

水ストレス勾配条件下のイネ葉温に及ぼす 施肥窒素の影響

Influence of Nitrogen Application Rates on Leaf Temperature of Rice Grown under Continuous Water Stress Gradients

藤 井 道 彦
Michihiko FUJII

（平成6年10月11日受理）

Abstract

Under continuous water stress condition by slope type system, influence of nitrogen application rates on leaf temperature of rice was tried to be detected by continuous measurements of leaf-air temperature difference by thermocouple. Akihikari (japonica lowland rice) was used for the cultivar of the measurements. Three different nitrogen application rates, low fertilizer level plot (L.F.), standard fertilizer level plot (S.F.) and high fertilizer level plot (H.F.), were set by three slope type systems. Differences were not detected in soil pF among three nitrogen application rate plots by slope type systems. In W1 plot (flooded plot), leaf-air temperature difference in H.F. was lowest. On the contrary, in W5 plot (severe stress plot), leaf-air temperature difference in H.F. increased, but that in L.F. was maintained low. There were not differences in top dry weight at harvest among nitrogen application rates. In W5, transpiration rate in L.F. seemed to be high because of low leaf temperature. But it seemed that water use efficiency in L.F. was lower than those in S.F. and in H.F.. The reduction rates in dry weight in W5 from that in W1 were lower in L.F. than in H.F.. And energy use efficiency seemed to be lower in L.F. than in H.F.. In severe water stress conditions in field, low nitrogen application rate seems to be appropriate from this experiment. But field experiment seems to be needed to determine the appropriate nitrogen application rate under water stress condition.

前報³⁾では、段階的な水ストレス条件を容易に設定することが可能な傾斜装置を作製し、熱電対によりイネの葉温の連続測定を行い、段階的な水ストレス条件下における葉温の品種間差異について検討した。

本研究は、水ストレス条件に適応した栽培技術を、生理的に明らかにすることを目的として行ったものである。段階的な土壤水分勾配条件を設定するため、前報³⁾と同様の傾斜装置を用
本研究の一部は、財団法人 新技術開発財団の奨学寄付金によるものである。

い、異なる施肥レベルが、水ストレス条件下におけるイネの乾物生産に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。また、異なる施肥レベル下における水ストレス状態の差を、非破壊かつ連続的に捉えるため、熱電対による葉温の連続測定を行った。葉温の測定により、異なる施肥レベルにおける水ストレス条件下のストレス状態の診断や、生長予測が可能となると考えられる。

水ストレスと施肥レベルとの相互作用については、圃場で施肥量の違いがイネの葉身水ポテンシャルと収量に及ぼす影響について検討した例¹⁹⁾や、ポットによる研究では、水ストレス条件下でイネの光合成、蒸散、水利用効率について、多肥と少肥の比較を行った例¹⁵⁾が報告されている。また、コムギ^{12,13)}やトウモロコシ²⁾、ワタ¹⁶⁾において、施肥レベルが葉身水ポテンシャルの低下に伴う気孔抵抗の変化に及ぼす影響についての報告がなされている。コムギについては、真昼の特定時間のみに放射温度計によって葉温を測定し、異なる施肥レベル間で作物水ストレス指数(CWSI)の比較を行った例¹⁴⁾がみられる。しかし、葉温の連続測定は行われておらず、また水ストレス条件下のイネの葉温に対する施肥レベルの影響についてはほとんど報告されていない。葉温は、熱電対により非破壊的な連続測定が可能であり³⁾、水ストレス条件に適応した栽培技術の生理作用を明らかにしていく上で、水ストレス条件下における葉温の施肥レベル間差異について明らかにすることは、重要であると考えられる。

本研究では、傾斜装置⁹⁾による段階的な水ストレス条件下における葉温の施肥レベル間差異について、熱電対による連続測定を行い、検討した結果について報告する。

材料と方法

実験には、日本型水稻のアキヒカリを供試した。アキヒカリは、出穂日が陸稲に近い早生品種であるため、前報⁹⁾において陸稲との比較に用いた品種であり、また耐肥性品種であるため、施肥レベルの設定が容易な品種である。1993年8月9日に播種し、9月14日に、条間12 cm、株間7 cmの1本植えで3台の傾斜装置⁹⁾に移植した。なお、各区の両端の列はボーダーとした。

傾斜装置は、土壤を傾斜させ、水面からの距離の違いによって、湛水区(W1区)から強ストレス区(W5区)までの、土壤水分の異なる5段階の処理区を設定したもので、奥行き180 cm、幅75 cm、高さ30 cmで、各処理区は奥行き45 cm、幅75 cmである。W2区からW5区までのセットの周囲の水深は5 cmに保った。傾斜装置は3台用い、それぞれ少肥区(L.F.)、標肥区(S.F.)、多肥区(H.F.)として、無加温のガラス室内に設置した。傾斜装置内には、静岡大学教育学部自然観察実習地の山土を充填した。施肥は化成肥料(5-5-5)を用い、元肥として9月9日に10 a当りの窒素成分の相当量で、少肥区2 kg、標肥区4 kg、多肥区8 kgを施肥し、追肥として10月5日に少肥区10 a当り1 kg、標肥区2 kg、多肥区4 kg、11月7日に標肥区1 kg、多肥区2 kgを与え、合計の窒素成分量は、10 a当り少肥区3 kg、標肥区7 kg、多肥区14 kgとした。標肥区は、慣行栽培の施肥レベルに相当する。また、少肥区は慣行栽培の施肥レベル^{17,21)}よりも少肥条件であり、多肥区は慣行栽培の施肥レベルの約2倍の多肥条件である。移植後は確実に活着するように土壤表面に灌水したが、移植2日後の9月16日以降は灌水を停止し、段階的な水ストレス処理を開始した。

