

報告

1993年鹿児島市の水稻減収に関連した気象的要因の解析

角 明夫*・長谷川利拡**・鈴木 義則***・箱山 晋****

An Analysis of Meteorological Factors Related to Decreased Yield of Paddy Rice at Kagoshima City in 1993

Akio SUMI*, Toshihiro HASEGAWA**, Yoshinori SUZUKI***
and Susumu HAKOYAMA****

Abstract

The meteorological factors related to decreased yield of paddy rice at Kagoshima City in 1993 were discussed. A close relationship was found between meteorologically potential yield (Y_p) estimated by growth simulation models and actual yield (Y_a), and the potential yields in 1993 were low both on early and normal season cultures. The lower productivity in 1993 was primarily attributable to lower solar radiation. The Y_a/Y_p ratio was closely related with the percentage of damages from meteorological disasters, diseases and harmful insects. The Y_a/Y_p ratio in normal season culture of 1993 was particularly low, and it seemed to be largely attributable to flood damage caused by heavy rainfall and typhoon.

キーワード：鹿児島市，気象的可能収量，急性的農業気象災害，水稻，冷夏

Key words: Acute agro-meteorological disasters, Cool summer, Kagoshima City, Meteorologically potential yield, Paddy Rice

1. はじめに

現在，わが国ではコメの余剰傾向が益々強まり，2001年産の生産調整面積は100万haを超えようとしている。しかし，全国的な異常気象の下，

食糧事情が逼迫し平成大凶作と呼ばれたのはわずか8年前のことである。この年の減収要因に関しては既に多くの検討がなされている^{1),2),3),4),5)}が，それらを要約すれば，北海道～東日本におけ

* 鹿児島大学農学部
Faculty of Agriculture, Kagoshima University
** 北海道大学農学部
Faculty of Agriculture, Hokkaido University

*** 九州大学農学部
Faculty of Agriculture, Kyushu University
**** 鹿児島大学農学部
Faculty of Agriculture, Kagoshima University

本報告に対する討論は平成15年2月末日まで受け付ける。

る作況指数の低下は夏季の低温(冷害)によっていたこと^{1),2),3),4)}、一方西日本における低下には低温・寡照、豪雨、台風等の複数要因が関わっていた⁵⁾としている点にあらう。西日本にみられた減収タイプの代表的一例を、6月12日から7月8日までの長雨、7月27日の台風5号、7月29日と30日の台風6号、7月31日から8月2日までと8月6日との2度の集中豪雨、8月8日と9日の台風7号、9月2日から3日にかけての台風13号と度重なる気象災害に見舞われた鹿児島県にみることができる。これらの要因による気象被害率は26.0%と平年値の4.6%を大きく上回ったのをはじめ、病害、虫害および鳥獣害等による被害率を含めた総被害率は県全体で41.6%(同平年値; 15.2%)にも及んだと推定されている(九州農政局鹿児島統計事務所)。

日射量や気温の影響は日々の経過の積み重ねとして顕在化する場合が多く、これらの影響の重要性は、豪雨や台風などによる被害ほどには認識されにくい。しかし、作物生産は基本的に植物の光合成活動に依存した営みであり、その駆動力である日射エネルギーの多少はその年の豊凶を左右する重要な要素の一つである。光合成や呼吸のみならず葉面積の拡大や各器官への乾物分配率に影響する気温もまた同様である。附言すれば、日々の日射量や気温の経過によって収量の上限(可能収量)が設定されており、そして生育の諸過程で生じた風水害、病虫害などが可能収量を押し下げているとの考えが成り立つ。本報告では、このような観点にたつて1993年に鹿児島市で生じた水稲減収の特徴を浮き彫りにしたいと考える。ところで、これまでに蓄積された作物学および農業気象学的知見は、寒冷地に対する西南暖地水稲の相対的低収の一因が、この地域の高温に由来していることを指し示している^{6),7),8),9)}。それにも関わらず、1993年の夏季低温は西南暖地においても減収要因として作用したとみなされている場合が多く、その評価は必ずしも定まっていない。「低温」が減収要因であったか、それとも増収要因であったのかを明確にすることは、水稲栽培期間中の温度管理を考えるうえでの重要課題である。ここで

は、鹿児島市のような西南暖地地域での夏季低温の影響についても検討した。

2. 解析方法

2.1 気象的可能収量の推定法

日々の日射量や気温の経過によって決まる可能収量(以下、気象的可能収量)は、Horie¹⁰⁾が開発したモデル(SIMRIW)に基づいて推定した。このモデルの骨格の一つは気象値から成長過程に対応した指数を求めることにある。ここでは、発育過程を表す出芽時、幼穂分化期、出穂期および成熟期の発育指数(Developmental Index, DVI)をそれぞれ0, 1, 2および3とする連続変数とする方式を採用した^{11),12)}。ある時点におけるDVIはその時点までの発育速度(Developmental Rate, DVR)の積算値として算出し、またDVRは日々の平均気温と日長(日の出から日の入りまでの時間)の関数として求めた。出穂期に至るまでのDVRは、鹿児島県における早期水稲および普通期水稲の主力品種となっているコシヒカリとヒノヒカリに対して、それぞれ中川・堀江¹¹⁾および長谷川ら¹²⁾が与えたパラメータを用いることによって算出した。出穂期から成熟期に至るまでのDVRはヒノヒカリに対しては長谷川¹²⁾が求めたパラメータに従ったが、コシヒカリに対しては出穂期以降の日平均気温の積算値が860°Cに達したときにDVIが3になるように定めた¹³⁾。ちなみに、鹿児島県農業試験場で毎年実施されている奨励品種決定調査での結果によれば¹⁴⁾、コシヒカリとヒノヒカリの移植日(DVI 0.25に相当)から成熟期までの平均生育日数はそれぞれ115日と114日であったが、これは上記モデルに鹿児島市の日長と当該年の気温推移を代入して求めたときの平均値である119日と113日とほぼ一致した。

