

温風導入型オープントップチャンバーによる圃場高温処理法の開発

農研機構
西日本農業研究センター
千葉 雅大・寺尾 富夫

はじめに

世界の平均気温は、IPCC 第5次報告書によると1880年から2012年の間に0.85°C (ICPP Working Group I 2013)、また今年出された1.5°C – 特別報告書では、産業革命以前(1850年から1900年の平均)から2017年の間に1.0°C (IPCC 2018) 上昇しており、今後も更なる気温上昇が予測されている (ICPP Working Group I 2013; IPCC 2018)。この気候温暖化の影響は、日本でも顕著であり (気象庁 2018)、水稻の登熟期にあたる夏の気温上昇による米粒の品質低下が大きな問題となっている (農林水産省 2018a)。水稻では、出穂後20日間の平均気温が26~27°Cを越えると白未熟粒が増加する (船場ら 1997; 近藤ら 2006; 高橋 2006)。白未熟粒とは、一部または全部が白濁した米粒の総称であり、白くなる部位によって、心白粒、背白粒、乳白粒、腹白粒、基部未熟粒に分類されている (図-1)。また、登熟期の高温は、米粒に亀裂が生じた胴割粒 (図-1) の発生も増加させる (長田ら 2004)。これら白未熟粒や胴割粒の増加は、米の格付けを低下させるため、高温登熟耐性品種の育成や対策技術の開発が行われてきた。しかし、気候が温暖化していても、毎年夏が高温になるわけではなく、また、品種の育成や技術開発には、多個体の選抜や圃場での実証が必要になるため、安定した温度で多くのサンプル

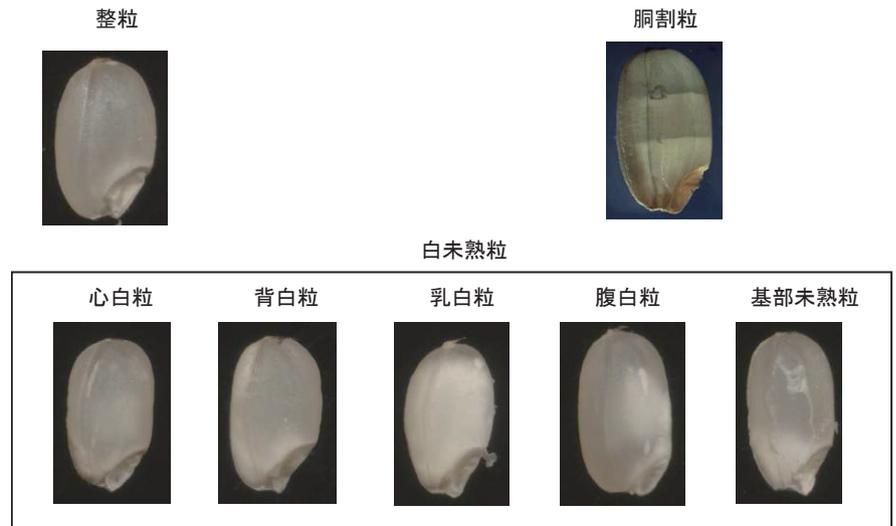


図-1 白未熟粒と胴割粒
胴割粒の写真は西日本農業研究センター長田氏提供。

を処理できる圃場での高温処理法が不可欠である。

既存の高温処理法

表-1 に水稻の高温登熟検定に利用される主要な既存の高温処理法の特徴、図-2 にその写真を示した。新潟県農業総合研究所や福岡県農林業総合試験場では、温水の圃場掛け流しによる高温処理が行われている。これは、圃場にボイラーで加温した水を循環させるシステムであり、太陽光を利用して加温するビニールハウス等とは異なる

り、天候の影響を受けにくく夜間も加温される。また、上面が開放されているため、遮光の影響はない。しかし、ボイラーや温水循環設備等の設置費用が大きく、地熱や排熱が利用できない場合には燃料代も必要なことから、導入できる圃場は限られる。

最も広く利用されているのは、出穂前の圃場にビニールハウスを設置して加温する高温処理法である。市販の支柱と農業ビニールを利用するので比較的安価に、広い面積の高温処理も可能であるが、圃場の上面がビニールで覆われるため、常時、遮光の影響を受ける。

