

収量予測・情報処理・環境

地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響

下野裕之

(岩手大学農学部)

要旨：地球温暖化がイネ生産に与える影響の正確な予測は極めて重要である。本研究では将来の地球温暖化が北日本のイネの収量変動に与える影響について (1) 過去の気温傾向, (2) 過去のイネの収量傾向, (3) 簡易なモデルによる予測から解析した。過去 70 年間の日本の各地での気温傾向をみると、年平均では 0.2°C (10 年換算) の上昇が認められた。しかし、季節間で昇温傾向が異なり、夏の昇温程度が他の季節に比べ、特に北日本で小さかった。品種ササニシキを北日本の同一栽培条件で生育させた収量の推移 (26 年間) をみると、 16 g m^{-2} (10 年換算) の割合で増加するものの、その年次変動は近年やや増加する傾向にあった。最後に、さらに温暖化傾向が進行した場合を想定し、簡易なモデルを用い、イネが幼穂形成期間中に受ける低温程度の指標として冷却量を算出した。「夏も春と同程度に昇温する」条件では既存の予測と同様に温暖化により冷却量を低下させたが、観測された気温傾向を反映させた「春は昇温するが夏は昇温しない」条件では 1°C の昇温で冷害強度を 16% 増加させることが予測された。以上、現在、徐々に進行している春の昇温傾向は、冷害強度の上昇を介し北日本の収量変動を高める可能性があり、品種・作期を最適化させる必要を示した。

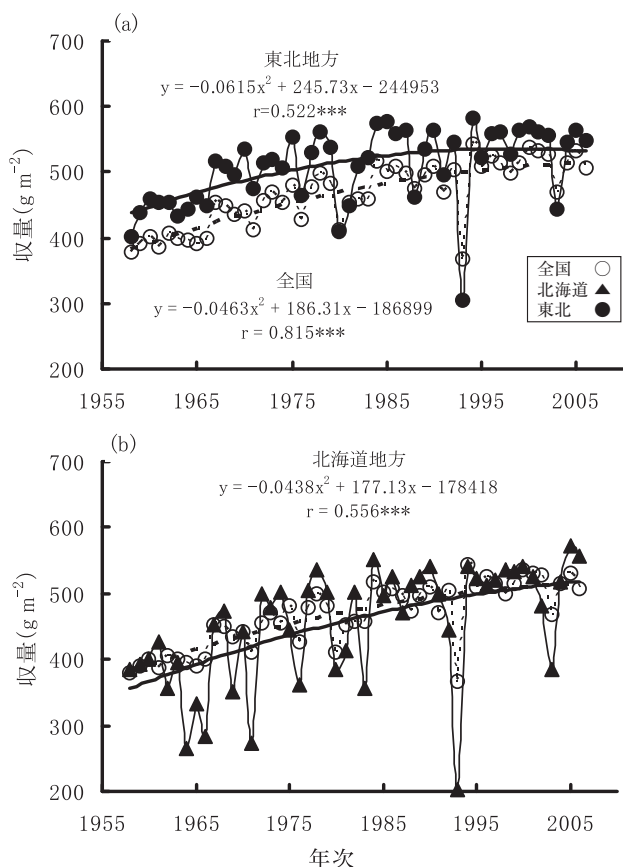
キーワード：イネ、乾物生産、シミュレーションモデル、収穫指数、収量予測、地球温暖化、不稔、冷害。

産業革命以降、急速に拡大した人間活動により、大気中の二酸化炭素をはじめとする温室効果ガス濃度が急増し地球規模での気温上昇をもたらしている。全球の平均気温でみると、過去 100 年の間で 0.74°C 上昇しており、その上昇程度は最近になり加速度的に増大している (IPCC 2007)。また地域別では気温上昇の程度は高緯度地域で大きいことが報告されている。現在、京都議定書をはじめ温室効果ガスの削減に向けた取り組みが開始されているものの、21 世紀末にさらに $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ の気温上昇が予測され、世界の食糧を支えている作物生産への影響が懸念されている。その中でも、世界人口の半分以上を養うコメの生産に与える影響評価は世界の食糧の安全保障を考える上で極めて重要である。

将来の地球温暖化条件でのコメ生産についてシミュレーションモデルを用いた予測がいくつか行われている (Horie ら 1995, 林ら 2001, Nakagawa ら 2003, Easterling ら 2007)。既存の報告の多くは地球温暖化がイネの潜在収量に及ぼす影響に焦点をあて検討している (= 過去数十年の平均気温に昇温量を加えた気象シナリオでの解析)。それらを総じてみると、熱帯・温帯地域において気温上昇は開花期の高温を原因とする受精障害を悪化させ不稔歩合を高める。さらに、その受精障害が大気中二酸化炭素濃度の上昇によりさらに助長されることから (金ら 1996, Matsui ら 1997)、それら地域における生産性の低下について警鐘がならされている。これとは対照的に寒冷地域における気温上昇は低温ストレスを軽減し、大気中二酸化炭素濃度上昇

の“施肥効果”により生産性を向上させるという、非常に楽観的な予測が共通した結論となっている。Easterling ら (2007) は、世界各地でのイネの収量予測に関する研究報告を総説し、低緯度地域では現在からのわずかな気温上昇で減収するのに対し、高・中緯度地域では $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ までの気温の上昇では収量を向上させると報告している。

一方、地球温暖化がイネの収量変動に及ぼす影響について検討した例は非常に限られている。Horie ら (1995) は大気中二酸化炭素が現在より倍増した気候シナリオ、すなわち今世紀末にあたる $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ の気温上昇が収量変動に及ぼす影響を解析し (= 過去のそれぞれの年次の気温に昇温量を加えた気象シナリオでの解析)、西日本ではその変動が拡大する一方、寒冷地において変動が小さくなることを示した。しかしながら、現在も徐々に進行している温暖化すなわち比較的近い将来の気温上昇 ($1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 上昇) が収量変動に及ぼす影響を検討した研究はない。第 1 図に、寒冷地域を代表し日本の北海道・東北地方の過去 49 年間の収量の推移を示した。収量水準は 1990 年代以降に頭打ち傾向になるものの年々徐々に上昇し、近年の収量は東北地方では全国平均より高く、北海道地方も全国と同水準まで上昇している。しかしながら、両地方ともに年次間の収量変動が大きく、急速な温暖化が進んでいる近年においても低温ストレスが問題となっている (Kanno 2004)。本研究では、まず日本各地の気温の過去の上昇程度を北日本の程度と比較し、現在の地球温暖化との関係について整理する。それを踏まえて冷害の危険度を簡易なシミュレーションモデル



第1図 北日本における水稻の子実収量の推移。

(a) 東北地方と全国、(b) 北海道地方と全国について示す。作物統計データから1958～2006年の49年間について抽出した。***: 0.1%水準で有意。

を用いて再評価し、不確実性を多く含む将来の気候条件、特に数十年先の近い将来の気候条件で安定してイネ栽培を行うための方策を議論する。

材料と方法

1. 気温の変化

過去70年間(1937～2006年)のわが国の気温の変化傾向の地域間差を比較するため、北海道から九州地方までの計13地点(札幌、旭川、八戸、盛岡、仙台、秋田、酒田、福島、富山、水戸、神戸、高知、鹿児島)の月別の平均気温(時別データの日平均値の平均)のデータを気象庁の「過去の気象データ検索」(気象庁2007)から取得した。なお、富山のみ観測開始が1939年のため68年間のデータとした。

加えて、気象台の気温データは観測地の都市化の影響を多大に受けており、純粋に長期の気温傾向を評価するためには、都市化影響が比較的少ない、観測地が農地に囲まれた農業試験場の気温データの有効性が指摘されている(Sameshimaら2007)。そこで、盛岡について上記の市街地で計測されている都市部を代表する気象台のデータと東北農業研究センター内の圃場内で計測されている農地を代表するデータ(厨川気象データ)とを過去50年間(1957～

2006年)について比較した。気象台観測値が盛岡市街中心部にあるのに対し、東北農業研究センターはそれより北西約5 kmに位置する。なお、東北農業研究センターにおける気温データは1970年以前が日最高気温と日最低気温のみの計測であったため、それらの平均を日平均値としその月別平均値について解析した。一般に日最高・最低平均は時別平均より0.1℃程度高い。

2. 子実収量および関連形質の変化

現在まで続いた温暖化の影響を評価するため、過去26年間(1980～2005)の子実収量の年次推移を検討した。供試データは、水稻奨励品種決定基本調査成績データベース(2006年版)(太田ら2006)から、品種「ササニシキ」について窒素施肥量が6～9 g m⁻²、移植を5/11～5/20に行った275計測値を抽出した。データは公立の農業試験場(岩手、秋田、宮城、福島、山形)で精密に管理して行ったものであり、農家圃場で得られた作物統計データ(例、第1図)に含まれる誤差要因(品種、栽培管理、収穫ロスなどの違い)が限りなく排除された純粋に気象条件の影響を評価できる最良のものである。調査データは、子実収量、全重(風乾)、出穂日、収穫日、穂数、穂長、稈長、収穫指数、千粒重(玄米)を用いた。なお、子実収量と千粒重は水分を15%に換算した値を示した。

3. 冷害強度の評価

将来の冷害の強度がどのように変わるかを予測するため、既存の簡易モデルを用いて評価を行った。発育予測は、神田ら(2000, 2002)の主稈葉齢予測モデルを用いて行った。モデル構造は有効積算気温の形をとる。移植から幼穂形成までは下限温度(10℃)と上限温度(24℃)を設定した有効積算温度(℃・日)とし、日平均気温(T)が10～24℃では(T-10)、24℃以上は(24-10)、10℃以下は0とした。幼穂形成期から出穂までは上限温度を設定せず、10℃以上の有効積算温度とした。移植から幼穂形成期までに必要な有効積算温度(5葉期からは、岩手県や宮城県の主力品種である「ひとめぼれ」クラスの熟期では495℃・日、青森県太平洋岸の主力品種「ゆきあかり」クラスの熟期では329℃・日とする一方、幼穂形成期から出穂期までの有効積算温度は品種によらず310℃・日とした。

冷害の発生原因である幼穂形成期以降に低温に遭遇した程度を、内島(1976)の提唱した冷却量概念を用いて推定した。冷害は低温の程度のみならずその持続期間にも大きく影響される。イネの低温に対する感受性は特に穂ばらみ期、正確には小孢子初期で高く、その時期からはずれるほど小さくなることが知られている(Hayaseら1969)。また穂ばらみ期の抵抗性が前歴、すなわち幼穂形成初期の低温により弱まることも知られている(Satakeら1988)。内島(1976)はポット試験の結果から穂ばらみ期についての冷却量を示したが、ここでは幼穂形成から出穂期までの間

第1表 過去70年間の月別平均気温の変化傾向(℃/10年)(1937~2006年)。

地点	年平均	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
札幌	0.25***	0.40***	0.36***	0.29***	0.26***	0.23***	0.22***	0.04ns	0.04ns	0.24***	0.31***	0.32***	0.33***
旭川	0.17***	0.32**	0.29**	0.26***	0.23**	0.22**	0.15*	-0.05ns	-0.03ns	0.11ns	0.14*	0.26***	0.20ns
八戸	0.17***	0.29***	0.30***	0.24***	0.20**	0.14ns	0.11ns	-0.06ns	-0.04ns	0.17*	0.21***	0.20**	0.26**
盛岡	0.14***	0.24**	0.25**	0.19**	0.20**	0.12*	0.16**	-0.03ns	-0.03ns	0.14*	0.14*	0.10ns	0.24**
仙台	0.21***	0.33***	0.33***	0.27***	0.27***	0.19**	0.14*	-0.02ns	-0.01ns	0.17**	0.28***	0.26***	0.35***
秋田	0.21***	0.28***	0.32***	0.28***	0.27***	0.27***	0.19***	0.02ns	0.06ns	0.23***	0.24***	0.20**	0.26**
酒田	0.21***	0.28***	0.30***	0.25***	0.29***	0.32***	0.22***	0.04ns	0.09ns	0.18**	0.19***	0.16*	0.24**
福島	0.13***	0.13**	0.14**	0.14**	0.14**	0.20***	0.10*	0.07ns	0.11*	0.09*	0.17***	0.15***	0.14**
水戸	0.16***	0.23***	0.24**	0.21**	0.22**	0.18**	0.15*	0.03ns	0.08ns	0.15*	0.17**	0.15*	0.16*
富山	0.19***	0.24**	0.29**	0.26***	0.27***	0.26***	0.14**	0.05ns	0.17**	0.19**	0.22***	0.16*	0.13ns
神戸	0.21***	0.26***	0.29***	0.22**	0.27***	0.25***	0.26***	0.15*	0.17***	0.22**	0.23***	0.20**	0.20**
高知	0.24***	0.27***	0.28**	0.19**	0.26***	0.25***	0.25***	0.23***	0.24***	0.24***	0.25***	0.20**	0.21*
鹿児島	0.35***	0.39***	0.41***	0.31***	0.39***	0.35***	0.30***	0.26***	0.30***	0.34***	0.42***	0.37***	0.38***
平均値	0.20	0.28	0.29	0.24	0.25	0.23	0.18	0.06	0.09	0.19	0.23	0.21	0.24

値は温度と年次間の関係の線形回帰の傾きを10年単位に換算したものを示す。***, **, *:0.1%水準, 1%水準, 5%水準で有意。ns:有意でない。

の日平均気温を用いて、20℃以下では(20-T)、20℃以上では0として日々積算したものを冷却量(℃・日)とし(Shimonoら2005)、植物体が幼穂発達中にどの程度の低温に遭遇するかの指標とした。一般に、冷却量と不稔歩合との関係から不稔歩合を算出するが(内島1976, Shimonoら2005)、不稔歩合と冷却量の関係は直線的ではなく、ある閾値を越えると不稔歩合が極値に張り付いてしまう。またその関係は特定の品種の耐冷性に依存するとともに、幼穂形成期間中の温度以外の要因、例えば、施肥窒素条件(天野・森脇1984)、大気中二酸化炭素濃度(Okadaら2005, Shimonoら2008)、幼穂形成以前の水温(Shimonoら2007a)などの影響を受けることも知られており、将来にわたる客観的な指標としては不稔歩合よりも冷却量そのものが妥当であると考え、本研究では冷却量を冷害強度の指標として示した。

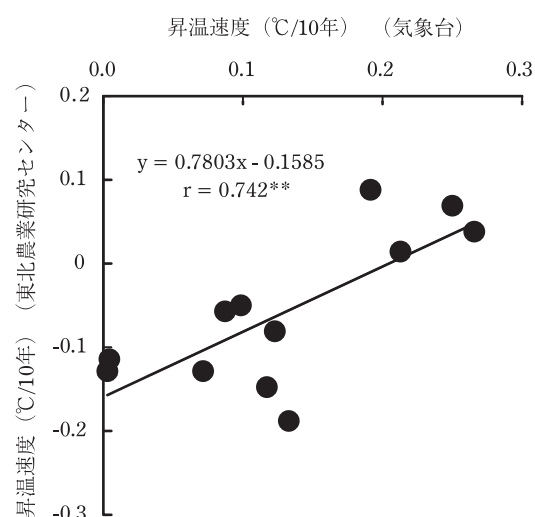
モデルの精度を検証するため、水稻奨励品種決定基本調査成績データベース(1980~2005年)(太田ら2006)の出穂日と収穫指数の各年の平均値を実測値として用いた。実測値の移植日をカバーするため3つの移植日(5/10, 5/15, 5/20)を想定し、盛岡の日平均気温のデータを用いて出穂日と冷却量を予測し、実測値と比較した。

地球温暖化後のイネの収量変動への影響を評価するため、北日本3地点(八戸、盛岡、仙台)について日平均気温のデータ(1991~2007年)を気象庁より取得し、各地の各17年間をベースシナリオとし、それぞれの年次に昇温量を加えたものを将来の気象シナリオとし解析した。

結 果

1. 日本の過去70年間の気温の変化

日本各地の過去70年間の年平均気温は、すべての地点において0.1%水準で有意な増加傾向が認められた(第1

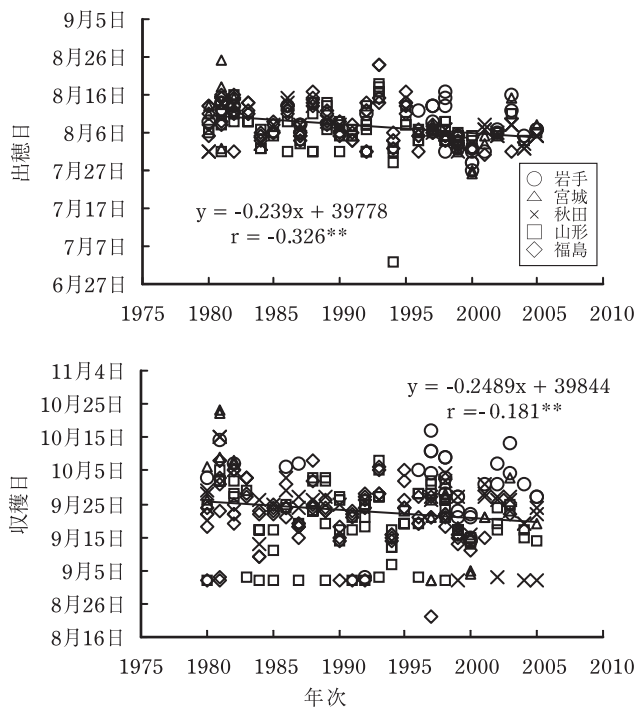


第2図 都市部と農地の昇温速度の比較。

盛岡市の都市部(气象台)と農地(東北農業研究センター)の月平均気温の過去50年間(1957~2006年)の昇温速度(℃/10年)の関係を示した。**:1%水準で有意(n=12)。

表)。その程度はすべての地点を平均すると10年あたり0.2℃となった。しかし、月別に昇温速度をみると、神戸、高知、鹿児島を除くすべての地域で共通し7~8月以外の月では上昇傾向がみられるのに対し、7~8月はその程度が著しく小さく、特に北日本では明確な増加傾向が認められなかった。北日本のイネでは、7月上旬が幼穂分化期、中下旬が減数分裂期、8月上旬が出穂・開花期にあたることから、地球温暖化は冷害の危険性を軽減していないことを示唆した。

この季節間の昇温トレンドへの都市化の影響を評価するため、盛岡の都市部(气象台)と農地(東北農業研究センター)における月別の過去50年間の昇温速度を比較した(第2図)。昇温速度は両地点で密接な関係が認められ、上



第3図 水稻品種ササニシキの出穂日と収穫日の推移。

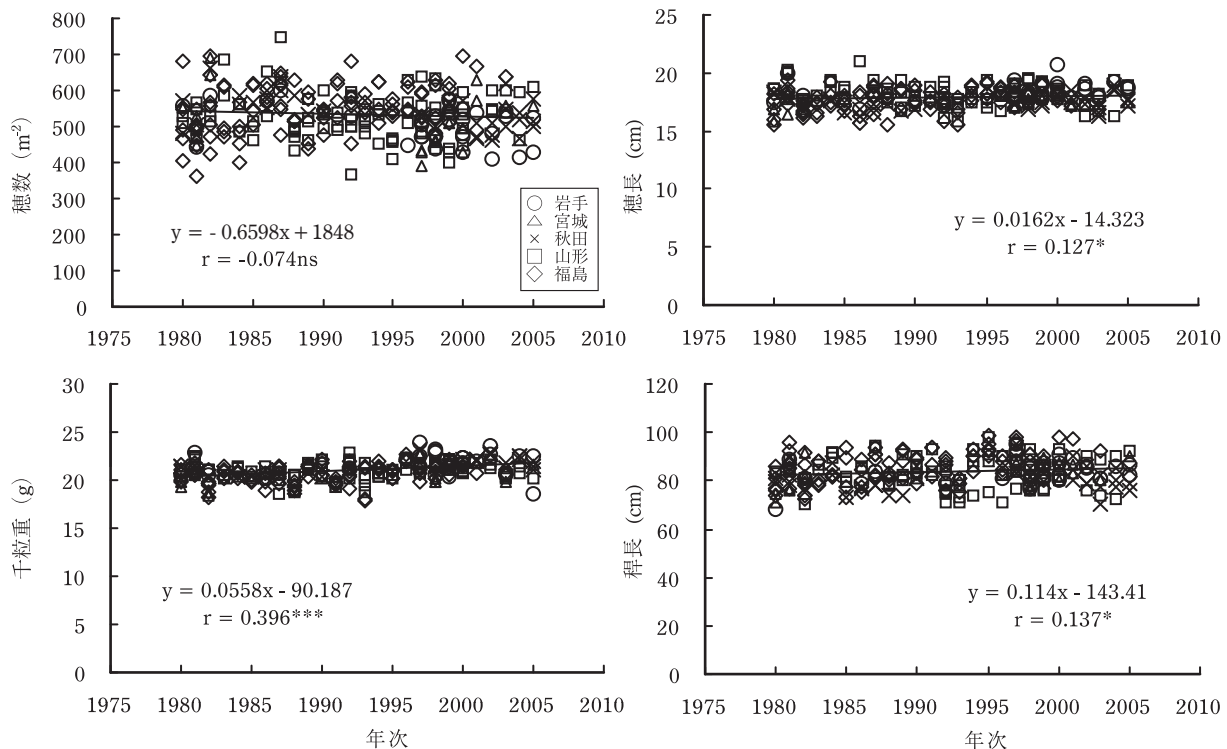
水稻奨励品種決定基本調査成績データベースから1980～2005年(26年間)について移植を5/11～5/20に行い、窒素施肥量を6～9 g m⁻²とした275計測値を抽出した。*: 1%水準で有意。

記の月別に観測された傾向は都市化の影響をあまり受けていない農地でも共通したものであることを確認した。ただし、絶対値をみると、都市部のデータに比べて小さく、都市化の影響を除くと、小さな昇温傾向になることが推察された。

2. 北日本の過去26年間の子実収量の変化

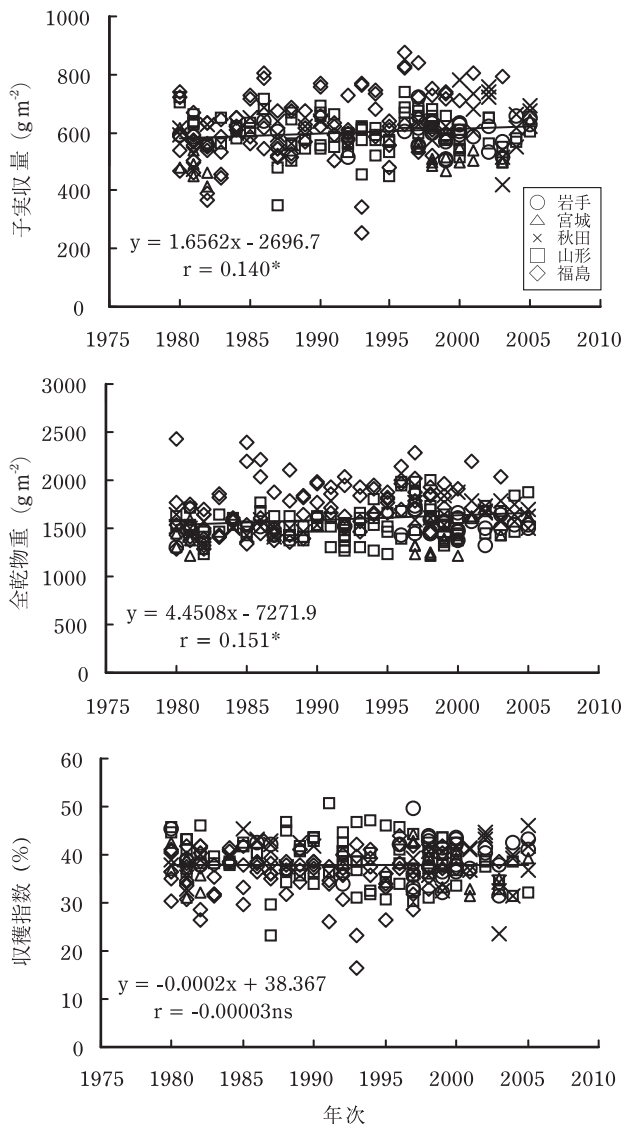
過去の気候変動のコメ生産への影響を厳密に把握するため、同一品種、施肥量、移植期を限定した条件での子実収量の年次変化について検討した。1980年以降、出穂日と収穫日は早くなる傾向が認められ、10年に換算すると2.5日程度早まった(第3図)。穂数には有意ではないものの、やや減少する傾向が認められたが、穂長、千粒重ならびに稈長は明瞭な増加傾向にあった(第4図)。このことは、近年、形態的には、穂数より一穂サイズを大きくする方向に応答していることを示す。

子実収量は年次とともに増加する傾向があり10年換算にすると16 g m⁻²の増収がみられた(第5図)。収量の変動を評価するため、観測された26年を前期(1980～1992年)と後期(1993～2005年)に2分割し評価してみると、平均値では前期から後期にかけて4%増加したものの変動係数は13.5%から15.5%と2.0ポイント増加した(第2表)。全乾物重は子実収量と同様に徐々に増加し、10年で45 g m⁻²の増加がみられた(第5図)。一方、収穫指数には明瞭な変化傾向が認められなかった。変動についてみると、全乾物重の変動係数には大きな変化はみられない



第4図 水稻品種ササニシキの穂数、穂長、千粒重、稈長の推移。

詳細は第3図の脚注参照。***, *: 0.1%, 5%水準でそれぞれ有意。ns: 有意でない。



第5図 水稻品種ササニシキの子実収量, 全乾物重, 収穫指数の推移. 詳細は第3図の脚注参照. *:5%水準で有意. ns:有意でない.

が, 収穫指数の変動係数は前期の11.4%から後期の13.3%に1.9ポイントの増加が認められた(第2表). すなわち, 近年の気候変化により収量水準は全乾物重の増加を介して増加したものの, 収穫指数の変動を介して収量水準の安定性がやや低下したことを示す.

3. 将来の地球温暖化が冷害危険度に及ぼす影響

将来の気象条件の影響を検討するためモデルを使った解析を行う. まずモデルの正確さを評価するため実測した出

穂日と収穫指数について評価した. 出穂日の実測値は7月29日から8月18日の範囲で変異がみられるが, その変異をモデルで2.6日(偏差平方和)の誤差で再現できた(第6図a). 収穫指数の実測値は33~41%までの変異がみられたが, 冷却量との間で負の関係がみられた(第6図b). 本モデルを用いて将来の気象条件での冷害の危険性を以下の2つのシナリオについて評価した. シナリオ1はベースシナリオである過去17年間(1991~2007年)の各年の日平均気温に全生育期間(春と夏を通じて)を1~3℃昇温させた場合とし, シナリオ2は第1表の実際の傾向に基づき, 春(5~6月)は1~3℃昇温するが夏(7~8月)は昇温しない場合とした. すなわち過去17年間の気温推移をベースとし, 各シナリオの昇温量をプラスすることで気象シナリオを作成し解析した.

幼穂形成期までの日数をみると, シナリオ1と2ともに, ほぼ同程度, 短縮した(シナリオ1で4.1日/℃, シナリオ2で3.9日/℃)(第7図a). 一方, 幼穂形成から出穂までの間の日数は, シナリオ1ではやや短縮し(0.8日/℃), シナリオ2ではやや延長した(0.9日/℃)(第7図b). 幼穂発達中にイネが低温にさらされる程度の指標である冷却量は, シナリオ1では1℃上昇で現在より23%低下することが予測されたが, シナリオ2では逆に1℃の上昇で16%の増加が予測された(第7図c).

考 察

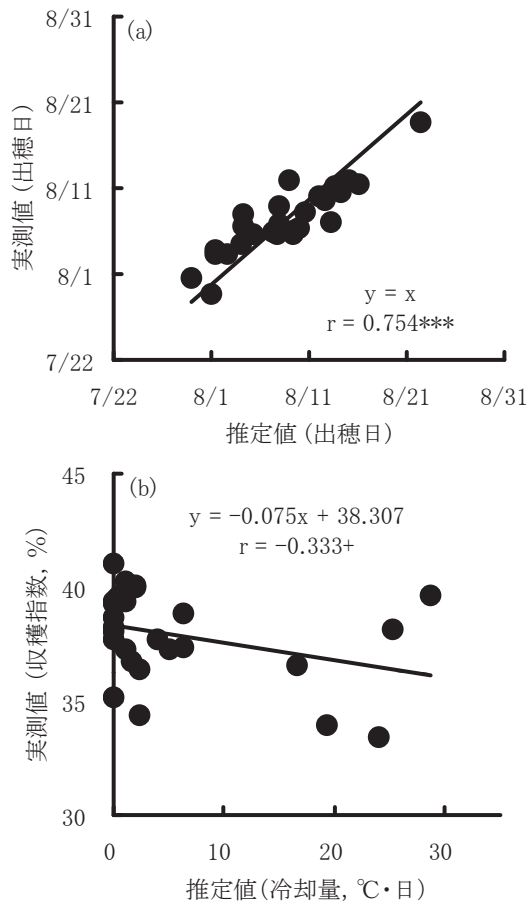
1. 気温傾向

将来の地球温暖化条件での北日本のコメ生産を占う上で, 将来の気温の変化傾向を正確に把握することは極めて重要である. 本研究において全国12地点の気象庁のデータを用いて解析したところ, 北日本では夏の気温の上昇程度が小さいことを示した(第1表). この傾向は都市化の影響をあまり受けていない農地においても同様に認められ, 季節間の昇温程度の違いが都市化の影響ではないことを示した(第2図). Kuriharaら(2005)は気候モデルを用いた予測において今後100年間で夏の昇温が他の季節に比べて小さいことを予測している. 遠藤ら(2007)は東北地方の冷害発生の一つの原因である「やませ」の2090年における発生程度を予測し, 「やませ」の発生程度は現在とはほぼ同程度みられると予測している. また, 第2図に示したように都市化の影響を受けていない農地では都市部より昇温程度が小さいため(Sameshimaら2007), 将来予測される夏の昇温はさらに小さいことが推察された. 以上,

第2表 品種ササニシキの収量とその変動要因.

時期	子実収量 (g m ⁻²)	全乾物重 (g m ⁻²)	収穫指数 (%)	穂数 (m ⁻²)	穂長 (cm)	稈長 (cm)	千粒重 (g)
前期	592 (13.5)	1561 (13.9)	38.2 (11.4)	541 (12.7)	17.8 (5.8)	82.8 (7.3)	20.6 (4.5)
後期	613 (15.5)	1628 (13.3)	37.9 (13.3)	526 (11.7)	18.0 (4.7)	84.6 (7.4)	21.4 (4.7)
相対値	1.04	1.04	0.99	0.97	1.01	1.02	1.04

括弧内は変動係数(%)を示す. 前期, 1980~1992; 後期, 1993~2005. 相対値=後期/前期.



第6図 モデル精度の評価。

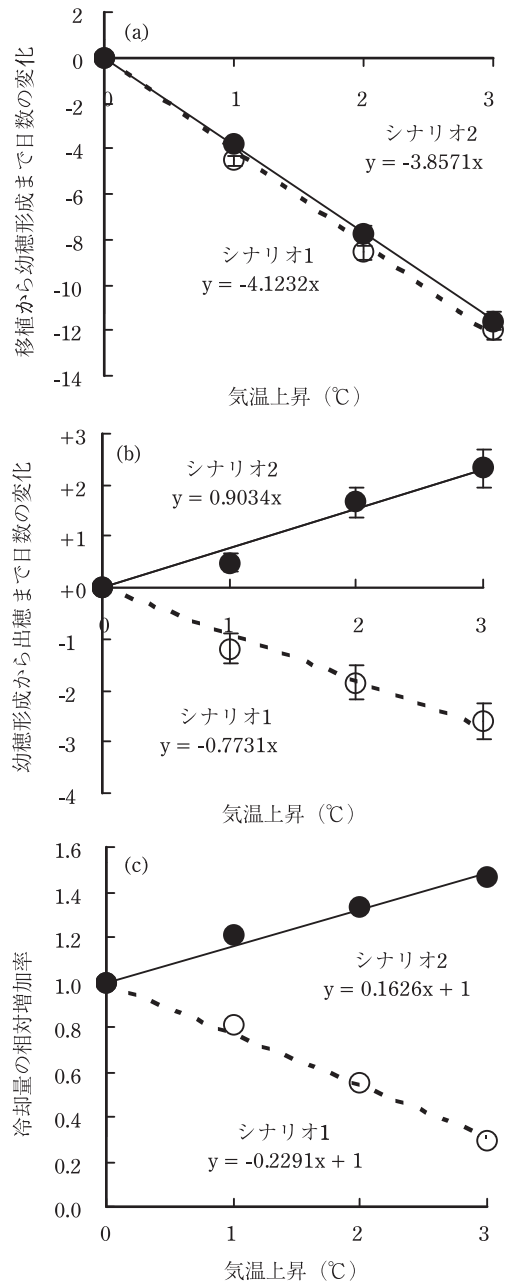
(a) 出穂日の実測値と推定値の関係。(b) 収穫指数実測値と冷却量の関係。

***, +; 0.1%, 10%水準でそれぞれ有意 (n = 16)。

地球温暖化は北日本の冷害発生に強く関わる夏の気温を他の季節に比べ大きく上昇させないことが示唆された。

2. 冷害被害

地球温暖化が寒冷地・北日本のコメ生産に与える影響を予測するには、収量の最大の変動要因である冷害の被害予測が極めて重要である。予測手段の一つとして一定期間の平均値を用いた解析方法がある (林ら 2001)。しかし、冷害被害を予測する場合、例え全期間の平均値が高くても一時的な低温で回復不能な被害を受けることから (Hayase ら 1969, Satake 1976)、冷害被害の評価には適さない。一方、本研究でも用いている生育モデルを用いた手法は日々の気象変化の影響を发育ステージを考慮しながら捉えることができる有効な手法である。しかし、既存の生育モデルを用いた解析では収量変動に着目せず、平均的な気象条件での潜在収量の変化に焦点をおいた解析となっている (Horie ら 1995, Nakagawa ら 2003, Easterling ら 2007)。本研究では、特に北日本の収量変動に着目し、現在進行している春のみの昇温が続いたとした場合 (シナリオ2)、わずか1°Cの春の気温の上昇で冷害危険度を16%増加させることを



第7図 地球温暖化がイネの (a) 移植から幼穂形成までの日数, (b) 幼穂形成から出穂まで日数, (c) 冷却量の相対増加率に及ぼす影響。

シナリオ1 = 「春夏ともに昇温」; シナリオ2 = 「春のみ昇温」。すなわち横軸の気温上昇はシナリオ1では春夏の昇温程度、シナリオ2では春のみの昇温程度を示す。(a) (b); 値は51予測値 (3地点 (八戸, 盛岡, 仙台) の17年間 (1991~2007年)) の平均値とし、棒線は標準誤差を示す。(c); 値はベースシナリオでの計算値 (x軸) と2つのシナリオで算出した計算値 (y軸) の関係の回帰直線の傾きを示す。

予測した (第7図c)。この予測は、観測された過去の実測収量の推移において、現在までの間に地球温暖化が進んでいるにも関わらず、収量変動が低下していない事実 (第5図, 第2表) から支持されるものと考えられた。すなわち、将来の季節間の気温変動が過去の変動と同じであり将

来も「春のみの昇温」が続いたと仮定すると、品種・作期の選定を適切に適応させなければ、冷害危険度を増し収量変動を大きくする危険性を予測した。

冷害被害を考える上で、冷害強度の直接的影響に加え、気候変化が穂ばらみ期耐冷性（以下、耐冷性）に及ぼす影響についても検討する必要がある。まず、植物の成長において考慮しなければならないのが、地球温暖化の原因物質の一つである大気中の二酸化炭素濃度の影響である。大気二酸化炭素の上昇は C_3 植物であるイネの光合成を促進し、現在より $200 \mu\text{mol mol}^{-1}$ の増加で約 10~20% の収量の増加が環境ストレスのない条件では予測されている（Kim ら 2003, Yang ら 2006, Shimono ら 2008）。しかしながら、最近、高濃度二酸化炭素は耐冷性を弱め、冷害被害を助長することが報告されており（Okada ら 2005, Shimono ら 2008）、今後さらに上昇が予測される二酸化炭素濃度は冷害の危険性を増加させると考えられる。また、施肥窒素条件も冷害発生の危険性に強く関わる大きな要因である。多窒素施用は植物体の窒素濃度を高め、因果関係は不明であるが、耐冷性を弱めることが知られている（天野・森脇 1984）。現在、進行している春の昇温は成長を促進するとともに、土壌の微生物などの活動も活発にし無機化を促すことが考えられる（Hasegawa and Horie 1994）。気温の上昇幅ほど地温は上昇しないものの、Shimono ら（2007b）の試算によると気温 3°C の上昇で水温が 1°C 程度上昇することが予測されている。その一方、幼穂形成以前の高水温が耐冷性を高めることが最近明らかにされており（Shimono ら 2007a）、この点からは逆に地球温暖化は耐冷性にプラスに働くことが予測される。これら 3 つの要素への影響またそれらの相互作用については未だ不明な点が多く、将来予測される地球温暖化環境での耐冷性への影響について、品種による応答の差異にも注目した研究が期待される。

3. 乾物生産

低温により生育可能日数が制限されている北日本で収量水準を高めるためには、乾物生産の促進が極めて重要である。本研究により過去 26 年間の収量の増加は乾物生産の増加が強く関わっていることを示した（第 5 図、第 2 表）。この間、二酸化炭素濃度は $36 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 上昇しており（IPCC 2007）、既存の二酸化炭素付加試験の結果（Kim ら 2003, Yang ら 2006, Shimono ら 2008）からは穂数の増加が期待された。しかしながら、穂数の増加はみられず、むしろ稈長が長くなり、穂のサイズも大きくなっていた（第 4 図、第 2 表）。このことは二酸化炭素濃度上昇の直接的効果が小さいことを示唆する。河津ら（2007）は、過去の試験データから試算した気象変動による収量増加は過去 30 年間で 19% であったものの、そのうち二酸化炭素上昇による増加は 2.5 ポイントに過ぎないとしている。すなわち、近年の乾物生産の促進（第 5 図、第 2 表）には春の昇温（第 1 表）が大きく寄与したことが示唆された。松島ら（1964）はポッ

ト栽培したイネを用いた試験で、栄養成長期（活着期～分けつ初期、分けつ盛期）の高温（ 31°C 、特に高水温）が穂数よりもむしろ一穂粒数を増加させた結果、全穂重を増加させることを報告し、本報告で示した過去の傾向（第 5 図、第 2 表）と一致した。しかし、ポット栽培条件では根圏が物理的に制限され地温も圃場条件とは大きく異なるため、正確な収量応答を検討するため圃場条件での比較が必須である。これまで、生育期間を通じた温度上昇が乾物生産に与える影響を圃場条件で評価した試験は数例あるものの（金ら 1996, Nakagawa ら 2003, Ohe ら 2007）、異なる生育時期の温度上昇の影響を検討した例はない。今後のさらなる春の昇温がさらに一穂サイズを大きくさせるかについては窒素の無機化影響も含め、群落かつ圃場条件で総合的に検討する必要がある。

以上、不確実性を多く含む将来の気候において、北日本のコメの生産性をさらに増加させるためには、予測される気候にあわせた栽培法の適応ならびに新たな品種選抜基準の確立が極めて重要となる。特に幼穂形成期間中の低温による障害型冷害の被害軽減と乾物生産の促進について解析する必要があると考えられた。

謝辞： 水稻奨励品種決定基本調査成績データベースは宮城県古川農業試験場永野邦明氏からご紹介いただいた。発育モデルは東北農業研究センターの神田英司氏からご教示いただいた。使用した気象データの一部は東北農業研究センターの菅野洋光・佐々木華織両氏からご提供いただいた。本原稿は岩手大学の黒田榮喜教授にご校閲頂いた。審査いただいた査読者からの確かな指摘を頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表する。

引用文献

- 天野高久・森脇良三郎 1984. 水稻の冷害に関する栽培学的研究. 第3報 穂孕期不稔に対する堆肥施用の効果. 日作紀 53 : 7-11.
- Easterling, W.E., P.K. Aggarwal, P. Batima, K.M. Brander, L. Erda, S.M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J.F. Soussana, J. Schmidhuber and F. N. Tubiello 2007. Food, fiber and forest products. In Parry M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Linden van der and C.E. Hanson eds., *Climate Change 2007 : Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge. 273-313.
- 遠藤洋和・蒔苗仁・森浩俊・倉橋永・栗原和夫 2007. 20 km 格子地域気候モデルによるヤマセ型低温の再現性と将来予測. 日本農業気象学会東北支部創立 50 周年記念文集 : 53-58.
- Hasegawa, T. and T. Horie 1994. A simplified model for estimating nitrogen mineralization in paddy soil. *Jpn. J. Crop Sci.* 63 : 496-501.
- Hayase, H., T. Satake, I. Nishiyama and N. Ito 1969. Male sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage in rice plants. II. The most sensitive stage to cooling and the fertilizing ability of pistils. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*. 38 : 706-711.
- 林陽生・石郷岡泰史・横沢正幸・鳥谷均・後藤慎吉 2001. 地球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 2

- : 141–148.
- Horie, T., H. Nakagawa, M. Ohnishi and J. Nakano 1995. Rice production in Japan under current and future climates. In Matthews R.B., M.J. Kropff, D. Bachelet and H.H. van Laar, eds. Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. CAB International, Oxon. 143–164.
- IPCC 2007. Summary for Policy makers. In Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z.J. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds. Climate Change 2007 : The physical science basis. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge. 1–18.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2000. 水稻における葉の形成過程を考慮した主稈葉齢予測モデル. 日作紀 69 : 540–546.
- 神田英司・鳥越洋一・小林隆 2002. 有効積算気温を用いた簡易モデルの穂の発育ステージ予測への適応. 日作紀 71 : 394–402.
- Kanno, H 2004. Five-year cycle of north-south pressure difference as an index of summer weather in northern Japan from 1982 onwards. J. Meteorol. Soc. Jpn. 82 : 711–724.
- 河津俊作・本間香貴・堀江武・白岩立彦 2007. 近年の日本における稲作気象の変化とその水稻収量・外観品質への影響. 日作紀 76 : 423–432.
- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996. 高温・高 CO₂ 濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 第2報 収量および収量構成要素について. 日作紀 65 : 644–651.
- Kim, H.Y., M. Lieffering, K. Kobayashi, M. Okada, M. W. Mitchell and M. Gumpertz 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. Field Crops Res. 83 : 261–270.
- 気象庁 2007. 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2007/7/14閲覧)
- Kurihara, K., K. Ishihara, H. Sasaki, Y. Fukuyama, H. Saitou, I. Takayabu, K. Murazaki, Y. Sato, S. Yukimoto and A. Noda 2005. Projection of climatic change over Japan due to global warming by high-resolution regional climate model in MRI. SOLA 1 : 97–100.
- 松島省三・田中孝幸・星野孝文 1964. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究 第70報 生育各期の気温・水温の各種の組み合わせが水稻の収量および収量構成要素におよぼす影響. 日作紀 33 : 53–58.
- Matsui, T., O.S. Namuco, L.H. Ziska and T. Horie 1997. Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. Field Crops Res. 51 : 213–219.
- Nakagawa, H., T. Horie and T. Matsui 2003. Effects of climate change on rice production and adaptive technologies. In Mew, T.W., D.S. Brar, S. Peng, D. Dawe and B. Hardy eds. Rice Science : Innovations and Impact for Livelihood. International Rice Research Institute, Manila. 635–658.
- Ohe, I., K. Saitoh and T. Kuroda 2007. Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. Plant Prod. Sci. 10 : 412–422.
- 太田久稔・清水博之・黒木慎・片岡知守・中込弘二・重宗明子・飯田修一・松下景・田村克徳 2006. 水稻奨励品種決定基本調査成績データベース (1980–2005). データ収録 CD-ROM (2006/10版). 農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所稲育種研究室.
- Okada, M., H. Shimono, Y. Yamakawa, M. Inoue and K. Kobayashi 2005. Effects of elevated CO₂ on floral sterility of rice plants caused by low temperature. J. Agr. Met. 60 : 589–592.
- Sameshima, R., T. Hirota, T. Hamasaki and S. Suzuki 2007. Temperature trends at the national agricultural research center for Hokkaido region in the 40 years from 1966 to 2005. J. Agr. Met. 63 : 95–102.
- Satake, T. 1976. Determination of the most sensitive stage to sterility-type cool injury in rice plants. Res. Bull. Hokkaido Nat. Agric. Exp. Stn. 113 : 1–44.
- Satake, T., S. Y. Lee, S. Koike and K. Kariya 1988. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practices-effects of the temperature and depth of water before the critical stage. Jpn. J. Crop Sci. 57 : 234–241.
- Shimono, H., T. Hasegawa, M. Moriyama, S. Fujimura and T. Nagata 2005. Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice. Agron. J. 97 : 1524–1536.
- Shimono, H., M. Okada, E. Kanda and I. Arakawa 2007a. Low temperature-induced sterility in rice : Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. Field Crops Res. 101 : 221–231.
- Shimono, H., T. Hasegawa, T. Kuwagata and K. Iwama 2007b. Modeling the effects of water temperature on rice growth and yield under a cool climate : II. Model application. Agron. J. 99 : 1338–1344.
- Shimono, H., M. Okada, Y. Yamakawa, H. Nakamura, K. Kobayashi and T. Hasegawa 2008. Rice yield enhancement by elevated CO₂ is reduced in cool weather. Global Change Biol. 14 : 276–284.
- 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 : 199–202.
- Yang, L., J. Huang, H. Yang, J. Zhu, H. Liu, G. Dong, G. Liu, Y. Han and Y. Wang 2006. The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and N supply on yield formation of rice crops with large panicle. Field Crops Res. 98 : 141–150.

Impact of Global Warming on Yield Fluctuation in Rice in the Northern Part of Japan : Hiroyuki SHIMONO (*Fac. Agric., Iwate Univ. Ueda 3-18-8, Morioka 020-8550, Japan*)

Abstract : Accurate prediction of rice yield under the future climate is a critical factor for future food security. I evaluated the impact of global warming on rice yield fluctuation especially in cool climates using (1) air temperature trend, (2) rice yield trend and (3) a simple model. Annual averaged air temperature has been rising at a rate of 0.2°C per 10 years, but the magnitude differed with the season. The increase in air temperature in summer tended to be slight especially in the northern part of Japan. Yield of rice cultivar, Sasanishiki grown under identical management practices, was increasing at a rate of 16 g m⁻² per 10 years, but yearly fluctuation tended to increase in recent years. The impact of further global warming on the cooling-degree day, that is, the chance of coldness in the panicle formation stage, was estimated under two climate scenarios. Under scenario 1 (air temperature rises uniformly over the season), the chance of coldness in the panicle formation stage was reduced similar to previous predictions, but under scenario 2 (air temperature rises only in spring), the change was expected to increase by 16% per 1°C rise. The trend of recent temperature increase in spring may increase the risk for cold damage in rice in the northern part of Japan, suggesting the necessity of selecting suitable varieties and planting season.

Key words : Cold damage, Dry matter production, Global warming, Harvest index, Rice, Simulation model, Spikelet sterility, Yield prediction.