また、水稲収量の予測は、生育期間中、群落に吸収された積算日射量と乾物生産量との間に極めて密接な直線関係が認められることに基づいて行われる。ここで、群落吸収日射量は日射量と葉面積指数の、さらに出穂期までの葉面積生長は温度の関数として表される。出穂期までの日射利用効

率(吸収日射量から乾物への変換効率, gMJ^{-1})は, $1.9^{15)}$ と仮定した。また, 出穂期以後に生ずる葉面積の減少と日射利用効率の低下はともに DVI の関数として表される。本報では日射利用効率を 1.9 としたことを除けば, 乾物生産量の推定に必要なパラメータはすべて Horie¹⁰⁾ に従った。収穫指数は不稔歩合と DVI の, さらに不稔歩合は出穂期前後の冷却量の関数として算出するとともに¹⁰⁾, 本報では, 不稔歩合に対する高温の影響についても考慮した¹³⁾。玄米収量は, 全乾物重と収穫指数との積として表される。これらの手順によって算出された収量は, 最適条件で栽培された場合に予想される気象的可能収量と考えられるものであり, また収量にみられる地域間較差とモデルによる計算値との間には密接な比例関係のあることが既に認められている^{10), 16)}。日平均気温と日射量のデータは鹿児島地方気象台における観測値を用いた。また, 鹿児島県における早期水稲と普通期水稲の移植最盛期がそれぞれ 3 月下旬から 4 月上旬, および 6 月中旬にあることを勘案して, 移植日を早期水稲において 4 月 1 日, また普通期水稲において 6 月 15 日として計算を行った。

なお, この解析法は気温と日射量のデータを任意に置き換えることにより, 当該年の気象的可能収量の低下が低温によるものか寡照によるものかを明確にすることが比較的容易である利点も有している。

2.2 埋没被害発生水田における現地調査¹⁷⁾

1993 年は 2 度の集中豪雨により, 鹿児島県の各地で土石流や山腹崩壊に伴う土砂・流木による大規模な土砂被害が発生した。ここでは, 短時間の気象現象によって生じた急性的(障害型)農業気象被害の事例として, 8・6 豪雨によって崩壊した土砂が谷間の水田に流入した鹿児島市犬迫の被災地についての調査結果を示す。

調査は, 少し高台に位置し土砂の流入がなかった 1 つの水田(無被害水田)と崩壊箇所からの距離を異にする 3 つの被害水田(A, B, C)について, 10 月 12 日に実施した。なお, 無被害水田, 被害水田 A および B では品種ミナミヒカリが,

また被害水田 C ではコシヒカリが栽培されており, 8 月 29 日の時点でそれぞれ穂孕み期と登熟中期にあったことを確認した。

各々の水田面積は現地での計測値から算出し, また平均栽植密度は 5~6 箇所の連続する 5 株を用いて, それぞれ条間と株間の平均距離を測定することによって推定した。被害水田については, 残存株数をカウントし, 栽植本数(栽植密度×水田面積)で除すことにより残存株率を算出した。平均栽植密度に残存株率を乗ずることによって 1 m^2 当たりの平均残存株数を求め, さらに残存株から無作為に抽出した 20 株を対象に 1 株穂数を調査した。さらに 30 本の穂に対して 1 穂籾数の計測を行い, 同時に肉眼で完全不稔籾数を測定した。不稔歩合は完全不稔籾数を全籾数で除すことによって算出した。1 籾重の測定は完全不稔籾を除いた籾を対象に行った。得られた測定値に基づいて, 次式から籾収量を推定した。

$$\text{籾収量} = 1 \text{ m}^2 \text{ 当たり残存株数} \times 1 \text{ 株穂数}$$

$\times 1 \text{ 穂籾数} \times (1 - \text{不稔歩合} / 100) \times 1 \text{ 籾重}$
 なお, 不稔歩合と 1 籾重の調査を行わなかった被害水田 A については, 被害水田 B における値を代用した。また無被害水田の 1 籾重についても調査を行わなかったが, 後述するように, 土砂の堆積深が小さい場合には 1 籾重に対する影響は小さいと考えられたことから, 被害水田 B の軽堆積下の稲体で得られた計測値を代用した。なお, 各々の水田から無作為に抽出した止葉 30 枚ずつについて, 葉緑素計 (SPAD 501, ミノルタ) を用いて葉緑素含量を測定した。

さらに, 被害水田 B と C の中から, 土砂堆積深を異にする 4~5 地点から数株ずつを掘り取り, 草丈と土砂堆積深を記録するとともに, 持ち帰って 1 穂籾数, 不稔歩合および 1 籾重を測定した。

2.3 実収量と被害率

鹿児島市とその北側に隣接する吉田町における早期および普通期水稲の実収量は, 鹿児島農林水産統計年報(第 33~47 次)¹⁸⁾に従った。また鹿児島市と吉田町を含む鹿児島地区における各年産の被害率(=被害量/平年収量, ただし被害量は

基準収量と実収量との差として求め、また被害が全くなかった場合の基準収量は平年収量の1.18倍と仮定している)についても同資料から引用した。なお、2000年産については鹿児島食糧統計事務所から直接にデータを得た。さらに、水稲の生育状況の概略を把握するために、九州農政局鹿児島統計情報事務所から毎年12月に発表されている農林水産統計速報「(昭和60年産～平成12年産)水陸稲収穫量」を参照した。

なお、ここで吉田町を取り上げたのは、同町が鹿児島市に隣接し、ほぼ鹿児島市と連動した収量推移をたどってきたにも関わらず、1993年のみは大きな違いが生じたことから、この年の特徴を浮き立たせるのに有意義と考えたからである。

