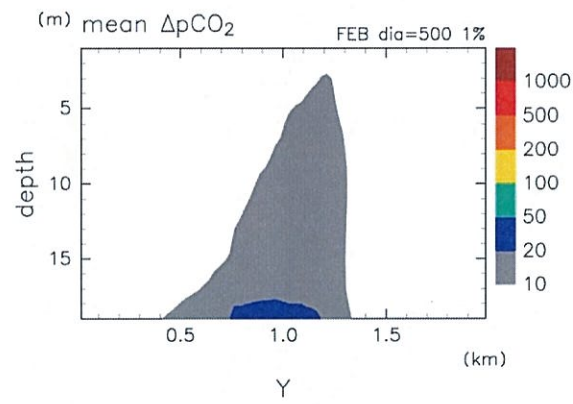
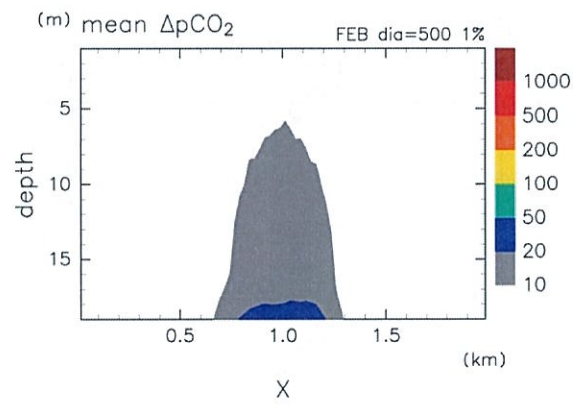
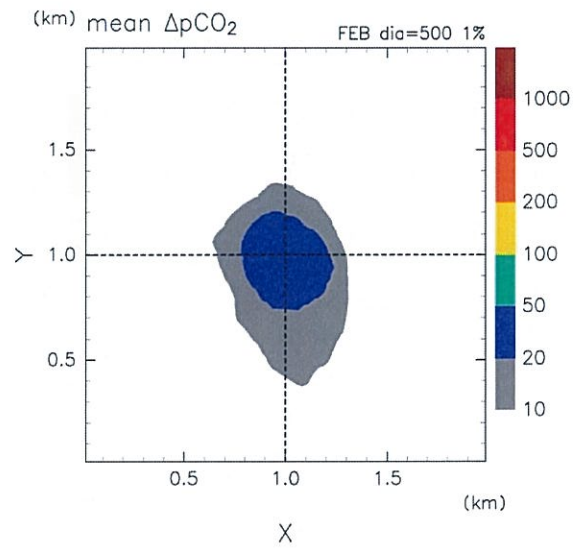


注：第 4. 4-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

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。

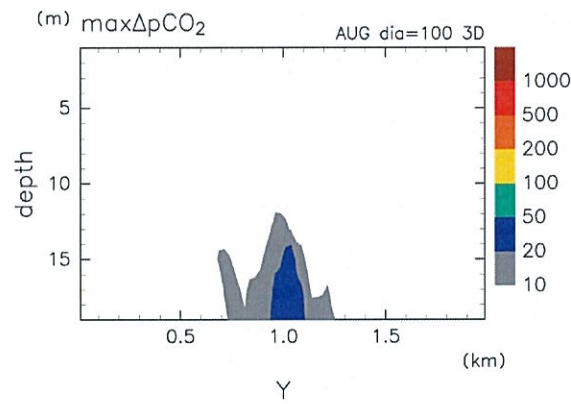
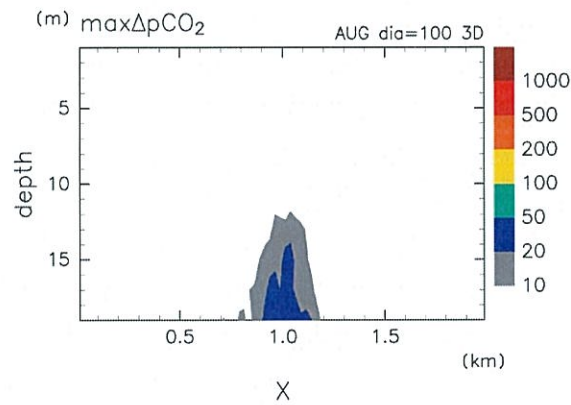
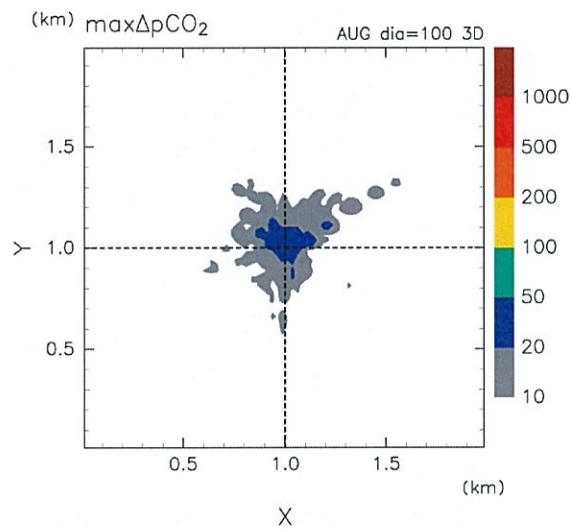
第 4.4-4 図  $\Delta p\text{CO}_2$  の分布図

