

Development of numerical models
for the dispersion of CO₂ in the sea
corresponding to some leakage
scenarios

漏出シナリオに基づく海中CO₂拡散シミュ
レーション技術開発

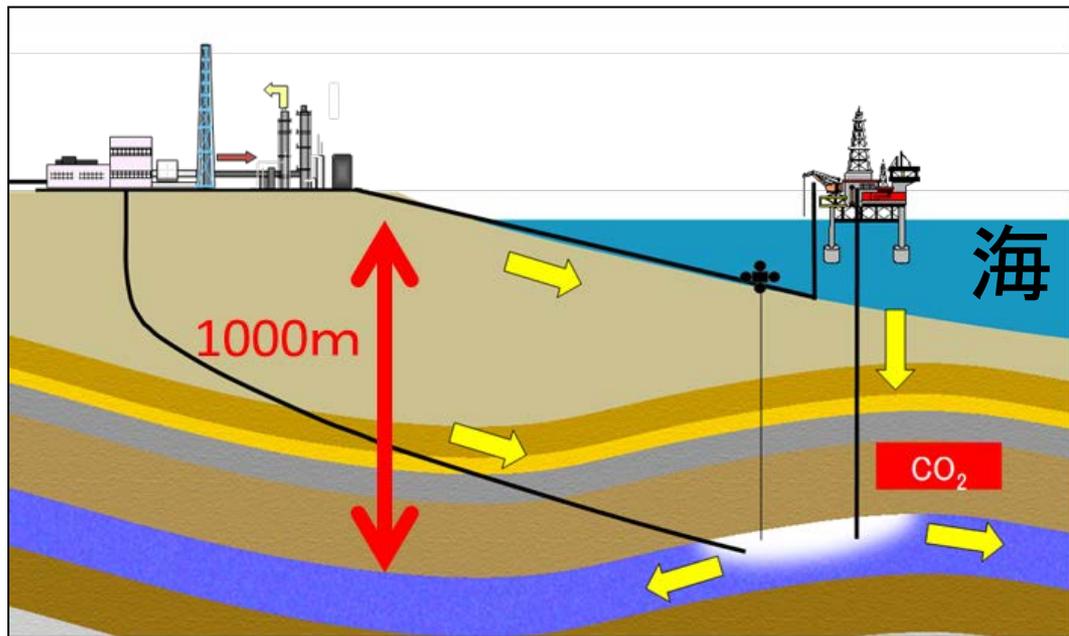
内本圭亮・中島崇裕

地球環境産業技術研究機構

CO₂貯留研究G

CO₂海底下貯留

日本では、CO₂の貯留サイトは主として海底下になるものと考えられている。



CO₂の貯留層の上にはCO₂を通さないキャップロックという“蓋”があるため、漏出の恐れはほとんどない。

キャップロック

貯留層

漏出に対する備えの必要性

- 万が一、漏出が起きた場合、海洋環境・生物に影響があり得るのかどうか？
- (貯留後) 海底からCO₂の漏出が起きていないか 海域の監視観測(モニタリング)をする必要はないのか？

海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律

海洋汚染防止法(海防法)

CO₂の海底下廃棄に係る許可制度

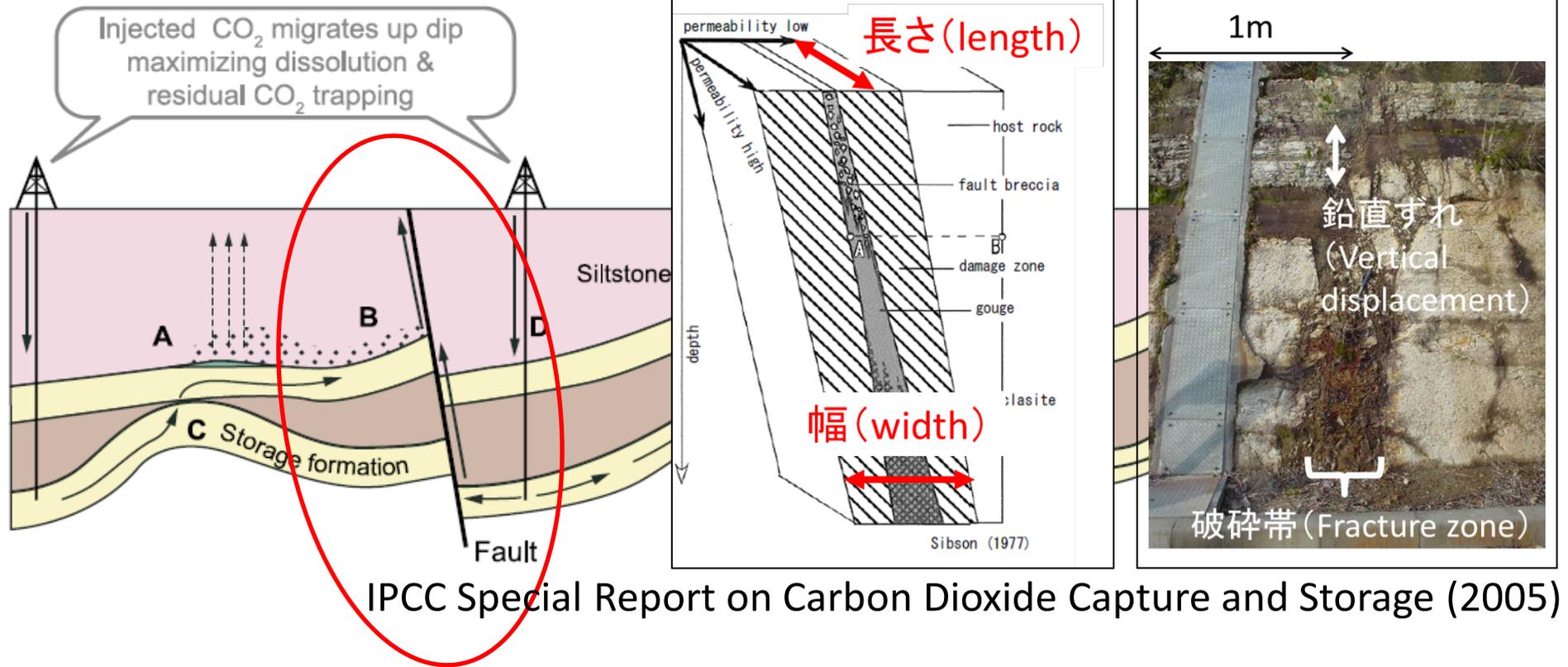
CO₂海底下廃棄の実施者は、

- 環境影響を評価しなければならない
 - ✓ 漏出仮説、拡散予測、影響評価
- 海洋環境の保全に障害を及ぼさないよう廃棄し、また、海洋環境を監視しなければならない
 - ✓ 実施計画・監視計画
 - CO₂が海に漏出していないことの監視