3. 結果および考察

3.1 実収量の推移からみた1993年凶作の位置づけ

1985年から2000年まで16年間の鹿児島市と吉田町における早期と普通期水稲の収量推移を図1に示した。なお、吉田町では、1989年以前には早期水稲の作付けがなかった。鹿児島市における早期水稲の収量は、1993年の340 kg/10 aから1994年の430 kg/10 aまで、また普通期水稲の収量は1993年の360 kg/10 aから1994年の510 kg/10 aまでの間にあった。吉田町における収量も鹿児島市と同水準であり、またその推移も1993年における普通期水稲を除き良く類似していた。鹿児島市と吉田町の水稲栽培が似た生産環境、技術水準の下で行われてきたこと、裏返せば1993年の普通期水稲の減収には極めて局地性の強い被害要因が絡んでいたことが推察される。

3.2 気象的可能収量からみた1993年の特徴

図2に、鹿児島市における早期水稲および普通期水稲の気象的可能収量の推移を示した。気象的可能収量は、早期水稲において630 kg/10 a (1994年)から490 kg/10 a (1993年)まで、普通期水稲において711 kg/10 a (1995年)から580 kg/10 a (1999年)までの間を変動し、また普通期水稲は早期水稲より常に高く推移した。

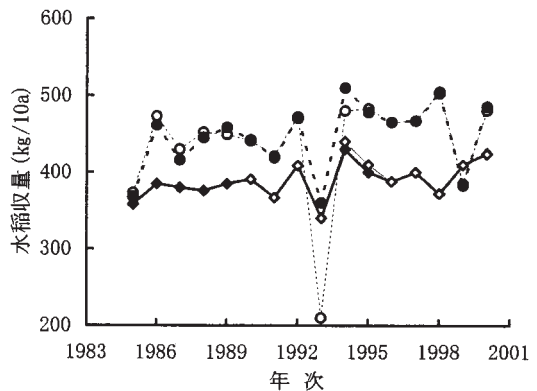


図1 鹿児島市と吉田町における水稲収量の推移。
◆：鹿児島市早期，◇：吉田町早期
●：鹿児島市普通期，○：吉田町普通期
1989年以前は吉田町での早期作はない。

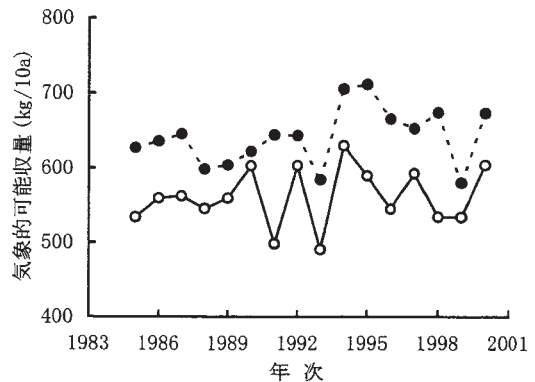


図2 鹿児島市における早期と普通期水稲の気象的可能収量の推移。
○：早期，●：普通期

1993年における早期と普通期の気象的可能収量は、1971-2000年の気候値(鹿児島地方気象台による統計値)から算出した気候的可能収量のそれぞれ86%と93%であり、1993年が日射あるいは気温環境の観点からみて不良な年であったことがわかる。しかし、1993年早期水稲の気象的可能収量は1991年と同程度であり、また普通期水稲についても1993年は1999年よりもむしろ高かった。この意味で、1993年は気象的可能収量が低かったという事実以上に、その低下が早期と

普通期に共通して顕れたところに一つの特徴があったように思われる。

気象的可能収量が低かった1993年、1991年および1999年における気温・日射量の推移の特徴を表1に示した。1993年は、6月を除いて、4月から10月にかけての月平均気温が平年値より0.4~1.7℃低く推移した。しかし、早期水稲の収量が低かった1991年の栽培期間中の気温は、5月を除き、0.6~1.0℃高く推移しており、また普通期水稲の気象的可能収量が最も低かった1999年においても、その栽培期間にあたる6月から9月の気温の平年値から負の偏差は1993年の場合ほどには大きくない。「低温」は1993年における減収要因の一つとして全国的に指摘されたが、このように鹿児島市では低温に推移したことと気象的可能収量が低かったこととの間に相関は認められない。これに対して、日射量は1993年7月から9月にかけては平年値の約70~90%、1991年4月から6月にかけては81~90%、また1999年6月から9月にかけては79~95%と、気象的可能収量が低下した年にはいずれも平年値と較べて栽培期間の日射量が少なかったことが注目される(表1)。

ところで、1994年は、1993年と対称的に、高温・多日射で経過した。すなわち、7月に平年値より1.4℃高かったことをはじめ9月を除く月平均気温がすべて平年値を上回り、また、日射量は、7月から9月の117~121%を中心として、4月を除いて軒並み平年値より高めに推移した。いま、気温は1993年の、日射量は1994年の経過を辿ったと仮定して気象的可能収量を試算した結果を表2に示す。早期水稲の660kg/10a、また普通期水稲の768kg/10aという収量は、1993年の気象的可能収量より35%から32%ほど大きく、また1994年のそれと比較しても5%から9%ほど高い。表2には、気温は1994年の、また日射量は1993年の経過を辿ったことを仮定したときの気象的可能収量も示している。早期水稲と普通期水稲における、それぞれ493kg/10aと520kg/10aは1994年における気象的可能収量より22%から26%ほど低く、また、普通期水稲での520kg/10aは1993年の584kg/10aと比較しても11%ほど低い。

