

機関番号：12614

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20510005

研究課題名 (和文) 東京湾における二酸化炭素収支の時空間変動

研究課題名 (英文) Spatial and temporal variation of carbon dioxide budget in Tokyo Bay

研究代表者

神田 穰太 (KANDA JOTA)

東京海洋大学・海洋科学部・教授

研究者番号：60202032

研究成果の概要 (和文)：東京湾表層海水の二酸化炭素分圧の航走中連続計測を行い、東京湾海水と大気との二酸化炭素収支を評価した。東京湾最奥部の一部の低塩分域では恒常的に二酸化炭素が放出されていた。一方、その他の内湾・湾口域では、秋季から冬季にかけては大気とほぼ平衡で、春季から夏季にかけては光合成の効果による吸収が卓越していた。東京湾全体としては、1年を通して正味で二酸化炭素を吸収していると結論した。

研究成果の概要 (英文)：Underway observations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) partial pressure were conducted in Tokyo Bay, and budget of CO<sub>2</sub> between surface water and atmosphere was evaluated. At the innermost, low-salinity waters of the bay, CO<sub>2</sub> was continuously released to atmosphere due to oversaturation. In most parts of the bay, however, CO<sub>2</sub> was taken up extensively during spring and summer, presumably by net photosynthesis of organic matter, and was nearly close to atmospheric equilibrium during autumn and winter. The entire bay was a significant net sink of atmospheric CO<sub>2</sub>.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：海洋生物地球化学

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：二酸化炭素、東京湾、一次生産、群集呼吸

## 1. 研究開始当初の背景

海洋における二酸化炭素吸収量の評価については、主に外洋域で多くの観測が行われ、データが蓄積されてきた。沿岸域は海洋全体の表面積の約7%にすぎないが、海洋における一次生産の14～30%を占め、平均的な一次生産速度は外洋域の2倍と報告されている。そのため、沿岸域の炭素循環を正確に把握することは地球規模の炭素収支を推定する上で必要不可欠だと考えられる。

沿岸域については、欧米を中心に観測が行

われてきた。例えば、ヨーロッパのスヘルデ川の河口域における二酸化炭素分圧は125～9425 $\mu$ atmの範囲で変動していることが報告されている。他のヨーロッパの河口域でも同様の非常に高い二酸化炭素分圧が報告され、海洋から大気への二酸化炭素放出のフラックスが非常に大きいことが示されている。また、アマゾン川、長江、メコン川などの大河川の河口域でも二酸化炭素分圧の観測が行われ始めた。しかし、これらの研究は一年に2～4回程度の観測しか行っておらず、季節変

化や年間を通しての二酸化炭素収支を明らかにするには十分ではなかった。沿岸海域は海洋全体の二酸化炭素収支を考える上で重要であると考えられるが、日本沿岸を含めた沿岸域の二酸化炭素分圧のデータは外洋域に比べて非常に少ないのが現状であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、我が国の代表的な富栄養沿岸域である東京湾に着目した。東京湾の周辺には都市域が集中し、荒川、多摩川、江戸川、隅田川などの河川がある他、下水処理場放流水や産業排水の流入もあり、陸域からの栄養塩負荷が大きい。近年、東京湾表層では経年的な栄養塩類の減少が報告されているが、未だ赤潮の発生は年間を通して観測され、夏季には湾奥部底層で形成される貧酸素水塊はむしろ拡大傾向にあるとの報告もある。

東京湾は二酸化炭素収支の研究が先行している欧米の汽水域と比べ淡水流入量が相対的に小さく、河川に比べて下水処理場の放流水の寄与が大きい。この様に欧米の汽水域と大きく異なる特徴を持つ沿岸域であることから、沿岸域の二酸化炭素観測データを蓄積していく上で、優先度が高いと考えられた。

本研究は、東京湾における表層水の二酸化炭素分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) の空間分布およびその時間的変動について、船艇による航走時連続計測を繰り返して詳細な現場観測データを得ようとするもので、これにより次の知見を得ることを目的とした。