## ② $\Delta p\text{CO}_2$ 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  $\Delta p\text{CO}_2$  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。

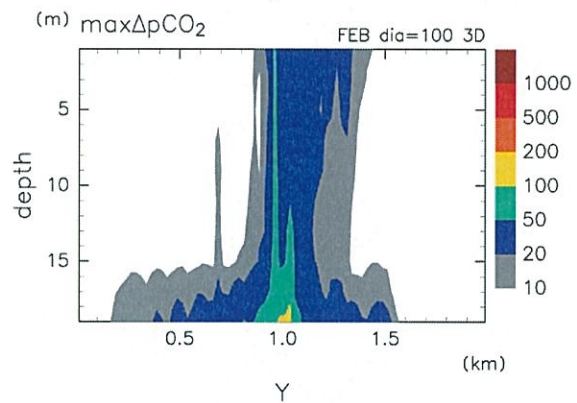
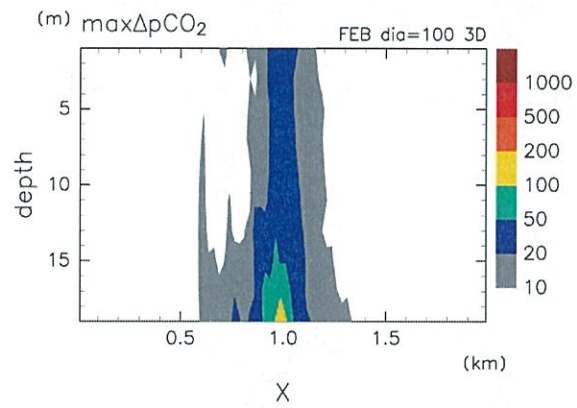
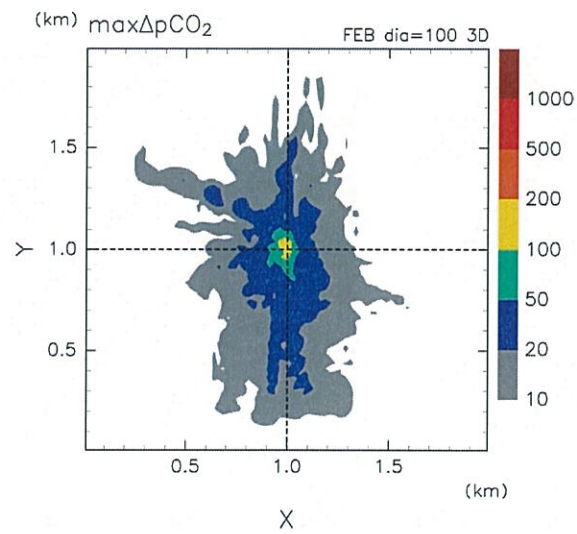
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4.4-6 図）は、漏出域直上で  $100\mu\text{atm}$  を超えるところが見られるがごく狭い範囲である。夏季（第 4.4-5 図）は  $50\mu\text{atm}$  を超えるところもなく、図で色がついている  $10\mu\text{atm}$  を超える範囲も狭い範囲となっている。第 4.4-7 図はカラースケールを他の図の  $1/10$  にしている。漏出域から離れるほど小さな値になるという分布が示されてはいるが、漏出域直上ですら極めて小さい値であることに注意が必要である。

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  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値が  $200\mu\text{atm}$  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  $\Delta p\text{CO}_2$  が  $200\mu\text{atm}$  を超えることはない。夏季（第 4.4-8 図）も漏出域付近で  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値は高い。しかし、冬季とは違い、最大値が  $200\mu\text{atm}$  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  $\Delta p\text{CO}_2$  が  $100\mu\text{atm}$  を超えるところが見られるが、それ以外は冬季では  $100\mu\text{atm}$  以下、夏季では  $50\mu\text{atm}$  以下である。



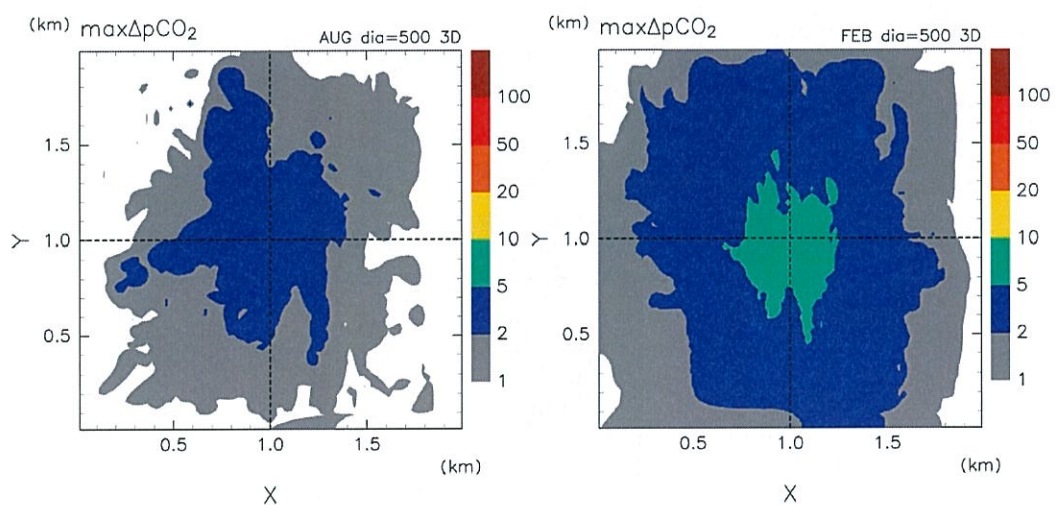
注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