さらに、気象的可能収量に対する気温の影響を明確にするために、1971-2000年の平均日射量の推移を用い、また気温を同期間の平年値から+3

表1 気象的可能収量の低かった年の月平均気温と月間日射量、および平年値との比較。

月	気象要素	平年値 ^z	1993年	1991年	1999年
4月	気温(℃)	16.8	15.6 (-1.2) ^y	17.4 (+0.6)	17.4 (+0.6)
	日射量(MJ/m ²)	457.0	563.4 (123.3)	412.7 (90.3)	508.0 (111.2)
5月	気温(℃)	20.3	19.9 (-0.4)	19.4 (-0.9)	20.3 (0.0)
	日射量(MJ/m ²)	518.9	475.2 (91.6)	433.2 (83.5)	610.8 (117.7)
6月	気温(℃)	23.7	23.8 (+0.1)	24.7 (+1.0)	24.4 (+0.7)
	日射量(MJ/m ²)	442.7	450.9 (101.9)	360.2 (81.4)	351.3 (79.4)
7月	気温(℃)	27.8	26.2 (-1.6)	28.6 (+0.8)	27.0 (-0.8)
	日射量(MJ/m ²)	552.6	388.3 (70.3)	561.9 (101.7)	523.1 (94.7)
8月	気温(℃)	28.2	27.1 (-1.1)	27.8 (-0.4)	27.9 (-0.3)
	日射量(MJ/m ²)	551.0	499.8 (90.7)	537.1 (97.5)	505.7 (91.8)
9月	気温(℃)	25.7	24.0 (-1.7)	26.1 (+0.4)	27.4 (+1.7)
	日射量(MJ/m ²)	451.2	404.1 (89.6)	483.4 (107.1)	416.0 (92.2)
10月	気温(℃)	20.8	19.2 (-1.6)	19.9 (-0.9)	22.3 (+1.5)
	日射量(MJ/m ²)	403.8	422.7 (104.7)	380.1 (94.1)	432.0 (107.0)

z 1971-2000年の平年値。

y 括弧内の数字は、気温において平年値との差、また日射量において平年値に対する割合を示す。

～3℃に変化させて気象的可能収量を計算した結果を図3に示した。早期水稲と普通期水稲に用いられる品種間には感温性と感光性において違いがあるために気温に対する反応に差異が生じているが、ともに低温が気象的可能収量の増大をもたらす点については共通している。これらの一連のシミュレーション結果は、1993年に生じた程度の低温は南九州においては減収要因としてではなく、むしろ増収要因として作用したことを表している。これは高温が作物の発育速度を大きくし、生育期間の短縮とそれに伴う全乾物重の減少を引き起こすためである^{19), 20)}。

なお、気象的可能収量が正規分布することを仮定して、気候的可能収量の90%まで低下する再現期間を計算してみると早期水稲でおよそ10年、また普通期水稲で40年と推定され、早期水稲は普通期水稲より気象的可能収量の変動が大きい傾向にあった(表3)。これは、早期水稲では日射量の不足しやすい梅雨期に登熟が進行することになるため、その変動の影響を受けやすいこと^{6), 7)}、さらには高気温による減収の程度も普通期水稲より顕著に顕れやすい(図3参照)ことを反映していると考えられる。

気象的可能収量と実収量の間には、早期水稲と普通期水稲を込みにした場合、および個別にみた場合の両方で有意な比例関係が認められた(図4)。この結果は、実収量にみられる早期水稲と普通期水稲の間の較差および年次間変動が気象的可能収量、換言すればそのベースとしての日々の気温と日射量の推移の違いを色濃く反映してきたことを示している。実収量/気象的可能収量比の最大値は、早期水稲および普通期水稲のそれぞれにおいて0.77(1999年)と0.76(1989年)であり、気象的可能収量は実収量より常に過大評価された。本報で用いた日射利用効率1.9は、堀江・櫻谷¹⁵⁾が品種、日本晴について得たものであるが、品種による違いも大きい^{15), 21)}。推定された気象的可能収量が過大評価されたのは、この日射利用効率がコシヒカリやヒノヒカリに対して、あるいは一般農家圃場の収量推定に適用するには高すぎた¹⁶⁾ことに一因があると考えられる。さらに、実収

表2 気温および日射環境の変化が気象的可能収量^zに与える影響。

気象 日射 気温	早期水稲		普通期水稲	
	1993年	1994年	1993年	1994年
1993年	490 ^y	660	584	768
1994年	493	630	520	706

^z 可能収量の単位はkg/10a。

^y 太字はそれぞれ1993年と1994年の気象的可能収量を示す。

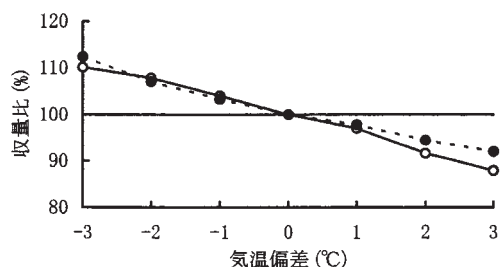


図3 気温変化に伴う鹿児島市の気象的可能収量の変化。

気温偏差は平均値(1971-2000)との差を、また収量比は気象的可能収量の平年値(1971-2000)に対する割合で示す。

○：早期，●：普通期

表3 鹿児島市における早期水稲と普通期水稲の実収量、気象的可能収量および実収量/気象的可能収量比の変動係数^z

作期	実収量	気象的可能収量	比 ^y
早期水稲	6.1	7.1	3.9
普通期水稲	10.2	6.1	7.2

^z 統計期間は1985年—2000年、単位は%

^y 実収量/気象的可能収量比。

量には気象被害、病害あるいは虫害等の被害によって生じたいくらかの減収分が差し引かれていることにも大きな原因があろう。ちなみに、鹿児島農林水産統計年報に基づく1985年から2000年まで16ヶ年の鹿児島地区における平年総被害率は17%であった。

