



### 3. 研究の内容・成果

#### (1) 発生源・吸収源インベントリデータの収集・解析

観測対象地域の二酸化炭素発生源インベントリの全体概要を把握するため、基礎的なデータを収集し、10km または 2.5km メッシュで GIS 化を行った。本年度は、最初に北海道の二酸化炭素発生源の概要を把握し、寄与率が高い項目を重点的に、より詳細なデータ収集及び GIS 化を行った。北海道の報告（北海道温暖化防止計画資料）によると、二酸化炭素量排出源として寄与率が高い項目は、製造業（31%）、家庭（18%）、自動車（18%）、業務（12%）であることが判明した。本年度は、これらの項目について重点的に資料収集及びデータ整備を行うこととした。

データ整備は、以下の手順で行った。

- ① より精密な検証が可能となるよう、三次メッシュ化（約 1km メッシュ）する
- ② 季節変化に対応できるよう、月別のデータ化を行う。
- ③ 時刻変化に対応できるよう、時別のデータ化を行う。

メッシュ化は、既存の GIS データ（道路・建物位置等）を使用できるものについては、GIS 上で三次メッシュ化を行った。データの位置が不明確で、単純なメッシュ化作業が困難なものについては、そのデータの特徴に応じ、市町村全体に配分、市町村役場に集中、世帯数・人口で配分のいずれかの方法で行った。季節変化や時刻変化について、資料から定量的に把握できないものについては、アンケートデータ等を用いて推定を行い、GIS データ化を行った。

#### (2) 二酸化炭素フラックスの定点連続観測

本研究の基幹観測点である国立環境研究所地球環境研究センター苫小牧フラックスリサーチサイト（カラマツ人工林、約 40 年生、苫小牧市丸山）において、二酸化炭素フラックスを連続観測するとともに、精密な二酸化炭素濃度及び各種気象要素を連続測定し、モデルの有用性の検証に用いた。同時に、比較対照観測点である北海道大学北方生物圏フィールド科学センター天塩研究林に所在する天塩 CC-LaG（Carbon Cycle and Larch Growth Experiment）サイト（針広混交天然林、天塩郡幌延町）においても、苫小牧サイトと同様の観測を実施した。

その結果、天塩の二酸化炭素濃度は苫小牧と比較して変動が大きいことがわかった。これは、苫小牧が平坦であるのに対し、天塩は比較的複雑な地形で、風向風速や温湿度等の気象条件によりセンサーに到達する空気塊が入れ替わり、それによって濃度の変動が大きいことが原因と考えられる。

一方、天塩における二酸化炭素フラックスの観測では、日積算値の最大・最小値はそれぞれ  $0.42\text{mol m}^{-2}$ （7月31日）、 $-0.39\text{mol m}^{-2}$ （6月18日）であった。積雪期は大よそ  $50\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$  程度の放出が続き、1月1日から消雪（4月10日頃）までに積算で  $4.1\text{mol m}^{-2}$  の炭素の放出があった。11月14日以降の積雪期とあわせると合計で  $5.7\text{mol m}^{-2}$  の炭素の放出が積雪期に行われていることとなる。これは年間の炭素吸収量の 65% に匹敵する値である。消雪期以降は二酸化炭素の吸収が見られるようになり、9月26日には積算吸収量が最大となった。今回の解析・補間方法を用いると年間の炭素吸収量は  $106\text{gCm}^{-2}$  となった。この値は平成 13 年度に観測した苫小牧フラックスリサーチサイトの年間吸収量  $250\text{gCm}^{-2}$  の 40% の値であり、札幌で行われている落葉針葉樹林、落葉広葉樹林の吸収量と比較して、約 1/2~1/3 であった。この原因として、天然林であること、7~8 月にかけて降水量が多く、二酸化炭素フラックスの日積算値が放出となる日が多くあったことや、積雪期が比較的長いこと等が挙げられる。

以上の結果により、北海道内で比較的多雪地である天塩の観測点と、比較的少雪地であり、本研究の基幹観測点である苫小牧での結果を融合することにより、大気輸送交換モデルへの有用なパラメータの提供等の活用が行えることがわかった。

#### (3) 大気輸送交換モデルでの二酸化炭素濃度分布推定

本研究に用いたモデルは、静水圧近似方程式系を基にした力学方程式系によって気流と温位の計算を行い、計算された気流に基づいて二酸化炭素の移流拡散を計算するものである。計算領域は、北海道全域を計算する外側領域（約 10km メッシュ）と、道央部を詳細に計算する内側領域（約 2.5km メッシュ）に分けて 1-way ネスティングを行った。内外領域とも鉛直方向には 5.5km 上空まで考慮し、地上付近では 20m 程度の格子間隔を用い、上空では 200m 程度の格子間隔の可変長格子を用いた。鉛直座標は地形に沿ったいわゆる地形座標系であり、大気境界層内の鉛直拡散には closure model を使用した。地表面条件は国土数値情報に基づいて 12 種類の地形と地表面条件を考慮し、それぞれについて熱収支式を解いて大気側に与えられる顕熱・潜熱等を計算した。ここでは気象条件については定常な地衡風を仮定して、夏季に出現する可能性の大きい 5 風向について計算を行い、道央部における典型的な二酸化炭素の拡散について計算を行った。

