

平成30年2月3日 修士論文発表会

サンゴの生息環境評価法の検討と 海洋温度差発電の影響予測

学籍番号 47166620

指導教員 多部田 茂 教授

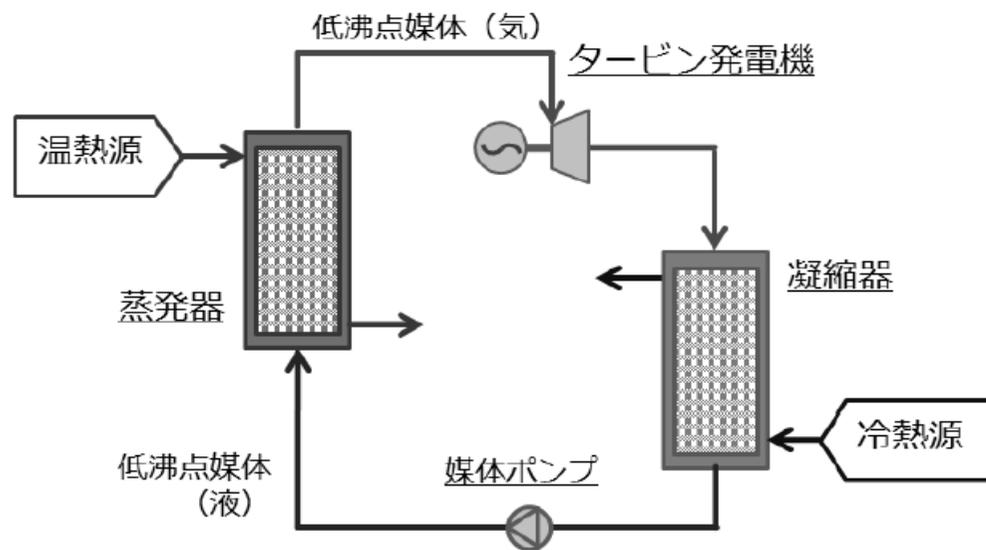
内田 恵

背景

研究動機：久米島の1 MWの海洋温度差発電の建設計画

海洋温度差発電とは
再生可能エネルギーの一種。
表層水と深層水の温度差で発電する。

国内の海洋温度差発電
沖縄県久米島町にて
現在50kWの海洋温度差発電が稼働。



海洋温度差発電の原理 (岡村, 2016)



久米島で稼働中の
50kW海洋温度差発電
(OTECHP)

建設に伴う環境影響に関する懸念事項

海洋温度差発電特有の環境影響

①限定された対象海域

- 表層水と深層水は
年平均20°C以上の温度差が必要
- 熱帯亜熱帯地域
- 高水温・貧栄養

サンゴ礁海域の海水と深層水の違い
(田中, 2012)(水質検査, 2014)

項目	単位	サンゴ礁 海域の海水	深層水 (久米島)
水温	°C	18-30	5-7
リン酸態リン	μM	0.01-0.1	2.1
硝酸態窒素	μM	0.1-0.5	25.7

②深層水の放水

- 低水温・富栄養

高水温・貧栄養な環境に適合している熱帯亜熱帯生態系に
低水温・富栄養な海水は影響があるのではないか



熱帯亜熱帯生態系の核であるサンゴ礁に対する影響を評価する必要がある

生息環境の評価方法

海洋温度差発電の実用化に伴って、サンゴへの影響を見る必要がある

→影響要因がなにかを知り、事前に影響を評価したい
→しかし、実海域で影響をみることは出来ない

定量的な生息環境評価法

・ HSI (Habitat Suitability Index : ハビタット適性指数)

野生生物の生息地としての価値を0 (全く適さない環境条件) から1 (理想的な環境条件) で表す方法。

$$HSI = f(SI_1, SI_2, \dots, SI_n)$$

HSIは対象生物にとって重要な環境因子SI (Suitability Index : 環境要因適性指数) を組み合わせて求められる。

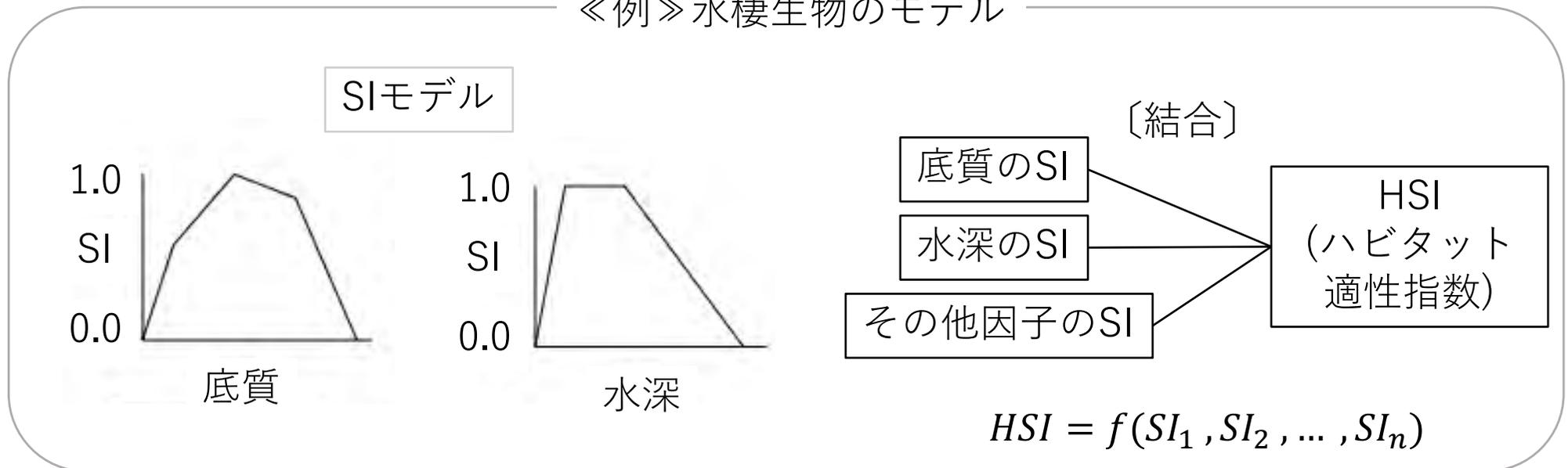
生息環境の評価方法

- SI (Suitability Index : 環境要因適性指数)

環境因子それぞれにおいて

対象生物にとって全く適さない条件であれば0, 理想的な条件であれば1として評価する.

