



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道におけるイネの生産性および冷害評価に関する研究
Author(s)	田中, 朱美
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第11340号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11340
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55391
Type	doctoral thesis
File Information	Akemi_Tanaka.pdf



博 士 論 文

北海道におけるイネの生産性および冷害評価に関する研究
(A study on assessments of rice productivity and cool summer
damage in rice in Hokkaido)

北海道大学大学院環境科学院

田 中 朱 美

要旨

作物生産性は気候変動の影響を大きく受ける分野のひとつであり、近年世界や日本を対象とした作物生産性予測が行われている。気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC AR4)では、気温上昇による全球での作物生産性について、中・高緯度では1~3°Cの気温上昇で生産性が向上する一方、低緯度では1~2°Cの気温上昇でも生産性が減少し、上記以上の気温上昇では全地域で生産性が減少すると予測している(Easterling et al., 2007)。日本を対象とした予測として、横沢ほか(2009)は広域コメ収量予測機構モデルPRYSBIを用いて全国4地域の気温上昇度に対するコメ収量変化を評価し、北海道・東北地域は気温上昇に伴いコメ収量は増加するが、それ以外の地域は減少することを示した。

このような先行研究によれば、北海道では温暖化によりコメの増収が見込まれる。しかし、収量変動に大きく影響する冷害については、温暖化により軽減するという予測(横沢ほか, 2009 など)がある一方で、リスクが軽減しないという指摘(Shimono, 2011)がなされている。Shimono(2011)は現在気候において北日本のイネの出穂が早期化しており、冷害に影響する生育ステージである穂ばらみ期の低温影響による収量ロスが増大していることを示した。そして、温暖化でイネの生育が早期化し、冷害に影響する生育ステージの暦日が前進することで、障害型の冷害リスクが増大する可能性があると指摘した。寒冷地である北海道では冷害が深刻であるため、気候変動下の収量予測において冷害を考慮することは重要である。また、北海道では冷害による減収の地域差が大きいいため、北海道内の収量変動や冷害の地域差を考慮した地域詳細な予測が求められる。しかし、世界の作物生産性評価に用いられるような汎用的なモデルでは、冷害の考慮は必ずしも十分ではない。本研究では、寒冷地である北海道に世界の作物生産性評価に用いられる GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) モデル(Fischer et al., 2002a; Masutomi et al., 2009)を適用し、収量変動評価への適用可能性を評価した。また、より精緻に不稔率を推定するモデルを用いて、温暖化を想定した気温上昇に伴う北海道のイネの冷害による不稔の変化について考察した。

前半では、GAEZ モデルを北海道へ適用できるように改良し、コメの観測収量変動の再現性を評価した。GAEZ モデルでは気温条件などによる適性判定が行われ、適性と判定されたときに収量計算が行われる。改良前のモデルでは、北海道のほぼ全域で GAEZ モデルの低温に関する条件を満たさず、収量計算を行うことができなかった。このことから、耐冷性の強化によってコメ栽培が

可能となった北海道には GAEZ モデルをそのまま適用できないことが分かった。そこで、(1) 気温条件の変更、(2) バイオマス計算論理の変更、(3) 出穂日推定論理の追加、(4) 障害型冷害(低温により受精が阻害され不稔稲が発生し減収する冷害)推定論理の追加の4段階でモデルの改良を実施した。(1)で適性判定条件を撤廃することで、北海道でも収量を計算することが可能となったが、観測の収量変動をほとんど再現しなかった。(1)に加え(2)、(3)、(4)を組み合わせることで再現性は大幅に向上した。まず(1)、(2)に加え(3)で簡易有効積算気温(日最高最低平均気温からイネの生育に有効な温度のみ使用した積算値)から出穂日を推定し、出穂遅延によるイネの成熟不良を考慮すると、観測収量変動の再現性は向上したが冷害時の大幅な収量減少は再現しなかった。さらに、(4)で出穂日を基準に推定した低温に脆弱な期間の気温条件により障害型冷害の影響を算出し反映すると、冷害時の収量減少を含む観測収量変動を再現した。このことから、改良によりGAEZモデルを北海道に適用することができ、北海道の観測収量変動の再現には障害型冷害の考慮が重要であることが分かった。また、障害型冷害の考慮により北海道内の収量変動の地域差を非常に良く再現できるようになったことから、北海道内の収量変動の地域差をもたらす要因として障害型冷害が関係することが示唆された。

後半では、気温の経年変動に着目し、気温上昇に伴うイネの障害型冷害による不稔の幅の変化を評価した。現在気候(1986年～2005年)の気温を一様に1°Cから5°Cまで1°C刻みで上昇させ、田中ほか(1997)の不稔率推定モデルにより北海道のローカルな品種である「きらら 397」の不稔率を計算した。まず個々の年や移植日において気温上昇ケースの不稔率を考察すると、いくつかのケースではイネの不稔が現在と同程度となるか、現在より悪化した。本研究ではこれを「促進された冷害(Accelerated cool summer damage; ACSD)」と呼ぶこととした。気温上昇ケースではイネの生育が加速し、低温に脆弱な期間が前進する。前進した脆弱な期間の気温が現在の脆弱な期間の気温以下となる場合、ACSDが発生する。次に不稔の幅を評価するため、現在の北海道の標準的な移植日(5月26日)に移植した場合の20年間の不稔率を評価すると、概して長期平均の不稔率は気温上昇とともに減少した。一方で、道内のいくつかの地点では、気温上昇ケースの不稔率の75パーセンタイル値や最大値といった不稔の極大値が現在以上となる場合があることが分かった。さらに、北海道の標準的な移植期間(5月20日～5月31日)の各日に移植した場合を考察すると、1°C上昇ケースでは、十勝地方やオホーツク海側で最大不稔率が現在以上となる可能性が高く、主要稲作地域を含む北海道中央部でも75パーセンタイル値が現在以上となる可能性が

あることが分かった。すなわち、長期平均では不稔が軽減しても、ACSD の寄与により不稔の極大値が増大し、発生しうる不稔の幅は拡大する可能性があることが分かった。この要因を低温に脆弱な期間の気温上昇度と期間の気温の経年変動幅の関係から考察した。低温に脆弱な期間のうち、北海道の不稔発生に最も影響する穂ばらみ期に着目すると、穂ばらみ期の気温上昇度が気温の経年変動幅を超えないため、北海道の多くの地域で冷害を引き起こすような不稔が将来も残る可能性があることが示唆された。さらに、穂ばらみ期の気温の経年変動幅が現在より拡大すると、最大不稔の程度が増大する可能性がある。すなわち、たとえ気温上昇により長期平均の不稔が軽減しても、気温の経年変動により発生しうる不稔の程度が増大する可能性があることが示唆された。

以上の結果は北海道における気候変動下のコメ収量変動予測に応用することができ、栽培地域の選定や適応策評価に資する情報の提供が期待できる。

目次

要旨.....	i
表リスト.....	vi
図リスト.....	vii
第1章 はじめに.....	1
1.1 モデルによる作物収量予測と北海道.....	1
1.2 イネの冷害と北海道.....	3
1.3 北海道の夏の気象と冷害.....	4
1.4 北海道の夏の気象の経年変動幅.....	5
第2章 潜在作物生産性モデルGAEZの北海道での適用可能性の検討と改良.....	15
2.1 はじめに.....	16
2.2 モデルと実験設定.....	17
2.2.1 潜在作物生産性モデル GAEZ の概要.....	17
2.2.2 気候データ作成方法.....	18
2.2.3 行政区域データ・作付面積データ作成方法.....	18
2.2.4 観測耕種期日・品種および収量データ.....	19
2.2.5 実験設定.....	20
2.3 モデル改良方法.....	20
2.3.1 気温条件の変更.....	20
2.3.2 バイオマス量計算論理の変更.....	21
2.3.3 出穂日推定論理の追加.....	24
2.3.4 障害型冷害推定論理の追加.....	25
2.4 結果と考察.....	26
2.5 まとめ.....	28

第 3 章 生育期間の気温上昇に対する冷害によるイネの不稔の感受性:北海道におけるケーススタディー.....	42
3.1 はじめに.....	43
3.2 データと方法.....	44
3.2.1 対象地域.....	44
3.2.2 データセット.....	44
3.2.3 イネの不稔の計算方法.....	45
3.2.4 解析のコンセプト.....	47
3.3 結果.....	48
3.3.1 促進された冷害 (Accelerated cool summer damage ; ACSD)	48
3.3.2 イネの不稔の確率変化.....	48
3.4 考察.....	49
3.4.1 気温上昇に伴う低温に脆弱な期間の早期化.....	50
3.4.2 低温に脆弱な期間の気温に対するイネの不稔の感受性.....	50
3.4.3 イネの不稔と気温の経年変動の関係.....	51
3.5 結論.....	52
第 4 章 結論.....	67
謝辞.....	71
参考文献.....	72

表リスト

表 1.1 日本国内を対象とした作物収量予測の例.....	8
表 2.1 GAEZ モデルの入力データ.....	30
表 2.2 地域分類と支庁の対応関係.....	31
表 2.3 本研究の実験設定.....	32
表 2.4 障害型冷害の不稔歩合(%)。北海道ほか(2011)による不稔歩合の低位値を引用。ただし 網掛け部分は本研究による拡張である。.....	33
表 2.5 GAEZ による北海道全域平均収量の観測との比較。MBE は平均誤差、RMSE は二乗平均 平方根誤差、R は相関係数。**は 1%危険率で有意な相関であることを示す。.....	34
表 2.6 GAEZ 収量と観測の支庁別・市町村別比較。MBE、RMSE、R は作付地域のない 3 支庁を 除く 11 支庁の平均。**は 1%危険率で有意な相関であることを示す。1%危険率で有意な相 関となる市町村数は 1985～2005 年全てで収量がゼロではない市町村のみについて集計し た。.....	35
表 3.1 本研究で使用したパラメータ.....	54
表 3.2 移植日を 5 月 26 日とした場合の T+0、T+5 ケースにおける低温に脆弱な 3 つの期間(前歴 期間、穂ばらみ期、開花期間)の 20 年平均日数.....	55
表 3.3 移植日を 5 月 26 日とした場合の穂ばらみ期の気温の 20 年平均値と 20 年平均の開始日 および終了日。括弧内は 20 年間の最大値と最小値の幅を示す。.....	56

図リスト

図 1.1 1993 年のイネの支庁別作況指数(農林水産省農林経済局統計調査部 b より)。作況指数とは、その年の 10a 当たり平年収量に対する 10a 当たり収量の比率で表したものである。1993 年の北海道全体の作況指数は 40 であった。.....	9
図 1.2 1958～2012 年における北海道の水稻の 10a 当たり収量の時系列(農林水産省農林経済局統計調査部 a に基づき作成)。赤丸は冷害年(北海道ほか, 2011)を示す。.....	10
図 1.3 イネの生長過程の模式図.....	11
図 1.4 500hPa 面の気圧配置により分類された梅雨期のオホーツク海高気圧の 3 つの型(大川, 1992 より).....	12
図 1.5 岩見沢、北見での 6 月 19 日から 8 月 31 日の各暦日の 7 日間移動平均気温の 1986～2005 年(20 年間)における(a)最下位および下位 2 位の年、(b)最上位および上位 2 位の年.....	13
図 1.6 岩見沢における 7 日間移動平均気温の 20 年間での経年変動の下位または上位を記録した年月日付近における天気図の例(気象庁, 2013a).....	14
図 2.1 2000 年の作付面積分布と支庁の位置.....	36
図 2.2 作物成長計算の流れとモデル改良方法。2.4 節「結果と考察」で用いた改良方法の分類を併せて示す。.....	37
図 2.3 簡易有効積算気温による出穂日推定値の地域別平均と統計値(農林水産省農林経済局統計調査部 b; 農林水産省農林経済局統計調査部 c)の比較。推定値はモデル改良手順(図 2.2)の(1)～(3)までを適用した場合に収量がゼロ以外の格子の出穂日を平均した値。エラーバーは各地域に含まれる格子の出穂日推定値の標準偏差を表す。.....	38
図 2.4 1993 年、2000 年における改良前・改良後 1・改良後 2 の収量ポテンシャル計算結果.....	39
図 2.5 GAEZ 改良前、改良後 1、改良後 2 の北海道全域平均収量の観測との比較。エラーバーは収量標準偏差で、GAEZ は格子単位、統計値は市町村単位である。.....	40
図 2.6 GAEZ の改良後 1、改良後 2 の支庁平均収量の観測収量との比較。上から空知(北海道中央内陸部)、上川(中央内陸部)、網走(東部オホーツク海側)、渡島(南部太平洋側)、十勝(東部太平洋側)、後志支庁(西部日本海側)。改良後 2 は障害型の冷害係数を棒グラフで	

示している。.....	41
図 3.1 2000 年の田作付面積と本研究で選択した 7 つの解析地点.....	57
図 3.2 低温に脆弱な期間の気温上昇度と期間の早期化度、気温の経年変動の概念図。X は与えた気温の増分である。各箱ひげ図は低温に脆弱な期間の数年間の気温の幅を示す。 T_b と T_b' はそれぞれ T+0 ケースと T+X ケースの経年変動の最低気温で、T は T+0 ケースの 経年変動の平均気温を表す。ΔT は T+X ケースの平均気温の T+0 ケースからの上昇度であ る。D _m と D _{m'} は気温の経年変動幅で、それぞれ $D_m = T - T_b$ 、 $D_m' = T + \Delta T - T_b'$ で表され る。.....	58
図 3.3 (a)2005 年、(b)1993 年の岩見沢における 5 月 26 日に移植した場合の 7 日間移動平均気 温と DVI の推移。実線は T+0 ケース、破線は T+2 ケースを示す。陰影を付けたボックスは低 温に脆弱な 3 つの期間で、C は前歴期間、B は穂ばらみ期、F は開花期間を表す。.....	59
図 3.4 1993 年の旭川における移植日を 4 月 1 日から 6 月 30 日とした場合の各不稔率。実線は T+0 ケース、破線は T+2 ケースを示す。図中の赤矢印は ACSO が発生する(すなわち、気 温上昇により不稔率が現在以上となる)移植日の期間を表す。.....	60
図 3.5 現在および気温上昇ケースにおける 20 年間(1986–2005 年)の不稔率のパーセンタイル値。 移植日は 5 月 26 日である。エラーバー上端は最大値、ボックスの上端は 75 パーセンタイル 値、十字マークは 50 パーセンタイル値、ボックス下端は 25 パーセンタイル値、エラーバー下 端は最小値で、円マークは平均値を表す。カラーは 2000 年の田作付面積を表す(図 3.1 と 同様)。.....	61
図 3.6 移植日を 5 月 20 日から 5 月 31 日とした場合(全 12 事例)について、不稔率の各パーセン タイル値が T+0 ケースのそれ以上となり、かつ 15%を上回る頻度。(上)T+1 ケース、(下) T+3 ケース。20 年間すべてについて、移植から 150 日以内に出穂した地域のみを考慮した。 計算の詳細は本文を参照されたい。.....	62
図 3.7 岩見沢(左)および北見(右)における、(a)前歴期間、(b)穂ばらみ期、(c)開花期間の 20 年間の出現時期の確率分布。移植日は 5 月 26 日である。棒グラフは現在、折れ線グラフは 気温上昇ケースを示す。横軸の JUN1, JUN2, ..., は半月の番号を示す。例えば、JUN1 は 6 月 1 日から 5 日、JUN2 は 6 月 6 日から 10 日を表す。JUL6 と AUG6 のみ 6 日間で、それ ぞれ 7 月 26 日から 31 日、8 月 26 日から 31 日となる。各期間に含まれる日にちを年を区別	

せずに半旬に割り当てた。.....63

図 3.8 (a) T+0 ケース、(b) T+1 ケース、(c) T+2 ケース、(d) T+3 ケースについて岩見沢の不稔率の時系列を昇順で示したもの。移植日は 5 月 26 日である。稔実率に対する気温影響である Y_1 、 Y_2 、 Y_3 および $(1-Y_1 \times Y_2 \times Y_3)$ と $(1-Y_2 \times Y_3)$ も示している。黒の棒グラフが不稔率で、円マークは Y_1 、三角マークは Y_2 、十字マークは Y_3 である。薄い灰色の棒グラフは $(1-Y_1 \times Y_2 \times Y_3)$ 、水色の棒グラフは $(1-Y_2 \times Y_3)$ を表す。.....64

図 3.9 (a) 各地点における 20 年平均の 7 日間移動平均気温の時系列(太実線)。薄い桃色の陰影は 20 年間の最小値から最大値の範囲、濃い桃色の陰影は 25 パーセンタイル値から 75 パーセンタイル値の範囲を示す。細い破線は限界温度 T_c である。(b) 移植日を 5 月 26 日とした場合の現在および気温上昇ケースの穂ばらみ期の中日。エラーバーの右端は 20 年間の最遅日、ボックスの右端は 75 パーセンタイル値、十字マークは 50 パーセンタイル値、ボックス左端は 25 パーセンタイル値、エラーバー左端は最早日で、円マークは平均値を示す。.....65

図 3.10 穂ばらみ期の気温の 20 年平均値と穂ばらみ期の気温の経年変動幅、およびクラス番号の分布。移植日は 5 月 26 日である。(a) T+0 ケースの穂ばらみ期の気温の 20 年平均値 (T)。 (b) T+2 ケース、(c) T+5 ケースにおける、穂ばらみ期の 20 年平均気温の上昇度 (ΔT)。 (d) T+0 ケースにおける穂ばらみ期の気温の経年変動幅 (D_m)。 (e) T+2 ケース、(f) T+5 ケースの穂ばらみ期の気温の経年変動幅 (D_m')。 (g) T+2 ケース、(h) T+5 ケースのクラス番号。20 年間すべてについて移植日から 150 日以内に穂ばらみ期の開始と終了が定義された地域のみを考慮した。.....66

第 1 章

はじめに

1.1 モデルによる作物収量予測と北海道

作物生産は気候変動の影響を大きく受ける分野のひとつであり、世界的に温暖化による作物生産の低下が懸念されている。このような背景から、近年世界や日本を対象に様々な作物モデルによる収量予測が行われている。日本を対象とした収量予測の一部を表 1.1 に示す。清野(1995)は 1991～1993 年にかけて実施されたアメリカ環境保護庁によるプロジェクト「気候変化による作物生産への影響評価プロジェクト」の一環として、作物モデル CERES を用いて温暖化後の日本の水稻、コムギ、トウモロコシの収量の評価を行った。日本の主食であるコメについては、Horie et al.(1995)の SIMRIW モデルや、それをベースとする広域コメ収量予測機構モデル PRYSBI(Iizumi et al., 2009;横沢ほか, 2009)により詳細な気候変動影響予測が行われている。Iizumi et al.(2007)は全球気候モデル(GCM)による気候予測情報の各月平均値の 10 年平均値について現在(1991–2000 年)と将来(2071–2080 年)の差分を求め、現在気候の冷夏年(1993 年)と暑夏年(1994 年)に加算し、領域気候モデル(RCM)で力学的にダウンスケールすることで、冷夏年・暑夏年が温暖化したときのコメの収量変化や不稔率の変化を評価した。横沢ほか(2009)は複数の温室効果ガス(GHG)排出シナリオ(Nakicenovic et al., 2000)での複数の GCM による気候変化シナリオ(計 17 シナリオ)に基づき、PRYSBI を用いて日本のコメ収量変化予測を行った。

横沢ほか(2009)は以下を指摘している:「一般の作物生育・収量予測モデルは圃場スケールの現象を対象とした研究に用いられ、モデルのパラメータは品種単位、地域単位で決定されている。そのため、モデルの駆動には品種、栽培管理などの詳細な情報が必要であり、日本全国を広域的に評価するには適していない」。このため、横沢ほか(2009)による PRYSBI では、各県の 13 のモデルパラメータを過去の品種特性、収量変化に基づき統計的に推定し決定している。しかし、PRYSBI は県単位のコメ収量予測を目的としており、県内の地域差については考慮していない。また、PRYSBI はパラメータ推定を統計的に行っているため、過去のコメ収量変動を非常に良く再現するが、新規の品種を導入した場合などは収量変動の統計情報を一定期間蓄積し、その上で各

パラメータの推定を行う必要があると考えられる。近年、特に高温による不稔や品質低下の影響が現れている九州(Okada et al., 2011 など)や、冷害による減収が大きい一方で温暖化により増収が期待される北海道では、気候変動に適応した新規の品種の開発が進められている。一般に統計モデルでは、新規に開発された品種についてその都度収量の統計情報を蓄積し、多くのパラメータの調整を行うことは容易ではないだろう。現行品種の将来の収量予測だけではなく、将来の気候変動に適応した新規の品種の収量予測を行うためには、より少ないパラメータ設定で評価を行うことができる汎用的なモデルが別途必要となる。

清野(1995)や Iizumi et al.(2007)、横沢ほか(2009)によれば、北日本では温暖化により作物収量の増加が見込まれる。北日本のうち北海道について、道内の複数地域の作物収量予測を行った研究として中辻ほか(2011)および丹野(2012)がある。丹野(2012)は 2030 年代のコメの収量変化予測のほか、移植日や出穂期(1.2 節;イネの生育ステージのひとつ)の変化予測、食味関連形質(アミロース含有率およびタンパク質含有率)の変化予測、冷害発生リスク等を評価した。丹野(2012)による収量予測は、村田(1964)に基づき求めた過去(1994~2008 年)の平均収量と出穂前 10 日以降 40 日間の平均気温および日射量の関係式、および内島(1983)に基づき林ほか(2001)により作成された気候登熟量示数(出穂後 40 日間の積算日射量および平均気温から決定される潜在的な収量で、関係式は試験データをもとに導出された)の式を用いて行われており、いずれも統計的な手法に基づいている。Nemoto et al.(2012)は北海道の主要稲作地域である岩見沢で、現行の北海道品種である「きらら 397」、および東北品種の「あきたこまち」と「ひとめぼれ」、北陸以南で広く栽培されている「こしひかり」を栽培した場合の将来の冷害リスクと高温リスク、収量について評価したが、収量予測は同じく林ほか(2001)による統計的關係式に基づく。このように、北海道内の各地域に着目したコメ収量予測は気温や日射量という比較的少ない説明変数による統計的な關係式に基づいて行われており、より多くの気象要素を考慮する作物モデル(プロセスモデル)による予測は行われていない。世界や日本を対象としたコメ収量予測に用いられる作物モデルを北海道内の各地域に適用すること、そしてそれをより汎用的なパラメータ設定で実現することは、北海道の気候変動下のコメ収量予測にとって有益である。

寒冷地である北海道では、冷害が深刻である。北海道は日本の主要な農業地域のひとつ(平成 24 年度収穫量は、水稻全国第 2 位、小麦第 1 位、大豆第 1 位である)であるが、冷害が発生すると収量が大きく落ち込み、食料の安定供給が難しくなる。このため、気候変動下の収量予測におい

て冷害を考慮することは重要である。しかし、全球を対象に用いられるような作物モデルでは冷害の考慮は必ずしも十分ではない。北海道では図 1.1 のように、イネの冷害の程度の地域差が大きいことも特徴であり、作物モデルによる収量予測を行う際は、冷害の地域差を評価することが求められる。また、表 1.1 に示す先行研究によれば、北海道のイネの冷害は温暖化により軽減するという見方(横沢ほか, 2009 など)が多いが、特に最近では、丹野(2012)のように冷害発生リスクが残るという指摘がなされている。さらに、Shimono(2011)は以下のように障害型の冷害リスクが増大する可能性がある」と指摘した。彼は現在気候において北日本のイネの出穂が早期化しており、冷害に影響する生育ステージである穂ばらみ期の低温影響による収量ロスが増大していることを示した。そして、温暖化でイネの生育が早期化し、冷害に強く影響する生育ステージの暦日が前進することで、障害型の冷害リスクが増大する可能性がある」と指摘した。このことから、北海道のイネの冷害リスクが温暖化によりどのように変化するかを評価することは重要である。以上より、本研究では、(1) 寒冷地である北海道の各地域のコメ収量変動を汎用的な作物モデルで評価することができるのか、(2) 温暖化に伴い、北海道のイネの冷害リスクはどのように変化するか、の 2 点に着目した。

1.2 イネの冷害と北海道

図 1.2 は 1958 年～2012 年の北海道の水稻収穫量(kg/10a)の時系列(農林水産省農林経済局統計調査部 a より)である。近年冷害はやや減少傾向であるが、1993 年、2002 年、2003 年、2009 年に冷害が発生した。北海道の平年収量は 2010 年では 535(kg/10a)で全国 7 位であったが、1993 年～2010 年の 18 年間では 502(kg/10a)で、全国 20 位であった。標準偏差は 85(kg/10a)で、青森県、岩手県、宮城県に次いで大きかった。これらの変動や差異は、1993 年や 2003 年の冷害年が大きく影響している(以上、北海道ほか, 2011)。

