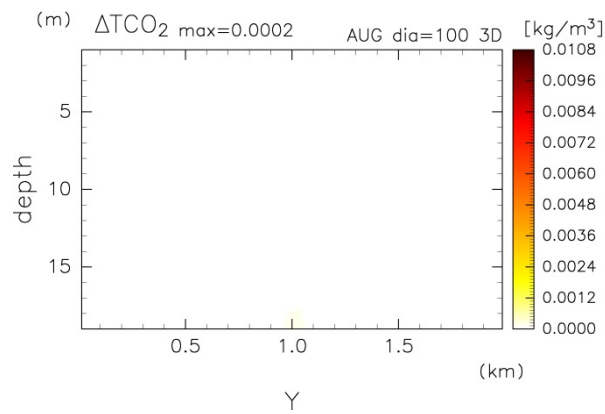
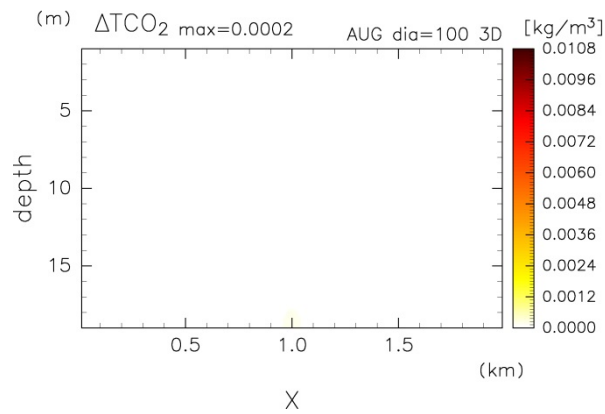
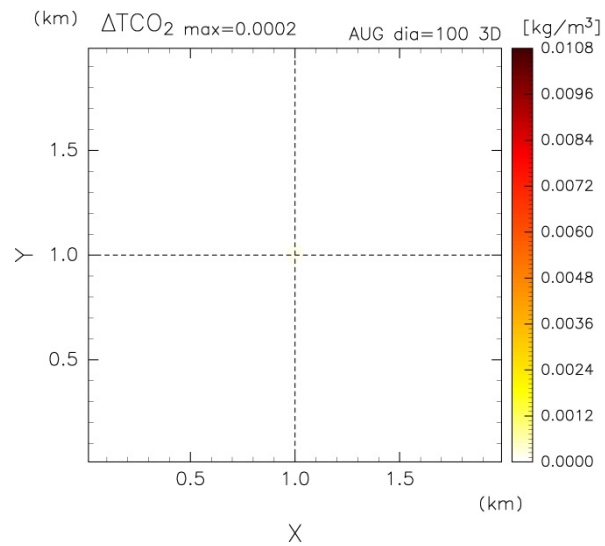
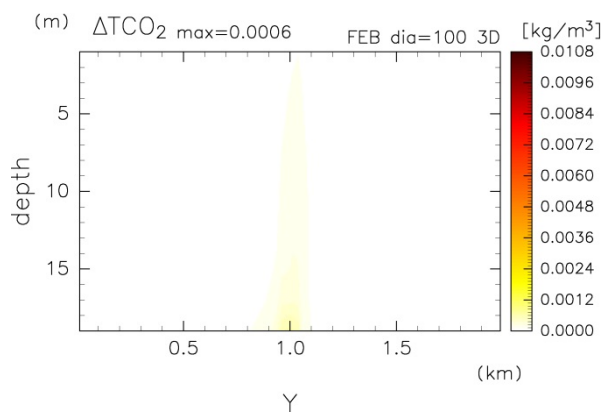
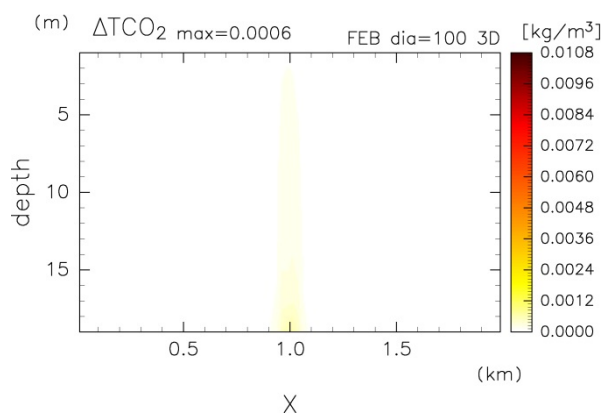
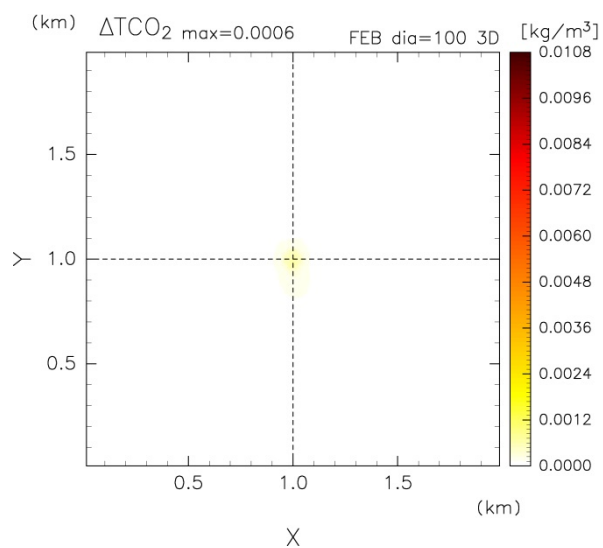




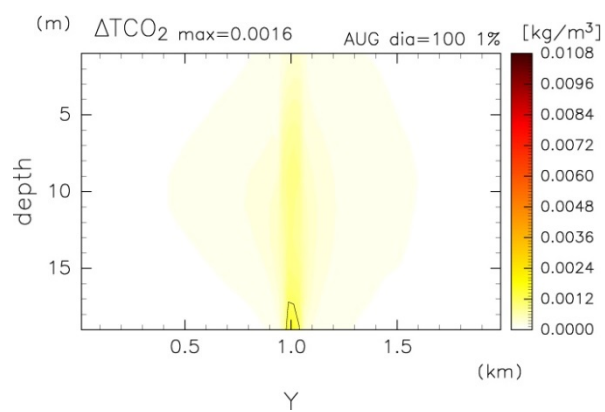
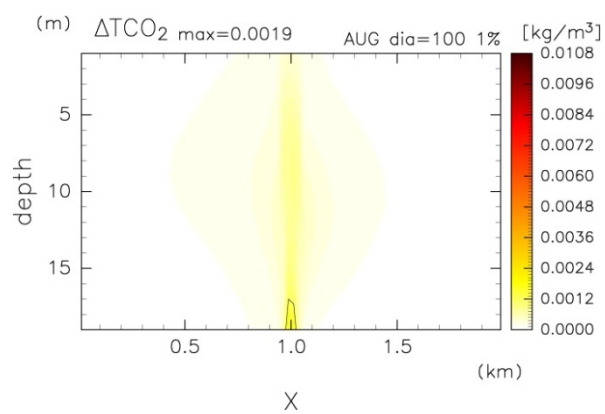
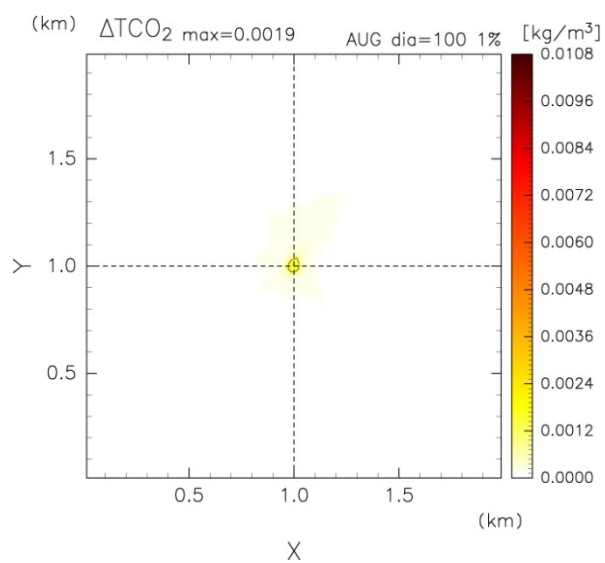
注：上から順に最下層の水平面（xy 平面）と y, x の中央での鉛直断面（xz 断面, yz 断面）。
シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

