

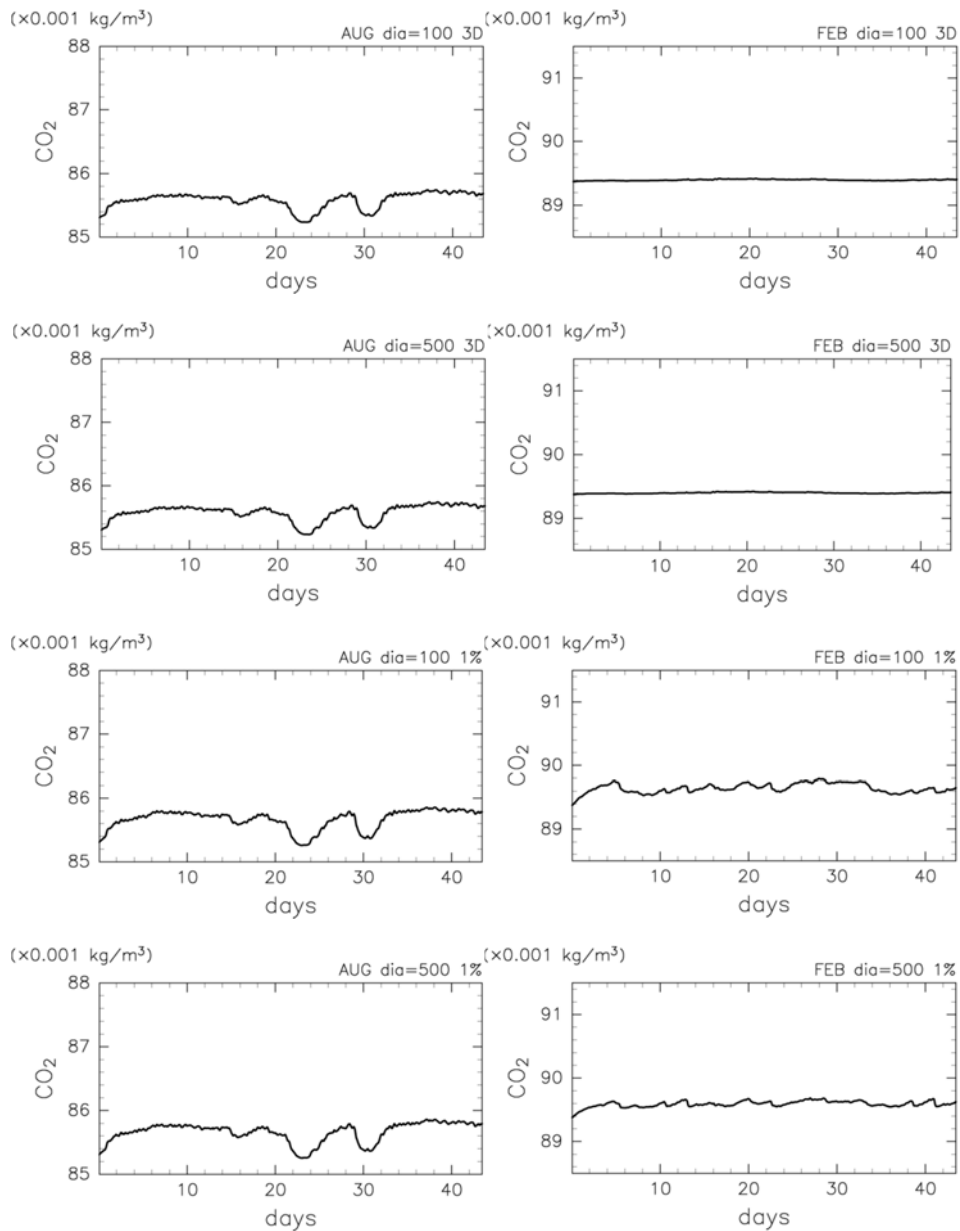
### 4.3 シミュレーション結果

#### (1) 潜在的環境影響評価項目

第 3-1 表に示した潜在的海洋環境影響調査項目のうち、CO<sub>2</sub>が海水中に漏出した際に直接的な影響が及ぶと考えられるのは、水環境については炭酸系の項目（水素イオン濃度指数、全炭酸、アルカリ度、pCO<sub>2</sub>）であり、その他の調査項目は直接的な影響がでるとは考えにくい。海底環境については、極端に危険側の CO<sub>2</sub> 漏出であっても、漏出の範囲は最大で水平方向に 500m であり（第 4.2-6 図参照）、漏出範囲は、広範囲に一樣な砂質が広がる海底のごく一部であることから、漏出の影響は限定的であるため、影響評価の対象としては選定しない。海洋生物については、浮遊生物は水塊の移動に伴って季節的に大きく種組成が変化すること、海藻および藻類は現存量が極めて小さいこと、さんご類は生息していないことから、これらの影響評価は困難である。したがって、影響評価の対象として魚類等遊泳動物および底生生物を選定した。生態系については、産卵場または生育場として当該海域を利用している重要な生物は魚類等遊泳動物および底生生物であり、藻場および干潟は極小域しか認められず、さんご群集その他の脆弱な生態系は認められない。また、熱水生態系その他の特殊な生態系は、当該海域に存在しない。さらに、海洋の利用等については、海洋レクリエーション、海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域、漁場、主要な航路、港湾区域および港域、海底ケーブルの敷設、海底資源の探査または掘削その他としての利用について調査を行った。漁場としての利用については、魚類等遊泳動物および底生生物を対象として漁業が行われていることから、魚類等遊泳動物および底生生物を環境影響評価項目とすることで対応する。その他の項目については、海洋レクリエーションの場として公園等が存在することや、自然環境の保全を目的として設定された区域として、陸上における自然公園等が存在すること等が確認されているが、ここで検討した極端に危険側の CO<sub>2</sub> 漏出であっても、海底の漏出地点から水平方向に 500m、垂直方向には海面までの範囲において、pCO<sub>2</sub> が最大で 100 $\mu$ atm 上昇する程度（第 4.4-2 図～第 4.4-4 図参照）であることや、海水中から大気へ微量の CO<sub>2</sub> が出た場合においても、大気中では海水中に比べて CO<sub>2</sub> は急速に拡散することから、ヒトや人間活動に直接的な影響を与えないレベルであると考えられる。したがって、潜在的環境影響評価項目は水環境における炭酸系の項目および海洋生物（魚類等遊泳動物および底生生物）に焦点を絞り、その影響評価を行った。海水中の炭酸系の項目のうち pCO<sub>2</sub> は海洋生物への影響を評価する際に有用となるので、この解析を主に行った。

#### (2) 溶存 CO<sub>2</sub>

海水中の CO<sub>2</sub> 濃度は漏出開始後時間とともに継続的に高くなっていくわけではなく、およそ 7 日以内でほぼ平衡状態に達する（第 4.3-1 図）。ただし、その後も変化する危険性を考え、平均値等の算出には平衡状態に達している漏出開始後 22 日～43 日の 3 週間を採用した。以下で「3 週間」という記載はこの 3 週間を意味するものとする。なお、ここに示す図、結果は Full-3D モデルの結果である。



注: 上から順にシナリオ2-100m ケース, シナリオ2-500m ケース, 1%漏出-100m ケース, 1%漏出-500m ケース。それぞれ左が夏季条件, 右が冬季条件。夏季と冬季のグラフは縦軸の値が異なっているが, 縦軸の最大値と最小値の差は同じ ( $0.003\text{kg/m}^3$ )。

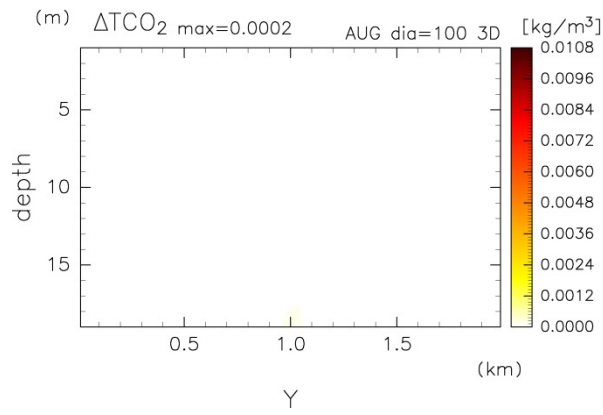
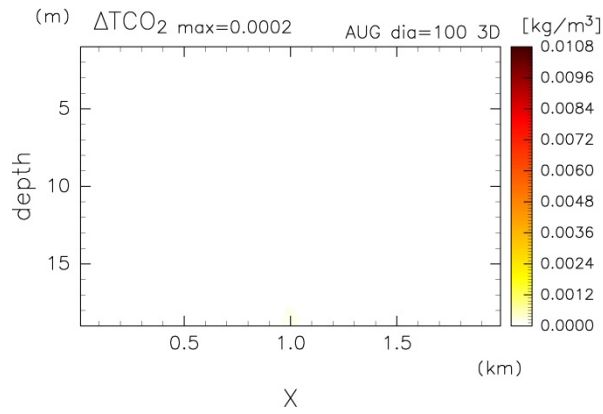
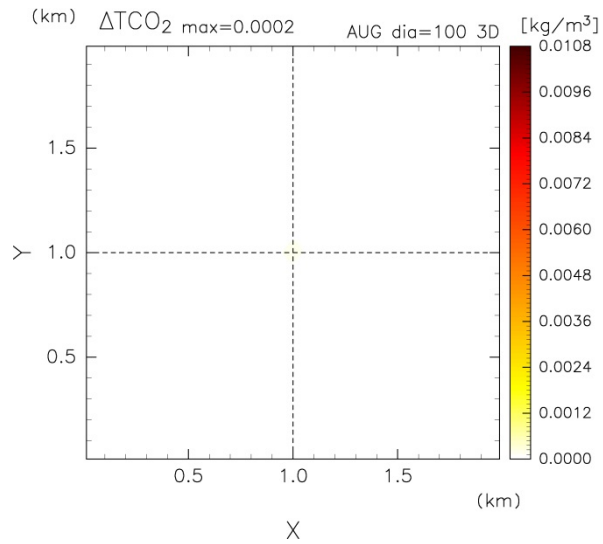
第 4.3-1 図 Full-3D モデル全領域で平均した溶存  $\text{CO}_2$  濃度の時系列

第 4.3-1 図は, シナリオ 2 ケース全領域で平均した溶存  $\text{CO}_2$  濃度の時系列である。ここでは溶存  $\text{CO}_2$  濃度は全炭酸 ( $\text{TCO}_2$ ) 量で示している。いずれのケースも, 夏季, 冬季ともに漏出直後から溶存  $\text{CO}_2$  濃度が増加していくが, どのケースもおおよそ 7 日以内で増加が止まり以降はほぼ平衡状態に達している様子が見られる。夏季と冬季で溶存  $\text{CO}_2$  濃度が異なっているのは, 夏季は冬季に比べて水温が高く  $\text{CO}_2$  ガスが溶解しにくいいためである。気体は水温が低くなると水への溶解度が上がるため, 漏出のない自然状態においても夏季よりも冬季の方が溶存  $\text{CO}_2$  濃度は高くなる。シナリオ 2-100m ケース, 500m ケースとも, 冬季ケースはほぼ一定値なのに対し夏季ケースでは変動が見られる。これらの変動は, 1%漏出ケースでも大きさは異なるものの同じタイミングで見られることから, 風によって起こされる流れによるものと

考えられる。また、1%漏出-100m ケースと 500m ケースに大きな違いが見られないことから、漏出域の広さの影響は 2km×2km の領域全体を考えた場合には小さいことが示唆される。

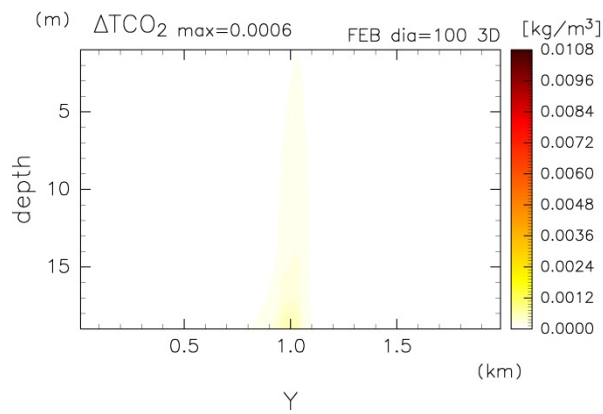
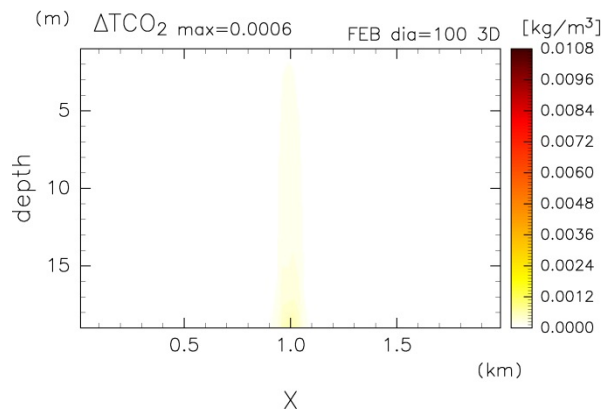
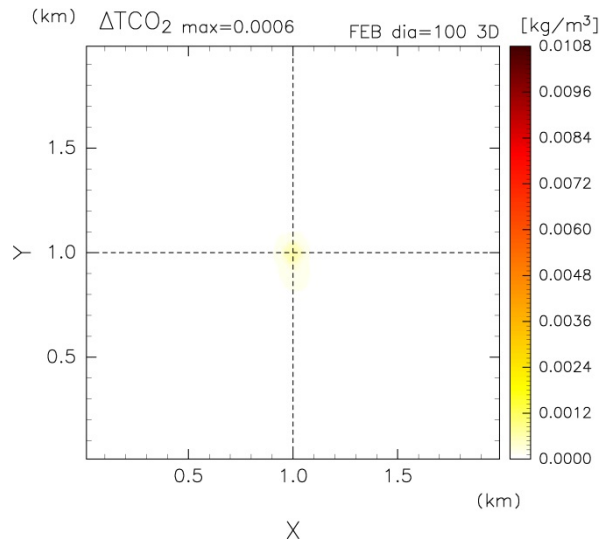
上述のとおり、溶存 CO<sub>2</sub> の濃度は水温依存性が大きいため、漏出 CO<sub>2</sub> がなくても夏季と冬季では溶存 CO<sub>2</sub> 濃度が大きく異なる。そのため、溶存 CO<sub>2</sub> の分布からだけでは漏出による濃度増加やその影響範囲がはっきりしない。そこで、各シミュレーションケースの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均から同じ季節条件で行った無漏出シミュレーションの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均を引いた差、すなわち漏出による溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の増分 ( $\Delta \text{TCO}_2$ ) を示した (第 4.3-2 図~第 4.3-7 図)。