イネの冷害は、遅延型冷害、障害型冷害、および両者の併行型の 3 つに分類される(北海道ほか, 2011)。イネは移植後、幼穂形成、出穂、成熟の順で生長する(図 1.3)。遅延型冷害は低温により生育が遅延した結果、秋冷に遭遇し登熟不良となるか、登熟期間の低温により登熟不良となるかのいずれかにより引き起こされる。一方、障害型冷害は生殖期間の低温により受精が阻害され、不稔粒が多く発生することにより生じる冷害で、出穂前後の特定の生育ステージの気象の影響を受けるのが特徴である。第 2 章では、汎用モデルとして世界の作物生産性評価に用いられる GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) モデル(Fischer et al., 2002a; Masutomi et al., 2009)に、遅

延型冷害、障害型冷害、および併行型の冷害を評価する簡易な論理を追加することで北海道の玉米収量変動の再現性を評価した。第3章では、温暖化でリスクが軽減しないと指摘される障害型冷害について、より精緻に不稔率を予測するモデルを用いて、温暖化を想定した気温上昇に伴う障害不稔の変化を考察した。

1.3 北海道の夏の気象と冷害

ここで北海道のイネの冷害に関連する夏の気象の知見を紹介する。北海道のイネの冷害は、オホーツク海高気圧の発達による冷夏の出現と、オホーツク海高気圧から吹く「やませ」や偏東風に起因して発生する。北海道全体がオホーツク海高気圧の中心に覆われる場合は晴冷型となり、主要稲作地域である空知・上川支庁などの北海道中央部では、気温は低いが日射量は多く、分けつ期(図1.3参照)は水温が高まるため、栄養生長は比較的順調に推移する(北海道ほか, 2011)。しかし、高気圧の中心がオホーツク海にある場合は、太平洋やオホーツク海岸から内陸部まで海霧を伴う低温多湿の風が吹き込み、低温と日照不足が顕著となり水稻生育に直接的な影響を与える(北海道ほか, 2011)。北海道の冷夏は第1種冷夏と第2種冷夏に分類される(柏原・大川, 1967)。前者はシベリア大陸から寒気が南下流入して低温になり、後者は北極の寒気がオホーツク海に流入してできる高気圧により著しい低温となる。大川(1992)はオホーツク海高気圧をE型、R型、N型の3種類に分類し(図1.4)、第1種冷夏をE型およびR型の場合、第2種冷夏をN型の場合と分類した。E型は梅雨型の気圧配置のときに多く現れる型で、オホーツク海上空の収束場にベーリング海やバイカル湖付近から対流圏中層以下に寒気が流入して形成される。R型は上層の気圧の峰やブロッキング高気圧に付随して出現する、対流圏下層から上層にわたる温暖高気圧である。N型は北極の寒気が寒冷渦となって東シベリアを横断し、オホーツク海に流入する高気圧で、非常に寒冷である(大川, 1992)。

オホーツク海高気圧から吹く偏東風であるやませは、北海道の東～南東方向から内陸部へ侵入する。やませが卓越した年は、留萌や後志など日本海側の地域では影響が小さい場合も多いが、檜山地方などでは冷害に見舞われる(北海道ほか, 2011)。南空知や石狩では「偏東風」と呼ばれ、5月から8月にかけて吹走する(北海道ほか, 2011)。大冷害だった1993年の7月下旬～8月上旬、同じく冷害年だった2003年の7月上旬にはやませや偏東風が稲作地域を吹走し、連続した低温と日照不足をもたらした(北海道ほか, 2011)。

一方、暑夏の場合は北海道全体が太平洋高気圧に覆われ、高温多照の状態が安定して続き、多くの場合、コメは高収量・高品質となる(北海道ほか, 2011)。北海道のコメの作柄は、その年の夏が暑夏か冷夏になるかで決定づけられ、暑夏の場合は豊作となり、冷夏の場合は作柄が不良となる(北海道ほか, 2011)。

以上のように、北海道の夏の気象はオホーツク海高気圧の卓越する冷夏と太平洋高気圧の卓越する暑夏の間で経年変動する。イネの冷害はオホーツク海高気圧の卓越とやませ・偏東風と関連しており、高気圧の位置ややませ・偏東風の吹走方向に対する各地域の位置関係により各地・各年の冷害の程度は異なる。図 1.1 の地域差はこれを反映したものである。第 2 章では、作物モデルに冷害の論理を追加することで、コメ収量変動の地域差を再現できるかについて解析した。第 3 章では、気温の経年変動幅に着目し、障害型冷害における不稔の発生しうる幅が温暖化によりどのように変化するかを考察した。

1.4 北海道の夏の気象の経年変動幅

第 3 章では、北海道の 7 地点(旭川、岩見沢、今金、北斗、三石、池田、北見;第 3 章図 3.1 参照)について 1986 年～2005 年の 20 年間のイネの生育ステージにおける気温の経年変動幅に着目し、障害型冷害による不稔発生との関係を考察した。前節で北海道の夏の気象はオホーツク海高気圧の卓越する冷夏と太平洋高気圧の卓越する暑夏の間で経年変動することを述べたが、ここで、第 3 章の解析期間の気温の経年変動幅がどのような気象現象によってもたらされたかについて、あらかじめ確認しておく。図 1.5 は、岩見沢および北見の夏季の各暦日における 20 年間の気温(7 日間移動平均気温)の最低値の年(最下位)、最高値の年(最上位)、および下から 2 番目の年(下位 2 位)、上から 2 番目の年(上位 2 位)の推移を示している。最低値、最高値を記録した年は地点により異なるが、低温年を最低値・下位 2 位の年、高温年を最高値・上位 2 位の年として見ると、おおむね 7 地点で同様の傾向であった。岩見沢について 6 月 22 日～26 日付近は、2002 年の気温が最低値であった。2002 年 6 月 22 日の天気図(図 1.6a)に示すように、この期間はサハリン付近にオホーツク海高気圧が停滞しており、6 月 24 日には北海道東部の山間部で降雪が観測された(図 1.6b)。北見や北斗、池田など、他の地点でもこの期間は 2002 年の気温が最低値である場合が多かったことから、この年の 6 月下旬の低温は全道的な傾向であったと考えられる。そしてその要因はオホーツク海高気圧の卓越にあったと推測される。岩見沢の 7 月 6 日～9 日の最低値

の 2005 年、7 月 16 日～21 日の最低値である 2003 年についてもオホーツク海高気圧が卓越していた(図 1.6c, d)。8 月に入ると低温の要因はオホーツク海高気圧から低気圧や前線にシフトすると推測された。例えば、岩見沢、北見における 8 月 20 日～24 日の最低値の 2002 年では、台風から変わった温帯低気圧や日本海上に低気圧がみられた(図 1.6e, f)。一方、気温経年変動の最高値について、梅雨明け後の 7 月 27 日～30 日の岩見沢では 2004 年が記録した。この期間は、北日本で前線の影響、関東以南で台風の影響による降雨がみられたものの、日本付近は太平洋高気圧に覆われ概ね晴れていた(図 1.6g, h)。他の 6 地点(旭川、今金、北斗、三石、池田、北見)でも 2004 年はこの期間のほとんどで最高値または上位 2 位を記録していた。また、岩見沢、北見ともに 8 月 11 日～20 日は 1999 年が最高値であったが、1999 年 8 月は太平洋高気圧が北偏して張り出し、北日本で暑い晴天が続いた(気象庁, 2000)。これらのことから、太平洋高気圧の勢力が強まる梅雨明け後から 8 月にかけての暑夏は太平洋高気圧に起因すると考えられる。なお、7 地点では 7 月上旬から中旬前半にかけて 2000 年が最高値または上位 2 位を記録する地点が多かったが、2000 年のこの期間は太平洋高気圧の勢力が弱く、7 月中旬から強まったとのことである(農林水産省, 2013)。このため、北海道の梅雨明け以前の高温と太平洋高気圧の関連は確認できなかった。以上より、解析期間(1986～2005 年)における北海道の夏季の気温の経年変動幅は、梅雨明け以降の 7 月についてはオホーツク海高気圧と太平洋高気圧、8 月は低気圧・前線と太平洋高気圧によって主に決定されたと推測される。また、6 月後半から梅雨明け以前は、オホーツク海高気圧の卓越に起因して低温がもたらされたと推測される。

図 1.5 に示すように、大冷害であった 1993 年は岩見沢において 7 月下旬から 8 月上旬にかけて最低値または下位 2 位の気温となっており、この時期の低温が障害型冷害の発生に寄与したと考えられる。同じく冷害年の 2003 年は、7 月下旬に最低値または下位 2 位となっており、この時期の低温が障害型冷害の発生に寄与したと想定される(これらの年は上記以外の期間についても低温が長く継続し、生育が遅れたことも想定される。これらの年は障害型と遅延型の併行型冷害として記録されている)。しかし、図から 1993 年や 2003 年の気温が夏季を通して常に最低値や下位 2 位であったわけではないことがわかる。これらの年は、イネの生育ステージのうち低温に特に脆弱な期間と低温のタイミングが重なったため、冷害(障害型冷害)が発生したと考えられる。他の年の中には、そのタイミングがずれていたため、冷害を免れた年もあると推測される。例えば、岩見沢では 7 月 11 日から 22 日にかけての大半で 1986 年が下位 2 位を記録したが、札幌地域における 1986

年の作況は平年以上(作況指数:110)であった。これらのことは、障害型冷害の発生には低温に脆弱な生育ステージのタイミングとその気温の考察が重要であることを示唆する。第 3 章では、気温上昇に伴う低温に脆弱な生育ステージのタイミングの変化とそのステージの気温の変化の双方を考慮し、障害型冷害による不稔の発生しうる幅の変化について考察した結果について述べる。

表 1.1 日本国内を対象とした作物収量予測の例

著者	概要	対象地域	主な結果
清野 (1995)	作物モデル CERES を用いて温暖化後の水稻、コムギ、トウモロコシの収量を評価	日本の主要生産地点	気温上昇により減収 (特に九州)。北陸・東北・北海道では気温上昇による減収を二酸化炭素 (CO ₂) 施肥により回復できるが、九州は回復が難しい。
Iizumi et al. (2007)	作物モデル SIMRIW により冷夏年、暑夏年の温暖化後のコメ収量変化を予測	日本全域	冷夏年における北日本の冷害は軽減、暑夏年における中央～南西日本の高温不稔は増加する。
横沢ほか (2009)	コメ収量予測モデル PRYSBI によりコメ収量への温暖化影響を評価	日本全域	気温上昇により北海道・東北では増収、それ以外の地域では減収。北日本の収量増加は、主に冷害による収量低下が発生する確率が減少することに起因する。
Okada et al. (2011)	PRYSBI と経験モデルを用いて将来気候下のコメの収量と品質を評価	九州	夜間の最低気温が上昇し、高温ストレスによりコメ品質は低下する。
中辻ほか (2011) 丹野 (2012)	2030 年代の水稻、畑作物、飼料作物の生育・収量・品質を予測	北海道	水稻について、収量は現在並～やや増収。遅延型冷害のリスクは減少するが、障害型冷害のリスクは残る。
Nemoto et al. (2012)	イネの耕作スケジュールの気候リスクを確率的に評価する手法を開発	北海道 (岩見沢)	2031–50 年には東北品種を栽培可能。2081–2100 年には移植日によっては高温障害が増加。冷害は減少する。

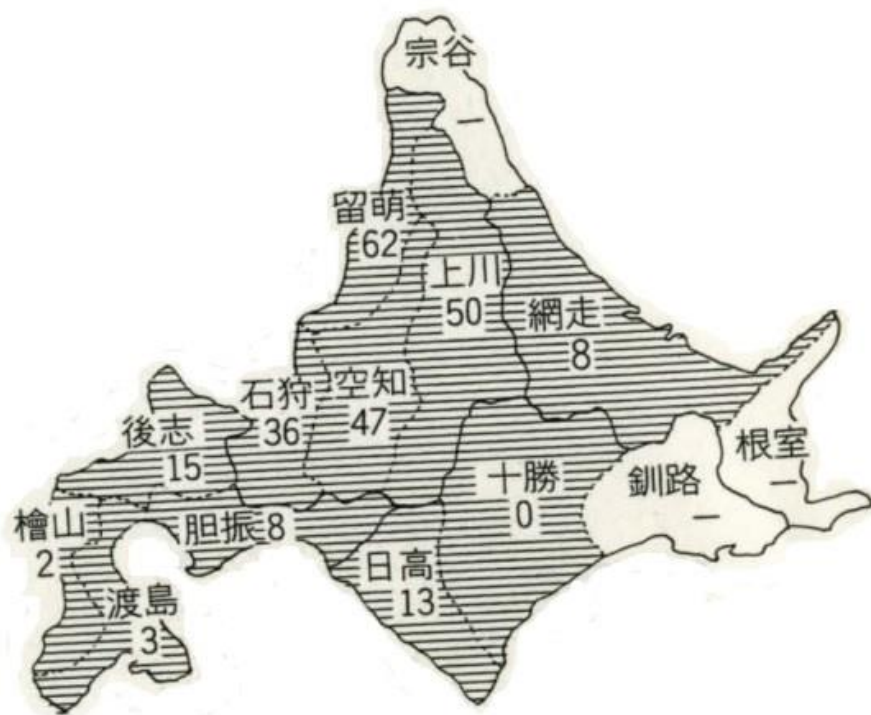


図 1.1 1993 年のイネの支庁別作況指数(農林水産省農林経済局統計調査部 b より)。作況指数とは、その年の 10a 当たり平年収量に対する 10a 当たり収量の比率で表したものである。1993 年の北海道全体の作況指数は 40 であった。

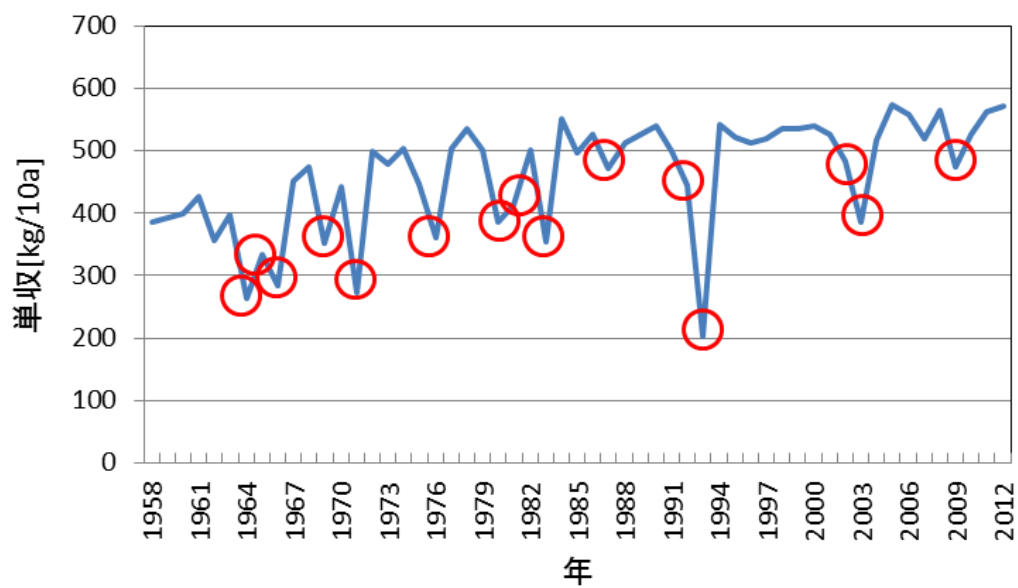


図 1.2 1958～2012 年における北海道の水稻の 10a 当たり収量の時系列(農林水産省農林経済局統計調査部 a に基づき作成)。赤丸は冷害年(北海道ほか, 2011)を示す。

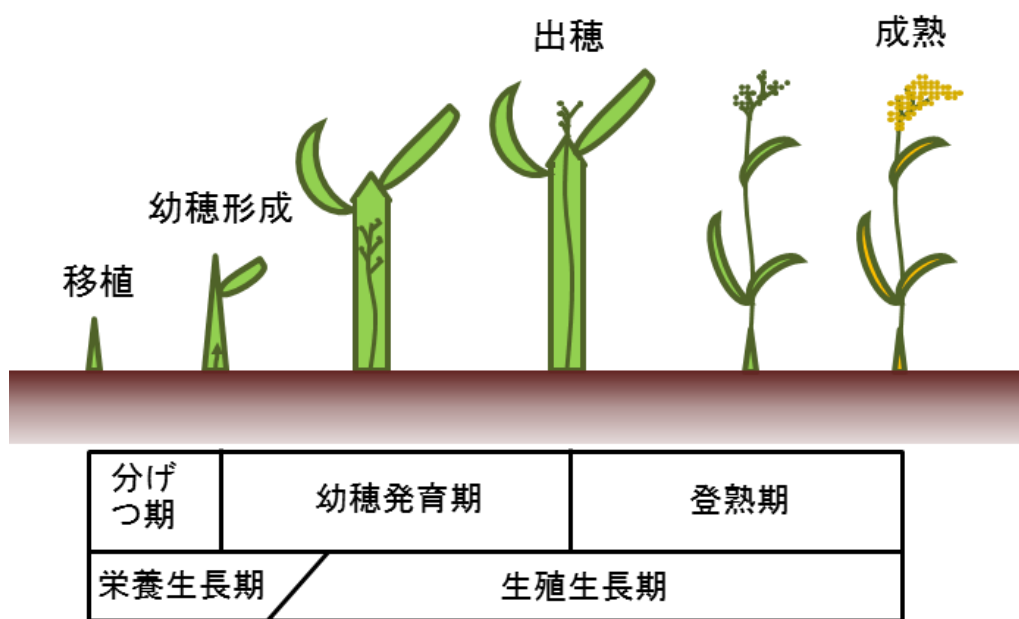


図 1.3 イネの生長過程の模式図

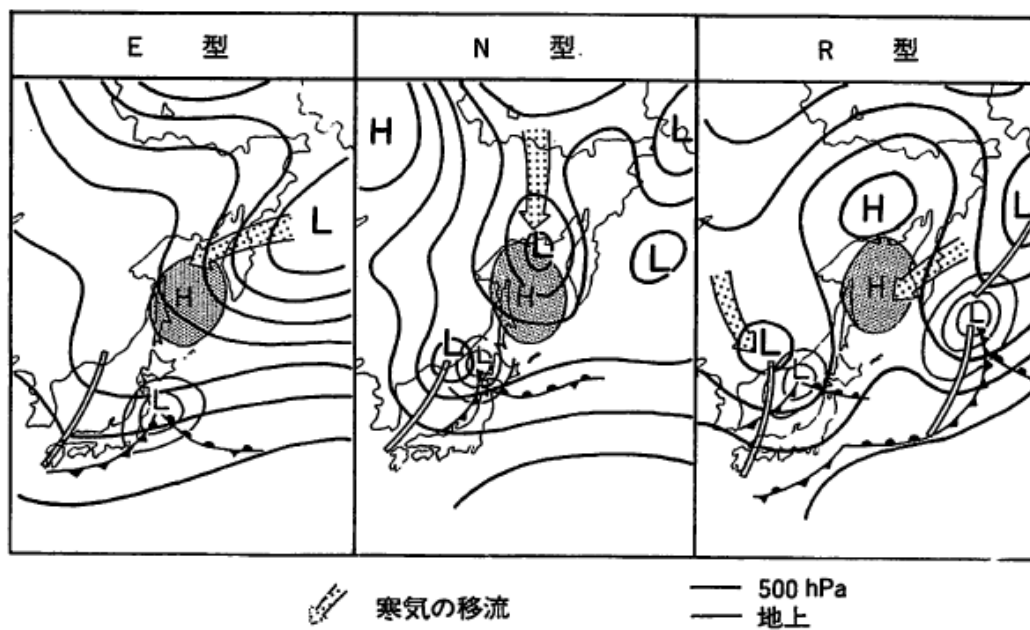


図 1.4 500hPa 面の気圧配置により分類された梅雨期のオホーツク海高気圧の 3 つの型(大川, 1992 より)

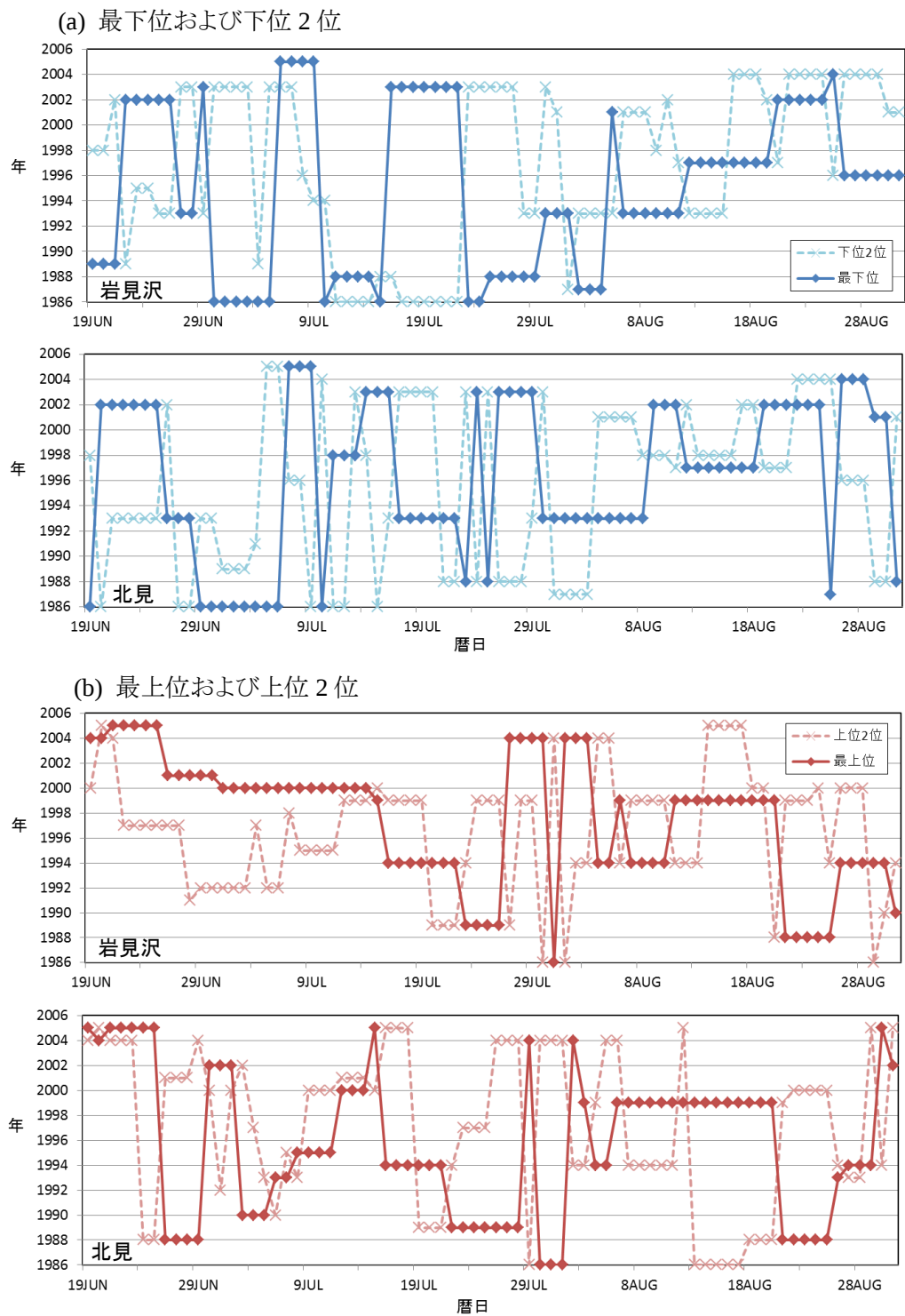
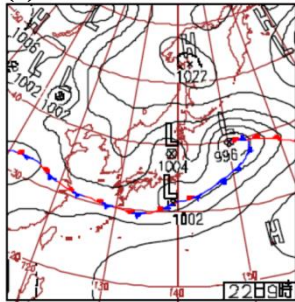


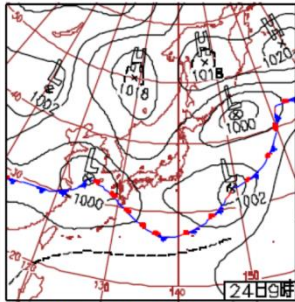
図 1.5 岩見沢、北見での 6 月 19 日から 8 月 31 日の各暦日の 7 日間移動平均気温の 1986～2005 年 (20 年間) における (a) 最下位および下位 2 位の年、(b) 最上位および上位 2 位の年

(a) 2002 年 6 月 22 日



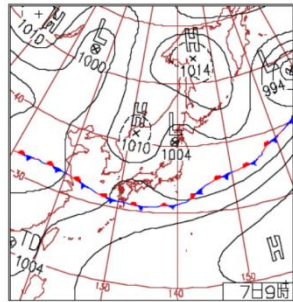
22日(土)東日本でやませ
梅雨前線は、北海道東海上の低気圧
から、九州の南を通り、華中に伸び
る。朝方に関東南部で雷雨。東日本
は北東気流が続き、梅雨寒傾向。

