排糞・自然死亡

- 付着生物の摂食による水質の変化

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (\text{浮遊生態系モデルの時間変化項}) - \frac{B_{101} \times X}{h \times (PHY + ZOO + POC)}$$

PHY : 植物プランクトン

ZOO : 動物プランクトン

POC : 懸濁態有機物

h : 層の厚さ

- 付着生物の呼吸・排泄・死亡による水質の変化

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (\text{浮遊生態系モデルの時間変化項}) + \frac{[X:C] \times (B_{102} + B_{103r})}{h}$$

B_{103r} : 自然死亡

$[X:C]$: X:炭素の構成比

➤ 新たにモデルに実装

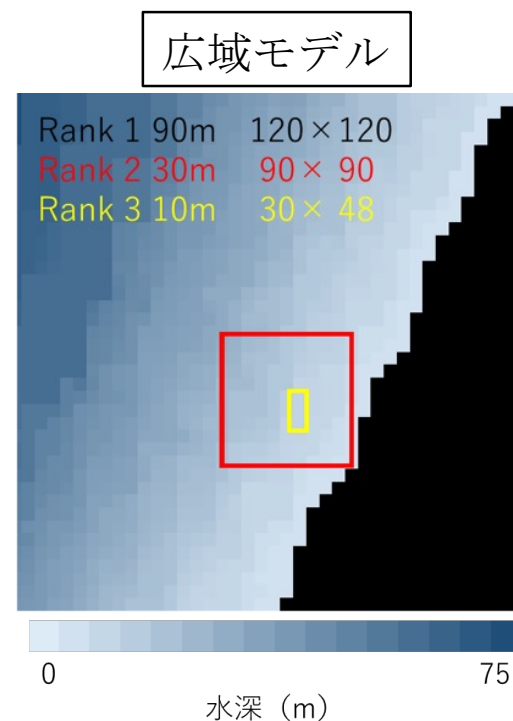


環境影響評価 計算条件

- 対象海域：秋田県由利本荘市沖
 広域モデル…10.8km×10.8km・90mメッシュ
 (ネスティング構造のRank3に海中構造物)
 狭域モデル… 120m× 120m・ 1mメッシュ