シナリオ 2-100m ケースは、冬季 (第 4.3-3 図) は漏出域付近で  $\Delta \text{TCO}_2$  が高くなっているが、夏季 (第 4.3-2 図) はこの図のカラースケールではほとんど色につかない程度にしかない。シナリオ 2-500m ケースは夏季、冬季とも漏出による  $\text{TCO}_2$  の増加が極めて小さく、このカラースケールでは色につかないため図は省略した。1%漏出-100m ケース (第 4.3-4 図, 第 4.3-5 図) は漏出域付近で  $\Delta \text{TCO}_2$  が大きい漏出域から離れると急速に小さくなる。1%漏出-500m ケース (第 4.3-6 図, 第 4.3-7 図) も漏出域付近で  $\Delta \text{TCO}_2$  が高くなっているが、増加量は非常に小さい。いずれのケースにおいても同じ漏出量・漏出率の場合、夏季に比べて冬季の溶存 CO<sub>2</sub> 濃度増分が大きい。これは、漏出した気相 CO<sub>2</sub> が海水温度の低い冬季の方が夏季よりも海水によく溶けるためと考えられる。



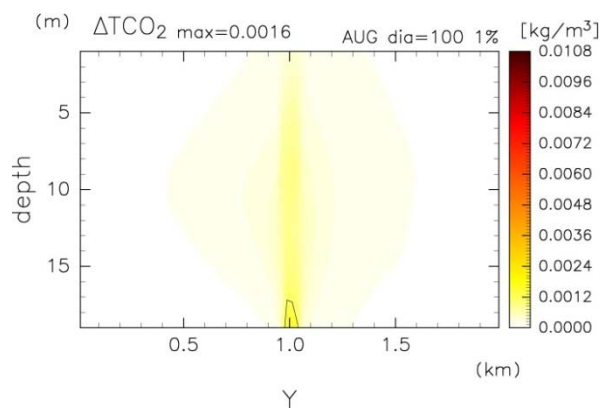
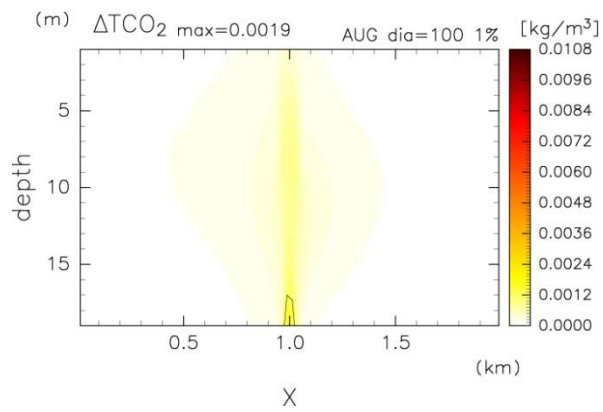
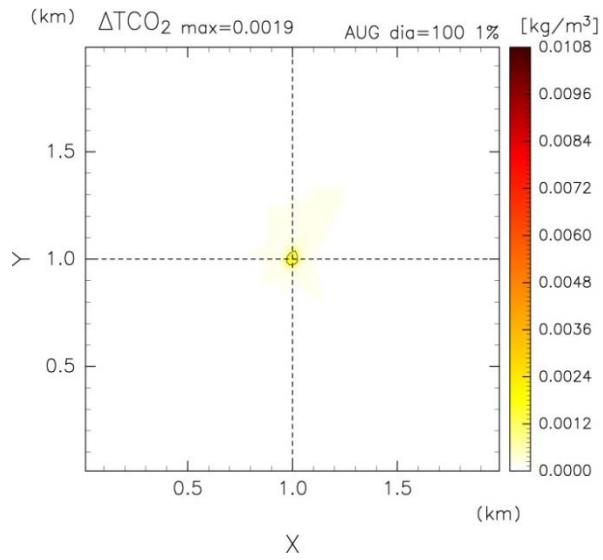
注：上から順に最下層の水平面（xy平面）とy, xの中央での鉛直断面（xz断面, yz断面）。  
 シナリオ2-100mケース, 夏季条件。

第 4.3-2 図 CO<sub>2</sub>漏出ありケースとなしケースの溶存CO<sub>2</sub>濃度の  
 3週間平均値の差（ $\Delta\text{TCO}_2$ ）の分布図



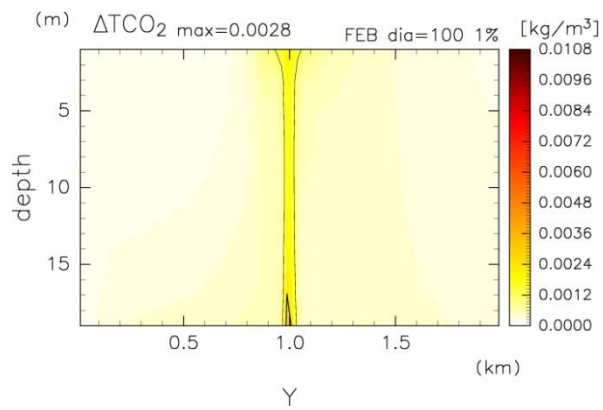
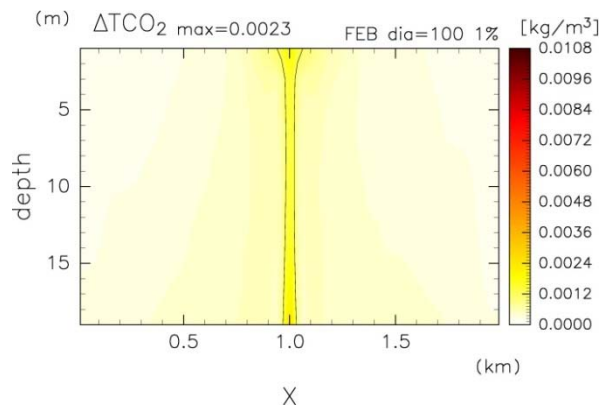
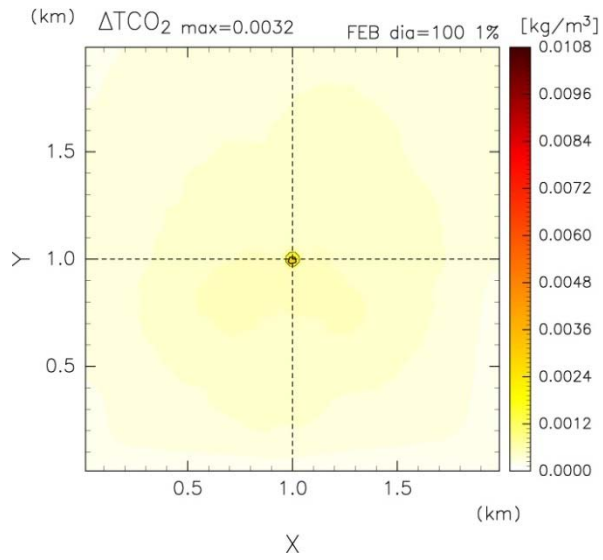
注：第 4. 3-2 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

第 4. 3-3 図 CO<sub>2</sub> 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均値の差 ( $\Delta\text{TCO}_2$ ) の分布図



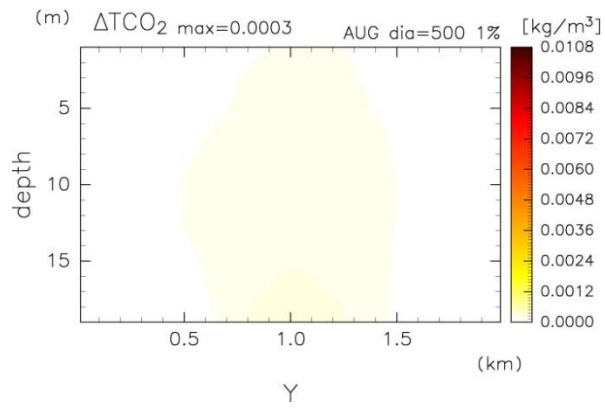
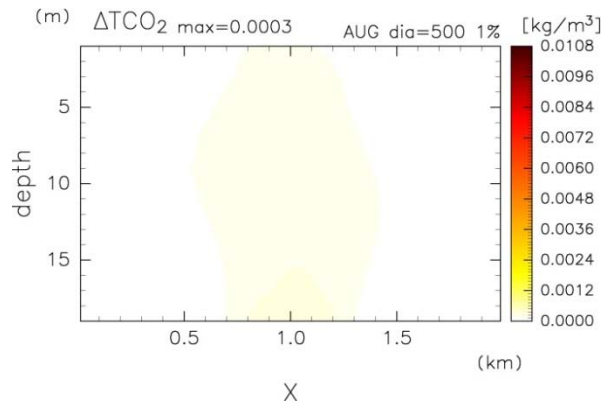
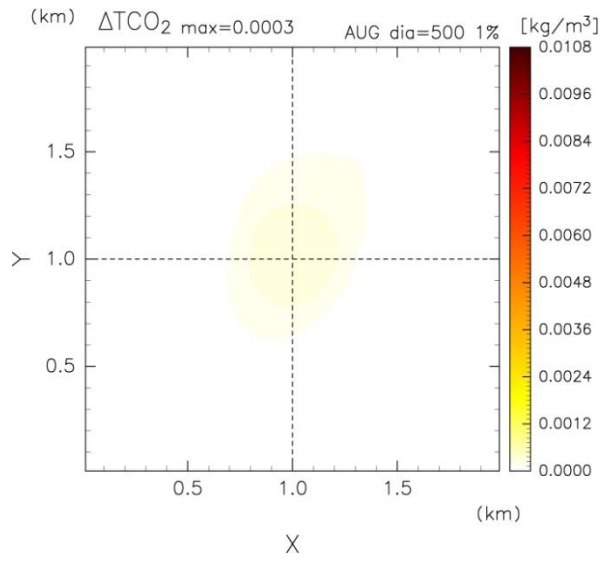
注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，夏季条件。

第 4.3-4 図 CO<sub>2</sub> 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO<sub>2</sub>) の分布図



注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

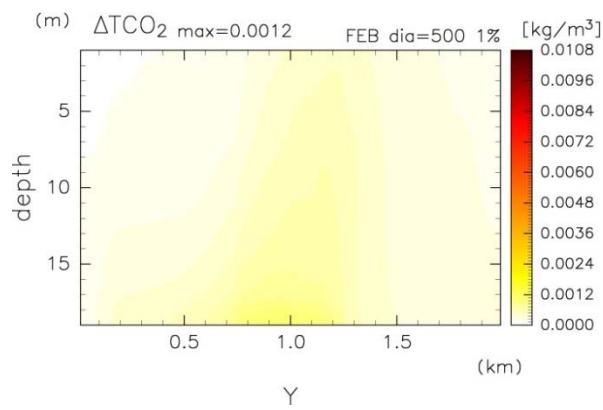
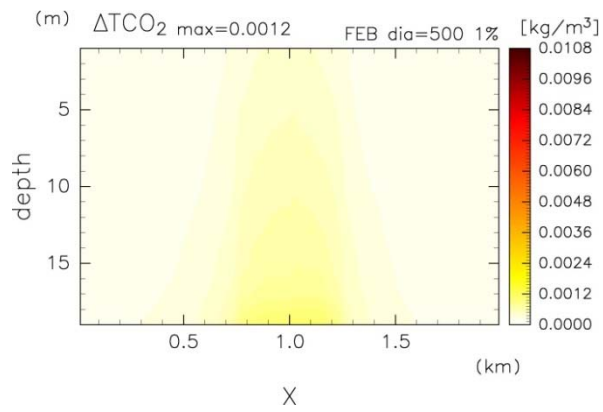
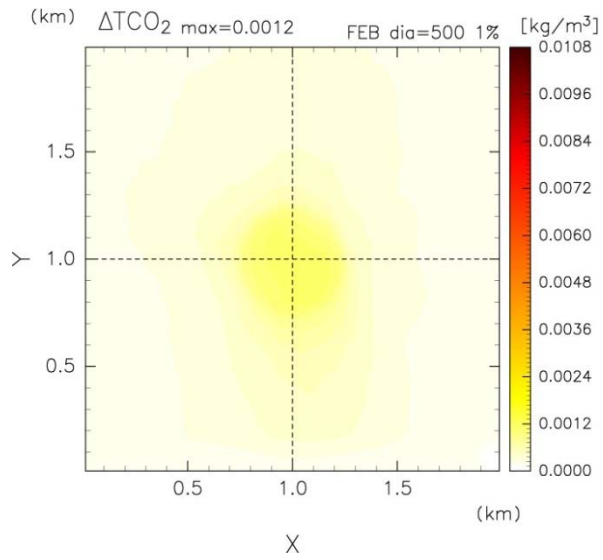
第 4.3-5 図 CO<sub>2</sub> 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均値の差 ( $\Delta\text{TCO}_2$ ) の分布図



