

## 学位論文題名

## Sources and sinks of atmospheric carbon dioxide in East Asia

(東アジアにおける大気二酸化炭素の発生源と消失源)

## 学位論文内容の要旨

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is the most importance greenhouse gas with the largest contribution to the radiative forcing. Surface observations of atmospheric CO<sub>2</sub> provide information of its sources and sinks in both global and regional scales. With the prospective of being facilitated by model simulation, long-term time series atmospheric CO<sub>2</sub> record constitutes valuable tool for validating bottom-up estimated inventories. The boreal region in East Asia is one of the most important carbon sink, while the anthropogenic emission from the middle part of East Asia is continuing increasing. Rishiri Island, locating between the Eurasia continent and the west North Pacific, is influenced by the outflow from the continent. The purpose of the study is to estimate carbon sources and sinks in East Asia based on observations at Rishiri Island. In the study, the fetch regions at Rishiri Island are first characterized by radon-222 (<sup>222</sup>Rn) tracer. Time series atmospheric CO<sub>2</sub> was then analyzed for the seasonal and interannual variations. These variations were discussed in association with the controlling climate factors in the fetch regions. As a supplementary, an attempt of soil CO<sub>2</sub> flux estimation from the snowpack at Rishiri Island was carried out.

<sup>222</sup>Rn is a suitable tracer to estimate atmospheric transport as it is emitted ubiquitously by soils and is removed by radioactive decay. Atmospheric <sup>222</sup>Rn observed from December 2008 to November 2010 was used to estimate seasonal fetch regions at Rishiri Island. For the observed signal, clear diurnal variation was observed in summer, indicating strong diurnal cycle of boundary layer height. A combined analysis of <sup>222</sup>Rn tracer and back trajectory clusters indicated that the predominant continental fetch regions were southeastern Siberia and northeastern China, around 90–150°E, 40–60°N of East Asia. The major maritime fetch regions were the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. The seasonal fetch regions were well verified by transport model NICAM-TM. This <sup>222</sup>Rn-derived fetch regions allowed for further analysis of the sources (sinks) of atmospheric CO<sub>2</sub> at Rishiri Island.

Six-year CO<sub>2</sub> record from May 2006 to September 2012 was analyzed for the variation pattern from diurnal, seasonal to interannual scales. After data selection, the observed record was fitted a function and a low-pass filter to extract the seasonal cycle and long-term trend. Seasonally, maximum CO<sub>2</sub> appeared

around the beginning of April, while the minimum appeared around the middle of August. A mean growing season length of ~130 days was estimated. The peak-to-peak amplitude increased until 2009 and decreased thereafter, within a mean value of 19.9 ppm. This variation of amplitude was related to the climatic variation in the fetch regions. It was found that temperatures in the fetch region affected CO<sub>2</sub> amplitude through affecting the seasonal maximum, with a time lag of 1–2 years. On the contrary, precipitation was not likely affecting CO<sub>2</sub> amplitudes. The decreasing amplitude since 2009 was also likely contributed by circulation changes as indicated by the simultaneous decrease of <sup>222</sup>Rn concentration in spring and summer.

In order to examine carbon flux from the terrestrial biosphere, soil CO<sub>2</sub> flux from the seasonal snowpack was estimated as such reports were quite limited. Based on the gas diffusion approach, an average diffusion-only soil CO<sub>2</sub> flux of 0.27  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  was estimated during the snow season from December 2010 to April 2011 at Rishiri Island. A general increasing trend, interrupted by several sharp decreasing events, characterized the seasonal dynamics of the CO<sub>2</sub> flux. Air temperature significantly influenced the estimation of CO<sub>2</sub> efflux. The corrected soil CO<sub>2</sub> flux (0.40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), eliminating wind-pumping effects, was estimated to be 48% larger than the diffusion-only CO<sub>2</sub> flux. A total amount of 61.9 g C m<sup>-2</sup> soil carbon emission in the snow season was estimated.

In this research, the fetch region of Rishiri was derived based on <sup>222</sup>Rn observation. This allows for improving studies on the sources (sinks) of other observed trace gases. The climatic variation in East Asia was captured by the interannual variation of atmospheric CO<sub>2</sub>. This implies the corresponding variation of carbon sources and sinks in the region. Although further investigations on the underlying mechanisms are needed, the study provided robust information for regional carbon budget estimation when compare with other approaches such as inversions and flux network observations. The soil CO<sub>2</sub> flux estimation in the snow season, on the other side, complemented the bottom-up studies in the boreal region where the wintertime studies were relatively lacked.

