

公益信託エスペック地球環境研究・技術基金

受託者 みずほ信託銀行株式会社 御中

報告書

北極域の海氷域面積と気象条件への影響評価 ～北極振動による農業生産予測への適用～

松村寛一郎 東京農業大学生物資源学部 准教授

門田萌 北海道大学大学院 環境科学院 地球圏科学専攻 大学院生

2014 年 10 月

概要

近年、台風、洪水、干ばつなどの気候変動が激しくなっている。農産物生産の不安定要因が高まっており、農業生産を含む人間活動への影響が危惧されている。北極域の海氷面積が減少傾向にあることが、蓄熱源としての海氷域の役割を低下させることにより、気候変動を激しくしている可能性がある。定期路線の航空機で北極上空を移動すると、海氷の割れ目から水蒸気が勢いよく噴き出している光景をみることがある。低温状況にある北極域において、海氷域の減少に伴って、海からの熱供給が増えており、北極域における気圧場に対して影響を与える可能性がある。北極域の海氷域との関連が存在すると考えられる高緯度地域における北極振動 (Arctic Oscillation) の変化とカナダのオカナガン地域における極低温現象 (Arctic Outflow Event: AOE) に着目した。北極振動 (Arctic Oscillation) は、北極と北半球中緯度地域の気圧が相反して変動する現象であり、北極海の低圧部とその周りの偏西風の循環、北太平洋と北大西洋の高圧部の組み合わせとして認識され、北極振動の形が強まった時には北極指数は正となる。日本が寒い冬になるのは、北極振動指数が負のときであることが知られている。北極海の海氷減少と北極振動が相互に影響を行っていることが指摘されている (池田ら、2001)。国立極地研究所が開発した空間軸と時間軸の双方から構成される Arctic Data Archive System (ADS) システムに対して、同研究所の杉村先生の協力を得て、イギリスの East Anglia 大学の Climatic Research Unit (CRU) と交渉して許可をいただき、CRU により提供される月別の気温と降水量のデータを展開した。空間情報から点のデータを抽出することが可能となった。本報告において、気象条件を示す指標として用いた月別の 500hPa のジオポテンシャル高度 (geopotential height) の再解析データは、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) より入手した。

農業生産と気候変動の関係を定量的に把握するために、カナダのプレーリー地域を対象として北極振動の農業生産予測への適用の可能性について言及した。北極振動の農業生産予測への適用は、中国東北部においても試みられている。カナダのブリティッシュコロンビア大学とカナダ環境省の協力を得てカナダのロッキー山脈の西側に広がるオカナガン地域の極低温現象 (Arctic Outflow Event) の動向に注目した。オカナガン地域は、日本の北海道に似た風土であり、高付加価値な果樹栽培で知られており、極低温現象が果樹栽培に対して与える影響が大きい。

AOE が最も多く発生した冬季の上位 5 年の 500hPa 高度偏差の平均値と冬季の気圧場の

時系列データに対して主成分分析を行った際の気圧場の第 3 主成分が類似していることを発見した。AOE の発生頻度と 500hPa 高度偏差の第 3 主成分の時系列変化には、0.596(有意水準 1%)の相関がみられた。

1979 年から 2012 年までの期間の月別の 500hPa のジオポテンシャル高度データを用いて、12 月から 2 月 (DJF と記載: December, January, February)、1 月から 3 月 (JFM)、2 月から 4 月 (FMA)、3 月から 5 月 (MAM)、4 月から 6 月 (AMJ)、5 月から 7 月 (MJJ)、6 月から 8 月 (JJA)、7 月から 9 月 (JAS)、8 月から 10 月 (ASO)、9 月から 11 月 (SON)、10 月から 12 月 (OND)、11 月から 1 月 (NDJ) の 3 カ月毎の 500hPa 高度偏差の平均値に対して主成分分析を行った。解析結果をみると、第 1 主成分は、北半球環状モード・北極振動(NAM/AO)を示しており、第 2 主成分についても北緯 70 度までの 500hPa 高度のパターンと類似することを確認した。季節毎の第 1 主成分から第 5 主成分までの時系列変化、冬季における AOE の発生頻度、オホーツクの海氷域の相関関係を求めた。

人間活動にくらべて、植物は気候変動の影響を受けやすく、その影響が危惧されている。カナダのプレーリー地域における春小麦の単収を、月別の気温、降水量、500hPa のジオポテンシャル高度、前年の単収を説明変数として説明することを試みた。収穫時期よりも早い段階で収量を予測することが可能となり、海氷域の状況から北半球高緯度域における農業収量の影響評価を行うことの可能性が見えてきた。

研究代表者の松村は、2014 年 10 月より、東京農業大学生物資源学部 に所属している。東京農業大学が運営する網走寒冷地農場周辺では、6~8 戸の農家が共通の機械利用をすることで(一軒で機械や機具類をフル装備にすると 1 億円近い投資となる)機械装備のコスト負担を軽減した効率的な農業経営を実現している。気象(気温、湿度)、土壌分析、作物の収穫量、作業履歴、農薬散布や肥料の投入量等の蓄積がある。網走寒冷地農場における穀物単収推移と月別の気温・降水量、北極振動、オホーツクの流氷域との関係式を過去の時系列データを用いた解析の準備を進めている。北海道銀行の協力を得て、ホクレン農業組合連合会がロシアのアムール地域で展開している大豆栽培への適用の可能性が期待できる。共同研究者の門田は、2014 年 4 月から北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻雪氷・寒冷圏科学コース低温科学研究所・環オホーツク観測研究センターへ進学しており、2014 年 9 月には、スイスのチューリッヒ工科大学のサポートの元、ローヌ氷河での実習を通じて、地球規模で起きている環境変化の指標としての氷河を利用するにあたっての解析方法を習得した。その経験は、研究の深化に資すると考えている。

目次

1. はじめに	2
2. 気圧場に対する主成分分析	4
3. オホーツクの海氷域	7
4. 極低温現象 (Arctic Outflow Event)	8
5. コンボジット解析	10
6. 農業と気象条件のサーベイ	11
7. カナダプレーリー地域と気象条件	12
8. 推計方法と近未来予測	15
9. カナダの氷河とスイスの氷河	21
10. まとめと今後の展開	25
参考：気象条件抽出システム	27

1. はじめに

北極域の海氷の減少に伴う気象条件の変動が大きくなっており、人間活動と密接な関係がある農業生産への影響が危惧されている。北極環境の変化により農業生産可能地域の拡大が期待されている一方で気象条件の影響が懸念されている。オホーツク海とアリューシャン低気圧の関係について、Tachibana et al. (1996)が、1989 年以降のオホーツク海南部の海氷の激減が、アリューシャン低気圧の弱化によるものであることを示している。Honda et al (1996)は、大気大循環モデル(AGCM)を用いてオホーツク海が大気場に与える影響について調べ、多氷と少氷に対する大気場の応答の差が北米大陸まで現れていることを示した。北極海の家氷減少と北極振動が相互に影響を行っていることが指摘されている(池田ら、2001)。

北極振動(Arctic Oscillation)は、北極と北半球中緯度地域の気圧が相反して変動する現象であり、北極海の低圧部とその周りの偏西風の循環、北太平洋と北大西洋の高圧部の組み合わせとして認識され、北極振動の形が強まった時には北極指数は正となる。日本が寒い冬になるのは、北極振動指数が負のときであることが知られている。図 1 に米国大気海洋庁が提供している月平均の北極振動の推移を示す (NOAA、2014)。

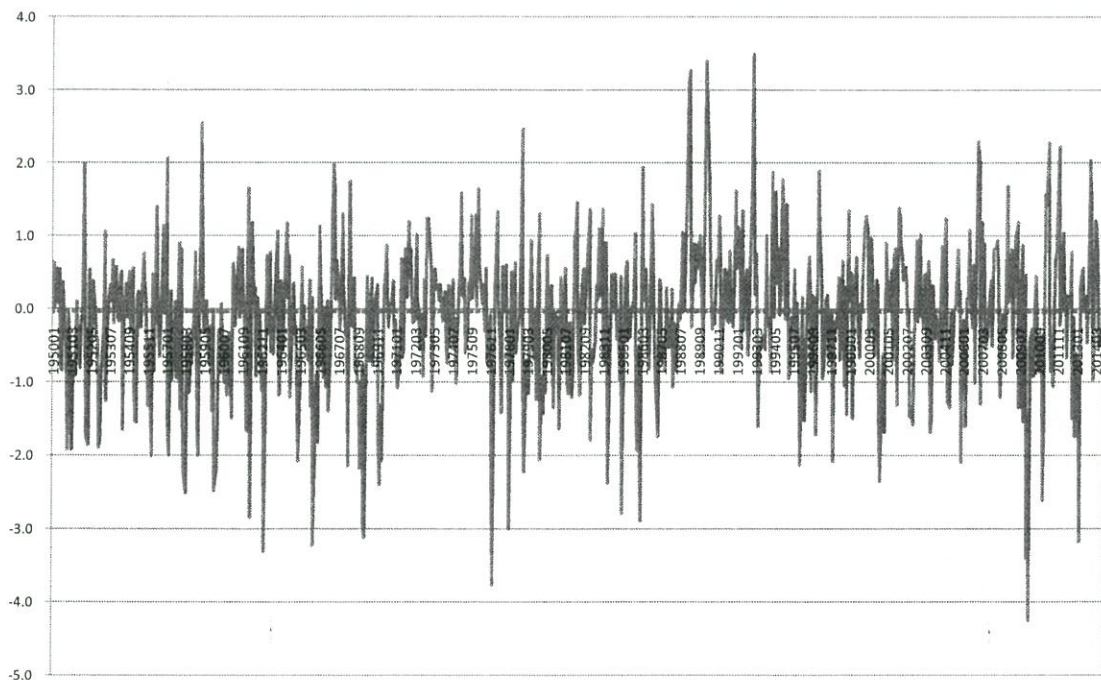


図 1. 月平均 AO Index の推移(1950 年 1 月～2014 年 9 月)

北半球 500hPa（高度約 5000m）の大気圧データに経験直交関数(EOF)を用いて解析すると、振幅の一番大きな第 1 主成分として北極振動が得られる。この成分は北半球の様々な地域で異常気象との関連が指摘されている。冬季における北極振動が正の値を示した 1989、1990、1993、1995、2000、2002、2003、2007 年の冬季には、日本が暖冬であったことが指摘されている。トレンドとしては地球温暖化と北極振動数はプラスを示すが、10 年スケールの変動の場合は、北極振動数は減少している（田中、2008）。北極振動の果たす役割が北半球高緯度地域において大きい。

本報告書は、北極域の海氷と北極振動の関連性、気象条件は気圧分布に大きく依存するので、大気科学で広く用いられている月別の 500hPa のジオポテンシャル高度 (geopotential height) の再解析データへの主成分分析の適用、カナダのロッキー山脈の西側に広がるオカナガン地域の極低温現象 (Arctic outflow event) の動向を俯瞰し、北半球の高緯度地域であるカナダのプレーリー地域における農業収量予測を試みた。具体的には、以下の a～e の手順で解析を行った。

a. ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)より提供されている月別の 500hPa 気圧場のデータより、12 月～2 月(冬季)、3 月～5 月、6 月～8 月、9 月～11 月における平均の気圧場のデータの構築

b. それぞれの時期の平均の気圧場に対して主成分分析を行うことで、気圧場のデータの特徴を抽出

c. オホーツク海の海氷域面積が最も大きい時期、カナダ西部の冬季の極低温現象 (AOE) が発生した日数が最も多い、冬季の平均の気圧場を求める。

d. 類似形のパターンを抽出し、それぞれの時期における気圧場のパターンの時間変化を求める。

e. カナダのプレーリー地域における農業収量予測への適用可能性の検討

2. 気圧場に対する主成分分析

ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF) より提供されている月別の 500hPa ジオポテンシャル高度 (geopotential height) の再解析データを用いた。同サイトでは、気温や降水量といった気象データについても、より細かい時間スケールでの提供がされている。

The screenshot shows the ECMWF website interface. At the top, there is a navigation bar with links: Home, Your Room, Login, Contact, Feedback, Site Map, and a Search box. Below this, a secondary navigation bar lists categories: About Us, Products, Services, Research, Publications, and News&Events, each with sub-links. The main content area is titled 'ERA Interim, Daily Fields'. On the left, a sidebar lists 'Type of level' (Potential, temperature, Potential vorticity, Pressure levels, Surface) and 'ERA Interim Fields' (Daily, Invariant, Synoptic Monthly Means, Monthly Means of Daily Means). The main content area features a 'NEW Data Server' notice, a note about accepting conditions of use, and a 'Select data' section. This section includes a date range selector (1979-01-01 to 2014-06-30) and a 'Select a list of month:' table. The table has two rows of month headers (Jan-Dec) and columns for years from 1979 to 2013, with checkboxes for data selection.