計算は外側領域について一定値の地衡風を与え、内側領域には風向、風速、温位、比湿、二酸化炭素濃度を 1-way nesting を用いて引き渡した。地衡風向は、北海道の夏期における主風向である南東、南、南西、西、北西の 5 風向とし、地衡風速はそれぞれ 10m/s とした。天気は晴天、雲量 3 程度を仮

定し、地上風向風速及び二酸化炭素濃度分布を推定した。

その結果、風向が南、南西、北東の場合は、気団が石狩平野を東西の山に沿って抜けるため、二酸化炭素の拡散がスムーズに行われることがわかった。一方、風向が南東及び西の場合は、地上風が極めて複雑な挙動を示し、二酸化炭素の滞留等の複雑な要因が発生することが判明した。

#### (4) キャンペーン観測による当該地域の大气中二酸化炭素の動態解明

対象領域の二酸化炭素収支を測定するには、風上・風下の二酸化炭素濃度の鉛直断面を測定する必要がある。風上・風下で異なった空気塊を精密に測定する必要がある。したがって、まず航空機搭載型二酸化炭素濃度計を開発し、その濃度計で民間小型航空機による二酸化炭素濃度の鉛直断面濃度を把握することにより、キャンペーン観測を行った。

これまで、二酸化炭素濃度計は標準ガスを使用して高精度な大型のものと、標準ガスを使用しない比較的精度な小型のものに分類されていた。また、特に航空機に搭載する場合、気圧の変化によって指示値が変動し、精度を確保することが難しかった。そこで、小型の二酸化炭素濃度計にバックプレッシャーバルブによる圧力調節機能を追加し、さらに2種類の標準ガスでの校正を行うこと等により、約 0.2ppm の精度で計測可能とした。同時に、約 70cm×50cm×30cm 大のスーツケース型収納箱に全ての機器を収納することにより、小型化、高携帯性を実現した。

キャンペーン観測は、森林・草地で植物による光合成活動が存在する夏期(2002年9月16日、2003年7月23日)と、二酸化炭素の収支量が人為起源の影響のみに依存する冬期(2003年2月24日)に実施した。観測場所や飛行ルート等の選定にあたっては、前述の大气輸送交換モデル解析による推定結果を用いた。

夏期の観測については、気団が石狩平野を南北に通過する理想的な条件である、地衡風向が南、南西、北東である条件を選定して観測日を決定した。観測日の決定に際しては、GPV 予報地による気象データ、及び気象庁発表の天気予報データを用いた。飛行ルートは、気団の通過時間を考慮に入れ、苫小牧側太平洋岸と札幌側石狩湾岸を4高度の水平飛行により、二酸化炭素濃度の鉛直分布を観測した。結果としては、苫小牧工業地帯(苫小牧市東部)から排出された二酸化炭素の高濃度域が観測されたほか、苫小牧周辺部から太平洋に一旦移流した高二酸化炭素濃度の空気塊が、風向の変化によって再び陸域へ移流する様子などが観測され、大气輸送交換モデルの改良に極めて役立つ情報を得た。また、二酸化炭素濃度の鉛直分布の観測では、二酸化炭素濃度の層構造に2高度の変化点が見られ、陸域及び海域がつくる境界層の存在をうかがわせた。

一方、冬季の観測については、二酸化炭素の大規模排出源である札幌を重点的に観測した。飛行コースは、札幌市を中心とする半径10kmの円上を4高度で飛行し、二酸化炭素の鉛直水平分布を測定するものとした。観測日の選定にあたっては、冬期は降雪による視界不良のため、小型航空機の飛行が可能であるのは晴天日(無降雪日)に限られている。したがって、晴天日の可能性が高く風速が弱い、移動性高気圧に覆われる気象条件を選定した。観測は計3回行った。また、冬季の観測においては、風速の鉛直分布を把握するため、1時間に1回の頻度で札幌丘珠空港内においてパイロットバルーン観測を行った。結果としては、都市熱による上昇気流の影響と思われる高二酸化炭素濃度の空気塊が観測されたほか、札幌の風下では移流によるものと思われる二酸化炭素の高濃度域が観測された。また、風下方向にない山麓部で二酸化炭素の高濃度域が観測されたが、この原因は局地循環の影響であることが推測された。札幌市西側の東向き山腹は、森林が存在するためアルベド(反射率)が小さく、日の出と共に日射を吸収し大気を加熱する。このため、山腹上は他の地域と比較して低気圧となり、地表面付近の大気は山腹方向へ移流する。つまり、札幌市内の高い二酸化炭素濃度である大気が西側へ移流し、山腹上で上空へ輸送されるものと考えられる。このような局地的循環の結果、札幌市西側の山腹上で高い二酸化炭素濃度が観測されたものと推測された。

