

高温登熟性の高い水稻品種「彩のきずな」の高温条件下における光合成特性

荒川 誠*・岡田雄二*

Photosynthetic Ability under the High Air Temperature of 'SAINOKIZUNA', a Rice Cultivar with Resistance to High Temperature During Ripening Period

Makoto ARAKAWA, Yuji OKADA

要約 水稻品種「彩のきずな」の高温登熟性が高い要因を明らかにすることを目的として、出穂期以後の高温条件下において光合成能、熱画像の表面温度の測定を行った。「彩のきずな」は気孔コンダクタンス、光合成速度、蒸散速度が高く、群落の表面温度は低かった。このことが高温登熟性が高い要因として考えられた。

近年、水稻の高温障害の発生が多く報告されている(農林水産省, 2006)。その対策として、日本各地で高温登熟性の高い品種の育成が進められており、「さがびより」(広田ら, 2009), 「元気つくし」(和田ら, 2010), 「にこまる」, (坂井ら, 2010), 「おてんとそだち」(永吉ら, 2011), 「とちぎの星」(山崎ら, 2012)等が育成された。

埼玉県では 2012 年に「彩のきずな」を育成した(荒川ら, 2013)。「彩のきずな」は、高温登熟性が高く、さらに病害虫複合抵抗性を有し、良質・良食味の多収品種である。

これらの品種のうち、「にこまる」の高温登熟性は、出穂期の茎葉部に非構造的炭水化物を多く蓄積していることを要因としている(森田, 2009)。

今後、さらに地球温暖化が懸念される中、高温登熟性のメカニズムを解明することは、高度耐性品種の育成や高温障害回避技術開発の点からも重要と考える。

土田ら(2006)は、サーモトレーサ等による熱画像により、品種間で高温ストレス耐性を評価できる可能性を示唆している。また、Takai ら(2009)は葉表面温度と気孔コンダクタンスおよび光合成速度と相関関係が認められ、熱画像により光合成

能を評価できるとしている。

そこで、「彩のきずな」の高温登熟性を明らかにすることを目的として、高温登熟性と光合成特性、熱画像による群落の表面温度の関係を調査したところ、いくつかの知見を得たので報告する。

材料および方法

1 光合成量の測定

個葉の光合成量の測定は 2012 年に行った。測定は、光合成測定装置(CIRAS-1, 小糸工業)を使用した。自然光で、株の最長稈の止葉の中央を 2 回測定、平均して 1 株の測定値とし、連続 10 株行った。比較として同熟期の「キヌヒカリ」を測定した。測定日時は、出穂期の 8 月 21 日、日中で最も高温となる 14:30 とした。また、日変化を調べるため、出穂期後 10 日となる 8 月 29 日に 9:00, 11:00, 13:00, 15:30, 16:30 の 5 回測定した。測定時の気象条件は表 1 のとおりである。

2 群落の表面温度の測定

試験区を赤外線サーモグラフィ(サーモギア G100, NEC 製)で撮影し、付属の画像解析ソフト

で約 1 m²の群落温度を計算した。2013 年は 1 画像で全試験区は写らないため、1 画像で 3 試験区写るように撮影し、1 試験区あたり 6 回撮影した。測定日時は、2012 年 8 月 21 日 14:30、2012 年 9 月 7 日 14:00。2013 年は 8 月 13 日 13:30、8 月 14 日 13:30 である。2012 年は比較に、「キヌヒカリ」、「タカナリ」、「ふさおとめ」、「初星」、「元気つくし」、「むさしの 26 号」、「彩のかがやき」、「笑みの絆」、「あかね空」を供試した。測定時の気象条件は表 1 のとおりである。

3 高温登熟性検定

検定は 2012 年に行った。「彩のきずな」、「コシヒカリ」、「キヌヒカリ」、「日本晴」、「ふさおとめ」、「初星」、「元気つくし」、「彩のかがやき」、「笑みの絆」、「あかね空」の 10 品種を供試した。成熟期に生育中庸な 6~8 株を刈り取り、脱穀、籾摺り後、玄米品質を穀粒判別器（サタケ製 RGQ120A）で

