



海底熱水鉱床開発における 環境影響評価ツールの開発

海洋技術環境学専攻

47-086806 阪本真士

指導教員: 多部田准教授

背景① 海底熱水鉱床とは

- 海底熱水活動により、海底に生成する鉱床のこと。
- 海底熱水活動は現在、世界中の海底に約350か所確認されている。
- 銅、鉛、亜鉛、金、銀等の重金属の供給源として期待されている。

背景② 海底熱水鉱床の生成過程

- ①地下深部に海水が浸透し、マグマ等により熱せられる。
(270°C～350°C)
- ②熱水は周囲の岩石より重金属を溶脱し、海底より噴出。
- ③硫化物として沈殿することにより熱水鉱床を形成



熱水噴出孔
出典: Metal Mining Agency of Japan

3

背景③ なぜ海底熱水鉱床か

- 海底熱水鉱床は、日本の排他的経済水域内にも分布。
(沖縄トラフ海域及び伊豆・小笠原海域等)
- 賦存している場も浅いこと等から、深海底鉱物資源の中では最も有望な資源として期待されている。
- 「排他的経済水域等における当面の探査・開発の対象を、石油・天然ガス、メタンハイドレート、海底熱水鉱床とし、必要な政策資源を集中的に投入」(海洋基本計画より)

4

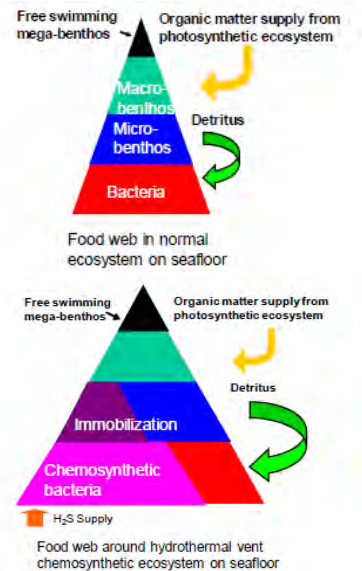
背景④ 熱水活動域の特徴

- 熱水プルームの噴出・拡散
- 化学合成生態系の形成

化学合成生態系

熱水とともに供給される硫化水素を直接利用する微生物の上に成り立つ生態系

化学合成生態系の存在の影響を受ける周辺海域の生態系は、深海底の通常の生態系より基礎生産性の高い場所となる



通常の光合成生態系(図上)と化学合成生態系を含む生態系(図下)の構成の比較(山崎,2009)

背景⑤ 深海底鉱物資源開発の環境影響に関する研究事例

- 1994年,JET(Japan deep-sea impact Experiment):日本のマンガン団塊工区で海底擾乱とプルーム拡散のモニタリングを実施
 - 1999年,DIETS(Direct Impact Experiment on Seamount):コバルトリッチクラストが賦存する場所での、集鉱機走行による海底の直接破壊を模擬した擾乱実験
- 通常の海底生態系に関する評価事例はあるが、化学合成生態系に関するものはない。

本研究の目的

- 海底熱水鉱床の早急な開発が求められている
- 熱水鉱床周辺域では環境データが不足している



目的

- ① 海底熱水鉱床近辺の場を再現するためのツールの開発
 - 物理場: 熱水プルーム (物質循環)
 - 生態系: 化学合成生態系を含めた生態系
- ② 生物量を評価する際に重要度が高い影響因子あるいはパラメータは何であることを考察する。

7

熱水プルームの挙動の再現

- 熱水プルームの挙動は、熱水活動域の物質循環を考える上で重要である。
- 熱フラックスと拡散係数を未知数とし、観測された流速、水温から、実際のプルームの挙動に適合する組み合わせを求める。

8

使用するモデル～MEC-NEST(FULL-3D)

支配方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_D}{\partial z} + A_M \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 + 0.002T) \cdot (S - 35.0)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + v \frac{\partial Q}{\partial y} + w \frac{\partial Q}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial Q}{\partial z} \right)$$

u, v, w [m/s]: x 方向, y 方向, z 方向の流速

A_M, K_M [m²/s]: 水平方向, 鉛直方向の渦動粘性係数

f [1/s]: コリオリパラメータ

ρ, p_D [kg/m³]: 全圧, 流水圧

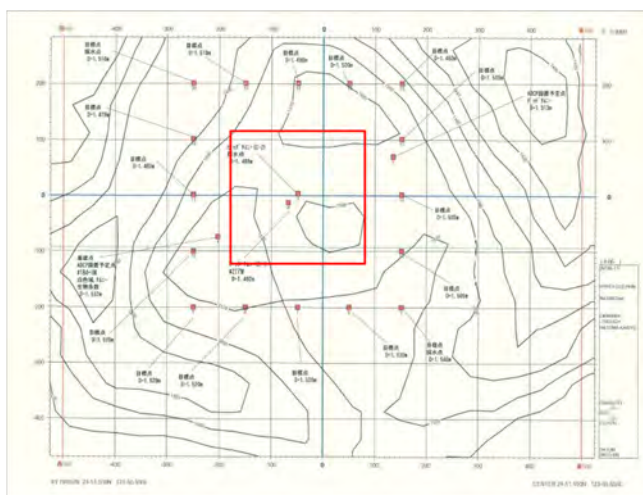
ρ [kg/m³]: 密度, T [°C]: 水温, S [psu]: 塩分濃度

A_c, K_c [m²/s]: 水平方向, 鉛直方向の渦拡散係数

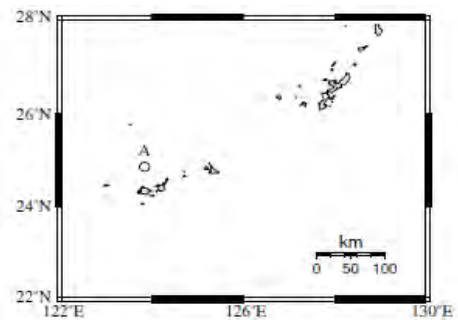
9

計算対象(鳩間海丘)について

- 沖縄トラフ南部に位置
- 底辺の直径4km, 比高600mの海丘
- 山頂部には熱水活動域が存在



計算領域(赤線内)