#### (5) キャンペーン観測とモデル計算結果の比較検証

キャンペーン観測によって得られたデータについて考察する際、その空気塊がどのような経路を経てきたかを理解することが重要である。各観測時のバックトラジェクトリを解析したところ、高度によって経路が大きく異なることが判明した。最も顕著な例は2002年9月16日に観測した値であり、特に1500mの空気塊は、2時間前には地上付近(森林上)にあったため、低二酸化炭素濃度が観測されたと示唆された。

一方、二酸化炭素排出源しか存在しない冬季の観測においては、キャンペーン観測値から推定した1秒あたりの二酸化炭素流入量は、0-340mで260kgCO<sub>2</sub>/s、340-500mで220kgCO<sub>2</sub>/s、500-700mで100kgCO<sub>2</sub>/sとなり、総計で580kgCO<sub>2</sub>/sとなった。一方、工場・事業場、家庭、自動車等の燃料消費より求めた2月の11時の二酸化炭素排出量は、図9における四角の領域全体で220kgCO<sub>2</sub>/sであり、オーダーは合っているものの過小評価となっている可能性が見受けられた。過小評価かどうかを確認するため、2月24日について二酸化炭素濃度シミュレーションを実施した。シミュレーションは既述のモデルを用い、計算は2月22日9:00より開始した。二酸化炭素発生源は人為起源のみを与えた。24日11:00の高度275mにおける風向風速と計算された二酸化炭素濃度、実測値をそれぞれ図

6-8~10に示す。風向についての計算結果は丘珠付近ではNNW、札幌市上空ではNであり、風速もほぼ丘珠空港での観測と一致している。二酸化炭素濃度については札幌市西部で高濃度である点は航空機観測と一致しているが、計算結果では最高濃度がバックグラウンドより17ppm高い。一方、航空機観測で測定したバックグラウンドとの濃度差は、最大20~30ppmであるので計算結果は低めになっている。このことから燃料消費等から推定した札幌市の排出量は過小評価である可能性が高いことが示唆された。

#### 4. 考察

本研究は、地域規模での二酸化炭素排出・吸収を観測から定量的に強化する手法を開発するための一つのケーススタディである。そのために、まず、従来からの二酸化炭素の排出・吸収に係わるインベントリデータを用いて原単位積み上げ方式で評価を行い、同時に、当該地域の気象学的特性から大幅に集約・強化した観測を行い、その観測結果を用いた大気輸送モデルから評価し、両者を比較検討するものである。

二酸化炭素吸収源データの収集及びGISデータ化においては、簡易でかつ精度の高い空間的発生源データの作成方法の開発を目的に、汎用的な公的統計値を使用し、1km四方の月別・時刻別のデータ加工手法を開発した。自動車の排出源データに代表されるような、時間的・空間的ちらばりの大きいものについては、さらに詳細なデータが必須であることが判明したが、自動車以外の主要排出源である製造業、業務、家庭のデータのGIS化については、高精度な配分が比較的簡易に行えることが判明した。また、二酸化炭素吸収源のデータ取得については、既存施設である苫小牧フラックスリサーチサイト及び新施設である天塩CC-LaGサイトにおいて既存の観測機器を有効活用しつつ、観測精度を上げるために各種観測を実施した。今後の課題としては、どのプロセスで二酸化炭素を吸収し、排出しているのかを明確にし、観測地以外の場所での二酸化炭素吸収量の算出根拠としてモデル計算に算入できるよう、プロセス研究を行うことが重要であると示唆された。

航空機搭載型二酸化炭素濃度計については、本研究の目的を鑑み、大幅な精度向上と小型軽量化を達成した。大気輸送モデルによる解析は、その有用性が示唆されたが、一方で局所的で複雑な地域風を組み込み辛いという問題も発生した。当初、本観測地域の選定にあたっては、四季を通じての卓越風向である南北方向への風が吹き抜けるため、空気塊もそれに沿って移動するものと推察していたが、バックトラジェクトリ解析などにより空気塊の挙動は単純ではないことが判明した。併せて、南北両側を海に挟まれていることにより、陸風及び海風が単一方向に流れず、空気塊の滞留や放散などが複雑に絡み合っていた。今後の課題としては、地域風を如何に組み込むかということが重要であると考えられる。

本研究の目的とする大気観測による二酸化炭素の挙動把握、特に地域規模での二酸化炭素収支研究は、京都議定書によって提出が義務づけられている二酸化炭素排出インベントリや森林による二酸化炭素吸収量を検証する手段として、今後重要視されることになると考えられる。特に欧米における二酸化炭素フラックスの研究は、地上観測拠点での「点」的観測と同時に、大気観測からの直接的な推定、「面」的観測が常識となりつつある。日本においては、地形や土地利用の複雑さから、観測、特に大気輸送モデルをはじめとするシミュレーション計算が比較的困難であるが、その必要性は増しつつある。本研究は、データベース整備、航空機搭載型二酸化炭素濃度計の開発、開発したセンサーによる観測、大気輸送モデルによる計算を一貫して実施した初めてのケーススタディであり、特にデータベース整備における方法論的知見や、汎用性の高い航空機搭載型二酸化炭素濃度計の開発などについては、今後の研究の大きな一助となると考えられる。