(b) 2002 年 6 月 24 日



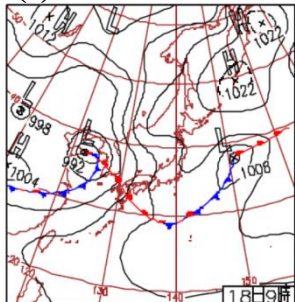
24日(月)真夏日と降雪
西日本では低気圧と前線の接近で雨。
東日本以北は全般に曇りで気温低め。
北海道東部の山間部では季節外れの
雪。一方、那覇では最高気温33.7℃、
今期一番。

(c) 2005 年 7 月 7 日



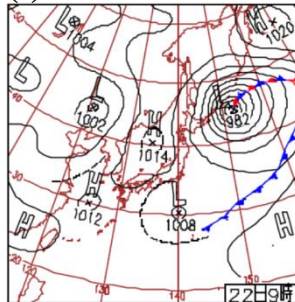
7日(木)神奈川県で落雷2人死亡
上空に寒気が入り、各地で雨や雷雨。
東北地方から西日本にかけて所々で
30mm/1h以上の雨。兵庫県西脇市で
51.5mm/1h。西日本では平年よりやや
早くヒグラシやアブラゼミの初鳴。

(d) 2003 年 7 月 18 日



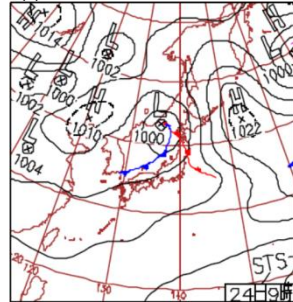
18日(金)台風第8号発生
梅雨前線が九州北部から日本の南海
上に延び、西日本で激しい雨。日降
水量は三重県尾鷲で190mm、高知県
室戸市で239mm。北日本～東日本で
は低温と日照不足の状況が続く。

(e) 2002 年 8 月 22 日



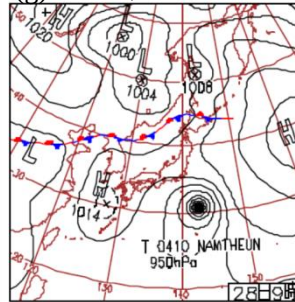
22日(木)気温低め
日本海の高気圧に覆われ、ほぼ全国
的に晴天だが、大陸育ちの冷たい空
気のため気温は低め。北海道大雪山
系で初雪。内陸部の長野県開田村で
5.8℃など10月上旬並みの冷え込み。

(f) 2002 年 8 月 24 日



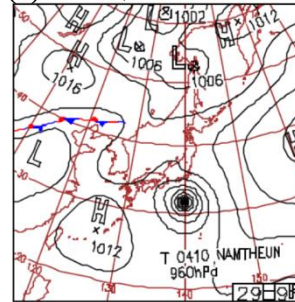
24日(土)日本海に低気圧
北日本に低気圧が近づき、北海道・
東北地方は雨や雷雨。前線に近い九
州北部で一時強い雷雨、長崎県野
崎町では日雨量234mm。関東以西も
西日本の一部で晴れた他は曇り空。

(g) 2004 年 7 月 28 日



28日(水)伊豆諸島 猛烈なしけ
北日本は前線の影響で曇りや雨。そ
の他は太平洋高気圧に覆われ概ね晴
れ。台風第10号が八丈島の南を西進
し、伊豆諸島の海上は9mを超える猛
烈なしけ。関東では夕方から雨。

(h) 2004 年 7 月 29 日



29日(木)関東大雨 南大東島少雨
台風第10号の接近により、関東を中
心に雨。山沿いでは日雨量100mmを
超える大雨。その他は高気圧に覆わ
れて晴れ。南大東島では6月21日以降
の総雨量9.5mm、少雨が続く。

図 1.6 岩見沢における 7 日間移動平均気温の 20 年間での経年変動の下位または上位を記録した年月日付近における天気図の例(気象庁, 2013a)

第2章

潜在作物生産性モデル GAEZ の北海道での適用可能性の検討と改良

要旨

現在気候下の北海道のコメ収量変動を再現するため、潜在作物生産性モデル GAEZ の北海道への適用可能性評価および改良を実施した。改良前の GAEZ では計算対象期間の大半で北海道のほぼ全域で気温条件を満たさず収量がゼロとなり、耐冷性の強化によってコメ栽培が可能となった北海道にはそのまま適用できなかった。モデルの改良として(1)気温条件の変更、(2)バイオマス計算論理の変更、(3)出穂日推定論理の追加、および(4)障害型冷害の考慮を実施した。(1)により寒冷地でも収量を得ることが可能となったが、観測の収量変動をほとんど再現しなかった。(1)に加え(2)、(3)、(4)を組み合わせることで再現性は大幅に向上した。特に障害型冷害の考慮と出穂日の推定が北海道の観測収量変動の再現性向上に大きく寄与した。

2.1 はじめに

気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC AR4)では、気温上昇による全球での作物生産性について、中・高緯度では1~3℃の気温上昇で生産性が向上する一方、低緯度では1~2℃の気温上昇でも生産性が減少し、上記以上の気温上昇では全地域で生産性が減少すると予測している(Easterling et al., 2007)。主要作物の生産性は食料安全保障等の観点からも重要であり、気候変動に対する脆弱性や地域特性を把握することが求められている。このような背景から、現在多くのモデルが開発され、気候変動下の作物収量予測が行われている。Masutomi et al. (2009)は潜在作物生産性モデル GAEZ を改良し、複数の気候変動予測シナリオおよび排出シナリオを用いてアジア地域のコメ収量の定量的予測を行い、特に2080年代のA2シナリオの場合に収量が著しく減少することを示した。申ほか(2011)はMasutomi et al. (2009)と同様の手法で全球を対象としたトウモロコシの収量変化の定量的予測を行った。

日本における作物収量の評価について、横沢ほか(2009)は広域コメ収量予測機構モデル PRYSBI を用いて全国4地域の気温上昇度に対するコメ収量変化を定量的に評価した。モデルのパラメータを県単位で統計的に推定することにより国内の地域特性を反映した予測を実現し、北海道・東北地域は気温上昇に伴いコメ収量は増加するが、それ以外の地域は減少することを示した。

IPCC AR4(Easterling et al., 2007)や横沢ほか(2009)の結果によると、北日本ではコメの増収が期待されるが、増収率や収量の安定性から作付地域の選定等を行う際にはより地域詳細な予測が求められる。特に我が国のコメ作付の北限である北海道では、たびたび冷害に見舞われるなど気象条件による制約が大きいため、気候変動下の収量予測やそれに基づいた栽培適地の判定は重要である。適地の変化による将来の作付地域の変化が北海道の土地利用計画や食糧自給に与えるインパクトは大きい。

以上のように、北海道における気候変動下のコメ収量への影響評価は重要であるが、より信頼性の高い評価のためには現在の北海道の気候に対する応答を再現できるか確認する必要がある。そこで、本章では将来の気候変動による影響評価に適用することを念頭にして、北海道を対象に現在気候下のコメ収量変動を再現し、その再現性を評価することを目的とする。本研究では圃場スケールでの細かい品種別の気候感度より、北海道内のコメの気候に対する応答の地域差や収量分布を包括的に評価したいため、ある程度広域に対応したプロセスモデルを用いる方法を採用し、Masutomi et al. (2009)および申ほか(2011)が使用した広域モデルの GAEZ を用いることとした。

GAEZ モデルは気温等の条件により栽培に適しているかを判定する適性判定条件を含む。本研究ではこのような判定条件を寒冷地である北海道に適用できるようにモデル改良を行った。さらにバイオマス量の計算方法を変更の上、北海道において甚大な被害をもたらす適地評価の観点からも重要な冷害リスクを反映できるようにした。本章では GAEZ モデルの北海道への適用可能性と改良の効果について現在気候での観測収量の再現性にに基づき評価する。

2.2 モデルと実験設定

本研究では Masutomi et al. (2009) による改良版の GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) モデルを用いた。元の GAEZ モデルは国際連合食糧農業機関 (FAO) と国際応用システム分析研究所 (IIASA) により開発された潜在作物生産性モデルで、詳細は Fischer et al. (2002a) を参照されたい。以降では改良版 GAEZ モデルの概要および実験設定について示す。

2.2.1 潜在作物生産性モデル GAEZ の概要

表 2.1 に GAEZ モデルの入力データを示す。Masutomi et al. (2009) の気候入力データは日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、日降水量 (mm/day)、日平均放射 (W/m^2)、日平均風速 (m/s)、気温日較差 ($^{\circ}\text{C}$) であるが、本研究では日較差の代わりに日最高気温 ($^{\circ}\text{C}$) と日最低気温 ($^{\circ}\text{C}$) を用いた。

モデル計算の手順は申ほか (2011) を参照されたいが、概要は下記の通りである。まず入力的气候条件に基づき、成長期間の算出、気温による適性判定、および農業気象制約を考慮した作物成長計算が行われる。さらに土壌制約 (土壌タイプに基づく)、灌漑面積率、入力レベル等を考慮した収量が計算される。ここで入力レベルは各国の資本や労働力、施肥等の社会経済要素を考慮した高・中・低の 3 段階の要素で、日本は高に該当する。GAEZ モデルでは天水農地と灌漑農地 (土壌水分の不足による制約がないと仮定) について計算可能であるが、日本では灌漑なしで稲作を行っているとは考えにくいとため、北海道全域で灌漑ありと仮定した。以上により収量ポテンシャル (北海道全域に作付した場合に見込まれる収量) が得られ、実際の作付面積分布でマスクすることにより作付地域のみの収量を得られる。GAEZ モデルではさらに大気中二酸化炭素 (CO_2) 濃度の変動による施肥効果を考慮可能であるが、今回は現在気候下の計算であるため考慮しなかった。

コメについて、GAEZ モデルでは大きく乾燥地帯品種と湿潤地帯品種に区別されており、日本

型イネは湿潤地帯品種に分類される。デフォルトで日本型イネは成長期間の異なる 4 つの品種 (105、120、135、150 日) の取扱いが可能である。計算は植付日および品種を固定した計算と固定しない計算が可能で、固定しない場合は年毎に収量が最大となる植付日および品種が選択される。北海道を対象とした今回の計算では、観測収量変動との比較のため後述の方法で植付日と品種を固定して計算を行った。

2.2.2 気候データ作成方法

GAEZ モデルの入力として必要な気候データのうち、日平均風速以外の要素は農業環境技術研究所作成のアメダスメッシュ化データ(清野, 1993)を使用した。日平均風速は JRA-25 長期再解析データ(Onogi et al., 2007)を領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2008)により力学的にダウンスケールしたものをを使用した。アメダスメッシュ化データは 3 次メッシュ(約 1km 格子)、WRF データは 10km 格子出力である。本研究では北海道全域を 0.05°(約 5km) 格子で解像するため、アメダスメッシュ化データは単純平均により平滑化し、WRF データは近傍 4 点による逆距離加重平均法にて線形内挿しを使用した。

2.2.3 行政区域データ・作付面積データ作成方法

行政区域(旧支庁・市町村)は国土数値情報の平成 22 年度の行政区域界データ(国土交通省)を 0.05°格子で解像し使用した。行政区域に基づくデータ作成および解析は全て平成 22 年度の状態(14 支庁・179 市町村)に従い実施し、それ以前の合併等による変動は考慮しない。また、旧支庁は現在の総合振興局・振興局を指すが、以降本文では支庁と記載する。

観測収量変動の再現性評価には作付面積に基づく収量集計が必要である。作付面積データは作物統計(農林水産省農林経済局統計調査部 a; 農林水産省農林経済局統計調査部 b) および北海道農林水産統計年報(農林水産省北海道統計情報事務所)の市町村別耕地面積・作付面積データと国土数値情報の土地利用 3 次メッシュ(国土交通省)をもとに下記手順で作成した。

- 1) 国土数値情報(国土交通省)の田耕地面積分布データを 0.05°格子で投影し、市町村別に集計する。データは 1987 年、1991 年、1997 年、2006 年のものを使用し、各々について上記作業を実施する。

- 2) 各市町村について、統計値(農林水産省農林経済局統計調査部 a; 農林水産省北海道統計

情報事務所)の毎年の市町村別田耕地面積データと 1) で作成した市町村別集計データの比を算出し、1) の 0.05°格子の分布データに比を乗算する。これは耕地面積の分布は国土数値情報に従っており、市町村毎の面積集計値は統計値により補正されることを意味する。統計値のみ値ありの場合は当該市町村内の格子に統計値の耕地面積を割り当て、国土数値情報のみ値ありの場合は統計値に従い面積ゼロとした。計算対象期間は 1985 年～2005 年とし、国土数値情報の 1987 年データを 1985 年～1989 年に、1991 年データを 1990 年～1994 年に、1997 年データを 1995 年～2001 年に、2006 年データを 2002 年～2005 年にそれぞれ対応させ、各年のデータを作成した。

- 3) 各年に対し市町村毎に統計値(農林水産省農林経済局統計調査部 a; 農林水産省農林経済局統計調査部 b; 農林水産省北海道統計情報事務所)の田耕地面積データと作付面積データの比を算出し、2) で補正した耕地面積分布データに乗算したものを作付面積分布データとする。

図 2.1 は以上により作成した 2000 年における作付面積分布と支庁の位置である。全計算対象期間を通して作付面積は空知支庁、上川支庁に集中するほか、北海道西部や十勝・網走地方に点在する。一方、宗谷・釧路・根室支庁では作付面積はゼロである。

2.2.4 観測耕種期日・品種および収量データ

本研究では観測収量変動の再現性を評価するため、植付日および品種を観測に基づき固定して計算を行った。植付日は作物統計(農林水産省農林経済局統計調査部 b; 農林水産省農林経済局統計調査部 c)より引用した観測の耕種期日(播種期、移植期、出穂期、刈取期)のうち移植期を設定した。耕種期日は北海道内を 4 地域(札幌、函館、帯広、北見)に分類し収録されているため、植付日もこの 4 地域毎に設定した。支庁と 4 地域の対応関係は表 2.2 に示す通りである。品種については観測の耕種期日に従い成長期間の調整を実施した。GAEZ モデルでは直播栽培を想定し成長期間を 4 つの生育ステージ(initial、crop development、mid-season、late season; 本章では順に ini、dev、mid、end 期と略す)に分類している。元の設定(Masutomi et al., 2009)では各ステージの成長期間に占める比率(%)は ini、dev、mid、end 期の順に 10、30、30、30 であった。本研究では移植日を dev 期始め、出穂日を mid 期末日と仮定し、4 地域毎の計算対象期間での観測移植期～刈取期および移植期～出穂期の平均日数をさらに各々 4 地域で平均した日数(約 129.8 日お

よび約 71.5 日)をもとに、ini、dev、mid、end 期の比率(%)を 20、30、15、35 とし、dev 期～end 期を 128 日 (ini 期～end 期で 160 日)とした。本研究では移植期を植付日としたため、収量計算等に用いる成長期間は dev 期～end 期の 128 日と設定した。成長期間以外の品種固有のパラメータは GAEZ モデルの成長期間 150 日の品種と同様とした。ini 期～dev 期(播種～移植期の想定)でのバイオマス生産量(移植時の乾物重)は最終収量の 1/100 のオーダー程度と想定されるため、今回は考慮しなかった。なお、上記品種設定は北海道全域で同一の値とした。

再現性評価の際に使用する観測収量データは作物統計(農林水産省農林経済局統計調査部 a; 農林水産省農林経済局統計調査部 b)および北海道農林水産統計年報(農林水産省北海道統計情報事務所)の市町村別収量データ(kg/10a)を用いた。

2.2.5 実験設定

以上の計算手順・データにより、北海道を対象にコメ収量のシミュレーションを実施した。実験設定は表 2.3 の通りである。再現性評価は観測収量年変動と GAEZ モデル出力の収量年変動との比較により実施した。その際、GAEZ モデル出力の収量は作付面積で重み付け集計した値を用いた。

GAEZ モデルの北海道への適用可能性を評価するため、モデルの改良を実施した。改良方法は 2.3 節に示す通りである。改良前と改良後の観測収量変動の再現性を比較することで、改良の効果を定量的に評価した。2.4 節ではその結果について述べる。

2.3 モデル改良方法

本研究では、GAEZ モデルの作物成長計算モジュール(気候条件のみを考慮した収量を計算)について改良を行った。作物成長計算モジュールの流れと改良方法の対応は図 2.2 の通りで、モデルの改良は 4 段階で実施した。下記に各段階の改良方法について示す。

2.3.1 気温条件の変更

作物成長計算モジュールでは、まず気候条件をもとに植付可能期間の算出を行う。10 年間のスピンアップ計算後、積雪、降水および土壌水分の状態、日平均気温条件により各日について植付可否、休眠状態(日本型イネの場合考慮しない)について判定し、植付可能と判定された日が連続

する期間を植付可能期間と設定する。このうち日平均気温は 5℃ 以上が条件であったが、北海道東部一帯で実際には平年以上の収量であった 1989 年に、GAEZ モデルでは条件を満たさず収量がゼロと判定された。この条件は栽培適地判定の観点に基づくもので、北海道に適した値を決定するため 4℃、3℃ および 0℃ で感度分析を行った。観測収量の再現性を吟味した結果、本研究ではこの条件を 4℃ に緩和することとした。

GAEZ モデルでは、上記で設定した植付可能期間と品種パラメータの成長期間を照合し実際の成長期間の算出が行われる。その後、気温による適性判定が行われ、適性と判定された場合のみ収量計算が行われる。気温による適性は成長期間内の積算気温や各気温帯(10℃ 以上 15℃ 未満など)日数の成長期間に占める割合から判定されるが、北海道に適用すると多くの年にほぼ全域で条件を満たさなかった。これは主に低温に関する条件(10℃ 以上 20℃ 未満の日数および 10℃ 未満の日数¹)を満たさないことによる。北海道は品種の耐冷性を強化しコメ作りが可能となった地域であるため、全球スケールの判定条件をそのまま適用できない。今回はこの気温による適性判定条件を撤廃し、収量を算出することとした。

2.3.2 バイオマス量計算論理の変更

バイオマス量は、光合成率(日中気温等に依存)に関連づけられたバイオマス生産率と呼吸率(日平均気温等に依存)に基づいて計算される。詳細は GAEZ モデルの当該項目の説明書(Fischer et al., 2002b)を参照されたい。今回用いた GAEZ モデル(Masutomi et al., 2009)ではバイオマス生産率に関わる日射量の取り扱いについて説明書と異なる計算式を用いていたが、北海道へ適用する際に説明書に準ずる式に変更した。すなわち、バイオマス生産率は下記により計算される。

¹ 10℃ 以上 20℃ 未満の日数の条件は、成長期間内の気温プロファイルの気温上昇期について成長期間日数の 40%未満、気温下降期について成長期間日数の 25%未満である。10℃ 未満の条件は日数ゼロである。

$$b_{gm} = \begin{cases} F(0.8 + 0.01P_m)b_o \\ + (1 - F)(0.5 + 0.025P_m)b_c \\ \text{for } P_m > 20 \\ F(0.5 + 0.025P_m)b_o \\ + (1 - F)(0.05P_m)b_c \\ \text{for } P_m \leq 20 \end{cases} \quad (2.1a)$$

$$(2.1b)$$

ここで b_{gm} は最大総バイオマス生産率、 P_m は最大光合成率、 b_o は完全に曇りの日の総乾物生産率、 b_c は快晴日の総乾物生産率を指す。 F は日中の空に占める雲の比で、 $F = (A_c - 0.5R_g)/(0.8A_c)$ により算出される (A_c は晴天時の最大有効短波放射 ($\text{cal cm}^{-2}\text{day}^{-1}$) で、光合成有効放射を用いた。 R_g は下向き短波放射 ($\text{cal cm}^{-2}\text{day}^{-1}$) を指す)。

GAEZ モデルでは成長期間の平均気象を用いて成長曲線の変曲点での光合成率やバイオマス生産率、呼吸率を算出し、成長期間の平均バイオマス生産率を変曲点での生産率の 1/2 と仮定し正味のバイオマス生産量を計算するが、北海道へ適用する際、日々の気象を反映するように変更した。具体的には、必ずしも正確ではないが、平均気象による各々の計算式が日々の気象に対しても成立すると仮定し、日々のバイオマス生産率および呼吸率を求め、成長期間で積算するようにした。これは日毎に成長曲線を描きバイオマス生産量を求めることに相当する。これにより最終的な正味のバイオマス生産量および収量ポテンシャルは下記により計算される。

$$b_{n,i} = (0.36b_{gm,i} - 0.5c_{t,i} \sum_j^{i-1} b_{n,j}) \times L_i \quad (2.2)$$

$$B_n = \sum_i^N b_{n,i} \quad (2.3)$$

$$Y_p = B_n \times H \times N / N_0 \quad (2.4)$$

ここで添え字 i は各日を表し、 $b_{n,i}$ は各日の正味のバイオマス生産量を表す。 $c_{t,i}$ は呼吸に関する係数、 L_i は葉面積指数 (LAI) から算出される係数である。 N は実際の成長期間で、 B_n は成長期間全体での正味のバイオマス生産量を表す。最終的な収量ポテンシャル Y_p は正味のバイオマス生産量に収穫指数 H および品種固有の成長期間 N_0 を考慮した値となる。

式(2.2)において、 L_i を算出するために LAI を日々推定する必要がある。今回のモデル改良では、FAO (Allen et al., 1998)による作物係数推定方法および桜谷・堀江(1985)による蒸発散量と LAI の関係式を用いて日々の LAI を推定した。桜谷・堀江(1985)によれば水田蒸発散量を ET 、水面蒸発量を E としたとき、LAI との関係は下記の式で表される。

$$\frac{E}{ET} = e^{-kLAI} \quad (2.5)$$

ここで係数 k は 0.40 である。FAO (Allen et al., 1998)による作物係数推定方法によれば、蒸発散量は基準蒸発散量 ET_0 (ペンマン・モンティース法により日々推定)に作物係数 K_c を乗算して得られ、下記が成り立つ。

$$ET = (K_{cb} + K_e)ET_0 = K_c ET_0 \quad (2.6)$$

ここで K_{cb} は基礎作物係数、 K_e は土壌蒸発係数である。 $E = K_e ET_0$ と考えられることから、式(2.5)は下記のように変換できる。

$$\frac{E}{ET} = \frac{K_e}{(K_{cb} + K_e)} = e^{-kLAI} \quad (2.7)$$

本研究では作物係数推定方法に従い K_{cb} および K_e を推定し、式(2.7)を用いて LAI を算出した。詳細は FAO による説明書 (Allen et al., 1998)を参照されたいが、概要は下記の通りである。まず ini、dev、mid、end の 4 つの作期各々について K_{cb} を算出する。本研究では GAEZ モデルのパラメータとして設定されている K_c と FAO による説明書 (Allen et al., 1998)を勘案し、ini、mid、end 期の K_{cb} をそれぞれ 0.9、1.15、0.7 とした。mid 期と end 期の K_{cb} は各期間の平均風速、平均日最低相対湿度、平均作物長により補正する。dev 期の K_{cb} は ini 期の値を起点、mid 期の値を終点として日々単調増加し、end 期は mid 期の値を起点、end 期の値を終点として単調減少するように設定する。次に、下記により K_e を算出する。

$$K_e = \min(K_r(K_{c\max} - K_{cb}), f_{ew}K_{c\max}) \quad (2.8)$$

ここで $K_{c\max}$ は K_c の上限値で平均風速や平均最低相対湿度などを考慮した値である。 f_{ew} は露出した湿地の比で、 $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$ により計算する。 K_r は蒸発減衰係数(完全に湿っているとき 1.0)、 f_w は灌漑等により湿った土壌の比で、いずれも 1.0 とした。 f_c は作物により被覆された土壌の比で、 K_{cb} 等を考慮し算出した。なお、平均風速および平均日最低相対湿度について、説明書 (Allen et al., 1998) に記載のある上限・下限値は考慮しなかった。以上の算出で用いた dev、mid、end 期の作物長は平成 21 年度北海道立中央農業試験場年報(北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場, 2010)による北海道品種「きらら 397」、「ほしのゆめ」および「ななつぼし」の平年の移植時、6 月 20 日、7 月 20 日の草丈および稈長平均を線形内挿したものを使用した。

2.3.3 出穂日推定論理の追加

北海道の水稲移植栽培では安定生産をはかるために作付品種の基準が作成されている(丹野ほか, 2007; 北海道ほか, 2011)。1989 年より導入された基準では出穂日を基準とした気温条件から安全出穂期間(早限出穂期～晩限出穂期)を設定し、簡易有効積算気温から推定した出穂日が安全出穂期間内となるような品種を選定する。2008 年に導入された方法では、水稲生育システムを用いて発育速度を計算することにより出穂日を推定し、安全出穂期間を求めている。上記のいずれの方法でも、出穂日を予測することが水稲生育の予測において重要であることが示唆されるが、GAEZ モデルでは出穂日の推定論理は含まれていない。このため、新たに出穂日を推定する論理を追加することとした。