第 4.4-5 図 シミュレーション期間中の  $\Delta pCO_2$  の最大値の分布図



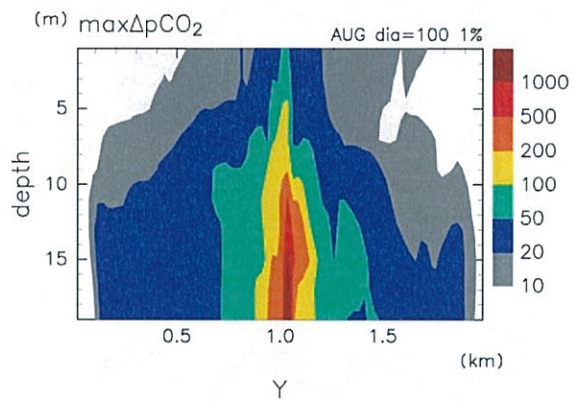
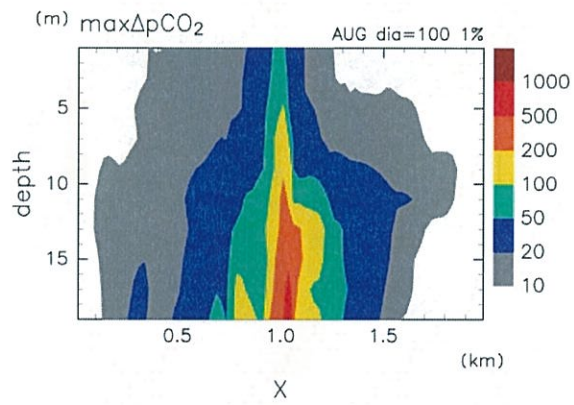
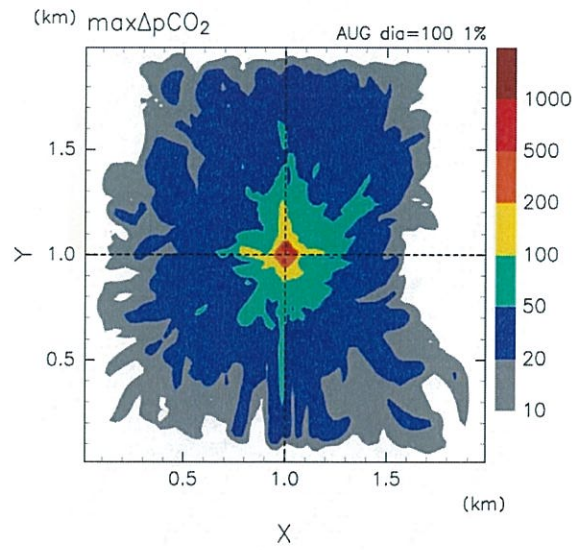
注：第 4.4-5 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

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



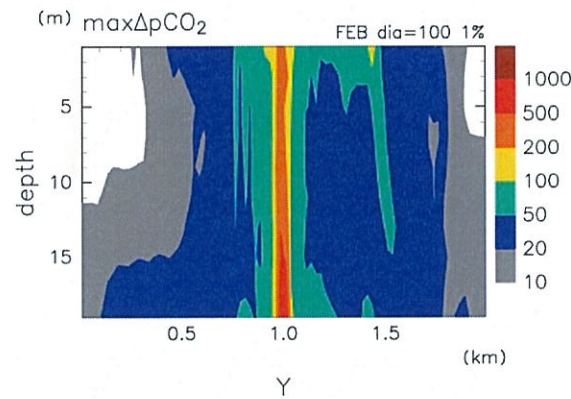
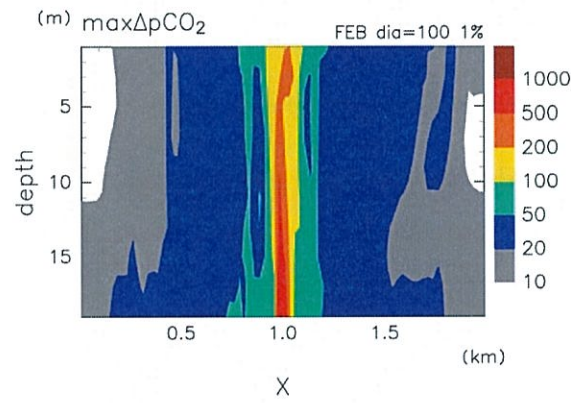
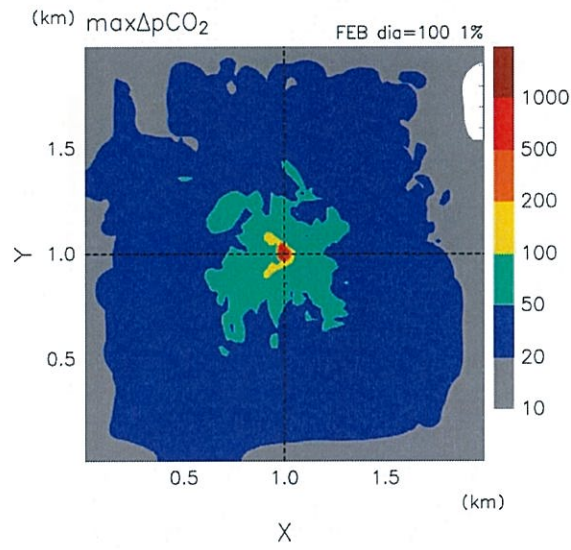
注：最下層の水平面（xy平面）図。シナリオ2-500mケース。左が夏季条件，右が冬季条件。ただしカラースケールが異なっている。