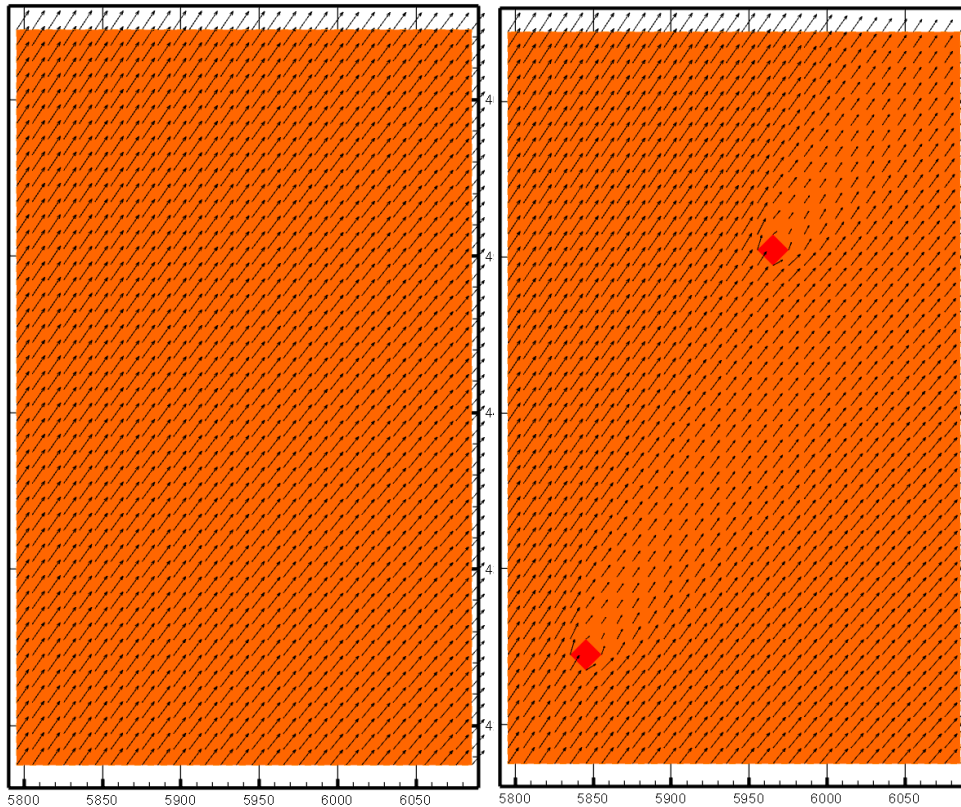
鉛直方向…ともに20層
 最大水深…広域：75m 狭域：20m

- 水深データ：JODC 500mメッシュ水深データ
- 流況条件：上下境界に流速を設定
- 潮汐条件：左側境界に主要4分潮を設定
- 水質データ：world ocean atlas など
- 付着生物量：福島洋上風力コンソーシアムの報告
 ケーブル部付着量厚さ…44.9 mm
 ケーブル付着量… 1.13 kg/m
 →56.3 gC/m²



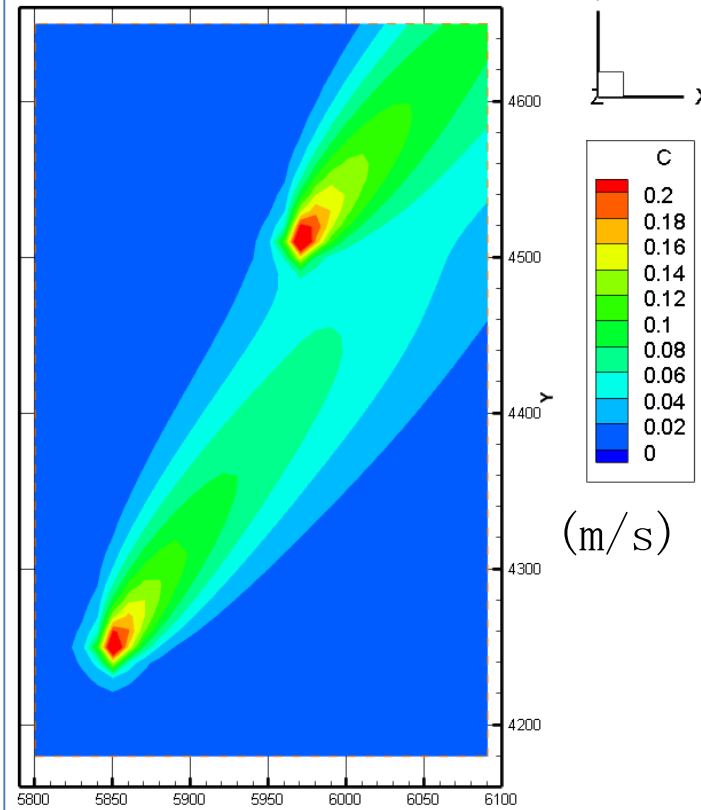
環境影響評価 計算結果 ～流れ場の変化～

- 流れ場の変化と流速の差分 (広域モデル Rank3)