- (1) 東京湾全体としての二酸化炭素収支
- (2) 有機物の生産 (内部生産) / 分解の不均衡の湾内分布

(1) は、年間を通じた東京湾各海域表層の観測データの集積により、東京湾全体の  $\text{CO}_2$  収支を明らかにするものである。航走観測の繰り返しのにより  $p\text{CO}_2$  の詳細な空間分布およびその時間的変動データを得ることができ、ガス交換係数の推定値を用いれば  $\text{CO}_2$  フラックスの量的評価が可能である。(2) は、 $p\text{CO}_2$  の分布データを用いて、有機物の生産と分解の不均衡についての空間的分布と季節変動を明らかにするものである。このような不均衡は、栄養塩類の収支や貧酸素水塊の消長などにも大きな影響を与えると考えられ、東京湾の水質一般の解析にも大きく寄与すると考えられた。

## 3. 研究の方法

海水に溶解した二酸化炭素は、溶存二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ )、炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ )、炭酸イオン ( $\text{CO}_3^{2-}$ )、炭酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) の4つの化学種として存在するが、溶存二酸化炭素の存在比は全体の1%未満である。しかし、溶存二酸化炭素は大気と交換可能な唯一の化学種であり、植物プランクトンの光合成にも利用

される。二酸化炭素と炭酸は通常の測定上は区別できず、また炭酸は溶存二酸化炭素に比べて非常に少ないため、これらを合わせて溶存二酸化炭素として扱うことが多い。

溶存二酸化炭素の存在量は、濃度ではなく、「分圧」を用いて示されるのが普通である。海水の二酸化炭素分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) は、溶存二酸化炭素濃度をヘンリー定数で除して与えられ、大気と平衡の状態では大気中の気体二酸化炭素の分圧と等しい値になる。またこの値が大気より高ければ、海洋から大気へ  $\text{CO}_2$  が放出され、低ければ吸収される。

二酸化炭素分圧は図1に示した連続測定装置によって定量した。一般に海水中の二酸化炭素分圧は圧倒的に大きい相対量の海水と空気を平衡化して、空気中の二酸化炭素の度を赤外線吸収等の方法で測定する。

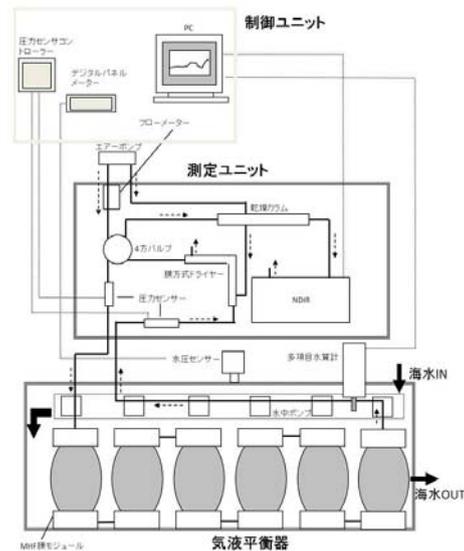


図1. 本研究で使用した  $p\text{CO}_2$  測定システム

この連続測定装置は、研究代表者が製作したもので、検出部に非分散型赤外線分析計 (LI-820, Li-Cor) を用い、平衡器にはMHF膜 (三菱レイヨンエンジニアリング) を用いている。MHF膜は膜厚  $0.5\mu\text{m}$  で、ガス透過膜性が高い。MHF膜モジュールを6個直列につなげることで膜面積を増やし約100秒の応答速度を実現した。そのため、二酸化炭素分圧の変動が大きいと考えられる沿岸域においても高時間分解能で測定することが可能である。体積混合比で計測された二酸化炭素データは、気圧データによって二酸化炭素分圧へ換算した。このとき、海面上の湿度を100%と想定して、水蒸気圧分の補正を行った。二酸化炭素分圧の測定システム

に多項目水質計 (Model 6920、YSI、米国) を組み合わせ、水温、塩分、クロロフィル a 濃度を同時に測定できるように改良を行った。大気の二酸化炭素分圧は約 3 時間置きに測定した。