第 4.3-2 図 CO_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



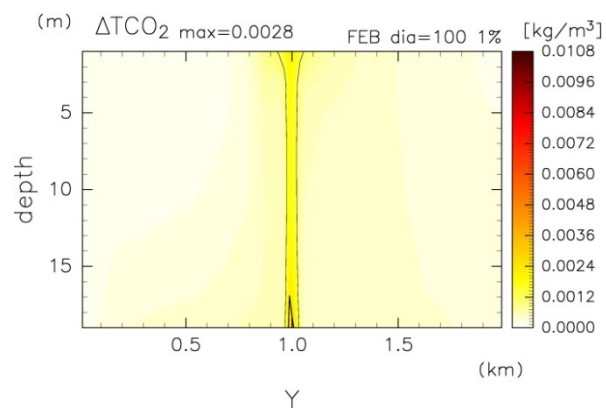
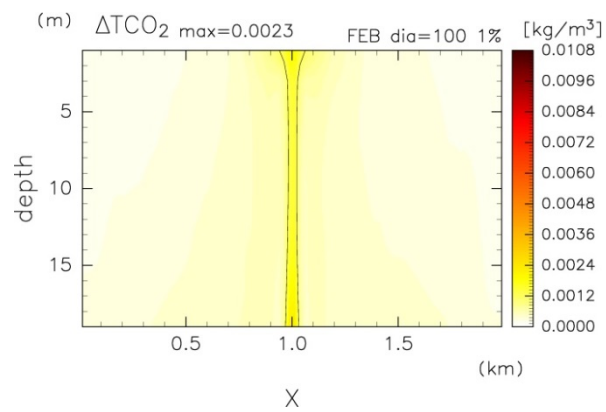
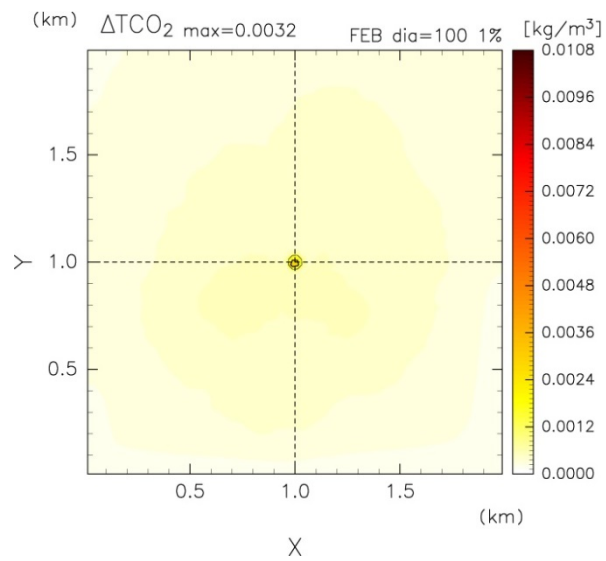
注：第 4. 3-2 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

第 4. 3-3 図 CO_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



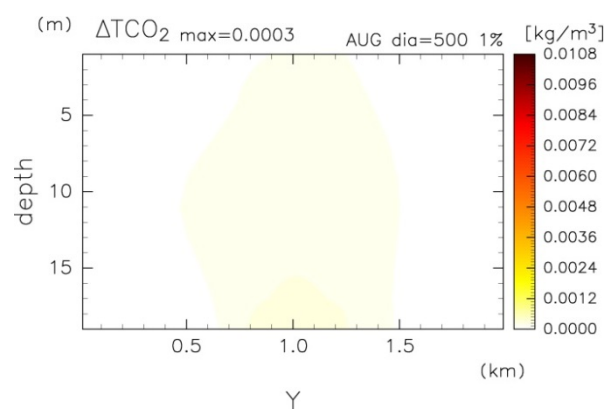
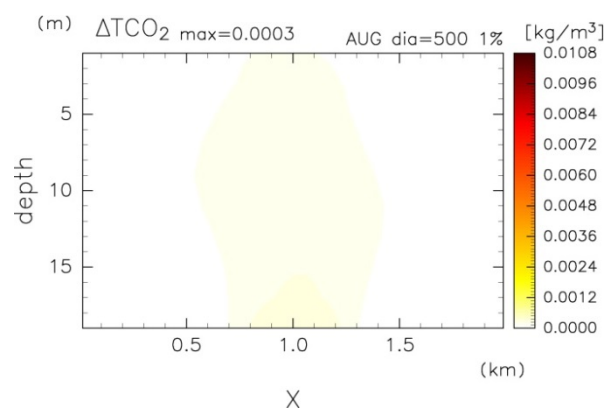
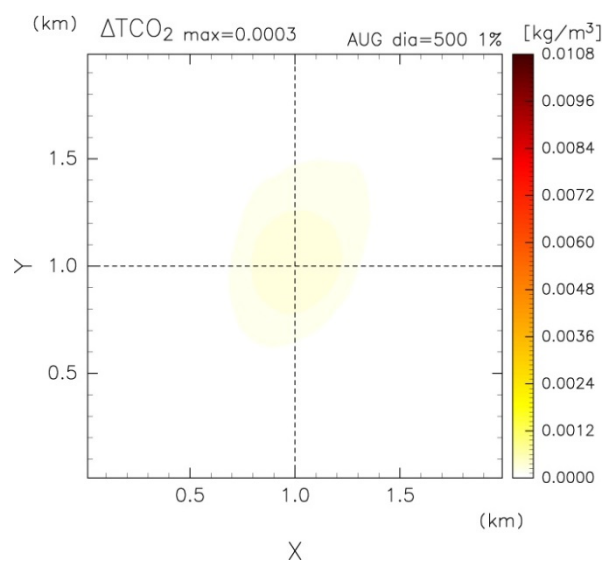
注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出－100m ケース，夏季条件。

第 4.3-4 図 CO_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



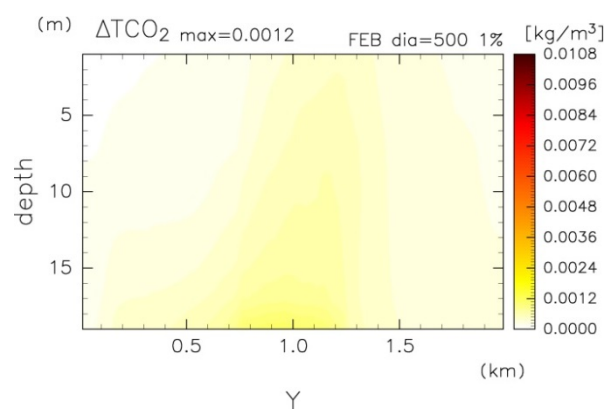
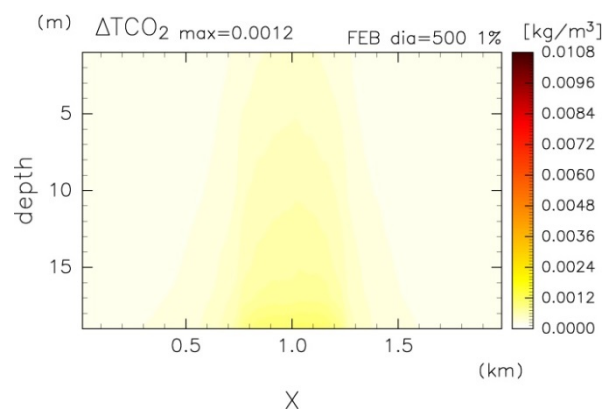
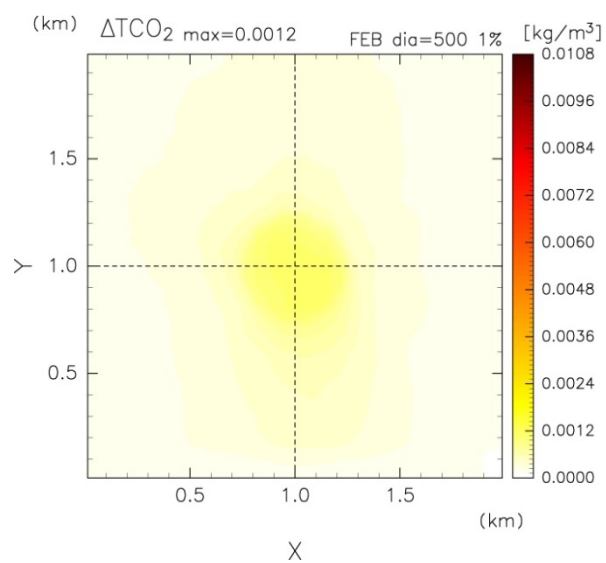
注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

第 4.3-5 図 CO_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_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 CO_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_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_2 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO_2 濃度の
3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) 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 CO₂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 CO₂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 CO₂分圧 (pCO₂) を採用し、安全側で影響を評価することとした。

CO₂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 CO₂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^[1]を参照して構築した。

生物に対する CO₂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 CO₂分圧を指標とし、実験対照区からの CO₂分圧の増加分 (ΔpCO_2) として取りまとめた。なお、対照区の CO₂分圧は、大部分の実験において 380~400 μ 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 CO₂分圧であるおよそ 280 μ atm が採用されている。ここでは現在の状況において CO₂が漏出した場合を想定するので、現在の CO₂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 CO₂分圧を対照区とした実験結果は対象外とした。

CO₂分圧の上昇により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 (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 μ 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 μ atm、幼体では 38,000~84,000 μ 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 μ atm、サンゴ類では 310~1,700 μ atm、ウニでは 200~79,000 μ atm、二枚貝では 300~1,300 μ atm、巻貝では 200~2,400 μ atm が得られており、石灰質殻を持つ生物は相対的に CO₂の濃度上昇に弱いことがわかる。

^[1] 『海水中の CO₂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, 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 μ 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、CO₂分圧の増加量 ($\Delta p\text{CO}_2$) として 200 μ atm を生物影響閾値として採用した。

第 4. 4-1 表 CO₂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		ー	ー	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	620*	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	910-140,000	
				成体	620**-59,000	
Arthropoda (節足動物門)	Maxillopoda(顎脚綱)	ミジンコ類、フジツボ類		幼生	4,900	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	580*-53,000	
Bryozoa (外肛動物門)	Gymnolaemata(裸喉綱)	コケムシ	○	ー	1,000	
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	50,000-120,000	*トウゴロウイワシ:8日間曝露で生残率減少
				胚	13,000	
				稚仔魚	240*	
					24,000-100,000	
				幼魚／若魚	30,000-59,000	
				成体	30,000-50,000	
	Elasmobranchii(板鰓綱)	軟骨魚類(サメ、エイ等)		成魚	68,000	
Cnidaria (刺胞動物門)	Anthozoa(花虫綱)	イソギンチャク、サンゴ類	○	ー	310*-1700	*8週間飼育で白化増加
	Scyphozoa(鉢虫綱)	クラゲ類		幼生	ー	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	ー	実験で影響みとめられず(～400)
				成体	ー	実験で影響みとめられず(～2,800)
	Echinoidea(ウニ綱)	ウニ類	○	幼生	900-79,000	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	200	
	Ophiuroidea(クモヒトデ綱)	クモヒトデ類	○	幼生	300	