W1区からW5区までの標肥区ならびに、W1、W3、W4、W5区の少肥区と多肥区について、葉気温差を連続測定した。各区の中央付近から代表的な1個体を選び、銅-コンスタンタン熱電対を用いて、完全展開した上位3葉について、移植後26日の10月10日から移植後73日の11月26日まで、平均葉気温差を連続測定した。熱電対は、直径0.1 mmの銅線とコンス

タンタン線を用い、銅線とコンスタンタン線の接点を、交互に葉温測定部と気温測定部とした。そして、銅線とコンスタンタン線の対を3組直列に接続し、葉温と気温の差を直接測定した³⁾。気温測定部は、直射日光を避けるために、内側を黒く塗った発泡スチロール製の気温測定ハウス³⁾内に入れた。また、葉温測定部は、約5 mm角の絆創膏で葉身の裏側に接着し、葉気温差を直接測定した。なお、葉温測定部は、葉身の展開とともに上位葉に移動させた。熱電対の両端は銅線に接続し、銅線をデータロガー (Campbell 社製 21X) に接続して測定を行った。また、測定前には各熱電対の組についてキャリブレーションを行った。葉気温差の測定は30秒毎に行い、30分毎の平均値としてメモリーに記録した。データは、2-3日おきに、RS232C インターフェイスを介して、パソコンに転送した。

本研究では、3台の傾斜装置を用いて実験を行ったが、各傾斜装置間の土壌水分の差について検討するため、テンシオメーターを用いて、3台の傾斜装置の各区の深さ10 cmにおける土壌マトリックポテンシャルを継続的に測定した。また、日射センサー (Licor 社製 LI200S) を用いて、実験期間中の日射量を測定した。

地上部乾物重の測定は、各区について水ストレス処理開始時の9月15日および、収穫時(W1区は12月13日、W2区は12月14日、W3区は12月15日、W4区は12月16日、W5区は12月17日)に抜き取り、根を切除し、通風乾燥機によって80°Cで48時間以上乾燥させた後に行った。なお、W1区からW4区では、10月30日に収穫日に達した。なお、ここでは収穫した穂数の割合が穂数全体の50%以上となった日を収穫日とした。一方、W5区における収穫は11月6日に始まったが、収穫までに収穫日には達しなかった。

結果

1. 地上部乾物重

収穫時における個体当り地上部乾物重は、湛水区のW1区から強ストレス区のW5区へと水ストレス段階が強度になるにつれて減少したが、減少の程度は施肥レベルによって大きく異なった (Fig.1)。W1区では、多肥区 (H.F.) の個体重が4.5 gと他の施肥区より高く、標肥区 (S.F.) の個体重は3.8 gと多肥区の84%の値となり、少肥区 (L.F.) のそれは1.9 gで、標肥区の乾物重の半分であった。W2、W3区では乾物重は減少したが、多肥区が最も高く、少肥区が最も低いという傾向はW1区と同様であった。しかしながら、W4区では少肥区と標肥区の個体重の差はほとんどなくなった。さらにW5区では、多肥区の乾物重も急激に減少し、いずれの施肥レベルにおいても地上部乾物重は0.3 gで、施肥レベル間の差は認められなかった。

2. pF の推移

標肥区、少肥区、多肥区は、同一サイズの3台の傾斜装置を用いて、水ストレス処理を行ったため、各施肥区毎にpFを測定した。水ストレス処理期間中における、移植後11日目である9月5日以降の深さ10 cmにおけるpFは、W2区では約1.0、W3区では約1.3、W4区では約2.0、W5区では約2.8であった (Fig.2)。施肥レベルごとに異なる傾斜装置を用いたが、各傾斜装置間の差は小さく、とくにpF 1.5以上では、同一水ストレス段階におけるpFの差はほぼ0.2以下で、施肥レベル間でpFの差は小さかった。ただし、W4区の移植後23日目のみでは、標肥区のpFは少肥区および多肥区よりも約0.5高かった。W5区におけるpFは、いずれ

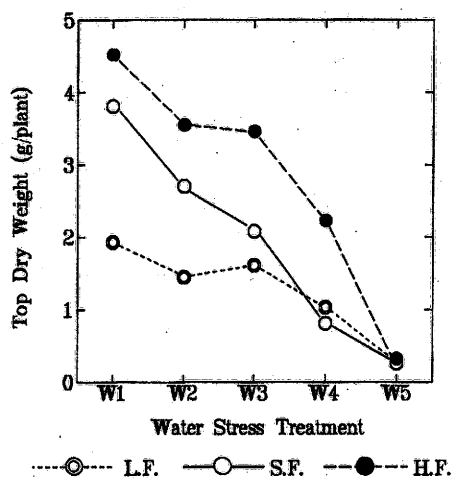


Fig. 1. Top dry weight of rice as influenced by soil water regime and N application rates. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