環境影響評価

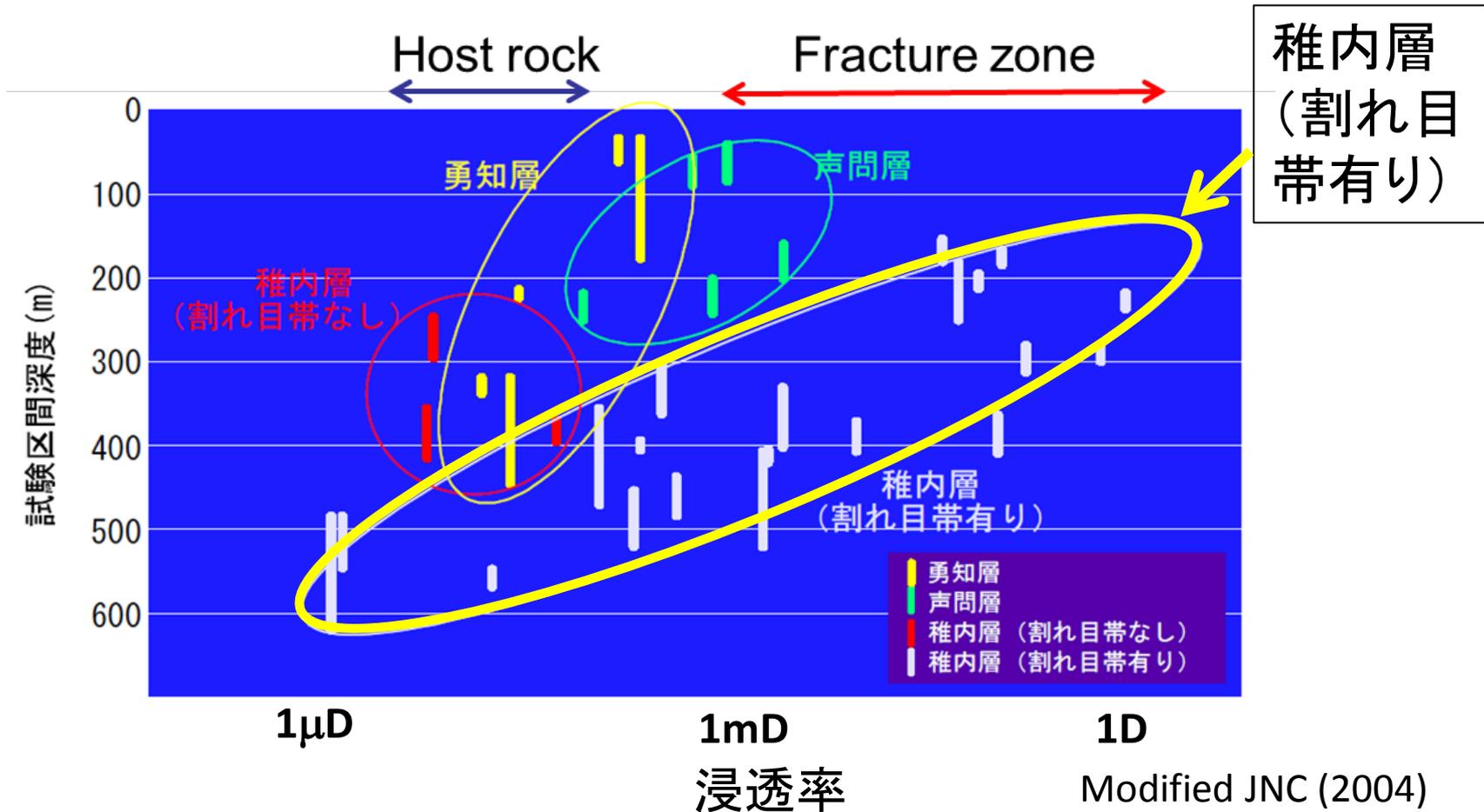
1. 漏出経路の仮定
 - 断層
2. 断層のパラメーターの設定
 - 既存の文献、データ
3. 地層のシミュレーション(断層モデル作成、数値計算)
 - 海底からの漏出量の計算
4. 海洋のシミュレーション(数値計算)
 - 海中での漏出CO₂の広がりの計算
5. 生物影響評価

1. 漏出経路の仮定



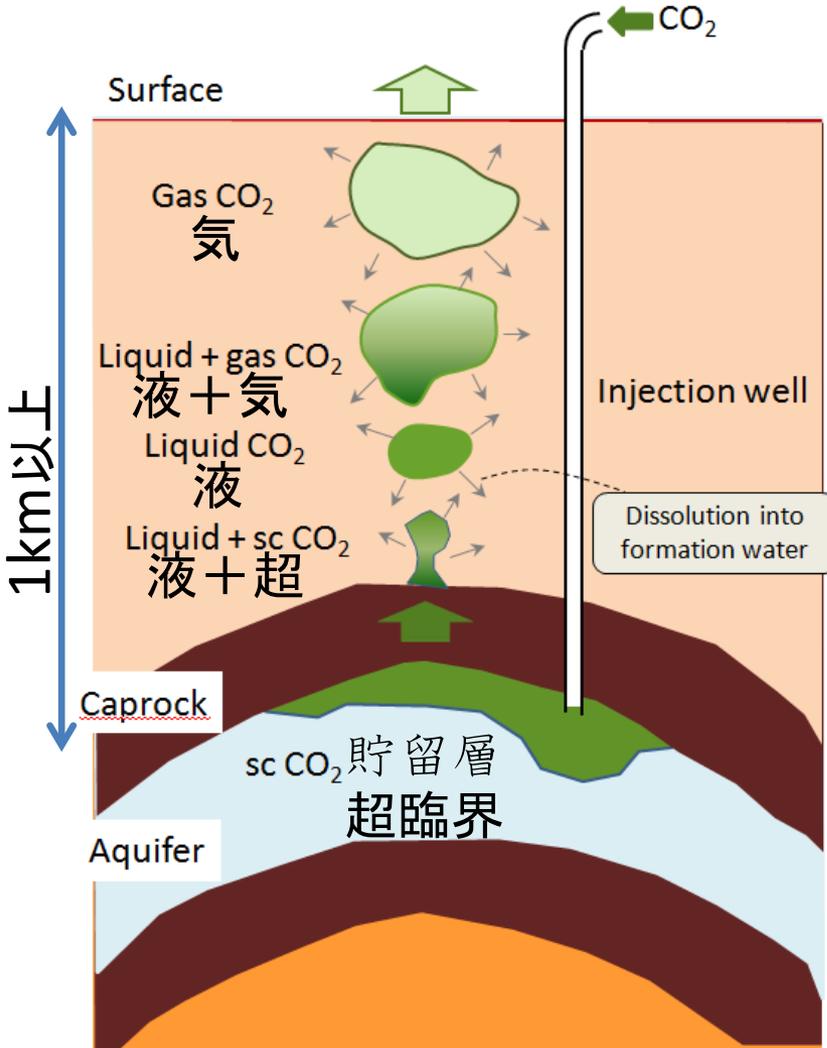
断層

2. 断層のパラメーターの設定

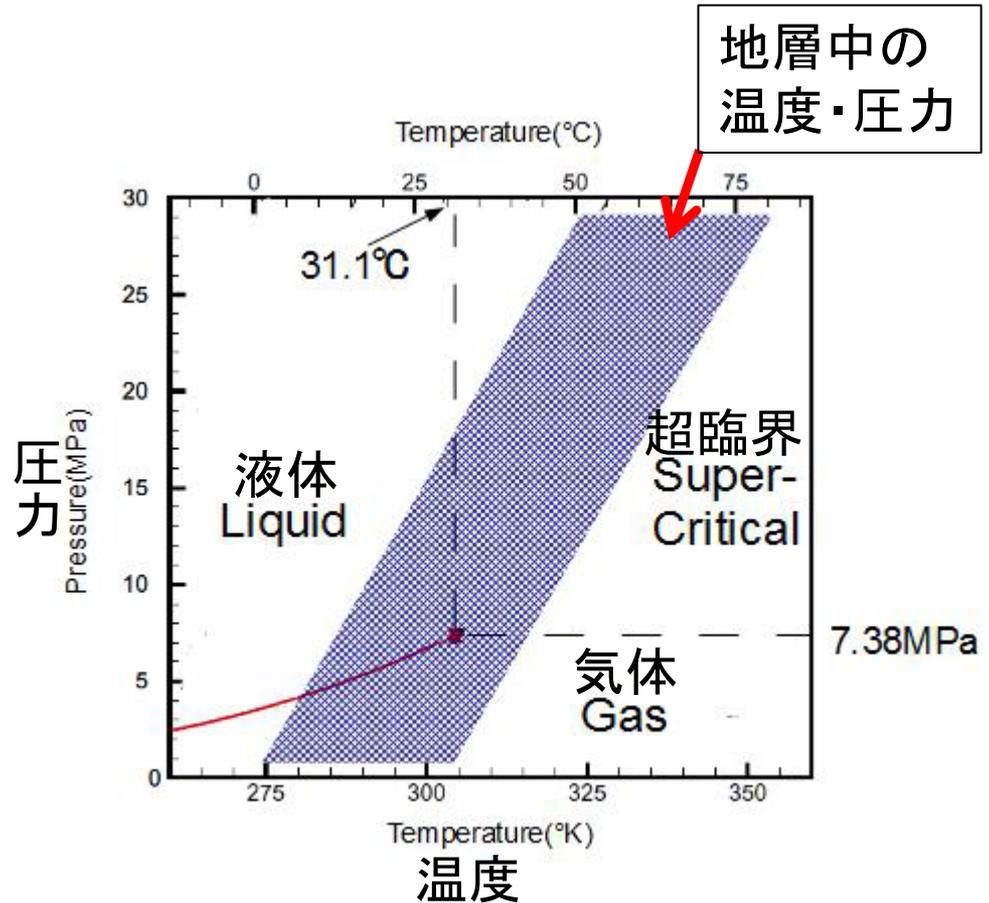


断層内の浸透率は1~1000mD

3. 断層モデル作成、数値計算(地層)