鳩間海丘の位置

10

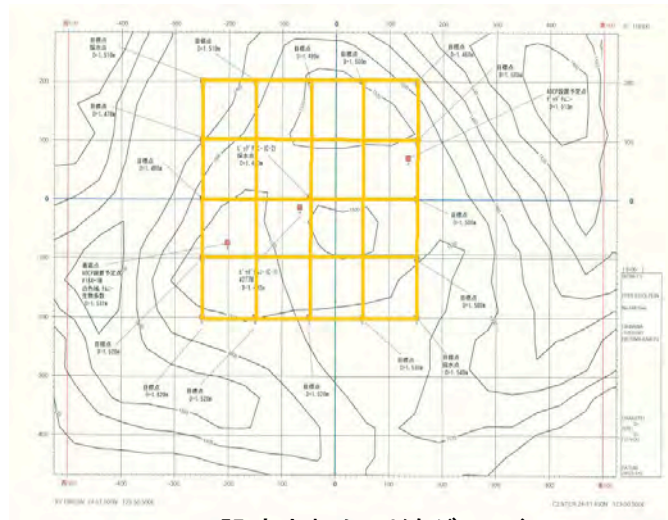
観測データ

ROVによるグリッド観測

水深

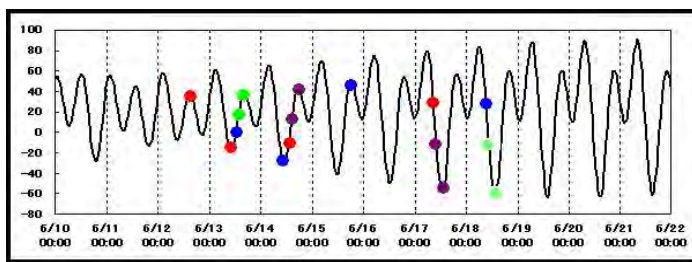
1365m、1400m、1435m、1700mの4層

上潮、満潮、下潮、干潮
の4フェーズ



のべ16層のデータを計算値と比較

設定された測線グリッド



石垣の潮位と観測の行程(紫:1365m、赤:1400m、青:1435m、緑:1470m)

11

計算条件

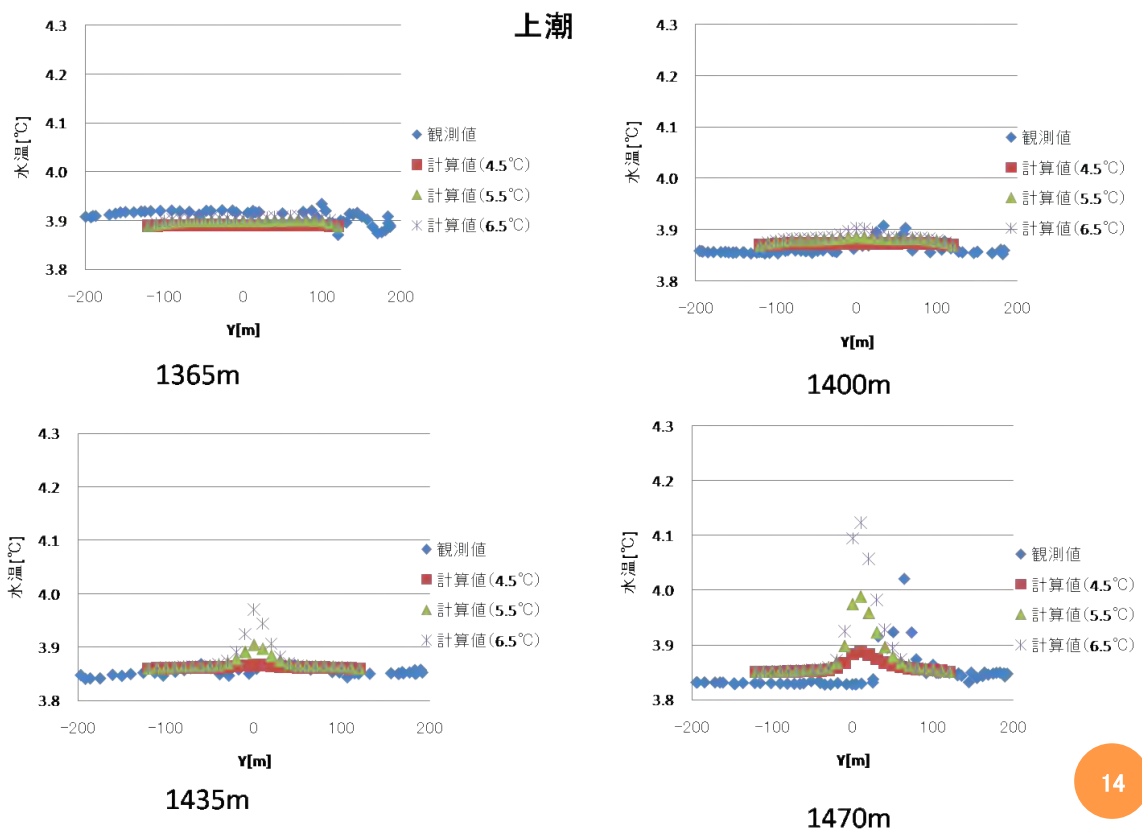
- 計算領域: 250m×250m(中央に熱水噴出孔)
- 格子のサイズ(1320m以深): 10m×10m×10m
- 熱水噴出孔はセルの温度を一定にすることにより表す
- 開境界条件: 4方向の開境界に流速の観測値を入力
- 渦拡散係数は水平方向は一定、鉛直方向は成層化関数(Ri数の関数)によって表す

12

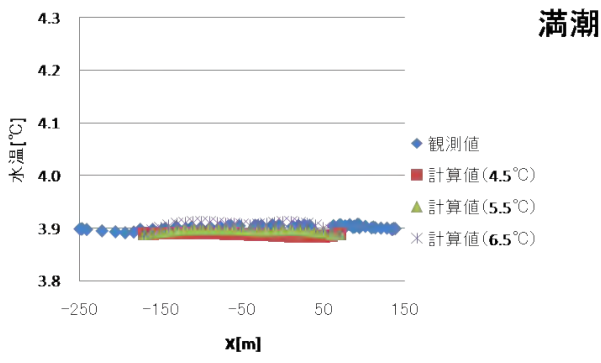
計算結果

- 熱水噴出孔のセルの温度は、4.5°C、5.5°C、6.5°Cの3通りで計算を行った。
- 渦拡散係数を0.215 [m²/s]とした。
- 噴出孔の直上の測線ラインに沿って水温の比較を行った。