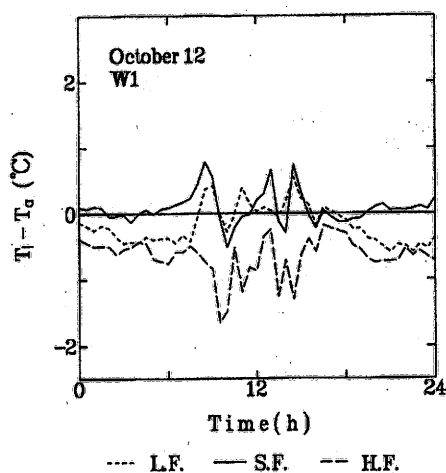


Fig. 3. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W1 plot on October 12, 1993, 28 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

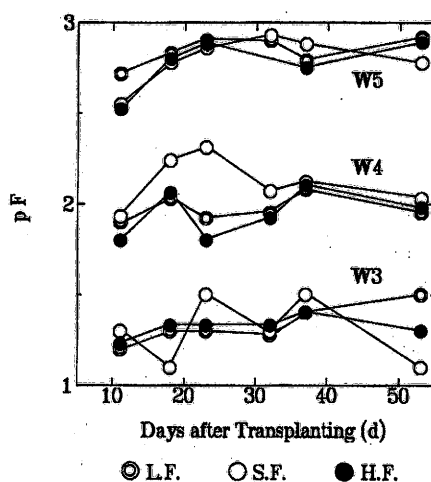


Fig. 2. Changes with day in soil pF at W3, W4 and W5 soil water regimes in L.F., S.F. and H.F. application rates. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

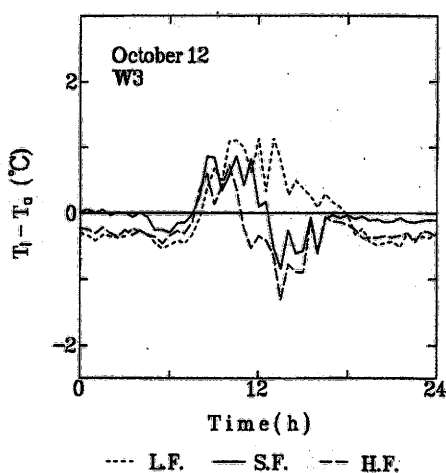


Fig. 4. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W3 plot on October 12, 1993, 28 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

の装置においても、移植後23日目の10月7日までは徐々に上昇したが、その後は、pFはほぼ一定の値を示し、施肥レベル間の差は小さかった。なお、多肥区のW5区における移植後32日目は、テンシオメーターのトラブルにより、値が得られなかった。

3. 葉気温差の日変化

移植後28日目である10月12日(晴天日)における、W1区の葉気温差の日変化をFig.3に示す。なお、この日は出穂前18日目に相当する。いずれの区においても、葉気温差は低く保たれていたが、とくに多肥区の葉気温差は、日中に約 -1°C と負の値を示し、低く保たれていた。一方、標肥区と少肥区の日中の葉気温差は、ほぼ 0°C であった。

10月12日における、W3区の葉気温差の日変化をFig.4に示す。W3区では、葉気温差は午前中には約 1°C と正の値を示し、午後には低下する傾向がみられ、多肥区では午後には約 -1°C と最も低い値を示した。一方、少肥区の葉気温差は高く、午後にも正の値を示した。

10月12日における、W4区の葉気温差の日変化をFig.5に示す。W4区では、日中の葉気温差は正の値を示し、W3区よりも上昇した。しかし、少肥区の葉気温差は約 2°C と高かったのに対し、多肥区では低く、午後には負の値を示した。

10月12日における、W5区の葉気温差の日変化をFig.6に示す。W5区では、葉気温差はさらに上昇したが、W5区ではW4区までとは異なり、多肥区が日中に約 $+4^{\circ}\text{C}$ と、最も高い値を示した。一方、標肥区と少肥区では、日中の最高値が約 $+3^{\circ}\text{C}$ と多肥区よりも低かった。

次に、生育ステージが進んだ、移植後40日目の10月24日における、W1区の葉気温差の日変化をFig.7に示す。この日は、出穂前6日目に相当する。10月24日も、10月12日と同様に

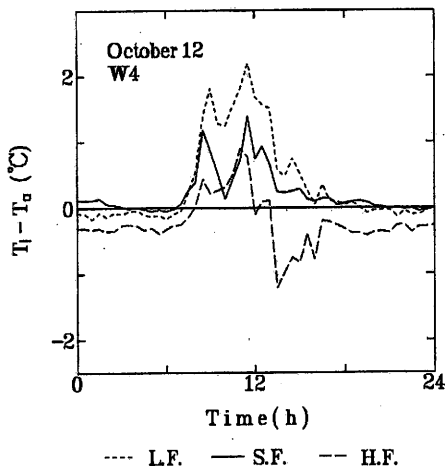


Fig. 5. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W4 plot on October 12, 1993, 28 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