3.3 急性的農業気象被害および病害虫被害の推定

日々の気温および日射量の推移のみに基づいて算出される気象的可能収量は、短時間に生ずる強風や豪雨などの気象的被害の影響、また当然のことながら病害、虫害、鳥獣害および雑草害などの非気象的要因の影響を含んでいない。これに対して、気象的可能収量に対する実収量の比は、実収量に及ぼすこれら要因の総合的影響を代表すると考えられる。鹿児島市における実収量/気象的可能収量比は、早期水稲で0.65 (1990年) から0.77 (1999年) まで、また普通期水稲で0.59 (1985年) から0.76 (1989年) までを変動した。吉田町における実収量/気象的可能収量比も鹿児島市におけるそれと類似した変動を示したが、1993年の普通期水稲では鹿児島市における0.62に対して0.36と著しく低下し、両市町間に大きな較差が生じた(図5)。ちなみに、1985年普通期水稲における実収量/気象的可能収量比の大きな低下は(図5)、台風13号(最大瞬間風速55.6 ms⁻¹)の襲来が風害に対する感受性が大きい穂孕み期～出穂期に重なったことと鹿児島湾岸で潮風害が発生したことに対応している。さらに、1993年普通期水稲における低下(図5)も、台風害や豪雨被害を反映していると考えられるが、何故この年のみ鹿児島市と吉田町の実収量/気象的可能収量比の違いが大きくなったのかに関連して後に考察を加えたい。

図6に実収量/気象的可能収量比と被害率平年比との関係を示した。なお、ここで被害率平年比とは気象被害や病虫害等による平年総被害率(1985-2000年の16ヶ年平均値)に対する各年総被害率の比であり、また各被害率は被害定期調査に基づく鹿児島地区(注)における推計値である。また、ここで用いた被害率は早期と普通期を込みにしたものであるが、鹿児島市と吉田町の稲作はともに普通期作を主体(栽培面積の99%以上)としているため普通期水稲における実収量/気象的可能収量比との関係で示してある。被害率が大きくなるほど実収量は低くなるのは当然のこととしても、実収量/気象的可能収量比も直線的に低下している(図6)。このことは被害定期調査に基づく被害率には気温や日射環境によって生じた生

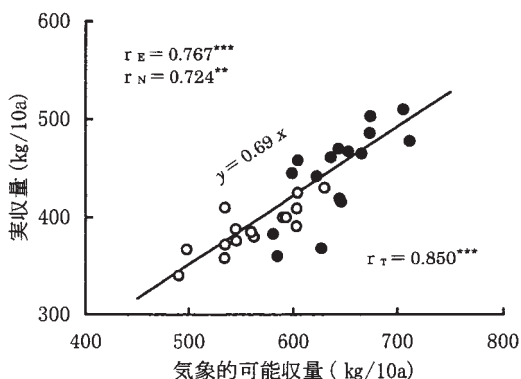


図4 鹿児島市での気象的可能収量と実収量との関係。
r_Eとr_Nおよびr_Tは、それぞれ早期水稲と普通期水稲における相関係数および両者を込みにしたときの相関係数を、また**と***は相関係数がそれぞれ1%, 0.1%水準で有意であることを示す。図中の実線は、早期と普通期を込みにした場合における気象的可能収量と実収量との回帰関係を示す。
○：早期， ●：普通期

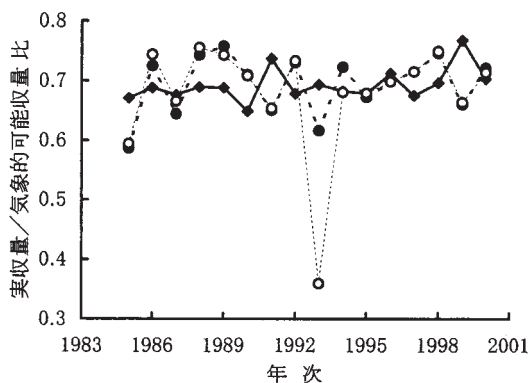


図5 鹿児島市と吉田町における実収量/気象的可能収量比の推移。
◆：鹿児島市早期， ●：鹿児島市普通期， ○：吉田町普通期

育不良の影響が必ずしも十分には評価されてこなかったことを示していると考えられる。また、鹿児島市における実収量/気象的可能収量比(y)はそれぞれ気象被害(x₁)、病害(x₂)、および虫害(x₃)による被害率と有意な負の相関関係を示した(相関係数:-0.606*, -0.695**, -0.791***)が、重回帰分析からはyに対して有意な負の回帰係数

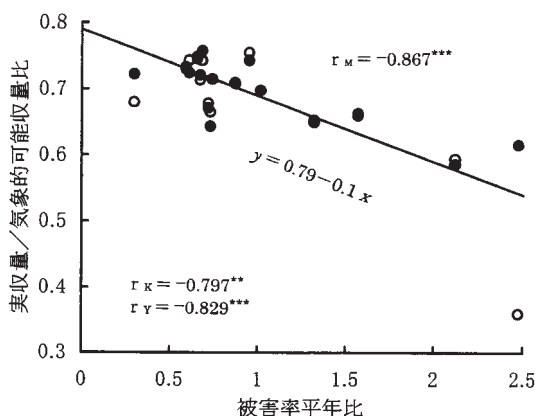


図6 鹿児島地区の被害率年平均比と鹿児島市および吉田町の普通期水稲の実収量／気象的可能収量比との関係。

被害率年平均比とは、年平均被害率に対する各年被害率の比を表す。 r_k と r_y は、それぞれ鹿児島市と吉田町の平均実収量／気象的可能収量比に対して算出された相関係数を、また***は相関係数が0.1%水準で有意であったことを示す。図中の実線は鹿児島市と吉田町の平均値に対して認められた帰帰直線を示す。

●：鹿児島市普通期，○：吉田町普通期

を示したのは x_1 (-0.004*)と x_3 (-0.030**)のみであった(x_2 , +0.007^{NS})。このことは、実収量／気象的可能収量比を急性的気象被害および非気象的被害の代表値として捉えようとする場合、現在の減収推定尺度では、とりわけ病害については対応しきれないこと、あるいは気温や日射環境の不良は同時に病害発生の誘因でもあることを反映している可能性がある。