《例》水棲生物のモデル



→本研究では, SIモデルを軸に久米島のサンゴと環境因子の関係を考察する

本研究の意義

先行研究

- ・ 深層水放水による環境変化に関して (wang,2017)

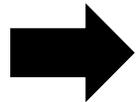
→水温, 栄養塩, プランクトン濃度に多少の変化はあるものの微量であり, 低次生態系にインパクトのあるような環境変化はない.

熱帯亜熱帯生態系 (サンゴ生態系) に注力した評価はできていない

- ・ 海洋温度差発電によるサンゴへの影響 (M.S. quinby-hunt, 1987)

→建設によって攪乱された海底の堆積物がサンゴの光環境を悪化させる.

深層水放水によるサンゴへの影響は見られていない



「放水後の環境変化+サンゴ生態」両方にまたがった知見はない

久米島で適用でき, 放水による環境変化を考慮できるサンゴの生息環境評価手法

本研究の目的と流れ

本研究の目的

海洋温度差発電による放水が久米島のサンゴに与える影響評価手法の基礎的検討

久米島サンゴの生息地評価

放水によって変化する環境因子

水温・栄養塩
→SIモデルの作成

放水によって変化しない環境因子

波, 流速, 光量子, 地形など
→既存モデルの適用

ステップ1

サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

1. 水温, 栄養塩とサンゴとの対応関係を定量的に評価するSIモデルを作成
2. 放水後のサンゴ生息環境を作成したモデルを用いて評価

ステップ2

その他の環境因子 (水温・栄養塩以外) によるサンゴの生息環境評価手法の検討

1. 既存のサンゴモデルが久米島に適用可能か検討
2. その問題点を踏まえ、改善案として新たな環境因子の提案

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

1. 水温、栄養塩とサンゴとの対応関係を定量的に評価するSIモデルを作成
2. 放水後のサンゴ生息環境を作成したモデルを用いて評価

SIモデルの作成

- 久米島で適用できる
- 放水の影響を見ることが出来る

低水温SIの決定

- サンゴの分布域は水温と相関が高い
 - 水温による棲み易さ（SI）の変化は分布域と対応している
 - 分布域（北限）は最寒月の平均水温で説明できる（堀, 1980; 中井, 1990; 菅, 2005）
- 水温下限閾値（低水温でSI=0.0になる）：最寒月の平均水温

高水温SIの決定

- サンゴは熱帯亜熱帯地域に生息する
 - 分布域で水温の上限を示すことは難しい
 - しかし、高水温のときはサンゴは減少（白化）することが知られている
- 水温上限閾値（高水温でSI=0.0になる）：白化指標（屋良ら, 2009）

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

低水温SIの決定

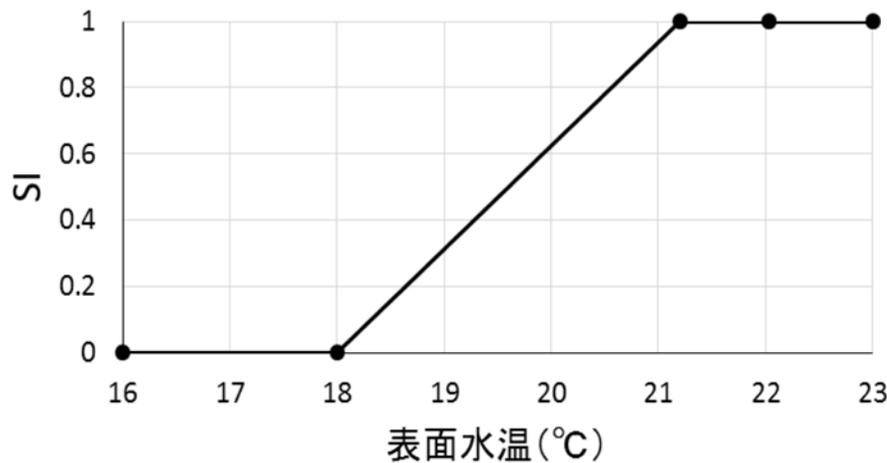
サンゴの分布域の北限を基に作成

- ①久米島サンゴは礁構造を形成する
→SIと礁構造形成を対応させた

〔 礁構造が形成されない：SI=0 〕
〔 礁構造が形成される：SI=1 〕

- ②礁構造の形成は
最寒月の平均水温が決定する

水温とSIの対応



最寒月平均海面水温のSIグラフ

最寒月平均海面水温※	島	礁構造	SI
18°C	種子島	形成しない	0.0
18~21.2°C	小宝島 ~種子島	海岸線 の一部	0.0 ~1.0
21.2°C	小宝島	形成する	1.0
23°C	久米島	形成する	1.0

※1971-2000年の平均水温（海上保安庁）

人工衛星による観測値

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

高水温SIの決定

白化指標

白化指標：DHM(Degree Heating Month)
= 最暖月水温 - 最暖月水温の平均水温※
 $1^{\circ}\text{C} \leq \text{DHM} < 2^{\circ}\text{C}$ ：白化
 $2^{\circ}\text{C} \leq \text{DHM}$ ：大量死をもたらす深刻な白化

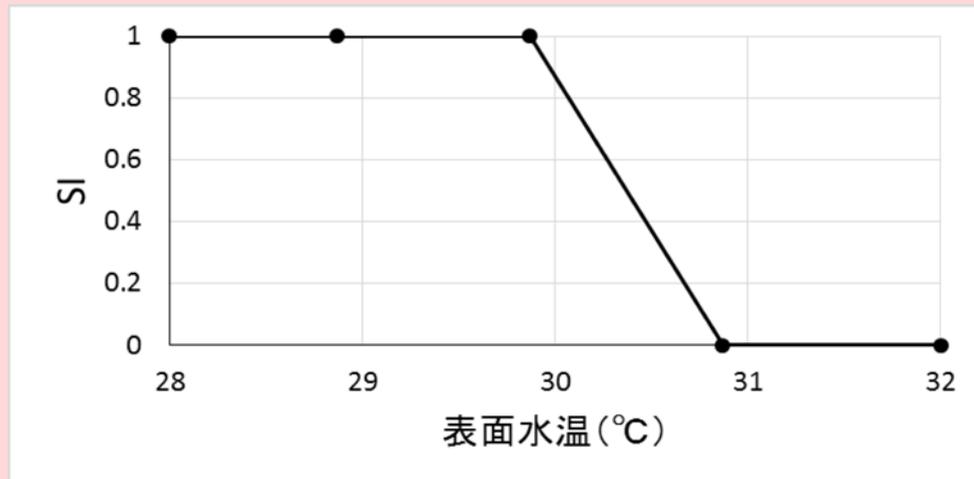
①SIと白化指標を対応させた

〔 白化していない：SI=1
大量死をもたらす深刻な白化：SI=0 〕

②白化は

最暖月の平均水温が決定する

水温とSIの対応



最暖月 平均水温	DHM	白化状況	SI
28.87°C	0	白化していない (久米島平均水温)	1.0
29.87°C	1	白化し始める	1.0
30.87°C	2	深刻な白化	0.0