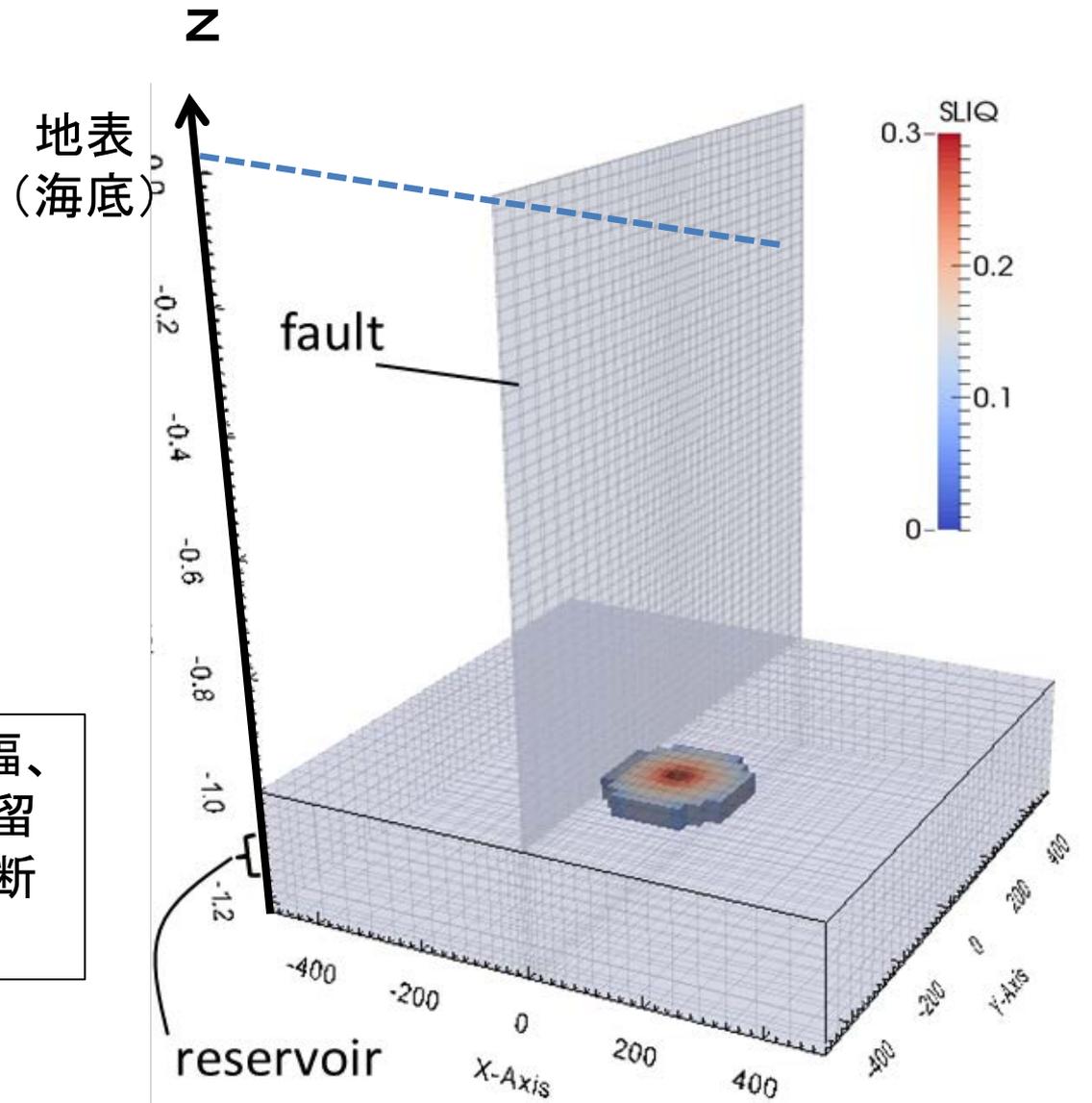


Suenaga et al.(2007)



相変化も考慮してシミュレーション(TOUGH2)

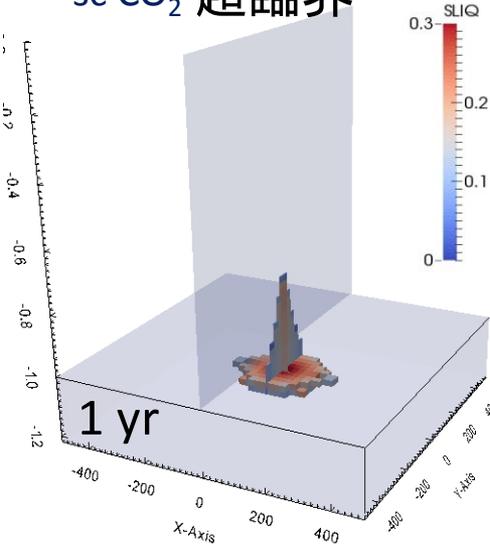
3. 断層モデル作成、数値計算(地層)



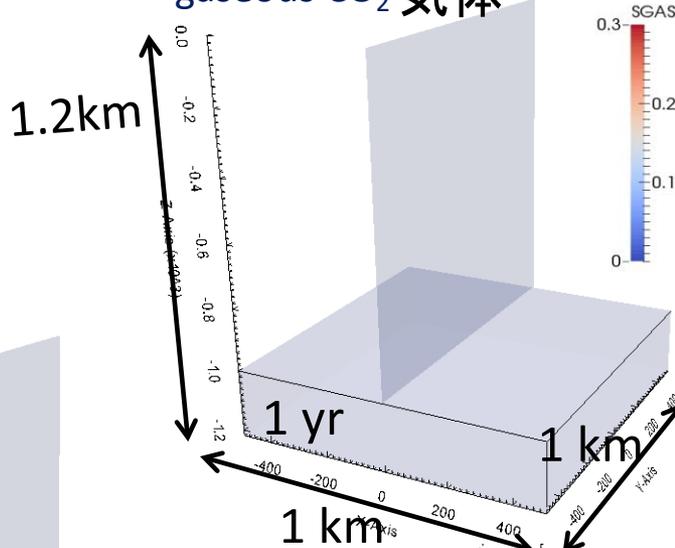
文献から得られた知見(断層幅、長さ、浸透率等)に基づき、貯留層直上に地上(海底)まで貫く断層がある場合のモデルを構築

3. 断層モデル作成、数値計算(地層)

