

岡山県下における水稻栽培期間中の水田地温の変化

森次 真一・石橋 英二・沖 和生

Variations of Soil Temperature in the Paddy Fields Cultivating Rice Plants in Okayama Prefecture

Shinichi Moritsugu, Eiji Ishibashi and Kazuo Oki

緒 言

被覆肥料を用いた水稻の全量基肥施肥技術は、近年、省力かつ環境保全的な施肥技術として、全国的に普及が進められている（伊藤，2003；肥料年鑑，2003）．岡山県内においても岡山平野を中心とした県南部で定着し（石橋，2004），今後も水稻栽培における主要な施肥技術として県内全域で普及していくものと思われる．

被覆尿素の窒素溶出速度は主に温度によって決定され、圃場の地温が分かれば窒素溶出パターンが予測できる（石橋ら，1992；小林ら，1997）．そのため、被覆肥料による全量基肥施肥技術を確立していく上で水稻栽培下における地温データは必須である．今後、県内全域に全量基肥施肥技術を展開していくためには、アメダス気象値等を活用し、気温や日射条件が地温に及ぼす影響を知る必要がある．

水田の水温・地温分布については、中西・山田（1957）が全国9か所の観測成績からその特性をまとめ、気温との関係について概略的な傾向を示しているが、気象条件や水稻の繁茂状態の違いと地温との関係については十分に論じられていない．また、水田の地温は、気温のようにアメダス等で定点観測が行われておらず、県内における水田地温の変化は明らかでない．

そこで、気象条件が異なる県下8か所に観測地点を設け、5年間の水稻栽培期間中の観測結果をもとに水稻の生育に伴う水田地温の変化についてとりまとめた．

現地での地温観測に当たり、ご協力頂いた関係農家各位には記して心よりお礼申し上げます．

調査方法

1. 調査地点

県下の水田は、年平均気温が約10～15℃の地域におおむね分布している（メッシュ気候値，2002；土地利用メッシュ，1997）．水稻の移植時期は年平均気温別の地帯でおおむね決まっており、県下においては年平均気温が低い地域では5月上旬～下旬、高い地域では6月上旬～下旬、中間的な地域では5月中旬～6月上旬にそれぞれ移植作業が行われる傾向にある．このため、本調査では年平均気温が異なる8か所の耕起移植栽培水田に観測定点を設定し（表1）、水稻栽培期間中の地温及び気温を測定した．

なお、調査水田の減水深は未調査であるが、聞き取り調査の結果から、調査圃場に漏水田は含まれていないと判断された．

2. 地温、気温の測定

地温及び気温の観測は、1998年から2002年にかけて5年間実施し、観測期間は各年とも移植期から収穫期までとした（表1）．

地温は、水口及び水尻の中間的な位置で、畦畔から5 m程度中央に入った位置の条間部（近接4株の中央）で測定した．水稻立毛中の地表下5 cmに温度センサー（ティアンドデイ社，TR-0106）を埋設し、1時間毎の観測値をデータロガー（同，TR-71S）に自動記録した．気温は、地温調査地点において地上1.5 m高で観測し、地温と同様に1時間毎の観測値をデータロガーに自動記

表 1 観測地点の概要

観測地点	年平均気温 ^{a)} (℃)	標高 ^{a)} (m)	観測期間 ^{b)}	移植期の気温 ^{c)} (℃)	品種	観測年
A 八束村上長田	11.0	431	5月上旬～9月中旬	14.1	あきたこまち	1998-2002
B 勝山町柴原	12.3	261	5月下旬～9月中旬	19.8	コシヒカリ	1998-2002
C 奈義町西原	12.8	223	5月中旬～9月中旬	17.7	コシヒカリ	2000-2002
D 北房町上水田	12.9	165	5月上旬～8月下旬	17.3	コシヒカリ	1998-2002
E 久米町宮部下	13.1	161	5月下旬～9月中旬	19.5	コシヒカリ	1998-2002
F 津山市東一宮	13.4	133	5月下旬～9月中旬	20.5	あきたこまち	1998-2002
G 山陽町神田沖	14.0	24	6月中旬～10月中旬	22.5	ヒノヒカリ	1998-2002
H 岡山市中畦	15.0	1	6月中旬～10月下旬	23.4	アケボノ	1998-2002