2000 粒を調査した。乳白粒、基部未熟粒、腹白粒および背白粒の合計値を白未熟粒とした。

4 耕種概要

光合成量および群落の表面温度の測定について、2012 年は 5 月 31 日播種、6 月 25 日移植。中苗を栽植密度 18.5 株/m²で 3~4 本/株を機械植えた。施肥量は窒素成分で基肥 0.5kg/a、出穂 20 日前をめやすに追肥 0.3kg/a を施用した。約 3a のほ場を半分ずつ「彩のきずな」と「キヌヒカリ」の試験区とした。2013 年は 5 月 29 日播種、6 月 24 日移植。1 穴あたり 4 粒播種したポット苗を栽植密度 18.9 株/m²で機械植えた。施肥量は窒素成分で基肥 0.5kg/a を施用した。1 試験区は 5.9 m²である。

高温登熟性検定は 4 月 9 日播種、5 月 1 日移植、栽植密度 18.5 株/m²で 3 本/株を手植えた。1 試験区は 1 畦 18 株である。施肥量は窒素成分で基肥 0.3kg/a を施用した。

表1 測定時の気象条件

年 月 日	時刻	気温 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)	天気	日最高気温(°C)
2012年8月21日	14:00	35.9	36.0	2.2	快晴	36.7
	9:00	28.6	62.0	1.3	薄曇	
	11:00	31.0	55.0	2.3	薄曇	
2012年8月29日	13:00	33.6	48.0	3.2	薄曇	35.1
	15:00	34.4	43.0	3.1	曇	
	17:00	34.0	44.0	3.0	曇	
2012年9月7日	14:00	32.1	44.0	3.2	快晴	33.1
2013年8月13日	14:00	34.5	44.0	2.5	薄曇	35.2
2013年8月14日	13:00	34.5	46.0	2.8	快晴	35.7

数値は熊谷地方気象台の観測値

結 果

1 光合成特性

「彩のきずな」は、出穂期の高温時における気孔コンダクタンス、蒸散速度、光合成速度、葉肉内の二酸化炭素濃度、いずれも「キヌヒカリ」より高く、葉の表面温度は 0.9°C 低かった(表 2)。

出穂期 10 日後に日変化を調べた結果、13:00、15:00 は出穂期と同様の傾向が認められた。一方、午前中は「キヌヒカリ」との差はなかった(図 1~4)。

2 熱画像による群落の表面温度

2012 年は、「キヌヒカリ」に比べ、出穂期、出穂期 20 日後とも 0.8°C 低かった(表 3)。

2013 年は、「タカナリ」が最も低く、次いで「彩のきずな」であり、供試した品種間には有意な差が認められた(表 4)。

また、「タカナリ」、「彩のきずな」、「むさしの 26 号」、「笑みの絆」、「あかね空」、「彩のかがやき」の低温グループと「元気つくし」、「キヌヒカリ」、「ふさおとめ」、「コシヒカリ」、「初星」、「日本晴」の高温グループの 2 つに分かれた(図 5)。

3 高温登熟耐性

供試した 10 品種の出穂期後 20 日間の平均気温(以後、登熟気温)は 27.6~29.0℃の範囲にあり、白未熟粒の多発条件であった(森田, 2008)。このことから本試験の気象条件で 10 品種間の高温登熟性の比較は可能であると考えた。その結果、「彩

のきずな」、「笑みの絆」、「ふさおとめ」は強と判定された(表 5)。

白未熟粒率と出穂期の群落の表面温度とでスピアマンの順位相関検定を行ったところ、相関関係は認められなかった(図 6)。

表2 出穂期の「彩のきずな」の光合成特性(2012年)