構造物なし

構造物あり

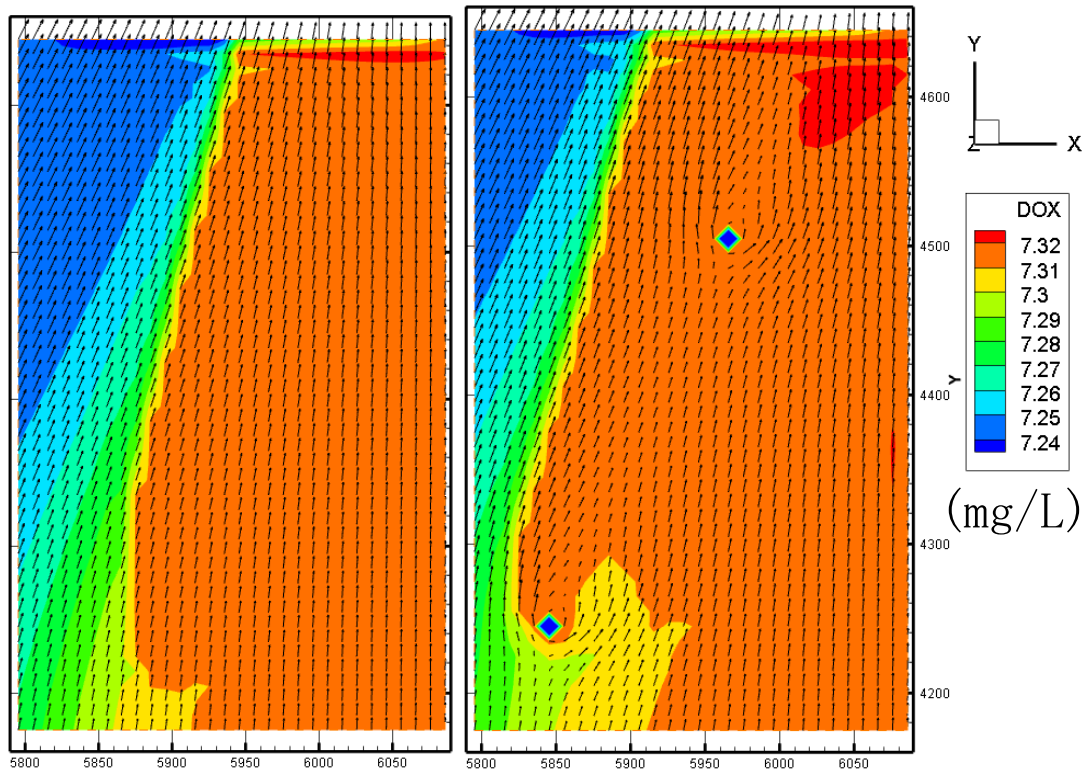


流速の差分



環境影響評価 計算結果 ～水質の変化～

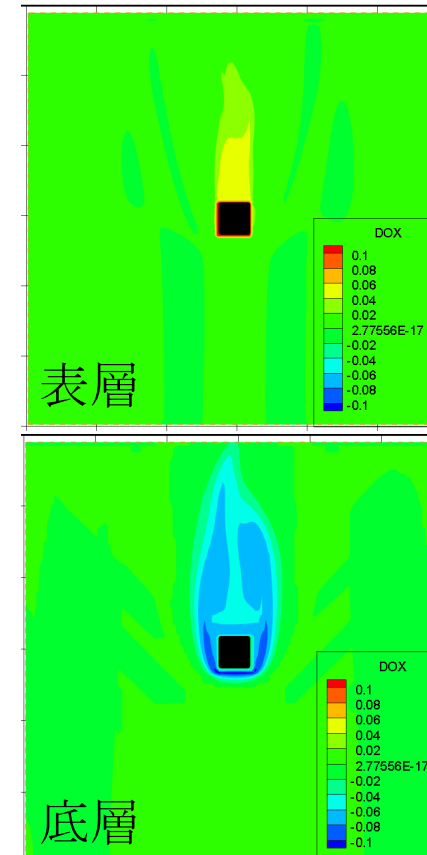
- DO濃度の変化（広域モデル Rank3）



構造物なし

構造物あり

- DO濃度の差分（狭域モデル）



表層

底層

流れ場の変化による濃度分布の変化

付着生物による水質への影響



社会受容性評価



社会受容性評価 検討対象

- 現状の課題点
 - 適地選定における住民の声の考慮不足
 - 我が国における景観の受容性に関するアンケートの不足（特に洋上）
- 今回の検討対象
 - 洋上風力発電に関するアンケート調査
 - 風車が実際に建てられた際の景観予想図の作成
 - 洋上風力発電の景観受容性の調査
 - 景観受容性の要因分析