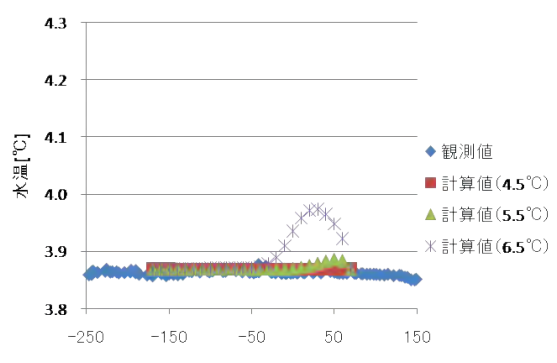
13



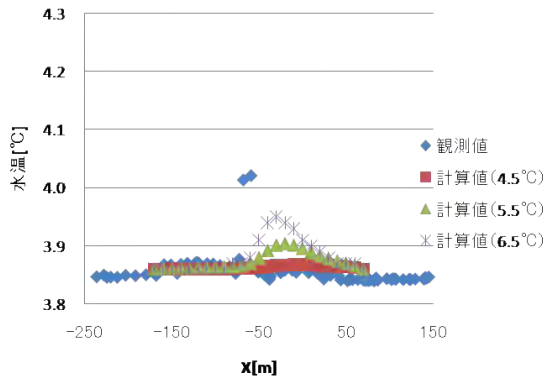
14



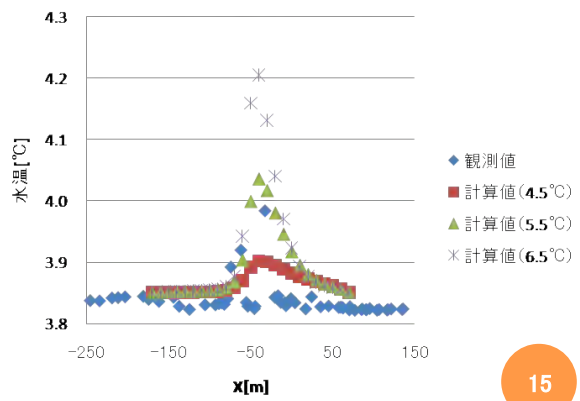
1365m



1400m

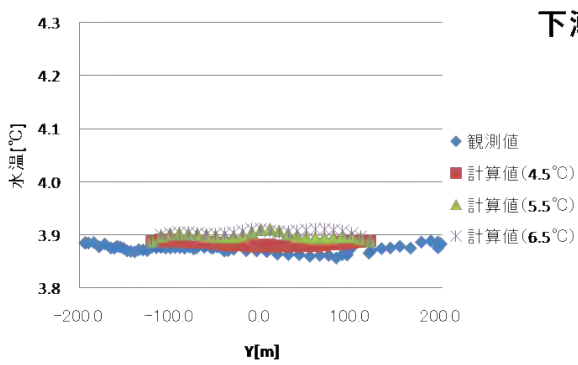


1435m

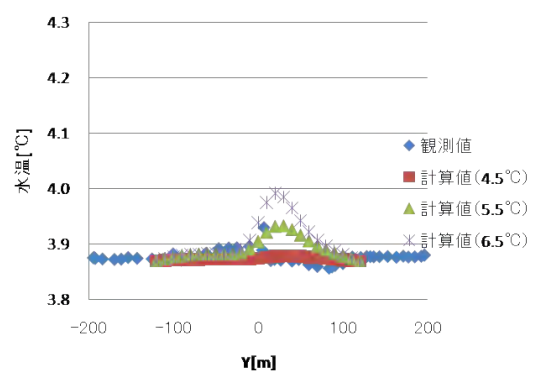


1470m

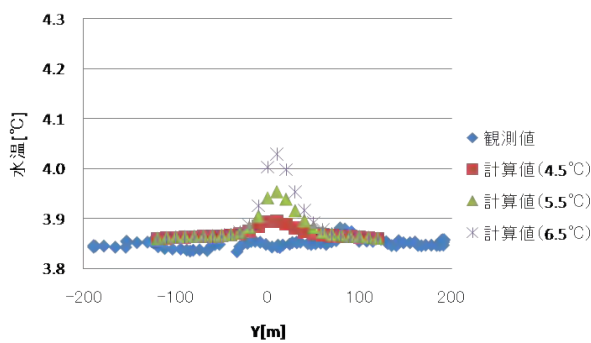
15



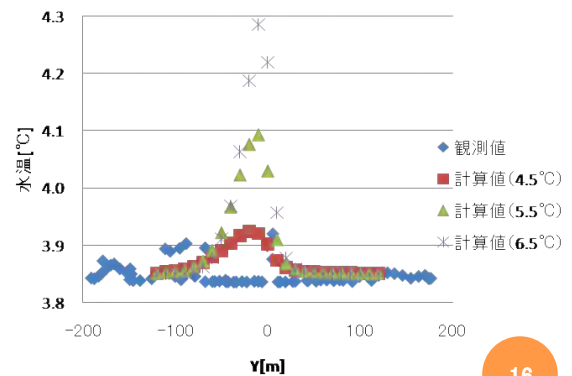
1365m



1400m



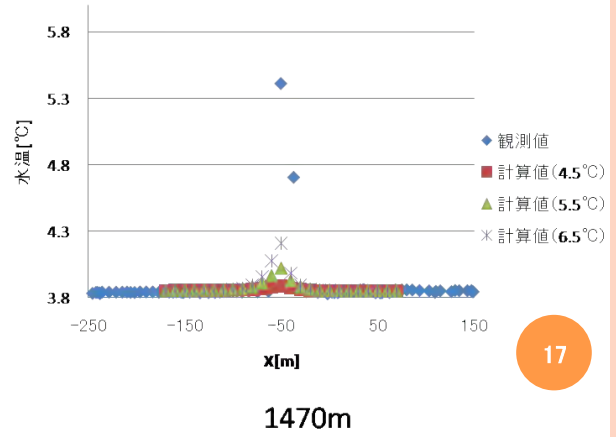
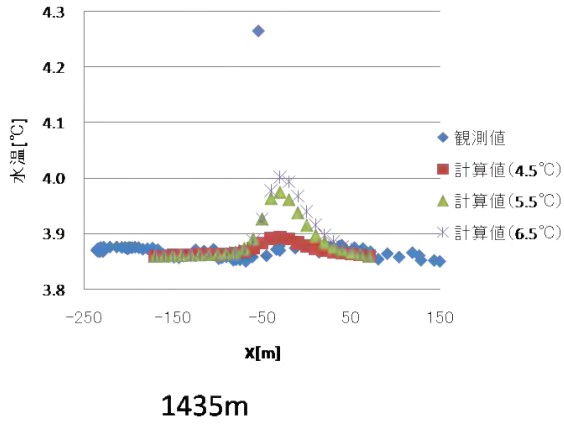
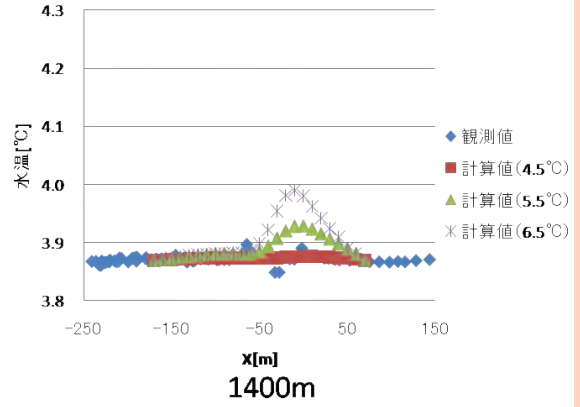
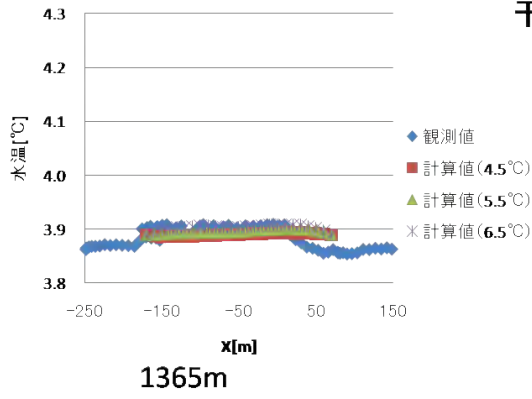
1435m