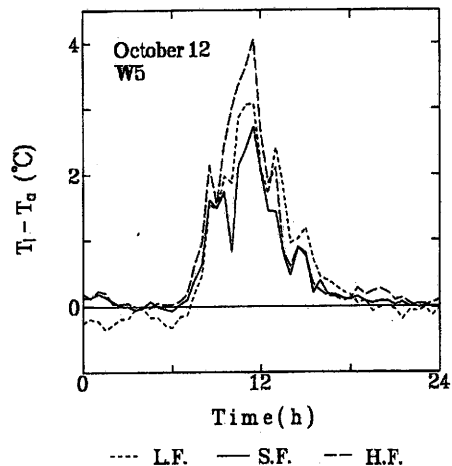


Fig. 6. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W5 plot on October 12, 1993, 28 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

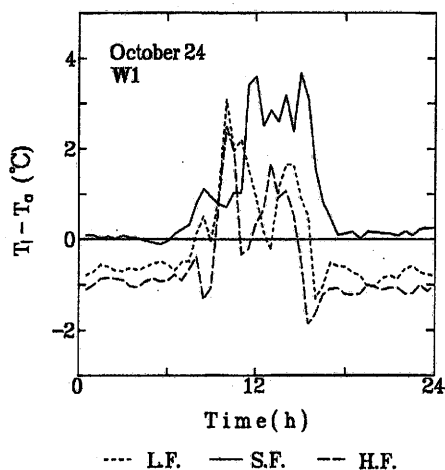


Fig. 7. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W1 plot on October 24, 1993, 40 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

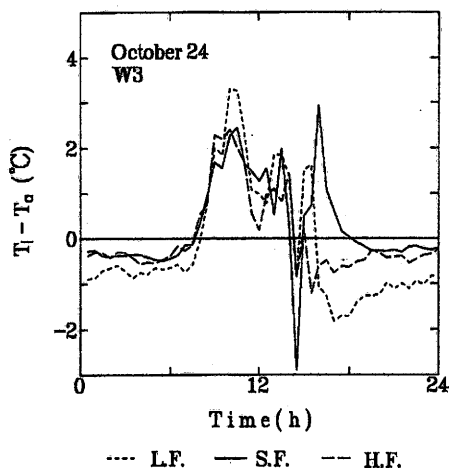


Fig. 8. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W3 plot on October 24, 1993, 40 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

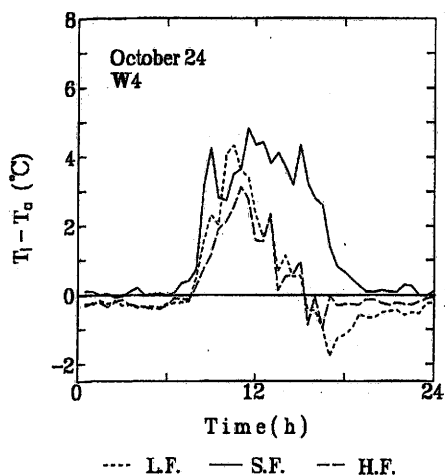


Fig. 9. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W4 plot on October 24, 1993, 40 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

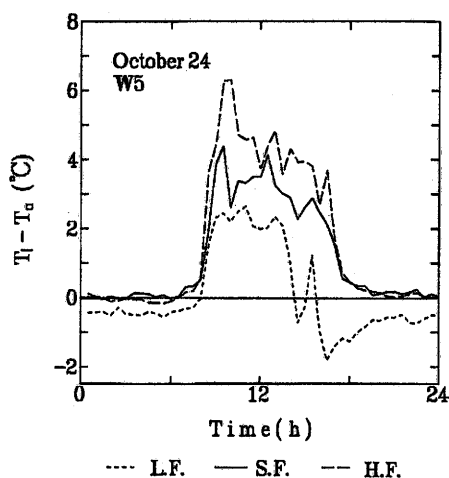


Fig. 10. Diurnal changes in leaf-air temperature difference in W5 plot on October 24, 1993, 40 days after transplanting. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

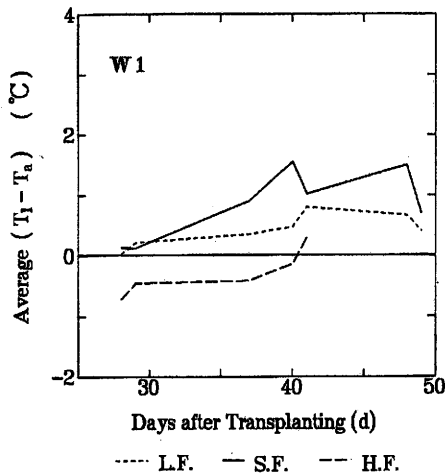


Fig. 11. Daily changes in day average leaf-air temperature difference between 6:00 and 18:00 in W1 plot. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

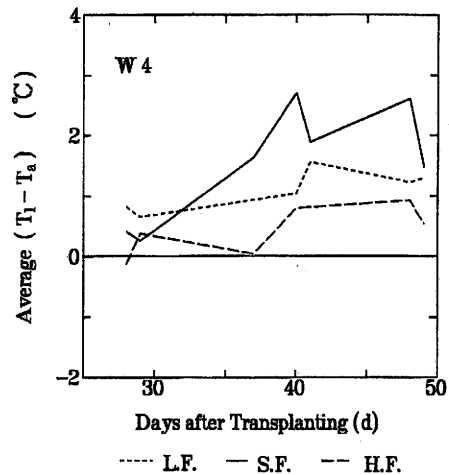


Fig. 12. Daily changes in day average leaf-air temperature difference between 6:00 and 18:00 in W4 plot. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