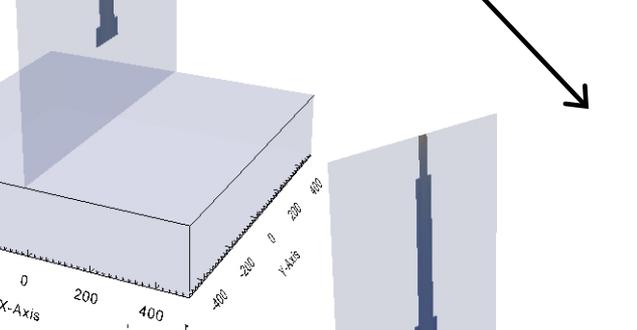
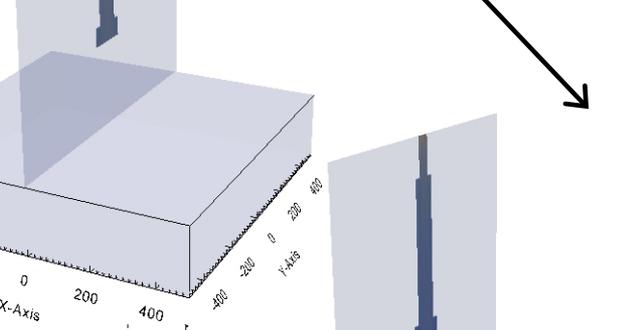
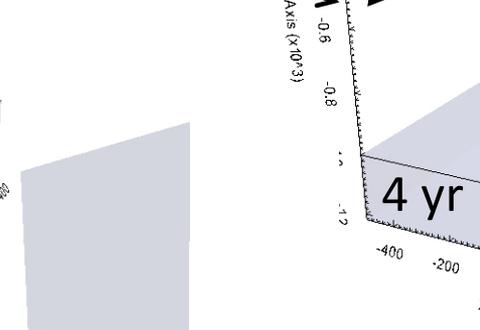
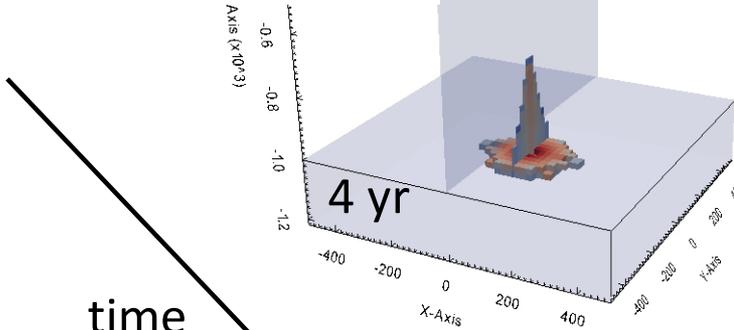
sc CO₂ 超臨界



gaseous CO₂ 気体



断層幅5m
貯留層内10mD
断層内200mD
CO₂ 100k ton/1year

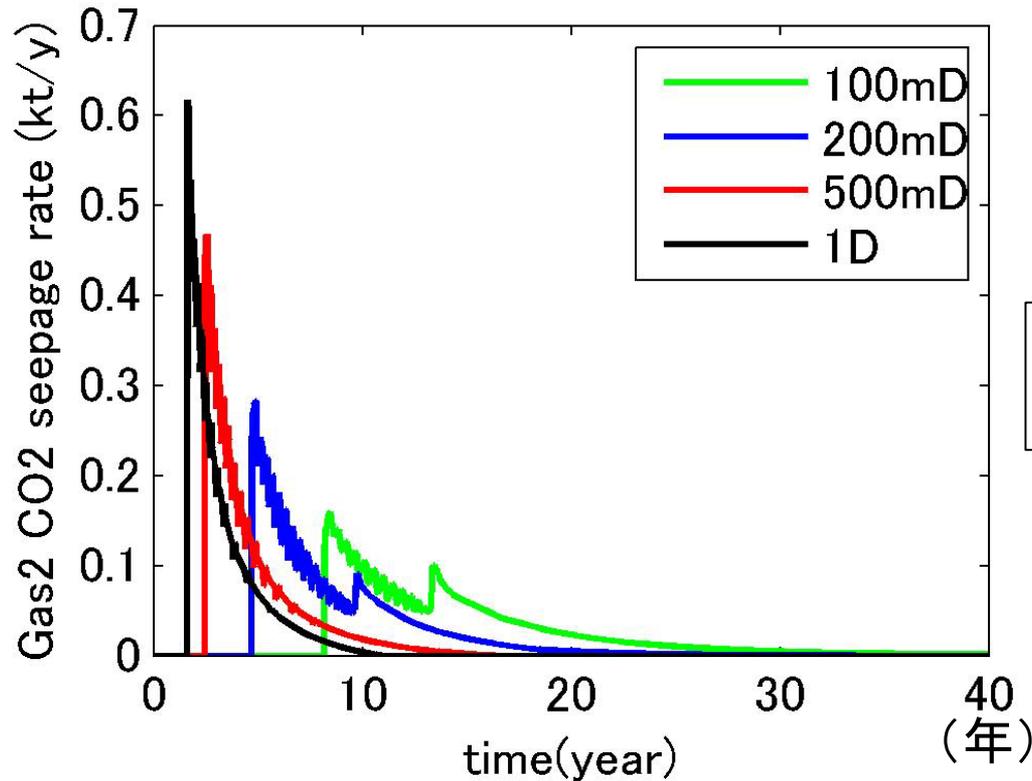


time

time

3. 断層モデル作成、数値計算(地層)

海底からの漏出率



漏出開始直後に漏出率が最大
200~600ton/year 程度

地層のシミュレーションで得られた漏出率を海洋のシミュレーションへ

4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

海水中でのCO₂の広がりは何で決まるのか？
イメージ的には煙と同じようなもの。



煙の広がりには基本的には風(=空気の流れ)で決まる

海の中のCO₂の広がりも海水の流れで決まる⇒**海の流れを知る必要**

4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

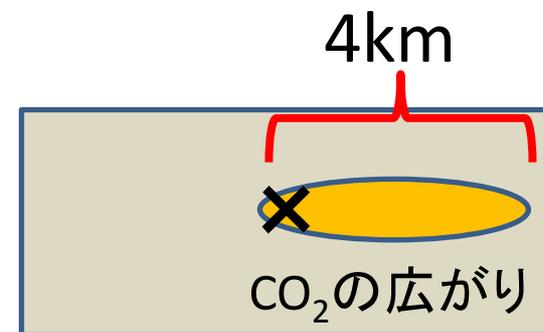
- 観測値、気候値の流速データ

例) 漏出域で5cm/sの東向きの流れだとする

1日後のCO₂の広がりの範囲は

5 cm/s × 24 hour ≒ 約 4 km

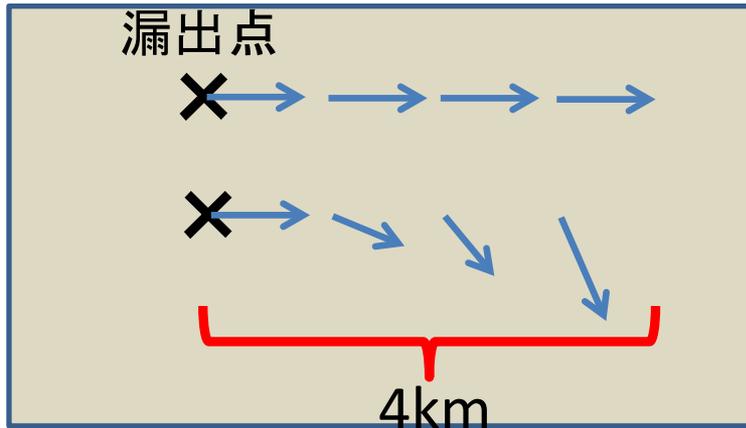
⇒ 4km先までCO₂が広がる？



4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

- 流れは空間的に変化する

ある点での流速が東向き5cm/sでも周囲は必ずしも同じ流速とは限らない



←4km東まで広がる

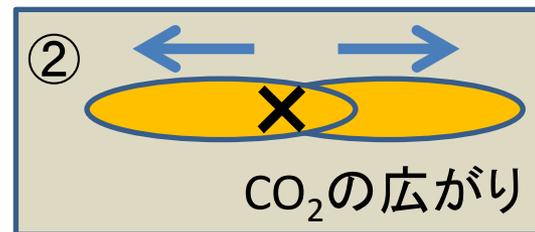
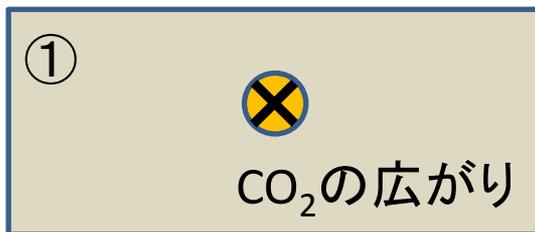
←4km東まで広がらない