注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-500m ケース，夏季条件。

第 4.3-6 図  $\text{CO}_2$  漏出ありケースとなしケースの溶存  $\text{CO}_2$  濃度の 3 週間平均値の差 ( $\Delta\text{TCO}_2$ ) の分布図





注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-500m ケース，冬季条件。

第 4.3-7 図 CO<sub>2</sub>漏出ありケースとなしケースの溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO<sub>2</sub>) の分布図

#### 4.4 海洋生物への影響の予測方法

##### (1) 生物影響閾値の設定

万が一のCO<sub>2</sub>漏出を仮定し、生物影響を予測評価するためには、海洋生物に及ぼすCO<sub>2</sub>影響の指標値が必要となる。ここでは、科学文献において影響が報告されている最も低いCO<sub>2</sub>分圧(pCO<sub>2</sub>)を採用し、安全側で影響を評価することとした。

CO<sub>2</sub>が生物に与える影響について記載された論文を網羅的に検索、解析して、生物影響データベースを構築した。このデータベースには、21門33綱84目143科246種の情報が収録されており、広範な海洋生物種を対象として影響閾値の検討を行った。なお、データベースは、環境省が「海水中のCO<sub>2</sub>濃度上昇が海洋生物に及ぼす影響に係る知見」として公開している資料<sup>[1]</sup>を参照して構築した。

生物に対するCO<sub>2</sub>の影響は、「死亡影響」と「死亡以外の影響」に分けて考えることができる。「死亡影響」は、生物個体の死亡や卵の孵化率低下などを通じて、直接的に個体群の減少を招く。「死亡以外の影響」は、繁殖速度の低下など個体群の再生産能力に係る影響、石灰質の殻形成不全・形成速度低下、血液の酸塩基平衡の変化や耳石形成不全などの生理的な影響、帰巢能力や逃避などの行動に関する影響などをもたらす。ここでは、致死作用あるいは成長阻害など個体の生残影響に関する報告をとりまとめ、14門21綱93種についての報告をもとに、生物影響閾値の検討を行った。

生物影響閾値に関してはCO<sub>2</sub>分圧を指標とし、実験対照区からのCO<sub>2</sub>分圧の増加分( $\Delta pCO_2$ )として取りまとめた。なお、対照区のCO<sub>2</sub>分圧は、大部分の実験において380~400 $\mu$ atm(現在の平均的な海洋表層の値)が採用されているが、一部の実験では産業革命以前のCO<sub>2</sub>分圧であるおよそ280 $\mu$ atmが採用されている。ここでは現在の状況においてCO<sub>2</sub>が漏出した場合を想定するので、現在のCO<sub>2</sub>分圧を基準にすることが望ましい。したがって、産業革命以前のCO<sub>2</sub>分圧を対照区とした実験結果は対象外とした。

CO<sub>2</sub>分圧の上昇により影響がみられたデータをとりまとめ、分類群ごとに整理した(第4.4-1表)。表中には、分類群、その分類群に含まれる代表的な生物の一般名、石灰質殻の有無、実験に用いた生物の生活史段階に対して影響閾値を示している。これらの生物の中で、石灰質は酸性に傾くと溶解しやすいことから、石灰質殻を持つ生物種は酸性化に対する耐性が低いことが一般的に知られている。例えば、石灰質殻を持たない水産上重要な魚類では、トウゴロウイワシ稚魚の一例をのぞき、10,000 $\mu$ atm以上の影響閾値を示す。また、タコやイカも同様に耐性が高く、成体で9,600 $\mu$ atm、幼体では38,000~84,000 $\mu$ atmであった。一方、石灰質殻を持つ生物としては、コケムシ、サンゴ類、ヒトデやウニなどの棘皮動物、二枚貝や巻貝、有孔虫、一部のハプト藻やサンゴモが知られているが、生物影響閾値はコケムシでは1,000 $\mu$ atm、サンゴ類では310~1,700 $\mu$ atm、ウニでは200~79,000 $\mu$ atm、二枚貝では300~1,300 $\mu$ atm、巻貝では200~2,400 $\mu$ atmが得られており、石灰質殻を持つ生物は相対的にCO<sub>2</sub>の濃度上昇に弱いことがわかる。

<sup>[1]</sup> 『海水中のCO<sub>2</sub>濃度上昇が海洋生物に及ぼす影響に係る知見』(環境省ウェブサイト：  
[https://www.env.go.jp/water/kaiyo/ccs/eikyo\\_db/database.htm](https://www.env.go.jp/water/kaiyo/ccs/eikyo_db/database.htm), 2014/10/21 アクセス)

これらの中で最も影響閾値が低い値は、棘皮動物門ウニ綱に含まれるバフンウニとナガウニ、および軟体動物門腹足綱に含まれるマガキガイを用いた実験で得られた 200 $\mu$ atm であった。いずれも 6 ヶ月にわたる飼育実験による影響を示したもので、これは慢性的な影響であることから、報告された文献の中で最も低い値といえる。

この結果、生物影響を検討するにあたり、CO<sub>2</sub>分圧の増加量 ( $\Delta p\text{CO}_2$ ) として 200 $\mu$ atm を生物影響閾値として採用した。

第 4. 4-1 表 CO<sub>2</sub>分圧上昇による生物影響のまとめ ー分類群別の生物種の影響閾値ー

門	綱	代表的な生物	石灰質殻の有無	生活史段階	影響閾値 ( $\Delta p\text{CO}_2 \mu\text{atm}$ )	備考
Annelida (環形動物門)	Polychaeta (多毛綱)	ゴカイ等		—	—	実験で影響みとめられず (pHデータのみ。およそ2,000と推察)
Arthropoda (節足動物門)	Malacostraca (軟甲綱)	エビ、カニ、ロブスター、オキアミ等		卵	<b>620*</b>	高濃度では短時間で、低濃度では長時間で生残率が低下 *ナンキョクオキアミ 卵孵化率低下 **イソスジエビ 30週間飼育
				幼生	<b>910-140,000</b>	
				成体	<b>620**-59,000</b>	
Arthropoda (節足動物門)	Maxillopoda (顎脚綱)	ミジンコ類、フジツボ類		幼生	<b>4,900</b>	高濃度では短時間で、低濃度では長時間で生残率が低下 *フジツボ 104日間飼育
				成体	<b>580*-53,000</b>	
Bryozoa (外肛動物門)	Gymnolaemata (裸喉綱)	コケムシ	○	—	<b>1,000</b>	
Chordata (脊索動物門)	Actinopterygii (条鰭綱)	硬骨魚類の殆ど (キス、アジ、イワシ、ヒラメ等)		卵	<b>50,000-120,000</b>	*トウゴロウイワシ:8日間曝露で生残率減少
				胚	<b>13,000</b>	
				稚仔魚	<b>240*</b>	
					<b>24,000-100,000</b>	
				幼魚/ 若魚 成体	<b>30,000-59,000</b>	
	<b>30,000-50,000</b>					
Elasmobranchii (板鰓綱)	軟骨魚類(サメ、エイ等)			成魚	<b>68,000</b>	
Cnidaria (刺胞動物門)	Anthozoa (花虫綱)	イソギンチャク、サンゴ類	○	—	<b>310*-1700</b>	*8週間飼育で白化増加
	Scyphozoa (鉢虫綱)	クラゲ類		幼生	—	実験で影響みとめられず(～50,000)
Echinodermata (棘皮動物門)	Asteroidea (ヒトデ綱)	ヒトデ類	○	幼生	—	実験で影響みとめられず(～400)
				成体	—	実験で影響みとめられず(～2,800)
	Echinoidea (ウニ綱)	ウニ類	○	幼生	<b>900-79,000</b>	バフンウニ <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> ナガウニ <i>Echinometra mathaei</i> 曝露期間6ヶ月 生残率減少
				幼体	<b>200</b>	
Ophiuroidea (クモヒトデ綱)	クモヒトデ類	○	幼生	<b>300</b>		

注: この表は、268 編の文献から、14 門 21 綱 93 種の海洋生物の影響閾値についてまとめたデータベースに基づく。

第 4.4-1 表 (つづき) CO<sub>2</sub>分圧上昇による生物影響のまとめ ー分類群別の生物種の影響閾値ー

門	綱	代表的な生物	石灰質殻の有無	生活史段階	影響閾値 ( $\Delta p\text{CO}_2$ $\mu\text{atm}$ )	備考
Mollusca (軟体動物門)	Bivalvia (二枚貝綱)	二枚貝(アサリ、カキ、ウバガイなど)	○	幼生	300-520	
				稚貝	350-1,300	
				成体	590	
	Cephalopoda (頭足綱)	タコ、イカ等		幼体	38,000-84,000	
				成体	9,600	
	Gastropoda (腹足綱)	巻貝(サザエ、アワビ等)	○	幼生	610-700	
稚貝				200	マガキガイ <i>Strombus luhuanus</i> 曝露期間6ヶ月 生残率減少	
成体				2,400		
Sipuncula (星口動物門)	Sipunculidea (スジホシムシ綱)		△	—	9,700	
Foraminifera (有孔虫門)	Polythalamia	有孔虫類 (石灰質殻をもつ原生動物)	○	—	740	
Chlorophyta (緑藻植物門)	Bryopsidophyceae	アオサ、ハネモ、ミルなどの海藻		—	2,100	
Haptophyta (ハプト植物門)	Prymnesiophyceae (ハプト藻綱)	植物プランクトン	○(一部の種)	—	—	実験で影響みとめられず(～520)
Rhodophyta (紅色植物門)	Florideophyceae (真正紅藻綱)	サンゴモ等	○(一部の種)	—	550-890	
Myzozoa (渦鞭毛植物門)	Peridinea (渦鞭毛藻綱)	植物プランクトン、共生褐虫藻(クラゲ、イソギンチャク、サンゴ等)		—	—	実験で影響なし(～1,700)

注: この表は、268 編の文献から、14 門 21 綱 93 種の海洋生物の影響閾値についてまとめたデータベースに基づく。

## (2) CO<sub>2</sub> 漏出シミュレーションによる pCO<sub>2</sub> の増分 (ΔpCO<sub>2</sub>)

### ① ΔpCO<sub>2</sub>

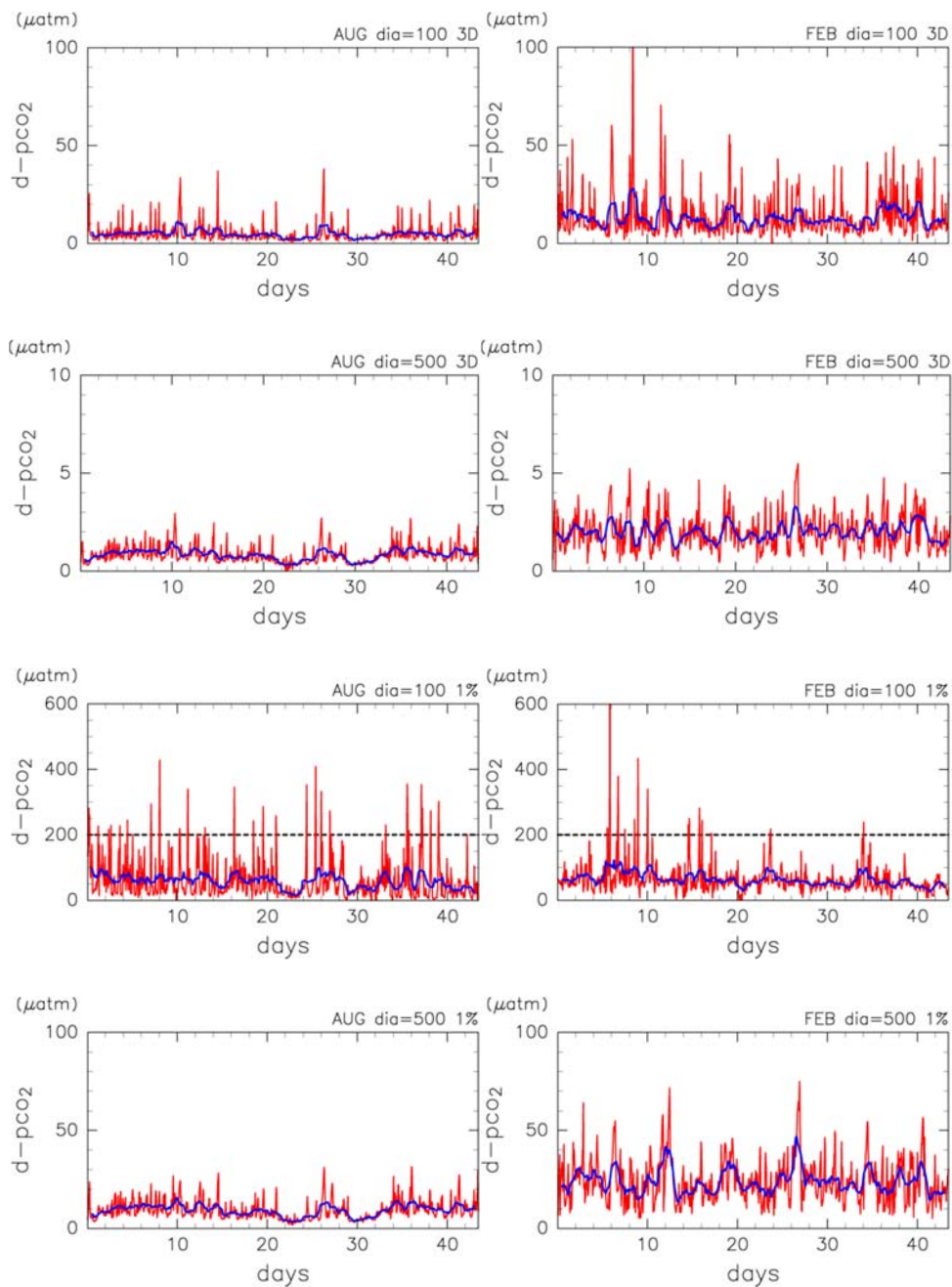
pCO<sub>2</sub> は、海水中の二酸化炭素分圧である。4.4 節のとおり、漏出 CO<sub>2</sub> の海洋生物への影響の有無は、CO<sub>2</sub> 漏出による pCO<sub>2</sub> の増分、すなわち ΔpCO<sub>2</sub> で見積られる。ΔpCO<sub>2</sub> が 200μatm 以上になると影響を受ける生物種が存在する。そこで、ΔpCO<sub>2</sub>=200μatm を漏出 CO<sub>2</sub> が海洋生物に与える 1 つの目安と考えた。ここでは ΔpCO<sub>2</sub> を、漏出ありのシミュレーションの pCO<sub>2</sub> と漏出なしのシミュレーションの pCO<sub>2</sub> の差と定義する。