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） CO₂分圧上昇による生物影響のまとめ 一分類群別の生物種の影響閾値－

門	綱	代表的な生物	石灰質殻の有無	生活史段階	影響閾値 ($\Delta p\text{CO}_2$ μatm)	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) CO₂漏出シミュレーションによる pCO₂の増分 (ΔpCO₂)

① ΔpCO₂

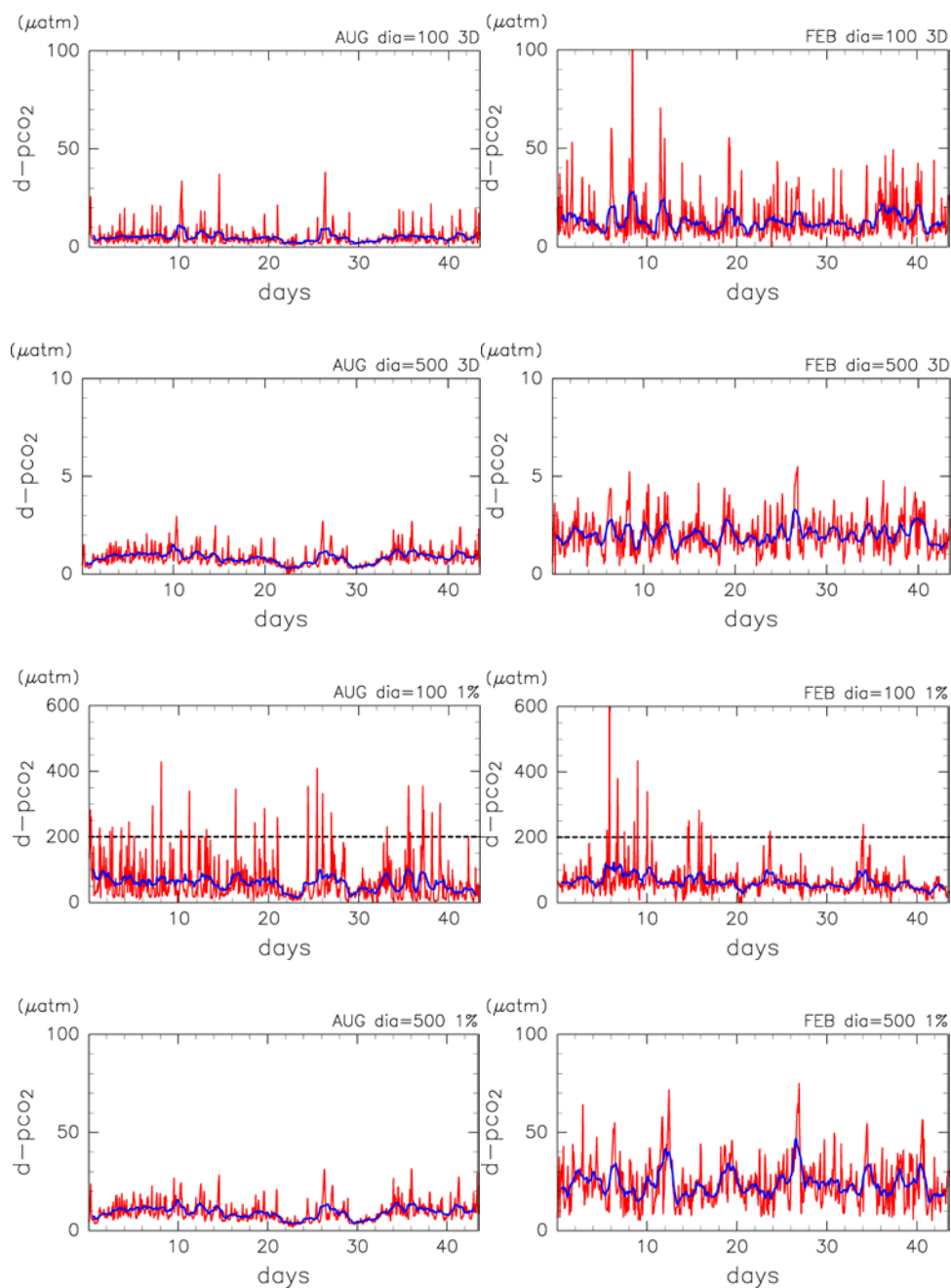
pCO₂は、海水中の二酸化炭素分圧である。4.4節のとおり、漏出 CO₂の海洋生物への影響の有無は、CO₂漏出による pCO₂の増分、すなわち ΔpCO₂で見積もられる。ΔpCO₂が 200μatm 以上になると影響を受ける生物種が存在する。そこで、ΔpCO₂=200μatm を漏出 CO₂が海洋生物に与える 1つの目安と考えた。ここでは ΔpCO₂を、漏出ありのシミュレーションの pCO₂と漏出なしのシミュレーションの pCO₂の差と定義する。

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 ΔpCO₂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 ΔpCO₂=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、ΔpCO₂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 pCO₂の増加は非常に小さい。

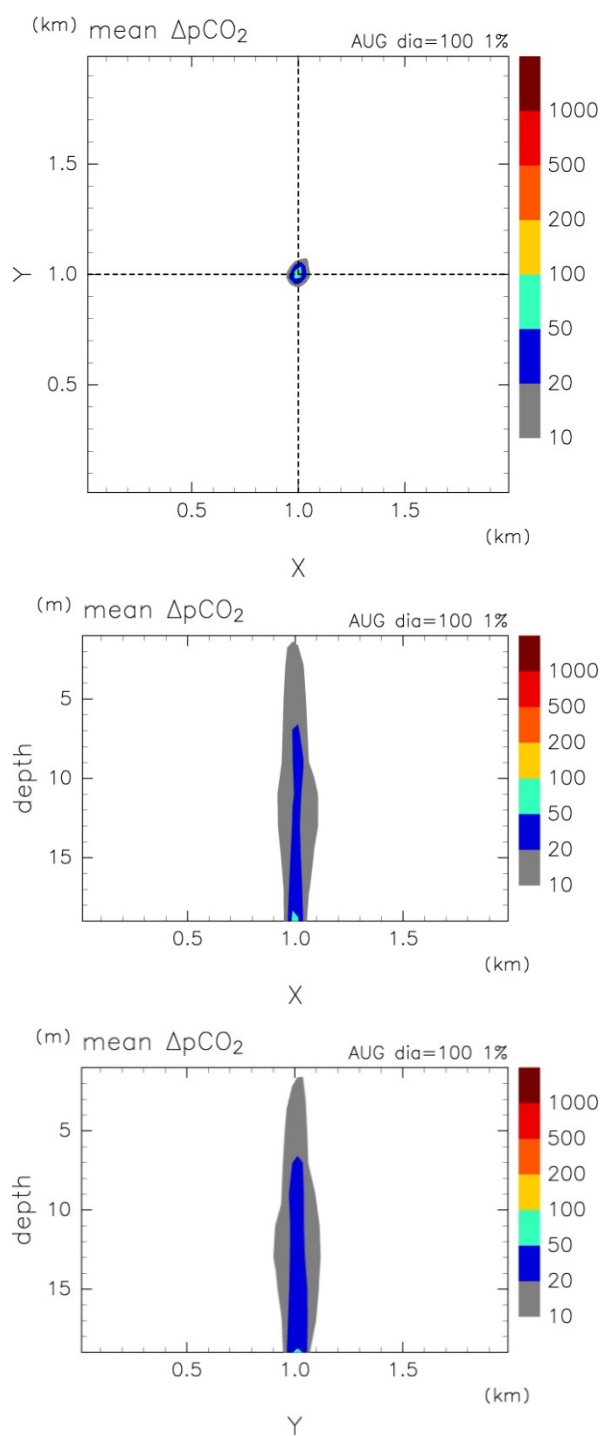
今回グラフとして示したこの時系列のセルは、漏出域が 500m の場合、周囲 8 セル全てが漏出域のセルで囲まれており、非漏出域のセルまで十分離れている。それに対し漏出域が 100m のケースは漏出セル数が 12 個しかないので、この時系列グラフに用いたセルの周囲 8 セルの 1つは非漏出域のセルになってしまう（第 4.2-6 図）。1%漏出-100m ケースにおいて単位面積当たりの漏出量があまり高い値にならないことや、1%漏出-500m ケースほど夏季と冬季の違いがはっきりしないのは、周囲の非漏出域から CO₂濃度の低い水が混ざり込みやすいことが影響していると考えられる。

第 4.4-2 図～第 4.4-4 図は、3 週間平均した ΔpCO₂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。