品種名	光合成有効放射 W m ⁻²	外気温 ℃	葉表面温度 ℃	蒸散速度 mmol m ⁻² s ⁻¹	気孔コンダクタンス mmol m ⁻² s ⁻¹	光合成速度 μmol ⁻² mol ⁻¹	葉肉CO ₂ 濃度 μmol mol ⁻¹
彩のきずな	1343.5	36.3	34.5	10.4	488.7	25.7	255.9
キヌヒカリ	1370.9	36.4	35.4	8.6	339.5	22.3	236.1
t 検定	n.s.	n.s.	**	**	**	**	**

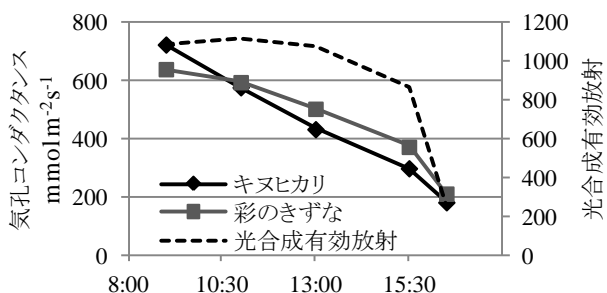


図1 出穂期10日後の気孔コンダクタンスの日変化(2012年)

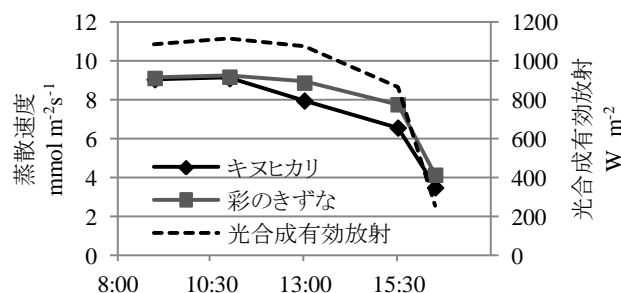


図2 出穂期10日後の蒸散速度の日変化(2012年)

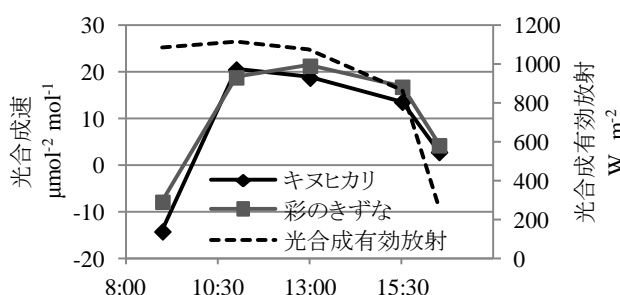


図3 出穂期10日後の光合成速度の日変化(2012年)

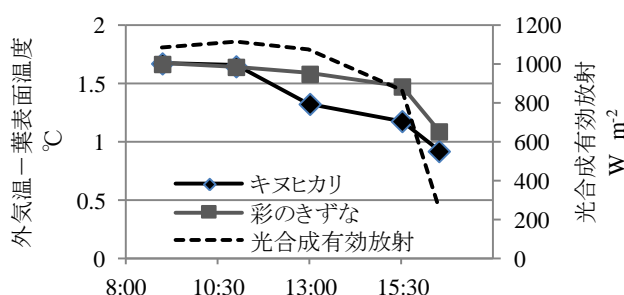


図4 出穂期10日後の気温と表面温度の差の日変化(2012年)

表3 熱画像による群落の表面温度(2012年)