**空間的にも
時間的にも
密な流れの
データが必要**

- 流れは時間的に変化する

例) 時間平均値として流れがない(0 cm/s) 場合

- ① ずっと流れがない場合 → CO₂は漏出点付近にたまる
- ② 前半に東向き、後半に西向きで平均0cm/sの場合

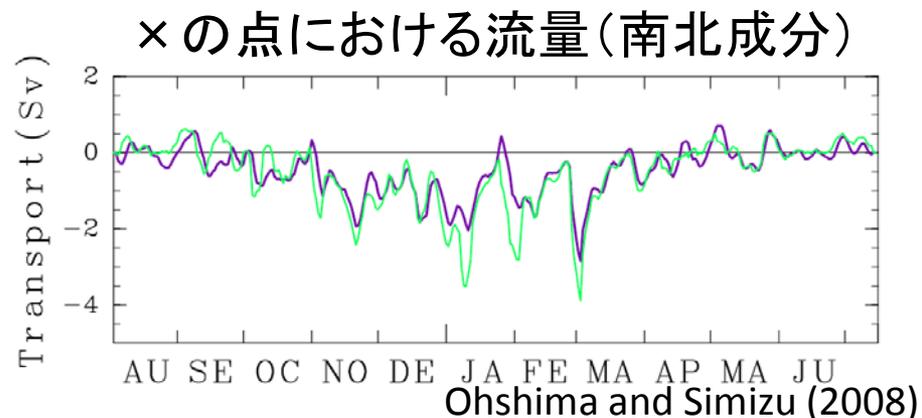


4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

- 空間的・時間的に変化する海の流れ
⇒ 数値モデルを使ったシミュレーション
- 海に流れを作る主たる要因
 - 気象条件 = 風と熱
 - 流れがある海域の直上や周辺の風
 - 流れがある海域から 遠く離れた海域の風

4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

- 遠方の風で作られる流れの例
 - オホーツク海サハリン沖の流れ



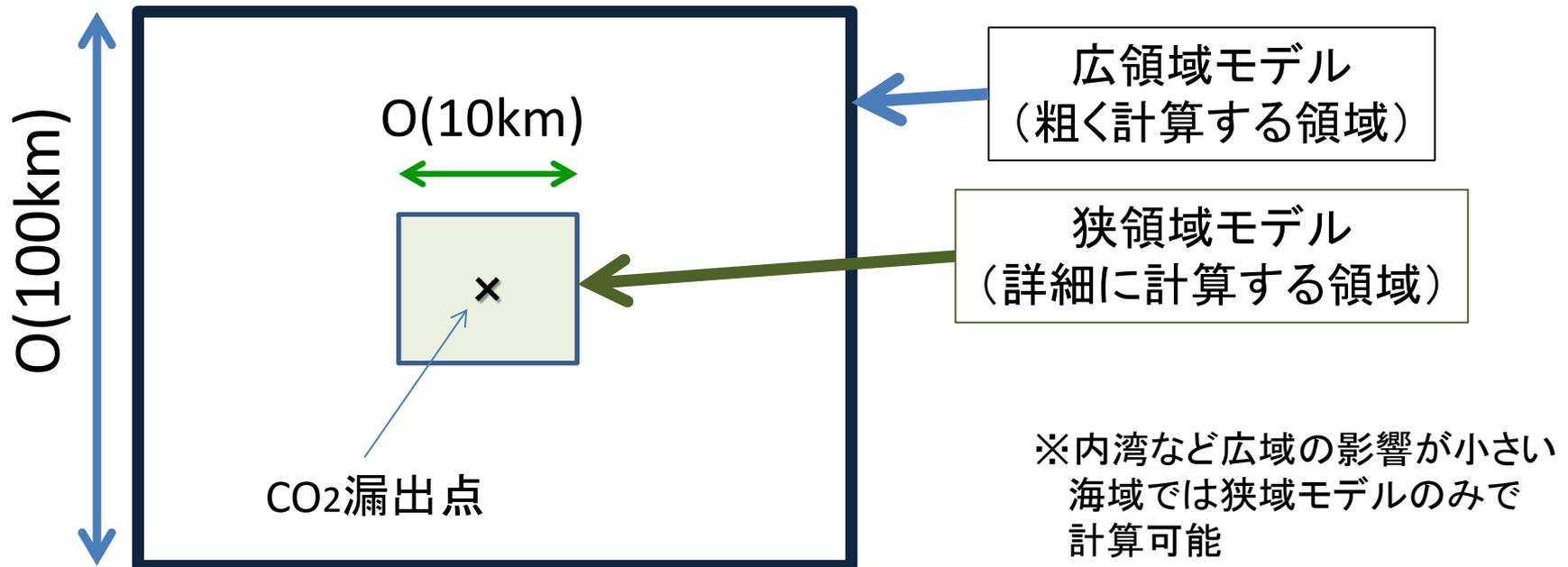
青: 現実的なシミュレーション
緑: Arrested Topographic Waves理論
(赤矢印に沿って風応力を積分)

- 黒潮: 太平洋スケールの風

4. 数値計算（海洋のシミュレーション）

- RITEで構築しているモデル

- 遠方の風の影響で作られる海流等→数百kmスケールのモデル（**広領域モデル**）でシミュレーション。
- CO₂漏出域周辺→数十kmスケールのモデル（**狭領域モデル**）でシミュレーション。広領域モデルの結果を境界条件として利用。



4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

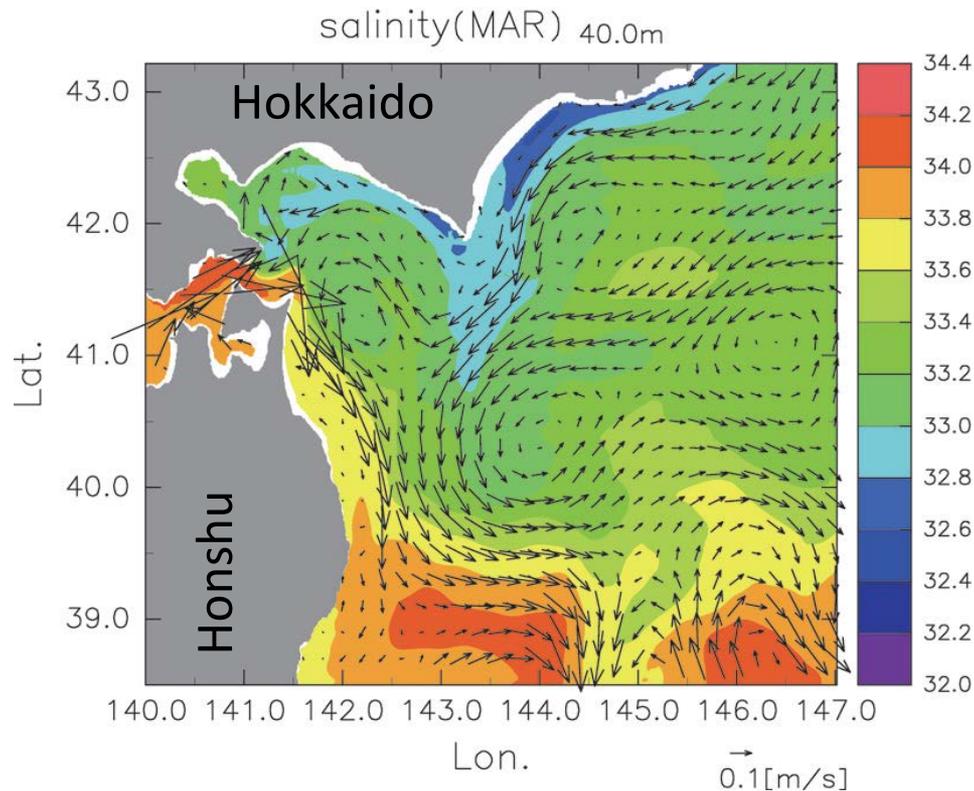
- 広領域モデル

- 領域: $140 \sim 147^{\circ} \text{E}$

- $38.5 \sim 43.2^{\circ} \text{N}$

- 水平解像度 $1/120^{\circ}$

- ($\sim 1\text{km}$)