晴天であったが、湛水区であるW1区の葉気温差は日中に約 3°C と大きく上昇した。しかし、多肥区では午後には約 -2°C と負の値を示して葉気温差は低下した。

10月24日におけるW3区では、日中の葉気温差の最高値は約 3°C でW1区とほぼ同様であった (Fig.8)。午前中の葉気温差の最高値を施肥レベル間で比較すると、多肥区ではやや低かったのに対し、少肥区では最も高かった。

10月24日におけるW4区では、葉気温差はさらに上昇した (Fig.9)。とくに、標肥区では葉気温差の最高値は約 $+5^{\circ}\text{C}$ まで上昇し、また午後も高い値を示した。一方、少肥区と多肥区では、標肥区より葉気温差は低く保たれ、午後には負の値を示した。日中の最高値では、多肥区が最も低い値であった。

10月24日におけるW5区では、葉気温差は上昇したが、W4区までとは異なり、多肥区の葉気温差が、少肥区ならびに標肥区よりも高く、日中の最高値は約 6°C まで上昇した (Fig.10)。これに対し、標肥区では葉気温差の最高値は約 4°C であった。一方、少肥区では最高値は約 3°C と低く保たれ、また午後には葉気温差が大きく低下し、負の値を示した。

晴天日であった、移植後28日目の10月12日、10月13日、10月21日、10月24日、10月25日、11月1日、移植後49日目の11月2日における、6時から18時までの日中の葉気温差の平均値の経日変化を Fig.11 に示す。なお、多肥区では、11月1日と11月2日の値は断線のために得られなかった。W1区においては、多肥区では標肥区と少肥区よりもつねに低い傾向が認められた。また、湛水区であるW1区において、生育ステージの進行に伴って、葉気温差は上昇する傾向が認められた。

W4区における、日中の葉気温差の経日変化をFig.12に示す。W4区における葉気温差の経日変化はW1区よりも上昇したが、W1区と同様、多肥区ではほぼいずれの測定日においても、最も低い値を示した。また、少肥区は測定期間の初期を除き、標肥よりも低かった。

W5区における、日中の葉気温差の経日変化をFig.13に示す。W5区における葉気温差の経日変化においては、つねに多肥区が最も高い値を示した。一方、少肥区においては、測定期間の初期を除いて、多肥区と標肥区よりも低い値を示した。

考察

1. pFについて

本研究では、同一サイズの3台の傾斜装置を用いて、標肥区、少肥区、多肥区における段階的な水ストレス条件を設定した。このため、異なる傾斜装置における各施肥レベル間での土壌水分の差の有無を明らかにするために、移植後11日目の9月25日から移植後53日目の11月6日まで、pFの測定を行った(Fig.2)。傾斜装置は、湛水区であるW1区と、W2区からW5区までのセットから構成されている³⁾。W2区からW5区までのセットでは、水は水面に接したW2区から、隣接する区を順に通ってW5区へ移動する。このため、水面に近いW2区やW3区における生育が盛んな場合には、W2区、W3区において蒸散による水分消費量が多くなり、移動する水分が減少することが考えられる。このため、多肥区の方が標肥区や少肥区よりもW4区、W5区における土壌乾燥程度が強度となる可能性が考えられる。しかしながら、ストレスが強度なW4区およびW5区のいずれの区についても、深さ10 cmにおけるpFで、多肥区の方が標肥区と少肥区よりも高い値を示す傾向はみられず、とくにW5区では、水ストレス段階が同一であれば、pFには各施肥レベル間でほとんど差は認められなかった(Fig.2)。したがって、3台の傾斜装置の土壌乾燥条件はほぼ同一であったと見なすことができる。

2. 乾物重について

湛水区であるW1区では、多肥区の収穫時地上部乾物重は高く、少肥区の2倍以上の値であったが、水ストレス段階に伴う乾物重の減少が大きかった(Fig.1)。これに対し、水ストレス段階に伴う少肥区の乾物重の減少は小さく、W4区では標肥区よりもやや高い値を示し、またW5区においては多肥区との差も認められなかった。このように、傾斜装置を用いた土壌水分勾配による強度の水ストレス条件下では、少肥区の生育が標肥区や多肥区と同程度の生育を示すことが明らかとなった。これは、著者らがポット栽培において得た傾向⁴⁾と同様であった。施肥量の増加が乾物生産に反映されなかったことから、強度の水ストレス条件下では少肥栽培が適していると考えられる。

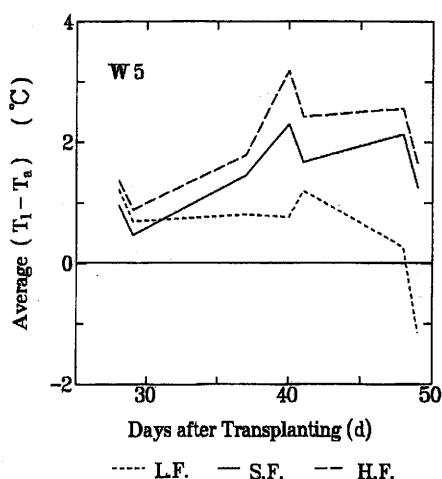


Fig. 13. Daily changes in day average leaf-air temperature difference between 6:00 and 18:00 in W5 plot. L.F., S.F. and H.F. indicate low fertilizer level plot, standard fertilizer level plot and high fertilizer level plot, respectively.