a) メッシュ気候値 2000 から引用

b) 移植期～成熟期

c) 移植後 10 日間の平均気温

録した。被覆肥料の窒素溶出予測では実用上日平均地温を用いるため(石橋ら, 1992), 1 時間毎の観測値から日平均値を算出した。

3. 水稻植被が地温に及ぼす影響

地点 G (岡山農試水田, 中粗粒灰色低地土, SCL) において, 同一水田内に水稻植被区と裸地区を設け, 地表下 5 cm の地温を現地調査と同様の方法で測定した。植被区はヒノヒカリを 6 月 16 日に移植し (1 m 当たり 17.7 株), 施肥は速効性肥料と LP コート SS100 を窒素成分比で 2 : 8 の割合で配合した LP コート SSD80 を窒素成分で 10 a 当たり 8 kg 施用した。水稻葉面積指数 (LAI) は, 生育中庸な 3 株を定期的に抜き取り, 全葉身の長さと幅を計測し, 川島・平野 (1982) の回帰式を用いて算出した。また, 相対照度は, 水稻植被による日射の遮蔽度合いを簡易的に表し, 水稻植被上 (群落最上部から 5 cm 上方位置) に対する植被下 (田面から 5 cm 上方位置) の照度を照度計 (Custom, LX-1332) により測定し, 割合 (%) で示した。

また, 地点 H では, 地温と気温が同程度になる時期が他の観測地点より早い傾向がみられ, 水稻植被の影響を知るために 2000～2002 年にかけて最高分げつ期に当たる 7 月下旬の LAI 及び相対照度を測定した。

結 果

1. 水田地温と気温の関係

水稻栽培期間中の地温及び気温の推移を調査地点別に図 1 に示した。どの調査地点においても調査年に関わらず, 地温と気温の関係は同様の傾向を示したため, 地温, 気温データとも観測した 3～5 年間の平均値を図示した。

年平均気温が最も低い地点 A (11.0℃) では, 水稻移植期に当たる 5 月上旬の地温は気温よりも約 4～5℃高い 18℃前後であった。そして, 6 月中旬頃までの移植後約 40 日間はその差を保ちながら気温の上昇とともに地温も上昇した。その後, 気温は 8 月上旬まで上昇したが, 地温と気温の差は 6 月中旬頃から次第に小さくなった。地温と気温の差は, 出穂期頃からはほとんどみられなかった。

年平均気温が 12～13℃の地点 D, C, B については, 水稻移植期がそれぞれ 5 月上旬, 中旬, 下旬と異なった。3 地点とも移植後約 20～30 日間の地温は, 気温より 3℃前後高く, 気温の上昇とともに上昇した。それ以降, 8 月上旬まで気温は上昇したが, 地温と気温の差は次第に小さくなり, 出穂期頃にほとんどなくなった。出穂期以降の地温は, 地点 B, C は気温と同程度, 地点 D は気温より 0.5℃程度低く推移した。

年平均気温が 13～14℃の地点 E, F については, 移植期に当たる 5 月下旬の地温が気温より 2～3℃高かった。生育初期から出穂期までの地温と気温の関係は, 前述した地点 A～D における両者の関係とおおむね同様であった。出穂期以降の地温は, 気温より 0.5～1℃程度低く推移した。

年平均気温が 14.0℃の地点 G については, 移植期に当たる 6 月中旬の地温は気温より約 2℃高かった。生育初期から出穂期までにおける地温と気温との関係は, 地点 A～F における両者の関係とおおむね類似していた。出穂期以降の地温は, 気温と同程度で推移した。

年平均気温が最も高い地点 H (15.0℃) については, 移植期に当たる 6 月中旬の地温は気温より約 1℃高かった。移植後約 1 か月間の地温は, 気温より 1℃前後高い値で推移した。それ以降は地温と気温の差が次第になくなり, 最高分げつ期に当たる 7 月下旬に同程度となっ