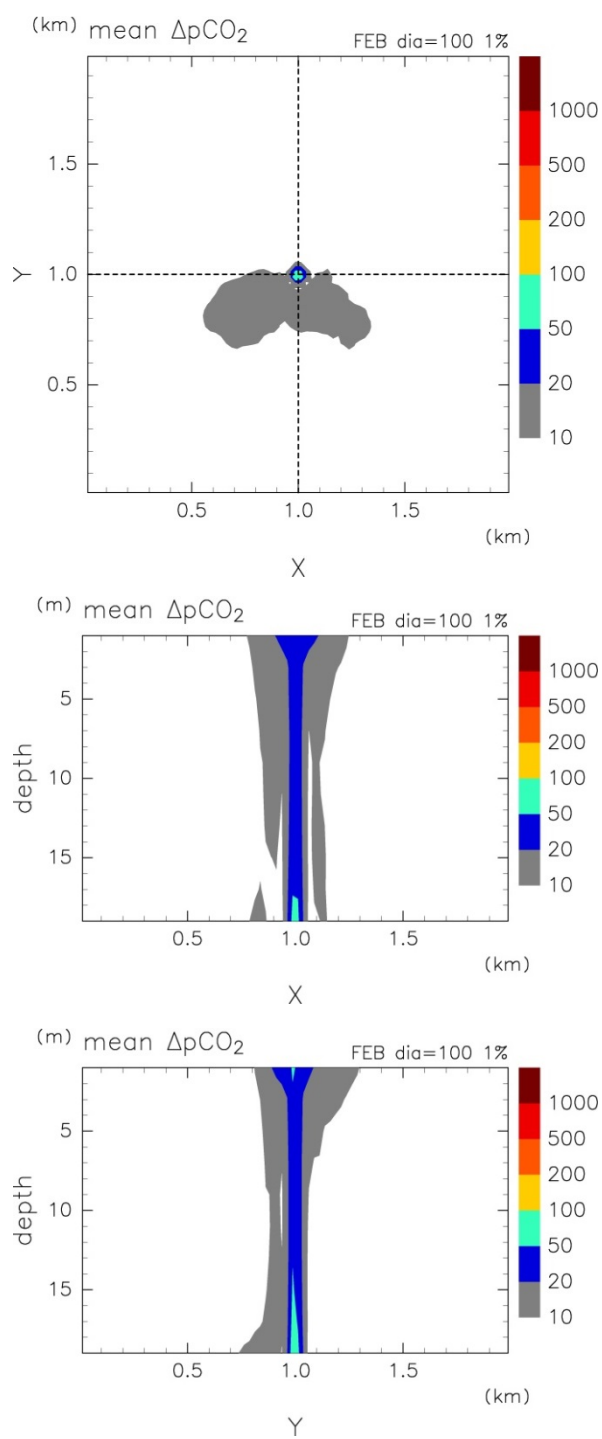
注：上から順にシナリオ 2-100m ケース，シナリオ 2-500m ケース，1%漏出-100m ケース，1%漏出-500m ケース。左が夏季条件，右が冬季条件。赤は生データ，青は 24 時間移動平均したもの。点線は生物影響の目安である $\Delta pCO_2 = 200 \mu atm$ 。

第 4. 4-1 図 漏出域中心の最下層セル（海底直上）の ΔpCO_2 の時系列



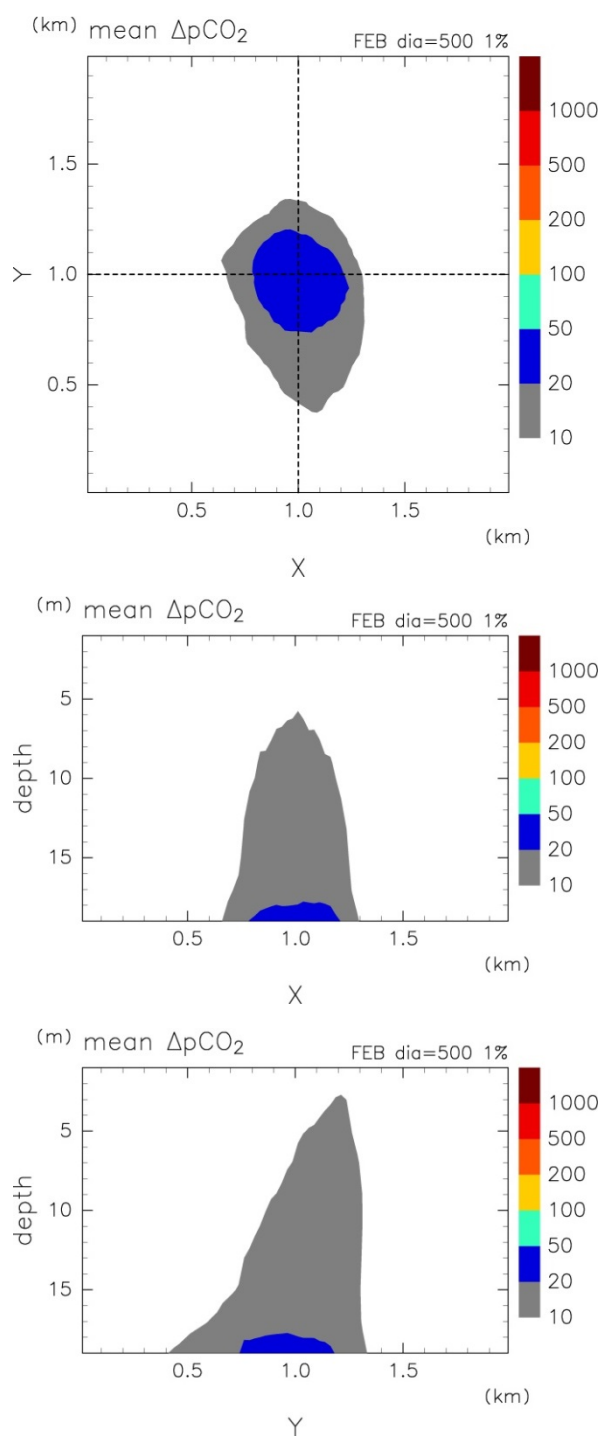
注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。1%漏出-100m ケース, 夏季条件。

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。

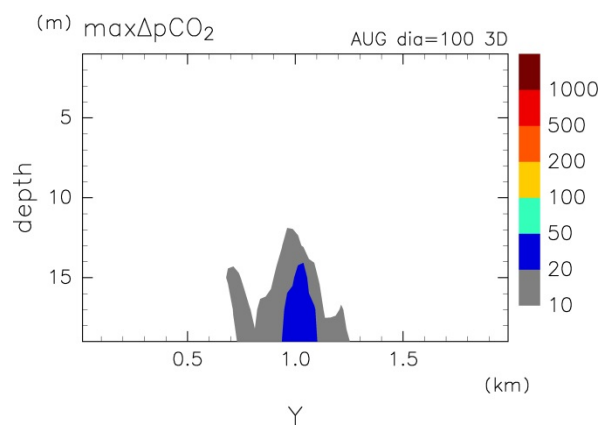
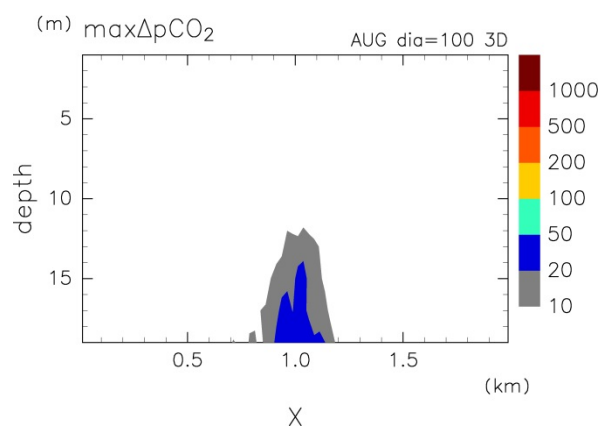
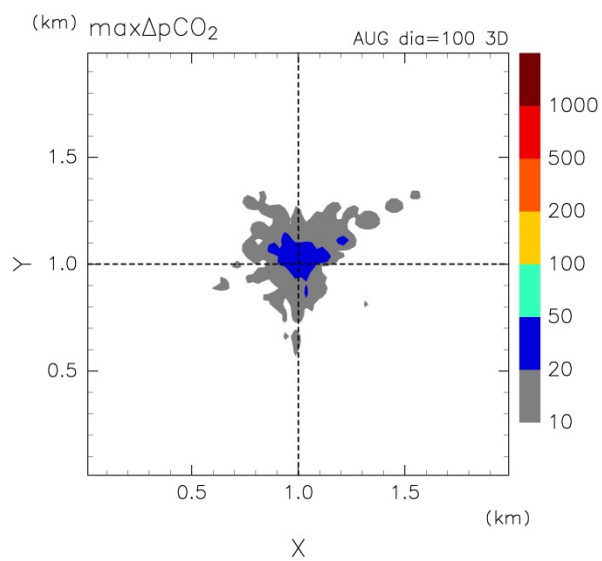
第 4. 4-4 図 $\Delta p\text{CO}_2$ の分布図

② ΔpCO_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 ΔpCO_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ースケールで示されていることに注意が必要である。