実収量／気象的可能収量比の変動係数は、早期水稲での3.9%に対して普通期水稲では7.2%であり、普通期水稲のほうで変動が著しい傾向にあった(表3)。これは、普通期水稲では栽培期間が台風襲来期間に重なり、風水害の発生頻度が高いことを反映している。一方、早期水稲で実収量／気象的可能収量比の変動係数が小さいことは、台風被害の回避手段としての早期水稲導入²²⁾が有効に機能している証明でもあるが、反面で早期水稲は登熟期が気温や日射量の変動の大きい梅雨期にあたるリスクを負っているため、気象的可能収量の変動が大きい傾向にある(表3、図4参照)。

3.4 1993年水稲減収に対する埋没被害の位置づけ

1993年鹿児島県下では、長雨、4度の台風襲来と2度の集中豪雨によって、冠水、倒伏、穂発芽、埋没、流出、いもち病等様々な被害が発生し、約88億円におよぶ水稲被害が発生した(確定値)。埋没・流出被害の発生自体は必ずしも珍しいこととはいえないが、1993年の特徴はこれらが極めて大規模に発生したことである。以下では、まず土砂の流入による埋没被害の実例を記し、次いで1993年に生じた実収量／気象的可能収量比の低下に占めたその位置づけについて検討する¹⁷⁾。

8・6水害時に発生した土砂被害現場における10月12日の時点での生育および収量調査の結果を表4に一括して記した¹⁷⁾。被害水田A、BおよびCの残存株率はそれぞれ2、7および30%に過ぎず、栽植密度に基づいて算出した1m²当たりの平均残存株数は1、2、および7株であった。株当たりの穂数に注目すると、被害水田Aでは無被害水田と比較して明らかに少なく、株内においてもかなりの穂が失われているのが観察された。被害水田BとCでは、無被害水田に匹敵する、あるいはそれを上回る穂数があったが株間の変異が大きく、また上位節からの2段穂の発生も目立った(写真1)¹⁷⁾。さらに、被害水田BとCでは無被害水田より栽植密度が低かったことも補償効果として、1株穂数が増大する一因となっていたと推測される。平均1穂数については、穂間の変異が無被害水田より大きく、より大きな穂をもつ稈が残存する傾向があった反面、2段穂の発生がその傾向を相殺していた。被害水田では稔実歩合および1穂重も低下していた。被害水田A、BおよびCの推定籾収量は残存株率のさらに1/2近い1、4および15%であったと推定される。

平均葉緑素含量は、被害水田のほうで高かった。出穂後には、窒素吸収が低下するとともに茎葉中のタンパク質その他の構成成分になっていた窒素が分解されて、大部分が穂へと移行するため、登熟の進行とともに葉身の葉緑素含量や窒素含量が減少するのが一般的である²³⁾。出穂からの経過日数の長かった被害水田Cですら無被害水田より葉緑

表 4 水田への土砂流込に伴う水稻生育被害の実例 (1993年8月6日豪雨, 鹿児島市).

	無被害水田		被害水田		
			A	B	C
止葉葉緑素含量 (g/m ²)	0.36		0.41	0.41	0.39
栽植密度 (/m ²)	32.5		31.3	27.6	21.8
残存株率 (%)	100.0		2.2	7.3	30.1
残存株数 (/m ²)	32.5		0.7	2.0	6.6
株当たり穂数	13.9 (100)		8.1 (58)	13.5 (97)	14.1 (101)
面積当たり穂数 (/m ²)	451.8 (100)		5.7 (1)	27.0 (6)	93.1 (21)
1穂籾数	76.3 (100)		77.0 (101)	80.3 (105)	80.9 (106)
面積当たり籾数 (×10 /m ²)	34.5 (100)		0.4 (1)	2.2 (6)	7.5 (22)
稔実歩合 (%)	97.5 (100)		71.5 (73)	71.5 (73)	75.0 (77)
稔実籾数 (×10 /m ²)	33.6 (100)		0.3 (1)	1.6 (5)	5.6 (17)
1 籾 重 (mg)	21.8 (100)		18.0 (83)	18.0 (83)	19.1 (88)
籾 取 量 (g/m ²)	732.6 (100)		5.6 (1)	27.9 (4)	107.8 (15)

括弧内の数字は、無被害水田の値に対する割合を示す。

z 品種: ミナミヒカリ (8月29日の時点で穂孕み期), y 品種: コシヒカリ (8月29日の時点で登熟中期)

x 完全不稔籾を除いた割合, w 被害水田Bでの測定値を代用

v 完全不稔籾を除いた平均1籾重, u 被害水田Bにおいて、土砂堆積深の小さかった位置での値を代用

素含量が高かった一つの原因は、登熟の進行が阻害されたことの反映でもある。さらに、上位節から発生した2段穂の存在も被害水田の葉緑素含量の平均値を高くするのに寄与していた。

図7に、被害水田BとCにおいて認められた土砂堆積深と1穂籾数、稔実歩合および1籾重との関係を示した¹⁷⁾。ここで土砂堆積深(H)は草丈(h)に対する比率(H/h)で示している。被害水田BではH/h>0.3のとき、1穂籾数はH/hの増加とともに減少したが、被害水田Cでは一定の傾向は認められなかった。稔実歩合もまた、H/hの増加とともに減少したが、その減少程度は被害水田Bのほうで大きかった。このような反応差異は、両水田で栽培されていた品種の違いに基づく被害発生時の発育ステージの違いを反映していたと考えられる。すなわち、無被害水田、被害水田AとBでは、8月29日の時点で穂孕み期であったのに対して、被害水田Cではすでに登熟中期に至っていた。松島²⁴⁾によれば、1穂籾数は幼穂に分化した穎花数とその後の退化した穎花数の差として表され、出穂期直前にはすでにその数は決まっている。被害水田Cで土砂堆積深との関係が不明確となったのは土砂流入被害が発生した時点には1穂籾数が決定されていたためと考えられる。稔実歩合は、減数分裂期、出穂期およ