最暖月海面水温のSIグラフ

※1971-2000年の平均水温 (海上保安庁)

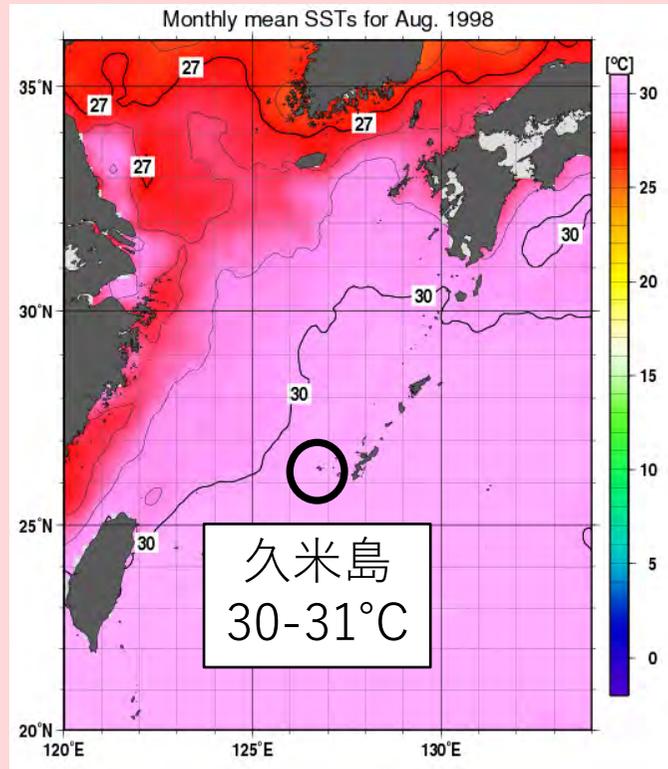
人工衛星による観測値

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

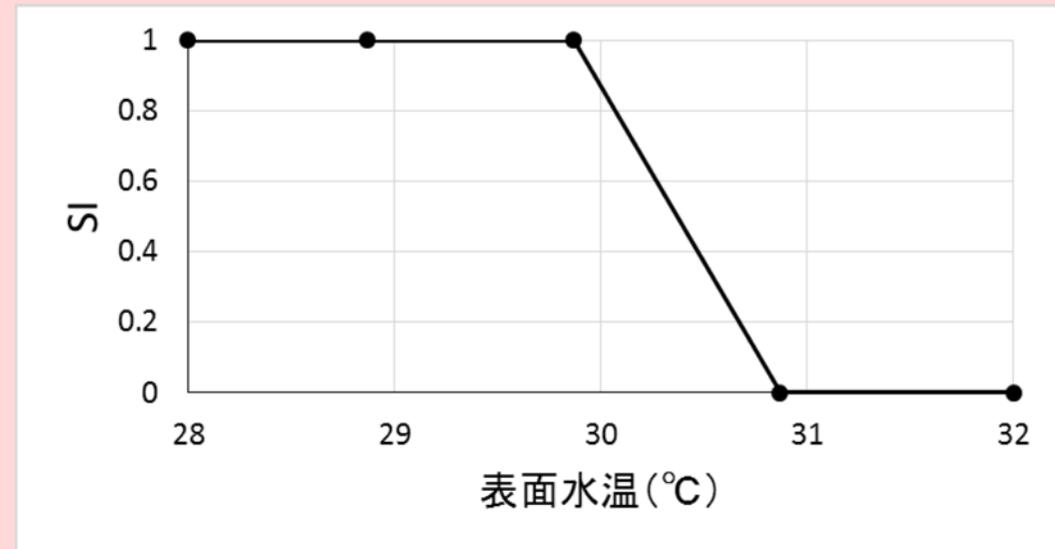
高水温SIの決定

1998年に久米島全域でサンゴの60%以上が白化し、
そのうち80%以上が死亡した(環境庁, 2000)

→1998年最暖月(8月)の平均水温と作成したSIモデルを見比べる



1998年8月海面平均水温(気象庁)
人工衛星とブイ・船舶による観測値



最暖月海面水温のSIグラフ

作成したSIモデルで白化を予測できる

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

本研究のSIモデルのポイントは

論文提出後に作成

①久米島で適用できる

→久米島サンゴの特徴（礁構造）を捉え、久米島の水温でグラフを作成した。

②放水の影響を見ることが出来る

→海面水温のグラフでは、放水による海中の水温変化を評価できない。

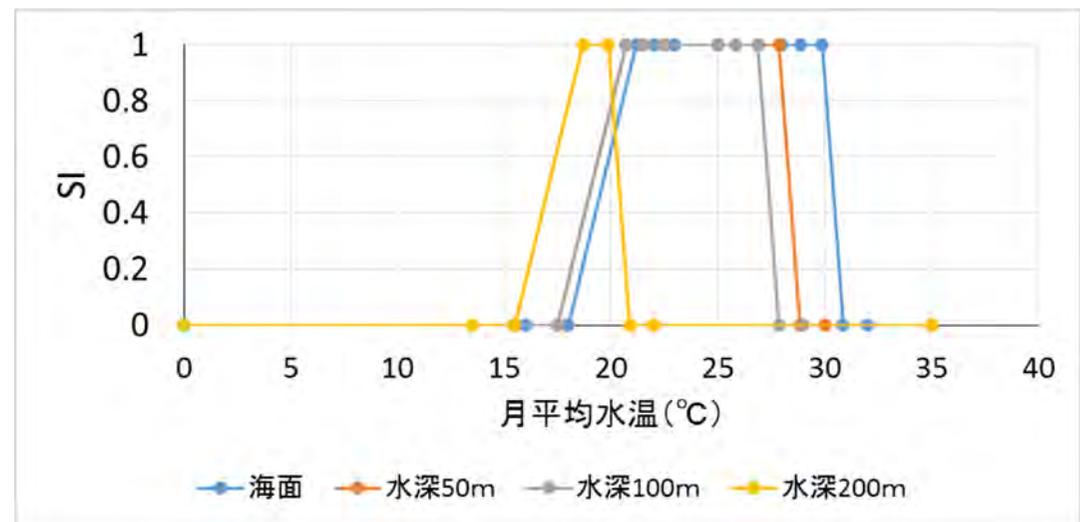
→久米島周辺での、海面水温と水深50m, 100m, 200mそれぞれの水温の差から水深ごとの（サンゴが存在する場）の水温を算出，SIと対応させた。