4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

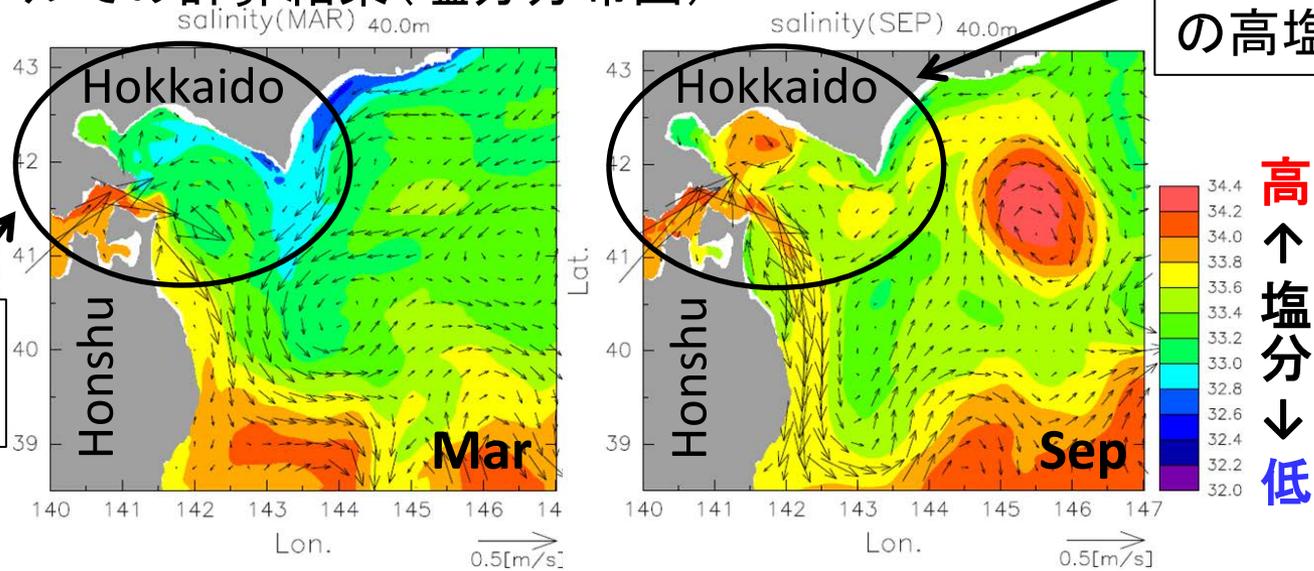
広領域モデルでの計算結果(塩分分布図)

親潮は塩分が低い

親潮由来の低塩分水

津軽暖流由来の高塩分水

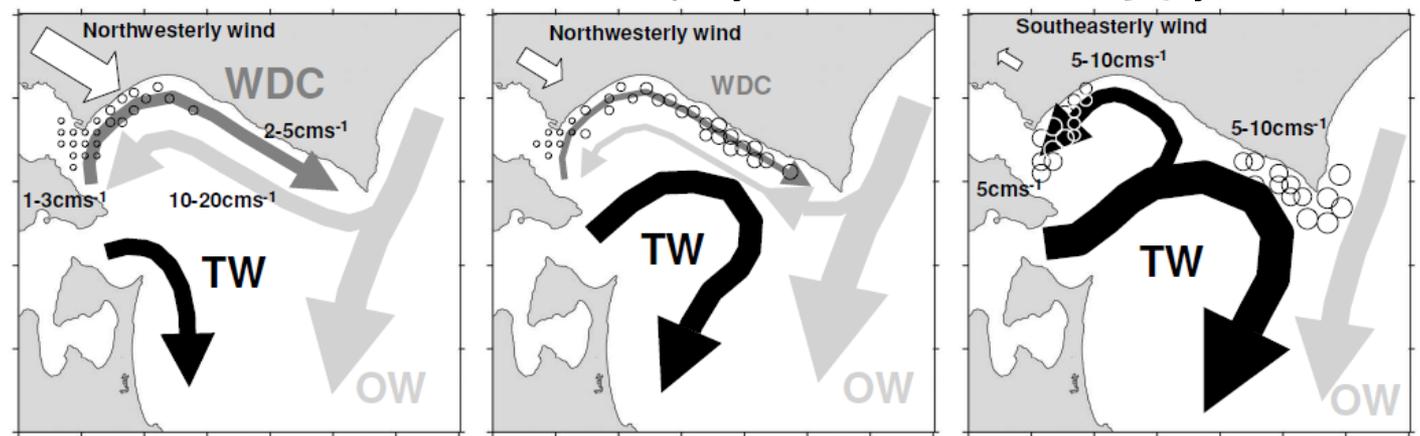
津軽暖流は塩分が高い



冬季

春季

夏季



TW: 津軽暖流、OW: 親潮

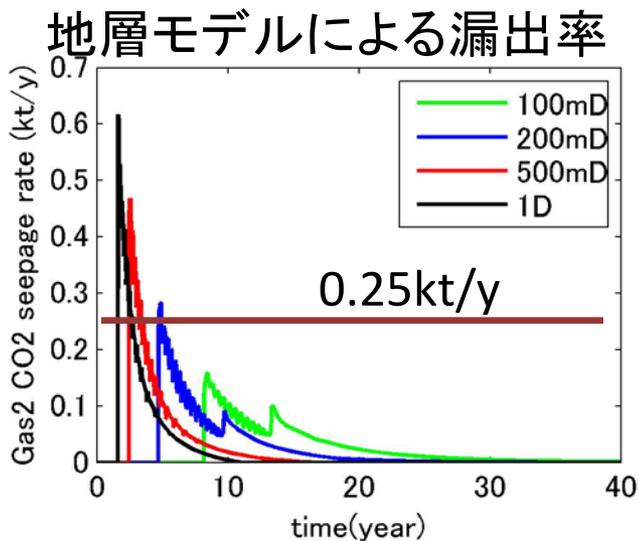
Rosa et al. (2009)