3. 葉気温差について

葉気温差では、W1区において多肥区がつねに低く保たれていた (Figs.3,7,11) のに対し、強ストレス区であるW5区では逆に、多肥区が最も高い傾向が認められた (Figs.6,10,13)。W5区の葉気温差における施肥レベル間差異の傾向は、移植後28日目の10月12日から生育ステージの進行とともに顕著となり、移植後40日目の10月24日には少肥区の葉気温差は多肥区よりも著しく低く保たれた (Fig.10)。このことから、強度の水ストレス条件下であるW5区では、少肥区における水ストレス状態は他の標肥区および多肥区よりも弱く、多肥区の水ストレス状態は最も強度であったと考えられる。一方、軽度の水ストレス条件下であるW3区とW4区では、W1区と同様に多肥区の葉気温差が最も低い傾向にあり、W5区のように多肥区の葉気温差が高く、また少肥の葉気温差が低い傾向は認められなかった (Figs.4,5,8,9,12)。これは、軽度の水ストレス条件下では、蒸散ならびに光合成は、葉身窒素濃度に律速される¹¹⁾ためと考えられる。

圃場条件下のコムギについて、放射温度計を用いて真昼の1時間のみに葉温の測定を行った報告でも、強度の水ストレス条件下では、施肥レベルの増大とともに、葉温により求められた作物水ストレス指数 (CWSI) が上昇する傾向が認められている¹⁴⁾。本研究では、熱電対によって葉温の連続測定を行っているため、日中の気象条件が変動するような条件における、水ストレス状態の施肥レベル間差異の定量化に対しても有効であると考えられる。

湛水区であるW1区における葉気温差は、出穂前18日目 (移植後28日目) に相当する10月12日には低かったが (Fig.3)、出穂前6日目 (移植後40日目) に相当する10月24日には、葉気温差は日中に大きく上昇した (Fig.7)。なお、10月12日と10月24日は同様の晴天で、日積算日射量は、それぞれ 15.4 MJm^{-2} 、 14.7 MJm^{-2} とほとんど差は認められなかった。生育ステージの進行に伴って、W1区の葉気温差が上昇する傾向は、葉気温差の経日変化を示した Fig.11からも認められる。W1区はつねに湛水を保っていたことから、葉温の上昇は土壤乾燥によるとは考えられない。したがって、根圏に水が存在するにもかかわらず、植物体の老化によって植物体内の通導抵抗⁹⁾が増加する¹⁰⁾ために気孔抵抗が増大し、葉温は上昇しているものと考えられる。しかし、多肥区の葉気温差は午後には負の値を示して低く保たれた。

4. 葉気温差と乾物重との関係

葉温が気温より低く保たれている状態では、気孔を開き蒸散が盛んに行われていると推測することができる。さらに、飽差が一定の環境条件下においては、水利用効率¹⁵⁾に著しい差がなければ、蒸散と光合成との間には比例関係が成立することが明らかとなっている^{1,9)}。このため、同一環境条件下では、葉温が低い方が光合成が盛んであると推測できる。したがって、W1区では多肥区の葉温が最も低かったために、この区における光合成速度が大きく、収穫時地上部乾物重が最も大きくなったと考えられる。一方、W5区においては多肥区の葉温は高く、少肥区の葉温は低かったが、収穫時地上部乾物重には差は認められなかった。

10月24日において、W5区では多肥区の葉気温差が、少肥区ならびに標肥区よりも顕著に高かった。この結果、多肥区の乾物重はW5区において急激に減少している (Fig.1) のものと考えられる。少肥区では、葉気温差が夕方に低下し、負の値を示す傾向が認められた。このことから、少肥区では、夕方には水ストレス状態から回復し、蒸散を行っているものと予想される。

また、W4区の葉気温差の経日変化では、多肥区の葉気温差が最も低く、標肥区の葉気温差は最も高い傾向にあった (Fig.12)。多肥区では水ストレス状態が最も軽度で、その結果、地上

部乾物重は他の施肥レベルよりも大きくなったと考えられる (Fig.1)。一方、標肥区では蒸散および光合成の抑制が大きく、収穫時地上部乾物重は低くなったものと考えられる。

本研究の結果では、最も強度の水ストレス条件であるW5区において、少肥区の葉温が標肥区ならびに多肥区の葉温よりも顕著に低下し (Figs.10,13)、また少肥区の収穫時地上部乾物重は、W5区では多肥区とほぼ同じ値を示した。W1区における収穫時地上部乾物重は、多肥区で4.5g、標肥区で3.8g、少肥区で1.9gであったが、W4区では多肥区で2.2g、標肥区で0.8g、少肥区で1.0gとW1区の半分以上に低下し、W5区ではいずれの施肥区でも0.3gとW1区の約1/10にまで極端に低下した (Fig.1)。乾物重の値からは、圃場条件下で問題となる、農業生産における対象レベルの水ストレス程度と比較して、W5区の水ストレスははるかに強度であるとも考えられる。しかしながら、深さ10cmにおけるpFは、W4区において約2、W5区において約2.8であった (Fig.2)。圃場の水ストレス条件下では、深さ10cmにおけるpFは2.5以上の値を示すことも多い⁹⁾。したがって、深さ10cmにおける土壌のpFの値から考えると、W5区における水ストレスの強度は、圃場条件において経験する水ストレスの強度に近いと考えられる。このため、本研究において、W5区の乾物重がW1区と比較してきわめて抑制されたのは、移植2日後以降は土壌表面への灌水を停止し、ほぼ全生育期間にわたり水ストレス処理を行ったため、初期生育が極端に抑制されたためだと考えられる。