第 4. 4-7 図 シミュレーション期間中の  $\Delta pCO_2$  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。

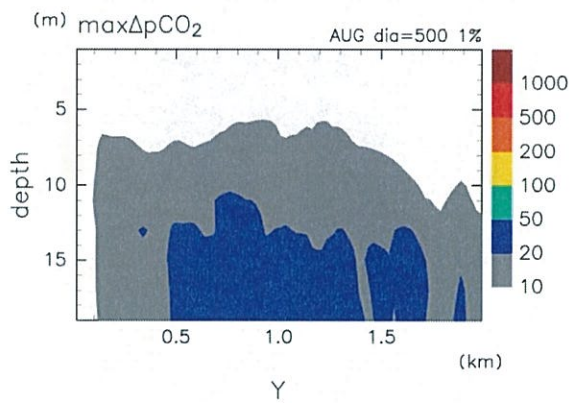
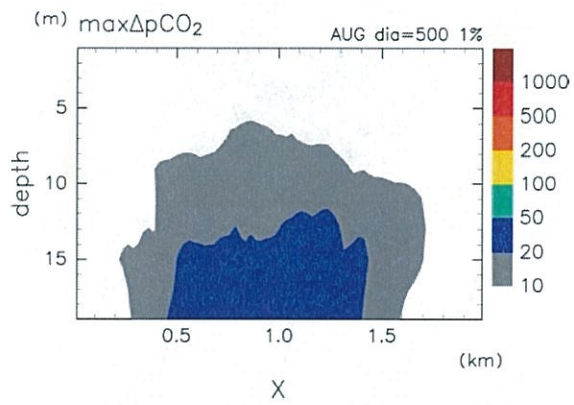
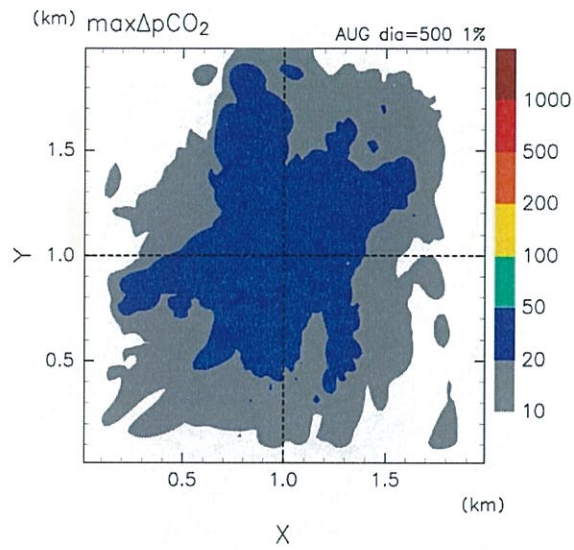
第 4. 4-8 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図