久米島周辺の水溫(°C)

水深(m)	2月	水温差	8月	水温差
0(海面)	22	—	29.5	—
50	21.5	0.5	27.5	2
100	21.5	0.5	26.5	3
200	19.5	2.5	19.5	10

(気象庁, 1982年~2010年の平均)

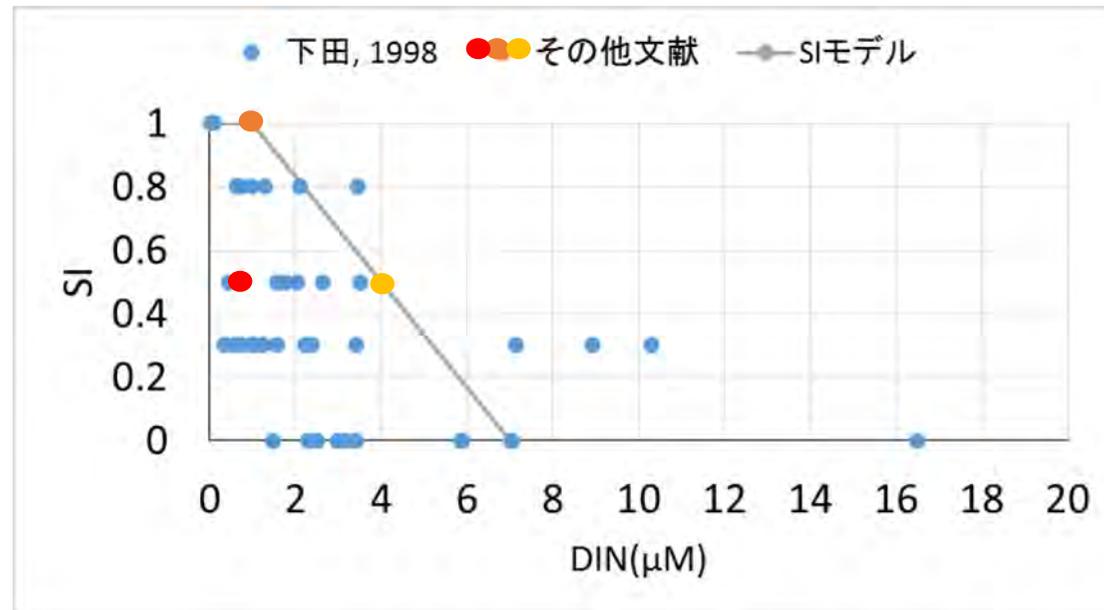
「海洋大循環モデル」の結果と人工衛星、船舶、ブイ、中層フロートなどの観測データを総合的に解析



水深ごとの水温SIグラフ

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

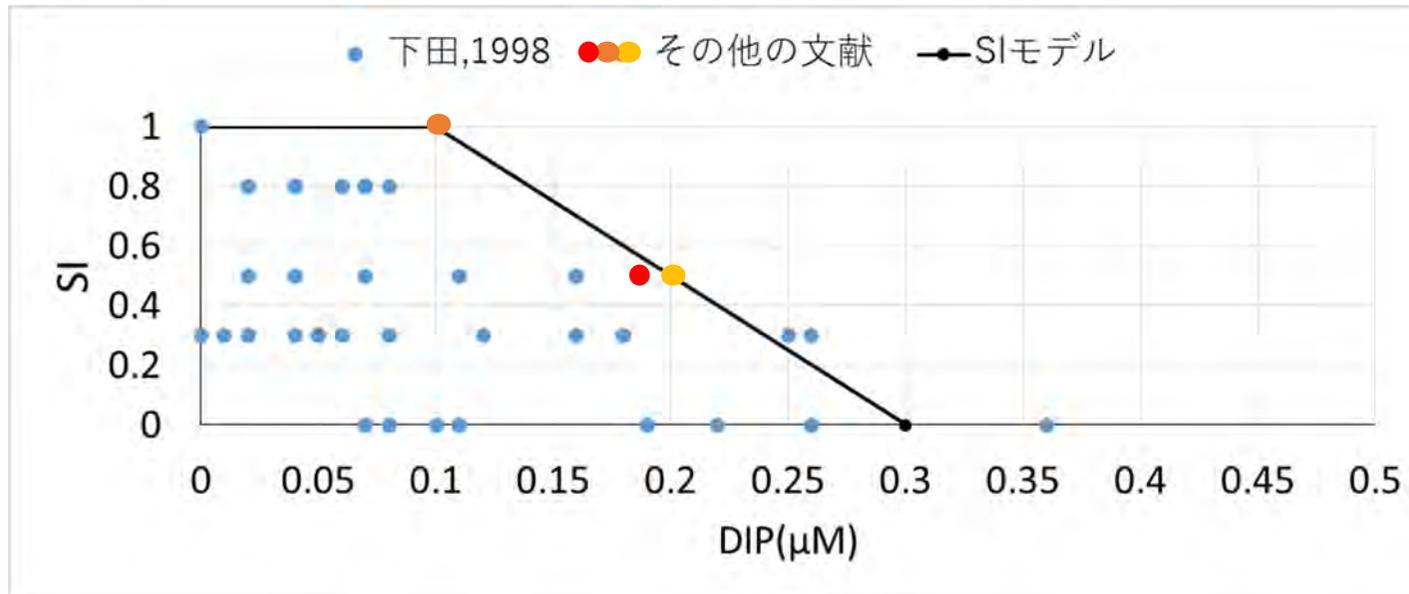
栄養塩（DIN）のSIグラフ



- 沖縄本島，渡嘉敷島，宮古島，石垣島，西表島の中の35か所にて，海水の採取と採取地点におけるサンゴ被度とDIN濃度の関係（下田，1998）
 - グレートバリアリーフ，カリブ海の研究で閾値とされた濃度（Bell and Elmetri,1996）
 - 沖縄においてサンゴ被度50%を保つために必要な値（kinjyo et al 2011）
 - 沖縄のサンゴ礁域にてホンダワラ類の海藻群落に移相した値（松川，1998）
-
- 5-10 μM：ブラジルで地下水汚染によりサンゴ被度10%以下（costa et al.2000）
 - 15 μM：石灰化が阻害された（Stambleretal,1991）
 - 1-11 μM：添加すると病原菌に感染されやすくなる(voss and rihcaedson,2006;Bruno et al,2003)
 - 1-20 μM：飼育した結果，産卵数，卵サイズの低下(ward and harrison,2000;harrison and ward,2001)