東京海洋大学練習船「青鷹丸」による観測は、2008 年 5 月から 2010 年 12 月までほぼ毎月 1 回、計 33 回行った。2008 年 5 月 18 日、2009 年 5 月 15 日、2010 年 7 月 9 日、9 月 16 日、12 月 15 日は千葉側への横断観測も行った。連続観測を行った全ての航跡を図 2 に示した。

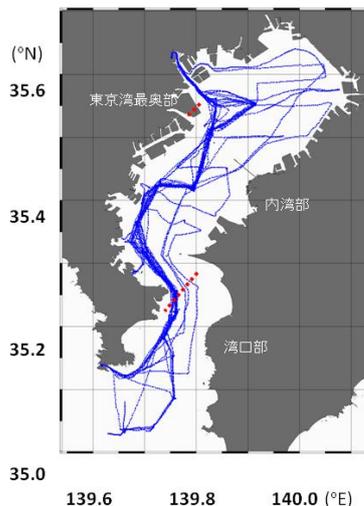


図 2. 青鷹丸による全観測航跡

航走中に船底から連続的にくみ上げられた海水を用いて二酸化炭素分圧、水温、塩分、クロロフィル a 濃度の連続測定を行い、約 15 分おきに溶存有機炭素、全炭酸、栄養塩類濃度、pH 用の表面海水試料の採取を行った。

2008 年 5 月～9 月の水温および塩分は、青鷹丸の表面モニタリングシステムの表層水温塩分計 (鶴見精機、横浜) で測定した。クロロフィル a 濃度も同様に表面モニタリングシステムのクロロフィル蛍光光度計 (10R、Turner Designs、米国) で測定した。2008 年 10 月以降は二酸化炭素分圧の連続測定装置に組み込んだ多項目水質計より得られたデータを解析に用いた。また、クロロフィル a 濃度は毎月実測値よりキャリブレーションを行った。

東京湾最奥部の観測は東京海洋大学実習艇「ひよどり」を用いて 2009 年 5 月から 2010 年 10 月まで計 9 回行った。航走中に表面海水の二酸化炭素分圧、水温、塩分、クロロフィル a 濃度の連続測定を行い、約 15 分おきに溶存有機炭素濃度、全炭酸濃度、栄養塩類濃度、pH 用の表面海水試料の採取を行った。全 9 回の観測航路は図 3 に示した。

溶存有機炭素濃度は、採取後ただちにガラスファイバーフィルター (Whatman GF/F)

を用いてろ過した試料水を全有機体炭素計 (TOC-V<sub>CSH</sub>、島津製作所) によって測定した。全炭酸濃度は、全有機体炭素計 TOC-V<sub>CSH</sub> の IC (Inorganic Carbon) 測定モードを用いて分析した。硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩、リン酸塩、ケイ酸は、採取後ただちにメンブレンフィルター (DISMIC-25cs) を用いてろ過した試料 (冷凍保存) について空気分節型連続フロー分析装置 (QUATRO Marine 5ch、Seal Analytical) を用いて分析した。pH は m-クレゾールパープルを用いた吸光度法により測定した。

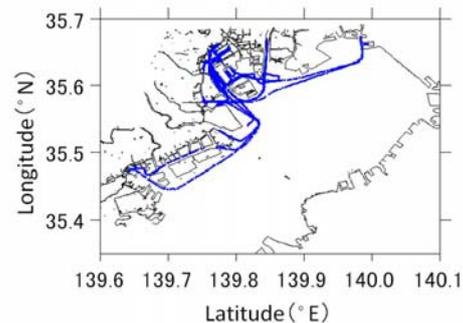


図 3. 「ひよどり」による全観測航跡

#### 4. 研究成果

##### 「青鷹丸」による湾全域観測

青鷹丸による観測は、東京湾内全域におよぶが、東京湾内を 3 つの領域に区分し、最奥部を代表する観測点として、「東京港入口」、内湾部の「F3」と「F6」、湾口部の「06」を選び、各観測点における二酸化炭素分圧の推移を検討した。図 4 にこれらの観測点の位置を示した。二酸化炭素分圧は領域ごとに異なる分布、変動を示した。図 5 には、これらの観測点における二酸化炭素分圧等の推移を示した。