注：第 4.4-5 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

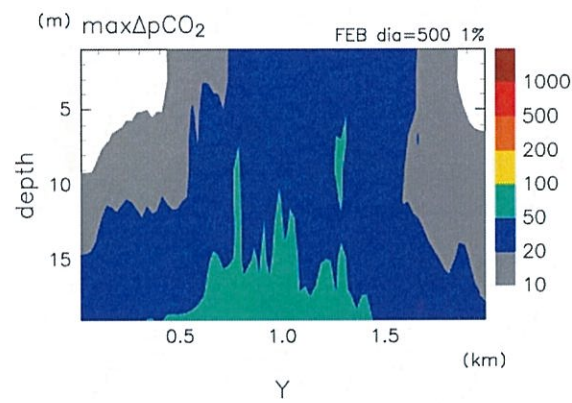
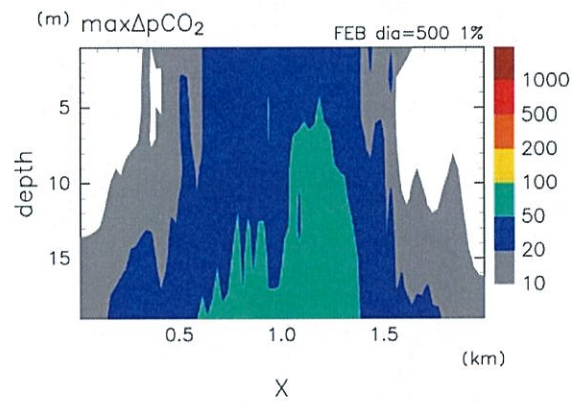
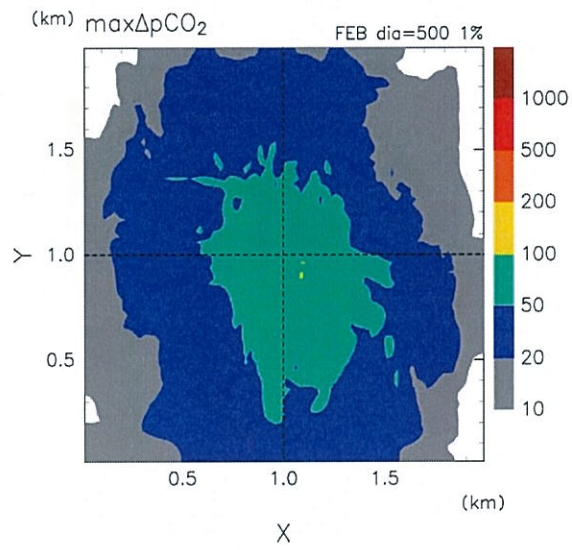
第 4.4-9 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図





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。

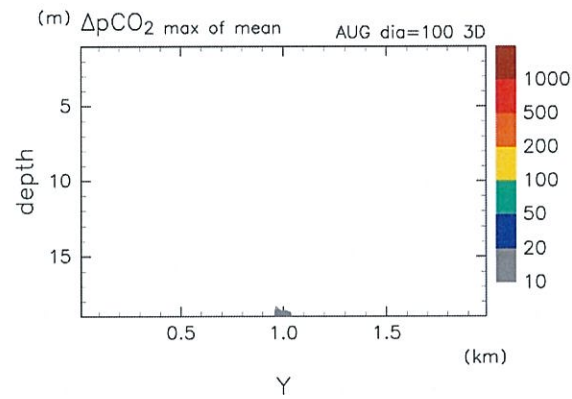
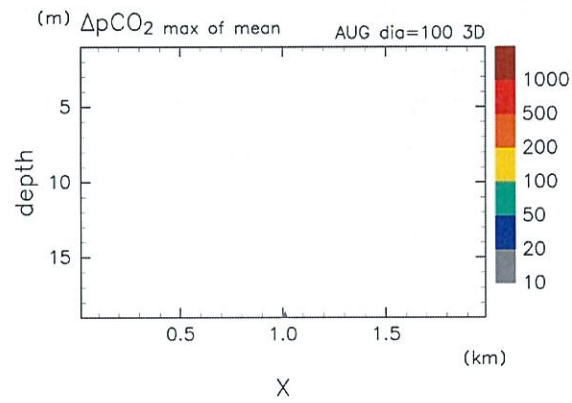
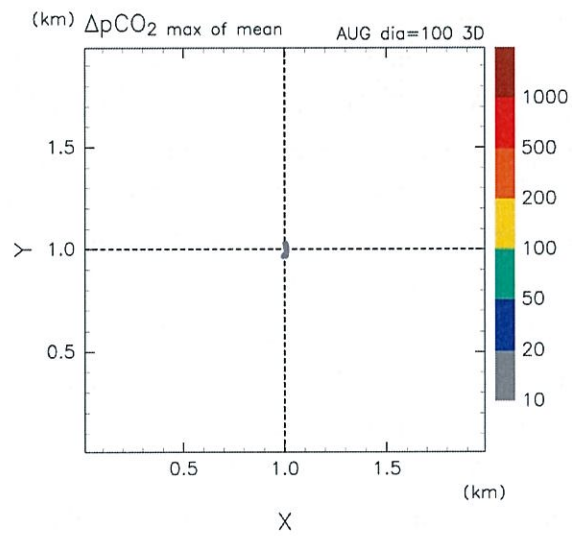
第 4.4-11 図 シミュレーション期間中の  $\Delta p\text{CO}_2$  の最大値の分布図

