

学 位 論 文 題 名

# Seasonal Variation of the Atmospheric Hydrologic Cycle in Polar Regions and the Relation with Annular Modes

(極域における大気水循環の季節変化および環状モードとの関係について)

## 学位論文内容の要旨

大気を通して極域の地表へ流入する淡水フラックス(降水量と蒸発量の差: $P-E$ )は、積雪、海氷、氷床に影響を与えるため、極域の水循環にとって重要な要素である。そしてこの $P-E$ は、大気の水収支により水蒸気輸送から見積もる方法が有効である。全球の大気水循環の中で極域は年間を通して水蒸気フラックスの収束域であるという特徴がある。北極域において $P-E$ は夏(6月から8月; JJA)に大きく、冬(12月から2月; DJF)に小さい。これは水蒸気量の季節変化の影響を受けるためである。一方、南極域では冬(JJA)に大きく、夏(DJF)に小さい。これは水蒸気量の季節変化とは逆であり一見奇妙な季節変化である。先行研究では冬に $P-E$ が大きい理由として擾乱活動が冬に活発なためであると指摘している。しかし、両極域における $P-E$ の季節変化の要因が、水蒸気量と擾乱活動の季節性のどちらに起因するのか明確な解析はなされていない。また極域の大気循環は環状モード(北極振動、南極振動)と関連しており、水蒸気輸送についてもまた環状モードと関連していることがわかっている。しかしこれらの研究は、特定の緯度帯や東西平均についての解析が主である。

そこで本研究では、北極海および南極大陸へどのように水蒸気が運ばれ、また各領域における $P-E$ の季節変化の要因が水蒸気量と擾乱活動の季節性のどちらの影響を強く受けるのかについて調べた。更に環状モードに伴った水蒸気輸送、 $P-E$ および降水の偏差についての水平パターンとその季節性を調べるため、相関、回帰分析を行った。以上の解析にはECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)40年客観再解析データを用い、水蒸気フラックスの定常成分と非定常成分、2つの役割に注目した。

北極海上における $P-E$ の年平均値は195 mm/yearであり、冬(DJF)は136 mm/year、夏(JJA)は301 mm/yearである。一方、南極大陸では年平均は167 mm/year、夏(DJF)は109 mm/year、冬(JJA)は203 mm/yearである。このように両極域においていずれもJJAに $P-E$ は大きい。両極域の $P-E$ の季節変化は、擾乱による水蒸気輸送(非定常フラックス)が支配的であり、北極海上の $P-E$ は大きさ、季節振幅ともに非定常フラックスの寄与が大きい。南極大陸上においては、 $P-E$ の大きさは非定常フラックスにより決まり、その季節振幅は定常と非定常フラックスの両方が寄与している。水蒸気輸送の水平パターンを調べると、北極域では大西洋と太平洋から北極海への水蒸気流入が顕著である。夏(JJA)には水蒸気量が多くなるため水蒸気フラックスも大きくなり、その輸送は強まる。更にユーラシア大陸中部での流入と北極海上で低気圧性循環の輸送が特徴的である。前者は非定常、後者は定常成分の影響を受けている。またカナダ北極域多島海では赤道向きの流出が強くなる。南極域では南極半島付近、ウィルクスランド沖および昭和基地付近で南極大陸への水蒸気の流入が顕著であり、夏にはアムンセン海での定常成分による極向きの輸送が強まる。これにはロス海上の定常的な低気圧が影響する。両極域ともに全体の水蒸気フラックスと定常

フラックスのパターンは似ているが、定常成分の場合での極向きフラックスは弱く、赤道向きは強い、その分を非定常フラックスが担っている。一般に正味の非定常フラックスは極向きであり、低緯度から高緯度へ水蒸気を運んでいるため、この影響を受けて極向きへの水蒸気流入は強まり、流出は弱まる。