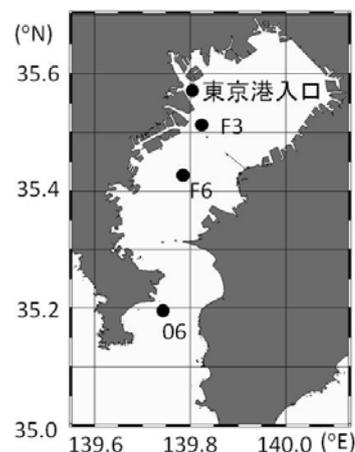


図 4. 解析のため選択した観測点の位置

東京湾最奥部は季節を問わず、二酸化炭素

分圧が非常に高くなっていた。東京湾最奥部は溶存有機炭素濃度、栄養塩類が東京湾の他の海域よりも高濃度であった。これは、荒川、隅田川などの河川水流入に加え、芝浦水再生センター、森ヶ崎水再生センターなどの下水処理場からの処理水の流入が大きく影響していると考えられた。クロロフィル a 濃度は春季から夏季にかけて高く、秋季から冬季にかけて低くなっており内湾部、湾口部と同様の濃度水準、季節変化であった。したがって、東京湾最奥部では光合成の効果を上回る活発な有機物分解が起こっていると考えられ、そのため二酸化炭素分圧が極端に高くなったと考えられた。

一方、内湾部・湾口部の二酸化炭素分圧は年間を通して大気中の二酸化炭素分圧より低い値が多く観測された。特に、春季から夏季にかけて非常に低く、秋季から冬季にかけて大気中の二酸化炭素分圧に近い傾向を示した。一般に水中の二酸化炭素濃度が同一であっても水温が高ければ、二酸化炭素分圧はより高く算出される。水温は春季から夏季にかけて上昇し、秋季から冬季にかけて低下するから、観測された二酸化炭素分圧の変動とは逆の変動になる。従って、他のプロセス（おそらく生物による消費・生成）が水温の効果を上回っていたと考えられた。この季節変化はクロロフィル a 濃度の季節変化と概ね対称的だった。春季から夏季にかけて栄養塩類は、他の季節より低くなる事が多く、場合によっては検出限界以下となった。全炭酸濃度も春季から夏季にかけて低下していたことから、光合成が呼吸に比べて卓越して起こり、正味で二酸化炭素が消費された結果、二酸化炭素分圧が低くなったものと考えられた。秋季から冬季の二酸化炭素分圧は夏季より高くなっていた。秋季から冬季にかけて鉛直混合が強くなり、クロロフィル a 濃度は低く、栄養塩類濃度、全炭酸濃度が高くなっていた。夏季に比べ単位面積あたりの光合成・呼吸速度が低く、大気平衡により近い状態であったと考えられた。

同様に、湾口部は内湾部よりやや高い二酸化炭素分圧となることが多かった。高い塩分が示すように、湾口部では外洋性の海水の影響をより強く受けており、単位面積あたりの光合成・呼吸が低いと考えられた。しかし、2008年5月14日、7月1日、8月30日および2009年12月14日の観測において、内湾部における二酸化炭素分圧の平均値は湾口部より高かった。これらの観測は観測日の数日前から1時間当たり30mmを超える雨量が観測されている。また、内湾部で塩分の低下、栄養塩類の増加も認められた。そのため、東京湾への淡水流入量が多くなり、東京湾最奥部と同様の過程で生ずる高い二酸化