### 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。

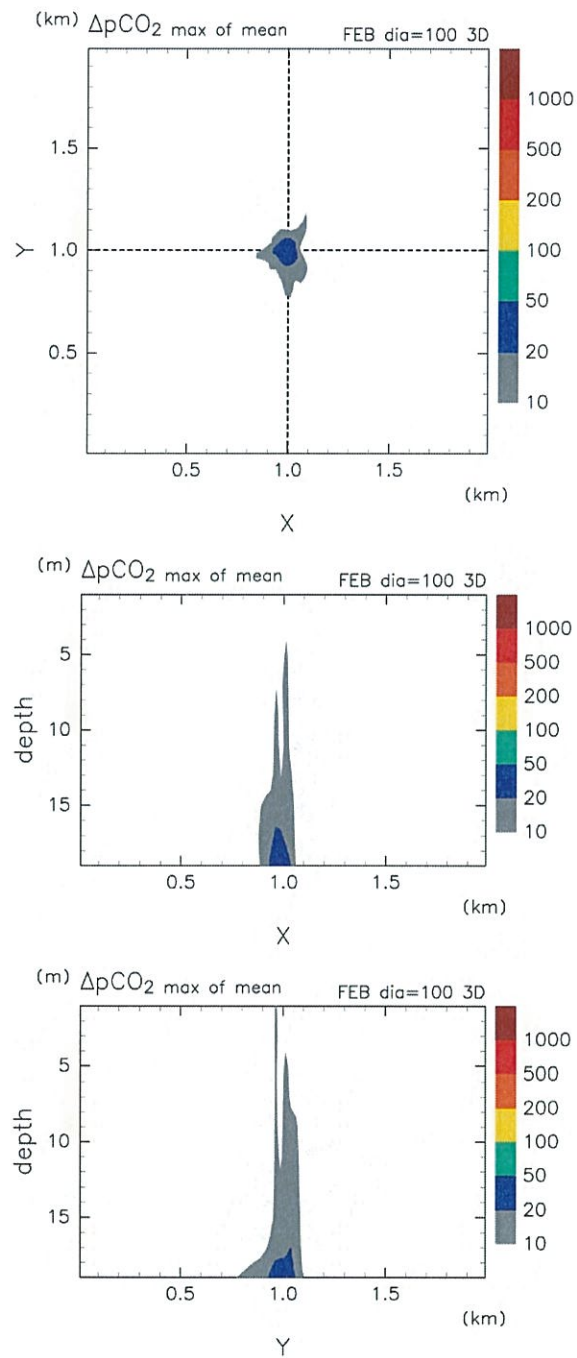
シナリオ 2-100m ケースの冬季（第 4.4-13 図）は漏出域直上に  $20\sim 50\mu\text{atm}$  を示す青色が見られ、その周囲のごく狭い範囲に  $10\mu\text{atm}$  以上のところがある。夏季（第 4.4-12 図）は漏出域直上で  $10\mu\text{atm}$  を超えるところがあるだけである。シナリオ 2-500m ケースは夏季、冬季ともモデル領域内の最大値が  $5\mu\text{atm}$  未満のため図は省略した。

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。



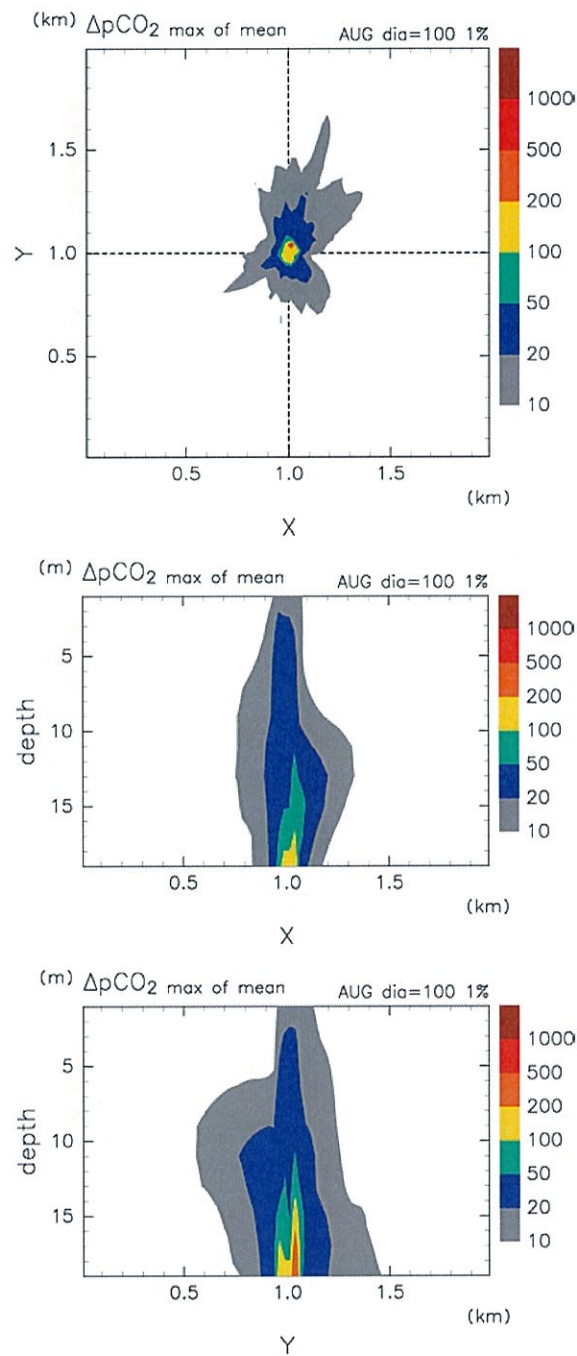
注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