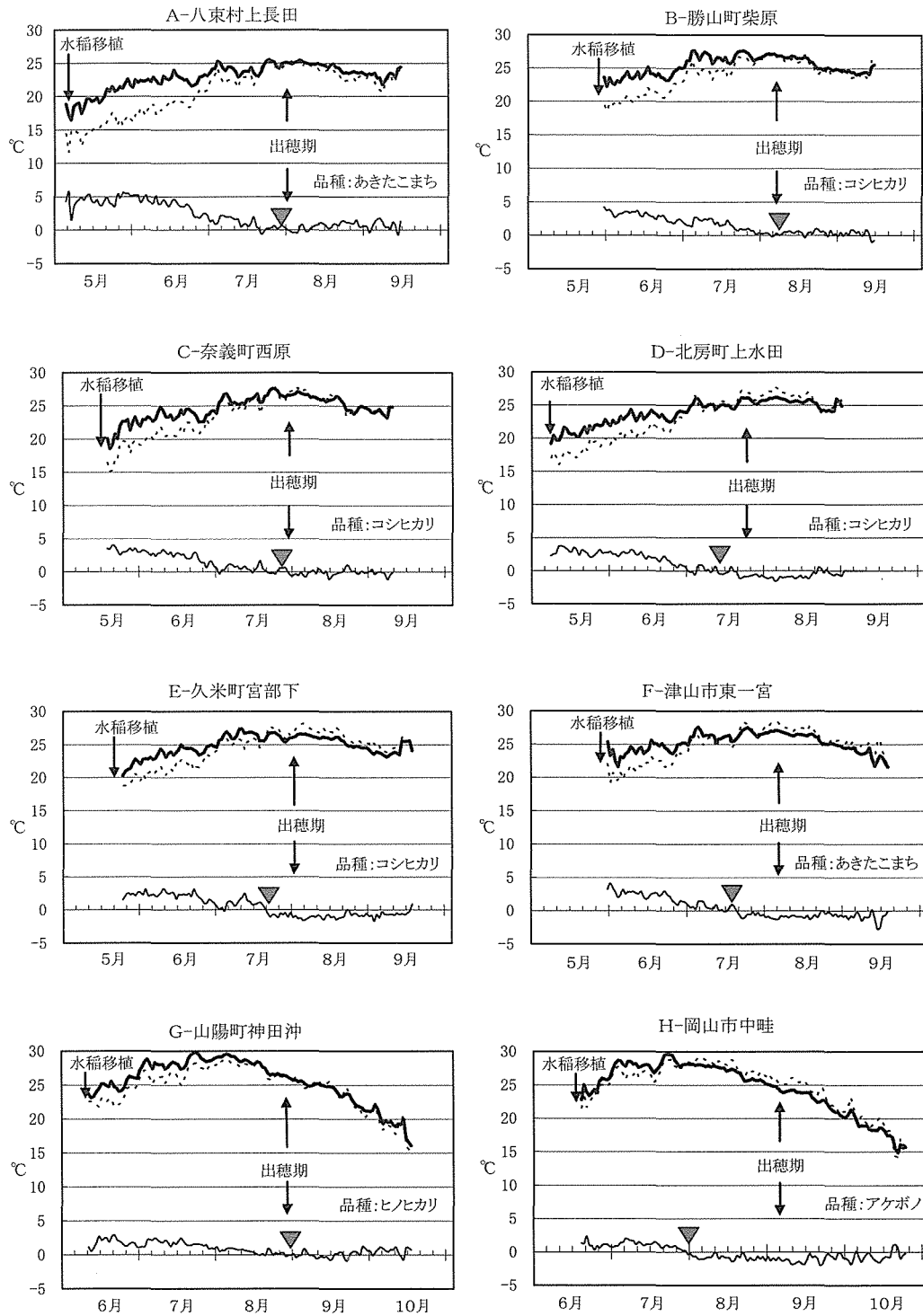
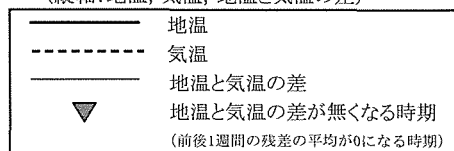


