

課題名	陸域・海洋による二酸化炭素吸収の長期トレンド検出のための酸素および二酸化炭素同位体に関する観測研究		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成16年ー20年	合計予算額 (当初予算額ベース)	150,653千円 (うち20年度 26,349千円)

#### 研究体制

陸域・海洋による二酸化炭素吸収の長期トレンド検出のための酸素および二酸化炭素同位体に関する観測研究（独立行政法人国立環境研究所、一部名古屋大学へ研究委託）

#### 研究概要

##### 1. 序（研究背景等）

人為起源のCO<sub>2</sub>の発生量はアジア諸国の急速な発展などで近年増加が著しい。例えば中国での二酸化炭素発生量はアメリカの発生量を超えたとされている。これまで大気中に排出された人為起源の二酸化炭素の約半分は海洋や、陸域生態系に吸収されていると考えられ、大気中の二酸化炭素の年間増加速度は、排出量の60%程度であった。しかし、近年の人為発生の増加に加え、自然界の吸収はどこまで続くのかが、将来濃度を予測する時に非常に大きな問題である。

二酸化炭素の増加速度や自然界への吸収比率は毎年一定ではなく、特にエルニーニョ現象の直後の気温の高温期に二酸化炭素濃度の急上昇が観測されてきた。その速度は通常の2倍（3ppm）以上に達することも多く、今後、エルニーニョ現象の頻発によって、全体の平均の濃度増加速度が上昇することも懸念されている。これは、主に陸域の生態系や海洋が持っている二酸化炭素の吸収力が気象や気候の変動によって影響を受けるためであると考えられている。

長期的にみると、温暖化により気温が上昇することに加え、降水量や海水や海水の量など生態系や物理系に関する因子が変化していくことが予想されている。その気候変化自身がさらに自然の吸収量を変化させ、あるときは正の、ある時は負のフィードバックを与え、長期的な濃度の上昇速度や最終的な到達濃度に大きな影響を与えることが予想されている。モデル計算によると、2050年あたりを境にして、陸域生態系の二酸化炭素吸収量が減少に転ずるといくつかの結果が出されている。また、海洋でも本来の吸収量に比べ25%程度の吸収量の減少が計算上考えられるとされている。

二酸化炭素吸収量を観測する方法として、酸素や二酸化炭素同位体比を用いる方法がIPCCでも提案されている。これらの成分をグローバルに精密に測定することで、陸域の生態系や海洋の二酸化炭素吸収量の変動を測定することができると考えられている。

##### 2. 研究目的

グローバルな二酸化炭素の収支の変化を調べるために、これまで太平洋（日本ーオーストラリア、日本ーアメリカ）を航行する定期貨物船を用いて、海洋のバックグラウンド大気の緯度別CO<sub>2</sub>変化や酸素濃度変化、二酸化炭素の炭素同位体比などの観測を行ってきた。

酸素や同位体比を用いて二酸化炭素収支を推定する方法の精緻化などを行い、グローバルな陸域、海洋吸収量やその年変動などを観測をベースとして求めていくことで、今後の吸収量がモデル計算のように持続するのか、それともなんらかの不安定要素を示す現象があるのかなどを検証していく。そのためには、10年規模の長期的観測によって変動の現象を早期検出して行くことが今後重要になってくると思われる。

ここでは現在ある観測プラットフォームを利用した観測を長期的に継続すると共に、観測の行き届かなかった南北半球の高緯度帯にその拠点やプラットフォームを開発し、地球の広い緯度帯での観測を継続進行させる。また気象要素や水循環を通して、陸上生態系の変動に係わる指標として酸素同位体比の変動を利用した解析や放射性の炭素を用いることで、収支変動の要因についての別の角度からの情報を得ることも検討する。また、酸素に関しては現場で連続的に測定できるシステムを開発し、地域的な酸素発生とグローバルな収支の関係などを解析に使うことも目標に挙げた。

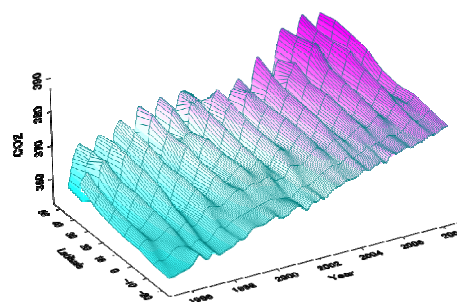


図1 CO<sub>2</sub>濃度の緯度別変動(1995-2008)