# 学位論文審査の要旨

主　査　教　授　吉　川　久　幸  
副　査　教　授　河　村　公　隆  
副　査　教　授　杉　本　敦　子  
副　査　グループ長　村　山　昌　平（産業技術総合研究所）

## 学位論文題名

### Sources and sinks of atmospheric carbon dioxide in East Asia (東アジアにおける大気二酸化炭素の発生源と消失源)

大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) は放射強制力への寄与が最も大きく、人間活動により増加を続けている重要な温室効果ガスである。大気中の  $\text{CO}_2$  観測は、さまざまな空間スケールで放出源と消失源の情報を与え、炭素循環理解に資することが可能である。東アジアは、経済の発展にともない人為的な  $\text{CO}_2$  排出量が他の地域よりも大きく増加を続けている。その一方で、東アジア北部は、全球的に見ても重要な炭素消失源の一つとなっている。ユーラシア大陸と北太平洋西部の間に位置する利尻島は、大陸からの流出の影響を受けやすいことが先行研究で明らかになっている。本研究の目的は、利尻島での観測に基づいて、東アジアにおける炭素発生源と消失源を推定することである。研究では、先ずラドン-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) をトレーサーとして用い、利尻島での観測値に特に強く影響を与える領域を検討した。その後、2006年から利尻島で観測している大気中の  $\text{CO}_2$  の時系列データについて、季節変化や経年変化を解析した。季節変化や経年変化の年々変動は、 $^{222}\text{Rn}$  を基に評価した領域の気象要因との関係について議論した。また、冬季の積雪からの  $\text{CO}_2$  フラックスについても、利尻島で推定の試みを行った。

大気中の  $^{222}\text{Rn}$  は土壤からほぼ一様に放出され、放射壊変によってのみ除去され、大気輸送を推定するのに適したトレーサーである。本研究では 2008年12月から2010年11月までの間に観測された大気中の  $^{222}\text{Rn}$  を用いて、利尻島の観測に強く影響を与える領域を季節ごとに推定した。利尻島で観測された大気中の  $^{222}\text{Rn}$  は、夏に明確な日変化（夜間に高濃度）を示したが、これは局所的な影響なので、解析には昼間のデータのみを選択した。観測された  $^{222}\text{Rn}$  の濃度と後方流跡線解析を組み合わせた結果、大陸における領域は  $90\text{--}150^\circ \text{E}$ ,  $40\text{--}60^\circ \text{N}$  (南東シベリアや中国東北部) が重要であることが示された。利尻に  $^{222}\text{Rn}$  低濃度をもたらす海洋領域は、オホーツク海とベーリング海であった。これらの解析については、化学輸送モデル N ICAM-TM によっても検証した。 $^{222}\text{Rn}$  の観測結果を基に大気中の  $\text{CO}_2$  変動に最も強く影響を与える領域が特定され、その発生源と消失源の異なる解析が可能となった。

2006年5月から2012年9月までの6年間に利尻島で観測された大気中のCO<sub>2</sub>データについて、日変化、季節変化、長期的な傾向について解析した。ある程度の空間スケールを代表する値を得るためにデータ選択を行った後、季節変化と長期的な傾向を評価した。長期的な影響を取り除いた季節変化は、4月の初め頃に最大値を、8月の半ば頃に最小値を示した。これにより、植生の生育期間としておよそ130日が推定された。最大値と最小値で決まる振幅の全期間平均値は19.9 ppmであり、2006年から2009年までの間に振幅が増加し、その後は減少した。南東シベリアや中国東北部における気象要素との関連を調べたところ、気温よりも1~2年の遅れで振幅が相關していることが分かった。その一方で、振幅と降水量の関係は、あまりはつきりしていなかった。春と夏の<sup>222</sup>Rn濃度は、2009年以降経年に減少していた。2009年以降減少したCO<sub>2</sub>の振幅は、このことから、おそらく大気循環の変化によっても影響を受けたと考えられた。

陸上生物圏での冬季炭素フラックスを調べるために、利尻島において積雪からのCO<sub>2</sub>フラックスを勾配法により推定した。風の影響を考慮した土壌CO<sub>2</sub>フラックス (0.40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) は、分子拡散のみで評価したCO<sub>2</sub>フラックスより48%大きくなると推定された。結果として、積雪期で61.9 g C m<sup>-2</sup>の土壌炭素放出を推定した。

本研究では、利尻のCO<sub>2</sub>変動に強く影響を与える領域が、<sup>222</sup>Rnの観測に基づいて導出された。これにより、微量ガスの発生源や消失源に関する研究を改善できることが示された。このような取り組みは世界でもあまり例がなく、本研究で示した手法は、炭素循環理解への新たなアプローチである。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。