第 4.4-1 図は、漏出域の中心の最下層セル（海底直上）における ΔpCO<sub>2</sub> の時系列である。赤線は生データ、青線は 24 時間の移動平均で、点線は生物が影響を受け得る目安である ΔpCO<sub>2</sub>=200μatm である。01 分潮の効果を打ち消すことを考えると 25 時間移動平均にすべきであるが、苫小牧港潮流観測調査業務報告書によると、P1 分潮、K1 分潮が卓越しているため、生物影響の予測に影響は生じないと考えられる。

シナリオ 2 の場合、ΔpCO<sub>2</sub> はもっとも高い値をとる 100m ケースの冬季でもほとんどの時間で 50μatm 以下であり、24 時間平均すると 30μatm 以下である。100m ケースの夏季は最大値が 50μatm 未満で、24 時間平均値はほとんどの時間で 10μatm 以下である。500m ケースは夏季、冬季ともにほとんどの時間において 5μatm 以下で非常に小さい値にしかない。1%漏出-100m ケースは、夏季、冬季ともシミュレーション期間中に数回 200μatm を超えるが、24 時間平均すると概ね 100μatm 以下である。1%漏出-500m ケースは冬季でも最大値が 80μatm 以下で、夏季は概ね 30μatm 以下と pCO<sub>2</sub> の増加は非常に小さい。

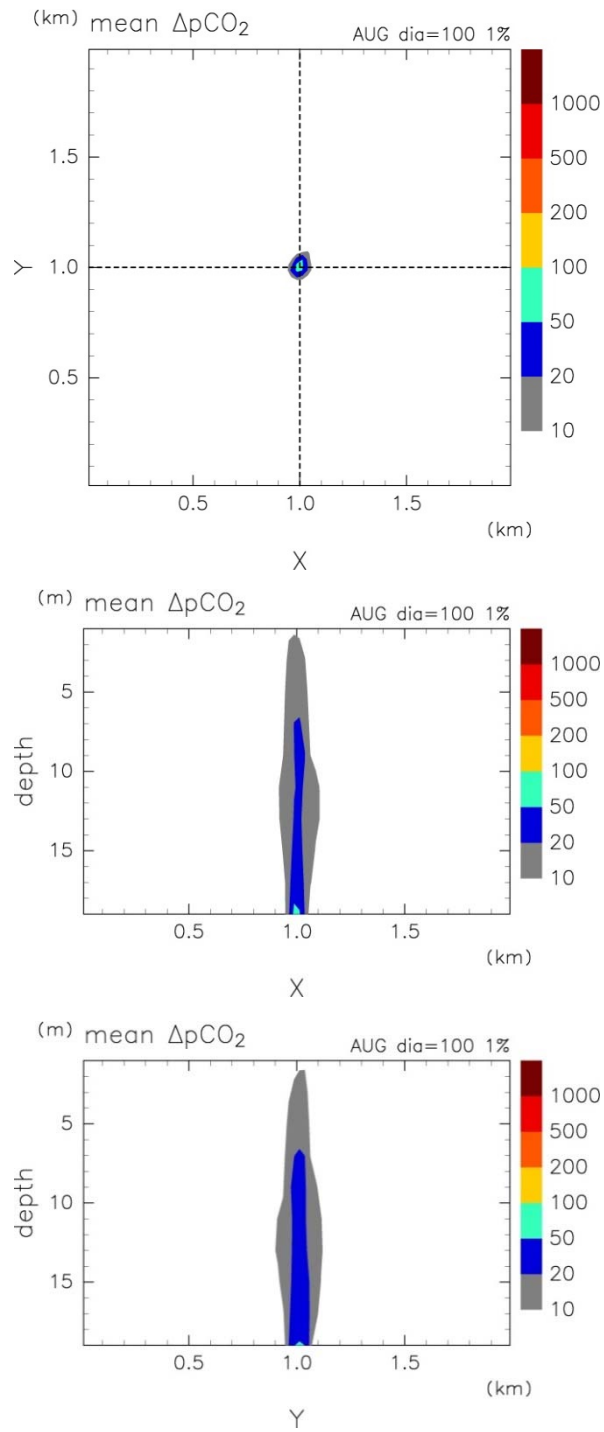
今回グラフとして示したこの時系列のセルは、漏出域が 500m の場合、周囲 8 セル全てが漏出域のセルで囲まれており、非漏出域のセルまで十分離れている。それに対し漏出域が 100m のケースは漏出セル数が 12 個しかないので、この時系列グラフに用いたセルの周囲 8 セルの 1 つは非漏出域のセルになってしまう（第 4.2-6 図）。1%漏出-100m ケースにおいて単位面積当たりの漏出量あまり高い値にならないことや、1%漏出-500m ケースほど夏季と冬季の違いがはっきりしないのは、周囲の非漏出域から CO<sub>2</sub> 濃度の低い水が混ざり込みやすいことが影響していると考えられる。

第 4.4-2 図～第 4.4-4 図は、3 週間平均した ΔpCO<sub>2</sub> の分布図である。シナリオ 2-100m ケースの冬季では、領域内最大値が 13μatm であるが、他のケースは最大値が 10μatm 未満である（第 4.3-1 表）。1%漏出-100m ケース（第 4.4-2 図、第 4.4-3 図）は、冬季の漏出域直上でも 100μatm を超えることはなく、夏季は漏出域直上でも 50μatm をわずかに超える程度である。1%漏出-500m ケースの冬季（第 4.4-4 図）は、漏出域の海底付近に 20μatm を超えるところがわずかにある程度である。夏季は最大値が約 9μatm（第 4.3-1 表）と漏出域直上ですら非常に小さい値である。なお、シナリオ 2 ケースおよび 1%漏出-500m ケースの夏季については、ここで示したカラースケールではコンターが描かれないため、図を省略した。



注: 上から順にシナリオ 2-100m ケース, シナリオ 2-500m ケース, 1%漏出-100m ケース, 1%漏出-500m ケース。左が夏季条件, 右が冬季条件。赤は生データ, 青は 24 時間移動平均したもの。点線は生物影響の目安である  $\Delta pCO_2 = 200\mu\text{atm}$ 。

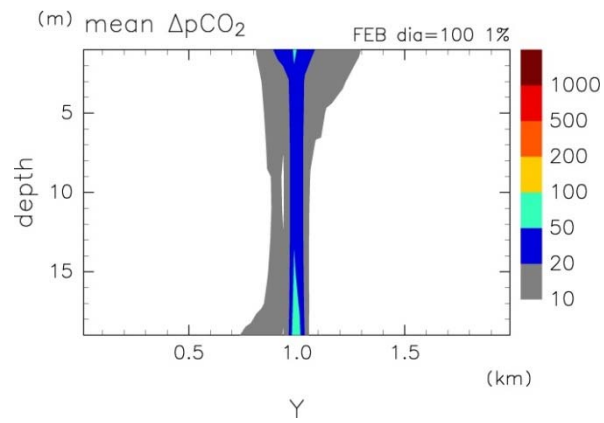
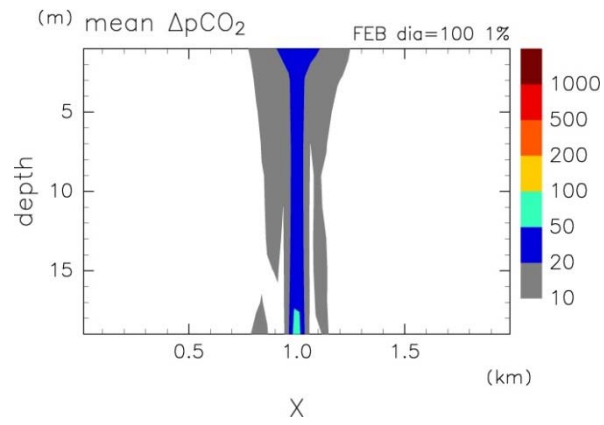
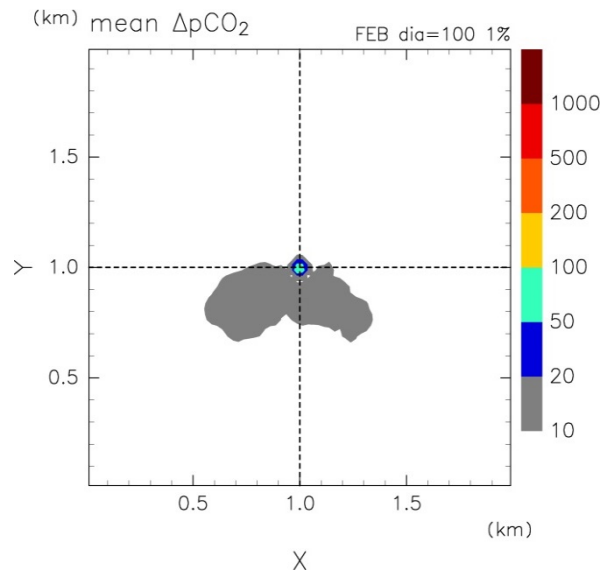
第 4.4-1 図 漏出域中心の最下層セル (海底直上) の  $\Delta pCO_2$  の時系列



注: 上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。1%漏出-100m ケース, 夏季条件。

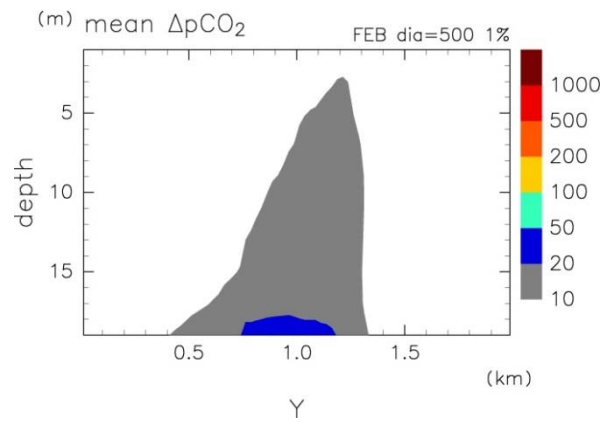
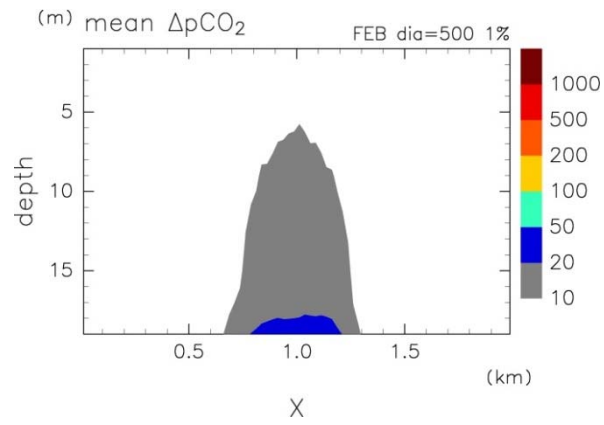
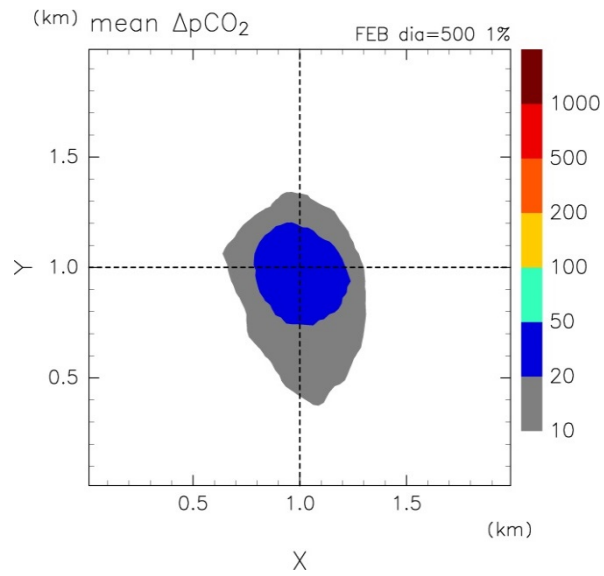
第 4. 4-2 図  $\Delta p\text{CO}_2$  の分布図