4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

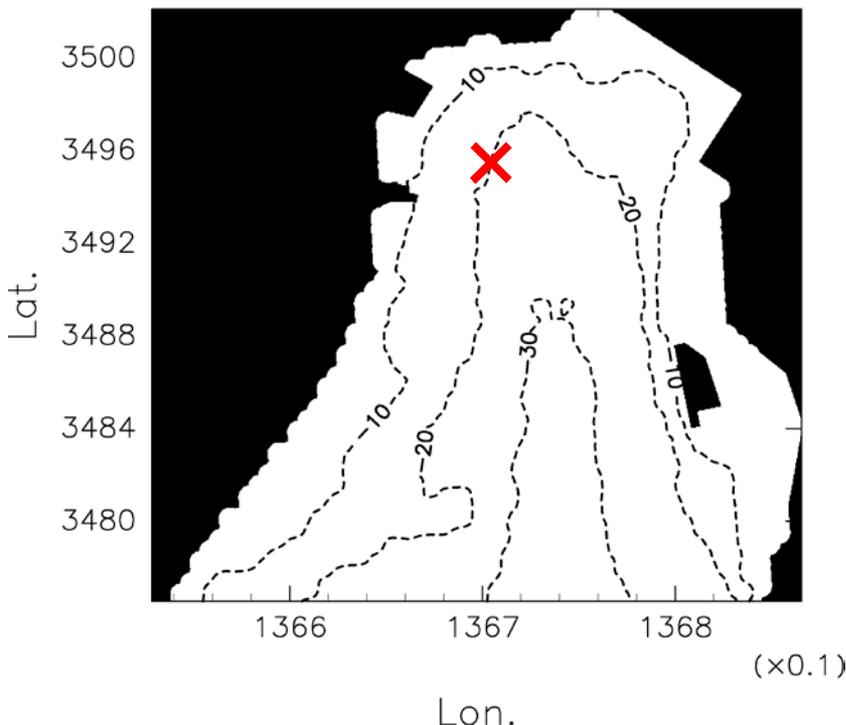
- 狭領域モデル

- 漏出域を含む数十kmを領域としてモデルを構築する

例) 湾地形



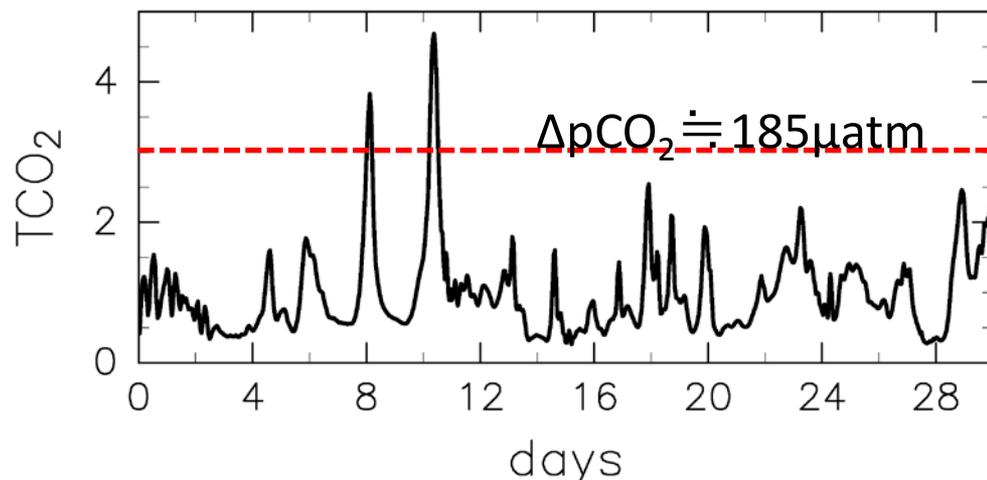
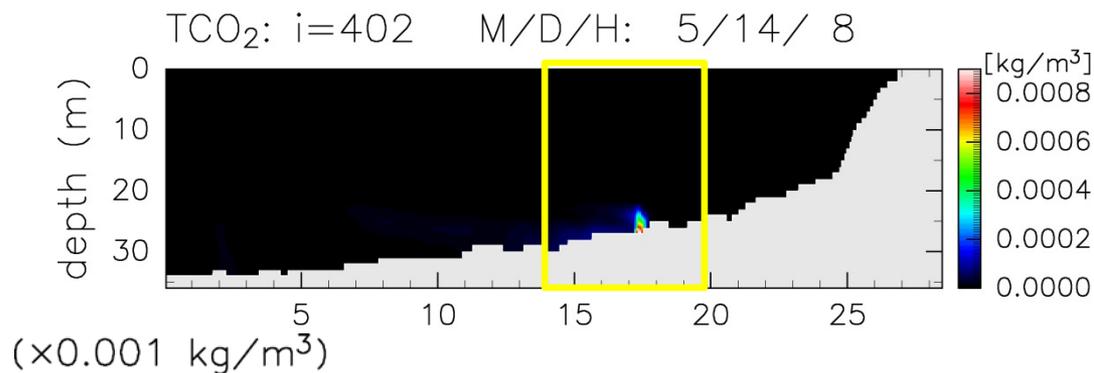
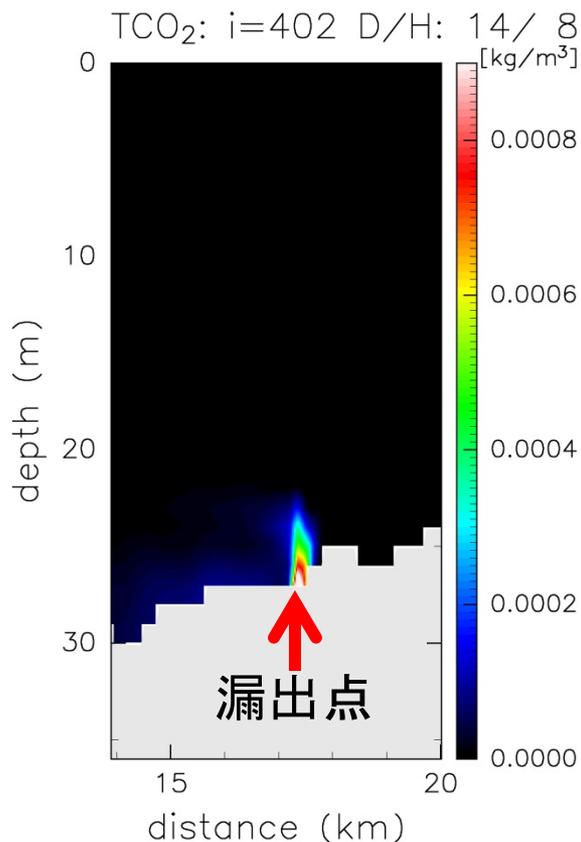
($\times 0.01$)



等値線は水深

4. 数値計算(海洋のシミュレーション)

● 計算例



海洋モデルで計算されたCO₂濃度は生物に影響するのだろうか？

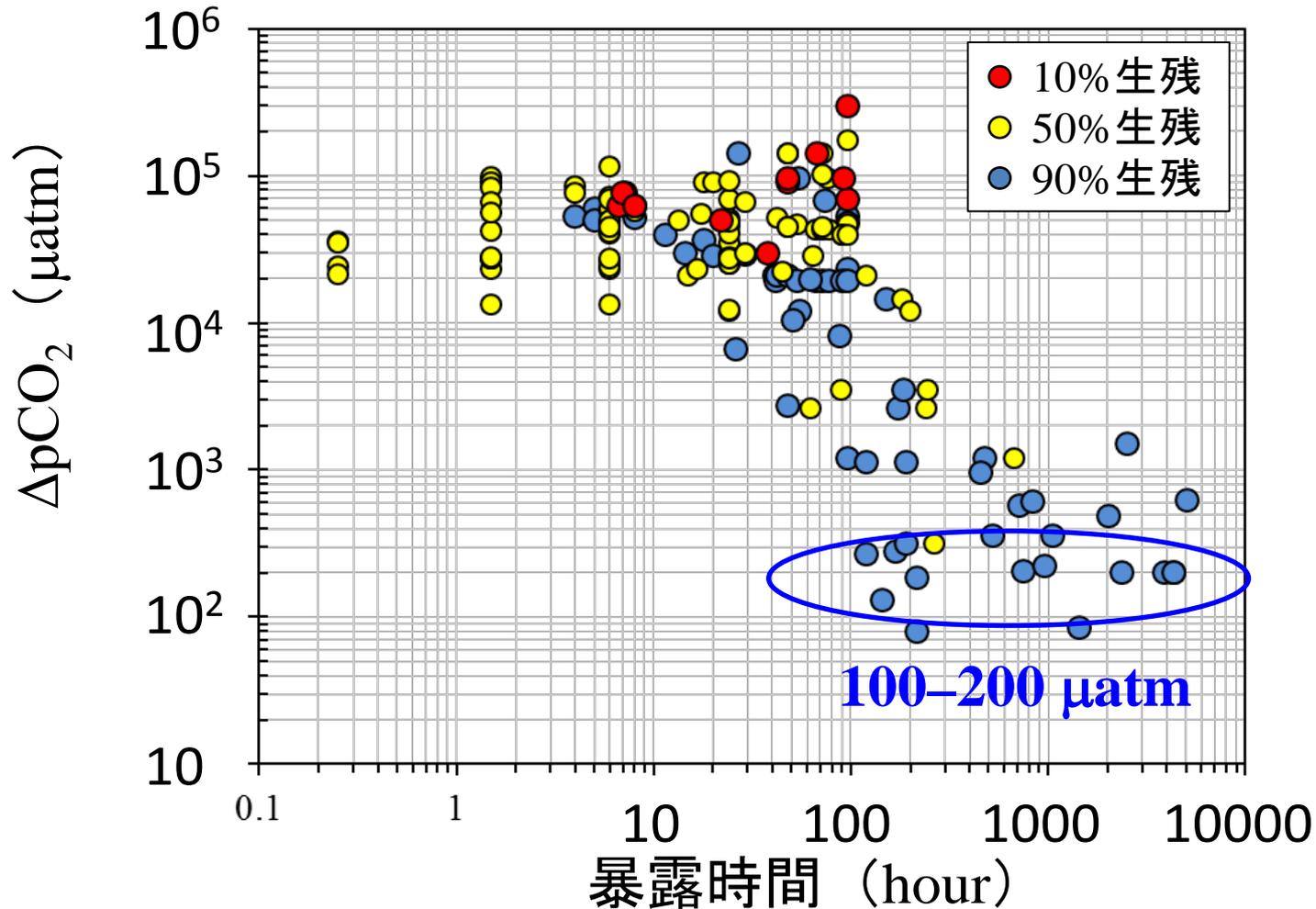
5. 生物影響評価

- 生物影響データベースの構築
 - 海水中CO₂濃度が生物に与える影響について調べた文献をまとめたデータベースを構築

供試生物	対照区pCO ₂ (ppm)	実験区pCO ₂ (ppm)	暴露期間	影響
サンゴ 成体 <i>Porolithon onkodes</i>	135-460 (pH 8.00-8.40)	520-705 (pH 7.85-7.95)	8 週間	白化が増加
		1,010-1,350 (pH 7.60-7.70)		白化が増加
サンゴ プラヌラ幼生 <i>Acropora tenuis</i>	400-475 (pH 8.03)	905-1,660 (pH 7.64)	7 日間	なし
		2,115-3,585 (pH 7.31)		生残率：低濃度区より増加
動物プランクトン 幼生 <i>Acartia erythrae</i>	365	2,365	24 時間	なし
		5,365		生残率減少
		10,365		生残率減少