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



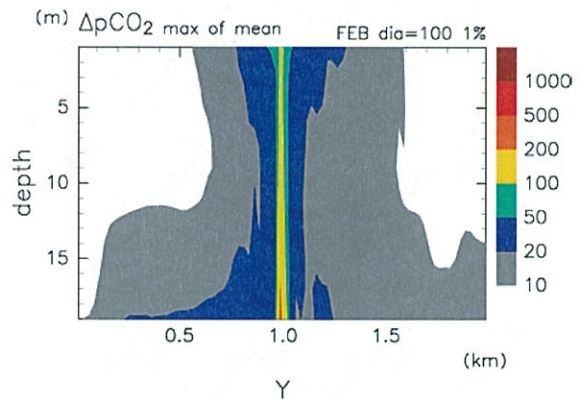
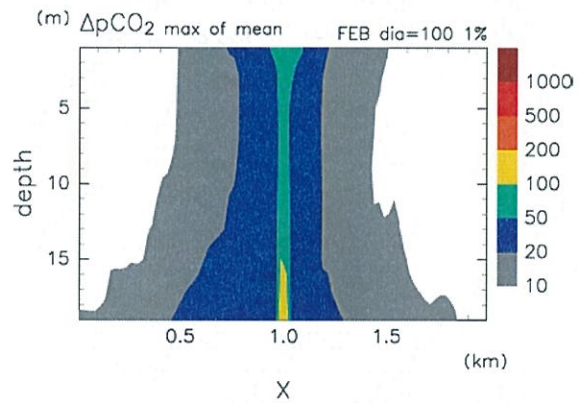
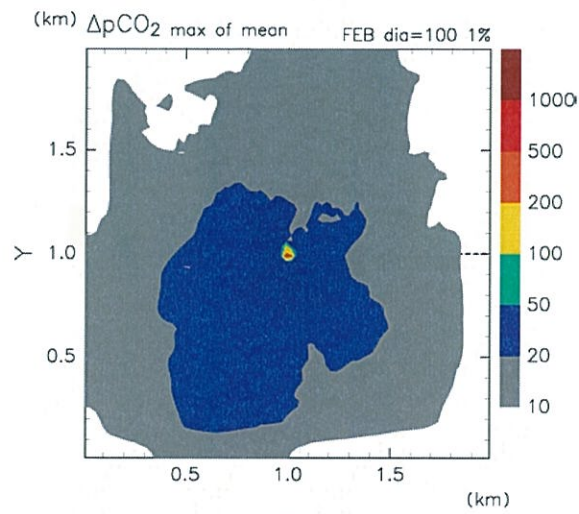
注：第 4.4-12 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

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



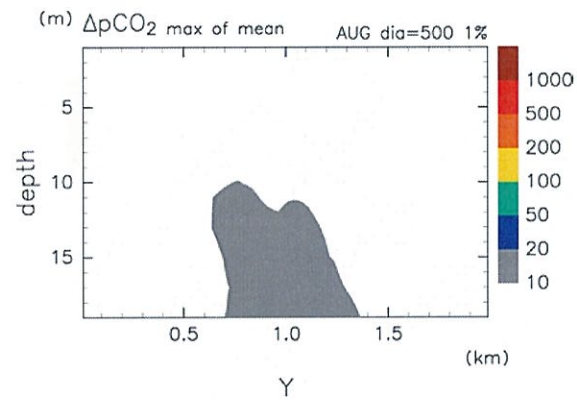
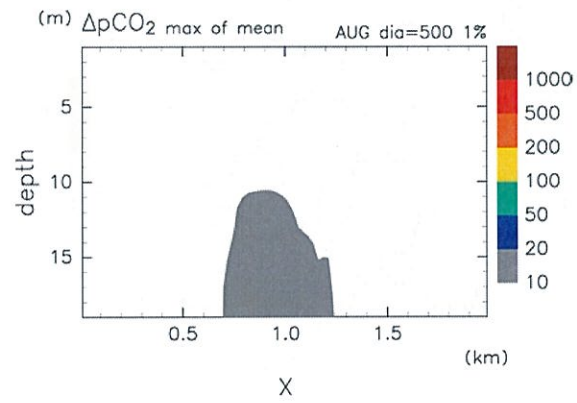
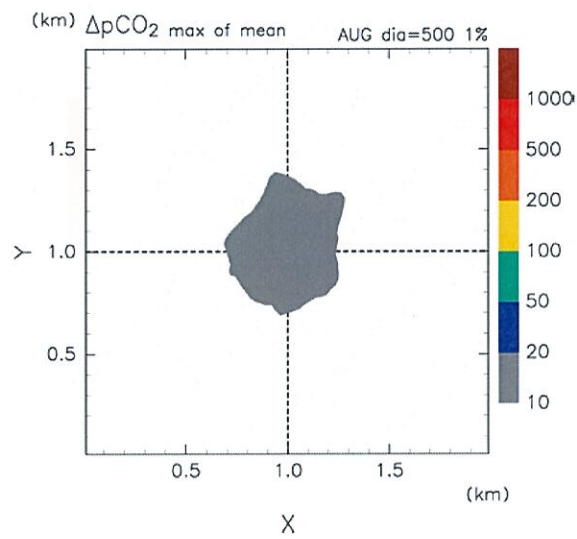
注：第 4. 4-12 図と同じ。1%漏出-100m ケース，夏季条件。