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

栄養塩（DIP）のSIグラフ



- 沖縄本島，渡嘉敷島，宮古島，石垣島，西表島の中の35か所にて，海水の採取と採取地点におけるサンゴ被度とDIN濃度の関係（下田，1998）
 - 富栄養に弱いサンゴ種(トゲスギミドリイシサンゴ)から強いサンゴ種(ハナヤサイサンゴ)や海藻に移相する値（松川，1998）
 - 沖縄においてサンゴ被度50%を保つために必要な値（kinjyo et al 2011）
 - 沖縄のサンゴ礁域にてホンダワラ類の海藻群落に移相する値（松川，1998）
-
- 0.5 μM：ブラジルで地下水汚染によりサンゴ被度10%以下（costa et al.2000）
 - 0.48 μM：大型藻類に移相した（松川，1998）
 - 0.19-0.29 μM：カリブ海にて藻類と競争がはじまった（kinjyo et al 2011）

ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

1. 水温、栄養塩とサンゴとの対応関係を定量的に評価するSIモデルを作成
2. 放水後のサンゴ生息環境を作成したモデルを用いて評価

放水による環境変化

先行研究にて

放水口の候補地の2点から深層水が放水された結果が

シミュレーションにて出力されている

+

環境変化へのサンゴ応答

ステップ1-1にて

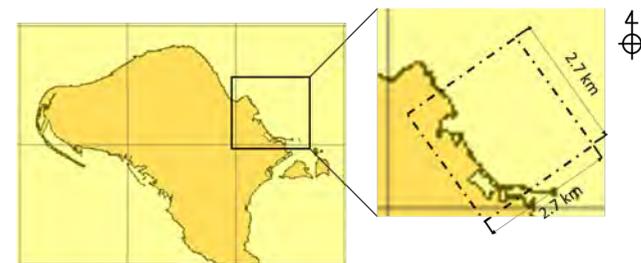
水温、栄養塩のSIグラフを作成した



- 放水後のサンゴ生息環境
- 放水口による環境影響の違いがわかる



海洋温度差発電放水予定位置(Wang,2017)



計算領域(Wang,2017)

初期値と境界条件：8月の気候値，気象条件
外力：M2潮汐

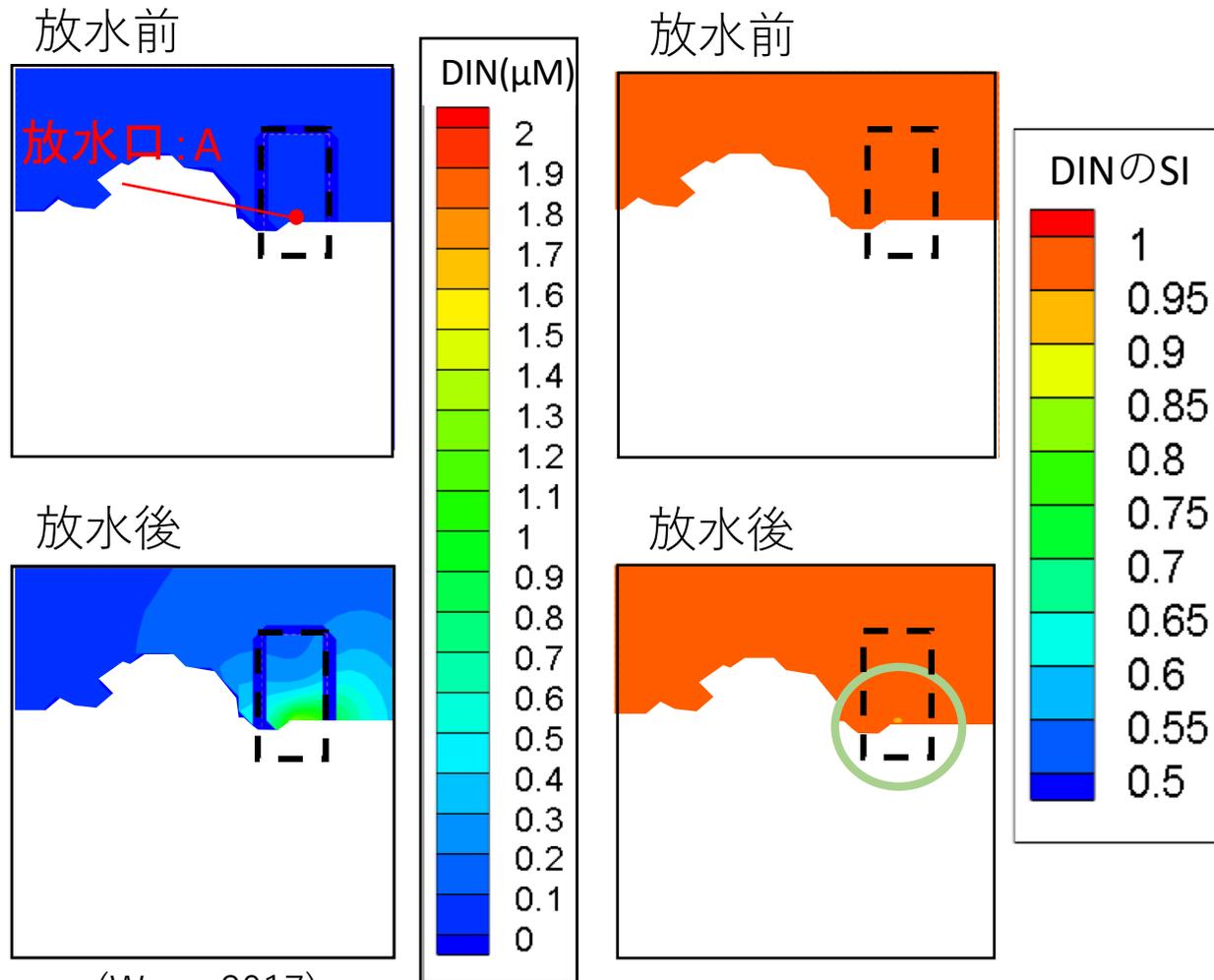
ステップ1：サンゴに対する低水温・富栄養な環境の影響評価

栄養塩(DIN)