品種名	出穂期	出穂期20日後
彩のきずな	33.0	28.6
キヌヒカリ	33.8	29.4
t検定	*	**

荒川ら：水稻「彩のきずな」の光合成特性

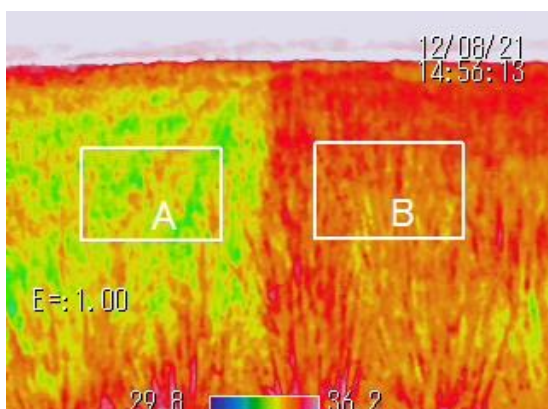


写真1 赤外線サーモグラフィによる出穂期の群落表面温度（左：彩のきずな、右：キヌヒカリ）
撮影：2012年8月21日

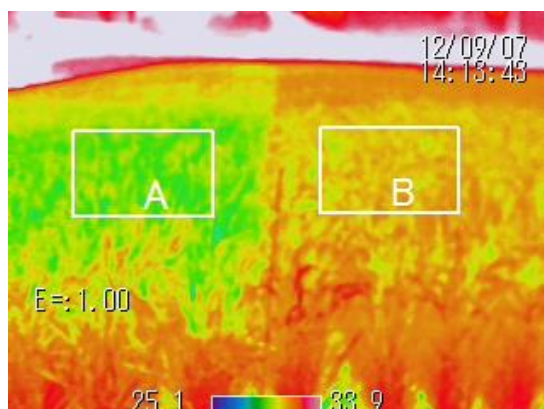


写真2 赤外線サーモグラフィによる出穂期20日後の群落表面温度（左：彩のきずな、右：キヌヒカリ）
撮影：2012年9月7日

表4 群落の表面温度の比較(2013年)

品種系統名	表面温度(°C)
タカナリ	31.0 a
彩のきずな	31.3 ab
むさしの26号	31.5 abc
笑みの絆	31.5 abcd
あかね空	31.6 bcde
彩のかがやき	31.7 bcdef
元気つくし	32.0 cdef
キヌヒカリ	32.0 def
ふさおとめ	32.1 ef
コシヒカリ	32.1 ef
初星	32.1 ef
日本晴	32.2 f

異なる英文字間で5%有意差(Tukey法による)

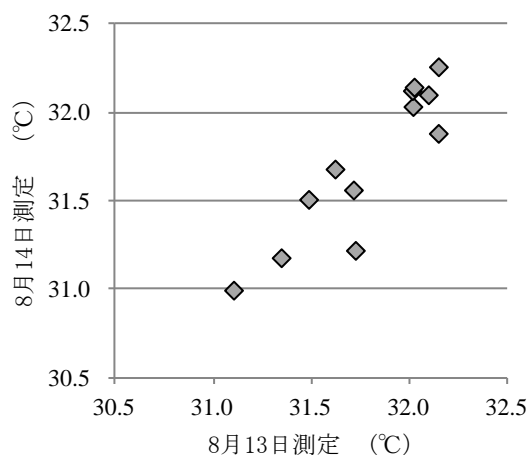


図5 測定日の違いによる群落表面温度の差(2013年)

表5 高温登熟性検定結果(2012年)と群落の表面温度(2013年)との比較

品種名	白未熟粒率(%)	順位	登熟温度(°C)	高温登熟耐性	葉の表面温度(°C)	順位
笑みの絆	4.3	1	28.5	強	31.5	2
彩のきずな	7.8	2	28.5	強	31.3	1
ふさおとめ	12.0	3	27.6	強	32.1	7
元気つくし	18.7	4	29.0	やや強	32.0	5
キヌヒカリ	25.6	5	28.5	中	32.0	6
コシヒカリ	26.0	6	28.5	中	32.1	8
日本晴	32.8	7	28.6	やや弱	32.2	10
初星	38.7	8	27.6	弱	32.1	9
あかね空	49.9	9	28.5	弱	31.6	3
彩のかがやき	61.9	10	28.6	弱	31.7	4

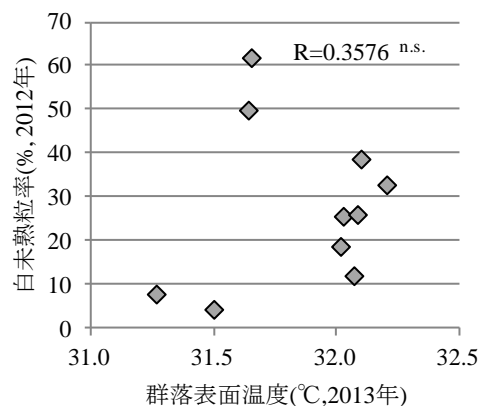


図6 群落表面温度と白未熟粒率

考 察

熱画像によって光合成性能を調べた報告には、穂付近温度は出液速度が低くなるほど高まる傾向が認められたとする土田ら(2007)の報告や葉表面温度と気孔コンダクタンスおよび光合成速度とは密接な相関関係が認められ、熱画像により光合成性能を評価できるとした Takai ら(2009)の報告がある。

また、多収インディカ品種はジャポニカ品種に比べて高い個葉光合成能をもつことが知られ、「タカナリ」、「ハバタキ」等は「コシヒカリ」に比べ葉表面温度が低く、高い気孔コンダクタンス、光合成速度を示す (Takai ら,2009) ことが確認されている。

晴天時、午後の「彩のきずな」は、気孔コンダクタンス、光合成速度とも「キヌヒカリ」より有意に高い。熱画像による群落温度は「コシヒカリ」、「キヌヒカリ」等より有意に低く、「タカナリ」より 0.3℃高いが有意差はなかった。

このことより、「彩のきずな」の気孔コンダクタンス、光合成速度が多収インディカ品種並に高いものと考えられる。

高温の日中、水稻の光合成速度が低下する(石原ら,1987)現象が知られている。本試験における出穂期の光合成量測定時の気温は 36.3℃と高温であること、出穂期、出穂期 20 日後の群落温度のいずれも「キヌヒカリ」より低かったことから、「彩のきずな」の光合成能は猛暑日のような高温条件においても高く、また、登熟期全般にわたって維持されていると考えられた。

サーモトレーサによる穂付近温度は、品種間で高温ストレス耐性を評価できる可能性を認めている(土田ら,2006)。本実験では 12 品種の群落温度の比較では品種間に有意な差が認められ、2つのグループに分かれた。「彩のきずな」と「笑みの絆」は低いグループに位置づけられ、白未熟粒率が低く、高温登熟性が強と判定された。しかし、供試品種全体では群落温度と前年の白未熟粒率や高温登熟性の評価との間に一定の傾向は認められなかった。

これらのことから、「彩のきずな」や「笑みの絆」の高い高温登熟性は、日中、高温時においても高

い光合成能を維持し、蒸散速度が低下せず、群落の表面温度を下げることに起因する可能性が示唆された。しかし、供試品種全体では、光合成能は高温登熟性を決定する 1つの要因であるが、決定要因ではないと考えられた。

三ツ井ら(2006)は、イネの高温登熟障害発生の 1つの要因として、デンプン集積に対して抑制的に作用する AGPP-NPP および α -アミラーゼの活性上昇が重要であると推測している。

今後、さらに「彩のきずな」の高温登熟性を明らかにするには、光合成能以外の因子についても検討が必要と考えられた。

「彩のきずな」の光合成能に起因する高温登熟性を育種に利用していくためには、その遺伝的背景を明らかにしていく必要がある。

西村ら(2000)は玄米品質の高温ストレス耐性は、遺伝的制御を受けているとみられ、「コシヒカリ」の近縁品種で高いとしている。

「彩のきずな」と「コシヒカリ」との近縁関係を家系 Web (http://www.d1.dion.ne.jp/~tmhk/yosida/yos_hp.html) を利用して調べたところ、近縁係数 0.396 で、同様に「笑みの絆」と「コシヒカリ」の近縁係数は 0.268 で、ともに「コシヒカリ」等のもつ高温ストレス耐性の遺伝的影響は高くはないと考えられる。