図 1. ECMWF データ提供サイト

同サイトから 1979 年から 2012 年までの月別のデータ (DJF は 2011 年まで) を抽出した。12 月から 2 月 (DJF)、1 月から 3 月 (JFM)、2 月から 4 月 (FMA)、3 月から 5 月 (MAM)、4 月から 6 月 (AMJ)、5 月から 7 月 (MJJ)、6 月から 8 月 (JJA)、7 月から 9 月 (JAS)、8 月から 10 月 (ASO)、9 月から 11 月 (SON)、10 月から 12 月 (OND)、11 月から 1 月 (NDJ) の 3

カ月毎の 500hPa 高度偏差の平均値の時系列データを構築した。

大気科学で広く用いられている手法である主成分分析を 3 カ月毎の 500hPa 高度偏差の平均値の時系列データに対して行った。主成分分析は、相関係数行列を使う方法と分散共分散行列を使う方法の 2 種類がある。本報告書で利用した ESRI 社の地理情報ソフトである ArcGIS は、分散共分散行列を使った方法のルーチンを備えている。このソフトでは、主成分得点の分布図を描画するにあたって、最低値をゼロとするスケール変換を行っているが、主成分得点の分布の高低を判読する際には問題ないと考えた。確認のために、フリーの統計ソフトである R を使った主成分分析を行い、両者の解析結果の比較を行った。ArcGIS においては、分散共分散行列から主成分を求める方法を使っている。相関行列を使わない方法で計算をおこなっており、さらに空間情報を表示する際に最低値をゼロとする調整が行われていることを確認した。”

北極振動は、特に冬季に強く現れるとされている。12 月から 2 月までの冬季のデータに対して主成分分析を行った結果を図 2 に示す。第 1 主成分は、北半球環状モード・北極振動(NAM/AO)を示している。

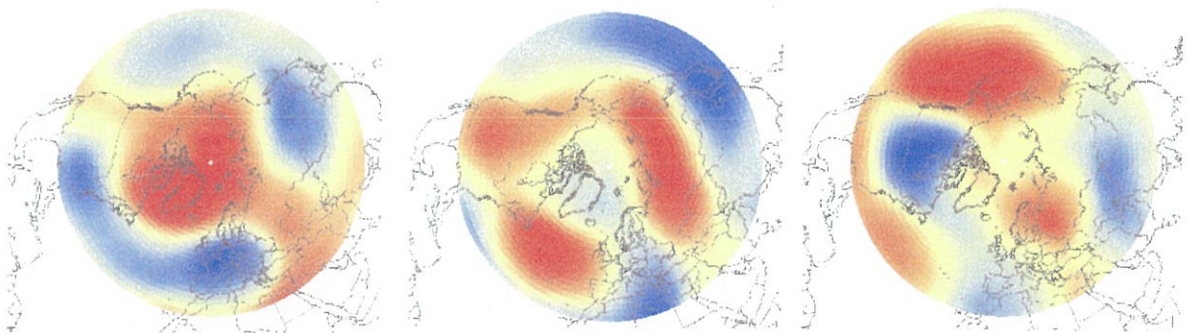


図 2. 冬季の 500hPa 高度偏差への主成分分析結果、第 1 主成分(左端)、第 2 主成分(中心)、第 3 主成分 (右端)

図 3 と 4 に 9 月から 11 月の 500hPa 高度偏差の平均値に対する主成分分析結果の第 2 主成分と 10 月から 12 月の 500hPa 高度偏差の平均値に対する主成分分析結果の第 2 主成分を示す。図 2 に示される 12 月から 1 月の空間パターンもふまえると、冬季にむけて第 2 主成分の空間分布パターンがより鮮明になっていく様子が示されている。

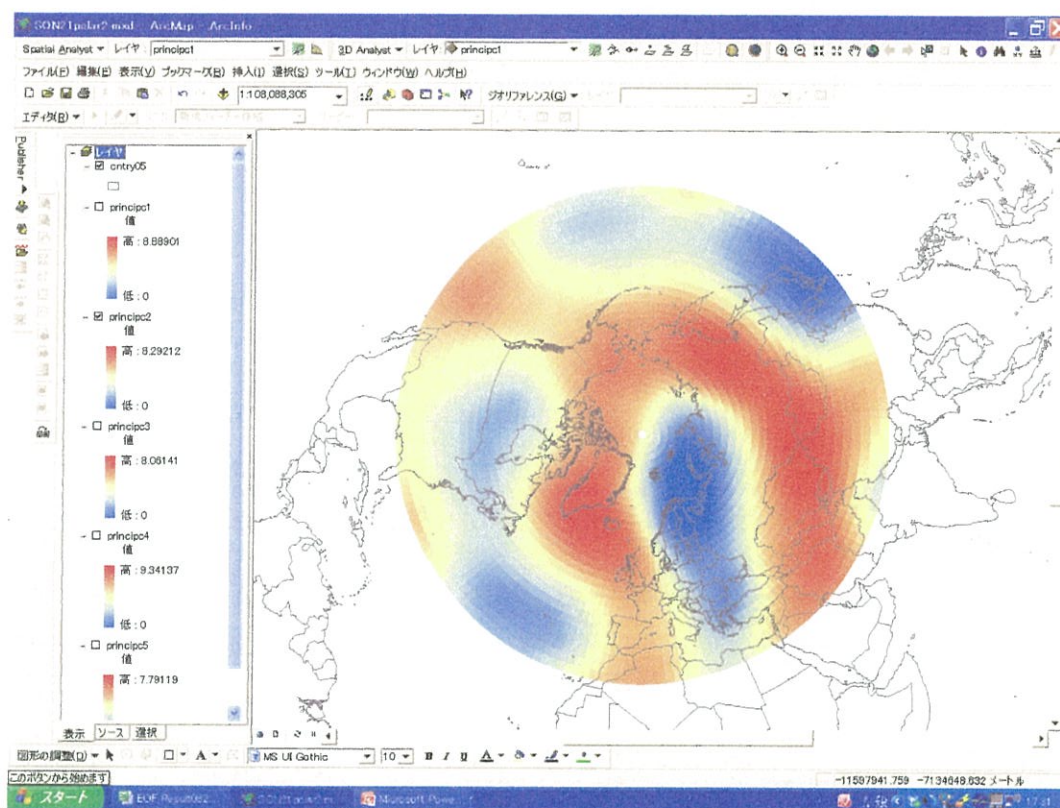


図 3. 500hPa 高度偏差への主成分分析結果、9月から11月の第2主成分

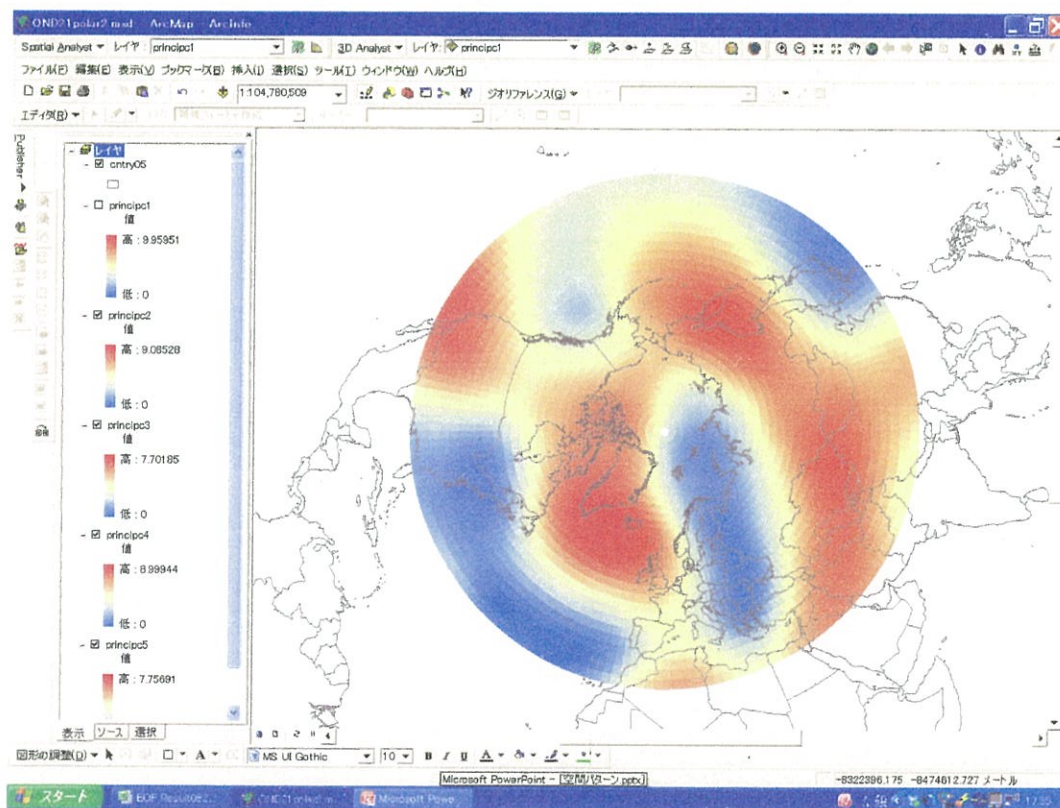


図 4. 500hPa 高度偏差への主成分分析結果、10月から12月の第2主成分

3. オホーツクの海氷域

オホーツク海は、北極域の南限に位置し、流氷が観測される地域としては緯度が低く、世界でも他に類をみない地域とされている。オホーツク海とアリューシャン低気圧の関係について、Tachibana et al. (1996)が、1989 年以降のオホーツク海南部の海氷の激減が、アリューシャン低気圧の弱化によるものであることを示している。オホーツクの海氷域は、1970 年 12 月 15 日から 2012 年 7 月 31 日までの半旬毎（毎月 5 日、10 日、15 日、20 日、25 日および月末）の海氷域面積が収録されている（気象庁 2013）。1979 年の冬から 2011 年の冬までのオホーツク海の年最大海氷域面積の推移（気象庁、2012）を図 5 に示す。