社会受容性評価 調査概要

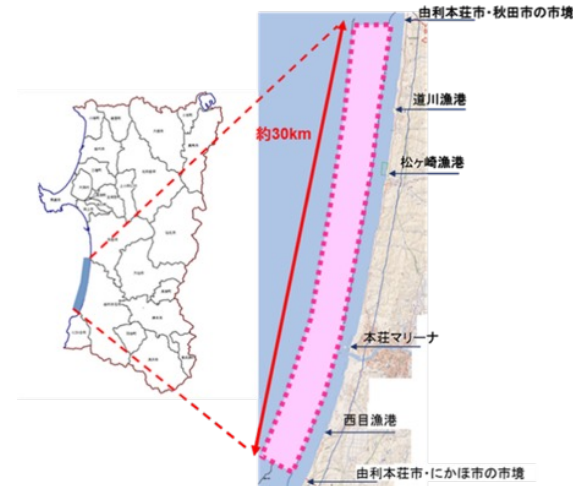
- 調査対象 秋田県由利本荘市沖
沖合1km~4km・南北30kmの海域に最大140基の風車が建設される計画

- 調査実施概要
景観予想図に対する景観受容性調査

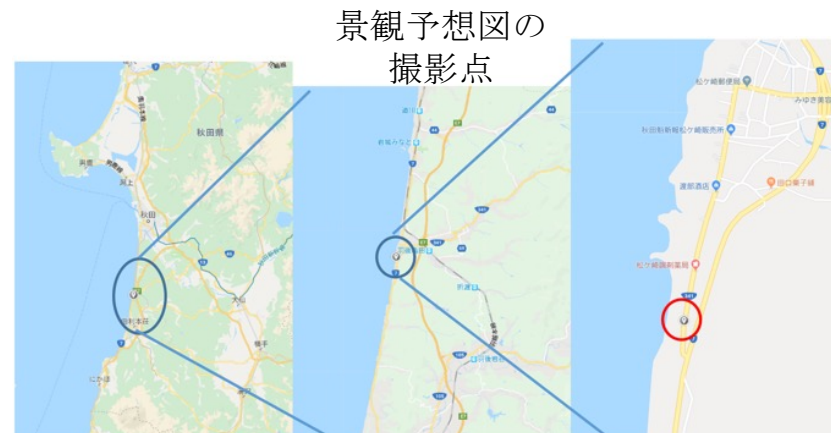
日時 : 2019年9月7日
場所 : 秋田県 秋田駅周辺
有効回答数 : 131 (学生が多数)

- 項目
 - ・ 属性
 - ・ 風力発電施設からの影響
 - ・ 景観予想図の受容性評価
(台数、離岸距離、視野内密度による違い)
 - ・ 洋上風力発電に関する知識
 - ・ 洋上風力発電への賛否、理由
 - ・ 沿岸属性による受容性評価

- 検定方法
平均値の差の検定、分散分析



出典：日経XTECH



景観予想図の
撮影点



社会受容性評価 アンケート内容

- 景観予想図

離岸距離…1km・4km

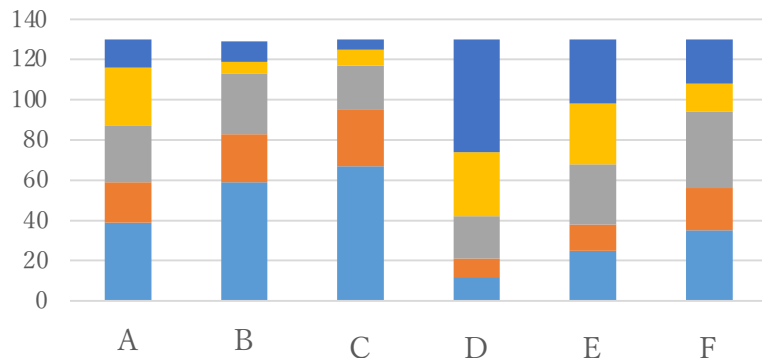
台数…100台・50台・25台 (/30km)