炭素分圧が内湾部でも観測されたと考えられた。

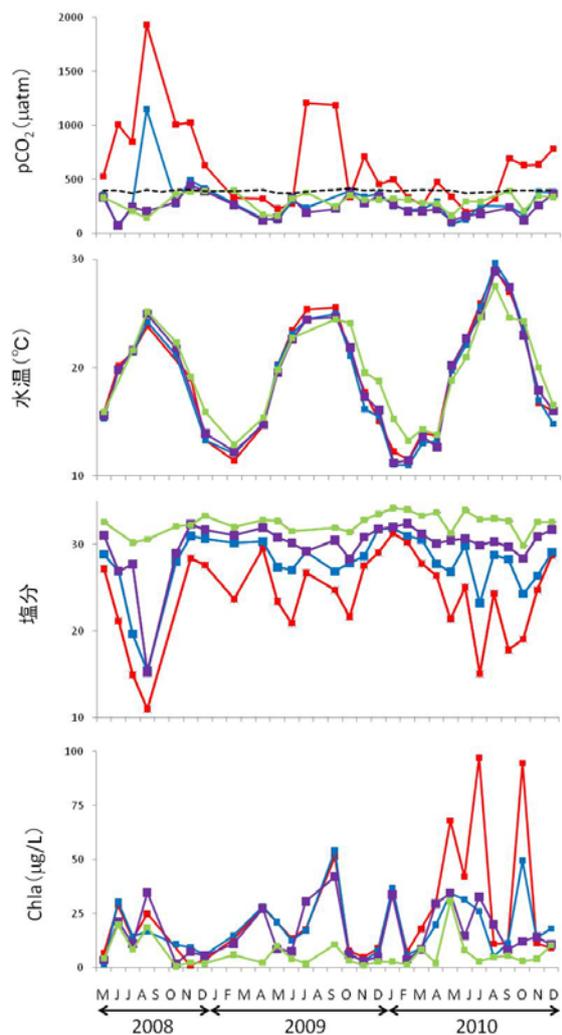


図5. 各観測点における二酸化炭素分圧 (pCO<sub>2</sub>)、水温、塩分、クロロフィル a の推移：(赤) 東京港入口、(青) F3、(紫) F6、(黄緑) O6

内湾部では東西方向にも変化が見られた。東京湾における塩分は、西部域は淡水の影響が大きく、中央および東部域は淡水の影響が比較的小さい。これに対応して、二酸化炭素分圧も2008年5月18日、2009年5月15日、2010年7月9日、12月15日で西部に比べ中央部、東部で低い値が観測された。しかし、2010年9月16日の観測では内湾部中央部より東部で高い二酸化炭素分圧が観測された。この月は湾東部海域の多くが青潮状態であった。青潮は、有機物が分解されることにより貧酸素化した底層水が、北東風の連吹、気温の低下などの気象条件により湧昇することで生ずる。二酸化炭素分圧が高い底層水が湧昇することにより、表層で高い二酸化炭素分圧が観測されたと考えられた。この様に東京湾の二酸化炭素分圧は生物

活動に大きく依存し、降水による淡水流入量の増加の影響や、外湾との海水交換、湧昇、鉛直混合などの物理的な影響も受けて時空間的に変動していた。また、赤潮の発生、青潮、下水処理水の流入など東京湾特有の環境が上記の過程と結びつき、非常に大きな二酸化炭素分圧の変動をもたらしたと考えられた。

#### 「ひよどり」による東京湾最奥部の詳細観測

一方、「ひよどり」による東京湾最奥部の詳細観測では、観測海域を通じて非常に高い二酸化炭素分圧が観測された。2009年5月、12月、2010年4月、9月、10月は観測海域を通じて、大気分圧を上回った。また、2009年8月、2010年2月でも一部を除いて、大気分圧を上回った。