注：第 4. 4-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

第 4. 4-3 図  $\Delta p\text{CO}_2$  の分布図



注: 第 4. 4-2 図と同じ。1%漏出-500m ケース, 冬季条件。

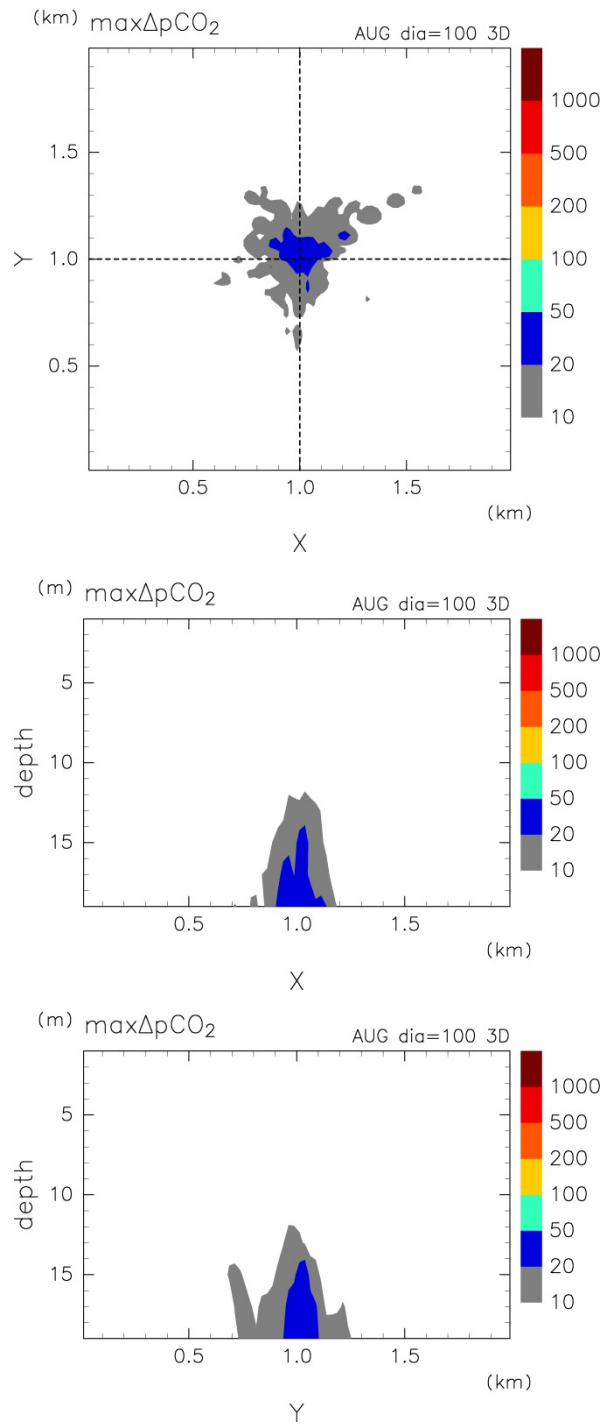
第 4. 4-4 図  $\Delta p\text{CO}_2$  の分布図

## ② $\Delta pCO_2$ の最大値

第 4.4-5 図～第 4.4-11 図は、夏季および冬季のシミュレーション期間（3 週間）を通しての各セルの  $\Delta pCO_2$  の最大値の分布図である。すなわち、各セルで、第 4.4-1 図で示すような赤線のグラフの最大値を求め、それらの値を基に分布図を描いたものである。最大値を取る時間はセルごとに異なるため、ある瞬間にこのような分布になるわけではないことに注意が必要である。また、第 4.4-1 図に示されているとおり、最大値はシミュレーション期間中に数回しか生じないような大きな値をとる場合もあることにも注意が必要である。また、シナリオ 2-500m ケースについては値が非常に小さいため、最下層の xy 平面の分布図のみを載せているが、他のケースと異なるカラスケールで示されていることに注意が必要である。

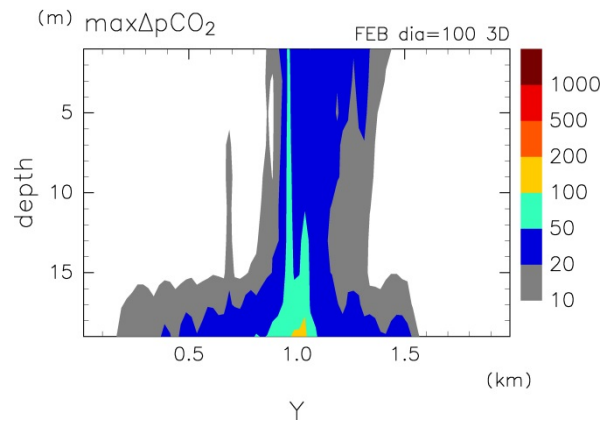
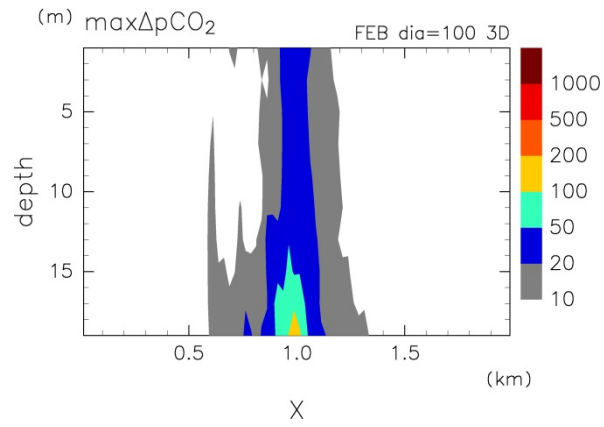
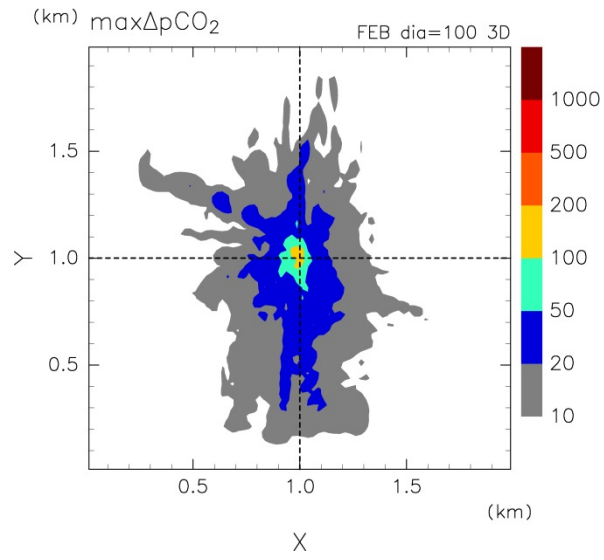
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4.4-6 図）は、漏出域直上で  $100\mu atm$  を超えるところが見られるがごく狭い範囲である。夏季（第 4.4-5 図）は  $50\mu atm$  を超えるところもなく、図で色がついている  $10\mu atm$  を超える範囲も狭い範囲となっている。第 4.4-7 図はカラスケールを他の図の 1/10 にしている。漏出域から離れるほど小さな値になるという分布が示されているが、漏出域直上ですら極めて小さい値であることに注意が必要である。

1%漏出-100m ケースの冬季（第 4.4-9 図）は、漏出域の直上で海底から海面まで全ての層で  $\Delta pCO_2$  の最大値が  $200\mu atm$  以上になっている。しかし、最大値が大きいのは漏出域の上だけで、その周囲では海底直上でも  $\Delta pCO_2$  が  $200\mu atm$  を超えることはない。夏季（第 4.4-8 図）も漏出域付近で  $\Delta pCO_2$  の最大値は高い。しかし、冬季とは違い、最大値が  $200\mu atm$  以上のところは海面までは到達せず、海底面上 10m 辺りまでになっている。冬季に比べて夏季の方が水平方向の広がりはやや大きい。1%漏出-500m ケース（第 4.4-10 図、第 4.4-11 図）では、冬季の海底直上にごくわずかに  $\Delta pCO_2$  が  $100\mu atm$  を超えるところが見られるが、それ以外は冬季では  $100\mu atm$  以下、夏季では  $50\mu atm$  以下である。



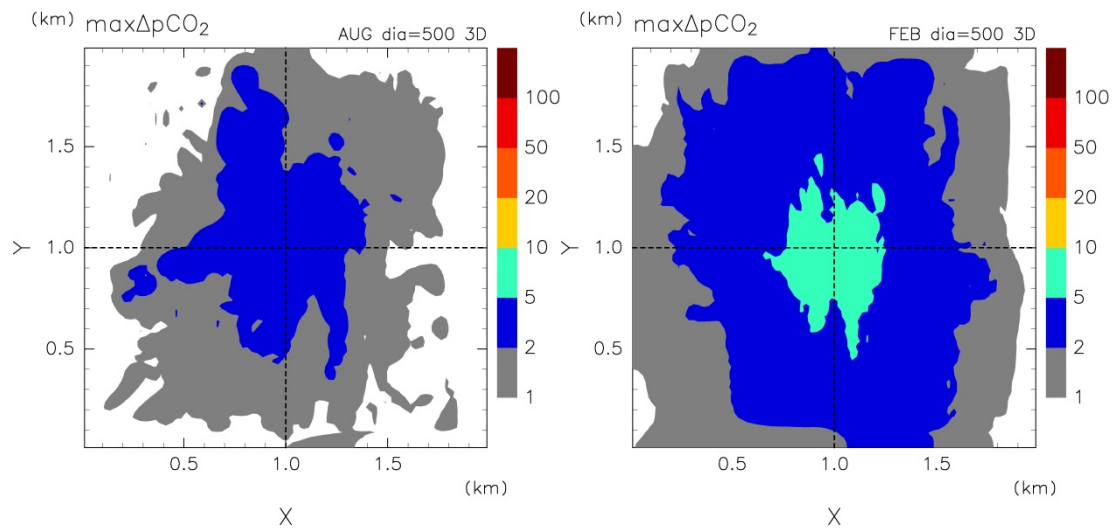
注：上から順に最下層の水平面（xy 平面）と y, x の中央での鉛直断面（xz 断面, yz 断面）。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

第 4.4-5 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



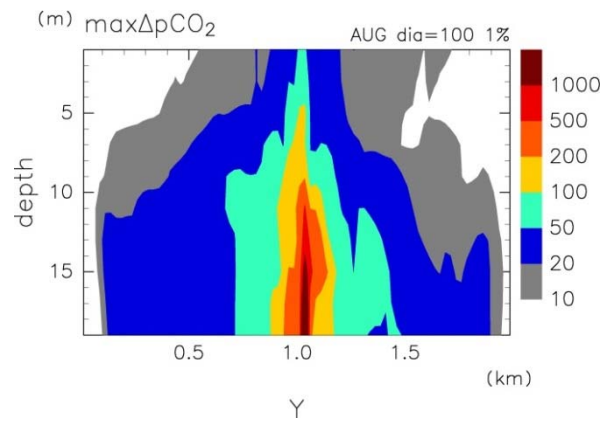
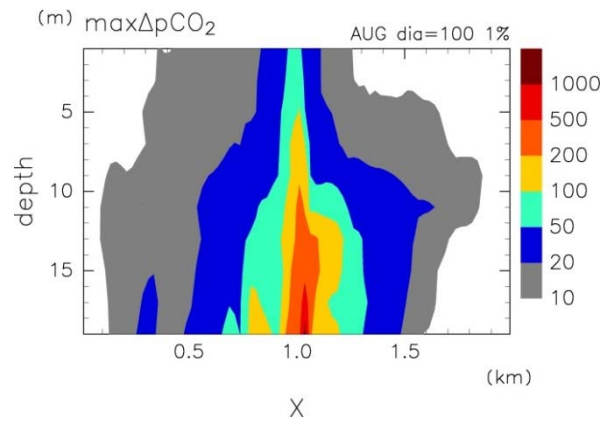
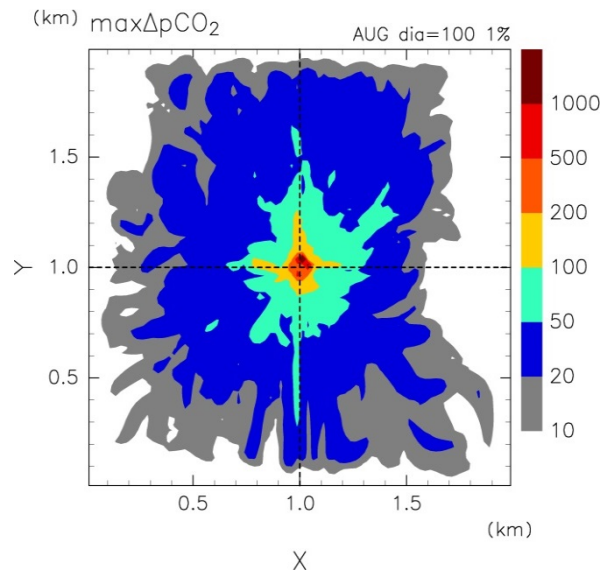
注：第 4.4-5 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