1470m

16

干潮

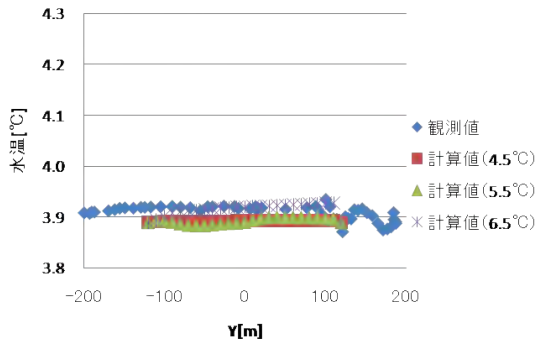


17

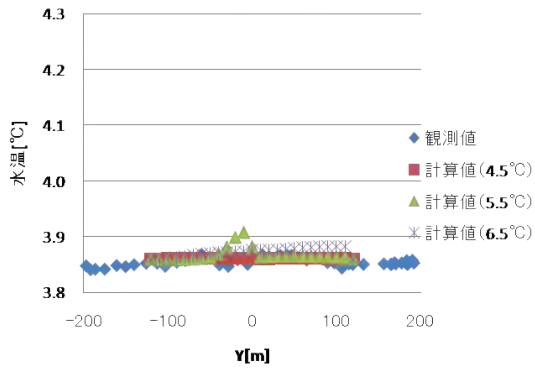
- 拡散係数 $0.00215[m^2/s]$ とし、同様に計算を行った。

18

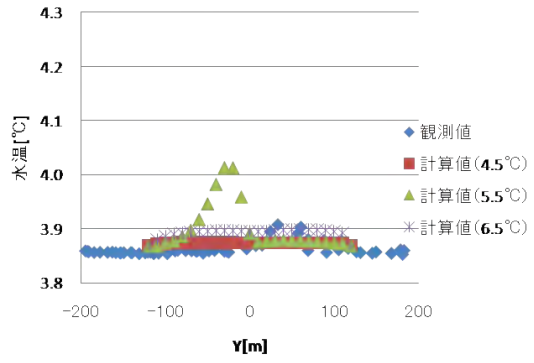
上潮



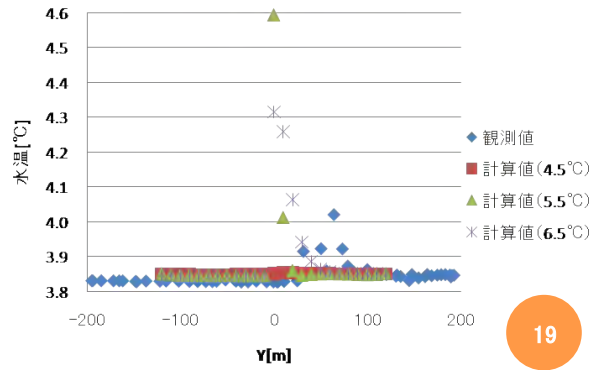
1365m



1435m



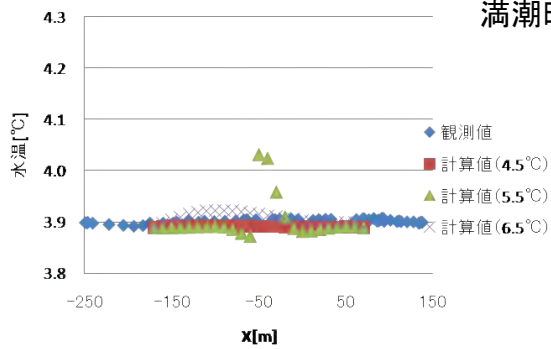
1400m



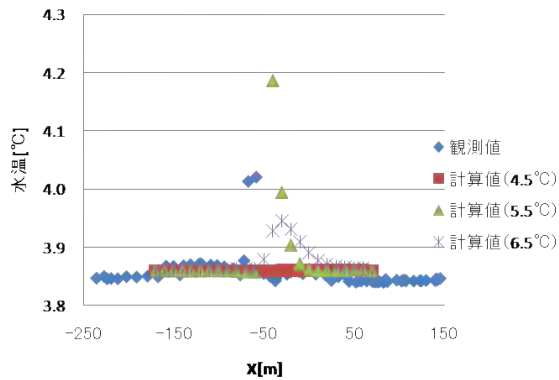
1470m

19

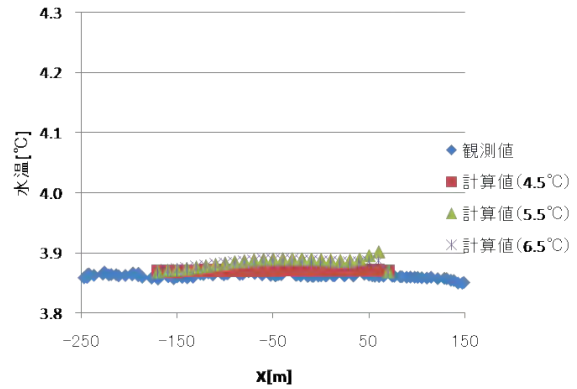
満潮時



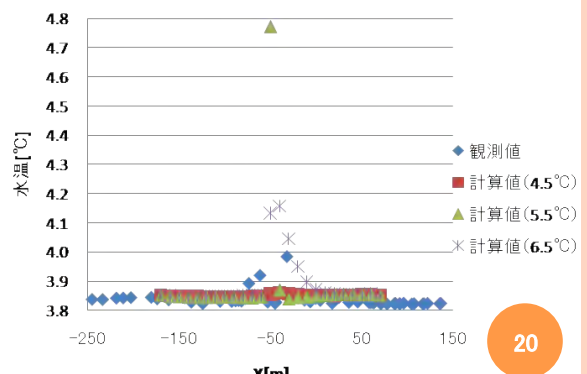
1365m



1435m



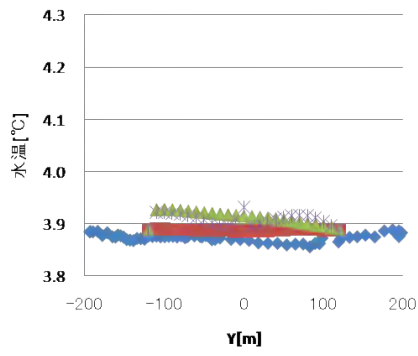
1400m



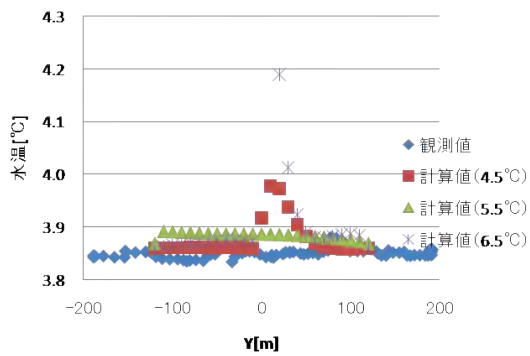
1470m

20