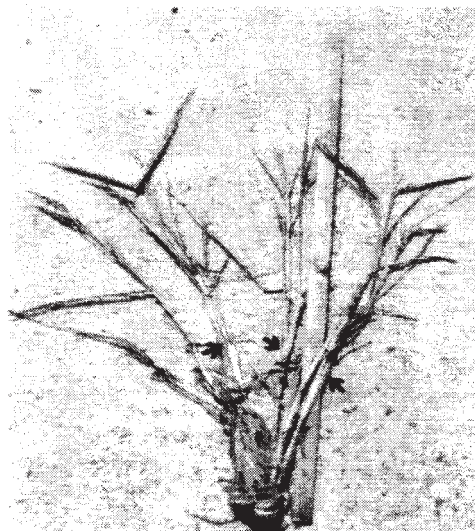


写真1 土砂流入被害を受けた稲体の状況

(1993年10月12日 鹿児島市犬迫被害水田C)

矢印の部分から新たな分けつが発生し、出穂しているものもある。その下の白い部分は埋没していた部分を示す。背後のスケールは1m。

び登熟盛期に低下の影響を受けやすい²⁴⁾。稔実歩合の低下が被害水田AとBでその影響が著しかったのは、これらのすべてのステージが被害発生以後の期間と重なっていたことを反映していると考え

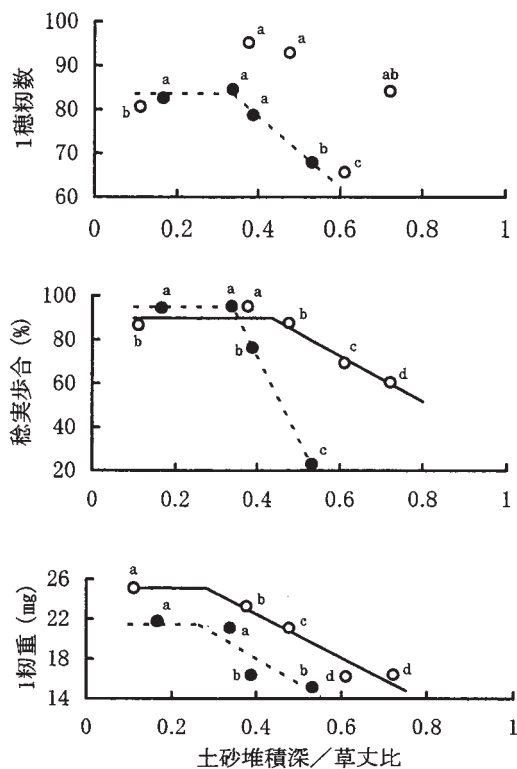


図7 土砂堆積深／草丈比と1穗粒数、稔実歩合および1粒重との関係。
同一品種内で同じアルファベットを付した測定値間にはLSD法で危険率5%で有意差がないことを示す。図中の実線と破線は目視による傾向線を表す。
○：コシヒカリ(被害水田C)、●：ミナミヒカリ(被害水田B)

えられる。1粒重もまた、 H/h が0.3より大きくなると H/h の増加とともに低下した。

図7で認められたのと同様の関係は、山本ら²⁵⁾によって1997年山口県むつみ村で発生した溜池決壊に伴う土砂堆積被害現場においても確認されており、このような残存株に対する影響が、収量の低下を一層助長していた(表4)。いずれにしても土砂が大量に流入した埋没被害水田にあっては実質的に収量皆無とみなせるほどの状況が生じたとみて良からう。

3.5 総合考察

鹿児島市における実収量は、早期と普通期とも

に気象的可能収量、すなわち気温と日射環境に依存して推移してきたことを示した。1993年における水稲減収の一因にはこの気象的可能収量の低下が関わっており(図4)、またその主要因は生育期間中の日射量の不足に求められた。また、1993年以上の「冷夏」を想定しても、低温は増収要因であることが示唆された(図3)ことから、南九州においては高温対策を栽培管理の基本とすべきであると考えられた^{26), 27)}。

1993年の普通期作においてはさらに実収量／気象的可能収量比が低下し、また実収量／気象的可能収量比は水稲被害調査に基づいた被害率の変動と高い負の相関関係を示した(図6)。いま、図6における y 切片に着目して、無被害時における実収量／気象的可能収量比を0.8と仮定すると、1993年は急性的農業被害あるいは非気象的被害によって実収量／気象的可能収量比が約23%、また平年値と比較しても12%低下したと見積もられる。現時点で、この低下要因をさらに細分して評価することには無理があるが、1)鹿児島市に隣接し、またこれまで鹿児島市と連動した推移を辿ってきた吉田町の実収量／気象的可能収量比が、鹿児島市におけるそれよりさらに42%低下した0.36であったこと、2)吉田町では、鹿児島市で発生した埋没・流出被害の被害面積率の4倍近い52%で埋没・流出の被害を受けたこと、3)埋没・流出被害の発生水田では実質的に収量皆無の状態にあり(表4)、被害面積率の違いが直接に実収量／気象的可能収量比の低下に反映されやすかったと考えられることを総合的に勘案すると、1993年における実収量／気象的可能収量比の低下は埋没・流出を主体とした水害であった側面が大きいと推察される。

今後、各種要因別の被害調査結果と実収量／気象的可能収量比との対応関係を検討する中から、実収量／気象的可能収量比の変動の成り立ちを要因別に評価できるようにする必要がある。また、このような検討を積み重ねていく中から各種の被害要因に関してこれまで策定されてきた被害推定尺度の精度向上が図られていくことも期待できよう。