図1 各観測地点における地温及び気温の推移

(日別平均値, 3～5か年の平均値)

(縦軸: 地温, 気温, 地温と気温の差)



た。最高分げつ期以降の地温は、気温より約1℃低く推移した。地点Hでは、地温と気温が同程度になる時期が他の地点より早く最高分げつ期頃であり、このときのLAIは約5、相対照度は約15%であった。

水稻生育初期の地温は、全地点において気温よりも高かった。水稻生育初期における地温と気温の差は約1～5℃で、移植後1か月の平均気温と有意な負の相関が認められた(図2, $r=0.959$, $p<0.001$)。地温と気温の差は、いずれの地点においても生育の経過とともに小さくなり、地点Hを除き、おおむね出穂期頃には気温と同程度となった。出穂期以降の地温は、気温と同程度あるいは気温よりも低く推移した。

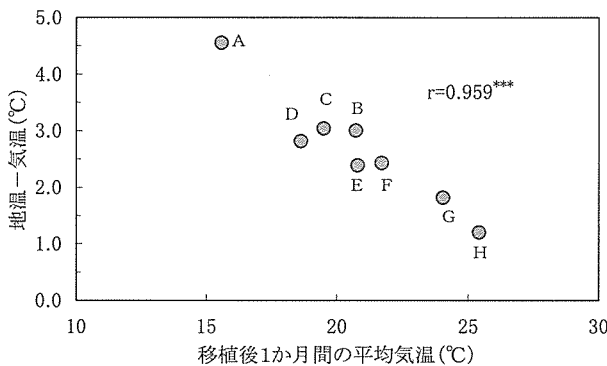


図2 水稻生育初期における気温と地温の関係

2. 水稻植被が地温に及ぼす影響

植被区と裸地区の地温は、移植初期は同程度で推移し、移植後約30日目頃から植被区が裸地区より約1～2℃低く推移した(図3)。LAIは、移植10日後頃から増加し始め、移植約30日後に1、約85日後の出穂期に最大値4.4を示した。LAIの増加とともに地表面に到達する日射が減少した(図4)。

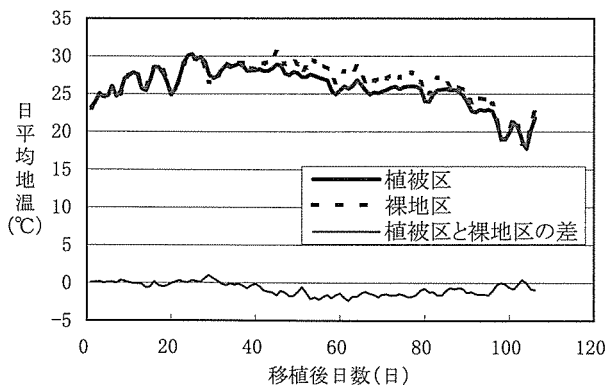


図3 水稻植被が地温に及ぼす影響

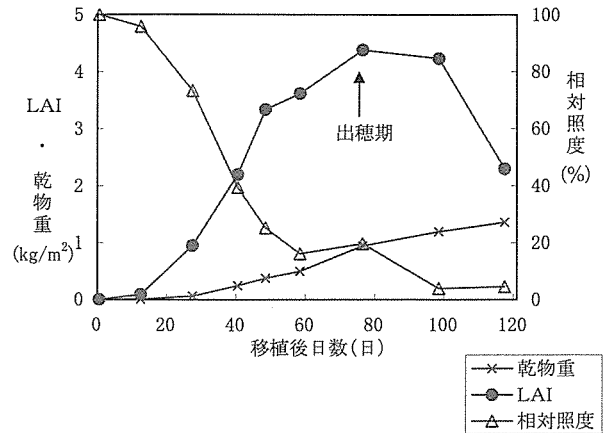


図4 葉面積指数 (LAI)、乾物重及び植被下の相対照度の推移 (地点G)