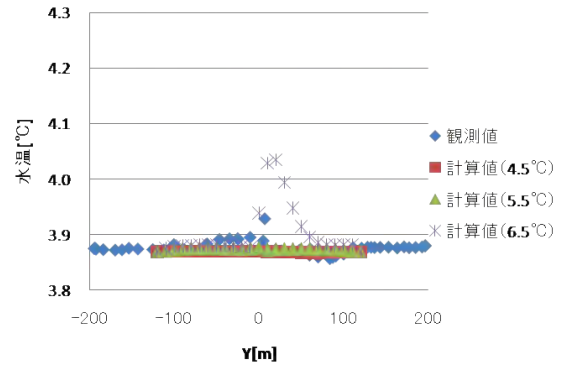
下潮



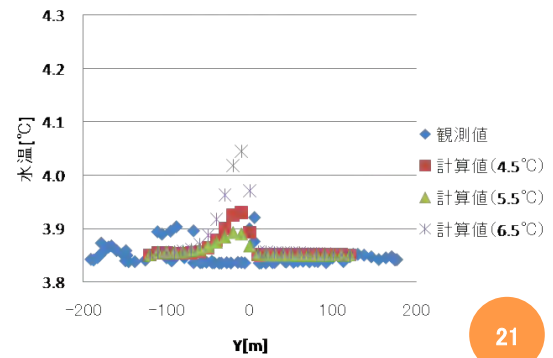
1365m



1435m



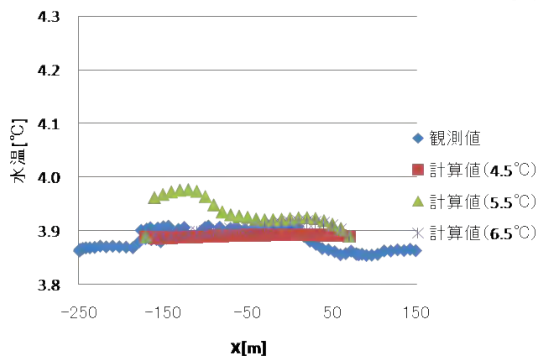
1400m



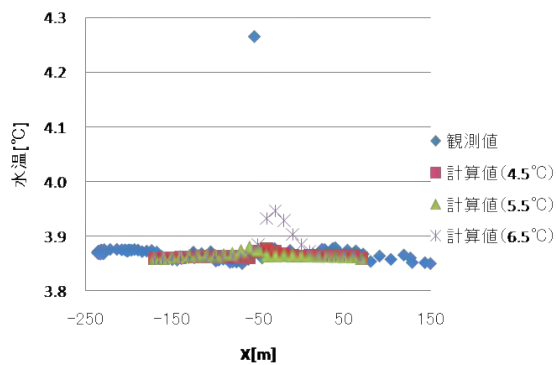
1470m

21

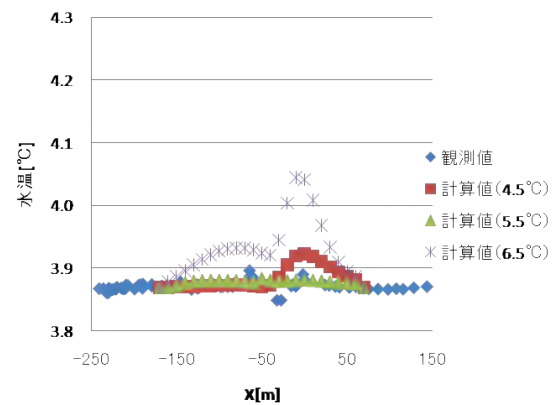
干潮



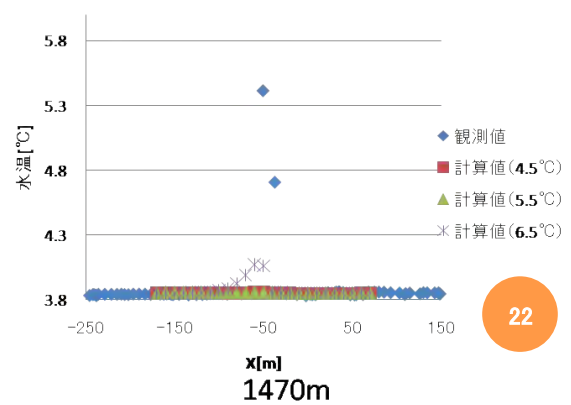
1365m



1435m



1400m

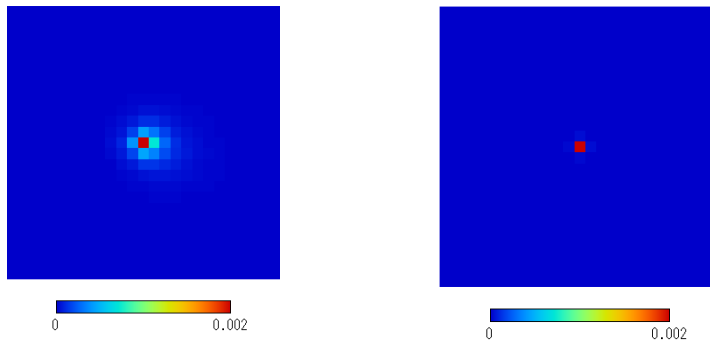


1470m

22

底層での物質の拡散

- 噴出孔のセルの硫化水素濃度を 2.0×10^{-3} [mol/l]と設定
- 渦拡散係数 0.215 [m^2/s]、噴出孔のセルの温度 5.5 [$^{\circ}\text{C}$]のケース①と渦拡散係数 0.00215 [m^2/s]、噴出孔のセルの温度 4.5 [$^{\circ}\text{C}$]のケース②で比較した。



ケース①での硫化水素濃度[mol/l] ケース②での硫化水素濃度[mol/l]