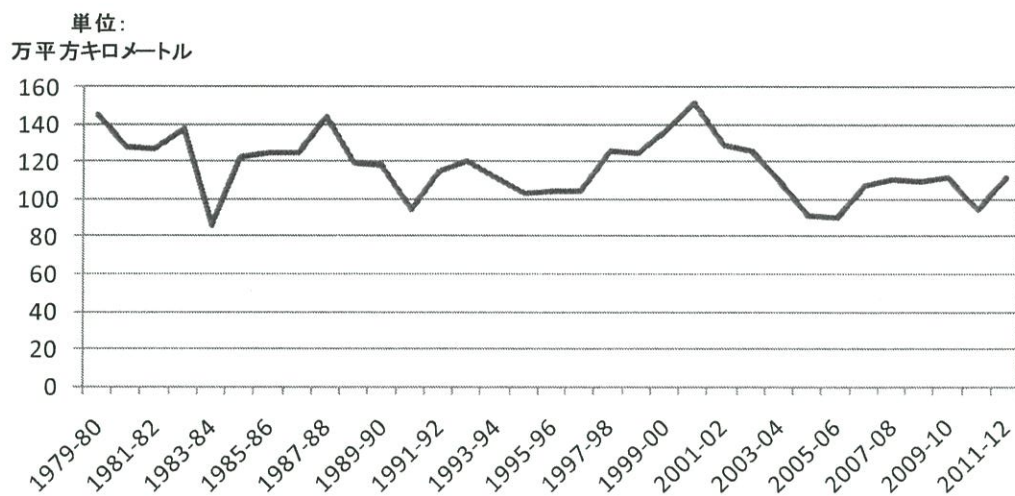


図 5. オホーツク海の年最大海氷域面積推移

1979 年 1 月から 2009 年 12 月の期間において、このデータより 12 月から 2 月までのオホーツクの海氷域面積が最大になった年として 2000/01, 1979/80, 1987/88, 1982/83, 1999/00 を抽出した。2000 年以降、観測値がゼロの年が頻発している。オホーツク海は、気象条件の影響を受けるために、変動が激しいが、長期的には減少傾向にあるとされている。1979 年の冬季から 2011 年の冬季までの期間を対象として、オホーツクの海氷域が大きい上位 5 年として 2000 年の冬(152)、1979 年の冬(145)、1987 年の冬(144)、1982 年の冬(138)、1999 年の冬(137)を選択した。() 内は、最大海氷域面積で単位は万平方キロメートル。

4. 極低温現象 (Arctic Outflow Event)

カナダ西部の極低温現象(Arctic Outflow Event: AOE)は、北米大陸の西海岸に近いところに高気圧が存在し、太平洋上に低気圧が存在している状況下で発生する。カナダ西部のオカナガン地域は、温暖な気候条件下での高付加価値の農産物生産地として知られているが、AOE により農産物生産が大きな打撃を受ける。冬季に AOE が発生すると、土壌の凍結など、その影響が春先までおよび、農産物の生育に対し影響を及ぼすこともあるという。

カナダの環境省の好意により提供いただいた AOE データは、カナダ西部のオカナガン地域における気象観測所のデータに基づき、1948 年 1 月 1 日から 2009 年 4 月 25 日までの期間において、AOE が発生した日がまとめられている(Quamme ら 2010)。1979 年から 2009 年における 12 月から翌年の 2 月までの冬期間における AOE が発生した日数を図 6 に示す。

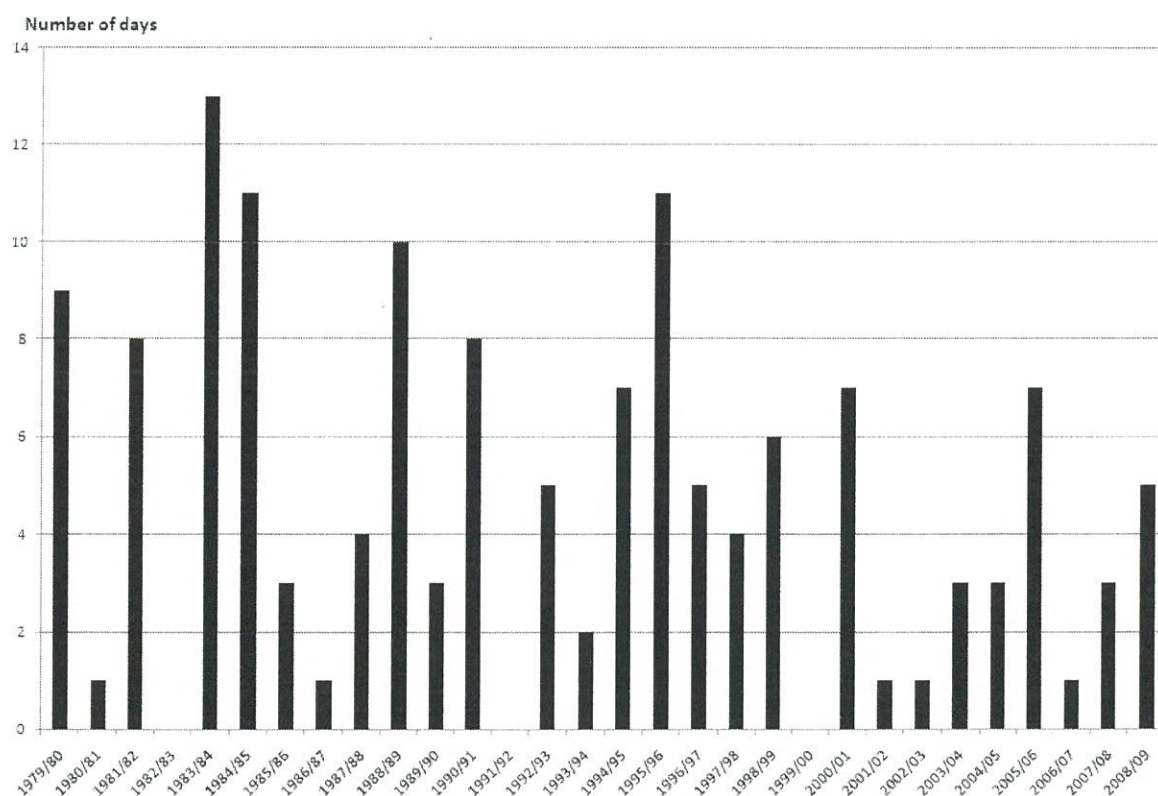


図 6. 冬季(12 月から 2 月)の、カナダの西海岸のオカナガン地域における
極低温現象 (Arctic Outflow Event) が発生した日数

12 月から 2 月の期間である冬季の AOE の発生日数 () は、多い順から 1983/84(13), 1984/85(11), 1995/96(11), 1988/89(10), 1979/80(9), 1981/82(8), 1990/91 (8), 1994/95(7), 2000/01(7), 2005/06(7), 1998/99(6), 1992/93(5), 1996/97(5), 2008/09(5), 1987/88(4), 1997/98(4), 1985/86(3), 1989/90(3), 2007/2008(3), 2003/04(3), 2004/05(3), 1993/94(2), 1980/81(1), 1986/87(1), 2001/02(1), 2002/03(1), 2006/07(1), 1982/83(0), 1991/92(0), 1999/00(0) となっており、1982/1983 年、1991/1992 年、1999/2000 年には、発生していない。冬季の AOE が発生した日数が多い上位 5 年として 1983/84(13), 1984/85(11), 1995/96(11), 1988/89(10), 1979/80(9)を抽出した。ヨーロッパ中期予報センターが提供する月別の 500hpa 高度データを用いた(ECMWF 2013)。各月の高度は、東西方向に 180 地点、極域から中緯度方向へ 30 地点の合計 5400 個の格子点より構成されている。各格子点は、2 度の大きさとなっている。

12 月から 2 月までの冬季に注目し、カナダの西海岸において、極低温現象 (Arctic Outflow Event) が発生した回数が多い年の北半球における 500hPa の気圧場偏差の平均値を求め、図 7 に示す。同データを用いて経験直交関数を求めた際に、第 3 主成分の空間パターンと類似しており相関係数は有意水準 1%で 0.49 であることが示された。

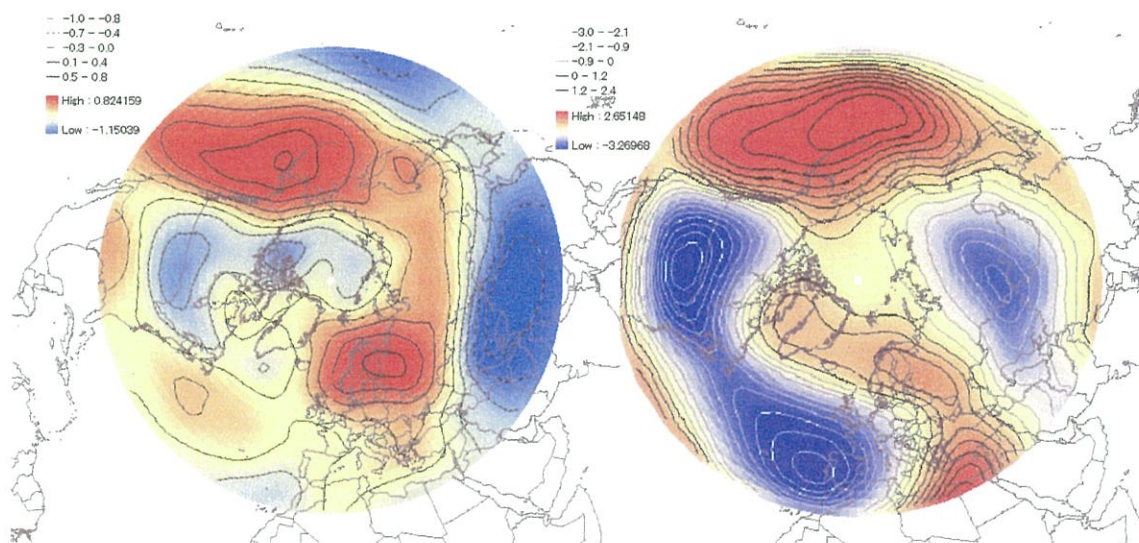


図 7. Arctic Outflow Event が最も発生した上位 5 年の冬季の 500hPa 気圧場偏差の平均値 (左) と同データに対する経験直交関数の第 3 主成分の空間パターン (右)

5. コンポジット解析

冬季における AOE が発生した上位 5 年とオホーツクの海氷域面積の最大値の上位 5 年における冬季 500hPa 高度偏差の平均値を求めた。統計的有意性の検証のために、モンテカルロ手法に基づいた任意の 5 年分のデータの組合せ 1000 個を求め、それぞれの組み合わせの平均値を求めて大きい方から小さい方へ並べたヒストグラムを構築した。この平均値の組み合わせの分布はゼロに近い分布が最も多くなるように構成されている。上位から 50 番以内であれば、1000 回抽出して 50 回しか起きない現象であり、統計的には 95% の信頼限界を超える（5% の有意水準）といえる（松山・谷本、2005）。同様に下位から 50 番以内の場所を抽出した。冬季における AOE が発生した上位 5 年とオホーツクの海氷域面積の最大値の上位 5 年における冬季 500hPa 高度偏差の上限値と下限値の 5% の有意水準を示す地域を空間的に求めた。