考 察

県内全域に被覆肥料を用いた全量基肥施肥技術を展開していくために、水田の地温データは必須である。水稻栽培下の地温は、その地域の気象条件や水稻の植被等の影響を受け変化すると考えられ、これらの要因が水田地温へ及ぼす影響について明らかにする必要がある。そこで、気温の違いが地温に及ぼす影響および水稻の生育に伴う地温の変化について検討を行った。

本調査結果において、移植初期の地温と気温の差は、移植後1か月の平均気温が最も低い県北の地点Aでは大きく、同時期の平均気温が最も高い県南の地点Hでは小さかった(図2)。大上・小野(2000)が水田の熱収支特性について検討した結果、気温の上昇に伴ってボーエン比(顕熱輸送量/潜熱輸送量)が低下する傾向を認めており、また近藤(2000)も、大気境界層の熱収支において、ボーエン比の気温依存性を論じ、一般に、高温のときボーエン比は小さくなるとしている。つまり、気温が高くなれば水面からの蒸発量が大きくなり、ボーエン比が大きい低温時に比べて潜熱輸送(放熱)が大きくなり、地温と気温の差は小さくなると考えられる。このことから、岡山県下における移植初期の地温と気温の差は県北で大きく県南で小さいと考えられた。

その後、県南、県北を問わず水稻の生育経過とともに地温と気温の差が次第に小さくなった。これは、中西・山田(1957)の報告でも認められており、水稻植被下においては、水稻の繁茂に従ってLAIが大きくなり、水面に到達する日射量が指数的に減衰していくためと考えられる(図4)。このことは、Uchijima(1961)、岩切(1964)も報告しており、入射する太陽光の減少によって地温の上昇が少なくなったためと考えられた。

地温に対する水稲群落の影響が現れる時期は、伊藤（1996）によると LAI が 1.0 を超えるころとされ、Uchijima（1961）、岩切（1964）は、水稲植被下水面の熱収支特性において顕熱伝達係数の減少が始まる時の LAI はそれぞれ 0.3、0.7 としている。本調査において、年次あるいは地点によって LAI に欠測値があるため、Horie（1987）の推定モデルを用いて観測地点の気温から各地点の LAI を推定した結果、地点 B～H では、地温と気温の平行関係が失われる時期は移植約 30 日後で（図 1）、その時の LAI は 0.6～0.9 であった（表 2）。一方、移植時の気温が低い地点 A では、植被の影響は移植後 40 日頃からみられ、この時の LAI は 0.9 であった。本調査においては、地温と気温の平行関係が失われる時期の LAI は 0.6～0.9 であると推定され、伊藤（1996）、Uchijima（1961）、岩切（1964）が示した 0.3～1.0 の範囲であった。したがって、地温と気温の関係から推測した場合、植被が地温に及ぼす影響は、岡山県下においては LAI がおおむね 0.6～0.9 に到達した時期以降であると考えられた。

Uchijima（1961）、岩切（1964）の観測結果によると、水温と気温が同程度になる時期はほぼ出穂期頃であったとみられ、本観測結果における地温と気温の関係とおおむね一致した。一方、この傾向が大きく外れた地点 H については生育前半から水稲の生育がおう盛で、最高分けつ期頃には稲葉（1991）が示した最適葉面積 4.2～5.9 に既に達しており、他地点の出穂期頃と同等の日射環境が形成されていたことから、田面に到達する日射量が減少して地温と気温が同程度になったと考えられた。品種によって草姿が異なるため、LAI だけを指標として植被層の影響を評価することは難しいが、地点 H のように生育がよりおう盛な場合は、地温と気温が同程度になる時期が出穂期よりも早くなるものと考えられる。

出穂期以降の地温については、調査地点によって気温と同程度を示す場合と気温より若干低い値を示す場合とがあった。この違いは、出穂期から成熟期にかけて LAI は一般的に漸減していくものの、出穂後の日射環境や水管理、根の活力及び病虫害の発生等による下葉の枯れ上がりや倒伏の発生によって植被の地温への影響が異なる