第 4.4-6 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



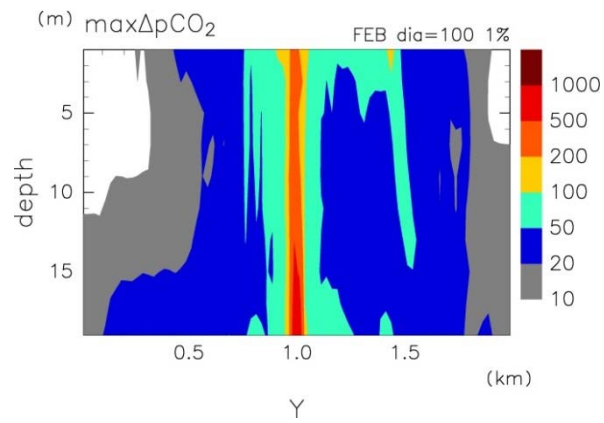
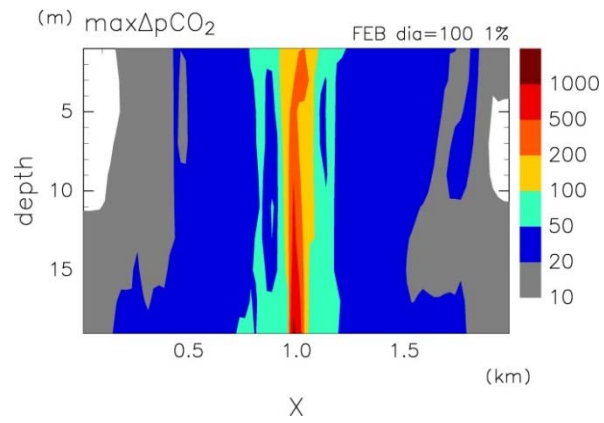
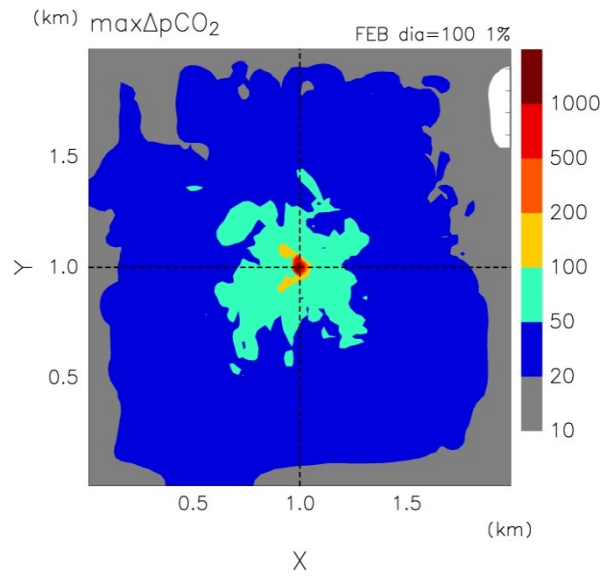
注：最下層の水平面（xy平面）図。シナリオ2-500mケース。左が夏季条件，右が冬季条件。ただしカラースケールが異なっている。

第 4.4-7 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



注: 第 4. 4-5 図と同じ。1%漏出-100m ケース, 夏季条件。

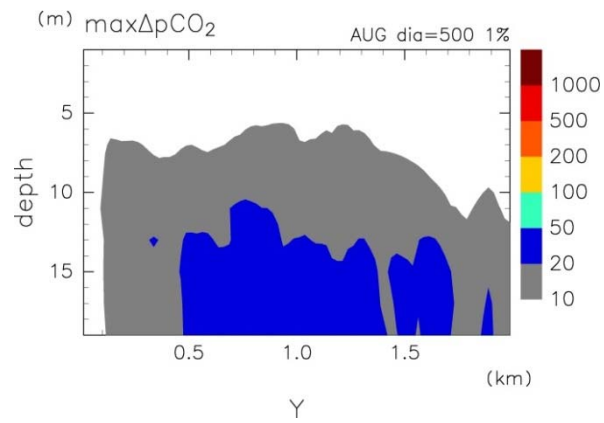
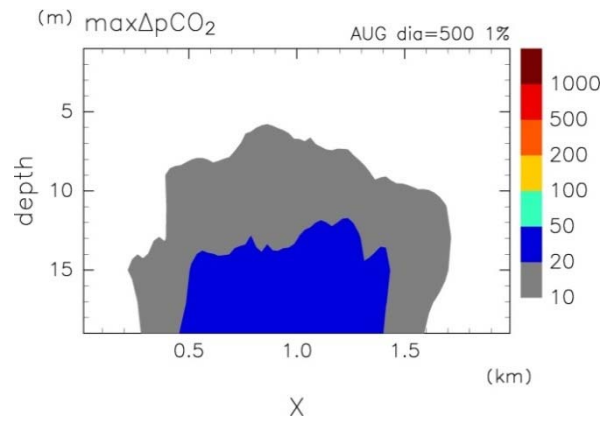
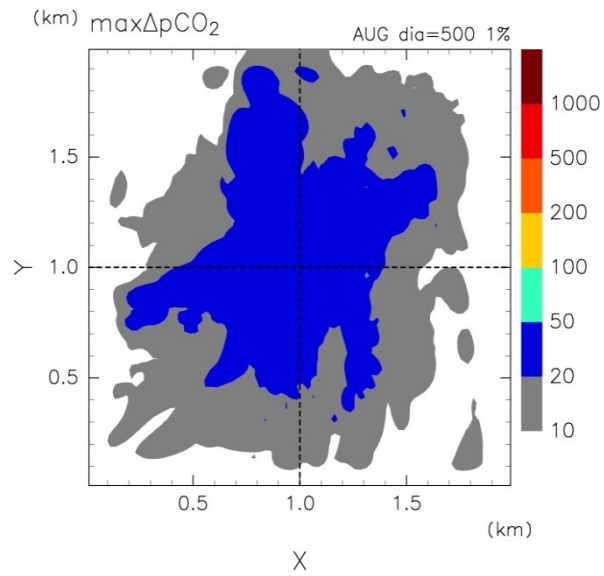
第 4. 4-8 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



注: 第 4. 4-5 図と同じ。1%漏出-100m ケース, 冬季条件。

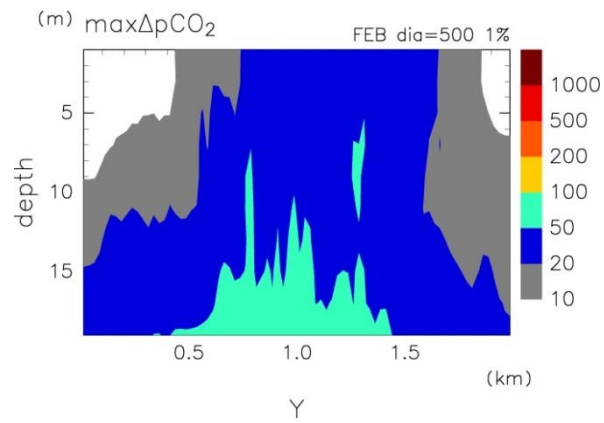
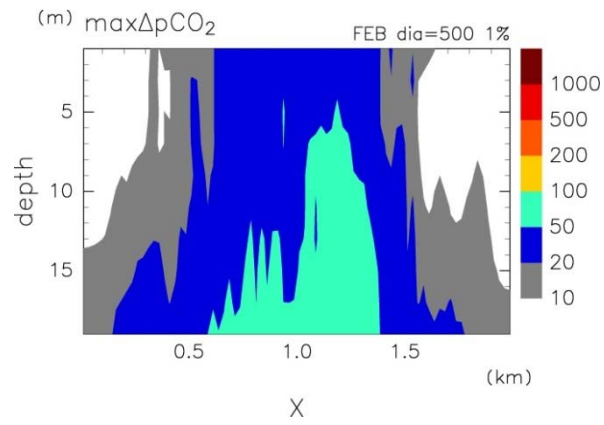
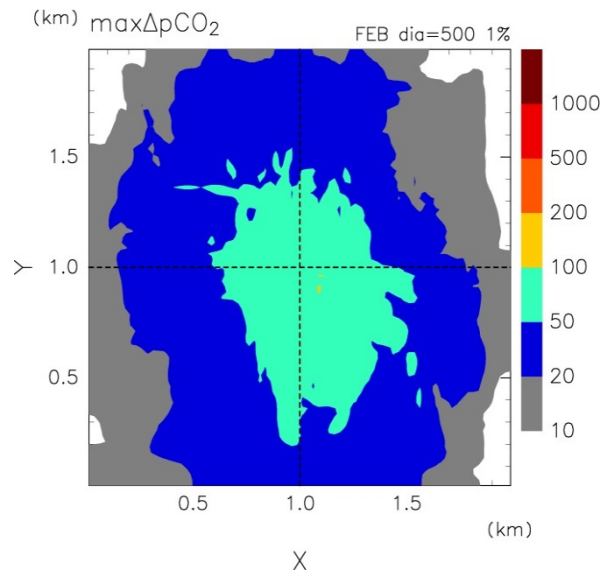
第 4. 4-9 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図





注: 第 4. 4-5 図と同じ。1%漏出-500m ケース, 夏季条件。

第 4. 4-10 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



注: 第 4. 4-5 図と同じ。1%漏出-500m ケース, 冬季条件。

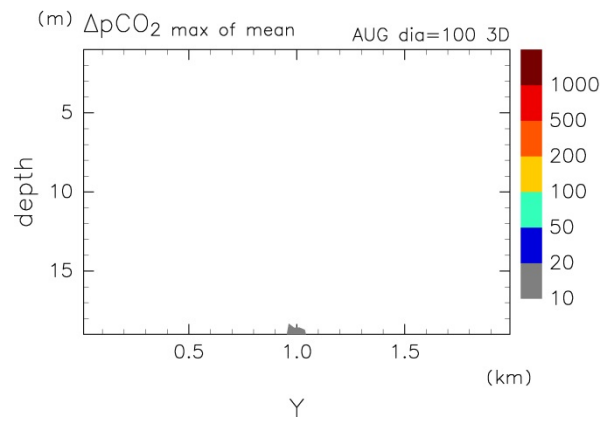
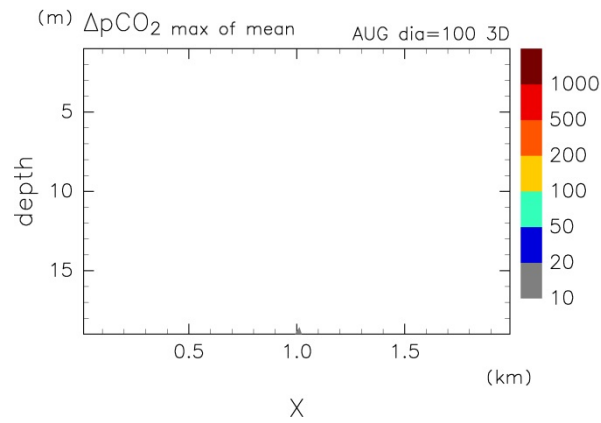
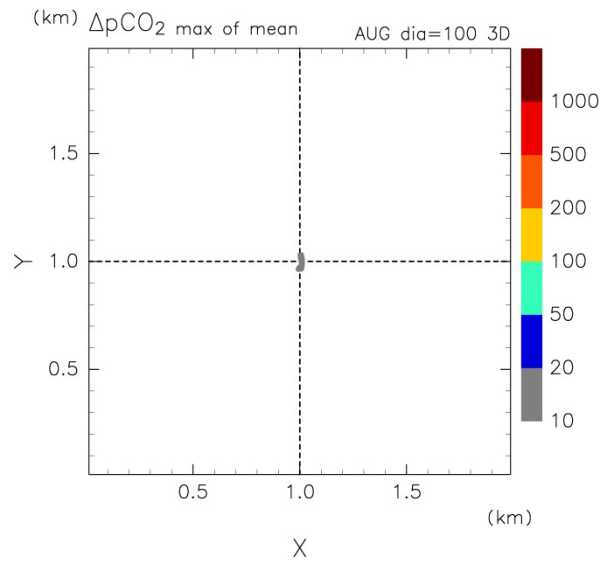
第 4. 4-11 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図

### ③ $\Delta p\text{CO}_2$ の 24 時間移動平均値

生物への影響を考えた場合、 $\Delta p\text{CO}_2$  の値が  $200\mu\text{atm}$  というのが 1 つの目安ではあるが、一瞬でも  $200\mu\text{atm}$  になれば生物が影響を受けるわけではない。ある程度の期間、例えば 24 時間以上に渡って  $\Delta p\text{CO}_2$  が  $200\mu\text{atm}$  以上の環境に曝露されると影響が出るという値である。そこで、ここでは 1 日平均値を考えることにし、1 日平均値で  $\Delta p\text{CO}_2$  が  $200\mu\text{atm}$  を超える範囲を示すために、セルごとに  $\Delta p\text{CO}_2$  の時系列を 24 時間移動平均し、その最大値の分布をプロットした（第 4. 4-12 図～第 4. 4-17 図）。すなわち、セルごとに第 4. 4-1 図で示すような青線を求め、その最大値をプロットしたものである。