本研究では簡易有効積算気温による出穂日推定論理を採用した。簡易有効積算気温とは、日最高最低平均気温から稲の生育に有効な温度(簡易有効気温)だけ使用した積算値である(北海道ほか, 2011)。丹野ほか(2007)は簡易有効気温 θ を下記により計算している。

$$\theta = (a - b) / (1 + (T_{mean} / c)^b + d) \quad (2.9)$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 d はそれぞれ 55.89942、-4.165141、21.84576、0.9107297 で、 T_{mean} は日平均気

温である。本研究でも式(2.9)を用いて θ を算出した。 T_{mean} について、丹野ほか(2007)は日平均風速および日照時間を考慮した値を用いているが、簡略化のため入力の日最高気温と日最低気温の平均値を設定することとした。

植付日から θ を積算し、基準値に達した日を出穂日とした。基準値は北海道ほか(2011)による簡易有効積算気温と晩限指標品種との対応関係をもとに4地域分類で調整・設定し、中生のうるち米品種が主の札幌・函館地域は950°C、早生のもち米が主の支庁を含む帯広・北見地域は850°Cとした。図2.3は4地域毎に平均した出穂日推定値の統計値(農林水産省農林経済局統計調査部b;農林水産省農林経済局統計調査部c)との比較である。年・地域により誤差にばらつきはあるが、二乗平均平方根誤差(RMSE)は札幌、函館、帯広、北見の順に1.75、1.58、2.35、2.91(日)で、概ね3日以内の精度で出穂日を予測できる。

イネのLAIは出穂日付近で最大となることから、先述のLAI算出方法に出穂日による変動を考慮した。GAEZの設定ではini、dev、mid、end期の成長期間に占める割合は固定であったが、 K_{cb} を求める際に出穂日がmid期末日となるようにし、dev、end期の割合を可変とした。すなわち、GAEZ設定のmid期末日より出穂が早い場合はdev期の割合が減少し、その分end期の割合が増加する。出穂が遅い場合はdev期の割合が増加し、end期の割合が減少する。ただしend期が減少する場合、 K_{cb} は本来のend期間日数から算出するとした。これはLAIが成長期間内に成熟期の値まで減少しきらないことを表す。さらに出穂遅延による成熟不良を想定し、end期が減少する場合は最終収量(式(2.4)の Y_p)にGAEZ設定のend期間に対する実際のend期間の比を乗算した。なお、成長期間内に出穂しない場合は収量ゼロとした。

2.3.4 障害型冷害推定論理の追加

1.2節で述べたように、冷害は低温障害で不稔歩多発により減収する障害型と低温による生育遅延で減収する遅延型、および両者の併行型の3つに区分される(北海道ほか, 2011)。出穂日を推定しLAIを変動させる方法は遅延型冷害を想定しており障害型の冷害は考慮していないため、さらに論理追加を行った。北海道ほか(2011)では障害型冷害の影響を受けやすい前歴期間、冷害危険期間、開花期間の気温分類による北海道品種「きらら397」の不稔歩合推定を行っている。本研究ではこの推定不稔歩合(%)を利用し、(1-不稔歩合/100)を冷害係数として収量ポテンシャルに乗算することで障害型冷害の影響を考慮することとした。表2.4に今回設定した各期間の気温

分類による不稔歩合推定値を示す²。前歴期間は出穂前 24～15 日、冷害危険期間は出穂前 14～8 日、開花期間は出穂後 7 日間とした。また、北海道ほか(2011)の注釈に従い、5～15%の不稔発生は収量ポテンシャルに影響しない(冷害係数=1)とした。

2.4 結果と考察

はじめに、各改良方法の効果について示す。改良方法(1)(2.3.1 節;気温条件の変更)の実施により、北海道のほぼ全域で収量が計算されるようになった。収量の平均値は観測収量と近いが、年々変動はほとんどみられず観測収量の再現性は低かった。(2)のバイオマス生産率計算の変更(2.3.2 節の式(2.1))により年々変動はやや大きくなったが、収量は大幅に過大となった。(2)の残りの手順(2.3.2 節の日別気象の考慮および LAI 算出方法の変更)を行うことで収量の過大傾向は緩和された。(3)(2.3.3 節;出穂日推定論理の追加)では、出穂遅延による成熟期間の短縮の考慮(end 期間の比の乗算)により観測収量の再現性が向上した。(4)(2.3.4 節;障害型冷害推定論理の追加)の実施により観測収量の再現性は大幅に向上した。(1)は栽培適性判定に関する変更で、(2)および(3)は日々の気象条件を収量計算に反映するための改良、(4)は障害型冷害の考慮により障害リスクを収量に反映する改良と大きく分けられることから、以降では(1)のみ実施した場合を「改良前」、(1)～(3)を実施した場合を「改良後 1」、(1)～(4)を実施した場合を「改良後 2」として結果を述べる(図 2.2 参照)。

図 2.4 は記録的な冷害となった 1993 年と平年以上の収量となった 2000 年における GAEZ モデルの改良前・改良後 1・改良後 2 での収量ポテンシャル計算結果である。改良前と比較し改良後は両年とも地域差が拡大している。また、改良後は両年の収量ポテンシャルの差が大きくなっている。改良後 1 で収量減少がみられる地域は出穂遅延によるもので、改良後 2 で収量減少がみられる地域は出穂遅延に加えて障害型冷害の影響を受けたことを示しており、1993 年で顕著である。

以降は作付地域で集計した値を用いて観測収量との比較を行う。図 2.5 は改良前、改良後 1、改良後 2 における北海道全域平均収量の比較結果である。改良前は観測の収量変動をほとんど

² 北海道ほか(2011)の不稔歩合推定値は各気温条件に対し 65～30%のように幅を持った値となっている。本研究ではこの低位値(65～30%の場合は 30%)を用いた。北海道ほか(2011)にない気温条件に対する不稔歩合(表 2.4 の網掛け部分)は、直近の気温条件の中位値(65～30%の場合は 47.5%)を設定した。直近の気温条件が本研究による設定値である場合は、設定値を勘案し適切な値を設定した。

再現しないのに対し、改良後 1 では収量は過大となるが変動の再現性は向上する。先述の通り、過大傾向は主にバイオマス生産率の計算式変更によるものである。変更はバイオマス生産率計算のための日射量の計算方法に対して行ったことから、日射量の処理方法については今後精緻化が必要である。変動の再現性向上は出穂遅延による成熟期間短縮の効果を考慮したことの寄与が大きく、併行型の冷害といわれる 1992 年、1993 年、2002 年、2003 年（北海道ほか, 2011）で収量にやや落ち込みがみられる。しかし、1993 年や 2003 年などの大幅な収量減少は再現しきれておらず、2002 年や 2003 年の収量減少は冷害のなかった 1998 年の収量と同程度となっている。障害型冷害を考慮した改良後 2 ではこれら併行型の冷害時の収量減少を再現し、変動の再現性がさらに向上する（表 2.5）。また、障害型の冷害といわれる 1987 年（北海道ほか, 2011）で改良後 1 と比較し収量の減少がみられるようになった。以上より北海道の観測収量変動の再現には障害型冷害の考慮が特に重要であることが分かった。障害型冷害は出穂日を基準とした特定期間の気温条件に基づき推定していることから、適確な出穂日を推定することも重要であると考えられる。

本研究の結果から、気温条件のみから推定した障害型冷害の影響によって北海道におけるコメ収量の冷害影響を概ね再現可能であることが分かった。これは北海道のコメの品種が感温性の高い性質を持つことによる（北海道ほか, 2011）と考えられる。一方、1988 年には観測にはない収量の大幅な減少が計算され、2003 年の冷害時の収量減少は過大評価となっている。出穂日の推定値の統計値との誤差は 2003 年の函館地域で約 3.2 日、1988 年の北見地域で約 2.2 日であるが大幅な誤差ではなく、出穂日のずれが障害型冷害推定の誤差に寄与したとは考えにくい。不稔発生の多少は昼夜の気温差やその継続日数、日照時間、品種の耐冷性、稲体の窒素濃度などにより変わるといわれており（北海道ほか, 2011）、再現性悪化の要因はこれらの要素を考慮していないことによる可能性があると考えられる。

図 2.6 に改良後 1 および改良後 2 の支庁平均での観測収量との比較結果を示す。観測の収量変動は地域による差が大きく、網走地方や十勝地方では年ごとの変動が大きいのに対し、空知地方や上川地方では安定しており、渡島地方や後志地方などは両者の中間的な特徴を持つ。出穂遅延の影響を考慮した改良後 1 では収量の変動は良く再現しており、市町村別にみても再現性は大きく向上する（表 2.6）。観測ほど変動に地域差はみられないが、空知、上川、後志と比較し網走、渡島、十勝地方では変動幅がやや大きくなっており、出穂遅延による成熟不良のリスクが高いことが示唆される。改良後 2 では各地域の冷害時の収量減少幅や頻度を良く再現し、地域差を非常に

良く再現している。改良後 2 は改良後 1 にさらに障害型冷害を考慮した状態であることから、北海道の収量変動の地域差をもたらす要因として障害型の冷害が関係していることが示唆される。障害型冷害の収量変動への寄与の大きさは冷害係数と改良後 2 の収量変動がほぼ同期していることから推測できる。網走地方や十勝地方は冷害係数の変動が大きく、障害型冷害のリスクが高いのに対し、空知、上川、渡島、後志地方では係数がほぼ 1 で安定しており、リスクが低いことが示唆される。網走地方や十勝地方では先述の通り出穂遅延の影響も受けやすく、冷害リスクが非常に高い地域であることが示唆される。

2.5 まとめ

本章では、広域スケールの潜在作物生産性モデルである GAEZ を北海道へ適用するためにモデルの改良を実施し、改良前と改良後で観測のコメ収量変動の再現性を評価した。GAEZ モデルにおける日本型イネの適性判定条件では、多くの年に北海道のほぼ全域で低温に関する条件を満たさず収量がゼロとなったことから、広域モデルをそのまま北海道には適用できないことが分かった。しかし、適性判定条件を撤廃し、さらにバイオマス計算論理の変更、出穂日推定論理の追加、そして障害型冷害推定論理の追加を行うことで観測収量変動の再現性が大幅に向上した。

まず、バイオマス量の計算のため LAI を作物係数から推定し、簡易有効積算気温から推定した出穂日による LAI の変動と出穂遅延による成熟不良を考慮した場合、観測収量変動の再現性は向上するが冷害時の大幅な収量減少は再現しなかった。さらに、出穂日を基準とした特定期間の気温条件により障害型冷害の影響を推定し反映したところ、観測収量の再現性は大幅に向上した。このことから、北海道の観測収量変動の再現には障害型冷害の考慮とそのための出穂日の推定が特に重要であることが分かった。また、障害型冷害の考慮により北海道内の収量変動の地域差も非常に良く再現できるようになったことから、収量変動の地域差をもたらす要因として障害型の冷害が関係していると考えられた。本研究では出穂日の推定および障害型冷害の推定は気温条件のみに基づいているため、北海道のコメ収量変動は気温条件で概ね説明できることが示された。これは北海道のコメ品種が感温性の高い性質を持つことによるものと考えられる。

本研究で GAEZ モデルの改良を行う際、北海道固有のパラメータとして新たに用いたのは出穂日までの簡易有効積算気温(道内で 2 地域に分類)、品種の成長期間(耕種期日の統計値より推定)、作物長、および障害型冷害の不稔歩合のみであり、これらは公表されているデータに基づい

ている。本結果から、比較的容易なチューニングにより冷害も含めた変動を再現可能であることが分かった。北海道において主要な障害である冷害リスクを評価できるようになったことで、現在および将来の北海道におけるより信頼性の高い影響評価が可能になると考える。

一方で、冷害に関して課題も残されている。本研究では遅延型冷害として出穂遅延による登熟期間の短縮を考慮し、観測の収量変動と有意な相関が得られた。しかし、実際には出穂遅延のため秋冷により登熟不良となる場合や、出穂が遅延しなくても登熟期の低温により登熟不良となる場合に遅延型の冷害が発生する(北海道ほか, 2011)。このため、低温による登熟割合への影響の考慮が必要となる可能性があり、さらなる検討が必要である。

本研究は気候変動による北海道のコメ収量変動への影響評価を行う前段階として、現在気候下での GAEZ モデルの適用可能性を確認した。その結果、モデル改良により北海道における収量変動を再現可能であることが示されたが、今後将来気候に適用する際にいくつかの課題が挙げられる。本研究では冷害影響は考慮したが高温障害の影響は考慮していない。北海道の気候がイネの高温障害に影響を及ぼすほど変化する場合には、モデルに高温障害の論理を組み込む必要がある。また、本研究では CO₂ の施肥効果を考慮しなかった。気候変動だけでなく、CO₂ 濃度の増加に伴い収量にどの程度の影響があるのか検討する必要がある。

GAEZ モデルでは灌漑地域は水ストレスを受けないと仮定している。しかし、将来の気候変動により融雪が早期化し、必要な時期に十分な灌漑用水を確保できなくなる可能性も否定できないため、水ストレスの仮定についてさらなる検討が必要になると考えられる。

表 2.1 GAEZ モデルの入力データ

GAEZ 入力項目名	北海道適用時の使用データ
気候データ 日平均気温(°C)、 日降水量 (mm/day)、日平 均放射(W/m ²)、 日平均風速 (m/s)、気温日較 差(°C)	日平均風速以外: アメダスメッシュ化データ(清野, 1993) (気温日較差は日最高気温(°C)と日最低気温(°C)から算出) 日平均風速: JRA-25 長期再解析データ(Onogi et al., 2007)を WRF (Weather Research and Forecasting) モデル(Skamarock et al., 2008)によりダウン スケール
行政区境界	国土数値情報(国土交通省)
土壌タイプ	Digital Soil Map of the World (FAO, 1995)
標高	GTOPO30 (USGS, 1996)
作付面積	作物統計(農林水産省農林経済局統計調査部 a, b)、北海道農林水産統 計年報(農林水産省北海道統計情報事務所)、国土数値情報(国土交通 省)
灌漑面積率	使用しない(全域で灌漑ありと仮定)
肥料使用量(入力レ ベルの算出に使用)	World Development Indicators (World Bank, 2006)

表 2.2 地域分類と支庁の対応関係

地域名称	支庁名
札幌	留萌、上川、空知、石狩
函館	後志、胆振、檜山、渡島
帯広	日高、十勝、釧路
北見	根室、網走、宗谷

表 2.3 本研究の実験設定

項目	設定内容
モデル	GAEZ モデル
対象期間	1985 年～2005 年 (21 年間)
対象領域	139°E～146.5°E、41°N～46°N (北海道全域)
解像度	東西 0.05°×南北 0.05°
対象作物	日本型イネ (成長期間 128 日)
植付日	4 地域毎に固定
気候条件	日平均気温 (°C)、日最高気温 (°C)、日最低気温 (°C)、日平均放射 (W/m^2)、 日降水量 (mm/day)、日平均風速 (m/s)

表 2.4 障害型冷害の不稔歩合(%)。北海道ほか(2011)による不稔歩合の低位値を引用。ただし
網掛け部分は本研究による拡張である。

前歴期間平 均気温(°C)	危険期間平 均気温(°C)	開花期間最高気温(°C)			
		<20	<21	<23	≥23
<16	<16	100	100	100	100
	<17	100	92.5	90	90
	<18.2	90	82.5	80	77.5
	<19	70	57.5	37.5	27.5
	≥19	65	47.5	22.5	12.5
<18	<16	100	92.5	90	90
	<17	92.5	85	80	80
	<18.2	82.5	75	65	60
	<19	57.5	45	25	20
	≥19	47.5	30	5	5
≥18	<16	95	85	80	77.5
	<17	85	75	70	65
	<18.2	72.5	55	40	35
	<19	57.5	45	25	20
	≥19	47.5	30	5	5

表 2.5 GAEZ による北海道全域平均収量の観測との比較。MBE は平均誤差、RMSE は二乗平均平方根誤差、R は相関係数。**は 1%危険率で有意な相関であることを示す。

	改良前	改良後 1	改良後 2
MBE (kg/ha)	128.51	665.86	65.03
RMSE (kg/ha)	742.40	848.73	701.11
R	0.390	0.768**	0.835**

表 2.6 GAEZ 収量と観測の支庁別・市町村別比較。MBE、RMSE、R は作付地域のない 3 支庁を除く 11 支庁の平均。**は 1%危険率で有意な相関であることを示す。1%危険率で有意な相関となる市町村数は 1985～2005 年全てで収量がゼロではない市町村のみについて集計した。

	改良前	改良後 1	改良後 2
MBE (kg/ha)	569.71	934.24	258.01
RMSE (kg/ha)	1217.84	1238.56	899.11
R	0.420	0.695**	0.814**
1%危険率で有意な 相関となる市町村数	15 /110	101 /110	106/110

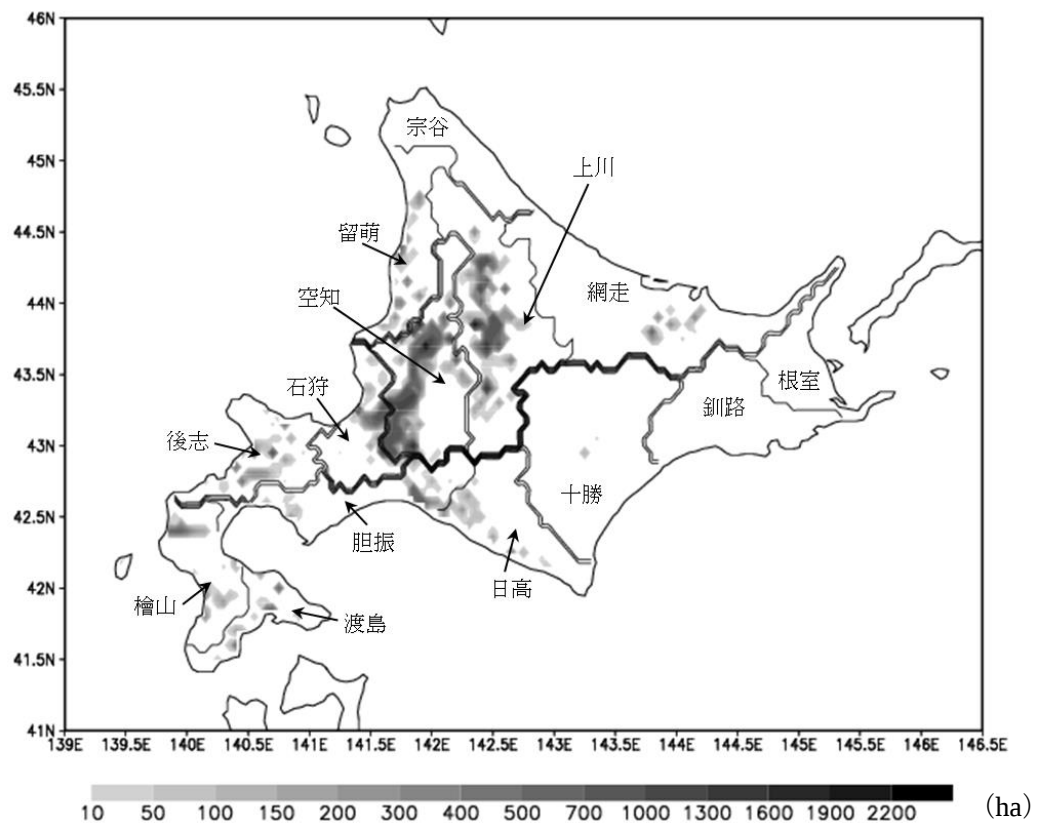


図 2.1 2000 年の作付面積分布と支庁の位置

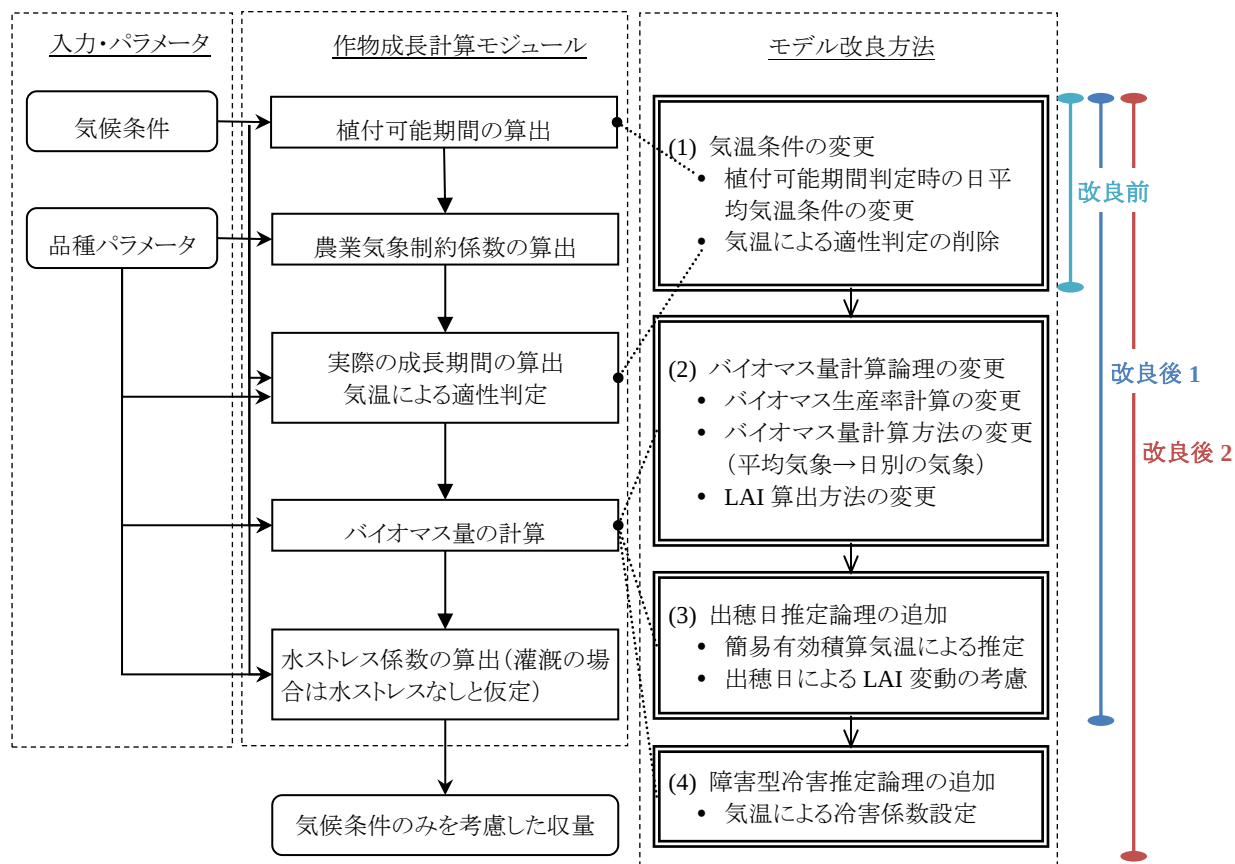


図 2.2 作物成長計算の流れとモデル改良方法。2.4 節「結果と考察」で用いた改良方法の分類を併せて示す。

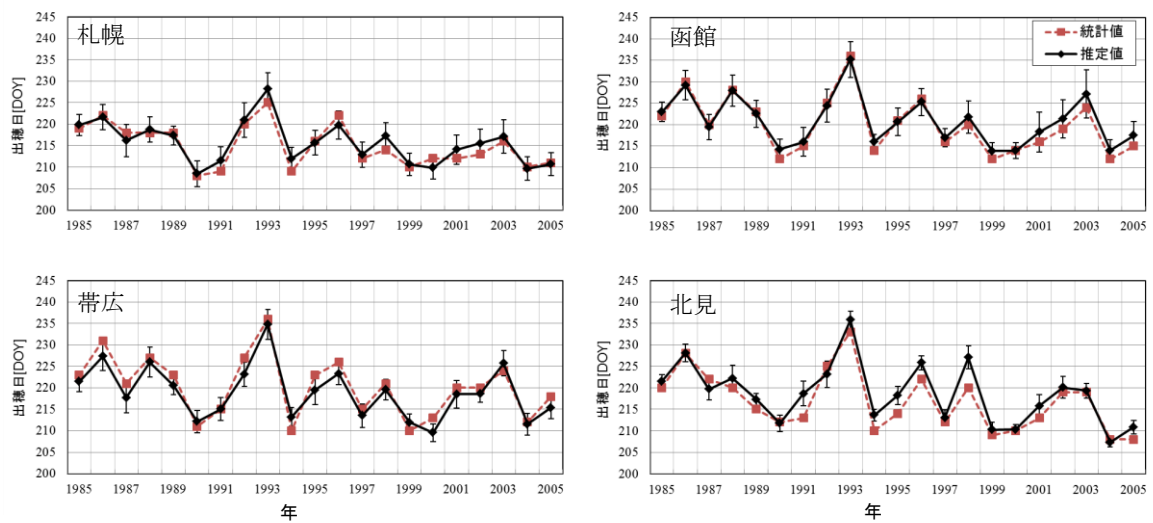


図2.3 簡易有効積算気温による出穂日推定値の地域別平均と統計値(農林水産省農林経済局統計調査部b;農林水産省農林経済局統計調査部c)の比較。推定値はモデル改良手順(図2.2)の(1)～(3)までを適用した場合に収量がゼロ以外の格子の出穂日を平均した値。エラーバーは各地域に含まれる格子の出穂日推定値の標準偏差を表す。