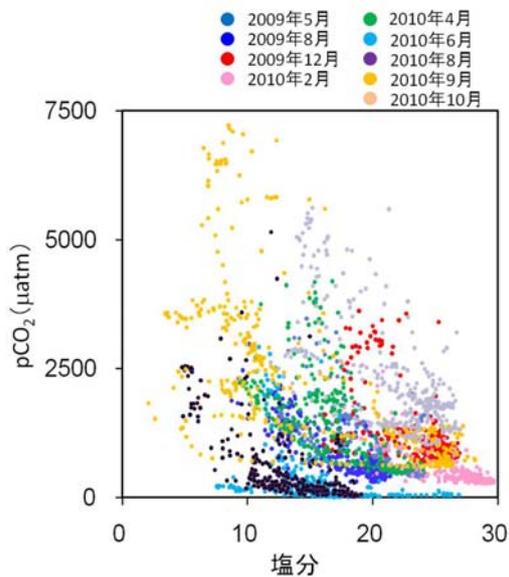


図6. 東京湾最奥部観測における二酸化炭素分圧と塩分の関係

全9回の観測のうち8回で京浜運河付近の二酸化炭素分圧が最も高かった。京浜運河は年間を通して、高い栄養塩類濃度、溶存有機炭素濃度、高水温、低塩分で特徴付けられた。この近隣には芝浦水再生センターがあり、処理水量から考えて水質に大きな影響を与えていると考えられる。二酸化炭素分圧の高い下水処理場の放流水に加え、現場での有機物分解が卓越して起こっていたため、二酸化炭素分圧が高くなったと考えられた。同様に、森ヶ崎水再生センター周辺でも全ての月で非常に高い二酸化炭素分圧が観測された。

隅田川河口周辺では塩分が増加するにつれ二酸化炭素分圧は増加し、勝鬨橋付近で最も高い値が観測された。河川水の影響を受け、全炭酸濃度、pHが低いいため二酸化炭素分圧が高くなっていると考えられた。同様の傾向

は荒川河口域でも見られた。

上記の水域とは異なり、東京港西航路・東航路では、やや低目の二酸化炭素分圧が観測された。東京港西航路・東航路は東京湾内湾部に近く、内湾部の影響をより強く受けていると考えられる。船橋港では高い二酸化炭素分圧が観測されたが、この時は2010年9月の青潮の影響と考えられた。

全9回の二酸化炭素分圧の観測結果を塩分に対してプロットして図6に示した。東京湾最奥部における二酸化炭素分圧は広い塩分の範囲で大きく変動していたが、一般に低塩分域で非常に高い二酸化炭素分圧が観測された。全炭酸濃度は低塩分域ほど低く、溶存有機炭素濃度は低塩分域ほど高かったことは、上記の考察を裏付けるものと考えられた。一方で、2010年6月、8月の様な赤潮時には、活発な光合成により非常に低い二酸化炭素分圧が観測された。

#### 二酸化炭素交換量

東京湾における大気-海洋間の二酸化炭素交換量 ( $F_{CO_2}$ ) を、以下の式から算出した。

$$F_{CO_2} = k_{av} \cdot K_H \cdot \Delta pCO_2$$

ここで  $K_H$  はヘンリー定数で、水温と塩分によって与えられる値を用いた。  $\Delta pCO_2$  は  $pCO_{2,sea}$  と  $pCO_{2,air}$  の差 ( $pCO_{2,sea} - pCO_{2,air}$ ) である。ガス交換速度定数  $k_{av}$  はガス交換速度定数は Wanninkhof による以下の式を用いて算出した。

$$k_{av} = 0.39 \times U_{av} \times \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-0.5}$$

ここで、  $U_{av}$  は平均風速、  $Sc$  は二酸化炭素のシュミット数で、気温から Wanninkhof に従って算出した。平均風速は東京湾海上交通センターの東京13号地、本牧、観音崎における観測データを用いた。気温は気象庁の東京、羽田、横浜、三浦における観測データを用いた。

以上の方法で求めた、東京港入口、F3、F6、06の月ごとおよび年間の二酸化炭素交換速度を図7に示した。内湾部、湾口部はほとんどの月で二酸化炭素を吸収しており、年間の二酸化炭素吸収量はF3、F6、06でそれぞれ  $-4.1$ 、  $-4.7$ 、  $-3.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  であった。東京港入口は二酸化炭素を吸収している月と、放出している月があった。年間の二酸化炭素交換量は  $1.9 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  となり年間を通してみれば二酸化炭素の放出域であった。東京湾は東京湾最奥部のみが二酸化炭素の放出域であったが、その他の大部分の海域では二酸化炭素の吸収域となっていた。この

ことから、東京湾全体では二酸化炭素を吸収していたと考えられた。これは、上述したように内湾部および湾口部における活発な生物活動に起因するものと考えられた。また、東京港入口は分圧差が他の海域と比較して大きいにもかかわらず、二酸化炭素交換量は小さくなっていた。これは、東京港入口が陸域に近く風速が弱いことに起因していると考えられた。