23

熱水プルームの挙動の再現～まとめ

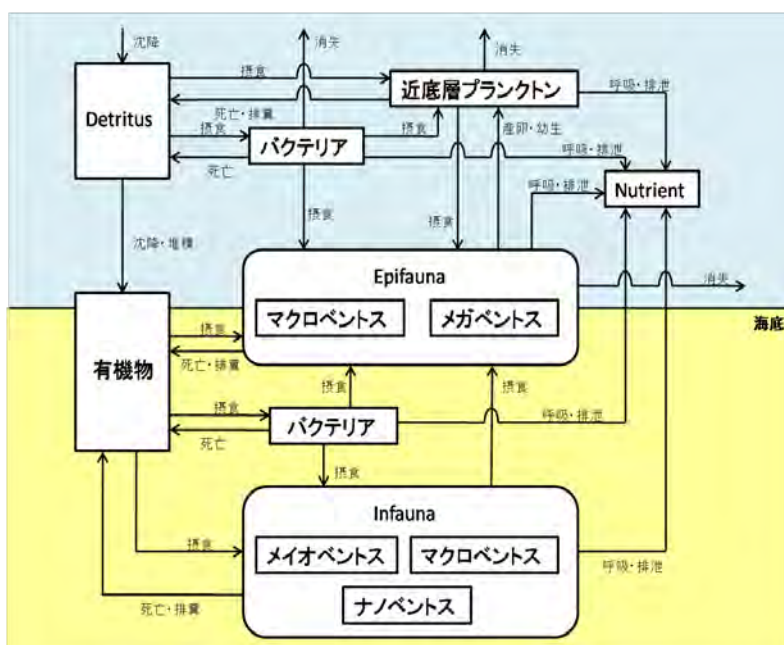
- 実際に熱水活動が行われている鳩間海丘において、熱水プルームの挙動の再現を行った。
- 熱水噴出孔のセルの温度、渦動拡散係数を変化させて計算を行った。
- 渦拡散係数を 0.215 [m^2/s]としたとき、 5.5 $^{\circ}\text{C}$ で最も再現性が良かった。
- 渦拡散係数を 0.00215 [m^2/s]としたとき、 4.5 $^{\circ}\text{C}$ で再現性が良かった。
- 確度よく熱のインプットを求めるには、渦拡散係数の情報がある程度必要であることが分かった。
- 上記の2ケースで化学合成に必要な硫化水素濃度の拡散の計算を行った。

24

海底生態系モデル

- 海底熱水鉱床開発の環境影響評価をするにあたって、**通常**の海底生態系と**化学合成生態系**の両方を考慮しなくてはならない。
- **通常**の海底生態系: 過去の深海底鉱物資源開発の環境影響評価実験のデータ有
- **化学合成生態系**: 環境影響データなし

通常



$$(a \text{ による } b \text{ の摂食}) = \mu \cdot v_a \cdot B_a$$

$$v = \alpha_1 [1 - \exp\{-\lambda(\Pi - B')\}]$$

$$(\text{排糞}) = (1 - e) \cdot v \cdot B$$

$$(\text{呼吸}) = (\alpha_2 + \eta \cdot v) \cdot B$$

$$(\text{自然死亡}) = \alpha_3 \cdot B^2$$

$$(\text{有機物の摂取}) = \alpha_4 \cdot \frac{B_{\text{organic}}}{K + B_{\text{organic}}} \cdot B$$

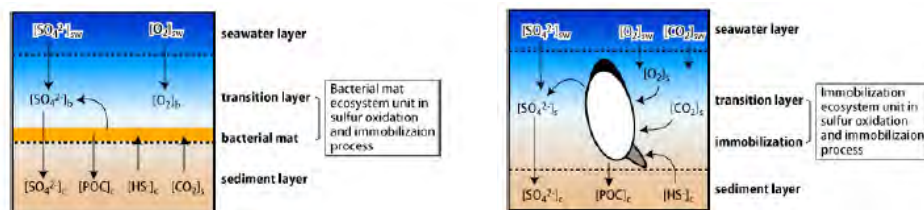
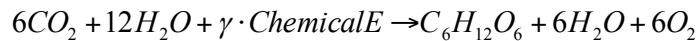
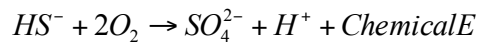
B : 現存量[mgC/m^2]
 μ : a にとっての全餌料における b の割合[-]
 v : 捕食速度[1/day]
 α_1 : 最大摂食速度[1/day]
 λ : $lvlev$ の定数[-]
 Π : 捕食の閾値[mgC/m^2]
 B' : a にとっての全餌料[mgC/m^2]
 e : 同化効率[-]
 α_2 : 基礎代謝速度[1/day]
 η : 摂食活動に伴うエネルギーの消費率[-]
 α_3 : 相対枯死速度[1/(day· mgC/m^2)]
 α_4 : 最大摂取速度[1/day]
 K : 半飽和定数[mgC/m^2]

熱水活動域の生態系と通常 of 海底生態系との比較

1. 化学合成生態系の存在

熱水活動域には、酸化還元反応によって得られるエネルギーを利用する化学合成細菌と、それを共生させる生物がいる。

本研究では代表的な硫黄酸化菌のみを考慮する。



硫黄酸化菌(左)と共生生物(右)のモデル概念 (Yamazaki,2007)

27

熱水活動域の生態系と通常 of 海底生態系との比較

2. メガベントス

- 熱水活動域では明白な優占種を除いて、通常 of 海底と生物量はほとんど変わらない。(Fujikura,2002)
- 優占種は化学合成細菌を共生させる生物(シロウリガイ等)や化学合成細菌を食べる生物といった熱水活動域特有の種。

3. メイオベントス

個体数調査:

Zekely(2006) at 大西洋中央海嶺、東太平洋海膨

Dinet(1998) at カリフォルニア湾

どの海域でも10cm²当たりの個体数は数十個体程度

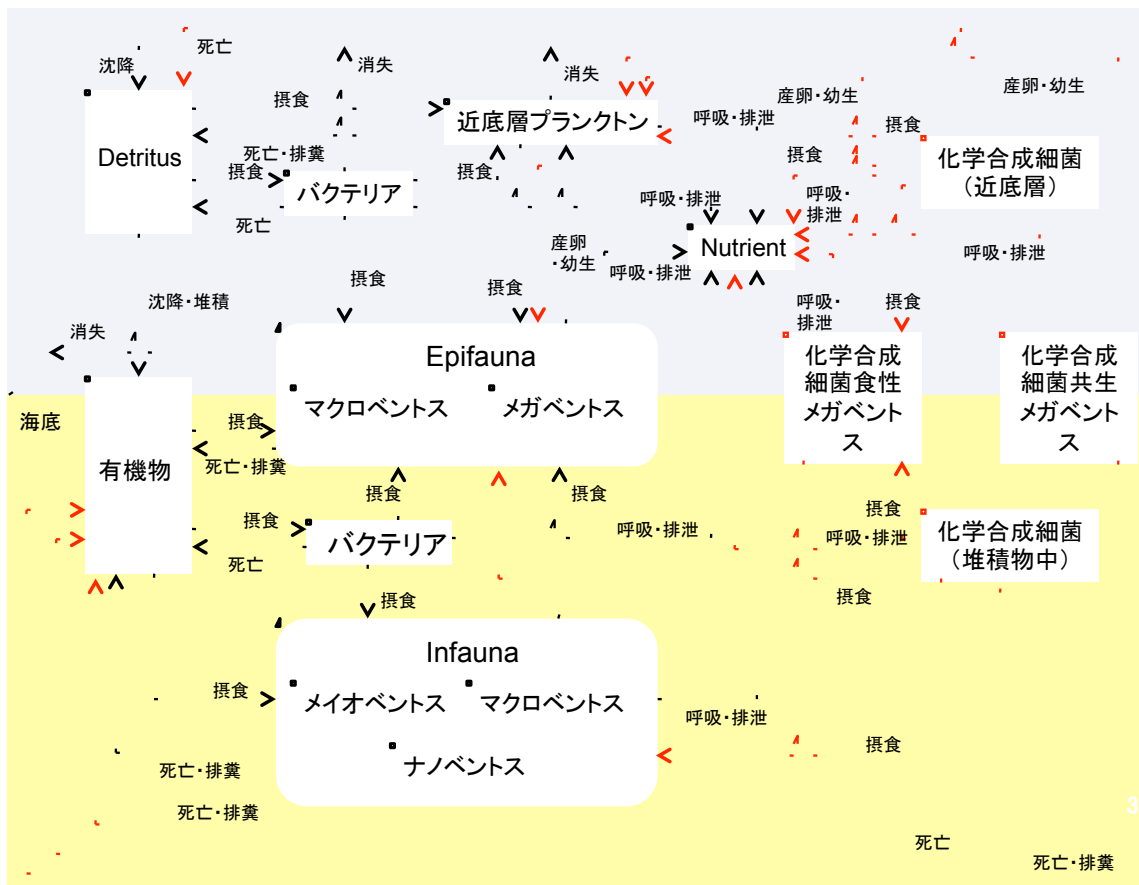
通常 of 海底生態系で用いている個体数とオーダーは変わらない。

28

熱水活動域の生態系モデルの構築

- ベースは通常海底生態系モデル
- 新たに増えるコンパートメント：
 - 化学合成細菌(近底層)、化学合成細菌(堆積物中)、化学合成細菌共生生物、化学合成細菌食性メガベントス
- 熱水活動域特有の捕食性メガベントスは、他のメガベントスと区別するために化学合成細菌食性メガベントスとし、化学合成細菌しか食べないと設定。

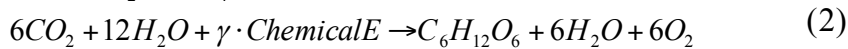
29



30

化学合成活動の定式化

○ 酸化反応を用いた硫黄酸化菌の増殖 (Takeuchi, 2007)



$$(\text{増加量}) = \frac{R_{CO_2}}{C_B}$$

$$R_{CO_2} = \gamma^{-1} \cdot R_{HS}$$

$$R_{HS} = k_{HS} \cdot f_{HS} \cdot [BAC]$$

$$f_{HS} = \frac{[HS^-]}{[HS^-] + K'_{HS} \cdot [BAC]}$$

R_{CO_2} : (1)の反応速度 [μmol]

C_B : cell当たりの炭素量 [$\mu\text{mol} / \text{cell}$]

R_{HS} : (2)の反応速度 [μmol]

[BAC]: 硫黄酸化菌の現存量 [cell]

γ : 二酸化炭素固定率 [-]

k_{HS} : (1)の反応速度定数 [$\mu\text{mol} / \text{yr} / \text{cell}$]

f_{HS} : 制限関数 [-]

K'_{HS} : 成長抑制率 [$\mu\text{mol} / \text{cm}^2 / \text{cell}$]

- 計算時は生物量は[mgC]に換算
- 化学合成細菌共生生物の生物量増加はバクテリアの酸化反応による炭素量の増加とする。
- パラメータはYamazaki (2007)より採用

31

熱水活動域の生物の現存量の推定

- 今回は沖縄トラフの熱水活動域の生物量を参考にした。
- 通常海底生態系モデルに存在する要素に関しては、値をそのまま引き継ぐことにした。
- 新たに追加した要素に関して現存量の推定を行った。
- ベントスの現存量の炭素量の変換には以下の式を用いた。

$$\text{炭素量} = \text{個体数} \times \text{平均体積} \times \text{比重} \quad (1.1)$$

$$\times \text{炭素含有比} (12.4\%)$$

なお、ベントスの平均体積については文献よりおおよその値を推定した。

32

熱水活動域の生物の現存量の推定

①化学合成細菌共生メガベントス

- Fujikura(2002)より、沖縄トラフの南奄西海丘における優占種である*Bathymodilus japonicus*の個体密度：
53.0[inds./m²]
 - 体積：20cm³/個体
- 現存量 1.45×10^{-1} mgC/m
- 共生する細菌の量： 3×10^{11} [cell/inds.]
(Yamamoto,2002)

33

熱水活動域の生物の現存量の推定

②化学合成細菌食性メガベントス

- Fujikura(2002)より、沖縄トラフの南奄西海丘における優占種である*Cantrainea jamsteci*の個体数5.3[inds./m²]を使用。
 - 体積：1cm³
- 7.24×10^{-5} mgC/m²とした。

新たに付け加えたコンパートメントについておおよそこれらの値を再現できるように化学合成以外のパラメータについて設定を行った。

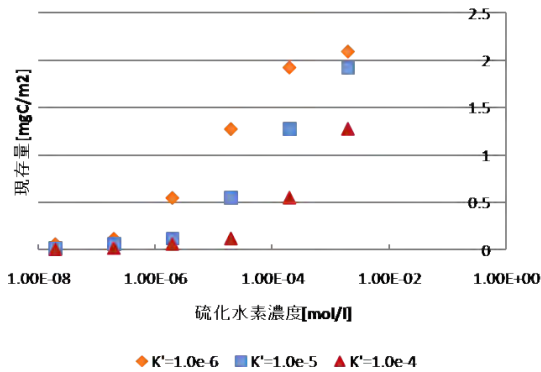
34

感度解析

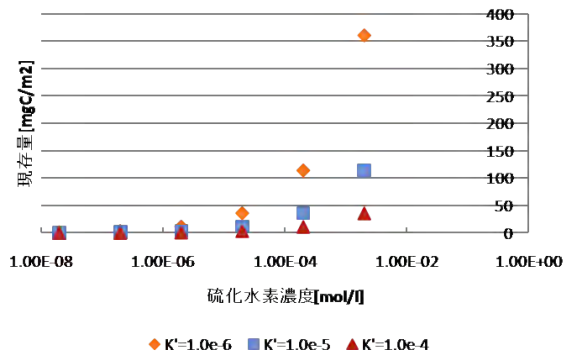
化学合成活動における抑制定数を
変化させ、各コンパートメントの生物
量に及ぼす影響を見た