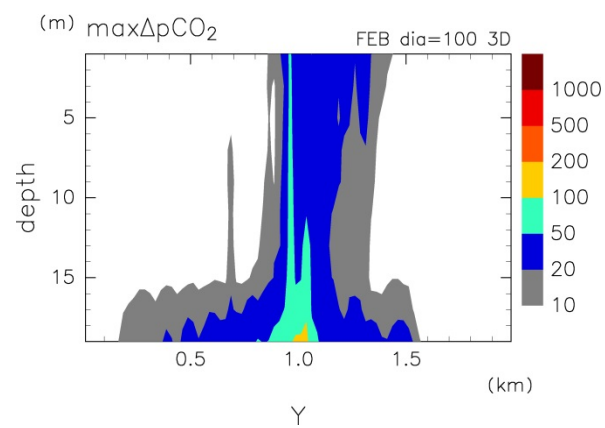
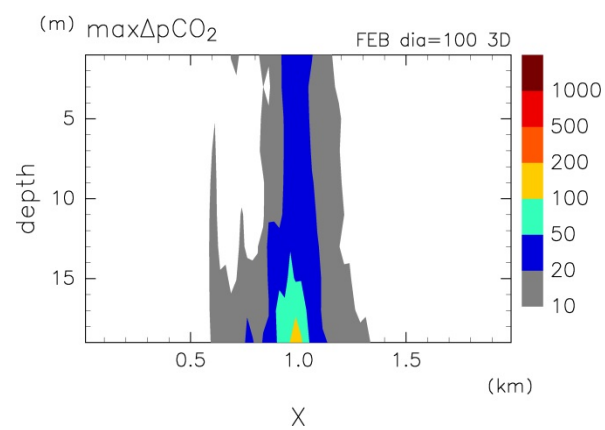
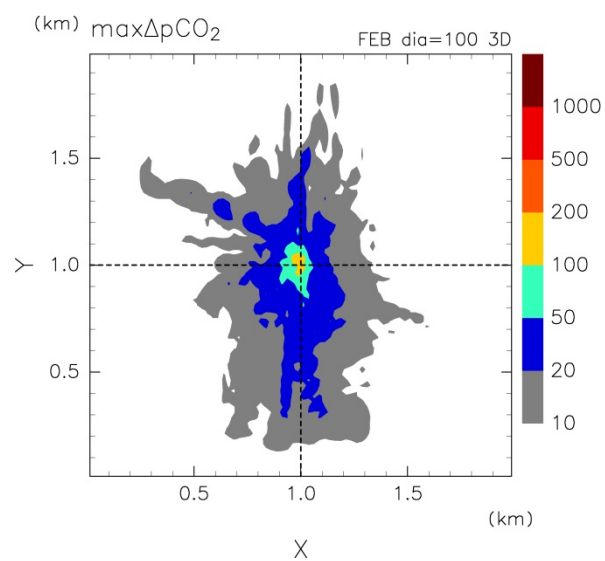
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4.4-6 図）は、漏出域直上で $100\mu atm$ を超えるところが見られるがごく狭い範囲である。夏季（第 4.4-5 図）は $50\mu atm$ を超えるところもなく、図で色がついている $10\mu atm$ を超える範囲も狭い範囲となっている。第 4.4-7 図はカラースケールを他の図の 1/10 にしている。漏出域から離れるほど小さな値になるという分布が示されてはいるが、漏出域直上ですら極めて小さい値であることに注意が必要である。

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 ΔpCO_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 ΔpCO_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 ΔpCO_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 ΔpCO_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。



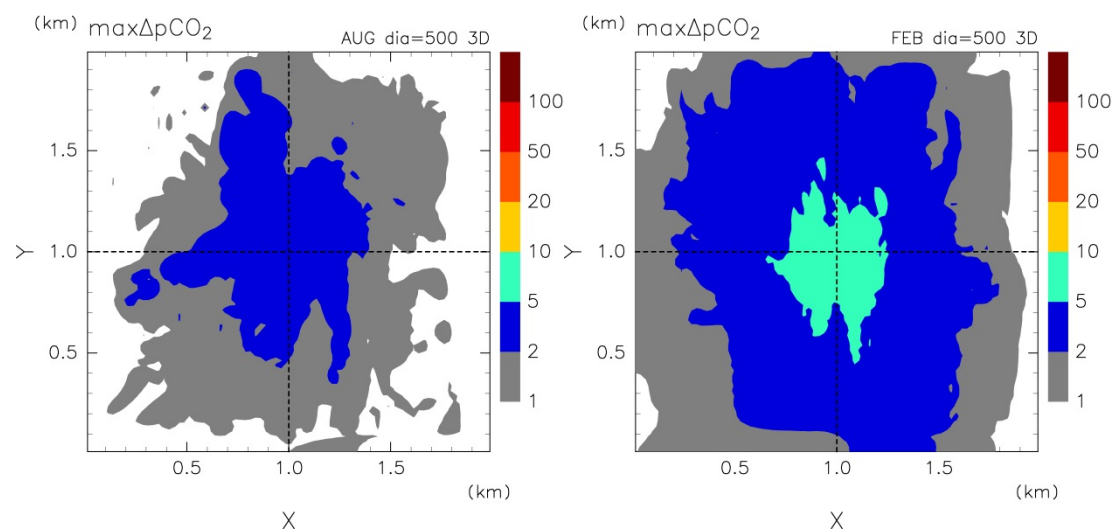
注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

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



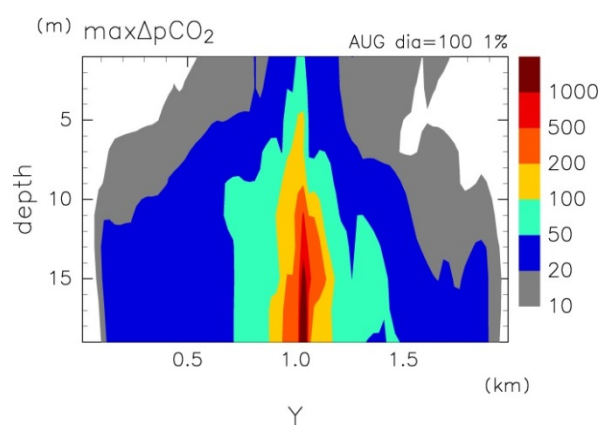
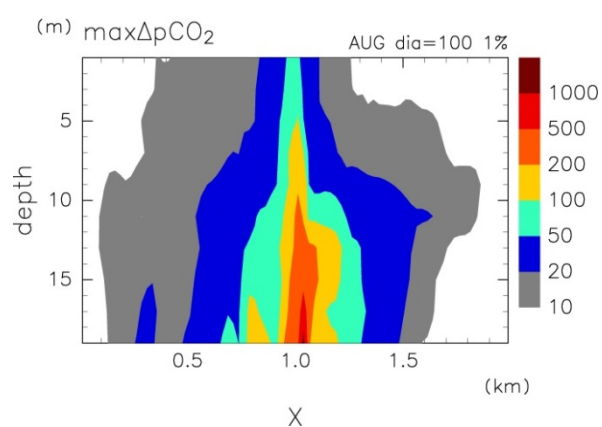
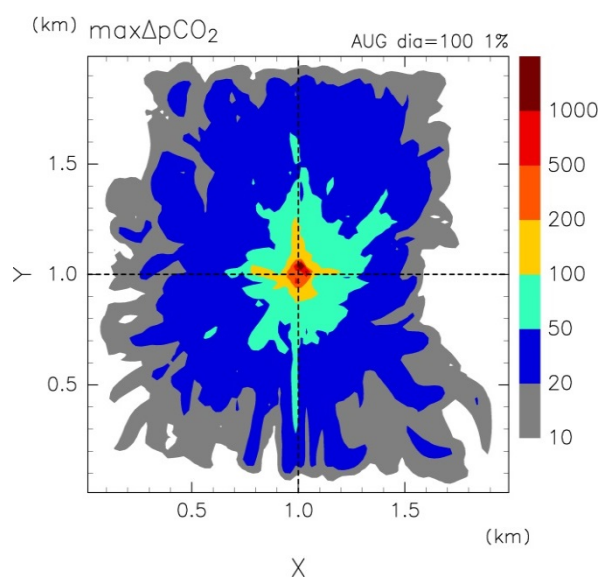
注：第 4.4-5 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

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



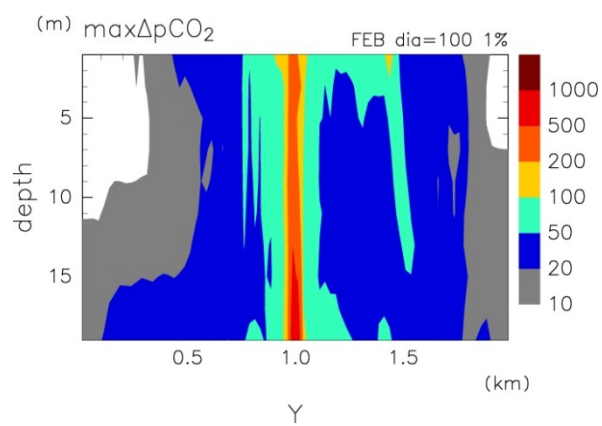
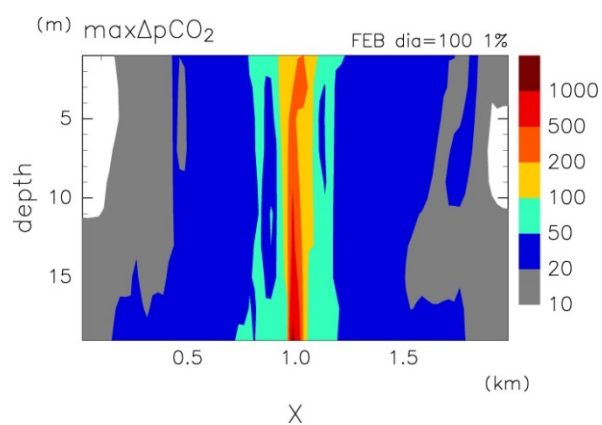
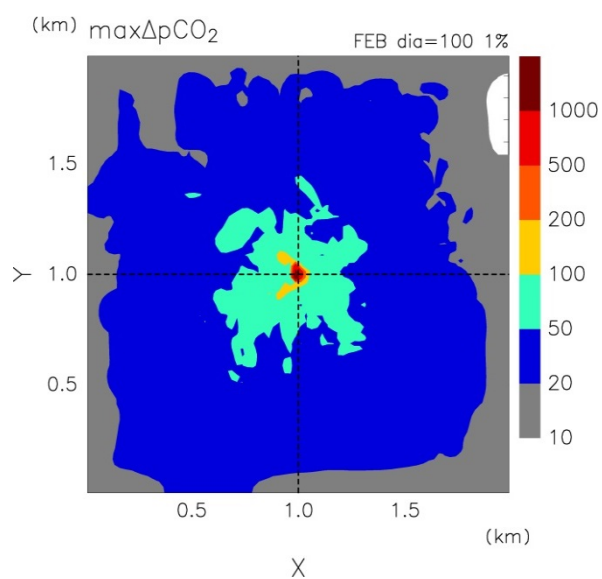
注：最下層の水平面（xy 平面）図。シナリオ 2-500m ケース。左が夏季条件，
右が冬季条件。ただしカラースケールが異なっている。