## 3. 研究の内容・成果

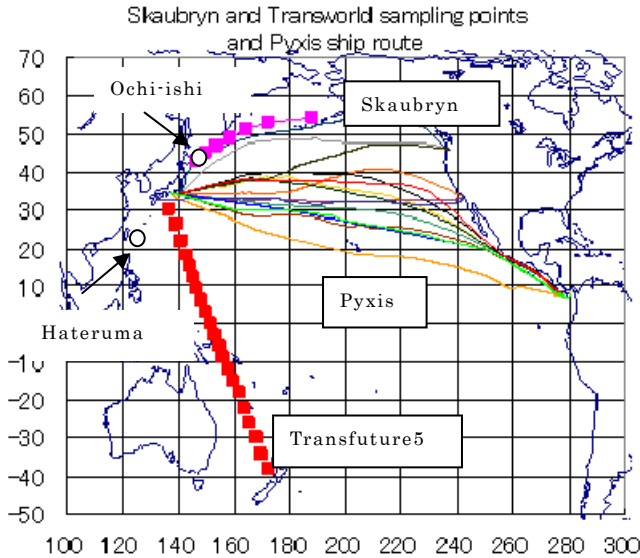


図2 サンプルング場所。日本－ニュージーランド航路と日本－北米航路の航路図および波照間と落石

素 (APO) は陸上の生態系の吸収量を推定するための良い指標と考えられ、長期間のステーションのデータならびに海洋大気用のデータを用いて、グローバルな自然界のCO<sub>2</sub>の吸収量を求めることができた。酸素濃度自身は季節変化成分を持っているが、長期的な変化トレンドとしてデータを解析し、平均的な陸域・海洋二酸化炭素吸収量を求めた。波照間、落石で共通するデータのある1999年から2008年の9年間の変化量を用いて求めると、7.51PgC/yの人為起源のCO<sub>2</sub>排出量に対して、0.9PgC/yの陸域吸収と2.35PgC/yの海洋吸収と推定値が得られた。これは、これまでIPCCで報告されている値とほぼ同等であった。さらに2002-2008年の最近の6年間は、海洋の広い緯度帯でのデータも使いながらグローバルに平均した場合、人為排出量7.56PgC/yに対して、1.4PgCが陸域に、1.9PgCが海洋に吸収されていると計算され、陸域の吸収量が相対的に多く見積もられた。現時点では、本研究で求められた陸域生物圏および海洋の炭素吸収量に付随する不確かさとしてはそれぞれ±0.9および±0.7Pg C/yと推定された。

## (1) 観測プラットフォームの変遷

波照間島 (沖縄県竹富町、北緯24度) と北海道落石岬 (北緯43度) の国立環境研究所の設置したモニタリングステーションにおいて、ガラスボトルに大気のサンプリングを行い、1998年から酸素、二酸化炭素の同位体比等の測定を継続している。さらにグローバルな大気の状態を把握するために太平洋上の広い緯度帯からの大気の採取を行うべく、太平洋上で定期航路を持つ民間の貨物船などの協力を仰ぎ、カナダ、アメリカ、オーストラリア、ニュージーランドへの航路でのガラスボトルによる酸素観測を展開した。さらに、より詳細なO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>比の時間変動を調べるために2005年より落石において、2006年より波照間において、GCシステムによる連続観測を開始した。現在の定期航路と代表的サンプリングサイトを図1に示した。