水温

放水口Aのみ水深50-60m, 2700m²の範囲で変化があった。SIが0.9に低下したが大きな影響と言える変化ではなかった。

最大水温変化が放水口Aで0.7°C, 放水口Bで0.1°Cであった。SIに変化はなかった。



(Wang,2017)

結果

- 1MW規模ではサンゴに大きな影響は与えないことが示された。

影響ができる状況

- 規模の拡大など、計画の変更に伴って深層水放水量を増加したとき、変化がでる可能性はある。
- エルニーニョ現象等地球規模で高水温のときサンゴは白化するが、これを抑える可能性がある

**ステップ2：水温・栄養塩以外による
サンゴの生息環境評価手法の検討**

ステップ2：水温・栄養塩以外によるサンゴの生息環境評価手法の検討

1. 既存のサンゴモデルが久米島に適用可能か検討
2. その問題点を踏まえ、改善案として新たな環境因子の提案を検討

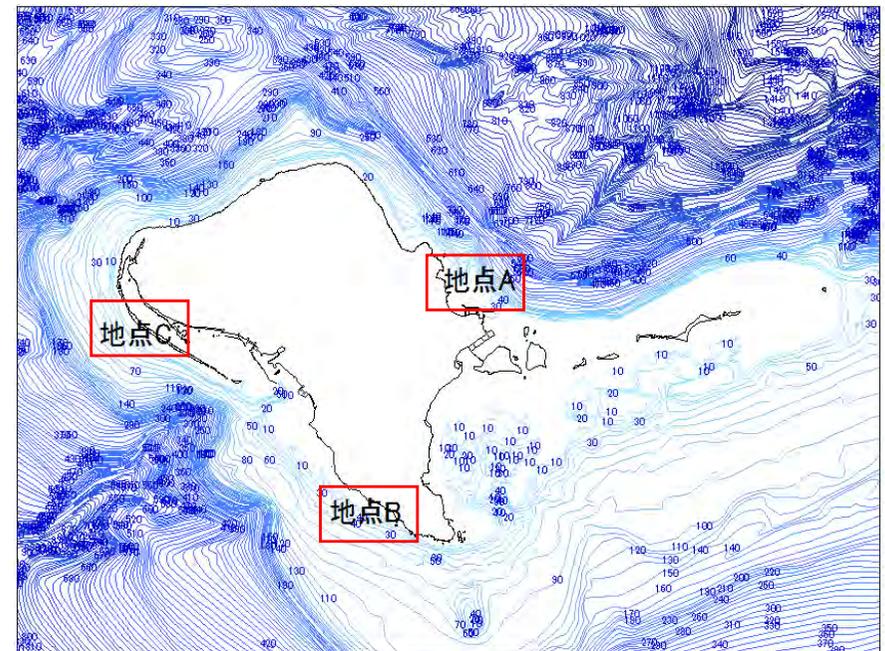
既存のHSIモデル（那覇港HSIモデル）が適用可能か検討するため、久米島の環境情報を既存のHSIモデルに入力、「求められたHSI=久米島のサンゴ被度」となるか検証した。

久米島にて、環境やサンゴ被度の異なる3地点を選択した。

那覇港のHSIモデル

$$HSI = \sqrt{(SI_A^2 + SI_C^2)/2} \times SI_B \times SI_D \times SI_E$$

- SI_A ：年平均有義波の底面軌道流速振幅(m/s)のSI
 SI_B ：年最大有義波の底面軌道流速振幅(m/s)のSI
 SI_C ：流速ベクトルの絶対値の平均(cm/s)のSI
 SI_D ：残差流速(cm/s)のSI
 SI_E ：年平均の光量子量($\mu\text{mol}/\text{sec}/\text{m}^2$)のSI



ステップ2：水温・栄養塩以外によるサンゴの生息環境評価手法の検討

結果

	水深 (m)	SI_A	SI_B	SI_C	SI_D	SI_E	HSI	サンゴ被度 (%)
地点A	10	0.052	1	0	0.18	1	0.0092	5-10
地点B	10	0.032	1	—	0.022	1	0.00070	5-10
地点C	10	0.030	1	—	0.091	1	0.0027	25-50

SI_A (波), SI_D (流れ)の値が小さく, 求めたHSIはサンゴ被度と相関しなかった.
相関しなかった理由

- ①那覇港と久米島で海域特性が異なっていた.
環境因子の変動域は場所によって異なる
- ②波や流れを精度良く推定することができなかった.
検証のための実測データが存在しなかった
実測値から空間分布を求めることも困難

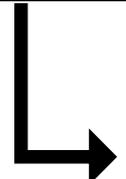


波, 流れではない, 久米島で使用できる新たな環境因子の提案

ステップ2：水温・栄養塩を含めたサンゴの生息環境評価手法の検討

1. 既存のサンゴモデルが久米島に適用可能か検討
2. その問題点を踏まえ、改善案として新たな環境因子の提案を検討

久米島で適用できる新たな環境因子の検討

- 
- ・久米島でデータが手に入ること
 - ・久米島のサンゴ分布を予測できること
 - ・波や流れのように算出に労力がかかりすぎないこと
 - ・検討したのち適切かを判断するため、類似研究があること

類似研究 (Costa et al., 2012)