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



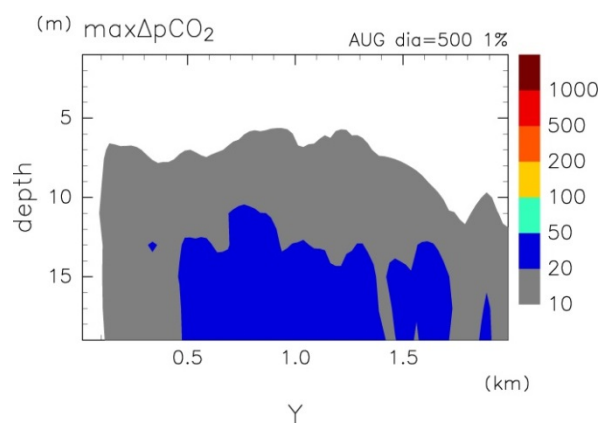
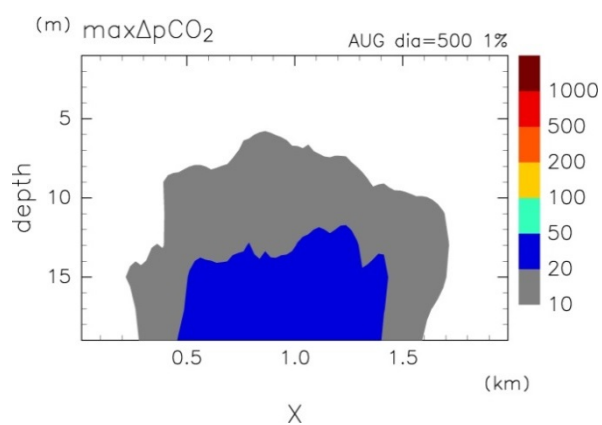
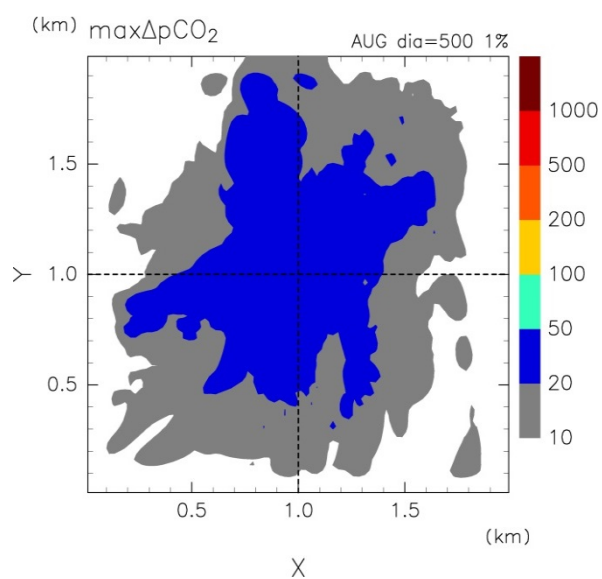
注：第 4.4-5 図と同じ。1%漏出-100m ケース，夏季条件。

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



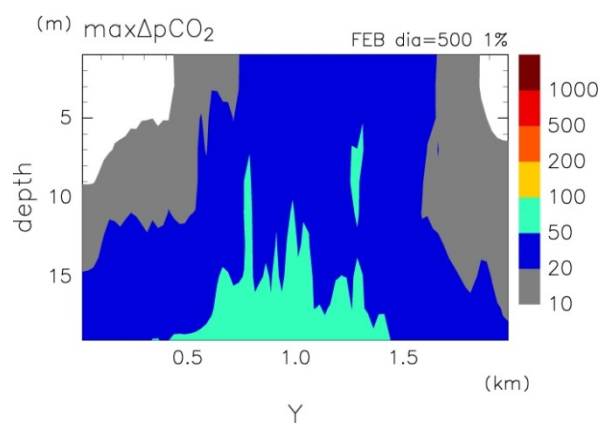
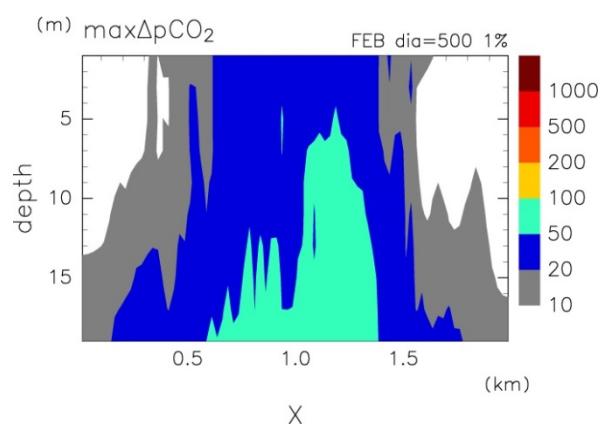
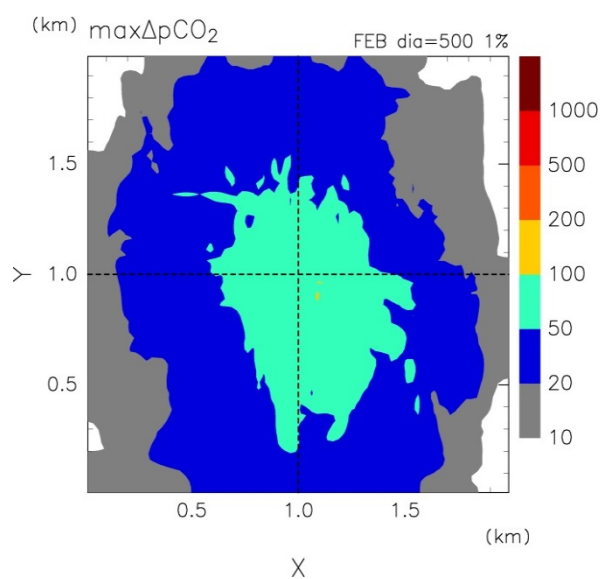
注：第 4. 4-5 図と同じ。1%漏出－100m ケース，冬季条件。

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。

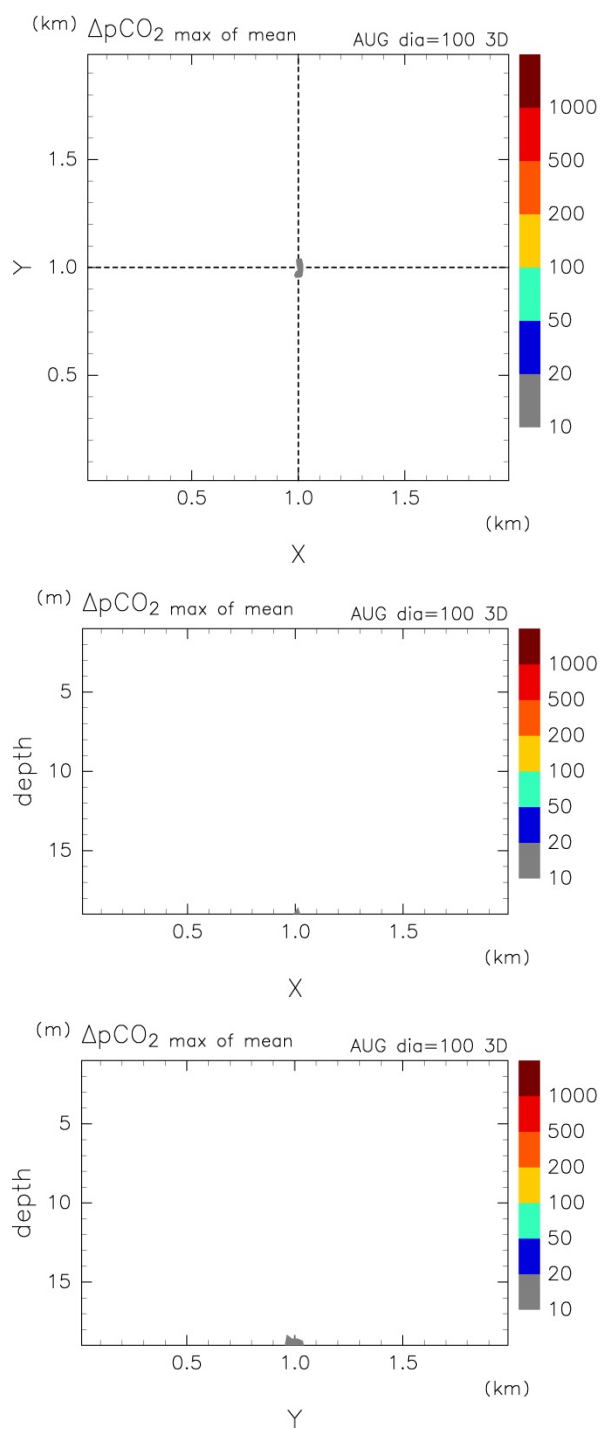
第 4. 4-11 図 シミュレーション期間中の $\Delta p\text{CO}_2$ の最大値の分布図

③ ΔpCO_2 の 24 時間移動平均値

生物への影響を考えた場合、 ΔpCO_2 の値が $200\mu atm$ というのが 1 つの目安ではあるが、一瞬でも $200\mu atm$ 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 ΔpCO_2 が $200\mu atm$ 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 ΔpCO_2 が $200\mu atm$ を超える範囲を示すために、セルごとに ΔpCO_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。