極域の  $P-E$  の季節変化に対して支配的である東西平均した極域の非定常フラックスの季節変化の要因を調べるために、水蒸気量の季節性の指標を 850hPa における比湿の南北傾度 ( $dq/dy$ )、擾乱活動の指標を南北風の分散 ( $v^2$ ) と定義した。極域 (緯度 67.5°と 70°) における東西平均した水蒸気フラックスの非定常成分の大きさは、 $\partial q/\partial y$  の大きさと南北風の標準偏差 ( $v^2$  の平方根) との積と強い相関を持ち、これらの積で線形近似できる。この線形近似の関係を用いて、 $\partial q/\partial y$  の大きさと南北風の標準偏差を三角関数で近似することで 2 つの影響を調べた。その結果、北極域では水蒸気量、南極域では擾乱活動の季節性が寄与することを定量的に評価することができた。70°N および 67.5°S での極向き水蒸気フラックスの季節変化を調べると、北極海への水蒸気の流入は、大西洋領域で DJF ピークであるのに対して、ヨーロッパと西シベリアの領域では JJA ピーク、太平洋領域では DJF, JJA 両方にピークがみられる。南極域では、南極半島の西側のベリングスハウゼン海とアムンゼン海上で流入が大きく、JJA にピークとなる。このように地域によって夏と冬のピークが違うことから、水蒸気量と擾乱活動の季節性の影響についても地域性があると示唆される。なお、水蒸気輸送の定常成分については対流圏下層 (850hPa) の平均的な風に対応している。

北極海、南極大陸上の  $P-E$  の経年変動については、顕著なトレンドはみられず、年々のばらつきが大きい。このばらつきは北極では水蒸気輸送の非定常成分よりも定常成分のばらつきの影響が大きく、南極では定常成分と非定常成分の輸送のばらつきが同程度影響している。このような経年変動とも関係する環状モードと水蒸気輸送の関連については以下のことがわかった。相関分析の結果、先行研究と同様に北極振動や南極振動が正のときに、高緯度で極向きの水蒸気フラックス偏差、中緯度で赤道向きの偏差となることが確認できた。また、南極大陸の内陸に相当する 75°S 以南の相関は弱く、南極振動とは関連していないことがわかった。北極振動が正のときには、水蒸気フラックスが北太平洋上で高気圧性循環、北大西洋上で低気圧性循環の偏差になり、大西洋中緯度では高気圧性の循環偏差となる。北極域では夏に大西洋とユーラシア中部で極向き、カナダ北極域多島海で赤道向きの偏差が顕著になる。一方、南極振動が正のとき、南極大陸周囲で東向き、中緯度で西向きの偏差となる。またベリングスハウゼン海およびアムンゼン海上で低気圧循環の偏差となる。以上の環状モードに伴った水蒸気フラックスの偏差は、環状モードに伴った対流圏下層の風の偏差に対応する。また、環状モードに伴った水蒸気フラックスの変化は、定常成分との関連が強い。ただし、極向きの水蒸気フラックス偏差は、擾乱成分も無視できない。 $P-E$  については、北極振動が正のときに、冬にアイスランド付近と北ヨーロッパで増加、南ヨーロッパおよび大西洋中緯度で減少となり、日本からベーリング海へ北東に延びる領域は増加、北東太平洋上で減少の偏差となる。南極振動が正のときには、南極大陸の周囲で増加、亜熱帯域で減少の偏差になる。この結果は降水量と環状モードとの関連についての結果ともほぼ整合的である。

以上、本研究によって得られた大気水循環の季節変化の要因解明および環状モードと水蒸気輸送や降水との関連は、極域全体の水循環とその経年変動の評価にとって有益な結果である。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	山崎孝治
副査	教授	池田元美
副査	教授	長谷部文雄
副査	助教授	渡部雅浩
副査	講師	遊馬芳雄 (大学院理学研究科)

### 学位論文題名

## Seasonal Variation of the Atmospheric Hydrologic Cycle in Polar Regions and the Relation with Annular Modes

(極域における大気水循環の季節変化および環状モードとの関係について)

極域の大気水循環は、積雪、海氷、氷床に影響を与えることから重要である。全球の大気水循環において極域は年間を通して水蒸気フラックスの収束域であるという特徴がある。月平均の時間スケールでは水蒸気フラックスの収束は降水量と蒸発量の差 ( $P-E$ ) にほぼ等しいので、極域は降水量のほうが蒸発量より多い地域である。北極域では  $P-E$  は夏 (6月から8月; JJA) に大きく、冬 (12月から2月; DJF) に小さい。これは水蒸気量の季節変化の影響を受けるためである。一方、南極域では冬 (JJA) に大きく、夏 (DJF) に小さい。これは水蒸気量の季節変化とは逆であり一見奇妙な季節変化である。先行研究ではこの季節変化を擾乱活動が冬に活発なためであると指摘しているが、明確な解析はなされていない。また極域の水循環は環状モード (北極振動・南極振動) と関連していることがわかっている。しかしこれらの研究は、特定の緯度帯や東西平均についての解析が主である。