4. 結論

鹿児島市における1993年の水稲収量は、早期と普通期ともに、1985年から2000年までの16年間の最低を記録した。ここでは、この被害発生原因をこの年の気象的可能収量と実収量／気象的可能収量比に分けて検討した。その結果、1993年の特徴として、1) 早期と普通期ともに気象的可能収量が低かったこと、2) その主要因は日射量の不足にあり、低温はむしろその影響を緩和する方向に作用したと考えられること、3) (とくに普通期において) 実収量／気象的可能収量比の低下が大きかったこと、があげられた。しかし、1993年の気象的可能収量は、早期において1991年と、また普通期において1999年と同レベルであり、また実収量／気象的可能収量比の低下に関しても1985年の普通期と比して必ずしも大きかったとはいえない。この意味で1993年における最大の特徴は、4) 気象的可能収量と実収量／気象的可能収量比の低下が重複して発生した点にあったと結論される。

最後に、本調査の機会を頂戴した鹿児島大学農学部 下川悦郎教授、および貴重な資料を提供頂いた鹿児島地方気象台、鹿児島農林統計情報事務所、鹿児島耕地事務所の各位に心よりの謝意を表します。

注) 鹿児島地区には、鹿児島市と吉田町のほかに、桜島町、三島村と十島村が含まれるが、これらの3町村における水稲の栽培面積は鹿児島地区の2%にも満たない。

参考文献

- 1) 堀口郁夫：1993年の冷害について，自然災害科学 13-2, pp.81-89, 1994.
- 2) 日本農業気象学会編：平成の大凶作，農林統計協会，234 p., 1994.
- 3) 日本農業気象学会北海道支部事務局：93年度の北海道の気象状況と水稲の生育—北海道支部特別講演会報告一，農業気象，50(1)，pp.49-54, 1994.
- 4) 日本農業気象学会東北支部：座談会「93大冷害 in 東北」，農業気象，50(3, 4), pp.235-248, 1994.
- 5) 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而：1993年の異常気象による西日本の農業気象災害，自然災害科学，14-1, pp.31-42, 1994.
- 6) Hanyu, J., T. Uchijima, and S. Sugawara : Studies on the agro-climatological method for expressing the paddy rice production I. Bulletin of the Tohoku National Agricultural Experiment Station. 34, pp.27-36, 1966.
- 7) 村田吉男：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．日本作物学会紀事，33(1)，pp.59-63, 1964.
- 8) 鈴木 守：暖地水稲の収量成立過程の物質生産的特徴に関する研究．九州農業試験場報告，20(4)，pp.429-494, 1980.
- 9) 武田友四郎・岡 三徳・縣 和一：暖地における水稲品種の物質生産に関する研究 第2報明治期以降の新旧品種の子実生産特性，日本作物学会紀事，53(1)，pp.12-21, 1984.
- 10) Horie, T. : A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to southeast Asia, Southeast Asian Studies, 59(1), pp.62-74, 1987.
- 11) 中川博視・堀江 武：イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究．第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル．日本作物学会紀事，64(1)，pp.33-42, 1995.
- 12) 長谷川利拡・宮地好徳・紫垣秀明・三浦 学・崎原 健・片野 学：熊本県における気象からみた水稲の生育・収量の予測に関する研究．I．発育ステージの予測について，九州東海大学農学部紀要，14, pp.9-15, 1995.
- 13) 宮川修一：タイにおけるイネの潜在生産量の評価，熱帯農業，38(1)，pp.26-32, 1994.
- 14) 鹿児島県農業試験場：平成12年度水稲奨励品種決定調査成績書，作物部平12-4，pp.1-84.
- 15) 堀江 武・桜谷哲夫：イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究(1) 個体群の吸収日射量と乾物生産の関係，農業気象，40(4)，331-342, 1985.
- 16) 堀江 武：水稲の生育・収量とCO₂ 気候変化，農業および園芸，66(1)，pp.109-116, 1991.
- 17) 角 明夫・長谷川利拡・鈴木義則：1993異常気象による水稲の生育被害(1) 土砂流入による被害実態の解析，「1993年鹿児島豪雨災害の総合的調査研究」報告書，pp.133-139, 1994.
- 18) 九州農政局鹿児島統計事務所編：鹿児島農林水産

- 統計年報（第33～47次），鹿児島農林統計協会，1987～2001.
- 19) 清野 裕：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），pp.131-138，1995.
 - 20) 清野 裕：農業気候資源とCO₂気候変化，農業および園芸，66（1），pp.103-108，1991.
 - 21) 高野順也・長谷川利拓・片野 学：熊本県における気象からみた水稲の生育・収量の予測に関する研究Ⅱ．乾物生産の予測について，九州東海大学農学部紀要，14，pp.17-24，1995.
 - 22) 岩切 敏：気象・気候環境の利用，農林・水産と気象—気象の利用と改良—（内嶋善兵衛編），朝倉書店，pp.64-94，1982.
 - 23) 武田友四郎・岡 三徳・縣 和一：暖地における水稲品種の物質生産に関する研究 第1報 明治期以降の新旧品種の乾物生産特性，日本作物学会紀事，52（3），pp.299-306，1983.
 - 24) 松島省三：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 第5号，pp.1-271，1957.
 - 25) 山本晴彦・早川誠而・岩谷 潔：1997年台風9号による山口県北部の豪雨特性と溜池決壊に伴う土砂堆積による水稲被害の実態，日本作物学会紀事，67（2），pp.226-232，1998.
 - 26) 植木健至：南九州とくにシラス地帯における水稲生育に及ぼす灌漑水温の影響，鹿児島大学農学部学術報告，21，pp.1-41，1971.
 - 27) 角 明夫・林田裕樹・竹之下佳久・下敷領耕一：微気象調節による減農薬・多収型水稲栽培の検討，生物環境調節，36（3），193-199，2001.

（投稿受理：平成13年5月28日
訂正稿受理：平成14年5月23日）