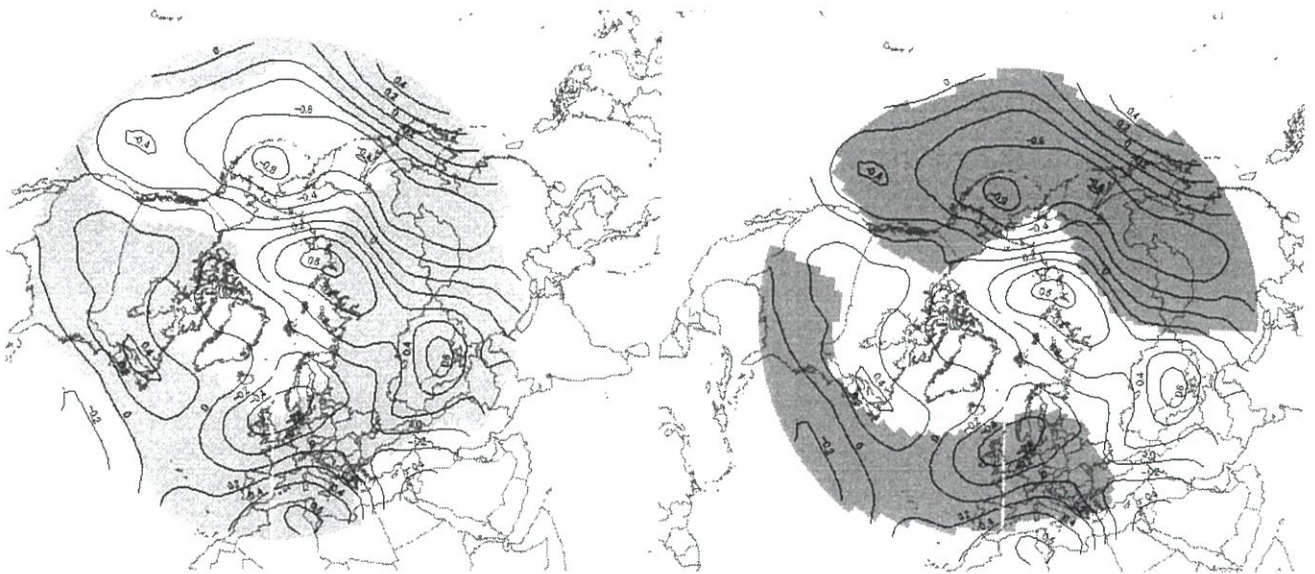


図 8. オホーツク海の海氷域最大値 Top5 有意水準 5% の地域、上限値（左側）と
下限値（右側）

6. 農業と気象条件のサーベイ

人間は体温が一定に保たれているために気候による成長や生理に対する変化は起きにくい、農作物は敏感である。北極域の海氷面積の減少による農業生産への影響が危惧されている。また食の安全への関心が高まり、非遺伝子組み換え作物への関心が高まっている。洪水や干ばつなどの気象条件変化が激しくなることで農産物生産の不安定要因が高まっている。(浜地、吉田 1989) は、1966～1980 年のビール大麦の全生育期間の気象要因とビール大麦の収量は、気温と降水量が収量と負の関係にあり、日照時間が収量と正の関係にあることを定量的に示した。水稻の単収と気象条件との関係に関する研究は、発育段階の質的变化と量的変化を考慮し、アメダス気象データ（気温、日射量、降水量）を用いた成長モデルが開発されている(Seino Hiroshi 1993)。(David, 2007)は、穀物単収が、毎日の最高気温と最低気温の差(DTR)よりも平均気温によって説明されることを示した。

めざましい経済発展を遂げつつあり、多くの人口を抱える世界最大の農業生産国である中国にとって、食料の安定供給は重要課題である。中国の沿岸部、南部の地域は、複数の穀物を時期を年に何回かに分けて栽培することができるために、気象条件などの影響への対応を行うことができる。ところが、中国の東北部は、冬季は、低温になり、雪に閉ざされてしまうために農業生産ができなくなるため、特に夏季期間における穀物の安定供給が求められている。JIA Jian-ying et al (2010) は、中国東北部の 9 か所における 1961 年から 2006 年までの日平均気温、最高気温、最低気温、降水量と日射量の気象データとトウモロコシの単収との関係をもとめた。トウモロコシの単収を傾向値によるものと気象条件の影響によるものに分割した推計式を用いた。1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて単収の劇的な増加がみられることを踏まえ、時期を分割して影響評価を行った。1974 年以前は、気象条件はトウモロコシ単収に負の影響を与え、1974 年から 1980 年後半までは、正の影響を与えたことを示した。1990 年代後半から 2000 年代にかけては、最高気温の増加による影響が大きく出ていることを示した。Ju Hui et al (2007)は、中国東北部における気温上昇と降水量減少の環境への影響評価を行った。気温の上昇による霧の影響が少なくなり、また栽培期間が長くなることで穀物への好影響を及ぼす一方で、湿地帯への負の影響を指摘した。GAO Tie-hua et al (2010)は、吉林省における 1986 年から 2008 年までのトウモロコシ単収と積算気温、降水量、日照時間の関係を求めた。日照時間の単収への寄与はなく、降水量の増加が、単収増加へ寄与することを示した。

7. カナダプレーリー地域農業と気象条件

カナダのプレーリー地域における気象条件の影響評価に関して、様々な研究が行われてきた。Qianら(2009)は、カナダのプレーリー地域は、世界的にも有数の穀物生産地であり、生産量の8割以上が国外へ輸出されていることを示し、穀物の生育過程に対応する日別の水使用量と土壌水分量を用いることで、カナダのプレーリー地域における春小麦の単収を説明する方程式を求めた。1976年～2006年までのデータを用いた推計結果によれば、アルバータ州で77%、サスカチュワン州で64%、マニトバ州で63%の変動の説明を示した。作付けの開始時期よりも、収穫時期に近い変数を用いた方により説明力が高まることを示した。Williamら(1998)は、カナダのプレーリー地域の小麦単収が最も大きい時期と小さい時期における月別海水面気温12月(収穫の前年)、1～4月(収穫と同年)における海水面気温の関係を求めた。表面海水温が高いほど、小麦の単収が低くなることが示された。カナダのプレーリー地域は、2013年6月には、アルバータ州のカルガリーの周辺で10万人を超える人々に洪水のために避難勧告が出された(CNN 2013)。いっぽうでカナダ西部を中心とする記録的な干ばつと高温のために2002年度が農家にとって記憶に残る深刻な不作になった。2002年は穀物輸出国としての米国、カナダ、オーストラリアが干ばつに見舞われ、国際的な穀物相場に大きな影響が及ぼされた。(農林水産省 2007)。

カナダの統計局よりカナダプレーリー地域における農業の境界データが提供されている(Census Agricultural Regions 2011)。境界データに対して、Esri社が提供する地理情報ソフトであるArcGISを用いて各農業の境界に対する重心を求めた。

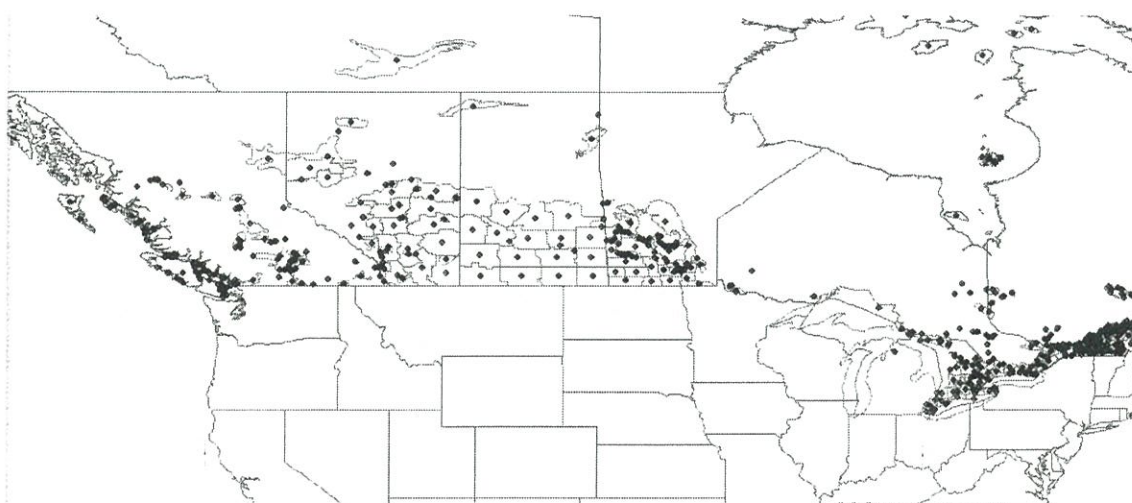


図9. 農業境界と重心

カナダ全域を複数の地域 SAD(Small Agricultural Division)における単収データを入手することができた。SAD の地理情報としてのデータが提供されていないために、カナダの統計局が構築した農地分類データ (Statistics Canada 2006) を入手した。SAD は、複数の CAR(Census Agricultural Regions)より構成されているために、紙ベースで提供されている SAD の空間情報との組み合わせを目視で土地勘のあるウイニペグ出身のカナダのブリティッシュコロンビア大学の研究者であるマイケルジョンソン氏の協力を得て遂行した。

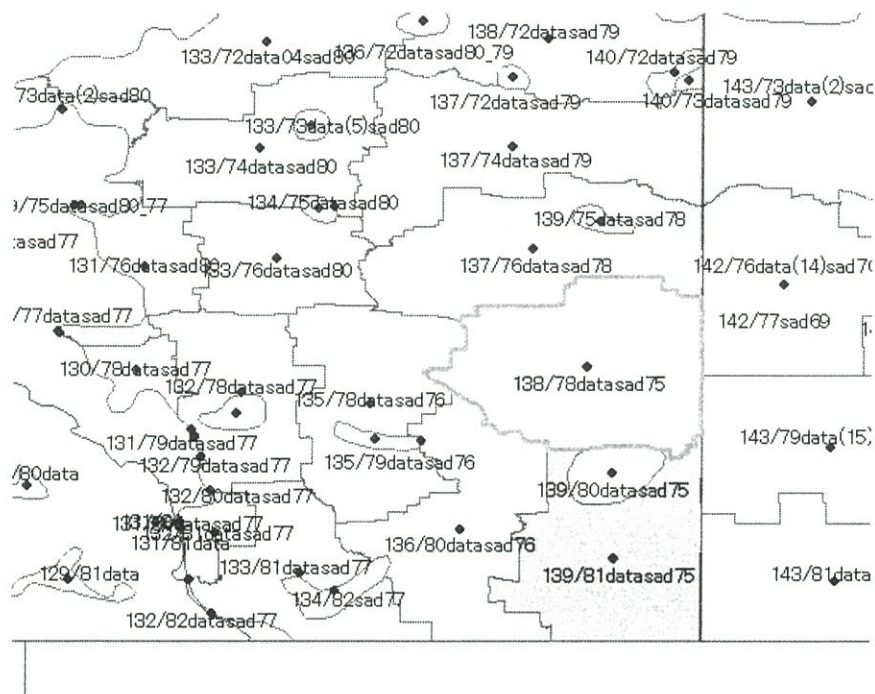


図 10. 重心と気象データの関連付け

月別気温と月別降水量は、イギリスの University of East Anglia による Climatic Research Unit (CRU)から提供されている CRU TS3.2 の値を用いた(CRU TS3.2 2012)。月別データは、北極域と南極域を除く地球全体の範囲において東西方向 720 列、南北方向 360 行の空間情報を持つ形で提供されている。この空間情報から、必要地点における月別の気温と降水量を抽出するプログラムを開発した (Sugimoto 2013)。東西方向について、左端を 1 として 720 までの設定を行い、横方向の数字を 1 万倍した。南北方向には、上端を 1 として下端が 360 までの設定を行った。東西方向と南北方向の数字を足し合わせた数字で構成される東西方向 720 列、南北方向 360 行の空間情報を持つラスタデータを構築した。例えば、” 6110093” は、東西方向に左端から数えて 611 番目、南北方向に上端から数えて 93 番目にあるセルの位置座標を示す。

SAD における月別の気温と降水量のデータをもとめるために、重心に最も近い地点の月別気温と降水量のデータを求めた。SAD が複数の CAR で構成されている場合は、複数の CAR の重心の値を平均したものを用いた。カナダのプレーリー地域の収量に関しては、カナダの統計局の協力をいただいて入手したものを用いた(November 2011 Farm Survey, 2012)。品目としては、Barley, Canola, Dry Field Peas, Fall Rye, Oats, Summerfallow, Total Spring Wheat のデータが提供されており、Total Spring Wheat (春小麦) のデータを解析に用いた。データの期間は、1976 年～2011 年となっている。

8. 推計方法と近未来予測

春小麦の収量を被説明変数とする。説明変数として、4月から6月の積算の気温と降水量、前年の収量に加えて、Arctic Outflow Event が最も発生した上位 5 年の冬季の 500hPa 気圧場偏差の平均値と同データに対する経験直交関数の第 3 主成分の空間パターンが似ていることから、経験直交関数の第 3 主成分の時系列を用いることで、予測精度が向上することを確認した。カナダ西海岸で北風が強まって低温乾燥状態が起きると収量が減る可能性を示していると考えられる。