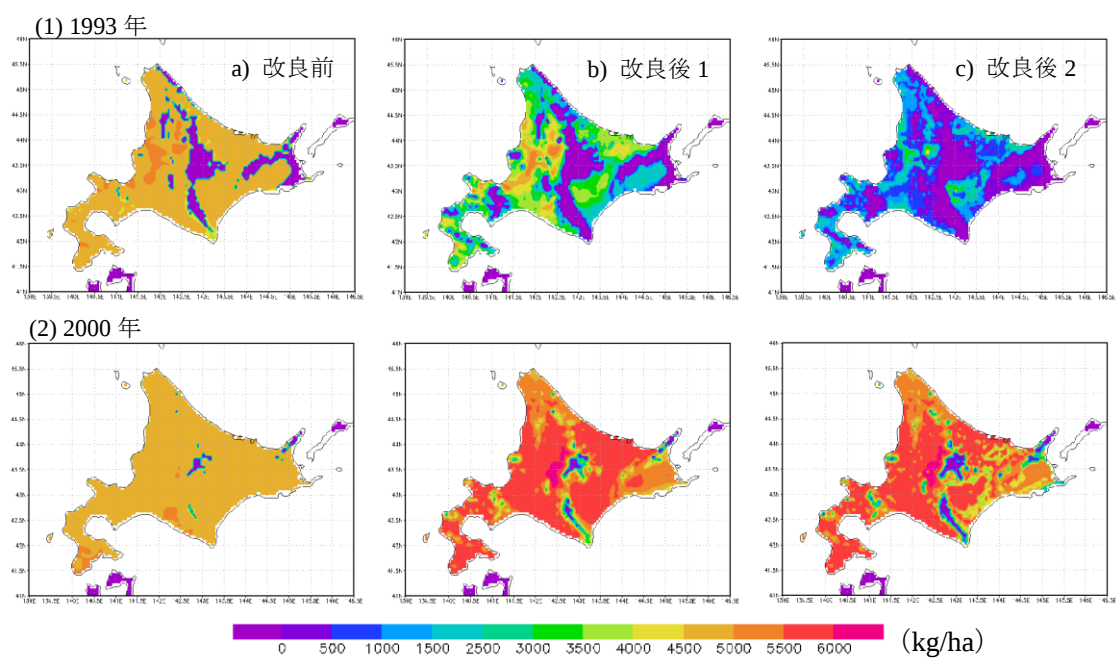


図2.4 1993年、2000年における改良前・改良後1・改良後2の収量ポテンシャル計算結果

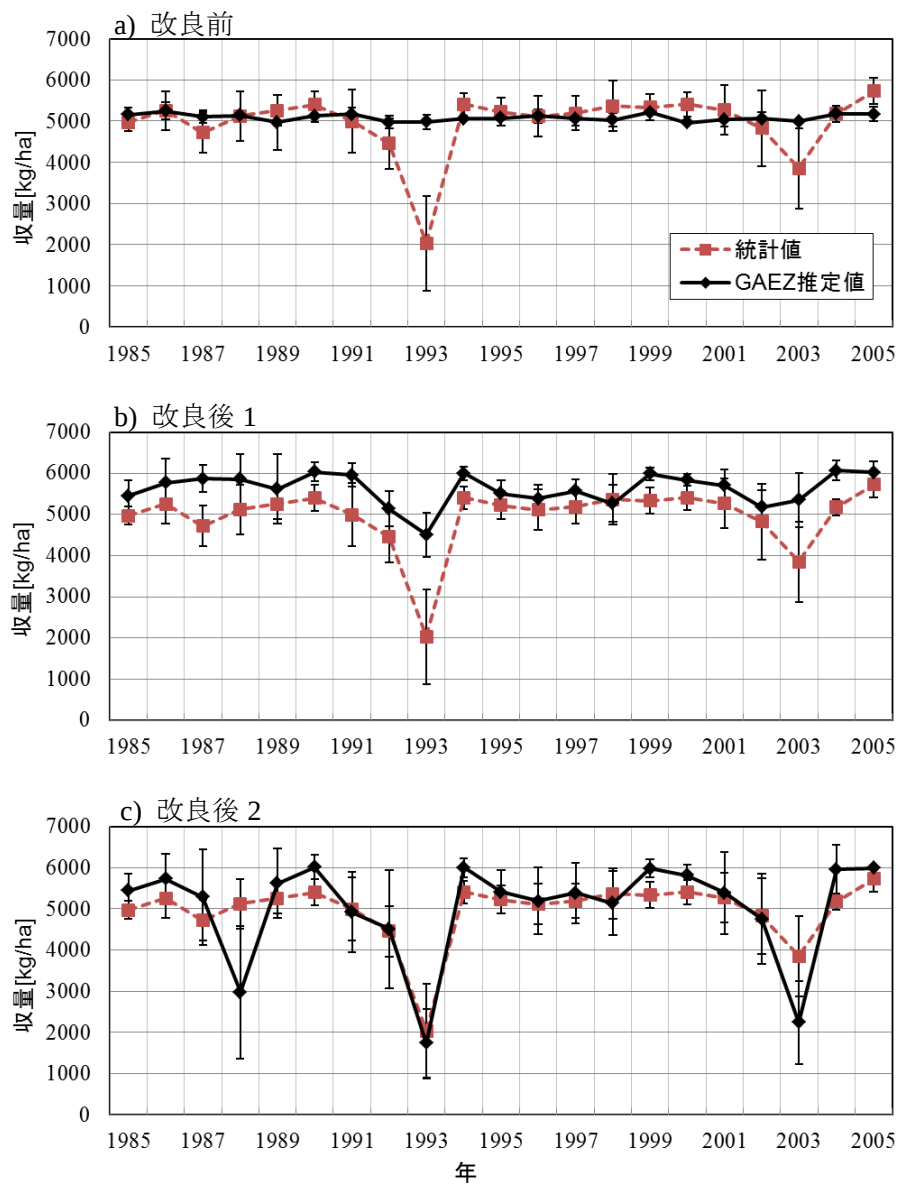


図2.5 GAEZ改良前、改良後1、改良後2の北海道全域平均収量の観測との比較。エラーバーは収量標準偏差で、GAEZは格子単位、統計値は市町村単位である。

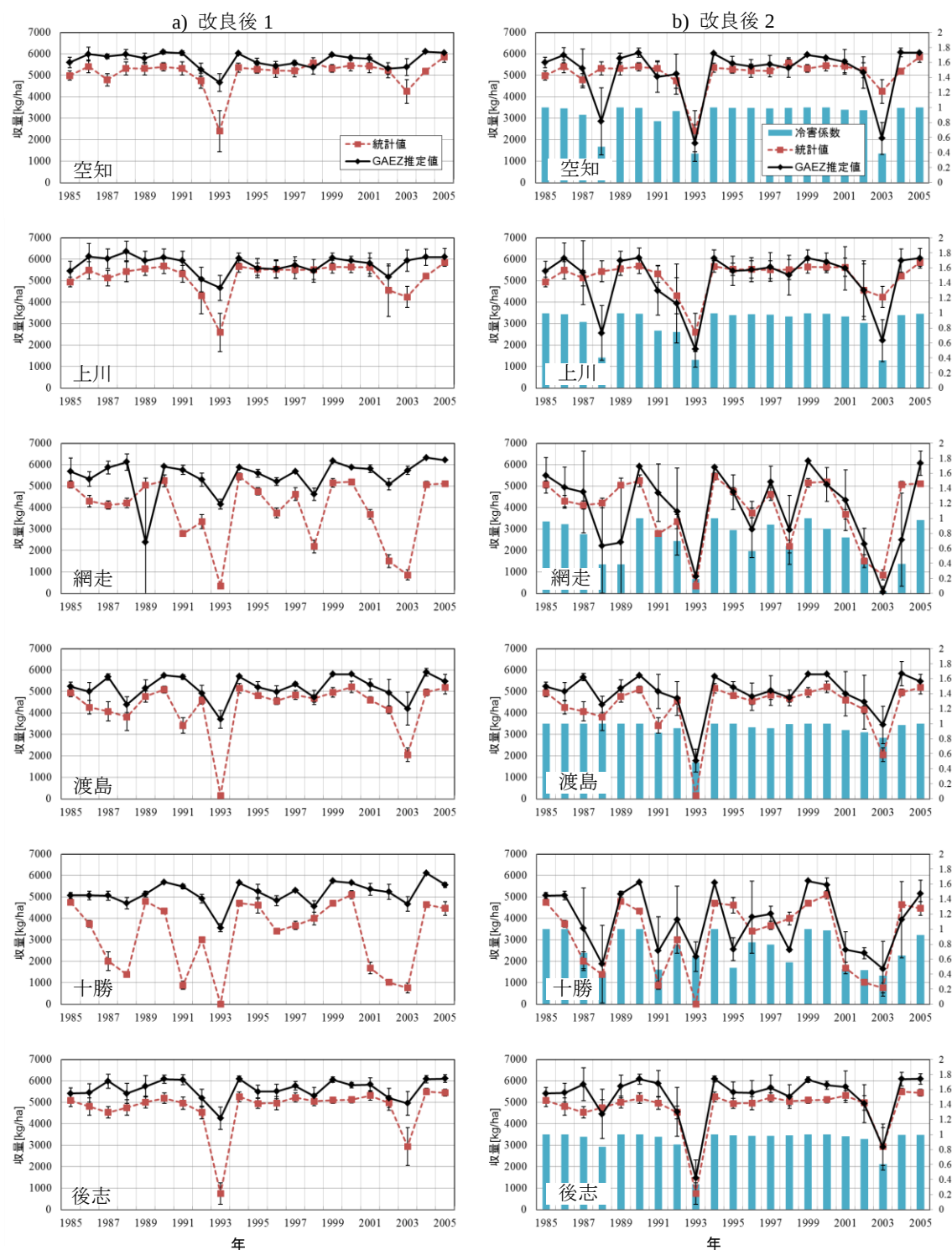


図2.6 GAEZの改良後1、改良後2の支庁平均収量の観測収量との比較。上から空知(北海道中央内陸部)、上川(中央内陸部)、網走(東部オホーツク海側)、渡島(南部太平洋側)、十勝(東部太平洋側)、後志支庁(西部日本海側)。改良後2は障害型の冷害係数を棒グラフで示している。

第3章

生育期間の気温上昇に対する冷害によるイネの不稔の感受性: 北海道におけるケーススタディー

要旨

日本北部に位置する北海道では、現在気候下において冷害によるイネの減収が頻発している。近年いくつかの研究で、イネの生育季節が早期化するため温暖化しても冷害が減少しない可能性があることが指摘されている。本章では気温の経年変動に着目し、気温上昇に伴うイネの不稔の幅の変化を評価した。日平均気温および日最高気温を一様に上昇させ、北海道のローカルな品種であるきらら 397 の不稔率を計算した。概して、長期平均の不稔率は気温上昇とともに減少した。しかし、個々の年や移植日において、いくつかのケースではイネの不稔が現在と同程度となるか、現在より悪化した。本研究ではこれを「促進された冷害 (Accelerated cool summer damage; ACSD)」と呼ぶ。気温上昇ケースでは生育が加速し、低温に脆弱な期間が前進する。前進した脆弱な期間の気温が現在の脆弱な期間の気温以下となるとき、ACSD が発生する。温暖化しても低温に脆弱な期間の気温上昇度が気温の経年変動幅を超えないため、冷害を引き起こすようなイネの不稔は将来も残る可能性がある。また、気温の経年変動幅が拡大すると、温暖化した気候下で不稔の極大値の程度が増大する可能性があることが分かった。このことは、たとえ気温上昇により長期平均でみるとイネの不稔が軽減しても、気温の経年変動により不稔の程度が増大する可能性があることを示唆する。

3.1 はじめに

北海道は日本における稲作の北限地域である。北海道は、1884–2010 年の期間において約 4 年に一度冷害の被害に見舞われている(北海道ほか, 2011)。日本の年平均気温は 1898–2012 年の期間に 1.15°C/世紀の割合で上昇しているが(気象庁, 2013b)、第 1 章図 1.2 に示すように近年でも北海道では 2003 年と 2009 年に冷害が発生した。北海道において冷害は現在でも重大な問題である。近年、21 世紀末までの温暖化予測が数多く行われており、SRES A2、A1B、B1 シナリオ(Nakicenovic et al., 2000)における日本の平均気温は 20 世紀末から 21 世紀末にかけてそれぞれ 4.0°C、3.2°C、2.1°C 上昇すると予測されている(文部科学省ほか, 2009)。温暖化に伴い冷害のリスクがなくなるのかどうかは関心事である。

イネの冷害のうち遅延型冷害は、気温の上昇により生育可能期間が長くなると見込まれるため、温暖化とともに減少すると予測されている(丹野, 2012)。しかし、障害型冷害は生育季節の早期化(Shimono, 2011)、すなわち気温上昇によりイネの生育速度が加速し、穂ばらみ期、出穂期、開花期のような重要な生育ステージのタイミングが前進することにより、温暖化してもリスクが減少しない可能性がある。

Shimono(2011)は冷却量(cooling degree-days; CDD)の概念に基づく生育モデル(内島, 1976; Shimono et al., 2005)を用いて、北日本のイネの穂ばらみ期の低温に起因する潜在的な収量減少を評価した。穂ばらみ期とは、生殖期間の中で低温に対する感受性を持つ期間のひとつである。Shimono(2011)は 1961 年から 2010 年の期間に出穂日が早期化しており、穂ばらみ期(Shimono(2011)は出穂の 6–15 日前と定義している)の気温が低下していることを示した。そして、穂ばらみ期の低温障害による潜在的な収量減少が増加していることを明らかにした。Shimono(2011)は温暖化の結果、生育季節が前進することで将来の収量減少のリスクが増大する可能性があることを示唆した。同様に、丹野(2012)は北海道の 6 地点の現在と将来における穂ばらみ期の平均気温を評価した。その結果、穂ばらみ期の暦日が前進するため、穂ばらみ期の気温の上昇は 7 月全体の気温上昇より小さいことを示した。さらに、穂ばらみ期の気温が 18.5°C(不稔のリスクが著しく増大するといわれる)以下になる確率は 2030 年代においてもゼロではなかった。丹野(2012)は、春の気温上昇により生育が加速するため、障害型冷害のリスクは今後に残ると指摘した。下野(2008)は、生育の早期化を要因として挙げていないが、春のみ気温が上昇した場合に北日本の冷害リスクが増大することを示した。

これらの先行研究は、主にイネの不稔による冷害の数十年間の平均的な変化に着目していた。しかし、イネの不稔は低温に脆弱な期間に低温に遭遇すると発生し、気温は経年変動することから、年々変動する。たとえ気温上昇によってある一定期間の平均的な不稔の程度が軽減しても、低温に脆弱な期間の気温の経年変動幅が拡大すれば期間中の最大の不稔の程度は増大するかもしれない。したがって、低温に脆弱な期間の早期化に加えて気温の経年変動に着目した評価が必要である。

本章では、北海道における気温上昇に伴うイネの不稔の変動幅(以降、「不稔の幅」と言及する)の変化を評価し、不稔の幅に対する気温の経年変動の寄与について議論する。

3.2 データと方法

3.2.1 対象地域

図 3.1 は北海道の 2000 年におけるイネの作付面積分布である。データは第 2 章 2.2.3 節で作成した 0.05°格子のデータセットを引用した。このデータの分布情報は国土交通省による 1997 年の国土数値情報の土地利用データに基づいており、面積の値は農林水産省の 2000 年の市町村別作付面積データで補正されている。イネの作付地域は北海道中央部から日本海側にかけて広がっており、十勝地方(池田周辺)とオホーツク海側に点在している(図 3.1)。本研究では、これらの地域を包含するように 7 地点を選択し解析を行った(図 3.1)。

3.2.2 データセット

1986 年から 2005 年の 20 年間の日平均気温と日最高気温データを使用した。データは第 2 章と同じく農業環境技術研究所提供のアメダスメッシュ化データ(清野, 1993)を用いた。このデータセットは北海道全域を含む。元のデータセットの解像度は緯度方向 30 秒、経度方向 45 秒(約 1km × 1km)である。第 2 章と同様に、本章でもこのデータセットを 0.05°格子データに平滑化したものを使用した。なお、データは粗グリッドに含まれる密グリッドデータを平均して生成し、標高などによる補正は行わなかった。すべての計算を空間解像度 0.05°で行い、7 地点についてはそれぞれに最も近接するグリッドデータを用いた(図 3.1)。

イネの不稔に与える気温変化の影響を解析するため、気温を 1°C 刻みで 5°C まで上昇させる感度分析を行った。いくつかの気候予測データが入手可能であるが、これらはトレンドと経年変動の

双方に大きな不確実性がある(気象庁, 2008)。このため、特定の将来予測データを用いる代わりに、簡単のため現在の気温を時空間一様に上昇させることにした。以降、気温を $X^{\circ}\text{C}$ 上昇させたケースを「 $T+X$ ケース」と呼ぶ(例えば、 2°C 上昇ケースを「 $T+2$ ケース」、現在の気温のケースを「 $T+0$ ケース」と呼ぶ)。先のモデル予測(文部科学省ほか, 2009)と比較すると、ここで与えた気温上昇度は 21 世紀末までに予測される気温上昇幅をほぼ包含する。

3.2.3 イネの不稔の計算方法

イネの不稔の程度を評価するため、田中ほか(1997)が開発したモデルを用いた¹。このモデルはイネの低温に最も脆弱な期間の日平均気温と日最高気温をもとにイネの不稔率を計算する。モデルでは脆弱な期間として(1)前歴期間、(2)穂ばらみ期、(3)開花期間の 3 つの期間を考慮している。不稔の主要因は花粉の異常発達であり(日本農業気象学会北海道支部, 2012)、これら 3 つの期間は花粉の発達と受粉に密接に関わるため、期間内に受けた障害はイネの不稔に大きく影響する。花粉の元となる細胞は前歴期間に活発に分裂する。穂ばらみ期には花粉の元となる細胞の分裂が止まり、花粉が成熟する。穂ばらみ期に低温に遭遇すると花粉が正常に成熟できず、不稔が発生する。開花期間において低温は受粉を阻害し、不稔を引き起こす。本モデルではイネの不稔率を以下の式で計算する：

$$Y_n = \frac{1}{1 + \exp[-A_n(T_n - T_{hn})]} \quad n=1,2,3 \quad (3.1)$$

$$S = \begin{cases} 1 - Y_1 \times Y_2 \times Y_3 & \text{for } T_2 < T_c \\ 1 - Y_2 \times Y_3 & \text{for } T_2 \geq T_c \end{cases} \quad (3.2)$$

添え字 n の 1, 2, 3 はそれぞれ前歴期間、穂ばらみ期、開花期間を表し、 T_1 および T_2 はそれぞれ前歴期間と穂ばらみ期の日平均気温の平均値、 T_3 は開花期間の日最高気温の平均値である。 T_c は限界温度、 A_n は温度に対する反応の傾きを表す係数、 T_{hn} は各期間の影響で不稔率が 50%となる温度、 Y_n は各期間の気温が稔実率に及ぼす効果で、 S が全体の不稔率を表す(北海道協同組

¹ 第 2 章では表 2.4 のように不稔歩合を離散的に推定したが、ここでは不稔率をより精緻に計算するため、農業試験データに基づき作成された不稔率の推定式を用いた。

合通信社ニューカントリー編集部, 2007)。限界温度 T_c は穂ばらみ期の平均気温で、前歴期間の気温が不稔率 (S) に及ぼす影響を無視できる最低の気温を示す (北海道協同組合通信社ニューカントリー編集部, 2007)。本研究では、不稔率 S を用いてイネの不稔の程度を評価した。

低温に脆弱な期間の開始と終了時期を決定するため、発育モデルを用いた (田中ほか, 1997; 北海道協同組合通信社ニューカントリー編集部, 2007)。このモデルはイネの生育ステージを数値的に示す発育指数 (DVI) を計算する。DVI は、1 日当たりの発育速度である発育速度 (DVR) の積算値である。DVI は出芽時に 0、幼穂形成期に 1、出穂期に 2 と定義される。移植時の DVI である DVI_{tp} は、移植時の葉数 (NL_{tp}) に基づき決定する。一連の指標は以下の式で表される:

$$DVR = \frac{1}{G} \frac{1}{1 + \exp[-A(T - T_h)]} \quad (3.3)$$

$$DVI = \sum_{i=1}^N DVR_i + DVI_{tp} \quad (3.4)$$

$$DVI_{tp} = B \times NL_{tp} \quad (3.5)$$

T は日平均気温、 G は各ステージ (幼穂形成期または出穂期) に達するまでに必要な最低日数、 A は温度に対する反応の傾きを表す係数、 T_h は DVR が最大値の 1/2 となる温度、 B はパラメータで、添え字の i は移植日からの日数を示す。本研究では NL_{tp} を 4 とした。DVI が 1.000 から 1.403 の期間が前歴期間に相当する。同様に、DVI が 1.403 から 1.672 の期間が穂ばらみ期、1.885 から 2.174 の期間が開花期間に相当する (田中ほか, 1997; 北海道協同組合通信社ニューカントリー編集部, 2007)。

本研究で用いたパラメータを表 3.1 に示す (田中ほか, 1997; 北海道協同組合通信社ニューカントリー編集部, 2007)。すべてきらら 397 に対するパラメータである。不稔率に対するパラメータは 1988 年から 1993 年の農試作況データに基づき決定され、DVI に対するパラメータは 1988 年から

1995 年の農試データと 1996 年の現地データをもとに決定された(田中ほか, 1997)²。

3.2.4 解析のコンセプト

ここで、本章の着眼点を明確にするため、不稔の幅と気温の経年変動の関係を概念的に示す(図 3.2)。現在において、冷害は通常年には発生しないため、冷害を引き起こすような深刻な不稔は長期平均の気温のもとでは発生しないと仮定する。一方、現在の気温の経年変動の最低気温において冷害を引き起こす不稔が常に発生すると仮定する。仮に低温に脆弱な期間のタイミングが固定であるなら、期間における気温上昇度と温暖化による気温上昇度は等しい。この場合、温暖化による気温上昇度が経年変動幅より大きければ、深刻な不稔はなくなる。しかし、先行研究で指摘されているように(Shimono, 2011; 丹野, 2012)、脆弱な期間のタイミングは前進する。したがって、期間の気温上昇度(ΔT)は温暖化による気温上昇度(X)より小さい(図 3.2)。

図 3.2 の各箱ひげ図は低温に脆弱な期間の数年間での気温の幅を表す。 $T+0$ ケースと $T+X$ ケースはそれぞれ現在および $X^{\circ}\text{C}$ の気温上昇ケースである。 T_b と T_b' をそれぞれ $T+0$ ケースと $T+X$ ケースの経年変動の最低気温と定義すると、脆弱な期間の早期化度合いにより、(1) $T_b' > T$ 、(2) $T_b \leq T_b' \leq T$ 、(3) $T_b' < T_b$ の 3 つのクラスが考えられる。脆弱な期間の早期化度合いが小さいクラス 1 では、深刻な不稔はなくなる(図 3.2a)。早期化度合いが中庸のクラス 2 では、イネの不稔が悪化することはないが、なくなることはない(図 3.2b)。一方、早期化度合いが大きいクラス 3 では、イネの不稔の程度が悪化する(図 3.2c)。温暖化による気温上昇(X)が時空間一様であっても、 $T+X$ ケースにおける前進した脆弱な期間の気温の経年変動幅(D_m')は、必ずしも $T+0$ ケースにおける元の脆弱な期間の経年変動幅(D_m)と一致しない。脆弱な期間が大きく前進しなくても、気温の経年変動幅が拡大するとイネの不稔の程度は悪化する(図 3.2d)。以降では、この最後のケースをクラス 3' として扱う。 ΔT が負でない(クラス 3')か負である(クラス 3)かにより、クラス 3' とクラス 3 を区別する。以上で述べた 4 つのクラスに従い、気温上昇ケースのイネの不稔について議論する。