「タカナリ」の葉の光合成速度を高める GPS 遺伝子は、「IR8」に由来する(Takai ら,2013)。

「彩のきずな」の系譜上に「IR8」はない。他のインディカ品種が、群落温度の低いグループの系譜上にあるかをイネ品種・特性データベース検索システム(<http://ineweb.narcc.affrc.go.jp/>)を使って調べた結果、「タカナリ」を除く 5 品種で共通する祖先親として「Modan」があった。また、高いグループの祖先親には「Modan」は含まれていない。これら 5 品種の高い光合成速度の遺伝子源として「Modan」の可能性が考えられる。

今後、「彩のきずな」の高温登熟性の遺伝的背景を明らかにするには、「Modan」および系譜上の品種の光合成能を検討する必要がある。

引用文献

荒川 誠・大岡直人・箕田豊尚・齋藤孝一郎・石

- 井博和・上野敏昭・岡田雄二・武井由美子・重松 統・矢ヶ崎健治・新井 守・新井 登・野田 聡(2013)：水稲新品種「彩のきずな」の育成。埼玉農研報 12, 1-9
- 広田雄二・徳田眞二・多々良泉・吉田桂一郎・木下剛仁・松雪セツ子(2009)：高温条件下でも収量、品質の低下が少ない水稲品種「さがびより」の育成。九州農業研究発表会 72, 1
- 三ツ井 敏明・福山利範・大山卓爾(2006)：イネの高温登熟障害の発生メカニズム。地球温暖化地域学 Vol.2(1), 1-4
- 石原邦・斉藤邦行(1987)：湛水状態の水田に生育する水稲の個葉光合成速度の日変化に影響する要因について。日作紀 56(1), 8-17
- 森田 敏(2008)：イネの高温登熟障害の克服に向けて。日作紀 77(1), 1-12
- 森田 敏(2009)：水稲高温登熟障害の生理生態学的解析。九州沖縄農研報告 52, 1-78
- 永吉嘉文・中原孝博・黒木智・齋藤葵・井場良一・加藤浩・山下浩・三枝大樹・竹田博文・堤省一郎・上田重英・若杉佳司・川口満・吉岡秀樹・藪押睦幸・角朋彦(2011)：高温登熟性に優れる暖地向き水稲新品種「おてんとそだち」。宮崎総農試研報 46, 1-29
- 西村 実・梶 亮太・小川紹文(2000)：水稲の玄米品質に関する登熟期高温ストレス耐性の品種間差異。育種学研究 2, 17-22
- 農林水産省(2006)：水稲の高温障害の克服に向けて。 http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_kiko_hendo/suito_kouon/
- Toshiyuki Takai, Masahiro Yano, Toshio Yamamoto (2009)：Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice. Field Crops Res. 115(2), 165-170
- Toshiyuki Takai, Shunsuke Adachi, Fumio Taguchi-Shiobara, Yumiko Sanoh-Arai, Norio Iwasawa, Satoshi Yoshinaga, Sakiko Hirose, Yojiro Taniguchi, Utako Yamanouchi, Jianzhong Wu, Takashi Matsumoto, Kazuhiko Sugimoto, Katsuhiko Kondo, Takashi Ikka, Tsuyu Ando, Izumi Kono, Sachie Ito, Ayahiko Shomura, Taiichiro Ookawa, Tadashi Hirasawa, Masahiro Yano, Motohiko Kondo, Toshio Yamamoto (2013)：A natural variant of NAL1, selected in high-yield rice breeding programs, pleiotropically increases photosynthesis rate. Scientific Reports 3, 2149, DOI: 10.1038/srep02149
- 土田 徹・南雲芳文・塚口直史(2007)：水稲群落熱画像に基づくストレス耐性評価の可能性。日本土肥 53, 253
- 和田卓也・坪根正雄・井上 敬・尾形武文・浜地勇次・松江勇次・大里久美・安長知子・川村富輝・石塚明子(2010)：高温登熟性に優れる水稲新品種「元気つくし」の育成およびその特性。福岡農総試研報 29, 1-9
- 山崎周一郎・湯澤正明・永島宏慧・青沼伸一・三好真弓・篠崎敦・伊澤由行・山口正篤(2012)：水稲新品種「とちぎの星」。栃木農試研報 68, 1-13