このことから、圃場条件においても、強度の水ストレス条件下では、本研究のW5区と同様に少肥区の葉温が低く保たれ、多肥区と同程度の乾物重を示すことが予想される。ただし、圃場の水ストレス条件において適した施肥量については、地力や灌漑用水などが傾斜装置とは異なるため、傾斜装置による本実験だけでは明らかではなく、さらに圃場実験において検討する必要がある。また、適切な施肥量は水ストレスの強度によって変化すると考えられるため、対象とする水ストレスの強度に対応して、適量を施肥することが望ましいと考えられる。

水ストレス条件下で、少肥区の葉温が多肥区よりも低く保たれたのは、少肥の方が多肥よりも土壌深層にまで根を伸長させる傾向にある⁹⁾ため、土壌深層の土壌水分を利用可能であるためと考えられる。

W5区において、少肥区の葉温は、標肥区および多肥区よりも低かったが、この区の収穫時地上部乾物重は他の施肥レベル区よりも大きくなかった。葉温は気孔の開閉に影響されるが、葉温では葉面積の拡大は捉えられないため、葉面積に顕著な差がある場合には、葉温の低さが乾物生産の高さに反映されない場合も考えられる。しかし、本研究では施肥レベル間で葉面積に顕著な差は認められなかった。W5区においては、少肥区は葉色が薄かったことから、標肥区や多肥区よりも葉身窒素濃度が低かったものと推定される。光合成は葉身窒素濃度に影響されるため¹¹⁾、少肥区では水ストレスの影響は小さかったが、光合成は葉身窒素濃度に律速されたことが考えられる。また、ポットによる水ストレス条件下のイネにおいて、気孔コンダクタンスの差は小さかったが、多肥区では少肥区よりも葉肉コンダクタンスが高く保たれ、水利用効率が高かったと報告されている¹⁵⁾。このことから、少肥区の蒸散速度が高くても、光合成速度の差は蒸散の差よりも縮小したものと考えられる。したがって、少肥区の水利用効率は低かったものと推定されるが、コムギについても、少肥区の方が多肥区よりも水利用効率が低いことが報告されている⁹⁾。

以上のような原因により、W5区における乾物生産の差は葉温の差よりも縮小したものと考えられる。しかし、各施肥レベルにおけるW5区の乾物重をW1区と比較すると、多肥区は約

1/15であったが少肥区では約 1/7 で、少肥区では多肥区よりも乾物重の減少率は小さかった。

また、水ストレス条件下において、少肥区と多肥区の生育にほとんど差が認められなかったことは、エネルギー効率^{18,20)}から考えれば、乾物重に差が認められなくても少肥区の方がエネルギーの利用効率が高いことを示している。したがって、強度の水ストレス条件下では少肥栽培とすることが、エネルギーの利用効率の高い持続可能な農業を進めていく上で重要であると考えられる。

5. まとめ

以上のように、傾斜装置を用いた水ストレス勾配条件下において、熱電対によって連続測定した葉温の施肥レベル間差異を捉えることができた。その結果、湛水区であるW1区では、多肥区の葉気温差が最も低かった。しかし、強ストレス条件であるW5区では、多肥区の葉気温差は上昇したのに対し、少肥区の葉気温差は低く保たれ、少肥区の水ストレス程度は多肥区および標肥区よりも軽度であることが明らかとなった。

なお、本研究では供試品種としてアキヒカリを用いたが、水ストレス条件下での施肥レベルに対する反応性は、品種により異なることが考えられるため、他品種の傾向についてはさらに検討が必要である。圃場における水ストレス条件においても、傾斜装置による本研究と同様に少肥が適していると考えられるが、圃場において適した施肥量については、傾斜装置と圃場では地力や灌漑用水が異なるため、圃場実験によりさらに検討する必要がある。

W5区において、少肥区の葉気温差は標肥区および多肥区よりも低かったが、収穫時地上部乾物重では差は認められなかった。これは、少肥区では水ストレス程度は軽度であるが、水利用効率が低いと考えられた。しかし、少肥区は標肥区および多肥区よりも、エネルギーの利用効率が高いと考えられる。

本研究では、葉温と乾物生産との関係についての検討を行ったが、葉温と収量との関係については不稔なども考慮する必要がある、今後の課題である。また、本研究では栽培時期が遅かったため、異なる栽培時期における温度や日射量などの環境条件の差が、施肥レベル間差異に及ぼす影響についても、今後の課題である。