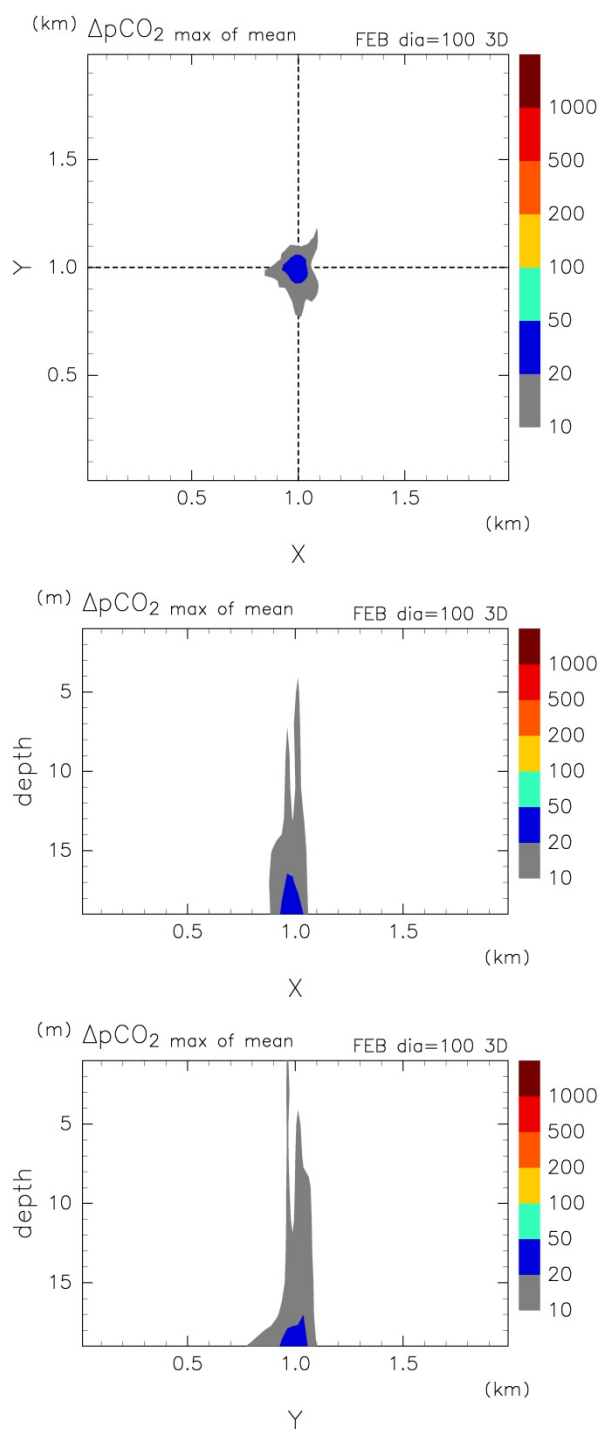
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4.4-13 図）は漏出域直上に $20\sim 50\mu atm$ を示す青色が見られ、その周囲のごく狭い範囲に $10\mu atm$ 以上のところがある。夏季（第 4.4-12 図）は漏出域直上で $10\mu atm$ を超えるところがあるだけである。シナリオ 2-500m ケースは夏季、冬季ともモデル領域内の最大値が $5\mu atm$ 未満のため図は省略した。

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 ΔpCO_2 が $200\mu atm$ 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 $200\mu atm$ 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 ΔpCO_2 はほぼ $50\mu atm$ 以下であり、夏季には $20\mu atm$ 以下と非常に小さい値になっている。



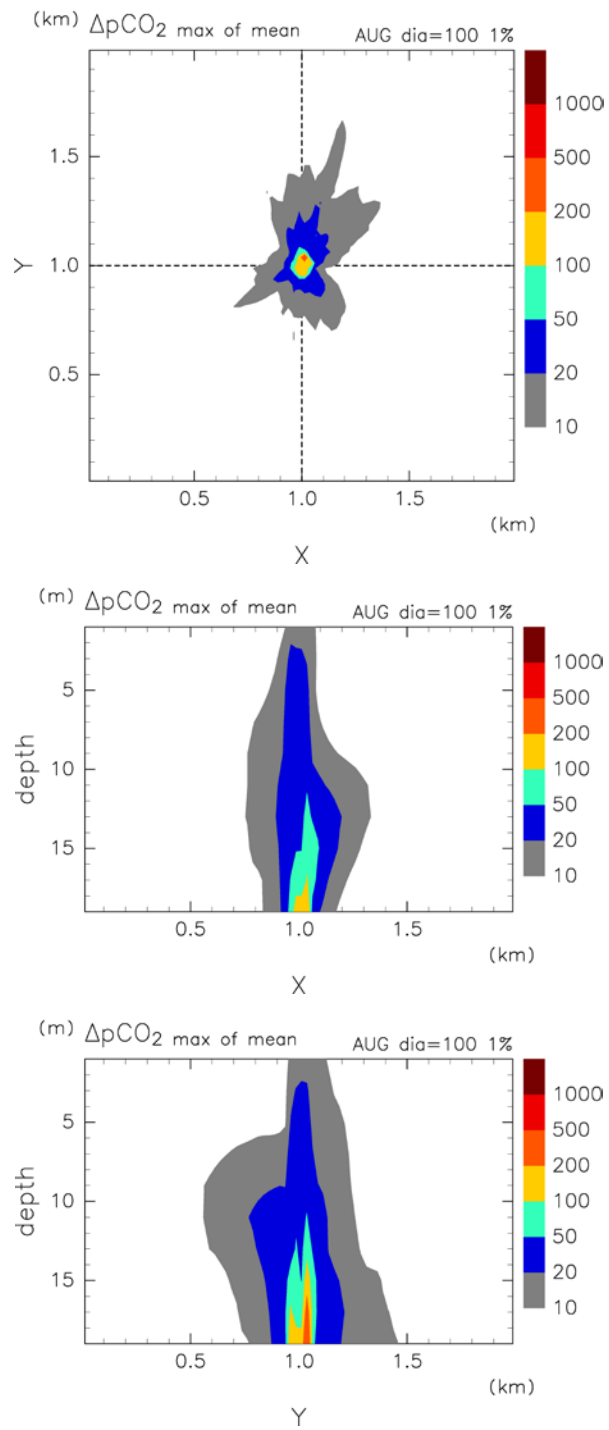
注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

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



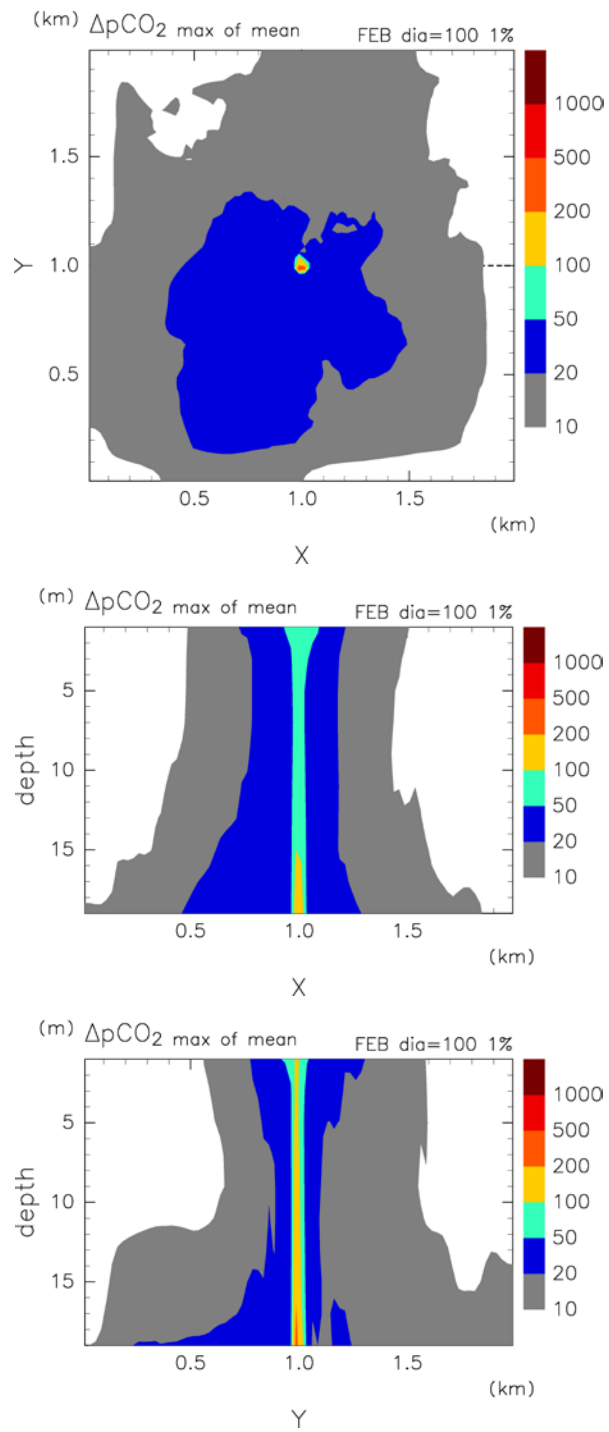
注：第 4.4-12 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