- ・ここで、多くの地形データを環境因子として、サンゴの分布予測を行っている
- ・地形データであれば、残り3つの検討条件を満たす

「地形データ」をサンゴの生息環境評価を行う新たな環境因子として提案

〔検討方法〕：類似研究で分布予測に用いられたツール

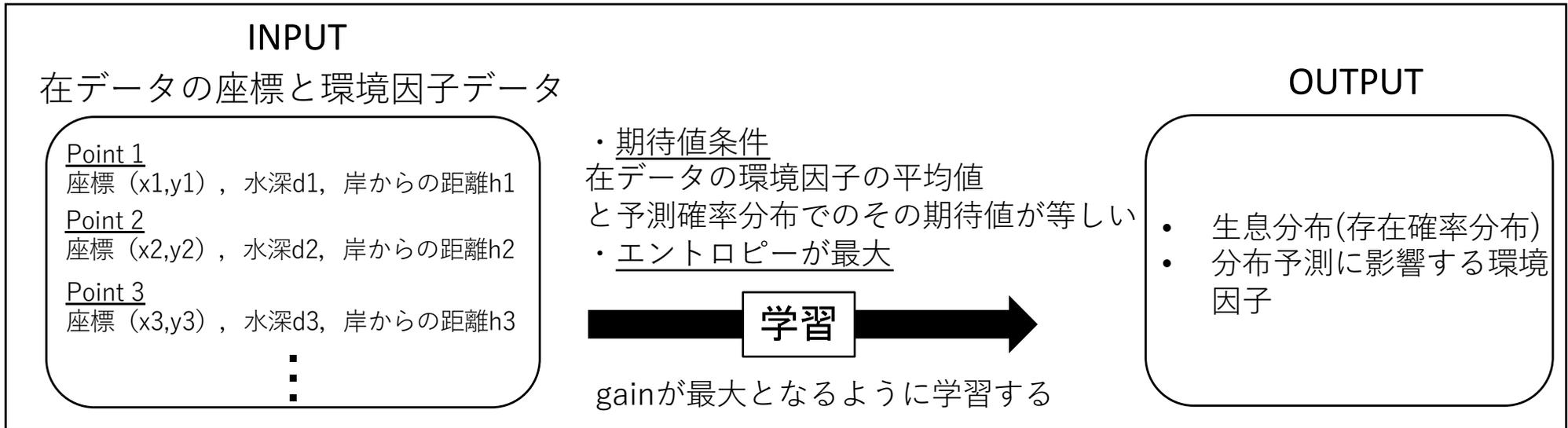
MaxEnt

最大エントロピー原理に基づく手法。

- ・在データのみで分布予測・環境因子評価が行うことができ、近年注目されている。
- ・入力した環境因子の中で重要なものを示してくれる。
- ・Au'au Channel(ハワイ)におけるサンゴ分布予測の実績がある。

ステップ2 : 水温・栄養塩を含めたサンゴの生息環境評価手法の検討

最大エントロピー原理とMaxEnt 在データのみから分布予測・環境因子の影響評価



- ・ 期待値条件

$$\sum_{i=1}^N f_j(x_i)q_\lambda(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m f_j(x_k)$$

N: 予測データ総数

- ・ エントロピー最大

$$q_\lambda(x) = \frac{\exp(\sum_{j=1}^n \lambda_j f_j(x))}{Z_\lambda}$$

評価関数

$$gain = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \ln(q_\lambda(x_k)) - \sum_{j=1}^n \beta_j |\lambda_j|$$

q: 確率分布
x: 地点の座標
λ: 環境因子の重み (feature weight)
f: 環境因子 (feature)
n: 環境因子の総数
Z: qの総和を1にするための定数

x: 在データの座標
m: 在データの総数
β: 誤差範囲
(the width of error bound)

gain大 ⇒ 分布確率が在データ点に集中 + 過学習によって複雑すぎない

ステップ2：水温・栄養塩を含めたサンゴの生息環境評価手法の検討

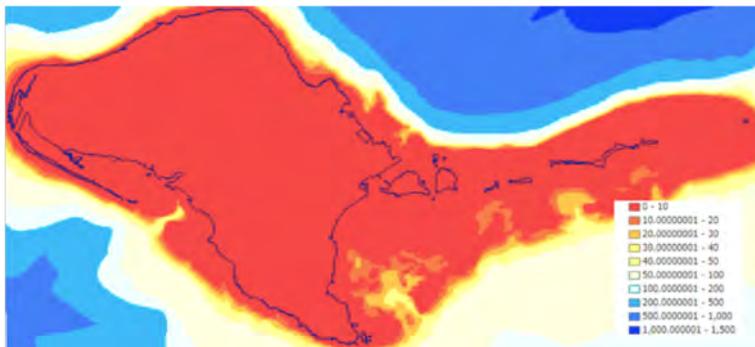
INPUT

サンゴの在データ



- サンゴランク 4 以上を「在データ」として入力
- マンタ法調査結果：136点
 - 久米島全域が調査対象
 - 礁斜面を目視でダイバーが調査
 - サンゴ被度に大きな差が存在
- 80%を学習データ、20%を検証データとして利用

環境因子



内挿した久米島の水深分布

- 類似研究で重要とされた地形因子をベース
 - 水深、岸からの距離、斜度
 - 水深と斜度は半径5mから200mの
 - 平均値および標準偏差を入力
- 元の水深データは日本水路協会のポイントデータ
 - 元データは久米島周辺で十分に細かい
 - 5m×5mのメッシュに内挿でGISを使って地形データ（水深，斜度，距離）を求めた。