社会受容性評価 調査結果 ～景観受容性～

● 景観受容性の結果

景観受容性



■ 1 (許容できる) ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 (許容できない)

	A	B	C	D	E	F
平均値	2.685	2.101	1.892	3.854	3.238	2.746

受容性最低 D…離岸距離4km・100台
最高 C…離岸距離1km・25台

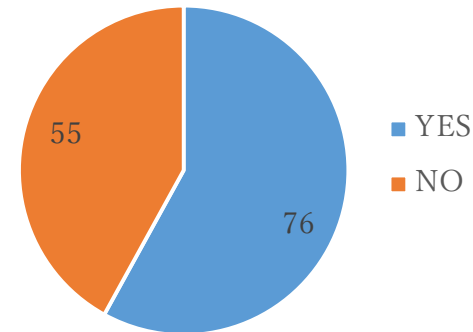
平均値の差の検定…

AとFのみ差がない A…距離1km・100台
F…距離4km・25台

→同時に見える風車数が受容性のカギ？

● 目視の機会の有無による景観受容性の差

目視の機会



	目視の機会		検定結果	P値
	あり	なし		
受容性の合計の平均値	2.621	2.879		0.076

有意水準を0.1とすると…
有意に差がある

→「見慣れ」が景観受容性のカギとなる？



社会受容性評価 調査結果 ～景観受容性～

● 知識の有無による景観受容性の差

質問 番号	説明文	知識の有無		検定 結果	P値
		YES	NO		
1	洋上風力発電とは、海の上で行われる風力発電のことである。	2.610	2.996		**
2	洋上風力発電はCO2の排出が少ないクリーンなエネルギーだ。	2.620	2.931		*
3	日本は海に囲まれた島国なので、莫大な発電量を期待できる。	2.608	2.893		*
4	すでにヨーロッパでは洋上風力発電が普及している。	2.633	2.773		
5	風車が魚の住みかとなり、漁獲量が増える可能性がある。	2.536	2.773		
6	観光業への活用・働き口の創出など、地域の活性化に貢献しうる。	2.786	2.701		
7	コストが高くかかり、電気代が高くなる可能性がある。	2.816	2.684		
8	発電された電気は国が一定の価格で買い取っている。	2.711	2.728		
9	騒音や振動、日照の問題などによる健康被害が発生する可能性もある。	2.853	2.609		*
10	鳥類の衝突や、海の生き物の生態に悪影響を及ぼすかもしれない。	2.878	2.589		*
11	船の通行や、マリンスポーツの妨げになる可能性もある。	2.754	2.704		
12	秋田県沖は洋上風力発電の促進区域として国に指定されている。	2.878	2.685		
13	由利本荘市などでは計画に対する反対運動が一部で起こっている。	2.810	2.695		

有意に差があるのは…

1, 2, 3…環境・エネルギーへのメリット
9, 10…健康被害・生態系への影響

→合意形成でのカギ

**… 5%有意

* …10%有意



結言



結言

- 洋上風力発電の適地選定に関する課題点の抽出
 - ・ 海洋に関する情報の不足、ゾーニングへの国の関与の不足への言及
 - ・ 既存研究の調査による経済面、環境面、社会面の課題抽出
- コスト関数を用いたLCOEの算出による経済性評価ツールの開発
- 海中構造物・付着生物モデルを結合した海洋数値モデルの開発
 - ・ 流れ場の変化の可能性の示唆
 - ・ 付着生物による水質への影響が微小である結果
- 景観予想図を用いた景観受容性アンケートの実施
 - ・ 景観受容性に影響する要因（見える風車数、見慣れ、知識…）の示唆

課題

- 経済面：日本のコストデータの導入、ファーム規模によるコスト変化の表現
- 環境面：海生生物への直接影響（魚類の動態等）の評価、実測データとの照合
- 社会面：景観受容性に関するより綿密な調査