そこで本研究では、北極海および南極大陸へどのように水蒸気が運ばれ、また各領域における  $P-E$  の季節変化の要因が水蒸気量と擾乱活動の季節性のどちらの影響を強く受けるのかについて評価した。更に環状モードに伴った水蒸気輸送、 $P-E$  および降水量の偏差についての水平パターンとその季節性を調べるため、相関、回帰分析を行った。以上の解析には ECMWF 40 年客観再解析データを用い、水蒸気フラックスの定常成分と非定常成分の2つの役割に注目した。ここで定常成分は月平均場によるフラックス、非定常成分は一月より短いスケールの変動成分と定義した。

北極海上における  $P-E$  の年平均値は 195 mm/year であり、冬 (DJF) は 136 mm/year、夏 (JJA) は 301 mm/year である。一方、南極大陸では年平均は 167 mm/year、夏 (DJF) は 109 mm/year、冬 (JJA) は 203 mm/year である。両極域の  $P-E$  の季節変化に対し

て、非定常擾乱による水蒸気輸送（非定常フラックス）が支配的であり、北極海上の  $P-E$  は大きさ、季節振幅ともに非定常フラックスの寄与が大きい。南極大陸上の  $P-E$  の大きさは非定常フラックスにより決まり、その季節振幅は定常と非定常フラックスの両方が寄与している。

極域の  $P-E$  の季節変化に対して支配的である東西平均した極域の非定常フラックスの季節変化の要因を調べるために、水蒸気量の季節性の指標を 850hPa における比湿の南北傾度 ( $\partial q/\partial y$ )、擾乱活動の指標を南北風の分散 ( $\overline{v'^2}$ ) と定義した。極域（緯度 67.5°と 70°）における東西平均した水蒸気フラックスの非定常成分の大きさは、 $\partial q/\partial y$  の大きさと南北風の標準偏差 ( $\overline{v'^2}$  の平方根) との積と強い相関を持ち、これらの積で線形近似できる。この線形近似の関係を用いて、 $\partial q/\partial y$  の大きさと南北風の標準偏差の季節変化を三角関数で近似することで2つの影響を調べた。その結果、北極域では水蒸気量、南極域では擾乱活動の季節性が寄与することを概念的に評価することができた。具体的には、水蒸気量の季節変化の振幅の年平均に対する比が擾乱活動の対応する比より大きい北極域では、水蒸気フラックスの非定常成分は夏に極大となり、擾乱活動の相対比が水蒸気量の相対比より大きい南極域では冬に極大となる。

北極海、南極大陸上の  $P-E$  の経年変動については、顕著なトレンドはみられず、年々のばらつきが大きい。このばらつきは北極では水蒸気輸送の非定常成分よりも定常成分のばらつきの影響が大きく、南極では定常成分と非定常成分の輸送のばらつきが同程度影響している。

環状モード（北極振動・南極振動）と極向き及び東向き水蒸気フラックスとは高緯度で正の相関、中緯度で負の相関がある。この結果は先行研究と整合的であった。さらに、南極大陸の内陸に相当する 75°S 以南の相関は弱く、南極大陸上の水蒸気輸送と南極振動とは関連していないことがわかった。環状モードに伴った水蒸気フラックスの偏差は、環状モードに伴う対流圏下層の風の偏差と対応している。環状モードに伴った水蒸気フラックスの偏差は定常成分との関連が強い。ただし極向きフラックスの偏差については擾乱成分も無視できない。また環状モードに伴った  $P-E$  の偏差は水蒸気フラックスの定常成分の偏差で説明できることがわかった。

これらの研究成果は極域における水循環の季節変動・経年変動の理解を深めるものである。地球温暖化の進行により北極域の海氷の顕著な減少が観測され、南極氷床がどうなるか懸念されているが、当研究は極域水循環の将来の変動に関して示唆を与えるものであり、今後の発展が期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有すると判断した。