5. 生物影響評価

暴露時間と生残 $\Delta p\text{CO}_2$ との関係 (石灰質の殻をもつ生物 7種、非石灰質生物20種)



海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律

海洋汚染防止法(海防法)

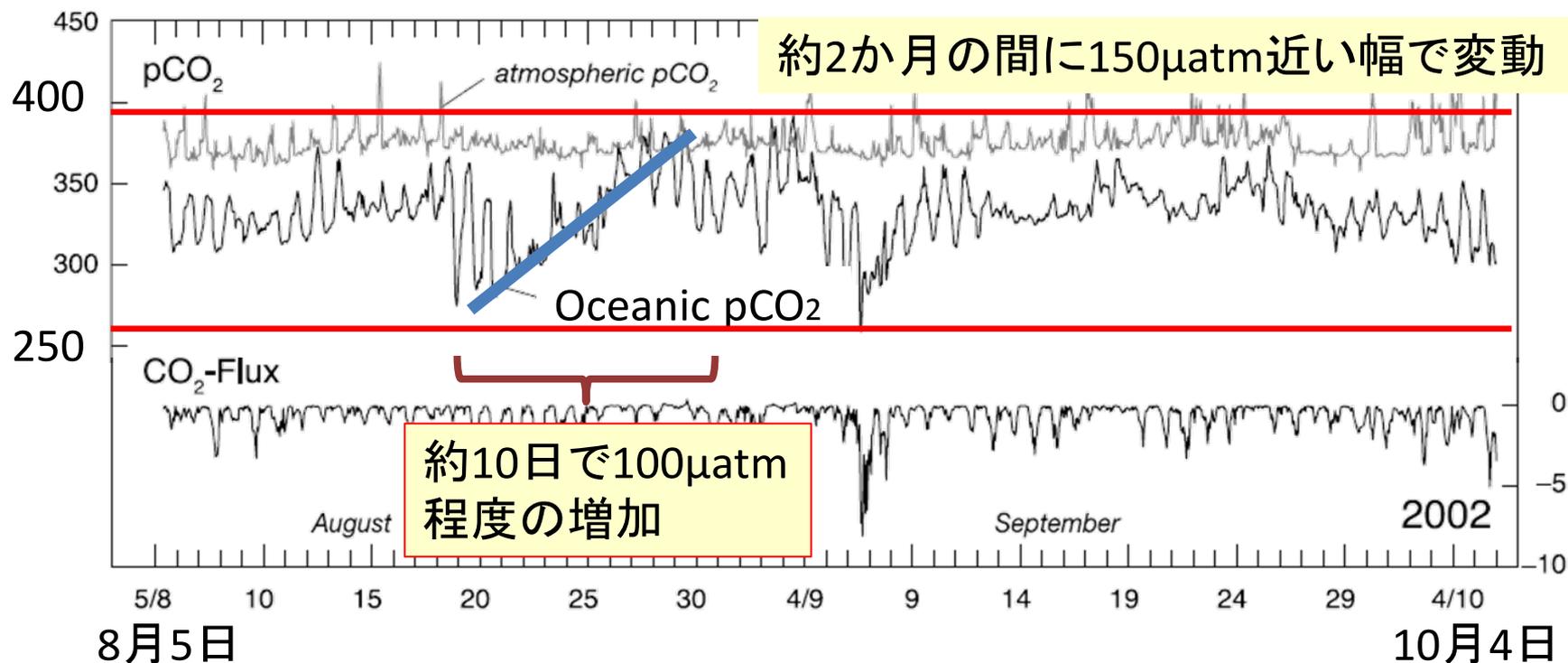
CO₂の海底下廃棄に係る許可制度

CO₂海底下廃棄の実施者は、

- 環境影響を評価しなければならない
 - ✓ 漏出仮説、拡散予測、影響評価
- 海洋環境の保全に障害を及ぼさないよう廃棄し、また、海洋環境を監視しなければならない
 - ✓ 実施計画・監視計画
 - CO₂が海に漏出していないことの監視

海水中の漏出監視

- 漏出をどのように判断するか？
 - 海水のCO₂濃度は自然変動が大きい



サンタモニカ湾(カリフォルニア)におけるCO₂濃度の日変動

(Leinweber et al., 2009)

海水中の漏出監視

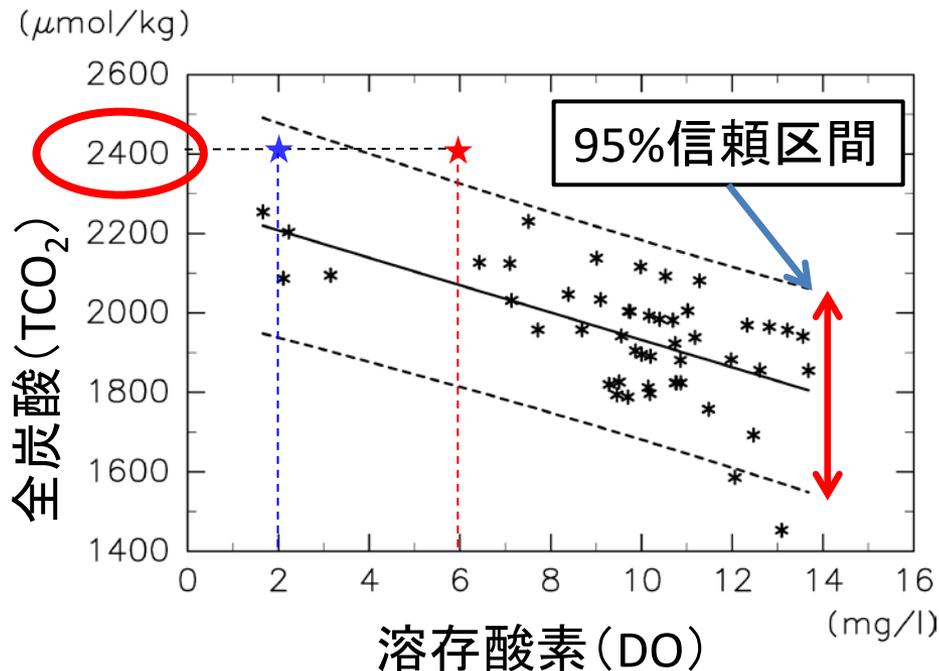
- 異常(漏出)の判断手法の提案
 - 海水中のCO₂の自然変動の要因
 - 光合成と有機物分解



海水中のO₂とCO₂の濃度には相関があるのでは？

海水中の漏出監視

伊勢湾の溶存酸素(DO)とCO₂濃度(全炭酸:TCO₂)の関係



溶存酸素濃度とCO₂濃度が
逆相関になっている

例えば、TCO₂ = 2400 $\mu\text{mol/kg}$
が測定された場合・・・
比較的高い値だが、
自然変動？異常(漏出の疑い)？

- ★ : TCO₂ = 2400 $\mu\text{mol/kg}$ で DO = 2 mg/L であれば、自然変動の範囲内と判断できる
- ★ : TCO₂ = 2400 $\mu\text{mol/kg}$ で DO = 6 mg/L であれば漏出が疑われる

まとめ

- 環境影響評価
 1. 地層のシミュレーションで漏出量の計算
 2. 海洋のシミュレーションで海水中濃度の計算
 3. 生物影響データベースで生物影響評価
- 海水中の漏出監視
 - CO₂濃度とともに溶存酸素濃度を測定
 - CO₂濃度と溶存酸素濃度の関係から異常値(=漏出)を判断

Acknowledgments

広領域モデルは電力中央研究所との、狭領域モデルは北海道大学低温科学研究所との共同研究でそれぞれ開発を行っています。