要旨

傾斜装置を用いた水ストレス勾配条件下において、イネの葉温の施肥レベル間差異を、熱電対による葉気温差の連続測定により捉えることを試みた。供試品種としてはアキヒカリを用いた。施肥レベルの異なる標肥区、少肥区、多肥区は、3台の傾斜装置を用いて設定したが、各傾斜装置間でpFの差は認められなかった。湛水区であるW1区では多肥区の葉気温差が最も低かったが、強ストレス条件であるW5区では、多肥区の葉気温差は上昇したのに対し、少肥区の葉気温差は低く保たれた。一方、W5区における収穫時地上部乾物重では、施肥レベル間で差は認められなかった。これは、W5区の少肥区では、葉温が低いことから蒸散速度は高かったと推定されるが、水利用効率が標肥区、多肥区よりも低かったものと考えられた。しかし、W1区と比較した乾物重の減少率では、少肥区は多肥区より小さく、またエネルギーの利用効率は少肥区の方が高いといえる。圃場における強度の水ストレス条件においても、少肥栽培が適していると考えられるが、圃場において適した施肥量については、さらに圃場実験により検討する必要があると考えられる。

謝辞

本論文を取りまとめるに当り、京都大学農学部教授堀江武博士に貴重な御助言を頂いた。ここに深く感謝致します。また、貴重な御助言を頂いた静岡大学農学部助手狩野敦博士に、厚く感謝の意を表します。また、図の作製に当り御助力頂いた静岡大学教育学部助教授上田整博士に感謝致します。また、本実験に御協力いただいた、本学教育学部自然観察実習地技官石原清治氏に、謹んで御礼申し上げます。

引用文献

1. 井上吉雄 1987. 作物群落の生産機能および状態の非破壊非接触診断に関する研究 第4報 野外条件下における光合成速度と蒸散速度の定量的関係 日作紀 56 : 474-481.
2. Bennett, J.M., J.W.Jones, B.zur, and L.C.Hammond 1986. Interactive effects of nitrogen and water stresses on water relations of field-grown corn leaves. Agron. J. 78 : 273-280.
3. 藤井道彦 1993. 傾斜装置による水ストレス条件下におけるイネの葉温の品種間差異 静岡大学教育学部研究報告自然科学篇 44 : 51-63.
4. 藤井道彦・堀江武 1989. イネの水ストレス抵抗性に関する生態生理学的研究 1. 栄養生長におけるストレス耐性と品種および施肥レベル 日作紀 58 (別1) : 14-15.
5. 藤井道彦・玉城綾子・堀江武 1991. イネの水ストレス抵抗性に関する生態生理学的研究 4. 水ストレス下での根長の Newman 法による非破壊的経時測定を試み 日作紀 60 (別2) : 19-20.
6. Hetholt, J.J. 1989. Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen- and water-stressed winter wheat. Agron. J. 81 : 464-469.
7. 平沢正・田中一生・宮本大輔・武居理英・石原邦 1991. 生育前半に異なる土壤水分条件で生育したダイズの生育後半の低土壤水分条件における生育および生理・生態的性質の比較 1. 生育、乾物生産、収量の比較 日作紀 60 (別2) : 185-186.
8. Hirasawa, T., M.Tuchida and K.Ishihara 1992. Relationship between resistance to water transport and exudation rate and effect of the resistance on the midday depression of stomatal aperture in rice plants. Jpn. J. Crop Sci. 61 : 145-152.
9. 堀江武 1983. 作物の物質生産と気象 [I] —モデルと測定法— 農及園 58 : 853-858.
10. 小葉田享・塩野健二・武井利彰・勝部淳史・宇高信一郎・今木正 1993. 水田条件下における蒸発要求に対するイネ葉身水ポテンシャル反応 第2報 生育、収量との関係 日作紀 62 : 17-26.
11. 黒田栄喜・玖村敦彦 1990. 水稻個葉の光合成速度における新旧品種間差異 第3報 窒素含量および窒素-光合成関係からみた個葉光合成の品種間差異の生理学的基礎 日作紀 59 : 298-302.
12. Morgan, J. A. 1984. Interaction of water supply and N in wheat. Plant Physiol. 76 : 112-117.
13. Morgan, J.A. 1986. The effects of N nutrition on the water relations and gas exchange characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Physiol. 80 : 52-58.
14. Nielsen, D.C. and A.D.Halvorson 1991. Nitrogen fertility influence on water stress and yield of winter wheat. Agron. J. 83 : 1065-1070.

15. Otoo, E., R.Ishii and A.Kumura 1989. Interaction of nitrogen supply and soil water stress on photosynthesis and transpiration in rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 58 : 424-429.
16. Radin, J.W. and R.C.Ackerson 1981. Water relations of cotton plants under nitrogen deficiency. III. Stomatal conductance, photosynthesis, and abscisic acid accumulation during drought. *Plant Physiol.* 67 : 115-119.
17. Taniyama, T., K.Ikeda, S.V.Subbiah, M.L.N.Rao and S.K.Sharma 1988. Cultivation and ecophysiology of rice plants in the tropics. V. Yield and yield components of several rice cultivars of India, grown under usual cultural methods. 57 : 728-732.
18. 鳥越洋一・高橋英博・伊藤信雄 1994. 水稻の作付規模別エネルギー収支 日作紀 63 (別 1) : 54-55.
19. 津田誠・村田昌清 1992. 施肥量の違いがイネの水ストレスと収量に及ぼす影響 日作東海支部報 114 : 7-8.
20. 宇田川武俊 1976. 水稻栽培における投入エネルギーの推定 環境情報科学 5-2 : 73-79.
21. Wada, G., R.C.Aragones and H.Ando 1991. Effect of slow release fertilizer (Meister) on the nitrogen uptake and yield of the rice plant in the tropics. *Jpn. J. Crop Sci.* 60 : 101-106.