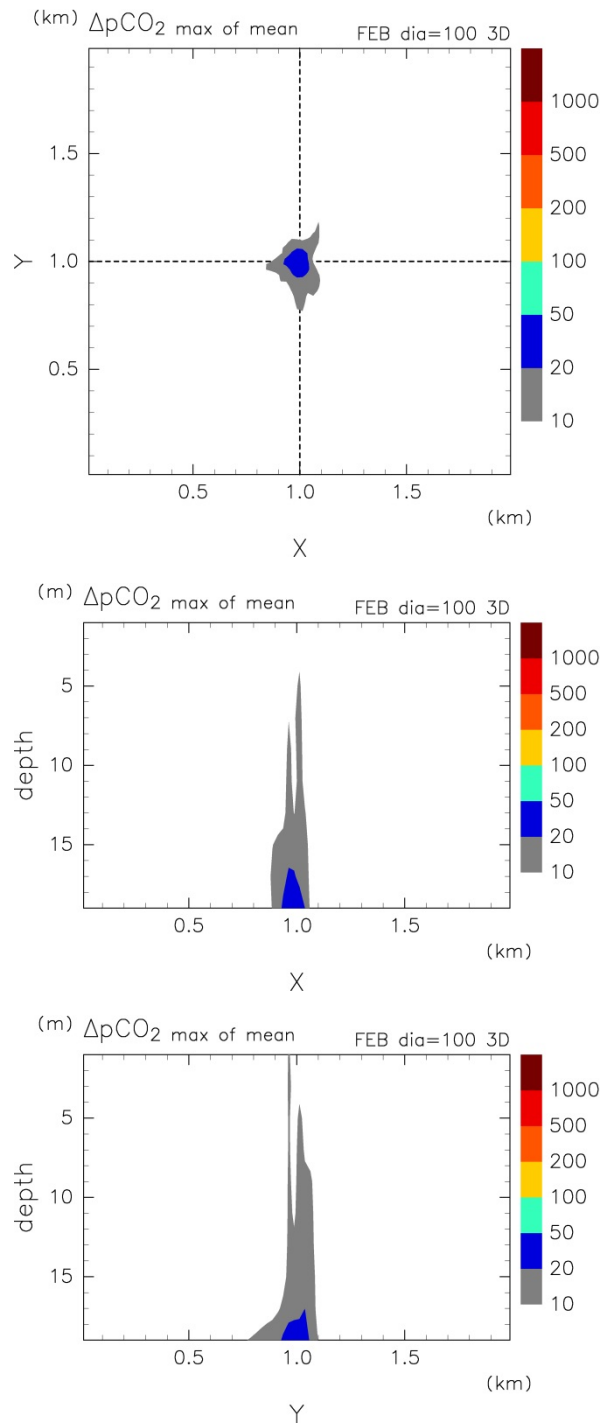
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4. 4-13 図）は漏出域直上に  $20\sim 50\mu\text{atm}$  を示す青色が見られ、その周囲のごく狭い範囲に  $10\mu\text{atm}$  以上のところがある。夏季（第 4. 4-12 図）は漏出域直上で  $10\mu\text{atm}$  を超えるところがあるだけである。シナリオ 2-500m ケースは夏季、冬季ともモデル領域内の最大値が  $5\mu\text{atm}$  未満のため図は省略した。

1%漏出-100m ケース（第 4. 4-14 図、第 4. 4-15 図）では、冬季、夏季とも漏出域直上に  $\Delta p\text{CO}_2$  が  $200\mu\text{atm}$  以上のところがあり、上方へと広がっているが、海底から数 m 離れると  $200\mu\text{atm}$  未満になる。1%漏出-500m ケース（第 4. 4-16 図、第 4. 4-17 図）では冬季でも  $\Delta p\text{CO}_2$  はほぼ  $50\mu\text{atm}$  以下であり、夏季には  $20\mu\text{atm}$  以下と非常に小さい値になっている。



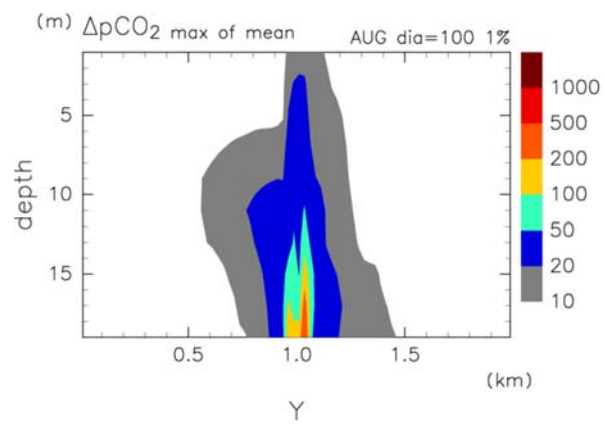
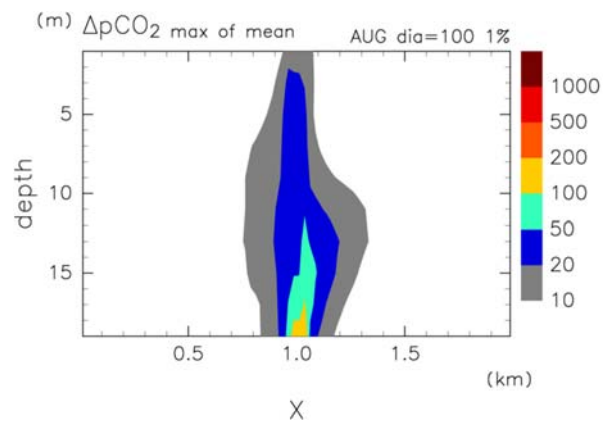
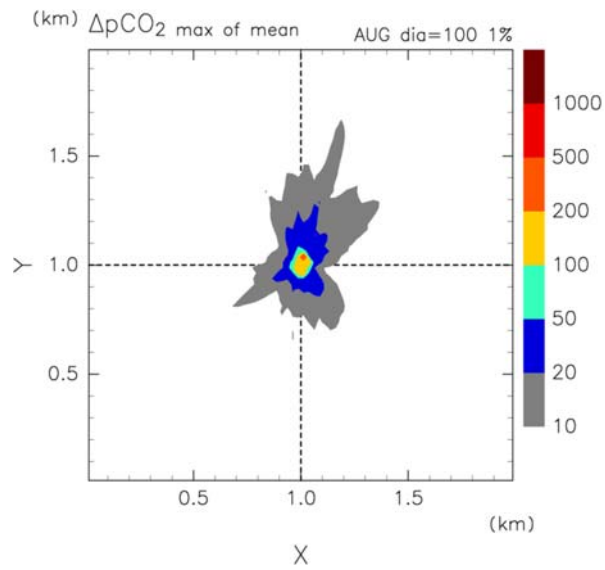
注: 上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

第 4.4-12 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図



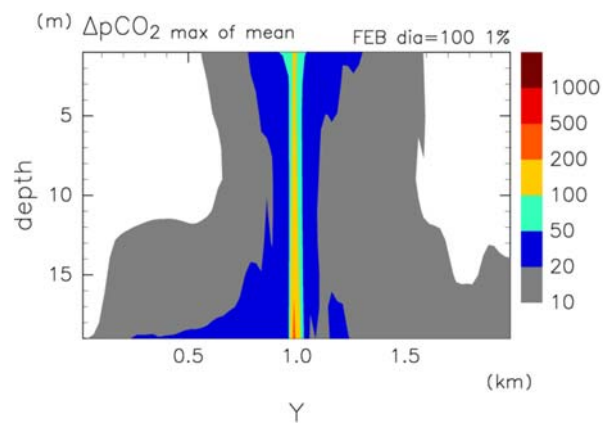
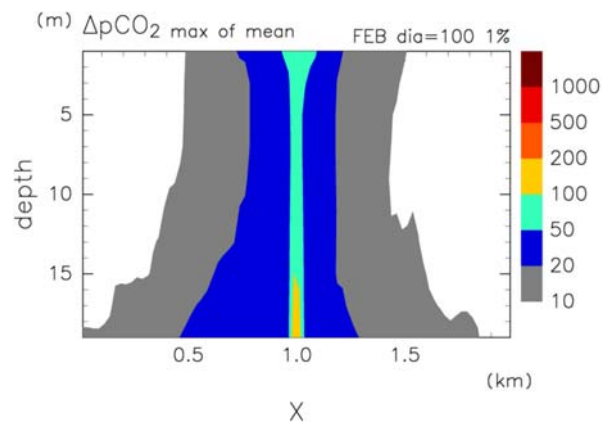
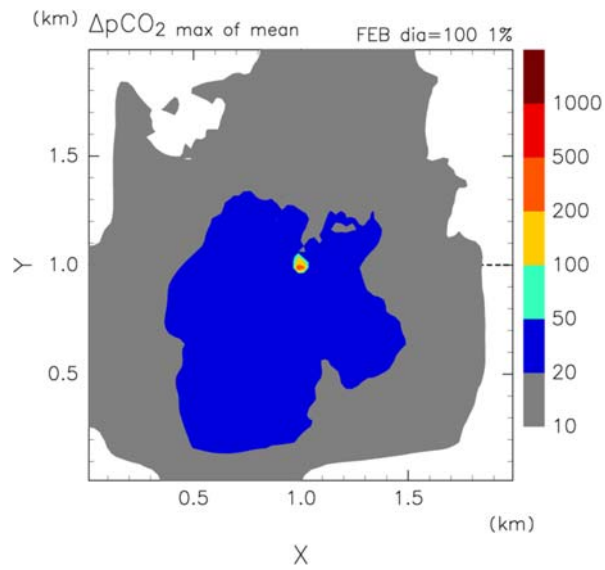
注：第 4.4-12 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

第 4.4-13 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図



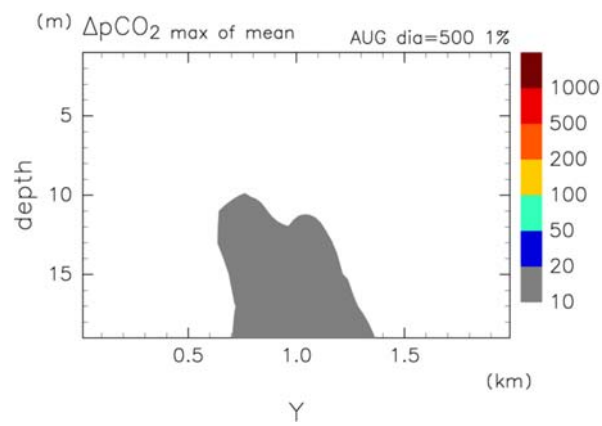
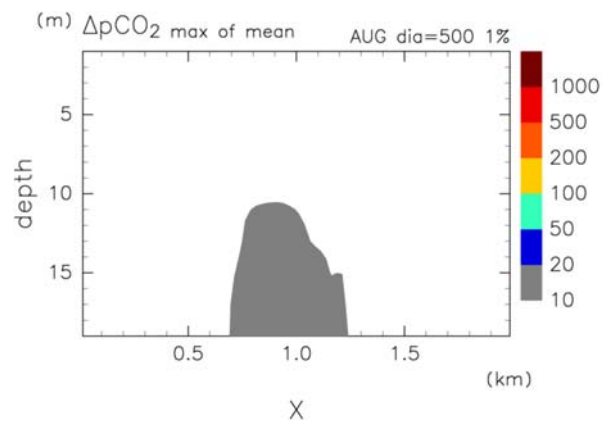
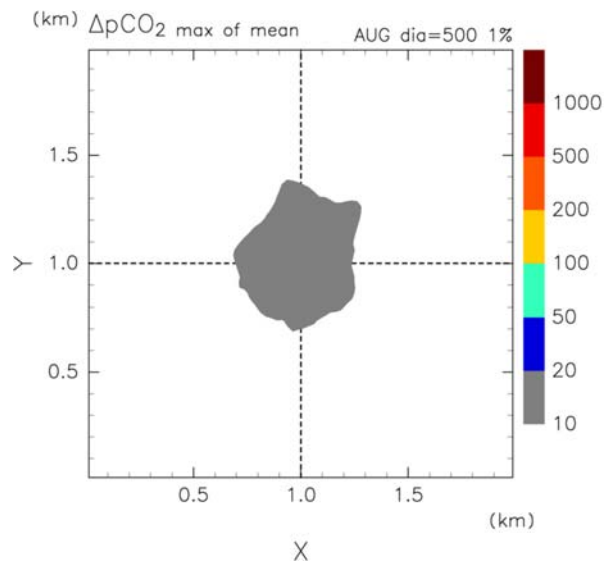
注：第 4.4-12 図と同じ。1%漏出-100m ケース，夏季条件。

第 4.4-14 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図



注：第 4.4-12 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

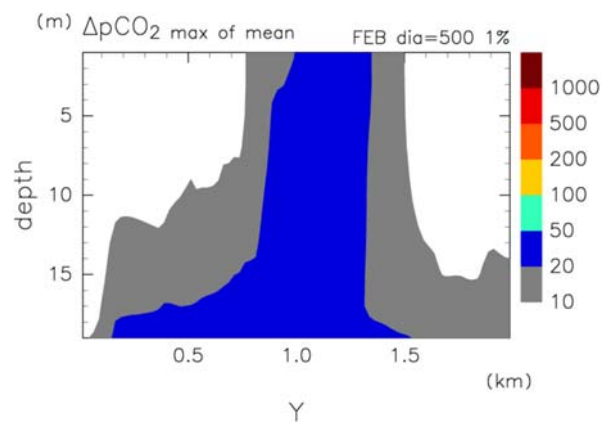
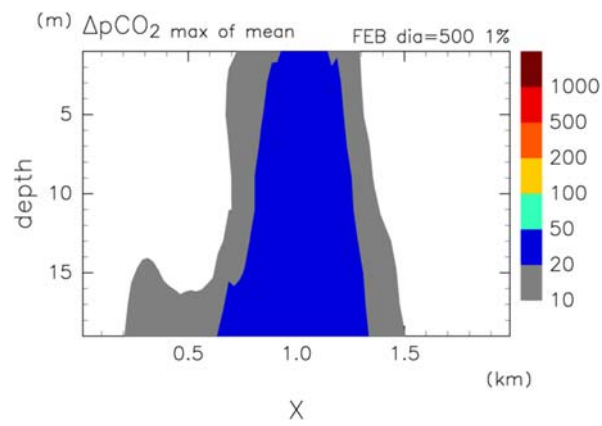
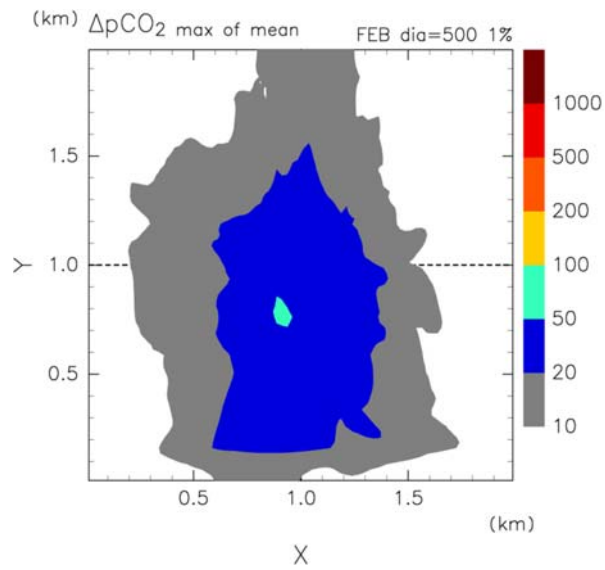
第 4.4-15 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図