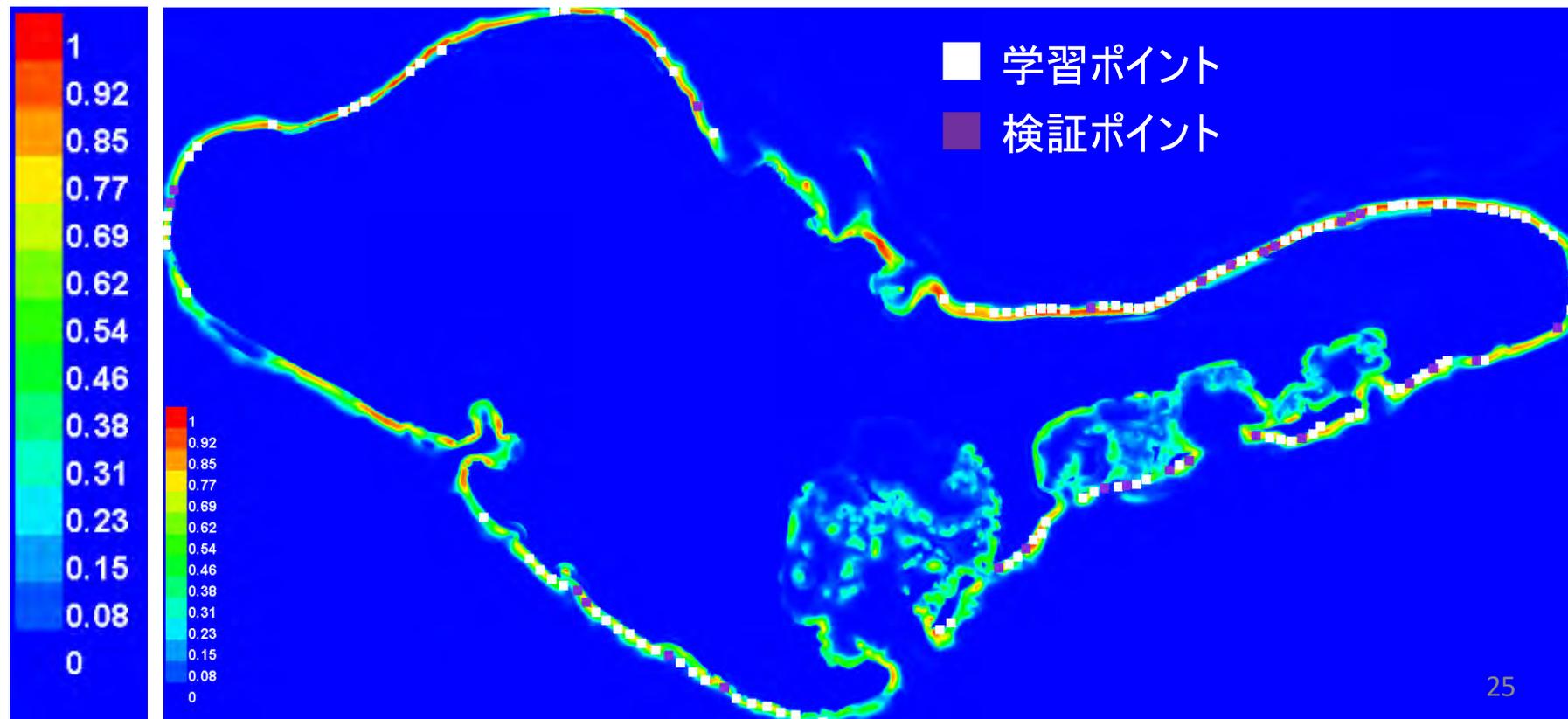
ステップ2 : 水温・栄養塩を含めたサンゴの生息環境評価手法の検討

OUTPUT

モデルの信頼度

- AUC : 学習結果の確率分布が在データのポイントでどれだけ高くなったか？
- 学習データAUC = 0.982, 検証データAUC = 0.977
- ハワイ周辺における先行研究 (Costa et al., 2012) AUC=0.90~0.97と同程度

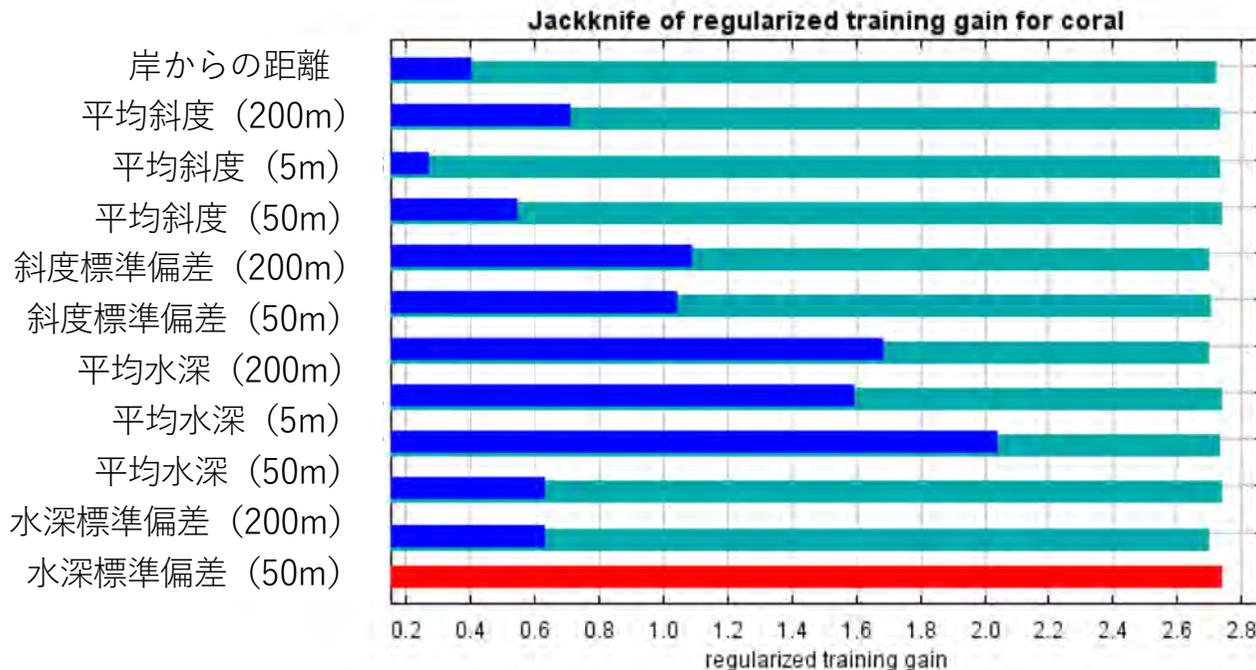
分布確率 (最大を1, 最小を0とする)



ステップ2 : 水温・栄養塩を含めたサンゴの生息環境評価手法の検討

OUTPUT

Jackknifeテスト：重要因子を示す



■ With all variables

全ての環境因子を入力して学習したときのgain.

■ With only variables

その環境因子だけを入力して学習したときのgain.

これが大きいとき、その環境因子がサンゴの住みやすさに強く影響することを示す

■ Without variables

その環境因子以外を入力して学習したときのgain.

Jackknifeテストで分かること

①平均水深の重要性が高い：類似研究と同じ結果

しかし、平均水深だけでは地形的特徴を捉えられているとはいえない。平均水深の定量的な値も類似研究と似ていた（平均水深100mでSI=0）

②斜度も分布予測において重要：類似研究と同じ結果

半径の大きい斜度要素の重要性が比較的高かった。今後要検討。

③岸からの距離の重要性は低い：類似研究と異なる結果

新たな環境因子である地形データでサンゴの生息環境を評価できる

久米島サンゴの放水影響評価

放水によって変化する環境因子

- SIモデルの構築
- 構築したSIモデルで放水影響を評価
→影響があまりないことを確認

今後

- 作成したSIモデルの検証
- より正確なSIモデルの構築のためサンゴ被度と対応した実測値での情報収集

放水によって変化しない環境因子

- 既存サンゴモデルを久米島に適用
→波・流れ因子算出は困難
→物理環境の違いからSIモデルに定量的な汎用性はなかった
- 久米島においてMaxEntを用いたサンゴの分布予測
→波・流れ因子ではない新たな因子でサンゴの生息環境を評価
→重要因子は「平均水深・斜度」
斜度の重要性は今後より詳細なデータで検討すべき。
→類似研究で重要とされていた「岸からの距離」は重要でない。

今後

- 地形データと久米島サンゴの定量的な関係性の解明，地形のSIモデル作成



放水による生息環境の評価を久米島にて定量的に行うHSIモデルの完成