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。

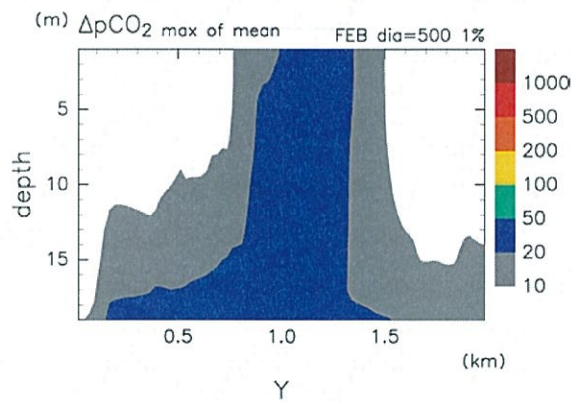
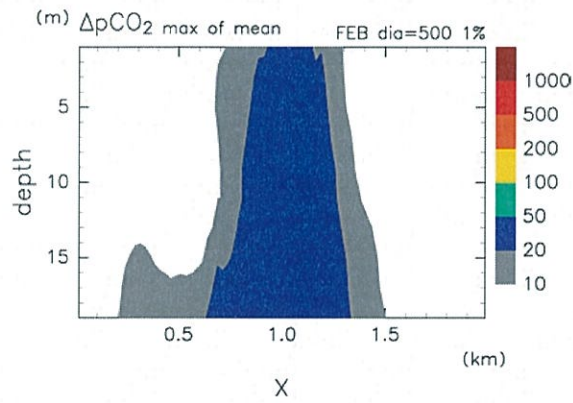
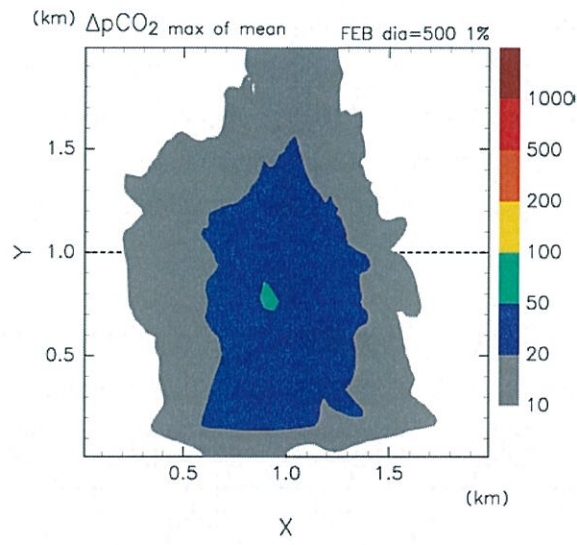
第 4.4-15 図 シミュレーション期間中の  $\Delta pCO_2$  の 24 時間移動平均の最大値の分布図



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4.4-1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

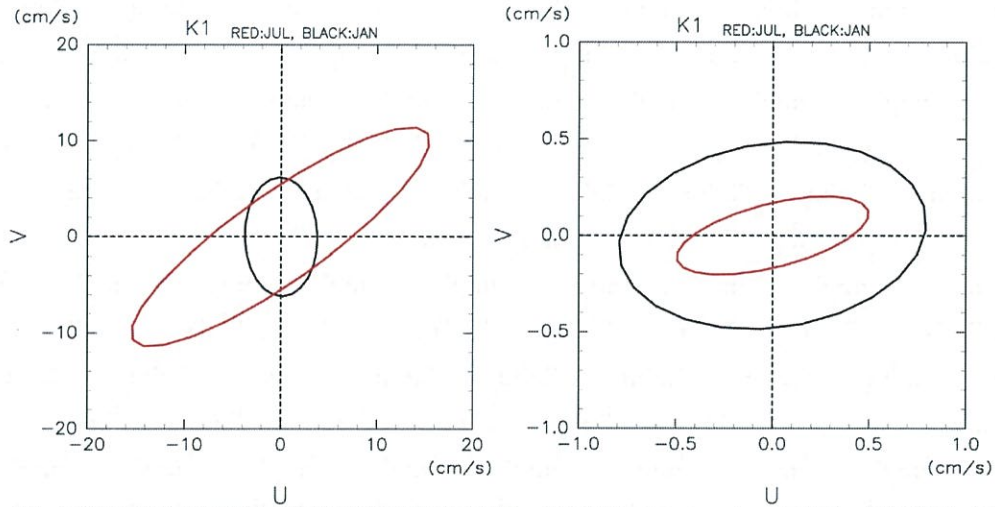
注：単位はTCO<sub>2</sub>とΔTCO<sub>2</sub>がkg/m<sup>3</sup>，ΔpCO<sub>2</sub>はμatm。

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未満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  $\Delta p\text{CO}_2$  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 $\mu\text{atm}$  であったが、その他のケースでは 200 $\mu\text{atm}$  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 $\mu\text{atm}$ （ $\Delta p\text{CO}_2$ ）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

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.