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



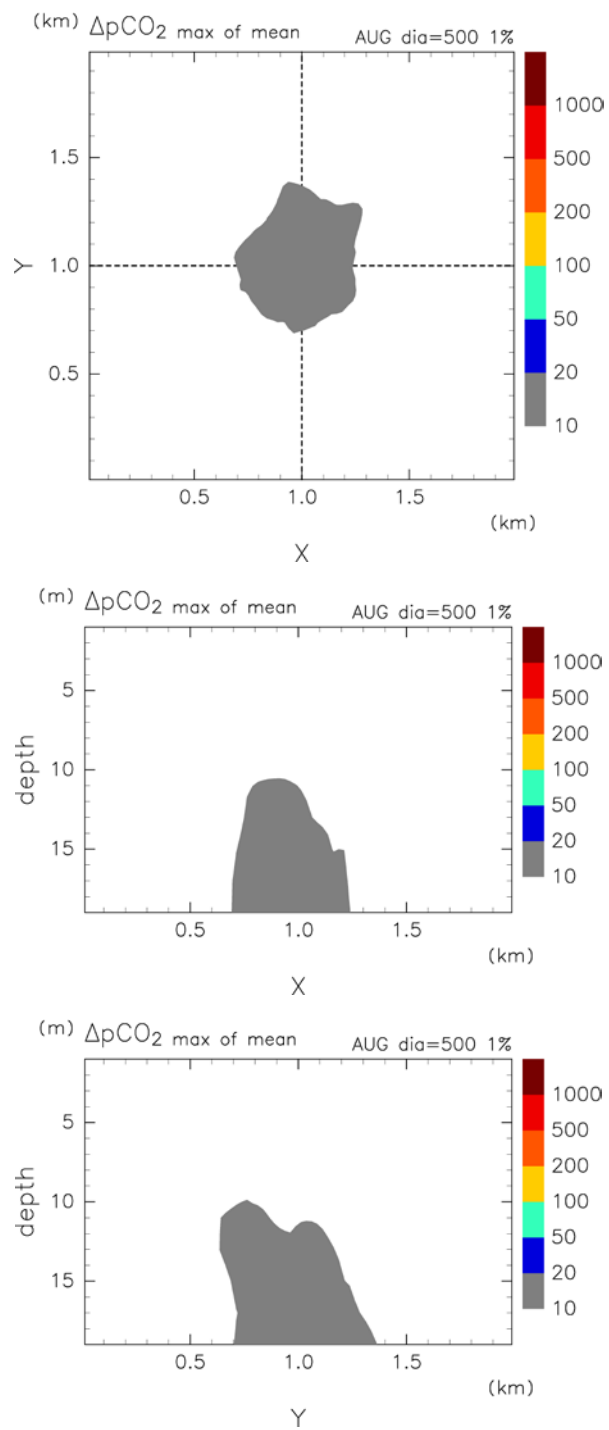
注：第 4.4-12 図と同じ。1%漏出－100m ケース，夏季条件。

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



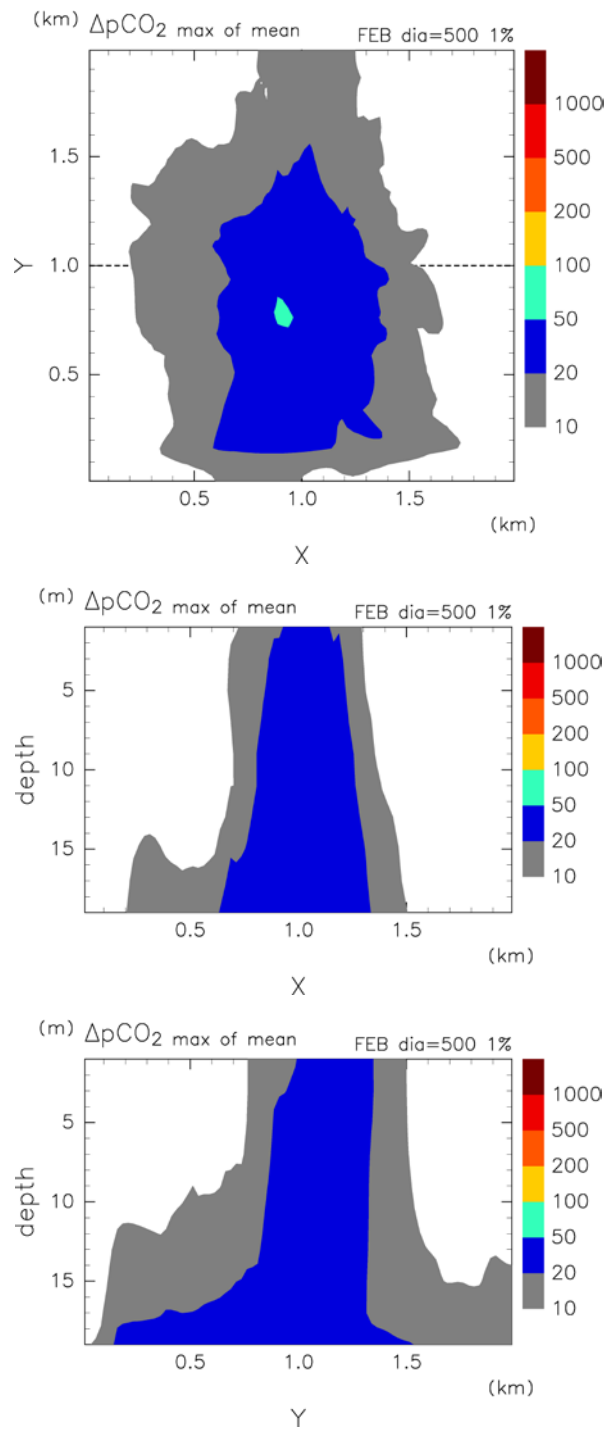
注：第 4.4-12 図と同じ。1%漏出－100m ケース，冬季条件。

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CO₂濃度の3週間平均値（3週間平均TCO₂），漏出による溶存CO₂濃度の増分の3週間平均値（3週間平均ΔTCO₂），3週間平均ΔpCO₂，ΔpCO₂の最大値，24時間移動平均したΔpCO₂の最大値（平均ΔpCO₂最大値）についてFull-3Dモデル領域内の最大値，最小値を第4.4-1表にまとめた。

第4.4-1表 Full-3Dモデル領域内の3週間平均TCO₂，3週間平均ΔTCO₂，3週間平均ΔpCO₂，ΔpCO₂最大値および24時間移動平均ΔpCO₂最大値の最小値と最大値

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

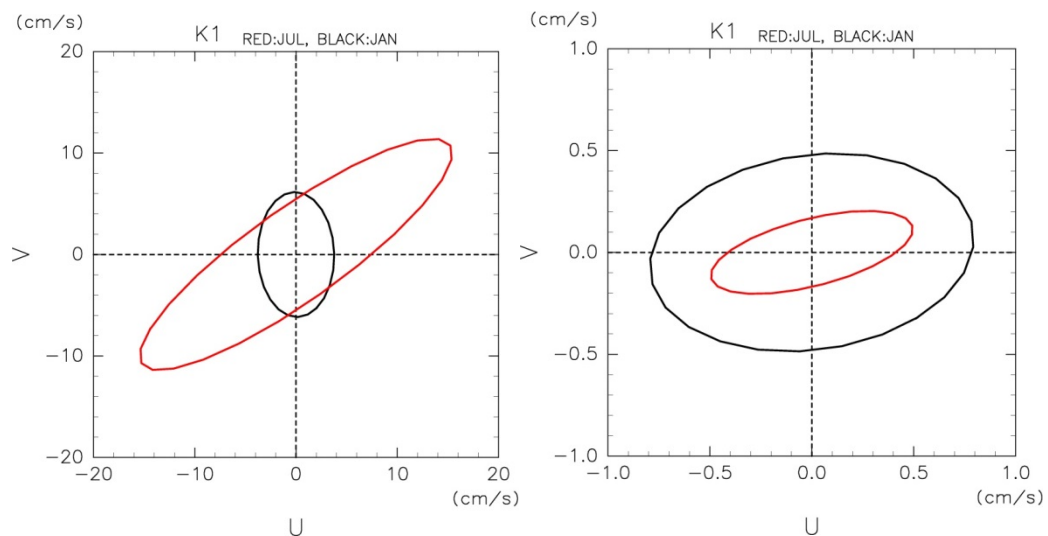
注：単位はTCO₂とΔTCO₂がkg/m³，ΔpCO₂はμatm。

シミュレーション期間中のΔpCO₂の最大値については，1%漏出ー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ΔpCO₂の最大値（平均ΔpCO₂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ー100m ケースについては，最も漏出の影響が大きい冬季でもΔpCO₂の最大値が151.02で，24時間移動平均したΔpCO₂の最大値は40.88と小さな値になっている。シナリオ2ー500m ケースは，ΔpCO₂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%漏出ー500m ケースはΔpCO₂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。

CO₂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CO₂濃度が高い。1%漏出ー100m ケースについては，ΔpCO₂の最大値や24時間移動平均したΔpCO₂の最大値は夏季の方が高いが，3週間平均したΔpCO₂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_2 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_2 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_2 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_2 が移行するシナリオでは、海底面までの CO_2 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_2 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_2 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_2 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 $\Delta p\text{CO}_2$ の最大値（平均 $\Delta p\text{CO}_2$ 最大値）をみると、1% 漏出-100m ケースでは 288.5~379.2 μatm であったが、その他のケースでは 200 μatm 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_2 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 μatm （ $\Delta p\text{CO}_2$ ）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

CO₂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^[1]。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（CO₂）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。CO₂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、CO₂気泡の海底面からの漏出が観察された。このCO₂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、CO₂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、CO₂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^[2]が掲載されるとともに、International Journal of Greenhouse Gas Control 誌に特集号^[3]として21編の詳細な論文が掲載されている。

^[1] 『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）

^[2] 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.

^[3] 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.