注：第 4.4-12 図と同じ。1%漏出-500m ケース，夏季条件。

第 4.4-16 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図





注：第 5.1-12 図と同じ。1%漏出-500m ケース，冬季条件。

第 4.4-17 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図

### (3) 生物影響の予測結果

2つの漏出シナリオ（シナリオ2ケース，1%漏出ケース）に基づきシミュレーションした溶存CO<sub>2</sub>濃度の3週間平均値（3週間平均TCO<sub>2</sub>），漏出による溶存CO<sub>2</sub>濃度の増分の3週間平均値（3週間平均ΔTCO<sub>2</sub>），3週間平均ΔpCO<sub>2</sub>，ΔpCO<sub>2</sub>の最大値，24時間移動平均したΔpCO<sub>2</sub>の最大値（平均ΔpCO<sub>2</sub>最大値）についてFull-3Dモデル領域内の最大値，最小値を第4.4-2表にまとめた。

第4.4-2表 Full-3Dモデル領域内の3週間平均TCO<sub>2</sub>，3週間平均ΔTCO<sub>2</sub>，3週間平均ΔpCO<sub>2</sub>，ΔpCO<sub>2</sub>最大値および24時間移動平均ΔpCO<sub>2</sub>最大値の最小値と最大値

ケース名	3週間平均TCO <sub>2</sub>		3週間平均ΔTCO <sub>2</sub>		3週間平均ΔpCO <sub>2</sub>		ΔpCO <sub>2</sub> 最大値		平均ΔpCO <sub>2</sub> 最大値	
	領域最小	領域最大	領域最小	領域最大	領域最小	領域最大	領域最小	領域最大	領域最小	領域最大
シナリオ2-100m ケース 冬季	0.089387	0.090016	7.81×10 <sup>-6</sup>	6.29×10 <sup>-4</sup>	0.152	13.348	0.208	151.02	0.174	40.88
シナリオ2-100m ケース 夏季	0.085363	0.086025	4.07×10 <sup>-6</sup>	2.02×10 <sup>-4</sup>	0.095	5.233	0.207	42.161	0.144	11.69
シナリオ2-500m ケース 冬季	0.089387	0.08959	7.43×10 <sup>-6</sup>	1.10×10 <sup>-4</sup>	0.145	2.149	0.187	7.193	0.338	4.3
シナリオ2-500m ケース 夏季	0.085362	0.086024	3.25×10 <sup>-6</sup>	3.19×10 <sup>-5</sup>	0.083	0.802	0.233	3.449	0.15	1.59
1%漏出-100m ケース 冬季	0.089487	0.092601	1.07×10 <sup>-4</sup>	3.21×10 <sup>-3</sup>	2.094	96.11	2.974	1614	2.705	288.5
1%漏出-100m ケース 夏季	0.085404	0.08758	3.25×10 <sup>-5</sup>	1.87×10 <sup>-3</sup>	0.828	58.37	1.996	2528	1.422	379.2
1%漏出-500m ケース 冬季	0.089461	0.090572	8.12×10 <sup>-5</sup>	1.19×10 <sup>-3</sup>	1.585	25.61	2.071	104.4	1.853	56.48
1%漏出-500m ケース 夏季	0.0854	0.086058	3.53×10 <sup>-5</sup>	3.46×10 <sup>-4</sup>	0.893	9.015	1.955	41.07	1.407	17.63

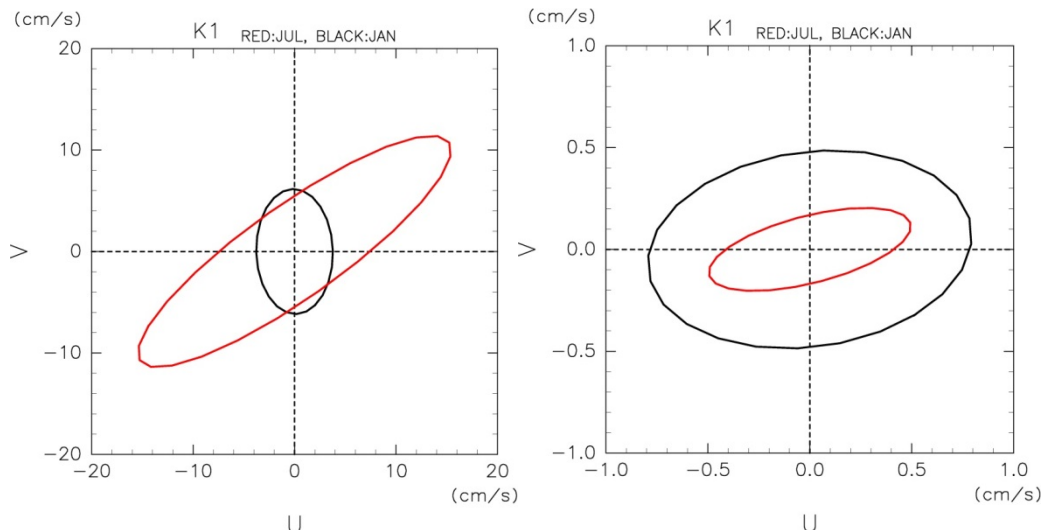
注：単位はTCO<sub>2</sub>とΔTCO<sub>2</sub>がkg/m<sup>3</sup>，ΔpCO<sub>2</sub>はμatm。

シミュレーション期間中のΔpCO<sub>2</sub>の最大値については，1%漏出-100m ケース夏季と冬季において1,000μatm以上と高いが，24時間移動平均したΔpCO<sub>2</sub>の最大値（平均ΔpCO<sub>2</sub>最大値）をみると，この2つのケースでは288.5~379.2μatmであり，生物影響への目安となる200μatmをわずかに超える程度である。また，その範囲は4.4(2)で示したとおり漏出域のごく一部に限られる。

シナリオ2-100m ケースについては，最も漏出の影響が大きい冬季でもΔpCO<sub>2</sub>の最大値が151.02で，24時間移動平均したΔpCO<sub>2</sub>の最大値は40.88と小さな値になっている。シナリオ2-500m ケースは，ΔpCO<sub>2</sub>の最大値が10μatm未滿で観測によって検知できない程度の低い値にしかない。1%漏出-500m ケースはΔpCO<sub>2</sub>の最大値でも冬季が104μatm，夏季が41μatmで，生物影響の目安となる200μatmに比べて十分小さい。

CO<sub>2</sub>は水温が低いほど海水によく溶けるため，各ケースとも夏季よりも冬季の方が，溶存CO<sub>2</sub>濃度が高い。1%漏出-100m ケースについては，ΔpCO<sub>2</sub>の最大値や24時間移動平均したΔpCO<sub>2</sub>の最大値は夏季の方が高いが，3週間平均したΔpCO<sub>2</sub>は冬季の方が高い。この点は4.4(2)で分布を示したとおり，夏季に局所的に高い値があるために，最大値が冬季より高くなっているだけと考えられる。なお，平均流（時間平均値）は第2.1-3図に示したように計算値は観測値を概

ね再現できているが、潮流など時間変動成分については必ずしも十分に再現されているわけではない（第 4.4-18 図）。そのため、本シミュレーションでは流れの時間変動成分による CO<sub>2</sub> の拡散効果を若干過小評価している可能性も考えられる。しかし、その場合、CO<sub>2</sub> が広がった分だけ濃度がより薄まることになるため、本シミュレーションで示された漏出 CO<sub>2</sub> による影響範囲（第 4.4-2～4.4-4 図）がより広くなるとは考えにくい。



注：左図が H16 年度苫小牧港潮流観測調査の結果。右図がシミュレーション結果。赤は夏季(7月)，黒は冬季(1月)。

第 4.4-18 図 観測とシミュレーションによる K1 潮の潮流楕円の比較

## 5. 当該特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出したと仮定した場合に予測される海洋環境に及ぼす影響の程度の分析及びこれに基づく事前評価の結果

弾性波探査の検出限界以下の小規模な断層/フラクチャを通じてCO<sub>2</sub>が移行するシナリオでは、海底面までのCO<sub>2</sub>漏出は起きないという結果が得られた。そこで、極端に危険側の漏出として、CO<sub>2</sub>圧入期間中に貯留層から海底面付近まで達する断層（断層全体が1Darcyという最大の浸透率）が新たに発生してCO<sub>2</sub>が漏出するシナリオ（シナリオ2ケース）と貯留量の1%が漏出開始直後の最大のフラックスで全て漏出するシナリオ（1%漏出ケース）を想定し、それぞれに円形漏出域として直径100m（100mケース）あるいは500m（500mケース）を設定し、CO<sub>2</sub>漏出シミュレーションを行った。シミュレーション期間中の24時間移動平均した $\Delta pCO_2$ の最大値（平均 $\Delta pCO_2$ 最大値）をみると、1%漏出-100mケースでは288.5~379.2 $\mu$ atmであったが、その他のケースでは200 $\mu$ atmを超えることはなかった。

一方、生物影響閾値に関しては、CO<sub>2</sub>分圧を指標として影響がみられたデータを取りまとめ、分類群ごとに整理した。その結果、最も影響閾値が低い値は、棘皮動物門ウニ綱に含まれるバフンウニとナガウニ、および軟体動物門腹足綱に含まれるマガキガイで得られた200 $\mu$ atm（ $\Delta pCO_2$ ）であった。そこで、生物影響を評価するにあたり、この値を生物影響閾値とした。

これらを総合的にみると、極端に危険側の漏出を想定しても、海水中では生物影響閾値をわずかに超える値が見られる程度であり、その範囲は漏出域の極近傍に限られていることが示されたとと言える。したがって、万が一の漏出が起こった場合でも、生物影響は極めて軽微であると評価することができる。

## 6. その他当該特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関して参考となる事項

CO<sub>2</sub> 海底下地層貯留の安全性検証のために、英国自然環境調査局（Natural Environment Research Council; NERC）が出資する QICS プロジェクト（Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage）が 2012 年に実施された<sup>[1]</sup>。このプロジェクトは世界初の実海域での海底下二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）漏出実験であり、世界的な注目が集まっている。実験には英国の研究機関とともに、日本の研究機関が参加した。

実験はスコットランド西海岸の Ardmucknish 湾で実施された。陸地から岩盤を通過して未固結堆積物まで、すなわち湾の沖合 350m、海底下 12m まで達する水平坑井が掘削された。CO<sub>2</sub> ガスを 37 日間このパイプに注入し、最終的に合計 4.2 トンのガスが堆積物中に放出され、CO<sub>2</sub> 気泡の海底面からの漏出が観察された。この CO<sub>2</sub> ガス放出前、放出中および放出後に、広範な地球物理学的、生物地球化学的、生物学的調査が行われた。その結果、CO<sub>2</sub> 漏出による海底および海水中の物理、化学的变化は、様々なモニタリング機器によって観測することが可能であることが示された。また、底生性の生物について、CO<sub>2</sub> 漏出による影響は漏出点の極近傍でわずかに認められる程度であり、漏出が止まると影響から短期間で回復することが示された。

これらの実験結果については、Nature climate change 誌に総説論文<sup>[2]</sup>が掲載されるとともに、International Journal of Greenhouse Gas Control 誌に特集号<sup>[3]</sup>として 21 編の詳細な論文が掲載されている。

---

<sup>[1]</sup> 『QICS - Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage』（英国地質調査所ウェブサイト：<https://www.bgs.ac.uk/qics/1>, 2016/02/01 アクセス）

<sup>[2]</sup> Blackford, J., Stahl, H., Bull, J.M., Bergès, B.J.P., Cevatoglu, M., Lichtschlag, A., Connelly, D., James, R.H., Kita, J., Long, D., Naylor, M., Shitashima, K., Smith, D., Taylor, P., Wright, I., Akhurst, M., Chen, B., Gernon, T.M., Hauton, C., Hayashi, M., Kaieda, H., Leighton, T.G., Sato, T., Sayer, M.D.J., Suzumura, M., Tait, K., Vardy, M.E., White, P.R., Widdicombe, S., 2014. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage. Nature Climate Change, 4, 1011-1016.

<sup>[3]</sup> Blackford, J., Stahl, H., Kita, J., Sato, T. (eds.), 2015. Special Issue: CCS and the Marine Environment. International Journal of Greenhouse Gas Control, 38, 1-229.