$$R_{HS} = k_{HS} \cdot f_{HS} \cdot [BAC]$$

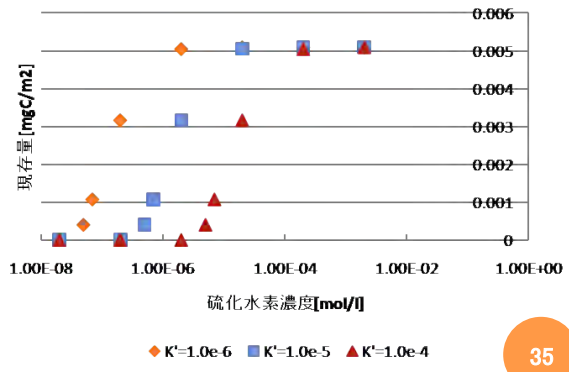
$$f_{HS} = \frac{[HS^-]}{[HS^-] + K'_{HS} \cdot [BAC]}$$



化学合成細菌共生メガベントス



堆積物中の化学合成バクテリア

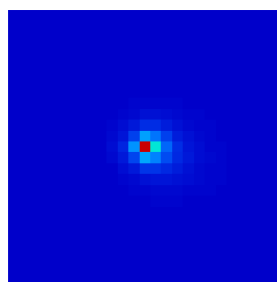


化学合成細菌捕食性メガベントス

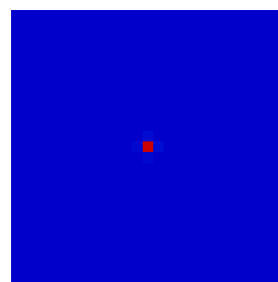
35

熱水プルームと生態系の結合

- 熱水プルームの計算で得た硫化水素濃度を元に、生物量の計算を行った。
- 渦拡散係数0.215 [m²/s]、噴出孔のセルの温度:5.5[°C]のとき(ケース①)渦拡散係数0.00215 [m²/s]、噴出孔のセルの温度4.5[°C]のとき(ケース②)の計算結果を用いた



ケース①



ケース②

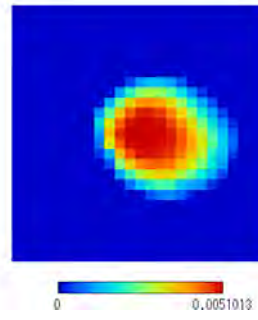
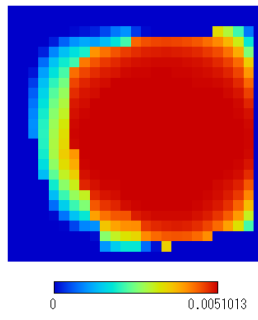
用いる硫化水素濃度[mol/l]

36

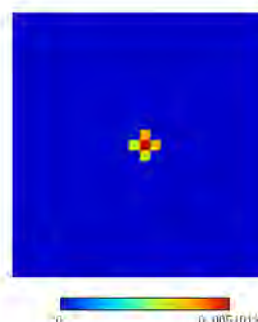
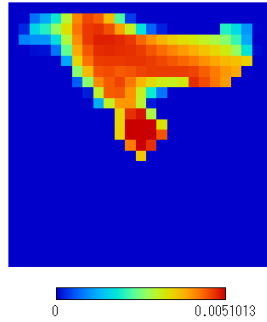
$K'=1.0 \times 10^{-6} [\mu\text{mol}/\text{cm}^3/\text{cell}]$ のとき

$K'=1.0 \times 10^{-4} [\mu\text{mol}/\text{cm}^3/\text{cell}]$ のとき

ケース①



ケース②



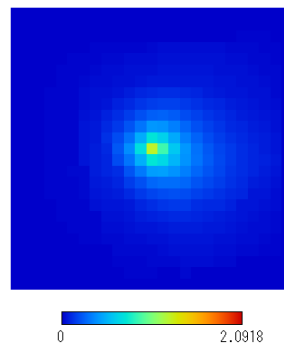
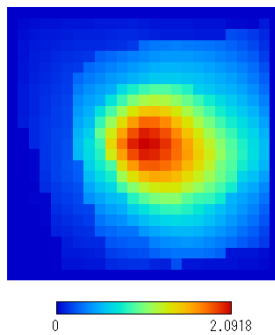
37

化学合成細菌食性メガベントスの生物量分布[mgC/m²]

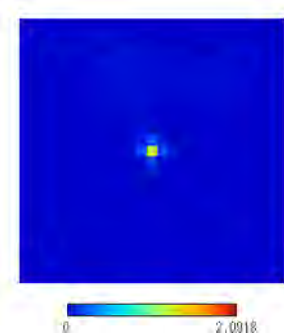
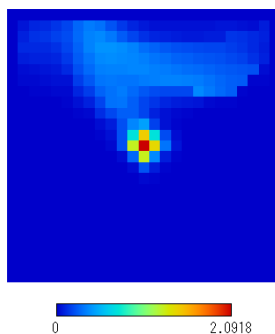
$K'=1.0 \times 10^{-6} [\mu\text{mol}/\text{cm}^3/\text{cell}]$ のとき

$K'=1.0 \times 10^{-4} [\mu\text{mol}/\text{cm}^3/\text{cell}]$ のとき

ケース①



ケース②



38

化学合成細菌共生メガベントスの生物量分布[mgC/m²]

生態系モデルについての考察

○ 領域内の生物量

化学合成細菌食性メガベントスの領域内の生物量[mgC]

	$K'=1.0\times 10^{-6}$	$K'=1.0\times 10^{-4}$
ケース①	1.78	3.62×10^{-1}
ケース②	5.28×10^{-1}	1.93×10^{-2}

化学合成細菌共生メガベントスの領域内の生物量[mgC]

	$K'=1.0\times 10^{-6}$	$K'=1.0\times 10^{-4}$
ケース①	2.71×10^2	4.21×10^1
ケース②	4.72×10^1	6.10

拡散係数と化学合成活動の抑制係数はメガベントスの生存量には同程度に影響することがわかる

39

結論

- Full-3Dの流体力学モデルに鳩間海丘の地形、流速等を適用して、現実的な熱水プルームの挙動を再現するモデルを構築した。
- 熱水噴出孔のセルの温度、渦拡散係数を変えて計算を行い、観測データに適合する組み合わせを求めた。
- より確度の高い推定をするためには、渦拡散係数の情報が必要であることが分かった。
- 化学合成生態系を含む底生生態系モデルの構築を行った。
- 結合モデルを用いた計算により、生物パラメータの化学合成活動抑制係数と物理パラメータの渦拡散係数が生物量に与える影響が同程度であることが分かった。

40

○ ご静聴ありがとうございました