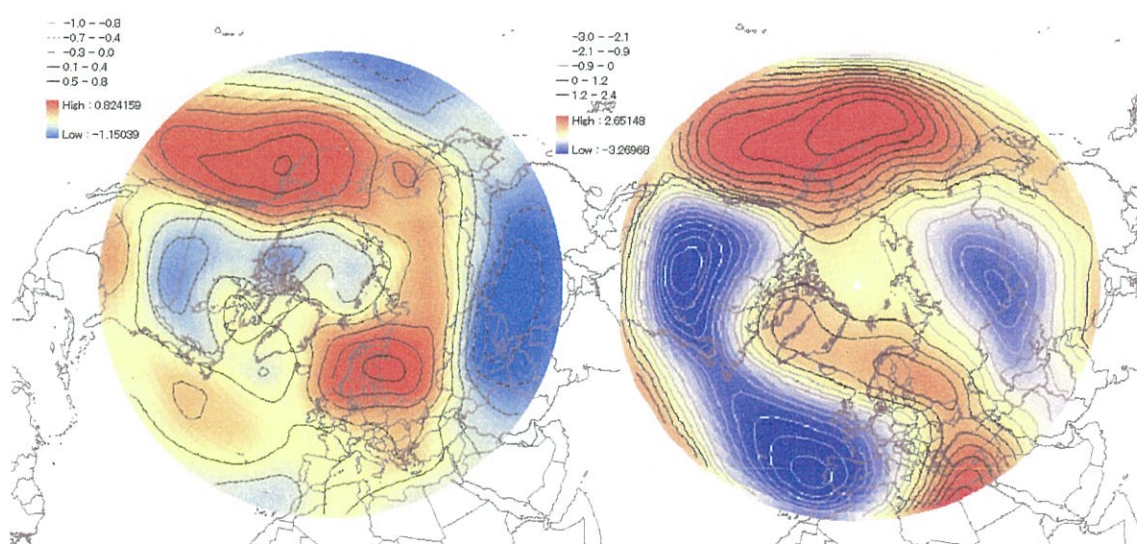


図 7 の再掲. Arctic Outflow Event が最も発生した上位 5 年の冬季の 500hPa 気圧場偏差の平均値（左）と同データに対する経験直交関数の第 3 主成分の空間パターン（右）

推計方法は、重回帰分析によるものであるが、推計する際の時系列データの並び方としてクロスバリデーションという手法を用いた。春小麦の単収を被説明変数とし、5月から7月までの期間における積算気温、積算降水量、前年の単収、冬季の 500hPa 気圧場偏差の第 3 主成分を説明変数とする推計式を求めた。さらに気候変動の影響を明確にだすために、技術進歩等の影響が出ていると考えられる傾向値を除去した。具体的には、1977 年から 2010 年までのそれぞれの説明変数を年の 1 次関数とし、切片と傾きから、傾向値を求めた。それぞれの説明変数から傾向値を減じることで傾向除去値を求め、さらにそれぞれの説明変数の標準偏差を用いて、傾向値を除去した規格化された説明変数を構築した。推計は 1977 年から 2010 年までのデータを用いて行った。推計に際しては、データを 1977-1980,

1981-1984, 1985-1988, 1989-1992, 1993-1996, 1997-2000, 2001-2005, 2005-2010 の 8 個に分割し、図 3 に示すように、推計期間(Training)と評価期間(Validation)を設定した。例えば、DATA1 については、1977 年から 2005 年までのデータを用いて推計式を求め、その推計式に対して 2005 年から 2010 年までの説明変数を挿入することで計算値を求め、その計測値を観測値と比較する。最終的に DATA1 から DATA8 までを組み合わせ、1977 年から 2010 年までの計算値と観測値を求めることができる。分割の数については、理論上は、1 年単位で、今回の場合だと、33 分割まで計算を行うことができるが、今回は 4 年毎に分割を行った。

DATA1:	77_80_81_84_85_88_89_92_93_96_97_00_01_05_06_10
DATA2:	06_1077_80_81_84_85_88_89_92_93_96_97_00_01_05
DATA3:	01_05_06_1077_80_81_84_85_88_89_92_93_96_97_00
DATA4:	97_00_01_05_06_1077_80_81_84_85_88_89_92_93_96
DATA5:	93_96_97_00_01_05_06_1077_80_81_84_85_88_89_92
DATA6:	89_92_93_96_97_00_01_05_06_1077_80_81_84_85_88
DATA7:	85_88_89_92_93_96_97_00_01_05_06_1077_80_81_84
DATA8:	81_84_85_88_89_92_93_96_97_00_01_05_06_1077_80

図 11. クロスバリデーション手法の概念

推計された式の精度の検証は、スキルスコア (RMSE(Root Mean Square Error)を用いた。これは以下の式で表現されて、計算されたものと実際の値がまったく一致した場合に 1 という数字になるというものである。この数字の大小により、予測精度の検証を行った。

$$SS = A \cdot A_{\text{ref}} / A_{\text{perfect}} - A_{\text{ref}}$$

スキルスコアを計算するにあたって、当初は、5 月から 7 月までの初夏の期間における積算気温、積算降水量、前年の単収を説明変数とする推計式を求めたが、前述の経験直交関数の第 3 主成分を説明変数とすることでスキルスコアの値が増加し、予測精度が向上することが示された。推計された式に挿入する因子としては、収穫の時期の前の冬季における 500hPa の気圧場、5 月から 7 月までの積算気温と降水量であるので、収穫の時期の数か月

前に予測値を求めることができる。アルバータ州の SAD20 の場所における予測値と観測値の推移を図 12 に示す。2013 年の予測値は、2012 年の 12 月から 2013 年の 2 月までの期間の冬季の 500hPa 気圧場と 2013 年の 5 月から 7 月までの積算気温と降水量を用いて推計を行ったものであるが、2013 年は 2012 年に比べて単収が落ち込む可能性が示された。

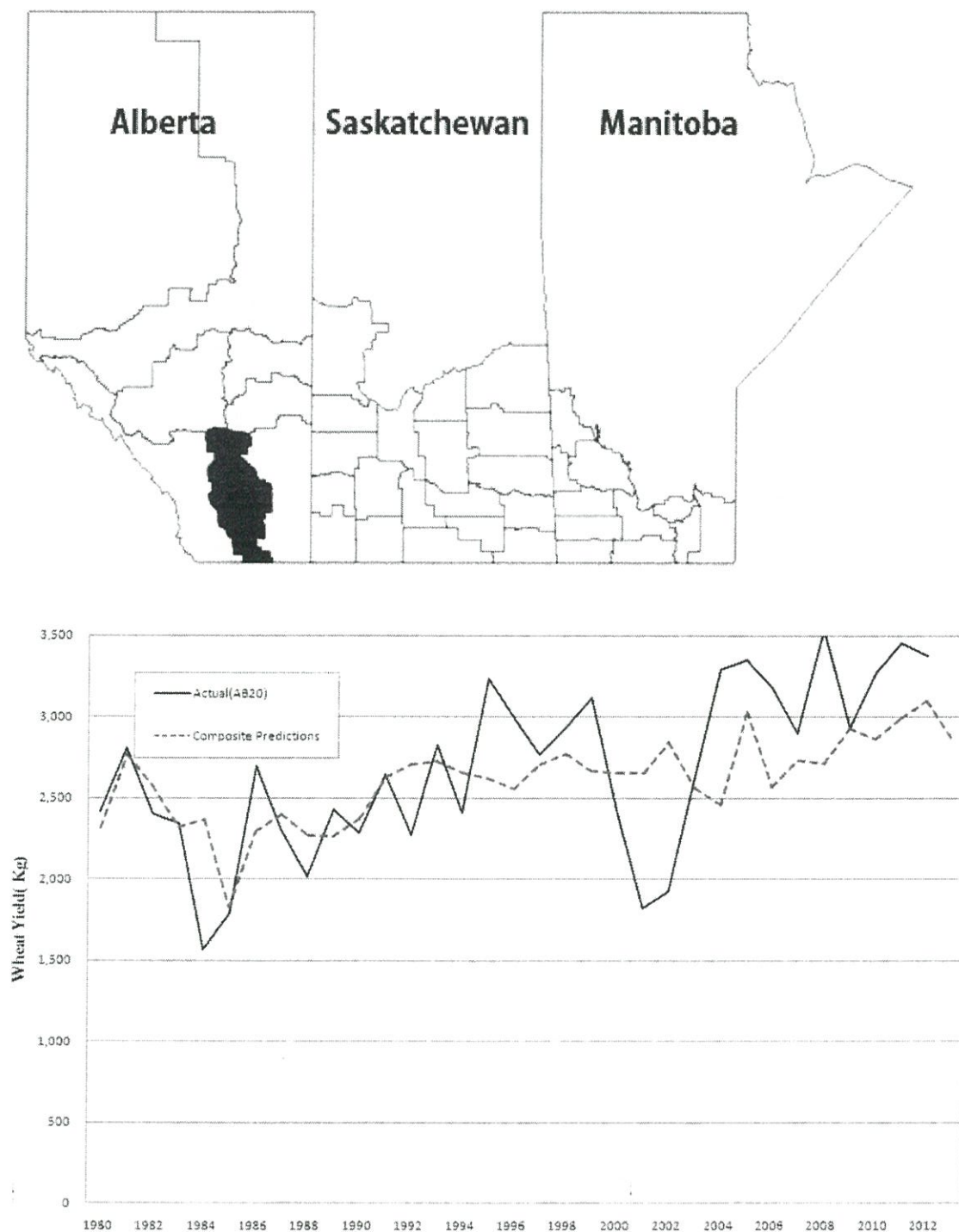


図 12. アルバータ州 SAD20 地域における春小麦の実測値と計算値（近未来）の推移

表 1. プレーリー地域における変数の組み合わせと推計結果

Predictors		Tmp4to6, Pre4to6, Yield(t-1)	Tmp5to7, Pre5to7, Yield(t-1)	Tmp4to6, MODE3, Yield(t-1)	Tmp5to7, MODE3, Yield(t-1)	Pre4to6, MODE3, Yield(t-1)	Pre5to7, MODE3, Yield(t-1)
AB	10	0.2615	0.3695	0.0897	0.2104	0.2272	0.3292
AB	20	-0.0414	0.0262	-0.1106	-0.0102	-0.0069	0.0369
AB	30	-0.0776	0.0099	-0.0941	-0.0157	-0.0491	0.0036
AB	40	-0.1458	-0.0346	-0.1226	0.0152	-0.0688	-0.1005
AB	41	-0.0823	-0.0788	-0.0651	-0.0275	-0.0291	-0.0779
AB	50	-0.0804	-0.0820	-0.1234	-0.0598	-0.0312	-0.1163
AB	60 year2001=zero						
AB	70 year2001=zero						
SK	1	-0.0455	0.0877	-0.0598	0.1166	-0.0659	-0.0762
SK	2	-0.0586	-0.0366	-0.0708	-0.0245	-0.0870	-0.0957
SK	3	-0.0126	0.0023	-0.0436	0.0238	-0.0851	-0.0337
SK	4	-0.0216	-0.0030	-0.0522	-0.0097	-0.0898	-0.0480
SK	5	0.1385	0.2276	-0.0203	0.0150	0.1150	0.1909
SK	6	-0.0524	0.0331	-0.0558	0.0605	-0.1056	-0.0338
SK	7 year2001=zero						
SK	8 year2000=zero						
SK	9	0.0768	0.2281	0.0588	0.1317	0.0874	0.2452
SK	10	0.1957	0.2392	0.1249	0.2269	0.1832	0.1777
SK	11	-0.0300	0.0093	-0.0106	-0.0034	-0.0827	-0.0284
SK	12	-0.0692	-0.0576	-0.0783	-0.0655	-0.0784	-0.0740
SK	13	0.0351	0.0799	-0.0025	0.0817	-0.0156	0.0211
SK	14	0.1242	0.2848	0.0583	0.2322	0.0490	0.1489
SK	16	-0.1358	0.0089	-0.0953	0.0333	-0.0892	-0.0643
SK	17 year2009=zero						
SK	19 year2006=zero						
SK	20 year2006 & 2000zero						
MB	1	0.0423	0.1902	0.1003	0.1977	-0.0585	0.0019
MB	2	0.0137	0.1859	0.0521	0.2019	-0.0710	-0.0359
MB	3	-0.0758	0.0890	0.0125	0.0913	-0.0331	0.0101
MB	4 2010, 2009, 2006, 2004, 2002zero						
MB	5 2006, 2004 =zero						
MB	6	0.0194	0.1299	0.0015	0.0831	-0.0456	-0.0343
MB	7	-0.0247	0.1204	0.0480	0.1415	-0.0734	-0.0616
MB	8	-0.0430	0.1062	0.0446	0.1874	-0.0871	-0.1060
MB	9	-0.0452	0.0223	0.0446	0.0684	-0.0794	-0.0811
MB	10 2010, 2003, 2002, 1999zero						
MB	11	-0.0604	-0.1525	-0.0604	-0.1198	-0.0817	-0.0474
MB	12 2009, 2003 zero						