² 式(3.1)～式(3.5)、および表 3.1 に示すパラメータにより推定した不稔率の推定精度は、標準推定誤差で約 10%である(田中ほか, 1997)。

3.3 結果

3.3.1 促進された冷害 (Accelerated cool summer damage; ACSD)

各気温上昇ケースについて、各年の不稔率を評価した結果、T+1、T+2、...、T+5 ケースの不稔率は T+0 ケースより高くなる場合と低くなる場合があることが分かった。双方の例を示し、両者の差異について示す。

例として北海道の主要稲作地域のひとつである岩見沢の 2005 年と 1993 年について示す(図 3.3)。気温上昇ケースでは生育速度が加速するため、気温上昇ケースの DVI は現在気候下より速く増加する。生育の加速により低温に脆弱な期間のタイミングが前進する。前進した低温に脆弱な期間の平均気温が T+0 ケースにおける元の脆弱な期間の気温より低いとき、不稔率が T+0 ケースより高くなる。2005 年は、T+2 ケースの穂ばらみ期の気温が T+0 ケースより低いため(図 3.3a)、T+2 ケースの不稔率(0.34)は T+0 ケースの不稔率(0.03)より高かった。1993 年は、T+2 ケースの 3 つの期間の気温が T+0 ケースより高いため(図 3.3b)、T+2 ケースの不稔率(0.09)は T+0 ケースの不稔率(0.72)より低かった。本研究では、気温が上昇したとき不稔率が現在以上となる、すなわちイネの不稔が軽減しない場合を「促進された冷害 (Accelerated cool summer damage; ACSD)」と呼ぶことにする(図 3.3a)。

不稔率は移植日により大きく変動するため、ACSD の発生と程度は移植日に強く依存する(図 3.4)。ACSD は、現在の北海道の標準的な移植期間である 5 月 20 日から 5 月 31 日の付近に移植した場合にも発生する可能性がある。ACSD の発生と程度は地域や年によっても異なる(図表省略)。これは、地域や年により気温の変動と低温に脆弱な期間のタイミングの双方が変動するためである。

3.3.2 イネの不稔の確率変化

イネの不稔の幅を考察するため、20 年間の不稔率を評価した。移植日は北海道の現在の標準的な移植期間の中日である 5 月 26 日に固定した。T+0 ケースでは全地点で不稔率の中位値が低く(≤ 0.16)、このことは図 3.5 の地点が現在の作付地域であることから合理的である(図 3.5)。一方、不稔率の平均値は中位値より高い。これは、数年の極端に高い不稔率が平均値に影響を及ぼしていることを示唆する。しかし、気温上昇ケースでは中位値と平均値の双方が低くなる。すなわち、気温が上昇すると概してイネの不稔は軽減する(図 3.5)。岩見沢や旭川では、T+3、T+4、T+5 ケ

ースにおいてイネの不稔はほとんど発生しなかった。冷害は現在でも不稔の程度が大きいときに発生し、通常の状態(20年間の平均や中位の不稔率)では発生しないため、以降は不稔の極値に着目する。不稔率の最大値や75パーセンタイル値が気温上昇とともに減少しない地点がいくつかあることは注目すべきことである。このことは、ACSDにより不稔の極値の程度が現在気候下と同程度にとどまるか、増大しうることを示している。池田と三石では、T+1、T+2、T+3 ケースの不稔率の最大値がT+0 ケースより高い(図 3.5)。岩見沢においても、T+1 ケースの75パーセンタイル値がT+0 ケースより高い。このように、不稔の極値が軽減しにくいことにより、イネの不稔の幅は容易には小さくならない。

移植日を5月20日から5月31日まで12日間変化させ、気温上昇ケースで高位のパーセンタイル値の不稔率が減少するかどうかを調べた。図 3.6 は、気温上昇ケースの当該パーセンタイル値の不稔率がT+0 ケース以上となり、かつ15%を上回る頻度(12の移植日のケースのうち条件を満たすケースの数)を示す。15%以下の不稔率は収量に影響しないため(北海道ほか, 2011)、気温上昇ケースで15%以下の不稔率となる場合はカウントしなかった。T+1 ケースでは、頻度の分布がパーセンタイル間で異なる(図 3.6a, b, c, d)。20年平均の不稔率における頻度は三石の北側から北海道南西部にかけての地域と池田周辺で大きい。一方、中位値における頻度は北海道のほとんどの地域で小さい。最大不稔率における頻度は池田周辺とオホーツク海近辺で大きく、中には平均不稔率の頻度が小さい地域を含む。これらの地域のいくつかの格子では頻度が12/12で、このことはT+1 ケースではイネを5月20日から5月31日の間のいつ移植しても最大不稔率が現在以上となることを示唆する(図 3.6a)。主要稲作地域を含む北海道中央部では、T+1 ケースの75パーセンタイル値の頻度が6/12前後であった(図 3.6b)。これらの地域でも、T+1 ケースにおいて不稔の極値は必ずしも軽減しない。T+3 ケースでは、池田周辺を除いて不稔率の最大値と75パーセンタイル値の双方がほぼゼロとなった(図 3.6e, f)。

以上のように、気温上昇により長期平均では不稔が軽減しても、ACSDにより不稔の極値が現在と同程度にとどまるか、さらに増大する可能性があることが明らかとなった。

3.4 考察

本節では、なぜ不稔の極値が現在以上となりうるかについて、低温に脆弱な期間の気温上昇度と経年変動幅に着目し議論する。(1)低温に脆弱な期間が早期化することを確認し、(2)低温に脆

弱な各期間がイネの不稔に与える寄与を評価したうえで、(3)図 3.2 に示した概念に従い期間の気温上昇度と経年変動幅について考察した。移植日は再び 5 月 26 日で固定とした。

3.4.1 気温上昇に伴う低温に脆弱な期間の早期化

T+0 ケースにおいて、前歴期間は 7 月中旬を中心に 7 月上旬から下旬に広がり、穂ばらみ期は 7 月中旬～下旬を中心に 7 月中旬から 8 月中旬にかけて広がる(図 3.7)。開花期間の時期は地点により異なり、旭川、岩見沢、今金、北斗では 7 月下旬を中心に 7 月下旬から 8 月中旬にかけて広がり、三石、池田、北見では 8 月中旬を中心に 7 月下旬から 8 月下旬にかけて広がる。3 つの期間各々の時期の分散は旭川や岩見沢のような主要稲作地域で比較的小さく、三石、池田、北見で大きい。T+0 ケースにおいて期間の時期や分散は地点により異なるが、気温上昇に伴うこれらの変化は全地点で共通していた。すなわち、2°C までの気温上昇度では各期間は 1°C につき約 5 日の割合で早期化した(図 3.7)。2°C を超える気温上昇では、早期化の速度と分散の双方が小さくなった。また、気温上昇により各期間の長さはやや短縮した(表 3.2)。

3.4.2 低温に脆弱な期間の気温に対するイネの不稔の感受性

3.2.3 節で定義された前歴期間、穂ばらみ期、開花期間の各気温が稔実率に及ぼす効果(Y_1 、 Y_2 、 Y_3)で不稔率を分解した。概して、 Y_2 が小さいときに不稔率が高く、 Y_2 が大きいときには不稔率は低かった(図 3.8)。一方、不稔率が高いときであっても Y_3 はほぼ 1 であったことから、 Y_3 はイネの不稔にほとんど寄与しない。 Y_1 が小さいにもかかわらず不稔率が低い場合があることは(例:T+0 ケースの 1986 年および 2005 年)、 Y_1 は必ずしも不稔率に影響しないことを示す。式(3.2)で定義されたように、 Y_1 は $T_2 < T_c$ のとき(すなわち、 $Y_2 < 0.65$ のとき)のみ不稔率に寄与する。T+0 ケースと T+1 ケースの 1993、1988、2003 年および T+1 ケースの 1986 年のように、 $T_2 < T_c$ のとき Y_1 と Y_2 の寄与により不稔率は非常に高くなる(>0.5)。すなわち、 T_2 が T_c を下回ると、非常に高い不稔率となる。また、 $T_2 > T_c$ であっても Y_2 の寄与で T+0 ケースより高い不稔率が発生する。例えば、2005 年について、T+2 ケースの不稔率は Y_2 が小さくなったために T+0 ケースより高かった。以上のように、本研究の研究対象地域においては、イネの不稔は穂ばらみ期の気温に最も敏感であることが分かった。

3.4.3 イネの不稔と気温の経年変動の関係

以降では、イネの不稔を決定する上で重要な生育ステージである穂ばらみ期に着目する。T+0 ケースから T+5 ケースの穂ばらみ期が主に分布する時期において、気温の季節変化は全地点で類似している(図 3.9)。6 月下旬から 7 月下旬の 1 か月で平均気温は約 4–5°C 上昇することから、気温の上昇率は約 0.7°C/5 日である。一方、地点や日によって異なるものの、各暦日の経年変動幅は約 2–5°C である。したがって、この期間の気温の経年変動幅は気温の季節変化より大きく、気温の経年変動幅は実質的である。経年変動幅は池田や北見で特に大きい。

穂ばらみ期の気温の 20 年平均値を表 3.3 に示す。穂ばらみ期の気温上昇度は与えた気温増分より常に小さい(例:岩見沢では T+2 ケースについて、 $\Delta T = 20.53 - 20.29 = 0.24^{\circ}\text{C} \ll 2^{\circ}\text{C}$ である)。気温上昇度が 2°C までの場合、穂ばらみ期の気温はほとんど上昇せず($\Delta T \cong 0$)、20°C 程度にとどまる。気温が 3°C 以上上昇すると、地点間の気温差は大きくなり、T+5 ケースの池田では約 20°C のままであるのに対し、旭川では約 24°C に達した。

ここで、5 つの気温上昇度と 7 地点の組み合わせの計 35 ケースを図 3.2 に示した 4 つのクラスに分類した。クラス 1、2、3、3'の該当数はそれぞれ 1、27、1、6 であった。クラス 1 は旭川の T+4 ケースのみ、クラス 3 は岩見沢の T+1 ケースのみで、クラス 3'には三石と池田の T+1、T+2、T+3 ケースが該当した。残りのケースはすべてクラス 2 であった。例えば、クラス 2 に分類される旭川の T+2 ケースでは、穂ばらみ期の気温上昇度 ΔT は 0.58°C である($\Delta T = 20.93 - 20.35 = 0.58^{\circ}\text{C}$)。穂ばらみ期の気温の経年変動幅 D_m' は 2.01°C で($D_m' = 20.93 - 18.92 = 2.01^{\circ}\text{C}$)、T+0 ケースの経年変動幅 D_m は 3.19°C である($D_m = 20.35 - 17.16 = 3.19^{\circ}\text{C}$)。 ΔT は経年変動幅の拡大幅($D_m' - D_m$)より大きい、 D_m' より小さい($-1.18^{\circ}\text{C} = D_m' - D_m \leq \Delta T \leq D_m'$)。この場合、穂ばらみ期の前進により穂ばらみ期の 20 年平均気温が T+0 ケースからほとんど上昇しないこと、および気温の経年変動幅が(T+0 ケースより小さいものの)大きいことによりイネの不稔は容易には軽減しない。クラス 2 が大半を占めることは、冷害を引き起こすようなイネの不稔はその程度が悪化することはほとんどないが、T+5 ケースでも残ることを示唆する。先に述べたように、穂ばらみ期の気温が T_c (=18.18°C)を下回ると不稔率が非常に高くなる。旭川や岩見沢では、2°C 以上の気温上昇で穂ばらみ期の気温の最低値が T_c を上回るが、池田では T+5 ケースでも T_c を超えない(表 3.3)。したがって、池田は特に深刻な不稔が発生するリスクが高い。

クラス 3 と 3'は不稔の最大値が悪化するケースである。例えば、クラス 3'に該当する池田の T+2

ケースでは、 ΔT がゼロより大きく ($\Delta T = 0.66\text{ }^{\circ}\text{C} \geq 0^{\circ}\text{C}$)、 D_m' と D_m はそれぞれ 4.32°C 、 2.84°C である。 $(D_m' - D_m)$ は ΔT より大きい ($1.48^{\circ}\text{C} = D_m' - D_m > \Delta T$)。この場合、穂ばらみ期の 20 年間の平均気温がやや上昇するにもかかわらず、気温の経年変動幅の拡大が不稔の最大値の悪化に寄与する。クラス 3'の結果は、低温に脆弱な期間の早期化だけでなく気温の経年変動幅も不稔の最大値の悪化に寄与することを示唆する。

以上の議論に基づき、北海道全域の穂ばらみ期の気温の経年変動幅とクラス分類の分布を示す(図 3.10)。T+0 ケースでは、イネの作付地域で他の地域より穂ばらみ期の 20 年平均気温が高い(図 3.10a、図 3.1)。一方、穂ばらみ期の気温の経年変動幅は全地域でほぼ一様である(図 3.10d)。T+2 ケースでは、特にイネの作付地域において平均気温はほとんど上昇せず(図 3.10b)、経年変動幅は概して平均気温の上昇度より大きい(図 3.10b, e)。結果として、ほとんどの地域がクラス 2 に相当する(図 3.10g)。十勝地方とオホーツク海近辺ではほとんどの地域がクラス 3'に該当する。これらの地域では、T+2 ケースにおける前進した穂ばらみ期の気温の経年変動幅が T+0 ケースにおける元の穂ばらみ期のそれより大きい(図 3.10d, e)。T+5 ケースでは、主要稲作地域を含む北海道中央部で平均気温が T+0 ケースから大幅に上昇する(図 3.10c)。これらの地域では、平均気温の上昇度が気温の経年変動幅を超え、クラス 1 の地域が拡大する(図 3.10c, f, h)。対照的に、その他の地域では平均気温の上昇度が小さく、気温の経年変動幅を超えない。このため、多くの地域はクラス 2 のままとなる。このように、北海道において気温の経年変動幅はイネの不稔に大きな影響を及ぼす。

本節では簡単のため穂ばらみ期のみの状態から不稔の程度を議論したが、イネの不稔は複数の生育ステージの影響を受けるため、実際には穂ばらみ期の状態で不稔の程度が完全に決定づけられるわけではない。それでも、生育の加速のため低温に脆弱な期間の気温が劇的には上昇せず、北海道において生育期間の気温の経年変動幅が実質的に大きいことから、長期平均のイネの不稔が軽減する一方で、冷害を引き起こすような深刻な不稔は将来も残ると考えられる。

3.5 結論

本章では、北海道のローカルな品種であるきらら 397 を用いて、一様な気温上昇のもとでの低温によるイネの不稔の幅の変化について評価した。概して、長期平均のイネの不稔は気温上昇とともに軽減する。しかし、個々の年や個々の移植日のいくつかのケースで、「促進された冷害

(Accelerated cool summer damage; ACSD)」が発生した。これは、気温が上昇したケースにおいてもイネの不稔の程度が現在と同程度にとどまるか悪化することを意味する。気温上昇により生育が加速することで、低温に脆弱な期間のタイミングが前進する。前進した脆弱な期間の気温が現在の脆弱な期間の気温以下となる場合、ACSD が発生する。いくつかの気温上昇ケースでは、ACSD により 1986–2005 年の不稔率の最大値および 75 パーセンタイル値が増大した。これは、ACSD により不稔の極値が現在と同程度にとどまるか、増大する可能性があることを示す。イネの不稔は低温に脆弱な期間の気温上昇度と気温の経年変動幅の関係に関連づけられる。穂ばらみ期の 20 年平均気温の上昇度が前進した穂ばらみ期の気温の経年変動幅より小さいため、冷害を引き起こすような不稔が将来残る可能性がある。さらに、たとえ穂ばらみ期の 20 年平均気温が上昇しても、前進した穂ばらみ期の気温の経年変動幅が元の穂ばらみ期のそれより大きい場合には不稔の最大値が悪化する可能性がある。このことは、気温の上昇により長期平均の不稔が軽減しても、気温の経年変動により不稔が増大する可能性があることを示唆する。本研究では、気候の将来予測に大きな不確実性があることから、簡単のためすべての季節で気温が一樣に上昇し、各暦日の気温の経年変動幅が現在と同一であると仮定した。イネの不稔をより詳細に予測するためには、各季節の気温変化を考慮した評価および気温の経年変動幅のより詳細な予測が求められる。

イネの不稔を回避する対策として、イネの移植を遅らせる、生育が遅い新しい品種を導入する、生育を遅らせるように品種を改良する、といった適応策が挙げられる。しかし、遅い移植や生育の遅さは登熟期間における秋冷のような低温に遭遇するリスクを増大させる恐れがある。Nemoto et al. (2012) は移植期、出穂期、登熟期の低温リスクと、不稔およびコメの品質に影響する高温リスクを考慮したイネの耕作スケジュールの確率的リスク評価手法を提案した。適応策の効果や収量減少に対する複合的リスクを評価するために、Nemoto et al. (2012) のような統合的評価を行う余地がある。

表 3.1 本研究で使⽤したパラメータ

不稔率	A_1	T_{h1}	A_2	T_{h2}	A_3	T_{h3}	T_c
	1.111	17.53	1.023	17.58	1.167	20.14	18.18
DVI	移植〜幼穂形成期				幼穂形成期以降		
	A	T_h	G	B	A	T_h	G
	0.2861	17.07	28.95	0.1086	0.2983	15.85	20.93

不稔率パラメータの決定と検証は田中ほか(1997)に従った。

表 3.2 移植日を5月26日とした場合の T+0、T+5 ケースにおける低温に脆弱な3つの期間(前歴期間、穂ばらみ期、開花期間)の20年平均日数

ケース	旭川	岩見沢	今金	北斗	三石	池田	北見
前歴期間							
T+0	12	12	12	13	12	13	13
T+5	10	10	10	10	10	11	10
穂ばらみ期							
T+0	7	7	7	7	7	7	7
T+5	6	6	6	6	6	7	6
開花期間							
T+0	7	7	7	7	8	8	8
T+5	6	6	6	6	6	7	6

表 3.3 移植日を 5 月 26 日とした場合の穂ばらみ期の気温の 20 年平均値と 20 年平均の開始日
および終了日。括弧内は 20 年間の最大値と最小値の幅を示す。

ケース	旭川		岩見沢		今金		北斗	
	気温(°C)	開始-終了	気温(°C)	開始-終了	気温(°C)	開始-終了	気温(°C)	開始-終了
T+0	20.35 (17.16-25.41)	7/13-7/19	20.29 (17.25-24.70)	7/17-7/23	20.21 (16.87-22.90)	7/21-7/28	20.20 (16.45-23.29)	7/19-7/26
T+1	20.55 (17.45-23.36)	7/9-7/15	20.26 (17.08-24.06)	7/12-7/18	20.37 (17.09-22.99)	7/16-7/23	20.22 (16.73-24.42)	7/14-7/21
T+2	20.93 (18.92-24.04)	7/6-7/12	20.53 (18.21-22.96)	7/8-7/14	20.68 (17.66-24.10)	7/12-7/18	20.56 (17.45-22.56)	7/10-7/16
T+3	21.86 (20.06-24.30)	7/3-7/8	21.31 (19.45-23.96)	7/5-7/11	20.96 (18.82-22.77)	7/8-7/14	20.90 (18.75-22.96)	7/6-7/12
T+4	22.91 (20.36-25.24)	6/30-7/6	22.21 (19.64-24.34)	7/2-7/8	21.50 (18.71-23.66)	7/5-7/10	21.66 (18.97-23.94)	7/3-7/9
T+5	23.78 (20.29-25.62)	6/28-7/4	23.02 (19.90-25.23)	6/30-7/5	22.36 (19.84-24.66)	7/2-7/7	22.52 (19.96-24.91)	7/1-7/6

表 3.3(続き)

ケース	三石		池田		北見	
	気温(°C)	開始-終了	気温(°C)	開始-終了	気温(°C)	開始-終了
T+0	20.31 (17.81-22.93)	7/27-8/3	19.55 (16.71-23.49)	7/28-8/4	20.24 (15.40-25.41)	7/20-7/27
T+1	20.59 (16.02-23.36)	7/22-7/28	20.49 (16.53-23.89)	7/22-7/29	20.46 (15.75-27.70)	7/15-7/22
T+2	20.68 (16.75-24.88)	7/17-7/23	20.21 (15.89-25.53)	7/17-7/24	20.55 (17.07-25.88)	7/11-7/18
T+3	20.60 (17.60-24.65)	7/12-7/19	20.49 (16.25-25.78)	7/12-7/19	20.55 (17.07-23.44)	7/8-7/14
T+4	20.89 (18.41-23.27)	7/8-7/14	20.43 (18.07-23.65)	7/8-7/14	20.86 (18.91-25.56)	7/4-7/11
T+5	21.60 (18.98-24.26)	7/5-7/11	20.85 (17.66-24.04)	7/5-7/11	22.25 (19.61-24.22)	7/2-7/8

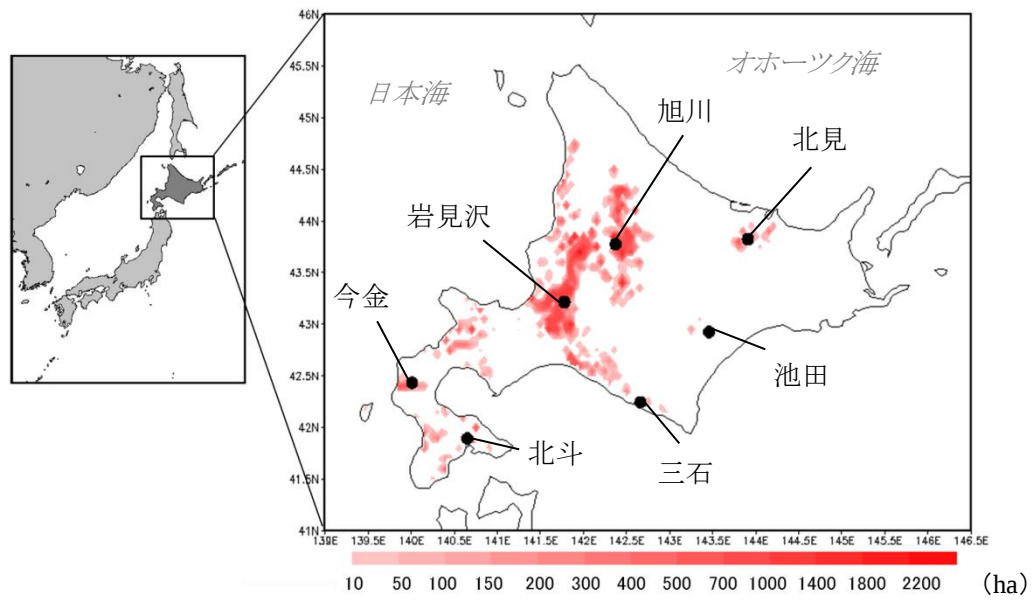


図 3.1 2000 年の田作付面積と本研究で選択した 7 つの解析地点

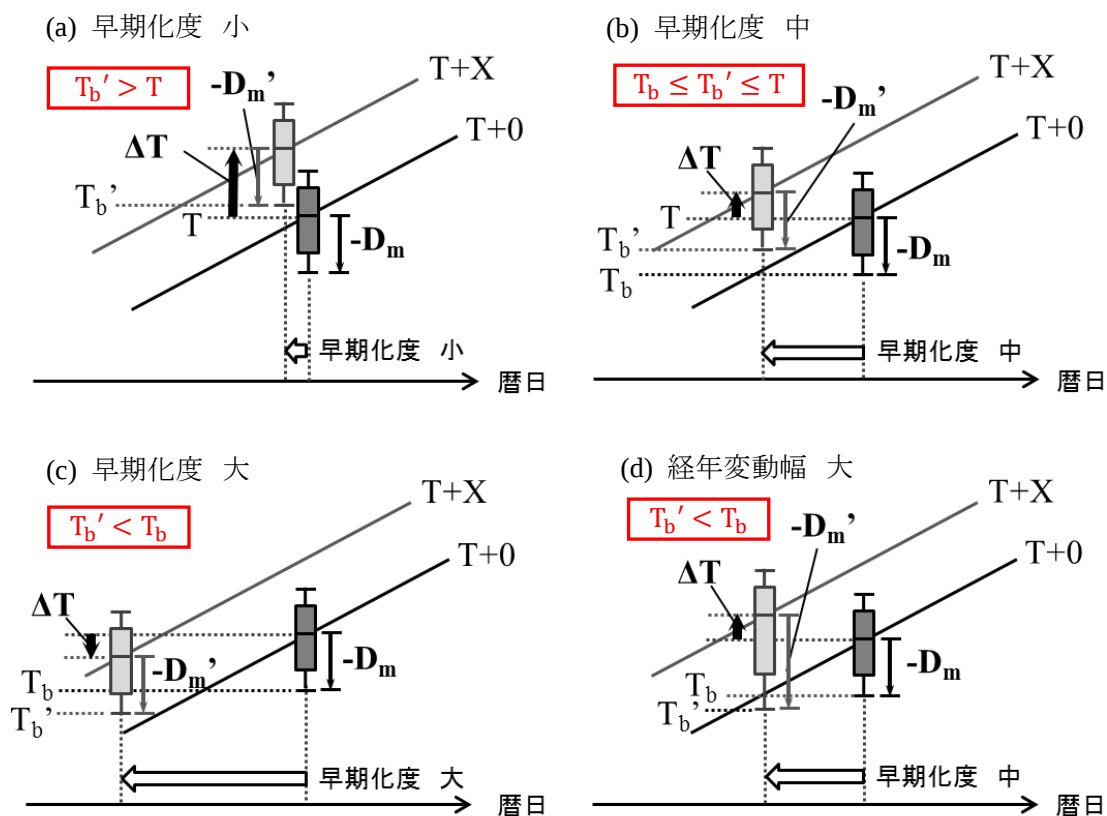


図 3.2 低温に脆弱な期間の気温上昇度と期間の早期化度、気温の経年変動の関係の概念図。X は与えた気温の増分である。各箱ひげ図は低温に脆弱な期間の数年間の気温の幅を示す。 T_b と T_b' はそれぞれ T+0 ケースと T+X ケースの経年変動の最低気温で、T は T+0 ケースの経年変動の平均気温を表す。 ΔT は T+X ケースの平均気温の T+0 ケースからの上昇度である。 D_m と D_m' は気温の経年変動幅で、それぞれ $D_m = T - T_b$ 、 $D_m' = T + \Delta T - T_b'$ で表される。