ためと考えられる。

以上から、岡山県下における水稲栽培期間中の地温変化を総括した。まず、水稲生育初期の地温は気温よりも高く、その差は移植 1 か月間の平均気温と負の相関を認め、約 1～5℃の差であった。その後、水稲の繁茂に伴って LAI が約 0.6～0.9 に到達してからは、その差が小さくなり、出穂期頃には気温と同程度となった。出穂期以降は気温と同程度かやや低く推移した。これらの結果は、今後、県下全域における被覆肥料の窒素溶出予測並びに全量基肥施肥技術の確立に寄与するものと考えられる。

摘 要

被覆肥料の窒素溶出予測に必要とされる水田地温について、気象条件が異なる岡山県下の 8 地点で観測を行い、水稲栽培期間中の地温の変動を 1998～2002 年の 5 年間にわたって調査した。

水稲生育初期の地温は、気温よりも高く、その差は移植 1 か月間の平均気温と負の相関を示し、約 1～5℃の差であった。その後、水稲の繁茂に伴って LAI が約 0.6～0.9 に到達してからはその差が小さくなり、出穂期頃の地温は気温と同程度で、これ以降は気温と同程度かやや低く推移した。

引用文献

肥料年鑑（2003）肥料協会新聞部、東京、439p.
Horie, T（1987）A Model for Evaluating Climatic Productivity and Water Balance of Irrigated Rice and Its Application to Southeast Asia, Southeast Asian Studies, 25: 62-74.
稲葉光國（1991）葉層構造改善による増収理論、農業技術体系作物編、第2-1巻、農文協、東京、技104の2-104の21
石橋英二（2004）岡山県の農業と土壌肥料、土肥誌、75: 623-624.
石橋英二・金野隆光・木本英照（1992）反応速度論的方

表 2 各観測地点における移植 1 か月後の LAI の推定値

地点	A	B	C	D	E	F	G	H	平均
LAI	0.3	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7

注）LAI は各地点の日別気温値（1998～2002 年の平均値）を Horie（1987）のモデルに代入し求めた。計算式に必要な係数は 1999 年のデータによって決定し、この係数による LAI の推定誤差 RMSE は 0.3 であった

- 法によるコーティング窒素肥料の溶出評価, 土肥誌, 63: 664-668.
- 伊藤信 (2003) 被覆肥料の効率的施肥法, 季刊肥料, 94: 68-76.
- 伊藤純雄 (1996) 水田の地温にかかわる圃場環境要因の評価について, 土肥学会講演要旨, 42: 298.
- 岩切敏 (1964) 水稻植被の繁茂にともなう水面熱収支特性の変化について, 農業気象, 19: 89-96.
- 川島長治・平野哲也 (1982) 水稻における葉面積の簡易測定法について, 日作紀, 51: 393-394.
- 小林新・藤澤英司・久保省三・羽生友治 (1997) ガウス補正法による溶出モデルの改良, 土肥誌, 68: 487-492.
- 近藤純正 (2000) 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 東京, 324p.
- メッシュ気候値2000 (2002), 気象庁, 東京, CD-ROM
- 中西幸生・山田稔 (1957) 全国的視野からみた水田水温の特性についての一考察, 水温の研究, 1: 173-182.
- 大上博基・小野啓子 (2000) 水田の熱収支特性に及ぼす気象条件と群落抵抗の影響, 農土論集, 208: 453-460.
- 土地利用メッシュ (1997) 国土数値情報 L03-09M, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- Uchijima, Z (1961) On Characteristics of Heat Balance of Water Layer Under Paddy Plant Cover, Bulletin of the N.I.A.S. Ser., A8: 243-265.

Summary

To estimate the amount of nitrogen release from coating fertilizers, variations of the soil temperature in paddy fields during rice cultivation were monitored at distinct eight fields in Okayama prefecture for five years (1998~2002).

In the early growth stage, the soil temperatures were approximately 1~5 °C higher than the air temperatures in the paddy fields. The values of these differences showed negative correlation with the average temperatures for one month after transplanting and gradually decreased after the leaf area index (LAI) reached at 0.6~0.9, which the plants grew luxuriantly. In the heading stage, the soil temperatures were the same level as the air temperatures, and after the heading stage the soil temperatures showed similar or slightly low against the air temperatures in the paddy fields.