表 2 から 4 までは表 1 から抽出した推計精度が最も高いものを集めた州における春小麦の推計結果とスキルスコアの値を示す。各表の右端の数字は、2013 年の収量が 2012 年の値に比べてプラスになるか、マイナスになるかを示したものである。

表 1. アルバータ州における推計結果

state	No	SoilConditions	RMSE SS	Combination	2012Actual	2012Calculated	2013Forecasted	2013-2012
AB	10	Semi-Arid	0.370	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,340	1,997	2,325	+
AB	20	Semi-Arid	0.037	Pre5to7,MODE3,Yield(t-1)	2,376	2,099	2,854	-
AB	30	Arid	0.010	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	3,653	3,312	3,333	+
AB	40	Semi-Arid	0.015	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2,801	1,999	2,705	+
AB	41	Sub-Humid	-0.028	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2,948	2,258	2,670	+
AB	50	Sub-Humid	-0.031	Pre4to6,MODE3,Yield(t-1)	3,674	3,683	2,547	-
AB	60	year2001=zero						
AB	70	year2001=zero						

表 2. サスカチュワン州における推計結果

state	No	SoilConditions	RMSE SS	Combination	2012Actual	2012Calculated	2013Forecasted	2013-2012
SK	01	Arid	0.117	Tmp5to7,Pre5to7,MODE3,Yield(t-1)	1,728	1,693	1,728	+
SK	02	Sub-Humid	-0.024	Tmp5to7,Pre5to7,MODE3,Yield(t-1)	1,829	1,950	1,963	+
SK	03	Sub-Humid	0.002	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,373	2,255	1,811	-
SK	04	Semi-Arid	-0.010	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2,373	1,375	2,284	-
SK	05	Sub-Humid	0.228	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,166	2,100	1,813	-
SK	06	Sub-Humid	0.060	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	1,723	1,316	2,052	-
SK	07	year2001=zero						
SK	08	year2000=zero						
SK	09	Semi-Arid	0.246	Pre5to7,MODE3,Yield(t-1)	1,875	1,939	1,515	-
SK	10	Sub-Humid	0.239	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,173	1,915	2,126	+
SK	11	Semi-Arid	0.009	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,278	2,197	2,163	-
SK	12	Semi-Arid	-0.058	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,862	2,541	2,693	+
SK	13	Arid	0.082	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2,545	1,718	2,252	+
SK	14	Arid	0.285	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2,636	2,614	2,094	-
SK	16	Arid	0.033	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	1,728	1,954	2,082	+
SK	17	year2009=zero						
SK	19	year2006=zero						
SK	20	year2008&2000=zero						

表 3. マニトバ州における推計結果

state	No	SoilConditions	RMSE SS	Combination	2012Actual	2012Calculated	2013Forecasted	2013-2012
MB	01	Sub-Humid	0.198	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	1.894	1.855	2.528	-
MB	02	Sub-Humid	0.202	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	1.894	1.855	2.528	-
MB	03	Sub-Humid	0.091	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2.213	2.140	2.337	-
MB	04	2010,2009,2006,2004,2002zero						
MB	05	2006,2004=zero						
MB	06	Sub-Humid	0.130	Tmp5to7,Pre5to7,Yield(t-1)	2.185	2.278	2.279	-
MB	07	Sub-Humid	0.142	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2.283	2.207	2.859	-
MB	08	Sub-Humid	0.187	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2.819	2.314	2.737	-
MB	09	Sub-Humid	0.088	Tmp5to7,MODE3,Yield(t-1)	2.510	1.755	2.204	-
MB	10	2010,2003,2002,1999zero						
MB	11	Sub-Humid	-0.047	Pre5to7,MODE3,Yield(t-1)	2.097	2.366	2.499	-
MB	12	2009,2003zero						

表2から4において、それぞれの地域における Soil Condition(土壌条件)が示されている。収量データが存在しない場所については、推計ができなかったことが示されている。説明因子として、Tmp5to7:(5月から7月までの積算気温)、Pre5to7:(5月から7月までの積算降水量)、Yield(t-1):(前年の収量)、MODE3(冬季における500hPaの気圧場の第3主成分)の組み合わせから、もっともスキルスコア値が高くなる組み合わせが示されている。2012年の実際に観測された値と計算値、2013年の計算値が示されている。なおカナダの統計局から入手したデータは2011年までの値であり、2012年の値については、傾向値を用いて求めたものを用いた。カナダというデータ入手に関しての制約が大きい地域においての問題点であるが、今後、開発された手法を北海道やロシアのアムール川周辺に展開するにあたっては、現地の農家と密接な関係を構築することで、常に最新のデータを入手できる仕組みが構築できると考えている。

9. カナダの氷河とスイスの氷河

カナダのロッキー山脈にあるアサバスカ氷河は、減少を続けており、氷河の端が何年にもわたって存在したかが表示されている。



図 13. アサバスカ氷河の様子、1982 年の時点で存在した氷河が後退（松村撮影）

門田は、2013 年の夏に北海道大学境科学院 国際南極大学カリキュラムに参加して、スイスアルプスの氷河実習に参加し、スイス連邦工科大学（ETH）の研究者による氷河学や気候学に関する講義を受講した。

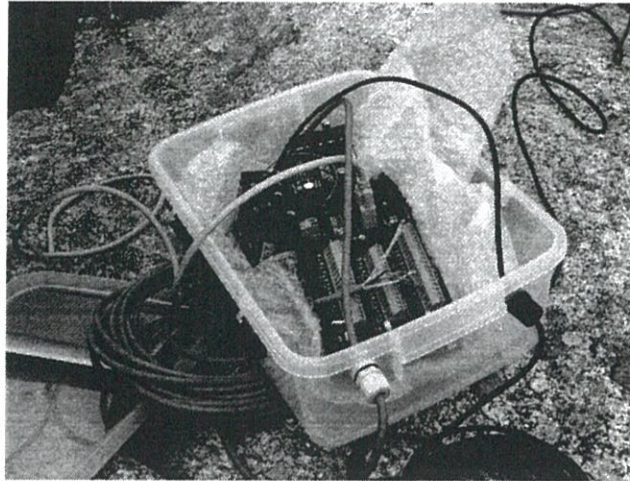


図 14. ローヌ氷河近くの岩場に設置した気象測器およびデータロガー（門田撮影）



図 15. ローヌ氷河全体(門田撮影)



図 16. ローヌ氷河全体(門田撮影)



図 17. ローヌ氷河でみられたクレバス（門田撮影）

スイス氷河実習においてはローヌ氷河で実際に観測を行った。観測項目は、氷河湖の水圧・水温・周辺気温、氷河上及び付近の岩盤上で総合気象測器を用いて気温・湿度・風向・風速・気圧・日射を観測。また、氷河上では総合気象測器での観測の他、放射量の測定、GPSを用いた氷河の高度変化測定を行った。岩盤上では地形やチズゴケの観察や観測も行った。本実習を経験することによりグリーンランドのアイスコア掘削に役立つと考えている。グリーンランドの気候はスイスよりももちろん過酷なものであるが、実際に観測を経験することは、観測中にいかに迅速に動けるかということも学べるしその場の雰囲気もわかる。そして何よりも観測機器への知識が身につく。今後それらを使うか否かにしても関連性はあるはずだ。また、スイスはヨーロッパの中でも多くの氷河を持つ国であり、氷河を観光資源としても利用している。その氷河が融解することは観光へのダメージだけでなく環境への影響が懸念される。その調査の一環として今回の実習は有意義なものであったといえる。アイスコア分析を行うことで、過去にどのような出来事がおこってそれがどのような成分を残し、現在に関わっているか、もしくは今後どうすべきであるか、といった指標を示せる可能性もある。変わりゆく北極の気候の解明にはアイスコア分析は必要不可欠と考えており、他の分野との連携が今後、ますます重要になってくると考えている。

10. まとめと今後の展開

北極域の海氷域と気圧場の関連性を文献サーベイおよびコンポジット解析により示した。オホーツクの海氷域が多い上位 5 年の空間パターンは、年間を通じて第 1 主成分の空間パターンと類似していることが示された。相関分析によると、有意水準 1% でオホーツクの海氷が多い年の 9 月から 11 月、10 月から 12 月の第 2 主成分とそれぞれ -0.46、-0.38 の相関があり、11 月から 1 月の第 3 主成分と -0.561 の相関が示された。オホーツクの海氷が多い年の秋には、オホーツクの海氷域を広げる気圧場になることが確認された。

有意水準 1% で冬季の AOE は、12 月から 2 月 (DJF) の第 3 主成分のパターンと -0.789、1 月から 3 月 (JFM) の第 3 主成分のパターンと -0.649 の強い相関が示された。夏季に向けて相関が弱まる傾向にあり、10 月～12 月 (OND) に再び強まることを示された。

冬季 (12 月から 2 月) にカナダの西海岸において、極低温現象 (Arctic Outflow Event = AOE) が発生すると低温で乾燥した状態となり、その年の収量は減ると思われる。AOE の回数が多い年を約 30 年のうち上位 5 年分を選択し、とり、500hPa の気圧場偏差の平均値を求めた。同データの第 3 主成分と類似していることを見出した。

カナダのプレーリー地域を対象として、春小麦の収量予測を行うために、説明変数として前年の収量、月別の気温と降水量のデータを用いた推計を行った。その際に、説明因子として冬季の 500hPa の気圧偏差に対して主成分分析を遂行し、その第 3 主成分を説明変数として用いることで、予測精度が向上すると確認した。推計された式に挿入する因子としては、収穫の時期の前の冬季における 500hPa の気圧場、5 月から 7 月までの積算気温と降水量であるので、収穫の時期の数か月前に予測値を求める手法を確立することができた。

カナダのプレーリー地域で確立しつつある手法を北半球の他の地域へも展開することで、収穫の数か月前の収量予測を行う仕組みを構築する必要がある。ロシア極東アムール地区において北海道寒冷地農法が試行されているが、これらの地域において収量予測の情報提供を行うことで北極域における農業生産の安定性に資することが期待できる。FOODEX Japan2014 でのヒアリングによると、オーストラリアにおけるアーモンドの 2013 年秋から 2014 年春にかけての収穫量は多いことが期待されている一方で、カリフォルニア州の収穫量は少ない傾向にある。北半球と南半球の顕著な農業生産の違いについても言及することで研究の対象と幅が広がると考えている。

現在交渉中の環太平洋戦略的経済連携協定 (TPP) において、遺伝子組み換え食品に対する

世界的な安全性意識の高まりにより、遺伝子組み換え技術を使わない穀物への需要が高まりつつある。非遺伝子組み換え品種は、生産性が落ちるだけでなく、異常気象などへの対応力が弱まる可能性が指摘されている。飼料用大豆については、除草剤と病害虫への耐性をもたせるため、その多くが遺伝子組み換えになってしまっており、非遺伝子組み換えを選択することは難しい状況になっている。

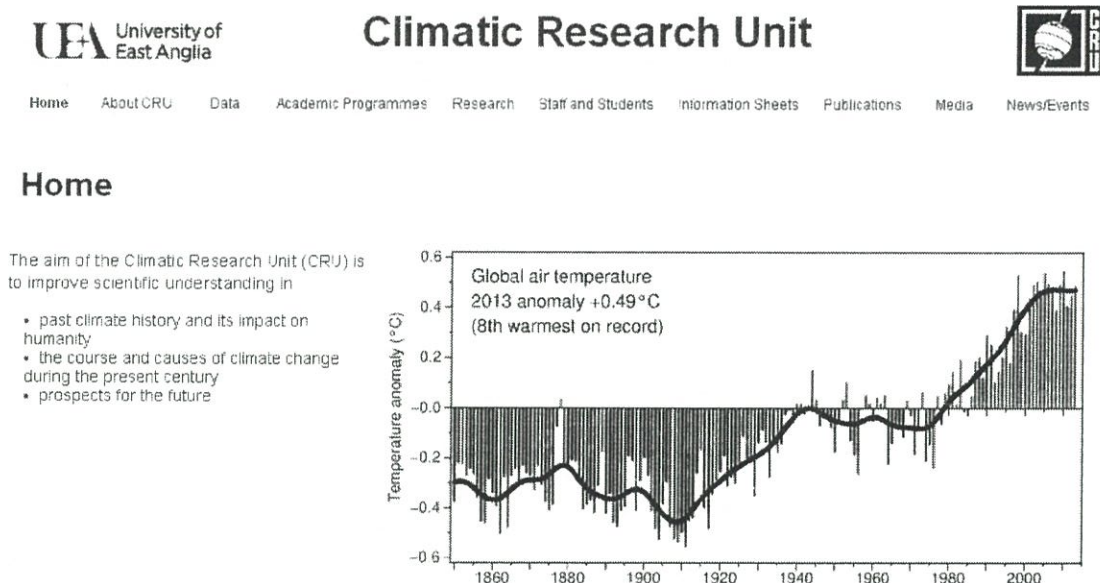
グローバルな穀物需給を考える際に冬小麦は重要な作物であるが、気候変動への脆弱性が危惧されている。本研究は、北半球高緯度地帯に属する北海道のオホーツク海沿岸域の6～8戸の農家から構成される営農集団（東京農業大学・網走寒冷地農場を含む）をモデルとして、冬小麦の単位面積あたりの収量（単収）を、月別気温と降水量、北極振動、オホーツクの流氷域等を用いて説明する予測モデルを構築する。求められた予測モデルを、日本政府と北海道銀行の主導で北海道農法の適用が行われつつあるロシアのアムール州における広大な穀倉地帯（日本の国土面積に相当）に適用する。アイスコアの観測などの一連の研究を融合させることで、北半球高緯度地帯での収量予測の可能性が広がり、結果としてグローバルな穀物需給の安定に資すると考える。

参考：気象条件抽出システム

国立極地研究所の杉村 剛博士の協力をいただいて、地図上の任意の点の気象情報、mean temperature、precipitation、cloud cover、diurnal temperature range vapour pressure、wet day frequency を抽出する仕組みを構築した。

STEP1. イギリスの研究機関との交渉

イギリスの East Anglia 大学の Climatic Research Unit は、様々な気象情報を提供している。



Climatic Research Unit <http://www.cru.uea.ac.uk/>

East Anglia 大学と直接、連絡をとりデータの移植についての了解を得ることができた。

Hi,

Are you aware of KNMI's Climate Explorer?

<http://climexp.knmi.nl>

This has many datasets, including CRU TS (currently at v3.10 but being updated to 3.21 shortly). Visualisation and simple analysis is possible, as is comparison with other datasets. However, you are welcome to transfer the dataset into a GUI-friendly version. You could have to ensure that relevant data were available:

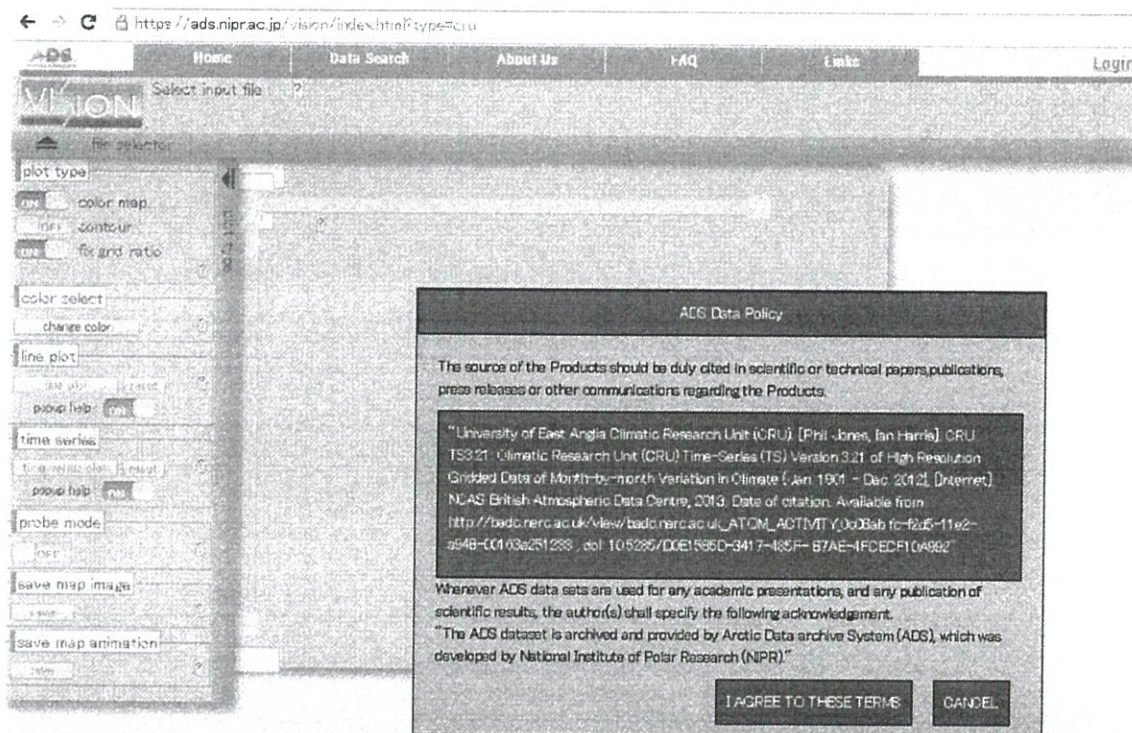
1. Station counts (.stn and .st0) to allow the quality of each data point to be assessed
2. A reference to the paper
3. A reference to the BADC information page

You would also have to be clear about which version you were using!

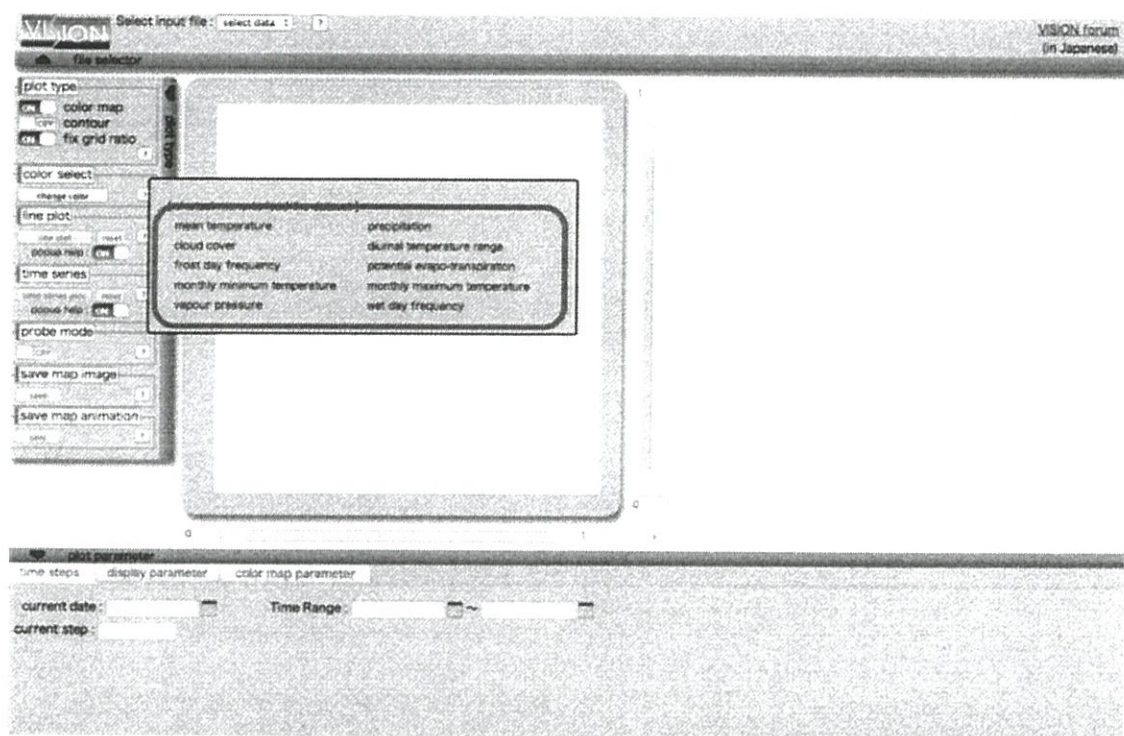
Cheers

H*****

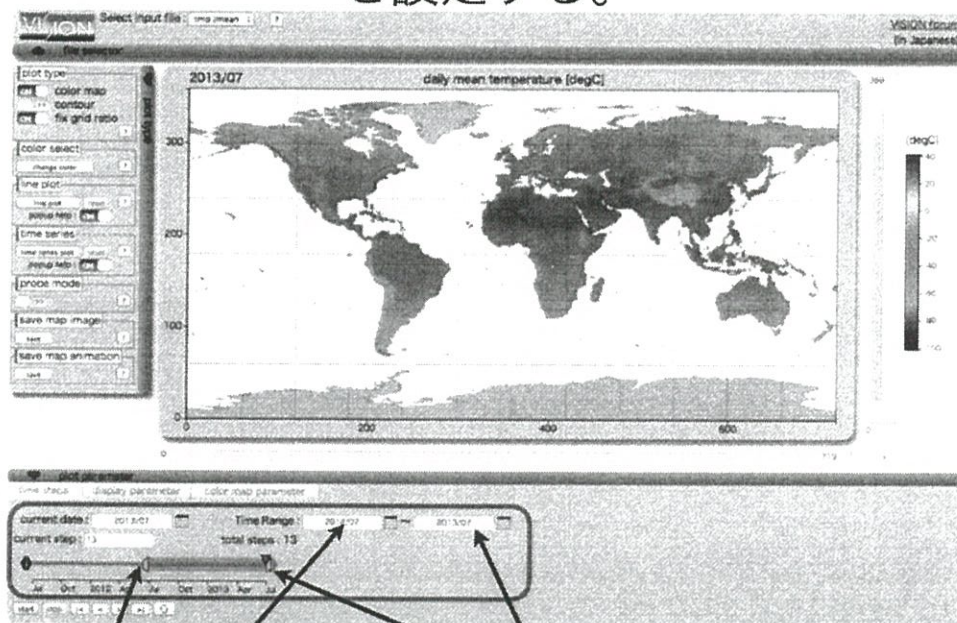
構築されたサイトとその利用方法を以下に記す。



<https://ads.nipr.ac.jp/vision/index.html?type=cru>



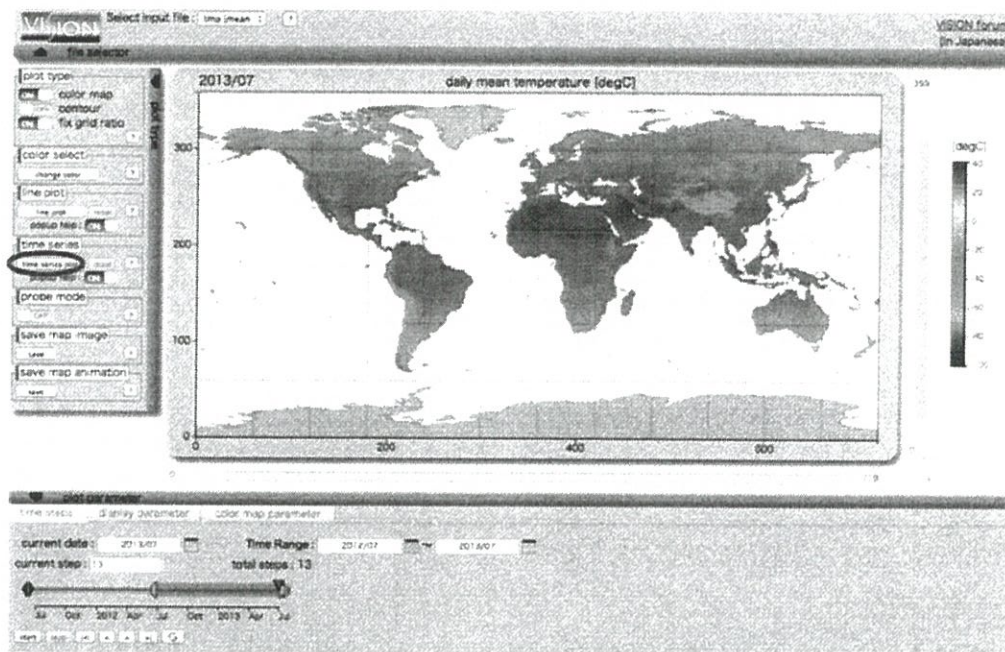
時系列プロットで切り出す時間幅（始点と終点）を設定する。



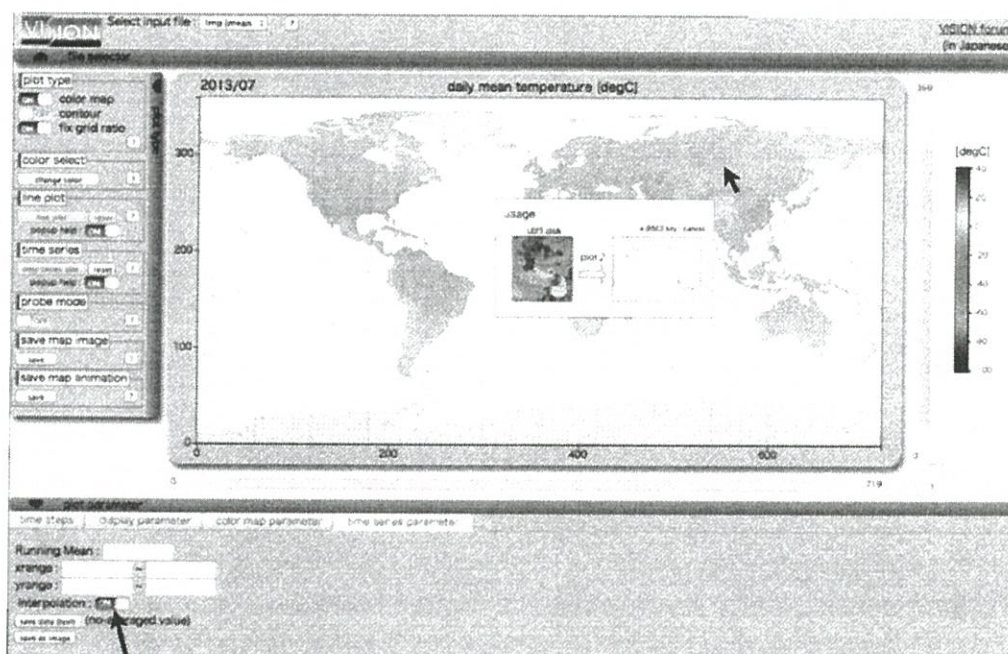
時系列データの始点

時系列データの終点

time series plotボタンを押す

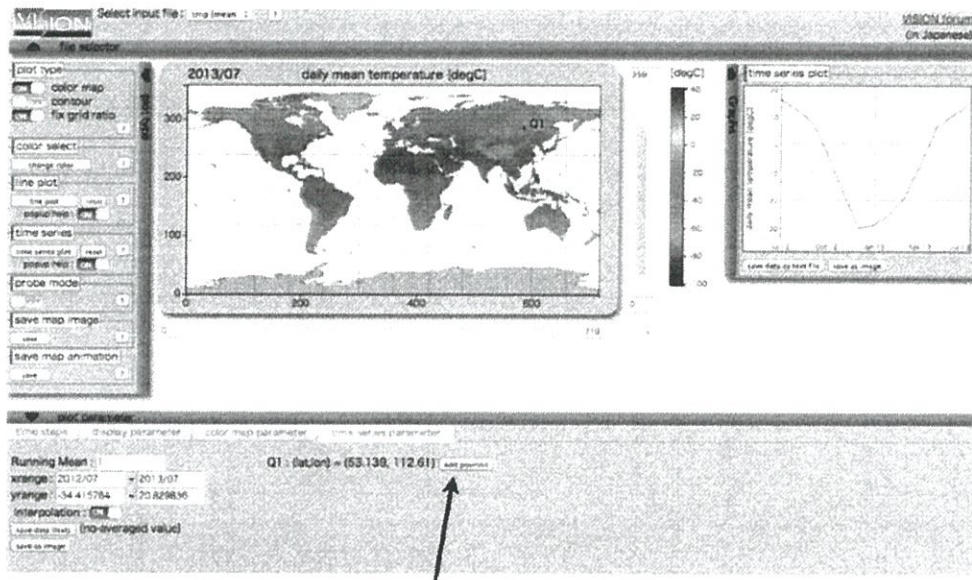


データが欲しい地点をクリックする



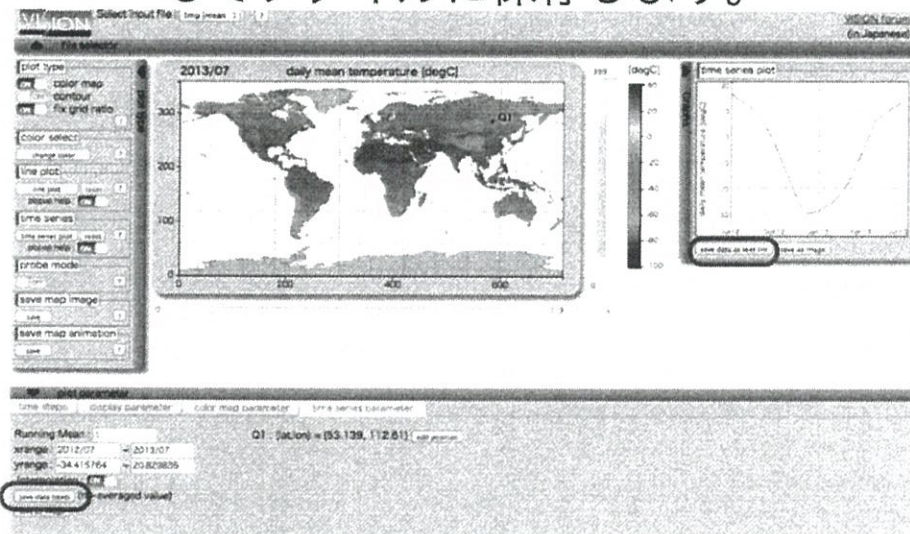
※ デフォルトでは、指定地点の周囲4グリッドから数値を補間します。
補間が必要ない場合はinterpolationをOFFにして下さい。

グラフが表示されます。



※ 緯度経度で地点を指定したい場合は、このボタンを押し、緯度と経度の数値を編集してからupdateボタンを押して下さい。
指定した場所のデータに変更されます。

[save as text file] or [save data(text)]ボタンを押してファイルに保存します。



ファイルはカンマ区切りのCSVファイルですが、先頭の7行はヘッダ部分です。

•

引用文献

Census Agricultural Regions Boundary Files of the 2011 Census of Agriculture

<http://www.statcan.gc.ca/pub/92-637-x/92-637-x2011001-eng.htm>

CNN（電子版）, 2013 年 6 月 22 日, カナダ洪水で死者、住宅被害も,

In <http://www.cnn.co.jp/world/35033725.html>

CRU TS3.2, 2012, Climatic Research Unit, University of East Anglia, In

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>.

(Accessed May 2013).

David B. Lobell., 2007, Changes in diurnal temperature range and national cereal yields, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.145, pp.229-238.

November 2011 Farm Survey, February 13, 2012, Statistics Canada, Agriculture

Division, Crops Section

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), 2012, Monthly averaged 500hPa geopotential height data. Accessed in 2013, June 10th.

浜地勇次、吉田智彦、暖地のビール大麦の収量と気象条件の関係の統計的解析、日本作物学会記事 第58巻(1):1-6,1989

Hsieh, W.W., Tang, B., Garnett, E.R., 1999. Teleconnections between Pacific sea surface temperatures and Canadian prairie wheat yield, *Bull. Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 209-217.

Honda, M., K. Yamazaki, Y. Tachibana, and K. Takeuchi, Influence of Okhotsk sea-ice extent on atmospheric circulation, *Geophysical Research Letters*, 23, 3595-3598, 1996

池田元美、2001、北極海海氷減少と北極振動が相互に影響しあっていることを発見、
http://www.jaxa.jp/press/nasda/2001/arctic_010330_j.html

JIA Jian-ying, GUO Jian-ping, : Effects of Climate Changes on Maize Yield in Northeast, *Agricultural Science & Technology*, Vol.11, No. 6, pp.169-174, 2010

Ju Hui., Xiong Wei., Xu Yinling, Lin Erda., : Climate Change and Its Impacts in Northeast China, *中国農学通報*、第23巻、pp.345-349, 2007

気象庁 2012, オホーツク海の海氷域面積データ

http://www.data.kishou.go.jp/db/seaice/okhotsk/data/okhotsk_alldata.txt

松山洋、谷本陽一、実践！気候データ解析、古今書院、2005

National Snow and Ice Data Center, 2013, Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent, Version 4.0 (NSIDC-0046)

NOAA, Arctic Oscillation - Climate Prediction Center -,2014

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml

Quamme, H. A., Cannon, A. J., Neilsen, D., Caprio, J. M. and Taylor, W. G. ,The potential impact of climate change on the occurrence of winter freeze events in six fruit crops grown in the Okanagan Valley. Can. J. Plant Sci. 90, 85-93, 2010

Seino Hiroshi , An Estimation of Distribution of Meteorological Elements using GIS and AMeDAS DATA , Journal of Agricultural Meteorology 48(4): 379-383, 1993

Sugiura T,What will happen to “agriculture” and “food” when global warming increases? Gijutsu-Hyohron Co., Ltd., 2009

Tachibana, Y., M. Honda and K. Takeuchi, The Abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low, Journal of Meteorological Society of Japan, 74, 579-584, 1996.

田中博、2008、異常気象をもたらす北極振動の解明とその予測（第3報）、アサヒビール学術振興財団研究紀要、地球環境科学., 2008-01

過去の氷河実習の詳細については以下のリンクに動画付きで紹介されている。

<http://www.earth.ees.hokudai.ac.jp/IAI/swiss13/diary.html>