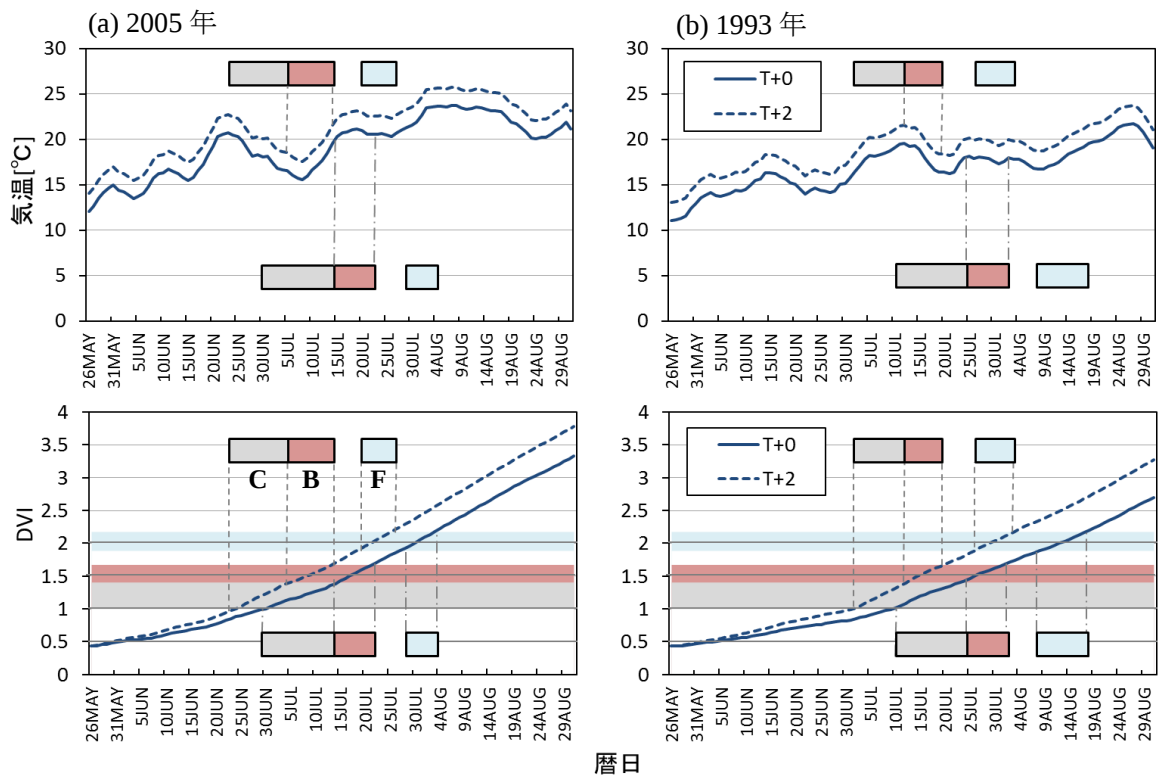


図 3.3 (a)2005 年、(b)1993 年の岩見沢における 5 月 26 日に移植した場合の 7 日間移動平均気温と DVI の推移。実線は T+0 ケース、破線は T+2 ケースを示す。陰影を付けたボックスは低温に脆弱な 3 つの期間で、C は前歴期間、B は穂ばらみ期、F は開花期間を表す。

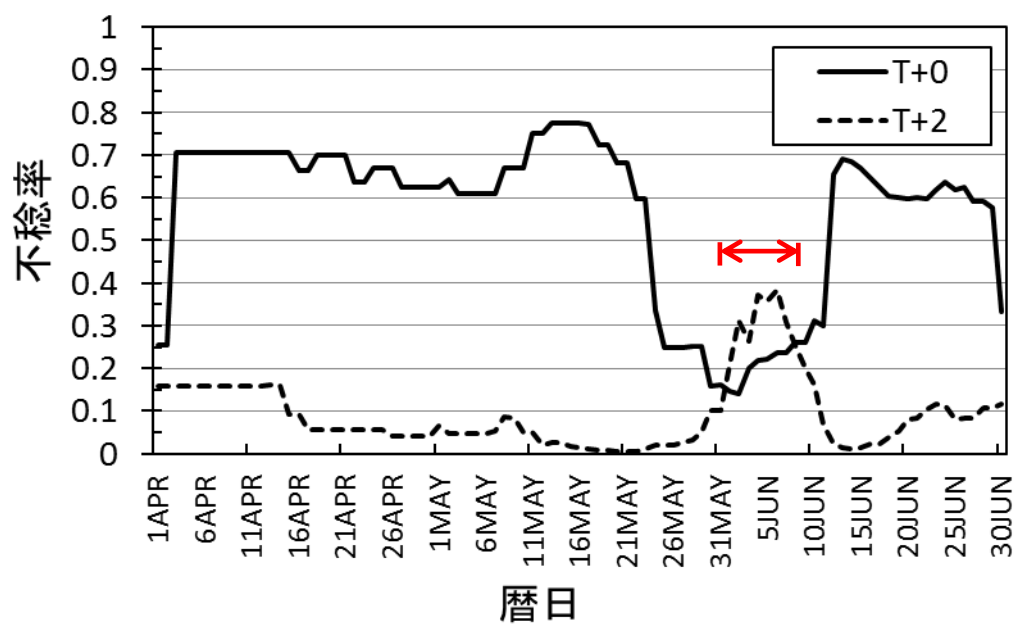


図 3.4 1993 年の旭川における移植日を 4 月 1 日から 6 月 30 日とした場合の各不稔率。実線は T+0 ケース、破線は T+2 ケースを示す。図中の赤矢印は ACSD が発生する(すなわち、気温上昇により不稔率が現在以上となる)移植日の期間を表す。

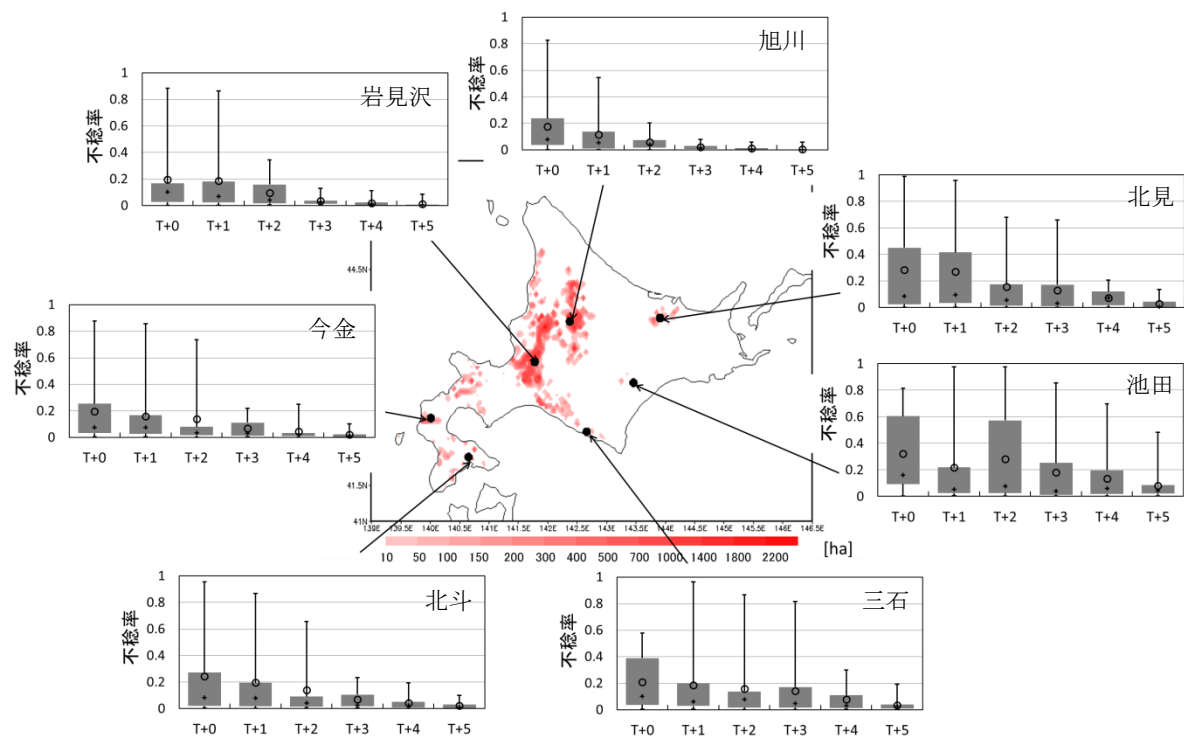


図 3.5 現在および気温上昇ケースにおける 20 年間 (1986–2005 年) の不稔率のパーセンタイル値。

移植日は 5 月 26 日である。エラーバー上端は最大値、ボックスの上端は 75 パーセンタイル値、十字マークは 50 パーセンタイル値、ボックス下端は 25 パーセンタイル値、エラーバー下端は最小値で、円マークは平均値を表す。カラーは 2000 年の田作付面積を表す (図 3.1 と同様)。

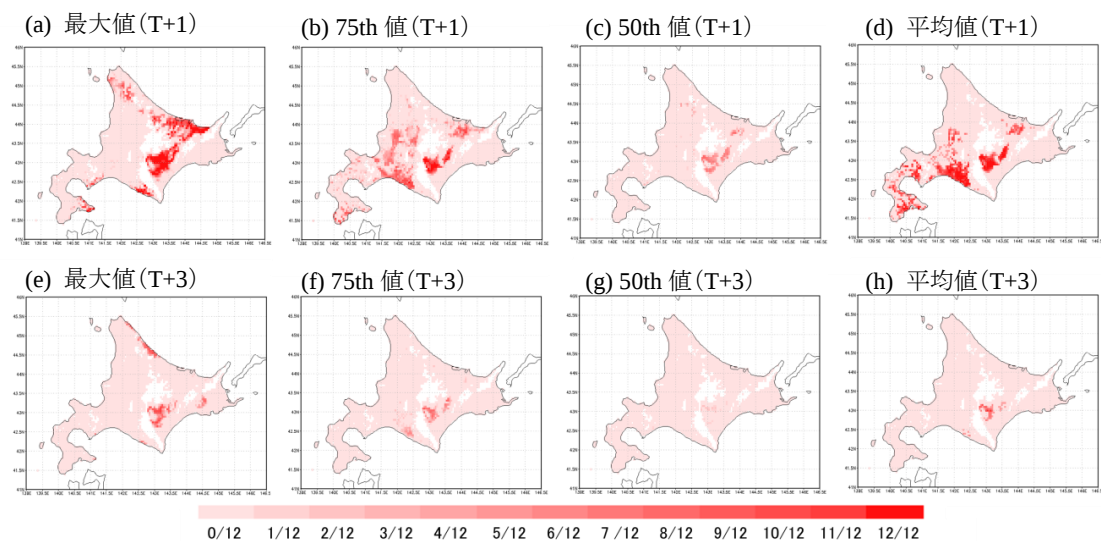


図 3.6 移植日を 5 月 20 日から 5 月 31 日とした場合(全 12 事例)について、不稔率の各パーセン
 タイル値が T+0 ケースのそれ以上となり、かつ 15%を上回る頻度。(上)T+1 ケース、(下)T+3
 ケース。20 年間すべてについて、移植から 150 日以内に出穂した地域のみを考慮した。計算
 の詳細は本文を参照されたい。

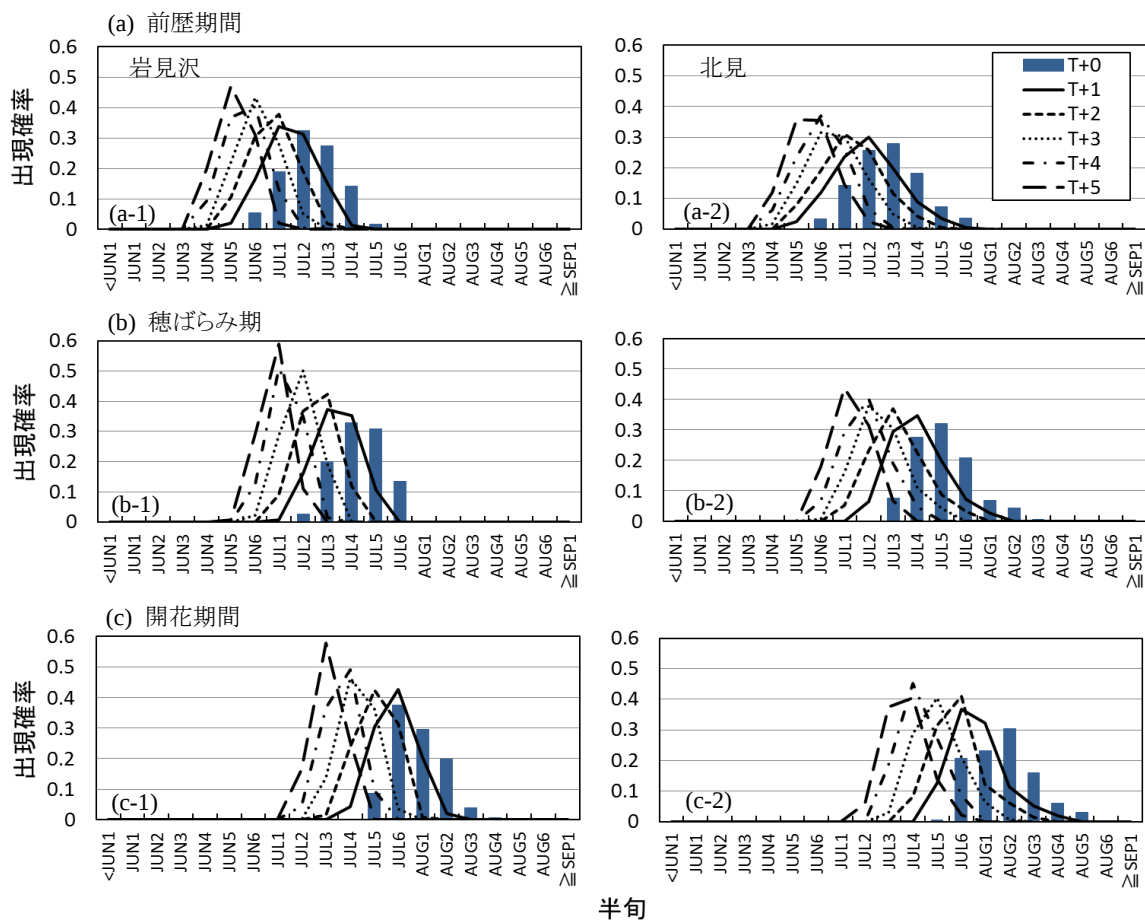


図 3.7 岩見沢(左)および北見(右)における、(a)前歴期間、(b)穂ばらみ期、(c)開花期間の 20 年間の出現時期の確率分布。移植日は 5 月 26 日である。棒グラフは現在、折れ線グラフは気温上昇ケースを示す。横軸の JUN1, JUN2, ..., は半旬の番号を示す。例えば、JUN1 は 6 月 1 日から 5 日、JUN2 は 6 月 6 日から 10 日を表す。JUL6 と AUG6 のみ 6 日間で、それぞれ 7 月 26 日から 31 日、8 月 26 日から 31 日となる。各期間に含まれる日にちを年を区別せずに半旬に割り当てた。

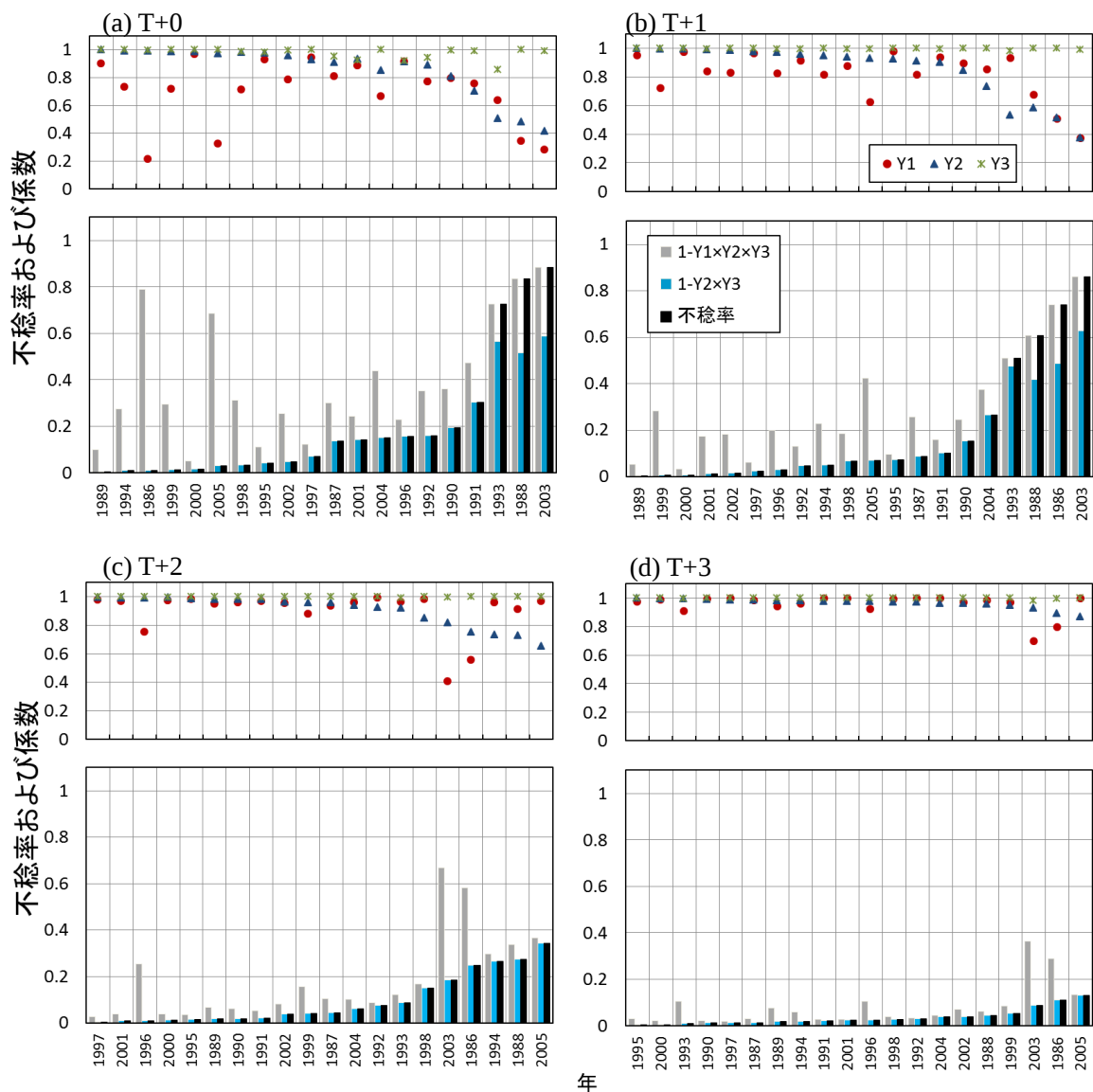


図 3.8 (a)T+0 ケース、(b)T+1 ケース、(c)T+2 ケース、(d)T+3 ケースについて岩見沢の不稔率の時系列を昇順で示したもの。移植日は 5 月 26 日である。稔実率に対する気温影響である Y_1 、 Y_2 、 Y_3 および $(1-Y_1 \times Y_2 \times Y_3)$ と $(1-Y_2 \times Y_3)$ も示している。黒の棒グラフが不稔率で、円マークは Y_1 、三角マークは Y_2 、十字マークは Y_3 である。薄い灰色の棒グラフは $(1-Y_1 \times Y_2 \times Y_3)$ 、水色の棒グラフは $(1-Y_2 \times Y_3)$ を表す。

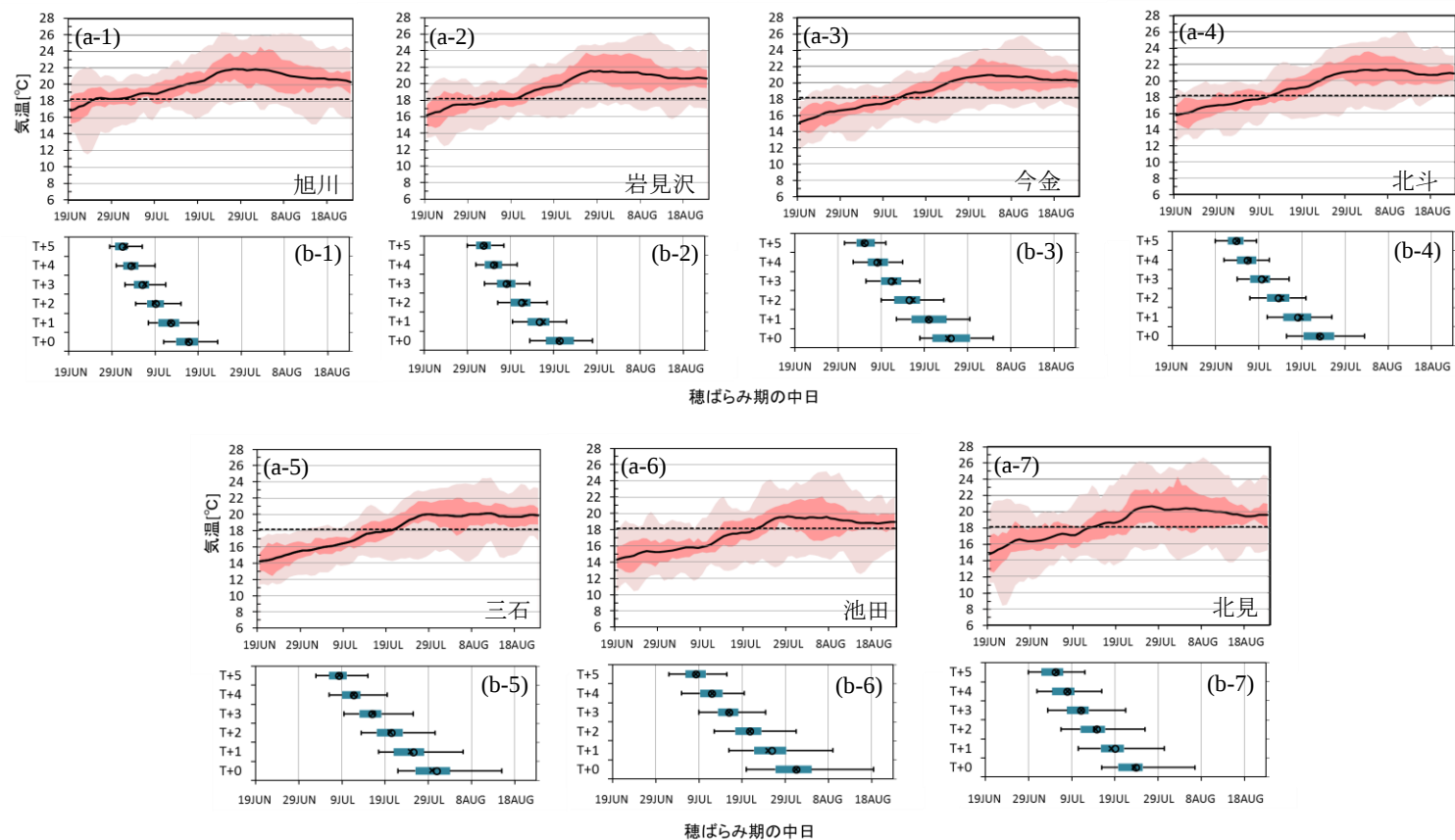


図 3.9 (a)各地点における 20 年平均の 7 日間移動平均気温の時系列(太実線)。薄い桃色の陰影は 20 年間の最小値から最大値の範囲、濃い桃色の陰影は 25 パーセンタイル値から 75 パーセンタイル値の範囲を示す。細い破線は限界温度 T_c である。(b) 移植日を 5 月 26 日とした場合の現在および気温上昇ケースの穂ばらみ期の中日。エラーバーの右端は 20 年間の最遅日、ボックスの右端は 75 パーセンタイル値、十字マークは 50 パーセンタイル値、ボックス左端は 25 パーセンタイル値、エラーバー左端は最早日で、円マークは平均値を示す。