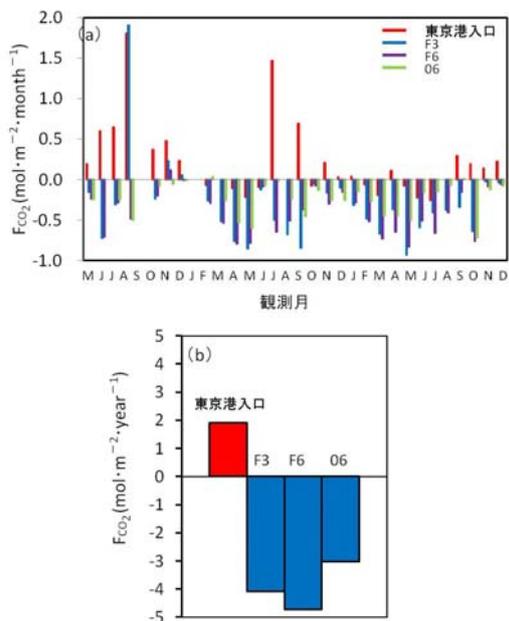


図7. 東京港入口、F3、F6、O6の月ごとおよび年間の二酸化炭素交換速度

東京湾最奥部における月ごとの大気-海洋間の二酸化炭素交換量を、同様に計算した。平均風速は東京湾海上交通センターの東京13号地における観測データを用いた。気温は気象庁の東京における観測データを用いた。算出した各地点の二酸化炭素交換量を図8に示した。東京湾最奥部は二酸化炭素の放出域であり、年間の二酸化炭素放出量は森ヶ崎、芝浦、レインボーブリッジ、勝鬨橋、東京港入口でそれぞれ130、85、52、48、14 mol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>であった。以上のように、東京港入口よりさらに奥部の水域では、より強い二酸化炭素の放出域となっていた。

これまでに諸外国で行われた沿岸域における二酸化炭素分圧の観測結果と本研究の結果を比較すると、東京湾内湾部、湾口部は二酸化炭素の吸収が報告されている沿岸域に比べて単位面積当たりの二酸化炭素吸収量が多いことが分かった。また、東京湾最奥部の各点は二酸化炭素放出が報告されているヨーロッパの二酸化炭素交換量に匹敵するものであった。以上のことから東京湾は世界的に見ても強い放出域と吸収域が混在す

るこれまでに観測例のないタイプの海域であることが分かった。

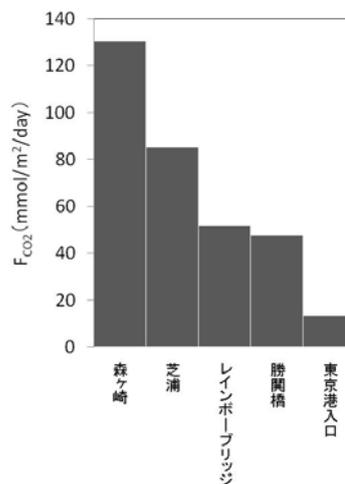


図8. 森ヶ崎、芝浦、レインボーブリッジ、勝鬨橋、東京港入口の二酸化炭素交換量

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① Atsushi Kubo, Yosaku Maeda and Jota Kanda (2011) Spatial and Temporal Variations of pCO<sub>2</sub> in Tokyo Bay. Asia-Oceania GeoScience Meeting、台北、2011年8月 (Abstract accepted)
- ② 久保篤史・鈴木亘、大内田知夏、神田穰太 (2010) 東京湾最奥部における二酸化炭素分圧の分布. 2010年度日本海洋学会秋季大会、網走、2010年9月7日
- ③ 久保篤史・前田洋作・神田穰太 (2009) 東京湾における二酸化炭素分圧の時空間変動. 2009年度日本海洋学会秋季大会、京都、2009年9月26日
- ④ 久保篤史・前田洋作・神田穰太 (2009) 東京湾における二酸化炭素分圧の分布と変動. 2009年度日仏海洋学会、東京、2009年6月20日

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 穰太 (KANDA JOTA)

東京海洋大学・海洋科学部・教授

研究者番号：60202032

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし