

収量予測・情報処理・環境

近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量・外観品質への影響

河津俊作・本間香貴・堀江武・白岩立彦

(京都大学大学院農学研究科)

要旨：近年わが国では夏期の気温が上昇傾向にある。こうした高温化傾向に向けた水稲生産の品種および耕種的な対応に資するために、1964年から2003年までに生じた水稲栽培における気象変化を定量化し、それが水稲生産に及ぼした影響を解析した。この40年間で夏期の大気二酸化炭素濃度は45 ppm 上昇し、最高気温は約0.8℃、最低気温は約1.1℃上昇した。またこの期間に品種および作期の変化により関東以西で出穂盛期が1~2週間早期化したが、それにより出穂前の気温は低下し、出穂後の気温と日射量は増加する傾向がみられた。これらによる水稲生産性の増加率は地方によって異なるが、二酸化炭素の増加によるものが2.5%、気候変化によるものが-6.0~3.1%、早期化によるものが-0.5~6.8%であると見積もられた。このうち気候変化については、関西以西において日射量の増加によるプラスの影響が、気温の上昇により打ち消されていたことがわかった。分散分析と重回帰式を用いた分析により、出穂盛期後10から30日までの平均最低気温が1℃上昇することにより一等米比率は平均で3.57%低下し、同期間の日射量が1 MJ 増加することにより2.59%増加することが示された。高温化傾向の対策としては作期の移動だけでは不十分であり、高温耐性品種の育成や施肥法の改善など総合的な対策が収量や品質維持のために必要であると考えられた。

キーワード：一等米比率、気候変化、気象生産力指数、高温化傾向、水稲生産性、早期化、都市化、二酸化炭素濃度。

近年わが国では夏期の気温が高温化傾向にあり、主食である水稲の収量や品質に及ぼす悪影響が懸念されている。実際、この高温にともなって乳白米の割合が増え、一等米比率が低下したと全国各地から報告されており(井上2003, 寺島2003, 月森2003)、気温が上昇すると収量が大きく低下することも実験的に示されている(金ら1996)。こうした夏期の高温化は温暖化ガスの増加との関連が一部に指摘されているが(Houghtonら1990)、その場合この傾向は今後さらに続くことが予想される。したがって、これまでに生じた稲作気象環境の変化とそれによる生産性への影響を定量化し、今後の改善方向を示すことが非常に重要であると考えられる。本研究では1964年から2003年までに気象的な変化がわが国の水稲収量に与えた影響を解析することを目的とした。

解析においては以下の点を考慮する必要があると考えられる。

第1に、大気中の二酸化炭素(CO₂)ガス濃度の年平均値はハワイのマウナロアで1964年の314 ppm から2003年の375 ppm と40年間で61 ppm 増加した(WDCGG 2004)。特にここ数年は一年で2 ppm ずつ増加している。CO₂ガスの増加自体は植物体の光合成量を増加させ、生産にとってはプラスの効果がある(Kimball 1983)。しかしこれに気候変化が加わると関係が複雑になり定量化が難しい。

1964年から2003年にかけて日本の年平均気温は約1℃上昇した(気象庁2003)。しかしながら、気温の増加は一

様に起こるわけではなく、都市部で大きいこと(都市化による気温上昇)、冬期および夜間で大きいことが知られている(Kato 1996)。水稲は農村部で主に生産され、またその生産性には平均気温よりも最高・最低気温や日較差などの影響が大きい(山本1954)。したがって水稲生産性への影響を解析するためには、気温の長期的な変化から都市化による影響を取り除き、水稲栽培期間の最高・最低気温を解析に用いる必要がある。

さらに、1964年から2003年の間でわが国の農業は、機械化が進んだ。また施肥法などの栽培技術の改善により、1964年の396 kg/10 a から469 kg/10 a へ水稲収量が増加した。稲作の栽培気象的な面から言うと、水田裏作の縮小および保温育苗と稚苗の機械移植により、作期が早期化したことが挙げられる(佐本1966)。したがって稲作栽培環境の変化を解析する際には作期の変化を考慮する必要がある。またそうした変化が水稲の生産性に与えた影響を解析するためには技術の効果を考慮した上で気象要因によって決まる生産力を評価する必要がある。

わが国では、水の供給が水稲収量の制限要因になることは少なく、水稲生産性は主に受光日射量によって決まる(村田1964)。気温が低くなると生育の抑制や遅延などが生じ、冷害の危険性が高まる(和田ら1972)。温度が高くなりすぎても呼吸量などが増大し(松島・角田1956)、高温不稔の確率も増加する。村田(1964)は平均気温の二次関数と日射量の積により水稲の気象生産力指数を定義し、8, 9

月の平均気温と日射量を用いて水稲収量の都道府県間差を説明できることを示した。

以上をふまえ、本研究では気象データから Kato (1996) の方法に準じて都市化による昇温を除去し、作物統計(農林水産省 1964-2003)から作期の移動を考慮しながら、農村部の稲作気象環境における気温変化を計算した。気温と日射によって決まる水稲の気象生産力指数については、村田(1964)が結論として用いた8, 9月の平均気温と日射量ではなく、水稲の出穂期前後の気象について再検討を行い、その適用を試みた。CO₂の増加による効果も文献から推定し、これらの各要素と県別の平均収量および外観品質(一等米比率)との関係を統計的に検討した。

材料と方法

1. 使用データ

気温データから都市化による昇温を取り除く際の計算に用いた気温月別値は、中央気象台月報(中央気象台 1904-1956)および気象庁月報(気象庁 1956-2003)によるものを用いた。その他 1964 年からの気温変化の計算などには地上気象観測時日別データ(気象庁 1964-2003)を用いた。いずれも都道府県の中から都道府県庁所在地かそれに準ずる代表地点を 1 地点選び、そこでの気象値を都道府県の値とした。日射量データがない場合は、日照時間から近藤ら(1991)の方法に従って推定した。代表地点の人口は国勢調査(総務省 2000)によった。

水稲の収量および一等米比率と、移植・出穂盛期のデータは作物統計(農林水産省 1964-2003)を用いた。

本研究では解析は都道府県単位で行ったが、全国を北海道・東北、関東、中部、近畿、中国・四国、九州の 6 地方に区分し、解析値を地方別の平均値として示した。なお、山梨県と三重県は中部地方に入れた。

2. 気温データからの都市化による昇温の除去

気象台は主に都市部にあり、観測される気温の長期的な変化には気候変化によるものだけでなく都市化によるものも含まれている(Houghtonら 1990, Kellogg 1991)。わが国の主要な水稲生産地は農村部に存在するため、稲作気象環境の変化を定量化する際に気象台の気温データをそのまま利用すると、気温の変化量を過大評価する可能性がある。そこで Kato (1996) の方法を参考に、気象台で観測される気温の長期的な変化から都市化による影響を取り除いた。

ある地点(a)のある月(b)におけるある項目(c:平均, 最高または最低気温)の気温(T_{abc})の上昇率(RM_{abc})は、年(y)に対する回帰により求めた。

$$T_{abc} = RM_{abc} \times y + \beta_{abc} \quad (1)$$

ただしβ_{abc}は回帰係数。T_{abc}として1920年からの月別値(平均, 最高および最低気温の月平均値)を用いた。

RM_{abc}は気候変化による上昇率(RC_{bc})と都市化による上昇率(RU_{abc})の和で表される。RC_{bc}には地点間差があ

るといわれているが、ここでは地点に依存しないものと仮定した。

$$RM_{abc} = RC_{bc} + RU_{abc} \quad (2)$$

b月の気温項目cについてのRM_{abc}が人口(P_a)の常用対数値に対して回帰できるとすると

$$RM_{abc} = K_{bc} \times \log_{10} P_a + L_{bc} \quad (3)$$

ただしK_{bc}, L_{bc}は回帰係数。

Kato (1996)は人口5万人以下の都市において都市化による昇温がほとんど無いと仮定できると報告している。つまり第3式にP_a=50000を代入して求めたRM_{abc}はRC_{bc}と等しく、b月における気温項目cの気候変化による上昇率を示す。つまり

$$RC_{bc} = K_{bc} \times \log_{10} 50000 + L_{bc} \quad (4)$$

従って第2式より都市化による気温上昇率は

$$RU_{abc} = RM_{abc} - (K_{bc} \times \log_{10} 50000 + L_{bc}) \quad (5)$$

気温日別値から次式により都市化の影響を除去した項目別気温(TC_{abc})を算出し、以下の解析に用いた。

$$TC_{abc} = T_{abc} - RU_{abc} \times (y - 1920) \quad (6)$$

3. 稲作気象環境の変化の定量化

水稲の生産性および品質には、出穂前後の温度と日射環境が大きく影響している(村田 1964, 寺島ら 2001)。その期間の気象は長期的な気候の変化による影響だけでなく、作期の早期化による出穂期の変化の影響も受ける。ここでは出穂盛期前 30 日間および出穂盛期後 30 日間の気象における 1994-2003 年の平均値(W₁)と 1964 年-1973 年の平均値(W₂)の差により、この期間のある地点(a)における気象の変化(C_a)を評価した。また、次式により稲作気象環境の変化を気候の変化によるもの(C_i)と早期化によるもの(E_r)とに分けて解析を行った。

$$C_a = W_1 - W_2 = C_i + E_r = (W_1 - W_1') + (W_1' - W_2) \quad (7)$$

ただしW₁'はW₂と同一暦日における(水稲の出穂盛期が 1964-1973 年から変わらないと仮定した場合の) 1994-2003 年の気象平均値である。

4. 気象と都道府県別水稲収量の関係の定量化

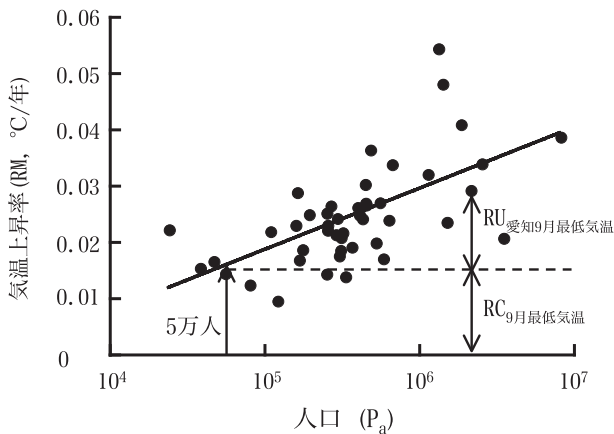
気象と都道府県別水稲収量の関係を定量化する際には、村田(1964)による気象生産力指数を応用した。村田(1964)は 1957-1961 年の都道府県別収量(Y)を 8, 9 月の平均日射量(Sn)で除した値は 8, 9 月の平均気温(T)で 2 次回帰できるとし、この関係を温度生産力指数(f(T))と定義した。

$$Y/Sn = f(T) = d_1(T - d_2)^2 + d_3 \quad (8)$$

d₁, d₂, d₃は回帰係数。さらに村田(1964)はこのf(T)にSnを乗じることで気象生産力指数(Y_w)を定義した。

$$Y_w = Sn \times f(T) \quad (9)$$

このY_wはある時代(村田の場合は 1957-1961 年)の平均的技術条件下・CO₂条件下で気温・日射から決まるものである。つまり、平均的技術条件やCO₂濃度が異なれば気



第1図 1904-2002年における9月の最低気温の上昇率 ($RM_{a,9月最低気温}$) と人口 (P_a) との関係。人口が5万人以下の地点では都市化による昇温はほとんどないと考えられることから (Kato 1996), 人口5万人における気温上昇率を気候変化による昇温率 ($RC_{9月最低気温}$) とし, ある地点 (a) における都市化による昇温率 ($RU_{a,9月最低気温}$) を $RM_{a,9月最低気温} - RC_{9月最低気温}$ によって求めた。図中には愛知の場合を例示した。

象条件が同じでも Y_w は変化する。

本研究では気象生産力指数について, 出穂盛期前後の気象値での適用を試みた。つまり8, 9月の平均気温と日射量ではなく, 出穂盛期 +e 日から30日間の気温 ($T_{c,e,e+30}$: 平均気温, 平均最高気温あるいは平均最低気温) と平均日射量 ($Sn_{e,e+30}$) をもちいて解析を行った。

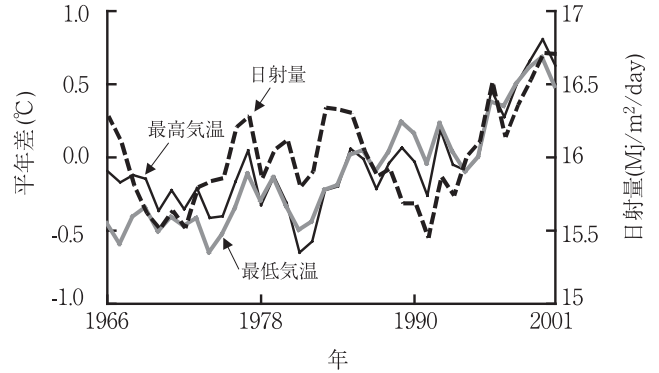
$$Y_w = Sn_{e,e+30} (d_1' (T_{c,e,e+30} - d_2')^2 + d_3') \quad (10)$$

5. 大気中 CO_2 濃度と水稲相対収量の関係

大気中 CO_2 濃度変化が水稲の収量に与える影響については様々な報告が行われている (中川・堀江 2001, Kim ら 2003)。ここでは長期的な CO_2 濃度変化に対する反応を群落状態で調べた7つの実験 (Allen ら 1995, 金ら 1996, Ziska ら 1997, 上田ら 2000, Huang ら 2002, Kim ら 2003, Baker 2004) を選択し, 大気中 CO_2 濃度に対する水稲収量の反応性 (E_{CO_2}) を解析した。その際, 大気中 CO_2 濃度が 353 ppm の時の水稲収量を1とし, 実験結果を相対収量で表した。

6. 気象と一等米比率の関係の定量化

都道府県別にみた一等米比率 (Q) と, ある時期の気温 ($T_{c,e,e+20}$) および日射量 ($Sn_{e,e+20}$) の関係について検討した (e: 出穂盛期後日数)。 $T_{c,e,e+20}$ と $Sn_{e,e+20}$ を階級値に区切り, その値を用いて Q に関して分散分析を行った。 $T_{c,e,e+20}$ と $Sn_{e,e+20}$ の Q に対する効果の有意水準が一番高かったものを説明変数, Q を目的変数として重回帰式を求め, それにより一等米比率期待値 (Q_{ex}) として定量化した。



第2図 わが国のこの40年 (1964-2003) で見られた6-8月の最高気温年平均偏差, 最低気温年平均偏差と平均日射量の推移。ただし5年移動平均とし, 気温データは都市化の影響を除去して算出した。気温平年値は1974-2003年の各都道府県の平年値とした。

結 果

1. わが国でこの40年間に見られた稲作気象環境の変化

(1) 気温データからの都市化による昇温の除去

9月の最低気温を例にして, 1904年から2002年における気温上昇率 ($RM_{a,9月最低気温}$) と2000年における人口 (P_a) の関係を第1図に示した。ばらつきがあるものの P_a が多くなるにつれ $RM_{a,9月最低気温}$ が大きくなり, 都市化の影響と考えられる。 P_a の対数値に対して $RM_{a,9月最低気温}$ の回帰直線を求め, $P_a = 50000$ における $RM_{a,9月最低気温}$ を気候変化による気温上昇率 ($RC_{9月最低気温}$) とし, 残差を都市化による気温上昇率 ($RU_{a,9月最低気温}$) とした。例えば第1図に示した愛知の9月の最低気温の上昇率 $0.029^\circ C / 年$ の場合, 都市化による上昇率 $0.015^\circ C / 年$ と気候変化による上昇率 $0.014^\circ C / 年$ に分けられる。以上のようにして回帰直線を月および平均, 最高および最低気温別に求め, 各都道府県の都市化による気温の上昇率を求め, 気温日別値から都市化の影響を除去した。

(2) 水稲生育盛期である6~8月の稲作気象環境の変化

都市化の影響を取り除いたデータを用いて, この約40年間のわが国における6~8月の気温年平均偏差と日平均日射量の推移を第2図に示した。1966年から2001年で最高気温は約 $0.8^\circ C$, 最低気温は約 $1.1^\circ C$ 増加しており, 特に1980年以降に顕著な増加が見られた。日平均日射量は約 $0.5 \text{ MJ} / \text{m}^2 / \text{day}$ 増加しており, 1970年代前半と1990年代前半に低下する時期が見られた。1991年から2001年までは日射量は約 $1.3 \text{ MJ} / \text{m}^2 / \text{day}$ 増加していた。ハワイのマウナロアにおける6~8月の大気中 CO_2 濃度はこの40年間で1964-1973年の322 ppm から1994-2003年の367 ppm へ45 ppm 増加していた。

(3) 水稲作期の変化と稲作気象環境への影響

この40年間の水稲播種盛期, 移植盛期, 出穂盛期, 成

第1表 1964-1973年と1994-2003年の地方別にみた播種, 移植, 出穂および成熟盛期と播種盛期から出穂盛期までの日数.

	播種盛期		移植盛期		出穂盛期		成熟盛期		播種から出穂までの日数	
	1964-	1994-	1964-	1994-	1964-	1994-	1964-	1994-	1964-	1994-
	1973年	2003年	1973年	2003年	1973年	2003年	1973年	2003年	1973年	2003年
北海道・東北	4/14	4/13	5/22	5/13	8/5	8/2	9/26	9/27	114	112
関東	4/22	4/25	6/3	5/20	8/15	8/7	10/4	9/23	115	104
中部	4/18	4/16	5/27	5/11	8/11	8/4	9/26	9/18	115	110
近畿	4/27	4/28	6/8	5/24	8/23	8/9	10/14	9/23	119	104
中国・四国	5/2	4/30	6/10	5/25	8/23	8/11	10/11	9/22	113	103
九州	5/16	5/12	6/20	6/8	8/31	8/20	10/19	10/6	107	100

第2表 この40年間で見られた最低気温・日射量の地方別平均値の変化. 1964-1973年の平均値と1994-2003年の平均値を出穂前30日間と出穂後30日間とで比較した.

	最低気温 (°C)					日射量 (Mj/m ² /day)				
	1964-	1994-	増減	内訳		1964-	1994-	増減	内訳	
	1973年	2003年		早期化	気候変化	1973年	2003年		早期化	気候変化
出穂前30日間										
北海道・東北	19.0	19.4	0.4	-0.4	0.8	16.4	16.6	0.2	-0.1	0.4
関東	22.0	22.3	0.4	-0.1	0.4	16.9	17.6	0.7	0.4	0.3
中部	21.4	22.0	0.6	-0.1	0.7	18.5	18.6	0.1	-0.1	0.1
近畿	23.1	23.5	0.3	-0.3	0.6	16.7	18.5	1.8	0.2	1.6
中国・四国	23.3	23.5	0.2	-0.4	0.7	18.6	19.6	1.0	-0.1	1.1
九州	23.0	24.0	1.0	0.3	0.7	17.4	19.2	1.8	0.8	0.9
出穂後30日間										
北海道・東北	19.0	20.0	1.0	0.3	0.6	15.3	15.7	0.4	0.3	0.1
関東	20.2	22.0	1.8	0.9	0.9	14.8	16.0	1.3	1.1	0.2
中部	20.3	21.9	1.6	0.8	0.7	16.6	17.9	1.3	1.0	0.3
近畿	20.3	22.7	2.4	1.6	0.8	13.4	16.7	3.3	1.5	1.8
中国・四国	20.6	23.1	2.4	1.4	1.0	15.2	18.1	2.9	1.6	1.3
九州	19.0	21.7	2.7	1.8	0.9	14.2	16.6	2.4	1.0	1.3

熟盛期の変化を第1表に示した. この40年間でどの地方においても播種盛期はほとんど変化していなかったが, 移植盛期は約2週間早くなっていた. 関東以西で出穂盛期, 成熟盛期は約1~2週間早期化していた. 北海道・東北地方は移植が早期化したにもかかわらず, 出穂盛期, 成熟盛期はほとんど変化していなかった. 播種盛期から出穂盛期の日数は1964~73年で107(九州)~119日(近畿), 1994~2003年で100(九州)~110日(中部)となり, この40年で2~15日間減少していた.

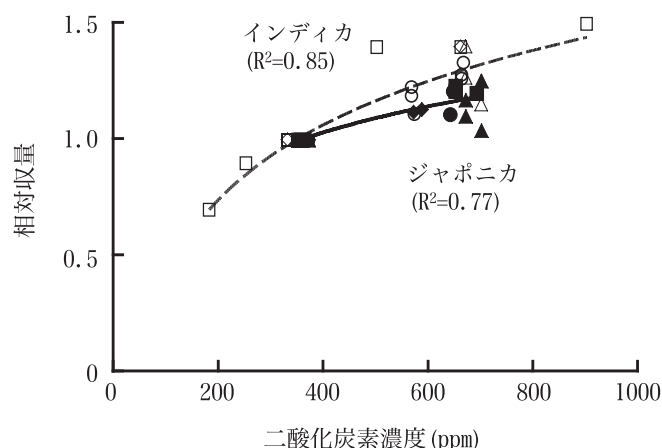
出穂盛期を中心とする気象環境はこの40年間で大きく変化していた(第2表). 平均最低気温と平均日射量はともに増加しており, 増加幅は出穂盛期前30日間より後30日間の方が大きかった. 特に近畿以西における出穂盛期後30日間の変化が顕著であり, 平均最低気温は2.4~2.7°C, 平均日射量は2.4~3.3 Mj/m²/day 上昇した. この変化は気候変化に出穂盛期の早期化による影響が加わったもの

である. 気候変化による影響だけをみると, 前文で述べたのと同様に出穂盛期前後の気温, 日射量は増加する傾向があり, 特に近畿以西では日射量が大きく上昇していた. 一方, 出穂盛期の早期化により, 出穂盛期前30日間の平均最低気温は九州を除けば低下し, 出穂盛期後30日間については各地方とも平均最低気温が上昇し, 日射量も増加していた.

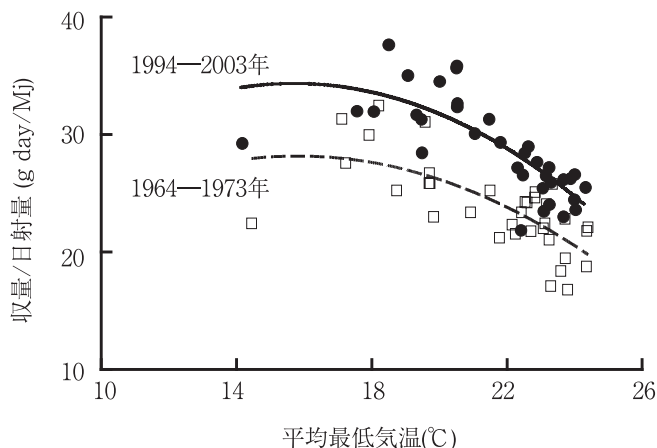
2. 稲作気象環境の変化が水稻生産に及ぼした影響

(1) 大気中 CO₂ 濃度の増加の影響

大気中 CO₂ 濃度と水稻相対収量 (E_{CO₂}) の関係を明らかにするため, 7つの論文 (Allen ら 1995, 金ら 1996, Ziska ら 1997, 上田ら 2000, Huang ら 2002, Kim ら 2003, Baker 2004) を用いて検討した. それらの関係にはインディカとジャポニカで差異があることが分かった(第3図). 両タイプともそれぞれ双曲線で回帰でき, インディカで R²



第3図 大気中二酸化炭素濃度が及ぼす水稲相対収量への影響. ジャポニカによるものを黒塗り, インディカによるものを白抜きで表した. データは金ら (1996, ■), Kimら (2003, ●), Huangら (2002, ◆), Baker (2004, ◇), Allenら (1995, □), Ziskaら (1997, ○) および上田ら (2000,) のものを使用した. 各試験の自然大気 CO₂ 処理の水稲相対収量を 1 とした.



第4図 出穂前40-10日の平均最低気温と都道府県別水稲収量を同時期の平均日射量で除した値との関係. 都道府県別収量として1964-1973年と1994-2003年の平均値を使用した.

=0.85, ジャポニカで $R^2=0.77$ だった. ジャポニカについての回帰式を用い E_{CO_2} を明らかにしたところ, この40年間の大気中 CO₂ 濃度の増加によって, わが国の水稲収量は2.5%増加していると推定された.

(2) 水稲生産性への影響

1964-1973年および1994-2003年の都道府県別の収量(Y)を出穂盛期+e日から30日間の平均日射量(Sn_{e+30})で除した値は, 同期間の(平均, 最高あるいは最低)気温の平均値により2次式で近似できた. 例として $e=-40$ で平均最低気温の場合を第4図に示した. 両者の関係は気温の項目とeの違いによって大きく異なった. 1964-1973年と1994-2003年ともに, 最低気温, 平均気温, 最高気温の順に決定係数(R^2)が小さくなる傾向が見られ, eについては-40で最大となった(第5図). 以上の結果から, 1964-1973年の気象生産力指数(Y_w)は決定係数が最大であった $e=-40$ の平均日射量(Sn_{-40-10})と平均最低気温($T_{min,-40-10}$)を用いて以下の式で表した.

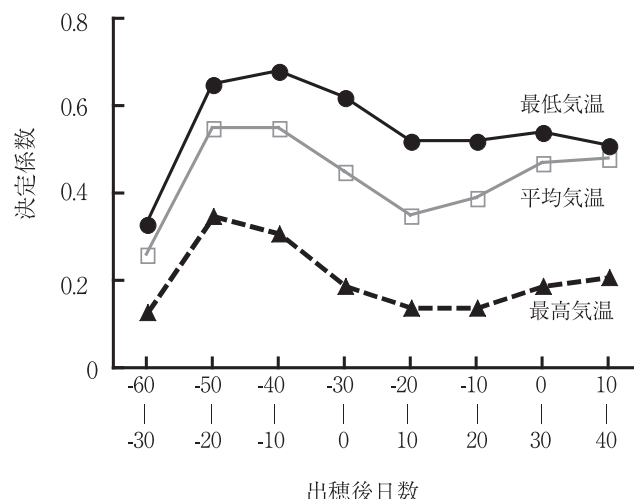
$$Y_w = Sn_{-40-10} \{-0.19 (T_{min,-40-10} - 17.7)^2 + 27.8\} \quad (R^2 = 0.54) \quad (11)$$

同様に1994-2003年の気象生産力指数(Y_w)は以下の式で表した.

$$Y_w = Sn_{-40-10} \{-0.26 (T_{min,-40-10} - 18.0)^2 + 33.5\} \quad (R^2 = 0.68) \quad (12)$$

この40年間で Y_w/Sn_{-40-10} を最大にする $T_{min,-40-10}$ にはあまり変化が無かったが, 最大値はこの40年間で約20%増加していた(第4図).

水稲生産性を変化させる要因として, 稲作気象環境の変化(気候変化による影響と水稲作期の早期化による影響), 大気中 CO₂ 濃度の変化, 水稲栽培技術の変化が考えられる.

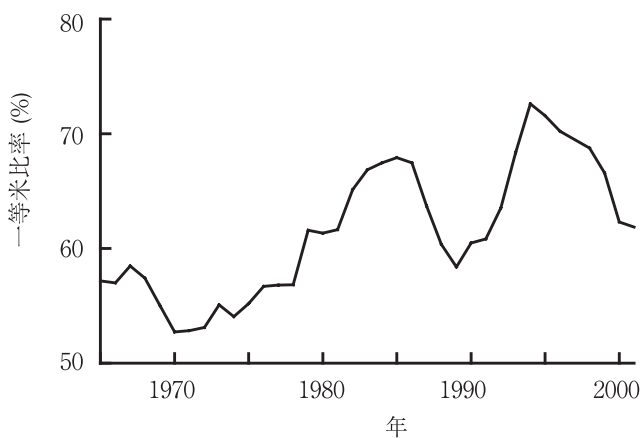


第5図 生育時期別に求めた温度生産力指数(第8式)の決定係数. 1994-2003年の府県別水稲収量/日射量を気温で二次回帰し比較した. 二次回帰は出穂前後日数を変え, 平均気温・平均最高気温・平均最低気温別に行った.

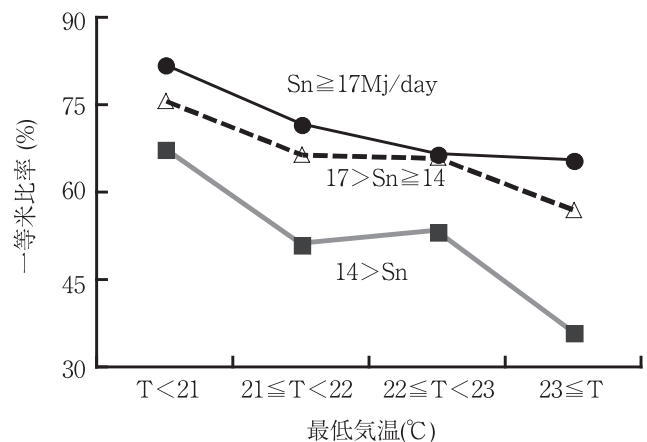
前節の解析により大気中 CO₂ 濃度の上昇は Y_w を2.5%増加したと推定されるため, ここでは第11, 12式を用いてこの40年間の気温と日射量の変化が Y_w に及ぼした影響について地方別に検討した(第3表). Y_w は1964-1973年で475(中部)から373 kg/10 a(近畿), 1994-2003年で544(北海道・東北)から486 kg/10 a(九州)の範囲にあり, 中部以東で高い傾向が見られた. この40年間で Y_w は14.0(中部)から32.4%(近畿)増加しており, 地方によってその増加率は大きく異なっていた. このうち気象条件の変化からは説明できない CO₂ 濃度の上昇とその他の要因によるものが約20%を占め, 第11式と第12式の最大値の差に対応していた. Y_w のその他の要因による増加は, 主に水稲栽培技術の向上によるものと考えられ, 近畿地方で

第3表 1964-1973年, 1994-2003年の地方別に見た気象生産力指数とその増加率の内訳。増加率内訳として早期化に伴う気温・日射量の変化の影響, 気候変化に伴う気温・日射量の変化の影響, 二酸化炭素濃度変化による影響に分け, 残りをその他とした。

	気象生産力指数 (kg/10a)			増加率内訳 (%)					
	1964- 1973年	1994- 2003年	増加率 (%)	早期化		気候変化		二酸化 炭素	その他
				気温	日射量	気温	日射量		
北海道・東北	457	544	19.2	0.2	-0.7	0.0	-0.7	2.5	17.8
関東	458	543	18.6	3.0	-2.6	-3.3	0.6	2.5	18.3
中部	475	542	14.0	2.0	-2.0	-3.0	-3.0	2.5	17.6
近畿	373	494	32.4	11.1	-4.3	-5.9	9.0	2.5	20.0
中国・四国	408	522	28.0	10.2	-4.7	-5.7	6.6	2.5	19.1
九州	396	486	22.8	3.1	1.0	-6.2	4.6	2.5	17.1



第6図 この40年間で見られた一等米比率全国平均値の推移。1963-2003年の5年移動平均値を示した。



第7図 出穂後10-30日の最低気温・日射量が一等米比率に及ぼす影響。最低気温を4つ, 日射量を3つの階級値にそれぞれ区切り, 平均値を求めた。

20%の増加, 九州地方で17%の増加と地方により多少の違いが見られたがその差は小さかった。一方, 出穂前40から10日の気象条件の変化による影響は-6.0(中部)から9.9%(近畿)まで地方による大きな違いが見られた。この稲作気象環境の変化を, 出穂盛期の早期化による影響と気候変化による影響に分けてみた。水稻出穂盛期の早期化によって Y_w は-0.5(北海道・東北)から6.8%(近畿)まで変化していた。特に近畿, 中国・四国地方で大きく上昇しており, この上昇は最低気温の低下によるものであった。気候変化によって Y_w は-6.0(中部)から3.1%(近畿)まで変化しており, 地方によって大きく異なる傾向があった。中部地方の Y_w 低下は最低気温の上昇だけでなく日射量の減少も原因であった。近畿地方の増加は日射量の増加が原因であった。

(3) 水稻外観品質への影響

この40年間で見られたわが国の一等米比率の推移(5年移動平均)を第6図に示した。長期的に見るとわが国の一等米比率は増加傾向にあったが, 1985年からの5年間と1994年以降に大きく低下していた。以下では1994年以降

の一等米比率低下に着目して解析を行った。1992-2003年の都道府県別値を用いて, 一等米比率 Q に関して分散分析を行った結果, $T_{\min,10,30}$ と $Sn_{10,30}$ および $T_{\text{ave},10,30}$ と $Sn_{10,30}$ の有意な効果が検出された。最低気温は平均気温に比べてこの40年間の変化が大きい点(第2図)や, 一等米比率に及ぼす影響が大きいと報告されている点(農林水産省2001)を考慮して, 以下では $T_{\min,10,30}$ と $Sn_{10,30}$ の Q への関係に着目した(第7図)。

$T_{\min,10,30}$ が上昇するに従って, また $Sn_{10,30}$ が低下するに従って Q は低下した。そこで, $T_{\min,10,30}$ と $Sn_{10,30}$ を説明変数, Q を目的変数として重回帰分析を行ったところ, R^2 値は大きくないものの1%水準で有意な回帰式(第13式)を得た。

$$Q_{\text{ex}} = -3.57 T_{\min,10,30} + 2.59 Sn_{10,30} + 102.22 \quad (13)$$

この式では $T_{\min,10,30}$ が1℃上がると一等米比率期待値(Q_{ex})は3.57%低下し, $Sn_{10,30}$ が $1\text{Mj}/\text{m}^2/\text{day}$ 増加すると2.59%増加することを示している。 $T_{\min,10,30}$ と $Sn_{10,30}$ の標準偏回帰係数はそれぞれ-0.34, 0.33となり, 両者が及ぼす一等米比率への影響はほぼ等しかった。

1992年以降で Q の全国平均値が特に低かった1999,

第4表 1999, 2002年の地方別に見た一等米比率と一等米比率期待値. 一等米比率期待値は出穂後10~30日の最低気温・日射量を第13式に代入して求めた.

	1999年		2002年	
	実際の一 等米比率 (%)	一等米比率 期待値 (%)	実際の一 等米比率 (%)	一等米比率 期待値 (%)
北海道・東北	70.5	63.9	82.6	74.4
関東	60.6	59.9	42.1	67.9
中部	73.2	65.5	73.0	72.5
近畿	59.0	61.0	61.4	64.9
中国・四国	55.4	58.8	57.4	67.0
九州	29.5	52.8	59.4	72.2

第5表 1994-2003年の平均出穂盛期の場合とそれよりも2週間出穂盛期を遅らせた場合と仮定した場合の地方別に見た気象生産力指数, 一等米比率期待値の比較および増減.

	気象生産力指数 (kg/10a)			一等米比率期待値 (%)		
	平均出穂盛期	+2週間	増減	平均出穂盛期	+2週間	増減
北海道・東北	544	550	5.7	72.2	73.5	1.3
関東	543	497	-46.3	64.7	66.5	1.8
中部	542	541	-0.3	70.4	71.4	1.0
近畿	494	466	-28.0	64.6	67.0	2.5
中国・四国	522	491	-31.6	66.6	69.4	2.9
九州	486	463	-23.5	69.0	76.1	7.1

2002年の地方別に見た一等米比率と一等米比率期待値を第4表に示した. 両年ともQは北海道・東北, 中部地方で高い傾向が見られた. 1999年の九州地方・2002年の関東地方でQは非常に低かった. 第13式を用いて求めた Q_{ex} はQと同様な傾向を示した. しかし, 1999年の九州地方および2002年の関東, 九州地方で出穂後10から30日の平均最低気温と日射量から説明できない一等米比率の低下が見られた. これは台風や病害虫の影響による(農林水産省2001)と考えられた.

(4) 作期の移動による外観品質低下の抑制効果の検討

近年一等米比率の低下を抑制するため, 作期を遅らせることが一部の地域で推奨されている. その効果について収量および一等米比率の両面から検討を行った. 1994から2002年の平均的気象条件の下で, 出穂盛期を同期間の平均的出穂期の場合と, それよりも2週間遅らせた場合の Y_w および Q_{ex} を第5表に示した. 作期の移動によって Q_{ex} は全国的に増加する傾向があったが, その増加は九州地方を除くと1.0から2.9%の範囲にあり小さかった. Y_w は作期の移動によって減少し, 特に関東(-46.3 kg/10a), 近畿(-28.0 kg/10a), 中国・四国(-31.6 kg/10a), 九州(-23.5 kg/10a)地方の低下が大きかった.

考 察

(1) 出穂期の早期化傾向と気候変化

稲作気象環境は出穂期の早期化と気候変化に影響を受けていると考えられる. 出穂盛期はこの40年間で関東以西において非常に早まっており, これは早期栽培の普及が主因であると考えられる. 早期栽培は従来に比べて早植えることで, 栄養生長期の低温・多照につながり, 多収となる(佐本1966). この早期栽培を支えた技術として保温折衷苗代の普及による健苗の早期育成が上げられている(米田1963). 本研究においても移植盛期の早期化に伴って出穂盛期が早期化する傾向が見られた(第1表). しかし, 同時に播種盛期から出穂盛期までの日数(栄養生長期)も短縮しており, これによっても出穂は早期化していた. この栄養生長期の短縮は, 高温による発育の促進や西日本にとって早生品種であるコシヒカリの普及が考えられる(大石2003). こうした出穂期の早期化が稲作気象環境に及ぼした影響は出穂前後で異なる傾向がみられた. つまり早期化により出穂前の気温と日射は低下し, 出穂後のそれは増加していた. これは1年のうちで最も気温の高い時期が出穂前30日間に含まれていたのが, 出穂の早期化によって出穂後30日間に含まれるようになったためであると考えられる.

一方, 気候変化による温度の変化量は地方や出穂盛期の

前後によって多少異なったが、最低気温は平均で 0.7°C 上昇した($0.024^{\circ}\text{C}/\text{年}$; 第2表)。第2図の最低気温において回帰直線をとると、その傾きは $0.031^{\circ}\text{C}/\text{年}$ が得られる。野田ら(2003)によるとこの100年間でみられたわが国の6~8月の平均気温の上昇率は地方によって異なるが $0.005\sim 0.011^{\circ}\text{C}/\text{年}$ であり、本研究値よりかなり小さい。この上昇率の差は近年における気温上昇が著しいためであると考えられる(気象庁2002)。

(2) 気象生産力指数

村田(1964)は気象生産力指数について、8~9月の平均気温、日射量だけでなく、出穂前10日~後30日の40日間の平均気温、日射量についても解析を行っている。しかし、出穂前10日~後30日の気象条件では気象生産力指数と収量との相関が低いため、8~9月の気象条件によって生産力指数を定義している。本研究では期間を30日間とし出穂前後日数を変化させ、平均気温だけでなく最高気温、最低気温についても検討した(第5図)。その結果、生産力指数の決定係数は出穂前40~10日と出穂後10~40日付近で極大を示し、出穂前後にまたがる期間では決定係数が低下した。出穂後の期間はHanyuら(1966)がその平均気温から登熟量示数を定義し、さらに出穂前の平均気温を組み合わせて気候生産力示数を提示したように(杉原・羽生1980)水稲の生産力を決定する上で重要な時期と考えられる。しかしながら決定係数はむしろ出穂前で高かったため、本研究では出穂前40~10日の平均最低気温と日射量を用いて気象生産力指数を定義し、それにより収量の都道府県間差を説明した。

一般に平均最高気温は日中の気温を、平均最低気温は夜間の気温を指標化していると考えられる。夏期においては日中の気温が低すぎて問題になることはほとんどありえない。日中の気温が高い場合には、光合成量の低下(堀江1979)や不稔粒の増加(Matsuiら1997)が報告されているものの、そうした現象が起こるのは開花時の気温が 35°C を超えた場合などで現在の気象でも頻繁に起こるものではない。したがって、日中の気温は概ね適温域にあると考えられ、収量に与えた影響が小さかったと考えられる。一方最低気温に代表される夜間の気温は、呼吸量に大きな影響を与えるほか、同化産物の再転流や再合成に関わると考えられている(松島1957)。最低気温が低すぎる場合は冷害が生じるが、一般にある作物の最適栽培環境は栽培可能地域内の高緯度側にあることが多い(Loomis and Gerakis 1975, Evans 1993)。第4図の結果はそうした傾向を示していると考えられる。Pengら(2004)はフィリピンにおいて同様の解析を行い、水稲収量は最低気温に大きな影響を受けると報告している。

本研究においては出穂前40~10日の気象条件で都道府県別収量をよく説明できた。出穂前40~10日は穎花数が最終的に決まり、籾のサイズが決定する時期である。退化穎花数と籾のサイズはこの時期の籾への同化産物供給量に

依存すると報告されており(松島1957, 和田1969, Matsushima 1976, 小林・堀江1994)、この同化産物量は一般に同時期の気象条件に大きな影響を受けると考えられる。つまり、出穂前40~10日の気象は水稲の収量形成にとって非常に重要であると考えられ、本研究の結果はそれを反映していると考えられる。

1964~73年と1994~2003年で見出穂前40~10日の収量/日射量と最低気温の関係は第4図のようになった。この40年間で Y_w/S_n の最大値は約20%増加しており、これは水稲栽培技術の向上と大気中 CO_2 濃度の上昇が原因と考えられた(第3表)。一方 Y_w/S_n を最大にする $T_{\text{min},-40,-10}$ は約 18°C でこの40年間でほとんど変化が見られなかった。わが国の稲作では北海道・東北の冷害を除いて温度が問題となることはほとんど無く(Matsuiら1997)、品種の育種においてあまり考慮されてこなかったためであると考えられる。Pengら(2004)は、フィリピンにおいて水稲収量を最大にする成育期の平均最低気温は 20°C であると報告しており、本研究の結果と約 2°C の差異があった。これは平均最低気温算出時期の違いだけでなくインディカとジャポニカの特性的違いも含まれていると考えられた。

(3) 一等米比率期待値

農産物検査規格では、容積重、整粒、形質の最低限度、水分や被害粒、未熟粒、死米、着色粒、異種穀粒、異物などの最高限度が定められており、これらを基準に1~3等米、等外、規格外に分類している。近年の一等米比率の低下の主因は籾へのデンプン充実不良に伴う乳白米を主とした白未熟粒の増加であり、この乳白米比率は出穂後の気象条件に大きく影響を受けると報告されている(農林水産省2001, 井上2003, 寺島2003, 月森2003)。たとえば月森(2003)は、乳白米の発生は登熟期間の気温と関係があり、特に出穂後20日間の平均最低気温が上昇すると乳白米比率は増加すると報告している。この出穂後の高温に伴う乳白米比率の増加の原因は、高温による胚乳のデンプン合成酵素活性の低下に加え(松村2001)、呼吸の増大による光合成産物の供給不足であると思われる(小葉田ら2004)。また、出穂期以降の日射量も乳白米比率に大きな影響を与えられている(長戸1952, 寺島ら2001)。本研究において1992~2003年の都道府県別一等米比率を分散分析したところ、出穂後10~30日の最低気温および日射量の有意な効果が検出され(第7図)、品質に関するこの時期の気象条件の重要性が改めて示された。出穂後10~30日の平均最低気温・日射量を説明変数、一等米比率を目的変数として重回帰分析を行い、 Q_{ex} を定義したところ変動が大きいものの有意な第13式が得られた($R^2=0.11$)。この大きな変動の原因には、2等米以下の主要な格付け理由が多岐にわたる点(長田ら1997)、乳白米の発生には品種間差異がある点(高松ら1982)なども考えられる。

(4) 今後予測される気候変動にむけて

高温による一等米比率低下を防ぐためには、苗を遅植えして作期を移動させることが一部の地域で推奨されている。作期を現在より2週間遅らせた場合、一等米比率期待値は若干増加する傾向があったが同時に気象生産力指数が大きく減少した(第5表)。作期の移動による品質改善の効果はあまり大きくないだけでなく、収量水準を維持するのが難しいと思われる。大気大循環モデル(GISS, GFDL, UKMO)によれば、大気中CO₂濃度が現在の2倍になったとき、現在より日射量は1~9%しか増加しないのに対し、気温は4~7℃上昇するといわれており、この上昇によって収量、一等米比率はさらに大きく低下すると考えられる。つまり、今後予想される気候変動に向けて、作期の移動だけでなく高温耐性品種の育成や施肥法の改善など総合的な対策が必要不可欠であると考えられる。

引用文献

- Allen, L.H. Jr., J.T. Baker, S.L. Albercht, K.J. Boote, D. Pan and J. C.V. Vu 1995. Carbon dioxide and temperature effect on rice. In Peng, S., K.T. Ingram, H.-U. Neue and L. H. Ziska eds., *Climate Change and Rice*. Springer-Verlag, Berlin. 258-277.
- Baker, J.T. 2004. Yield response of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agr. For. Met.* 122: 129-137.
- Evans, L.T. 1993. *Crop Evolution, Adaptation and Yield*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 1-500.
- Hanyu, J., T. Uchijima and S. Sugawara 1966. Studies on the agroclimatological method for expressing the paddy rice products. Part 1. *Bull. Tohoku Agr. Exp. Sta.* 34: 27-36.
- 堀江武 1979. 気象環境とイネの物質生産に関する研究。II 葉面ガス拡散抵抗, 光合成および蒸散に及ぼす大気湿度と気・水温の影響。農及園 66: 109-116.
- Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums 1990. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge. 1-364.
- 中央気象台 1904-1956. 中央気象台月報。中央気象台, 東京。
- Huang, J., H. Yang, G. Dong, Y. Wang, J. Zhu, L. Yang and Y. Shan 2002. Effects of free air enrichment (FACE) on yield formation in rice (*Oryza sativa*). *Chin. J. Appl. Ecol.* 13: 1210-1214.
- 井上健一 2003. 高温のイネ生産への影響と技術的対策—福井県の場合—。日作紀 72 (別2): 440-445.
- Kato, H. 1996. A statistical method for separating urban effect trends from observed temperature data and its application to Japanese temperature records. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 74: 639-653.
- Kellogg, W.W. 1991. Response to skeptics of global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 74: 499-511.
- Kimball, B.A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron. J.* 75: 779-788.
- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996. 高温・高[CO₂]環境が水稲の生育・収量に及ぼす影響。第2報 収量及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 and S. Miura 2003. Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply: a free air CO₂ enrichment (FACE) experiment. *Global Change Biology* 9: 826-837.
- 気象庁 1956-2003. 気象庁月報。気象庁, 東京。
- 気象庁 1964-2003. 地上気象観測時日別データ。気象業務支援センター, 東京。
- 気象庁 2002. 20世紀の日本の気候。財務省印刷局, 東京。
- 気象庁 2003. 異常気象レポート 2003. 大蔵省印刷局, 東京。
- 小葉田亨・植向直哉・稲村達也・加賀田恒 2004. 子実への同化産物供給不足による高温化の乳白米発生。日作紀 73: 315-322.
- 小林和広・堀江武 1994. 水稲の穎花ならびに枝梗分化に及ぼす生殖生長期の体内窒素の影響。日作紀 63: 193-199.
- 近藤純正・中村亘・山崎剛 1991. 日射量および下向き大気放射量の推定。天気 38: 41-48.
- Loomis, R.S. and P. A. Gerakis 1975. Productivity of agricultural ecosystems. In cooper, J.P. ed. *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 145-172.
- Matsui, T., K. Omasa and T. Horie 1997. High temperature-induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. *Jpn. J. Crop Sci.* 66: 449-455.
- 松村修 2001. 乳心白粒の発生とその生理機構。北陸作物学会報 36: 100-102.
- 松島省三・角田公正 1956. 水稲収量の成立と予察に関する作物学的研究(6) 生育各期の気温格差が水稲の登熟に及ぼす影響。日作紀 35: 205-206.
- 松島省三 1957. 水稲収量の成立と予察に関する作物学的研究。農業技術研究所報告 A 5: 1-271.
- Matsushima, S. 1976. High-yielding rice cultivation. *Japan Sci. Soc. Press, Tokyo.* 1-367.
- 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: 59-63.
- 長田健二・黒瀬義孝・吉永悟志・高梨純一 1997. 四国地域における水稲の収量・品質の変動と地域的气象特性の関係。四国農試報告 61: 119-125.
- 長戸一雄 1952. 心白・乳白米および腹白の発生に関する研究。日作紀 21: 26-27.
- 中川博視・堀江武 2001. 水稲栽培への影響。環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ編, 地球温暖化の日本への影響 2001. 環境省, 東京。150-157.
- 野田晃・磯部英彦・鬼頭昭雄・佐藤康雄・杉正人・西森基貴・松本淳 2003. 自然・人への影響予測。
- 原沢英夫・西岡秀三編, 地球温暖化と日本。第3次報告。古今書院, 東京。7-56.
- 農林水産省 1964-2003. 作物統計。農林統計協会, 東京。
- 農林水産省 2001. 高温による水稲作への影響と今後の技術対策に関する資料集。
- <http://www.kanbou.maff.go.jp/www/gichou/hitemp/index.htm> (2005/1/15 閲覧)
- 大石晃 2003. 近年の気象及び稲作の動向から見た品質低下要因。気候変動に適応した水稲生産技術に関する検討会資料。1-31.
- Peng, S., J. Huang, J.E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G.S. Kush and K.G. Cassman 2004. Rice yields decline

- with higher night temperature from global warming. Proc. Nat. Ac. Sci. USA 101 : 9971 - 9975.
- 佐本啓智 1966. 水稲早期, 早植栽培の生態に関する研究. とくに東海近畿地域における早期, 早植栽培の多収機構と栽培時期の移動について. 東海近畿農業試験場報告 15 : 1 - 41.
- 総務省 2000. 国勢調査. 総務省, 東京.
- 杉原保幸・羽生寿郎 1980. 水稲の気候生産力の評価に関する研究. I. 水稲の気候生産力評価の試み. 農業気象 36 : 71 - 79.
- 高松美智則・香村敏郎・釈一郎・朱宮昭男・谷口学・伊藤和久 1982. 水稲品種の特性に関する試験(第3報) 県内主要品種の作期と米質変動. 愛知農業総合試験場報告 14 : 16 - 30.
- 寺島一男・斉藤祐幸・酒井長雄・渡部富雄・尾形武文・秋田重誠 2001. 1999年の夏期高温が水稲の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70 : 449 - 458.
- 寺島一男 2003. 全国的な高温化がコメ品質に及ぼす影響とその要因の解析. 日作紀 72 (別2) : 446 - 451.
- 月森弘 2003. 島根県における高温のイネ生産への影響と技術的対策. 日作紀 72 (別2) : 434 - 439.
- 上田恭史・中川博視・岡田邦子・堀江武 2000. イネの収量および稔実歩合の高温・高CO₂濃度反応の品種間差異. 日作紀 69 (別1) : 112 - 113.
- 和田源七 1969. 水稲収量成立に及ぼす窒素栄養の影響. 一特に出穂以降の窒素の重要性について. 農技研報 16 : 27 - 167.
- 和田定・国広泰史・本間昭 1972. 水稲の減数分裂期における水温, 気温ならびに遮光などの処理が不稔歩合に及ぼす影響. 日作紀 41 : 340 - 347.
- WDCGG 2004. 温室効果ガス世界資料センター(WDCGG) データ http://gaw.kishou.go.jp/wdogg_j.html (2004/12/10閲覧)
- 山本健吾 1954. 水稲の成熟に関する研究—I. 海岸稲と盆地稲の生育相一. 農及園 29 : 1161 - 1163.
- 米田憲一 1963. 水稲早期栽培 10年の歩み. 関西地区水稲早期栽培推進連絡協議会.
- Ziska, L. H., O. Namuco, T. Moya and J. Quilang 1997. Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. Agron. J. 89 : 45 - 53.

Change of Weather Condition and its Effect on Rice Production during the Past 40 Years in Japan : Syunsaku KAWATSU, Koki HOMMA, Takeshi HORIE and Tatsuhiko SHIRAIWA (*Grad. Sch. Agriculture, Kyoto Univ., Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan*)

Abstract : In recent Japan, the increasing summer temperature and its influence on rice production have been recognized. The change in management and cultivar to adapt to this warming trend is necessary to maintain the yield and quality of rice. In this study we quantified the changes of weather condition and their effects on the production of rice in Japan during the period from 1964 to 2003. The average CO₂ concentration in the atmosphere from June to August increased from 322 ppm in 1964 to 367 ppm in 2003. The average daily maximum temperature from June to August increased by about 0.8°C and minimum temperature about 1.1°C during the 40 years. The rice heading season in 1994-2003 was one to two weeks earlier than that in 1964-1973. The shift of heading season resulted in lowering of air temperature before heading and rise in air temperature and increase in solar radiation after heading. The change in CO₂ concentration was estimated to increase the rice productivity by 2.5%, the climate change to increase it by -6.0 to 3.1%, and the shift of heading season to increase it by -0.5 to 6.8%. The analysis indicated that the positive effect of increased solar radiation on rice productivity was offset by the negative effect of temperature rise. By analysis of variance and multiple regression analysis we estimated that a 1°C increase in average daily minimum temperature during 10 to 30 days after heading reduced the ratio of first-class rice by 3.57%, and that a 1 Mj increase in average daily solar radiation increased the ratio by 2.59%. Although late transplanting is sometimes recommended to maintain grain quality of rice, the results of this study suggest that the late transplanting slightly improves the quality but definitely decreases the yield.

Key words : Climate change, Climatic productivity, CO₂ concentration, Early transplanting, First-class rice, Rice productivity, Urban effect, Warming trend.