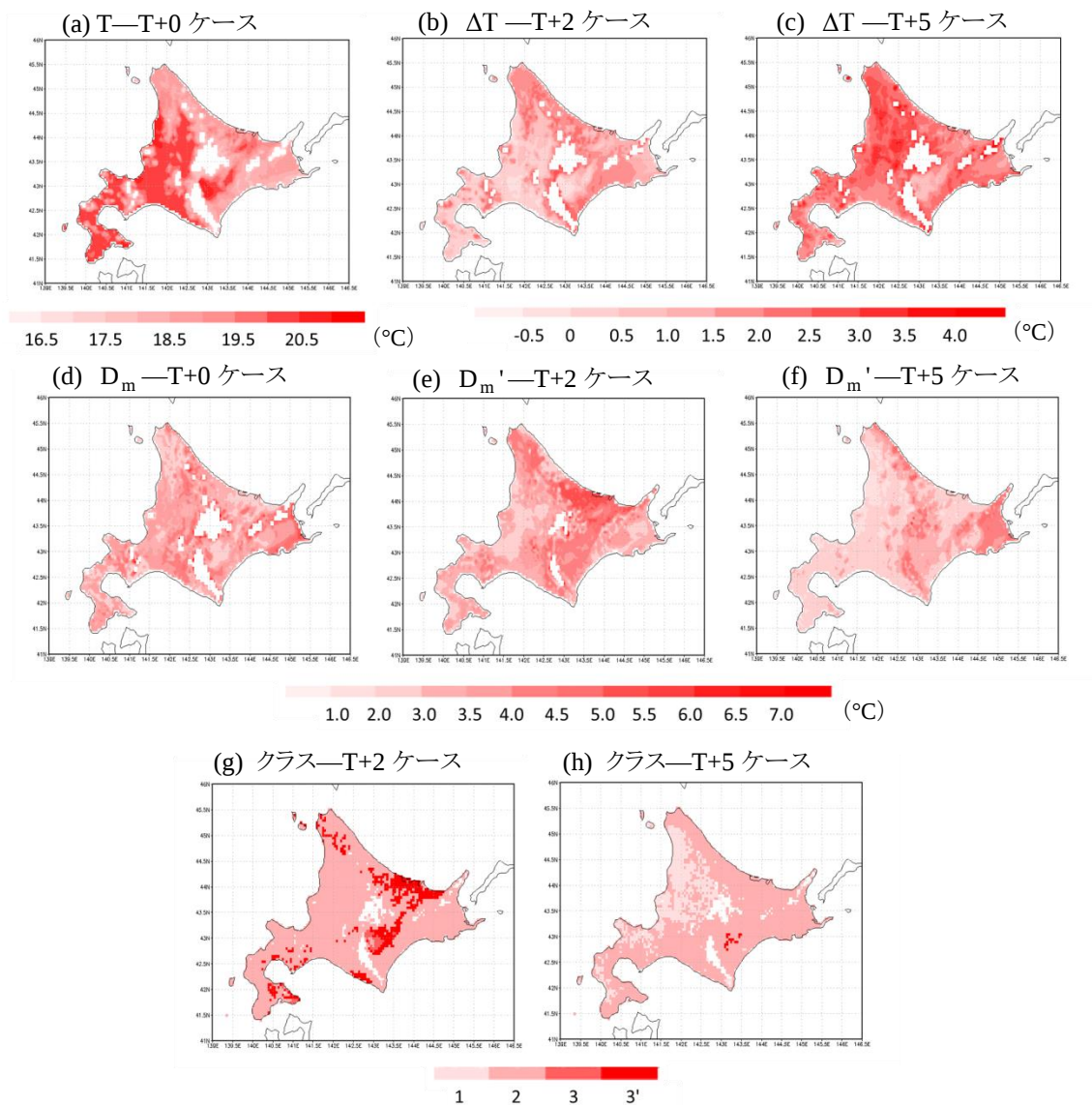


図 3.10 穂ばらみ期の気温の 20 年平均値と穂ばらみ期の気温の経年変動幅、およびクラス番号の分布。移植日は 5 月 26 日である。(a) $T+0$ ケースの穂ばらみ期の気温の 20 年平均値(T)。 (b) $T+2$ ケース、(c) $T+5$ ケースにおける、穂ばらみ期の 20 年平均気温の上昇度(ΔT)。 (d) $T+0$ ケースにおける穂ばらみ期の気温の経年変動幅(D_m)。 (e) $T+2$ ケース、(f) $T+5$ ケースの穂ばらみ期の気温の経年変動幅(D_m')。 (g) $T+2$ ケース、(h) $T+5$ ケースのクラス番号。20 年間すべてについて移植日から 150 日以内に穂ばらみ期の開始と終了が定義された地域のみを考慮した。

第 4 章

結論

本研究の着目点は、第 1 章で述べた通り、(1)寒冷地である北海道の各地域のコメ収量変動を汎用的な作物モデルで評価することができるのか、(2)温暖化に伴い、北海道のイネの冷害リスクはどのように変化するのか、の 2 点であった。第 2 章では、世界を対象とした作物生産性評価に用いられる GAEZ モデルを改良し、比較的簡易な改良と汎用的なパラメータにより、北海道の冷害を含めたイネの観測収量変動を再現可能であることを示した。第 1 の着目点に対する回答は、「評価できる」となる。第 3 章では、温暖化を想定した気温上昇に伴うイネの障害不稔の発生しうる幅について評価し、平均的には不稔は軽減するが、不稔の極大値が増大しうることを示した。第 2 の着目点に対する回答は、「平均的には冷害による不稔は軽減するが、不稔の程度の幅は拡大する可能性がある」ということになる。汎用的なモデルで比較的容易なパラメータ設定により北海道のコメ収量変動が再現可能となったこと、および冷害による不稔の平均的傾向だけでなく発生しうる幅を評価したことは、今後の気候変動下の収量変動予測に応用でき、その結果は栽培地域の選定や適応策(新たな品種を導入した場合の評価)に資すると期待できる。また、本研究の手法を北海道以外の地域へ応用することも期待できるだろう。以下では、北海道における将来の収量変動予測への適用、他地域の評価への応用に際し、考慮しておきたい事項について述べる。

まず、北海道の気候変動下の収量変動予測を行うためには、GCM による気候変動予測を用いることが求められる。北海道のコメの収量変動は冷害の影響を大きく受けることから、特に第 3 章で行った不稔率の推定を、GCM の気候変動予測に基づいて実施することで将来の収量変動予測を精緻化することができる。第 3 章では気温を時間一様に上昇させて解析を行ったが、温暖化により各季節の気温が一様に上昇するとは考えにくい。下野(2008)は過去 70 年(1937~2006 年)の気温の変動から、北日本では年平均気温は上昇したが 7・8 月の気温に増加傾向はみられないことを示し、仮に春(5・6 月)のみ温暖化し夏(7・8 月)は昇温しないと仮定した場合、冷害危険度が増加することを指摘した。本研究の結果では、北海道では 5℃温暖化した場合でも穂ばらみ期は概ね 7 月に属することが分かった(図 3.7)。下野(2008)のように春のみ温暖化した場合を考えると、生育

が早期化するため、穂ばらみ期の時期は本研究のように全季節について一様に気温を上昇させた場合と大きくは変化しないと想定される。一方、穂ばらみ期の属する7月の気温は現在から上昇していないため、不稔率は本研究の結果より悪化すると考えられる。これとは逆に、春は温暖化せず、夏のみ昇温する場合は生育の早期化度合いは小さくなり、穂ばらみ期の気温は現在より高くなるため不稔率は本研究の結果より小さくなると想定される。Endo (2012) は複数の GCM の気候予測情報を用いて 2081 年～2100 年の日本付近の海面気圧 (Sea level Pressure; SLP) とやませの頻度について解析した。現在の SLP とやませを比較的良く再現する 9 つの GCM の予測によれば、オホーツク海付近の SLP は現在と比較し 6 月は負、7 月は正の偏差となる傾向がみられた (Endo, 2012)。オホーツク海高気圧の卓越が北海道の冷夏と密接に関連することを考慮すると、将来の 6 月は昇温傾向、7 月は 6 月ほど昇温しない可能性が考えられる。この場合、「春は昇温、夏は昇温しない」という仮定に近いと、障害型冷害による不稔率は本研究の結果より高くなる可能性が想定される。気候予測は不確実性が大きいと、不稔率の予測の精緻化のためには、Endo (2012) のように複数の気候予測情報を用いて、不稔率の不確実性の幅を示すことが重要であると考えられる。

また、第 1 章で、北海道の夏の気象はオホーツク海高気圧と太平洋高気圧の卓越により冷夏と暑夏が出現し、それがコメの作況と関連することを述べた。このため、将来オホーツク海高気圧と太平洋高気圧の強弱がどうなるかについて、より精緻な解析が求められるだろう。オホーツク海高気圧と太平洋高気圧の強弱は、大規模な大気・海洋変動に起因する。フィリピン付近の対流エネルギーはロスビー波による対流圏下層の南西風によって北日本周辺まで伝播するが、伝播が強い夏は太平洋高気圧が強まり暑夏となり、弱い夏はオホーツク海高気圧が出現して冷夏になりやすいという (日本農業気象学会北海道支部, 2012)。さらに、熱帯 (熱帯西部太平洋域) の対流活動の変動は、エルニーニョ・ラニーニャ現象と関わりがある。エルニーニョ時は熱帯アジア域の海水温が平年より低くなり、日本では冷夏になりやすい (日本農業気象学会北海道支部, 2012)。以上のことから、北海道の冷夏・暑夏に影響するオホーツク海高気圧・太平洋高気圧の強弱の予測のためには、全球スケールの大気・海洋現象の解析が求められる。GCM を用いた全球スケールの大気海洋変動の解析が、北海道の冷夏・暑夏や、冷害評価にとって有効であると考えられる。さらに、第 1 章ではオホーツク海高気圧が E 型、R 型、N 型の 3 つに分類され、特に N 型のときに非常に低温となることを述べた。これらの型は地上気圧だけでは判断できないため、上層 (500hPa 付近) の気圧配置

を含めた解析ができれば、強い低温の頻度や時期がどのように変化するかについても評価することができるかもしれない。

次に、北海道以外の地域への応用を含めて考えたときの課題について述べる¹。第2章では、イネの出穂日を簡易有効積算気温により推定した。また、第3章では、気温を説明変数とする発育指数(DVI)の式からイネの生育ステージ(幼穂形成、出穂、低温に脆弱な期間)を予測した。北海道のイネ品種は感温性が高く、気温のみからほぼ生育ステージを推定することができる。しかし、東北以南の品種は日長反応性を持つため、気温の他に日長を考慮する必要がある。日長反応性は品種により異なり、一般に低緯度地域の品種ほど大きい。日本各地の品種について、気温と日長を考慮したDVIの推定式と不稔率の推定式、およびそれらのパラメータを入手できれば、本研究の手法を北海道以外の地域の評価へ応用することができると考えられる。特に、北海道と同様に冷害が深刻な東北地方の冷害評価への適用が期待できるだろう。

第2章において、改良したGAEZモデルを将来予測へ適用する場合の課題として高温障害の考慮、CO₂施肥効果の考慮、灌漑地域における水ストレスの検討に言及した。CO₂施肥効果や水ストレスの検討は北海道に限らず、あらゆる地域へGAEZモデルを適用する際に必要になると考えられる。高温障害については、現在の北海道では懸念する必要はほとんどないが、九州など西日本ではすでに被害が現れはじめている。西日本地域へGAEZモデルを適用するためには、高温障害の論理を追加する必要がある。北海道については、丹野(2012)が2030年代の高温による障害不稔および登熟期の高温による白未熟粒発生に伴う品質低下について考察している。丹野(2012)によれば、明確な高温障害(高温による不稔)が生じるのは開花期の気温が35℃前後であるが(松井, 2009)、江差や北斗、深川、旭川での解析から2030年代に35℃以上の気温が発生する危険性は極めて低いとのことである。また、コメの検査等級が低下するまで白未熟粒の発生率が高くなるのは出穂後20日間の平均気温が26~27℃を超える場合であるが、2030年代の北海道の平均的气象条件においてその危険性は低い(丹野, 2012)。しかし、Nemoto et al.(2012)によると、北海道の主要稲作地域である岩見沢では2030年~2050年には極めて確率は低いが高温不稔、高温による品質低下のリスクが現れるようになり、2081年~2100年にはそのリスクが高まる。このことから、北海道についても今後100年程度の長期のコメ収量予測を行う場合は、高温不稔および

¹ 世界各地への適用については、DVIなどに関するパラメータの入手が日本と比べて難しいと想定されるため、ここでは日本国内の地域を想定する。

高温による品質低下を考慮する必要があるだろう。

西日本では、冷害よりも高温障害への懸念が大きい。上述の通り、高温障害は開花期や出穂期を基準とした特定の期間の気温により推定することができる。各品種の高温に対する耐性をパラメータ化する必要はあるが、それができれば、第 3 章で行った冷害による不稔の幅と同様の手法で高温による不稔の幅について評価することができ、西日本のコメの収量変動予測を精緻化することができると考えられる。

高温障害のほか、温暖化によりリスクの増加が懸念されるのが病虫害である。丹野 (2012) は、2030 年代について北海道では現在より春季の気温が上昇することにより、いもち病の初発が早まると言及している。また、いもち病の発生適温は 20~25℃で、日照不足による稲体の軟弱化、降雨によるいもち病菌の発芽・侵入に必要な水滴の供給がその発生を助長する(大畑, 1989)とのことであるが、2030 年代には夏季の気温上昇とともに日射量の減少や降雨量の増加が見込まれることから、いもち病の発生増加は避けられないと指摘している(丹野, 2012)。このため、北海道を含めた各地域の収量変動予測の精緻化のためには、病虫害を考慮する余地がある。GAEZ モデルでは農業気象制約の中で植付可能期間の長さをもとに病虫害発生リスクを考慮しているが、この論理が実際の観測(現在気候において病虫害の被害が発生している地域における収量統計値など)をどれだけ再現するのかを検証し、必要であれば論理を改良することが求められる。

さらに、温暖化すると台風の総数は減少するが、強い台風の数が増加するという予測がある(杉, 2008)。Masutomi et al. (2012) は、損傷度曲線 (fragility curves; FCs) と呼ばれる外力と損傷確率の関係を示す関数を用いて、熱帯低気圧による水稻の被害面積を評価する手法を提案した。このような手法を作物モデルに取り込めば、台風のような極端現象を考慮した収量予測が可能となると想定される。

以上のように、本研究の手法・結果を北海道やその他の地域の将来気候下の収量変動予測に応用するためには、考慮すべき事項がいくつかある。特に、北海道の予測については GCM の気候変動予測の利用、西日本地域への適用についてはさらに日長と高温障害を考慮することが求められるだろう。それでも、本研究で汎用モデルの北海道への適用を試み実現したこと、気温の経年変動幅を考慮し冷害による不稔の程度の幅を評価したことは、今後、収量変動予測をより精緻化するための第一歩になったと考える。

謝辞

北海道大学大学院環境科学院の博士後期課程において、本研究を行い学位論文として取りまとめるにあたり、指導教官である山中康裕教授に多大なるご支援、ご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。山中教授には博士課程への進学についてご相談させていただき、進学後は研究を行う上での考え方や研究のアイデア・方針・構成など研究全般について懇切にご指導いただきました。地球環境科学研究院の佐藤友徳准教授には、研究の方針や解析方法について多くのご指導を賜りました。また、第2章のWRFモデルの風速データをご提供いただきました。深く感謝申し上げます。国立環境研究所 主任研究員の高橋潔博士には、第2章で改良を行ったGAEZモデルをご提供いただき、研究方針についてご指導いただきました。また、APEC Climate Center Research Fellowの申龍熙博士にGAEZモデルの取り扱い方法についてご指導いただきました。埼玉県環境科学国際センター 主任の増富祐司博士には、GAEZモデルの北海道への適用に関してご助言をいただきました。本当にありがとうございます。第3章のイネの冷害に関する研究を取りまとめるにあたり、北海道農業研究センター 主任研究員の根本学博士に北海道の稲作に関する先行研究や知見などについて、多くのご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

本論文の審査において、主査の山中康裕教授、副査である渡辺悌二教授、佐藤友徳准教授、藤井賢彦准教授、根本学博士にご助言・ご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、博士課程での研究を支えてくださった環境科学院環境起学専攻の教員の皆様、スタッフの皆様、学生の皆様に深く感謝いたします。誠にありがとうございました。

参考文献

- 内島立郎, 1976: 冷温条件と水稻の不稔発生との関係についての一考察. 農業気象, **31**(4), 199–202.
- 内島立郎, 1983: 北海道, 東北地方における水稻の安全作季に関する農業気象学的研究. 農業技術研究所報告 A 物理・統計, **31**, 23–113.
- 大川隆, 1992: 北海道の動気候. 北海道大学図書刊行会, 北海道, 246pp.
- 大畑貫一, 1989: いもち病. 稲の病害—診断・生態・防除—. 全国農村教育協会, 東京, 295–396.
- 柏原辰吉・大川隆, 1967: 北海道における夏季低温の総観的研究. 気象庁研究時報, **19**, 235–254.
- 気象庁, 2000: 気象庁キャンペーン資料 12-8.
- 気象庁, 2008: 地球温暖化予測情報第 7 巻—IPCC 温室効果ガス排出シナリオ A1B および B1 による日本の気候変化予測—. 気象庁, 東京, 59pp. 気象庁, 2013a: 日々の天気図. <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html> (アクセス日: 2013 年 11 月 29 日)
- 気象庁, 2013b: 日本の年平均気温. http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/an_jpn.html (アクセス日: 2013 年 11 月 29 日)
- 国土交通省: 国土数値情報(行政区域).
- 国土交通省: 国土数値情報(土地利用 3 次メッシュ).
- 桜谷哲夫・堀江武, 1985: 作物の蒸発散に関する研究 (1) 水田蒸発散の季節・品種別特性と簡易推定法, 農業気象, **41**(1), 45–55.
- 下野裕之, 2008: 地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響. 日作紀, **77**(4), 489–497.
- 申龍熙・高橋潔・肱岡靖明・花崎直太・山本隆広・増富祐司, 2011: 気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の温暖化影響評価. 土木学会論文集 G(環境), **67**(5), I_61–I_70.
- 杉正人, 2008: 5. 地球温暖化で台風はどうか(2006 年度秋季大会シンポジウム「台風—伊勢湾台風から 50 年を経て—」の報告). 天気, **55**(5), 385–390.

- 清野 豁, 1993:アメダスデータのメッシュ化について. 農業気象, **48(4)**, 379-383.
- 清野 豁, 1995:気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響. 農業気象, **51(2)**, 131-138.
- 田中英彦・古原洋・三浦周・五十嵐俊成, 1997:水稻の発育ステージ及び不稔歩合の推定法. 新しい研究成果 北海道地域(1996 年度), 17-20.
- 丹野久, 2012:地球温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向(2030 年代の予測) 2. 水稻における影響予測. 北農, **79(1)**, 72-81.
- 丹野久・田中英彦・古原洋・佐々木亮・三浦周, 2007:寒地水稻の湛水土中直播栽培における簡易有効積算気温による品種選定. 日作紀, **76(4)**, 591-599.
- 中辻敏朗・丹野久・谷藤健・梶山努・松永浩・三好智明・佐藤仁・寺見裕・志賀弘行, 2011:地球温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向(2030 年代の予測) 1. 2030 年代の気候予測および技術的対応方向(総論). 北農, **78(4)**, 440-448.
- 日本農業気象学会北海道支部, 2012:北海道の気象と農業. 北海道新聞社, 北海道, 384pp.
- 農林水産省, 2013:I. 最近の高温年における気象と水稻作柄状況. http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_kiko_hendo/suito_eikyo/pdf/clim1.pdf(アクセス日:2014 年 1 月 22 日)
- 農林水産省北海道統計情報事務所 [編集]:北海道農林水産統計年報. 農業統計市町村別編.
- 農林水産省農林経済局統計調査部 a:作物統計. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html(アクセス日:2013 年 11 月 29 日)
- 農林水産省農林経済局統計調査部 b:作物統計.
- 農林水産省農林経済局統計調査部 c:作物統計. http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000000010697&requestSender=dsearch(アクセス日:2013 年 11 月 29 日)
- 林陽生・石郷岡康史・横沢正幸・鳥谷均・後藤慎吉, 2001:温暖化が日本の水稻栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト. 地球環境, **6(2)**, 141-148.
- 北海道協同組合通信社ニューカントリー編集部, 2007:畑で読む北海道の農業気象:温暖化・異常気象に負けない営農対策. 北海道, 238pp.
- 北海道・道総研農業研究本部・ホクレン農業協同組合連合会・社団法人 北海道米麦改良協会, 2011:北海道の米づくり [2011 年版]. <http://www.beibaku.net/rice/2011/manual/ricetext/ricetext.html>(アクセス日:2013 年 11 月 29 日)

- 北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場, 2010: 平成 21 年度 北海道立中央農業試験場年報. 北海道, 129pp.
- 松井勤, 2009: 開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L.) の不稔. 日作紀, **78(3)**, 303–311.
- 村田吉男, 1964: わが国の水稲収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について. 日作紀, **33(1)**, 59–63.
- 文部科学省・気象庁・環境省, 2009: 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」. 65pp.
- 横沢正幸・飯泉仁之直・岡田将誌, 2009: 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価. 地球環境, **14(2)**, 199–206.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M., 1998: ETc - Dual crop coefficient ($K_c = K_{cb} + K_e$). In: *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm> (アクセス日: 2013 年 11 月 29 日)
- Easterling, W. E., Aggarwal, P. K., Batima, P., Brander, K. M., Erda, L., Howden, S. M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J. -F., Schmidhuber, J. and Tubiello, F. N., 2007: Food, fibre and forest products, In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J., and Hanson C. E., eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273–313.
- Endo, H., 2012: Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 123–136.
- FAO, 1995: *Digital Soil Map of the World (Version 3.5)*. Food and Agriculture Organization Press, Rome, Italy.
- Fischer, G., van Velthuizen, H., Shah, M., and Nachtergaele, F., 2002a: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA RR-02-02, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fischer, G., van Velthuizen, H., Serge, M., and Nachtergaele, F., 2002b: *Global Agro-ecological*

- Assessment for Agriculture in the 21st Century CD-ROM: APPENDIX VI BIOMASS AND YIELD CALCULATION*. <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/SAEZ/index.html> (アクセス日 : 2013 年 11 月 29 日)
- Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H. G. S., and Kropff, M. J., 1995: The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In: *Modeling the Impact of Climatic Change on Rice Production in Asia* (Matthews et al., eds.). CAB International, Oxon, 51-66.
- Iizumi, T., Hayashi, Y., and Kinura, F., 2007: Influence on rice production in Japan from cool and hot summers after global warming. *J. Agric. Meteorol.*, **63**(1), 11–23.
- Iizumi, T., Yokozawa, M., and Nishimori, M., 2009: Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. *Agric. For. Meteorol.*, **149**, 333–348.
- Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H., and Matsuoka, Y., 2009: Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **131**, 281–291.
- Masutomi, Y., Iizumi, T., Takahashi, K., and Yokozawa, M., 2012: Estimation of the damage area due to tropical cyclones using fragility curves for paddy rice in Japan. *Environ. Res. Lett.*, **7**, 014020.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z., 2000: *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.
- Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A., Goto, S., and Ozawa, K., 2012: Probabilistic risk assessment of the rice cropping schedule for central Hokkaido, Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1253–1264.
- Okada, M., Iizumi, T., Hayashi, Y., and Yokozawa, M., 2011: Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **67**(4), 285–295.
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T.,

- Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N., and Taira, R., 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Shimono, H., 2011: Earlier rice phenology as a result of climate change can increase the risk of cold damage during reproductive growth in northern Japan. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **144**, 201–207.
- Shimono, H., Hasegawa, T., Moriyama, M., Fujimura, S., and Nagata, T., 2005: Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice. *Agron. J.*, **97**, 1524–1536.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. -Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. *Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo, 113 pp.
- USGS, 1996: *GTOPO30*. United States Geological Survey. <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30> (アクセス日:2013 年 11 月 29 日)
- World Bank, 2006: *World Development Indicators 2006*. World Bank, Washington, CD-ROM.