## (2) 酸素からの収支観測

酸素濃度変化および大気ポテンシャル酸

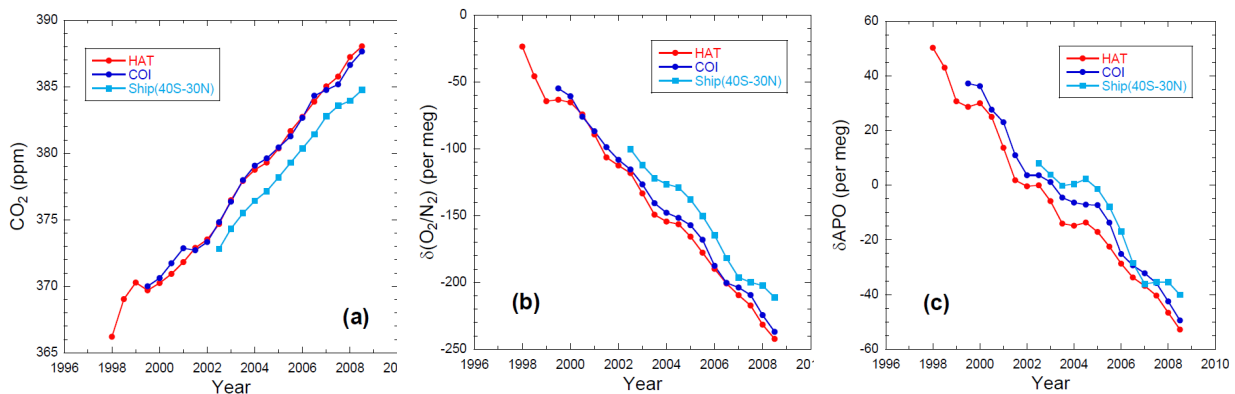


図3、波照間 (HAT)、落石 (COI)、船舶による西部北太平洋域 (南緯40度～北緯30度) でサンプリングされたフラスコサンプルの分析に基づく、大気中(a)CO<sub>2</sub>濃度および(b)O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>比、(c)APOの年平均値。年平均値は1月1日および7月1日を中心とする前後6カ月間の年平均値がプロットされている。

## (3) 酸素濃度の地域的特性観測

これまで広域での観測してきた船舶のデータを地域ごとに分けて解析することによって、その

地域性が明らかになってきた。緯度毎の季節変化を図に示した。この図では大気ポテンシャル酸素（APO）として表しているの、ほぼ海洋からの酸素の放出に対応した季節変化が現れている。このように北半球高緯度において大きな酸素発生量の季節変化見られた。南半球でも位相が逆になった季節変化が高緯度に現われている。GCMモデルで海洋からの酸素の発生密度を推定して、大気中のAPOを計算したところ観測値の変動が振幅の違いはあるものかなり再現された。

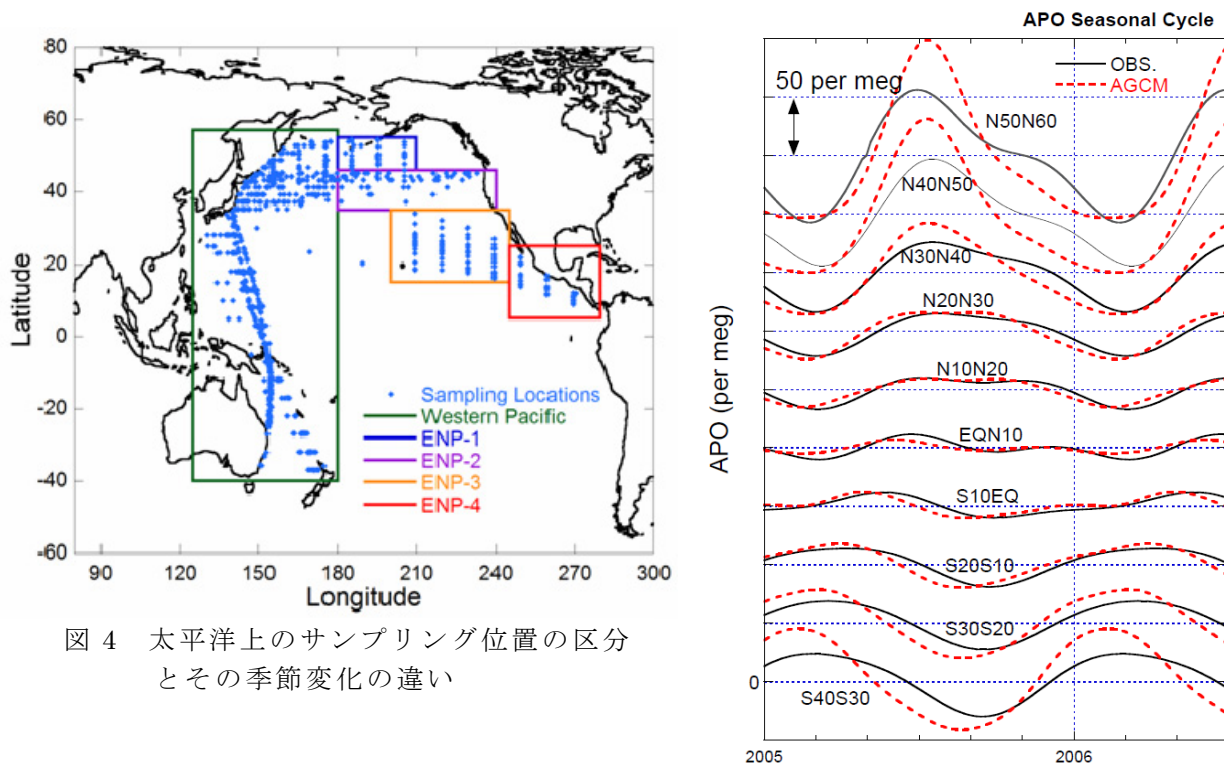


図4 太平洋上のサンプリング位置の区分とその季節変化の違い

落石では連続酸素観測を3年行ない、5—6月の海洋プランクトンのブルーム期にAPOの増加が繰り返すことがわかった。原因としては、局地的な海洋植物プランクトンのブルームとの関連性が認められ、今後グローバルな酸素収支を解析する際に、ローカルな酸素発生量の変動や海洋変動との関連を解析していく必要があることが示唆された。

#### (4) 大気中二酸化炭素同位体比の変動による長期的収支の観測

炭素の安定同位体比を用いた研究からは、年変動に関する情報が取り出されたが、その推定方法についても検討が加えられた。吸収量のトレンドを見極めるために大気と陸域、海洋リザーバーとの間の同位体比的な非平衡値を固定しない考え方を考案した。固定した場合と固定しない場合の両極端の間に真値があるとして、ここ10年間ほどのトレンドとしてだけ取り出してみると、陸域の吸収量は最近の増加が認められ、海洋吸収にも微増が認められた。

これは最近のトレンドとしての温度上昇に対しても陸域の吸収量の全体量が下がっていないことを示す重要な結果である。これは、温度に対してマイナスに応答する場所があるのに対して、例えば陸域でも高緯度帯などが吸収センスに向かっていることを示唆している。緯度別の解析を行った結果でもそれが示唆された。

森林火災などの緯度別分布を比較すると、97-98年に向けて高緯度ほど応答が遅れているのと火災の発生のタイミングずれが合致しているのと、2003年の高緯度における吸収量の減少は、ロシアなどの火災の増加とタイミングが合致しているようであった。

海洋の吸収量のトレンドも若干の増加を示したが、2008年がラニーニャであったことを考慮しても、濃度上昇による海洋吸収は少し増えているように評価された。緯度別の解析を行った結果、赤道付近の緯度帯が特にエルニーニョ/ラニーニャなどの影響を強く示すことが明らかになった。30度以北の海洋吸収の変動は赤道とは異なっていた。2008年の弱いラニーニャ期には、赤道付近は吸収量の減少が、高緯度帯では増加がみられた。

酸素の結果と比較するために、1999年から2008年の平均値を求めると陸域吸収は1.1PgC/y、海洋吸収は2.3PgC/yとなり、ほぼ同等の値を示した。しかし、最近の6年での比較は酸素の結果のような海洋の吸収量の減少は明らかではなかった。



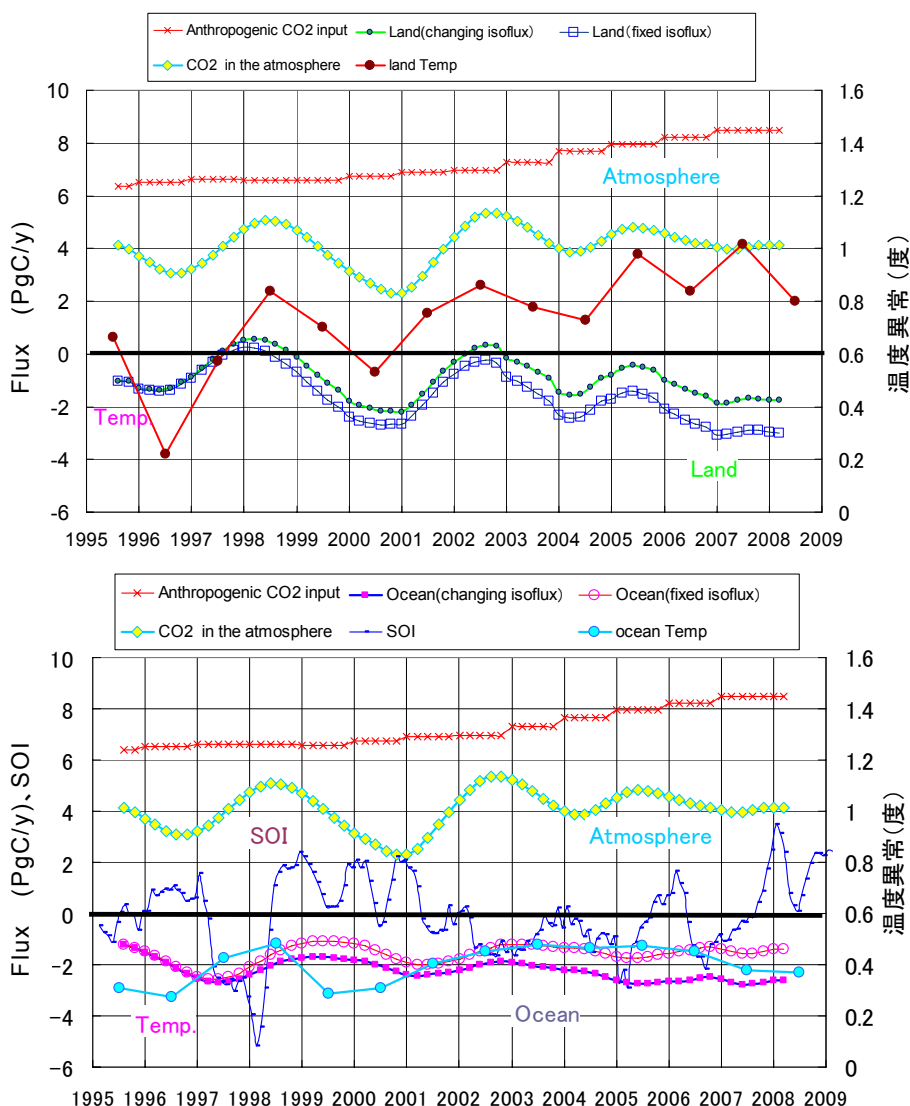


図 5 二酸化炭素の大気蓄積と陸域、海洋吸収量の推定と温度異常や SOI との関係。同位体比フラックス (isoflux) を変化(changing)させた場合と、固定(fixed)させた場合。

#### (5) 放射性炭素や酸素同位体比の観測

放射性同位体比は、1960年代の核実験により大気中に供給された後、自然界の炭素循環によりその分布や変化率が左右されている特異なトレーサーとして位置づけられている。本年度は、44N、25N、12N、赤道、15Sでの時系列のデータを分析し解析を進めた。

全体的な  $\Delta^{14}\text{C}$  の減少傾向は世界の他のデータともよく合っているが、緯度毎のデータを詳しく調べると、緯度毎にそのトレンドに特徴があることがわかった。特に赤道付近の変化傾向が他の緯度帯とは異なっており、この緯度帯での海洋や陸上との  $\text{CO}_2$  交換過程が年変動していることの表れであろうと推察された。今後、モデルとの比較などを通して、これらのデータセットを用いた解析を進めることが重要と結論付けられた。

酸素同位体比は南半球から北半球に向かっての減少がはっきり分かる上に、観測期間では全体としては気温が高くなるほど、その値が大きくなるような増加トレンドを示した。2008年にはラニーニャ現象時に伴う気温低下によってか、一時的に減少傾向があることがわかった。今後、温度や乾燥による植物への水ストレスが強くなれば、一層酸素同位体比が大きくなっていくものと思われる。従って、今後ともその指標としての監視を続けていく価値があることがわかった。

#### 4. 考察と今後

これらの10年程度の気温や濃度変動などによる自然の吸収フラックスへの応答を解析したが、この結果はまだまだ50年先を予測できるようなデータではないものの、温度に対する陸域

の吸収量が大きく減少に転じない範囲では濃度増加が吸収量の増加にそのまま反映される可能性を示した(図7)。同時に海洋の吸収が続くことが陸域の吸収量変動によるフィードバックを和らげる働きとして重要であることがわかった。これらは将来予測のための今後の観測に大きな示唆を与えた。

しかし、海洋への温度依存性の検出にはまだ観測期間が10年では短期的な温度応答しかわからないことや、CO<sub>2</sub>濃度増加が陸域での吸収量増加にどの程度の応答しているのかなどは、今後着目すべき課題として残された。また、陸域の実際の吸収量は、森林破壊などの土地利用変化を含めて考えると、海洋と同等の吸収力を持っていることが見積られることから考察すると、森林破壊から出る二酸化炭素の正確な把握がこの解析には非常に重要な課題と考えられた。

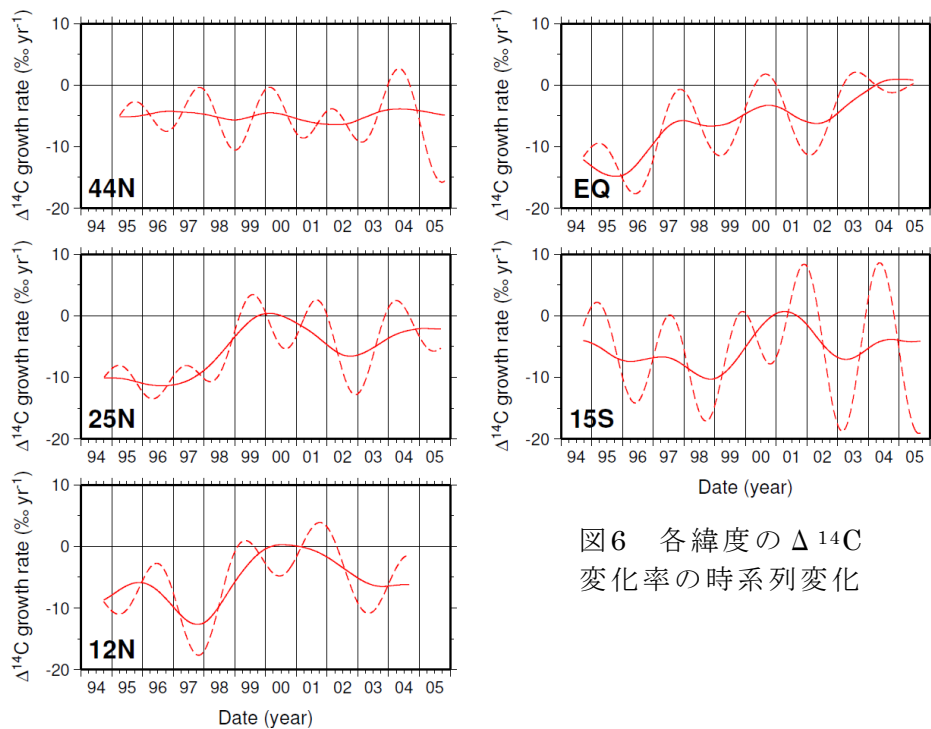


図6 各緯度の  $\Delta^{14}\text{C}$  変化率の時系列変化

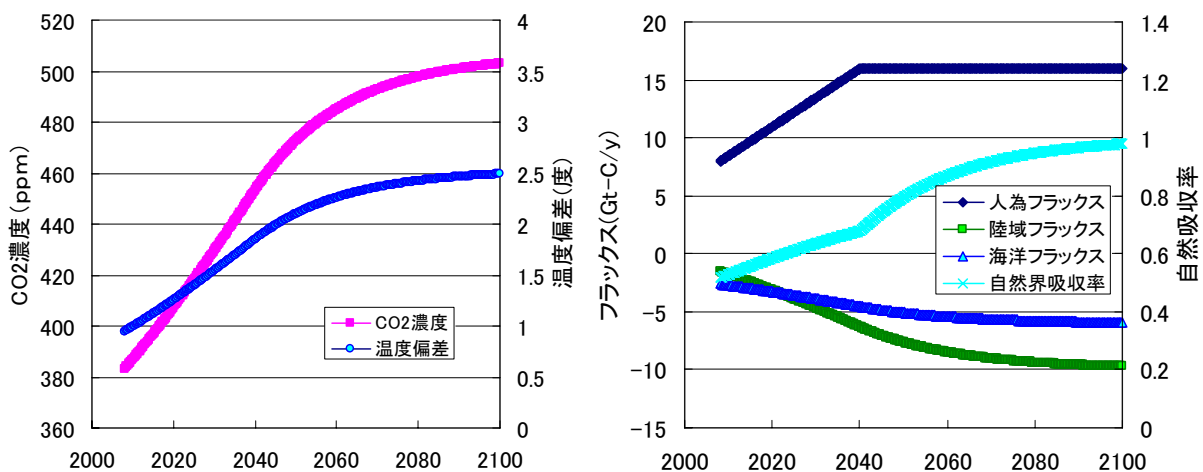


図7 回帰分析結果式が意味する吸収量増加と濃度変化例(実際を予想しているわけではない)。人為起源のフラックスを8PgCから16PgCへと2040年まで増加させた後一定にした。温度は310ppmの濃度の倍の濃度になった場合に4度上昇するとした。濃度と温度はリニアの関係とした[ $4 \times (\text{CO}_2 - 310\text{ppm})/310\text{ppm}$ ]。自然の吸収量は濃度増加によって大きくなる。温度上昇によって、上昇しない時より陸域吸収速度は15%少なくなった。