表-1 高温処理法の特徴

高温処理法	コスト	効果の安定性	処理サンプル数	遮光の回避
温水掛け流し	×	○	○	○
ビニールハウス	○	△	◎	×
オープントップチャンバー	○	×	△	○
透明筒	◎	△	×	◎
人工気象室	×	◎	×	△

◎：非常に優れている、○：優れている、△：普通、×：劣っているの4段階で長所・短所を模式的に示した。

温水掛け流し圃場



ビニールハウスによる高温処理



人工気象室



オーブントップチャンバーによる高温処理



透明筒による高温処理



図-2 高温処理法の写真

(1) 日中の風向が一定な地域

日中の風向が一定な地域として新潟県上越市の農研機構中央農業研究センター北陸研究センター（現北陸研究拠点）で試験を行った。圃場が所在する頸城平野は、夏の陸海風が明瞭であり、日中は北からの風が卓越する（Chiba & Terao 2014）。

勾配タイプ（図-3A）では、風上に設置した温風の導入路となるトンネルにオーブントップチャンバーが接続し、チャンバー奥では下側にビニールがなく開放している。このタイプでは、温風導入路に近いほどチャンバー内の温度上昇が大きく、温風導入路から0.5mで1.81°C、4.0mで0.19°Cの昼温上昇が認められた（図-4A）。このタイプでは、導入路からの温風がチャンバー奥の出口まで届かず上空に抜けるため、導入路から出口にかけて連続的に温度上昇幅が小さくなる。そのため、一定温度での処理には適さないが、反面、温度勾配チャンバー（TGC）として利用できる可能性があり、連続した温度での検定に使用できる。

勾配タイプにおける、導入路から出口にかけてのチャンバーの温度低下を改良したのが均一タイプ温風導入型オーブントップチャンバーである。均一タイプでは、勾配タイプに加えて、導入路上部にチャンバーの空気攪乱を緩和するための傾斜壁、導入路の反対側に、温風を吸い出す効果により、チャンバー奥までスムーズな通気を行うための排気路を設置した（図-3B）。これ

圃場をビニールで取り囲むオーブントップチャンバーによる高温処理法（千葉・松村 2006）は、安価であり比較的多くのサンプルの処理が可能である。また、上面を覆わないため遮光の影響が比較的小さいが、温度上昇は日中0.5°C程度と小さめである。

寺尾ら（2006）は、出穂後の穂にOHPシートを丸めた透明な筒を被せる高温処理法を開発した。極めて安価であり、同一株内で、高温処理した穂と高温処理していない穂の比較が可能であることから、遺伝的に固定させていない系統の高温処理にも利用できるが、大量のサンプル処理には向かない。

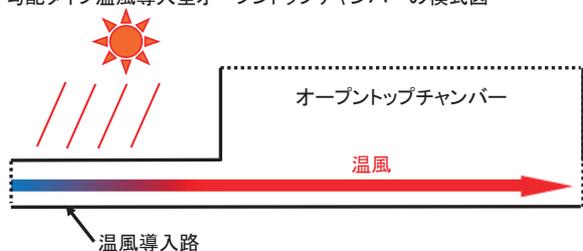
人工気象室は、精密な温度制御が可能である。しかし、設置費用と電気代が高額であり、処理できるサンプルが少ないため、あらかじめ絞り込んだ少数のサンプルを詳しく評価するような場合に向いており、初期のスクリーニングには不向きである。

温風導入型オーブントップチャンバー

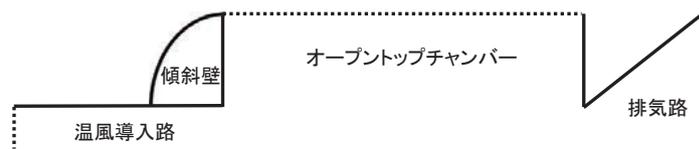
前述のように、既存の高温処理法に

は一長一短があり、遮光の影響なく安価に大量のサンプルを安定的に高温処理できる方法はなかった。そこで、解決策として温風導入型オーブントップチャンバーを開発した。この方法では、風が温風の導入路となるトンネルを通る間に太陽光で加温されて、接続するオーブントップチャンバー内の気温を上昇させる（図-3A）。温風導入型オーブントップチャンバーでは、太陽光がない夜間の気温は上昇せず、昼温を上昇させる高温処理法である（Chiba & Terao 2014, Chiba & Terao 2015）。チャンバーの上面が開いているため、朝夕の側面からの光は減衰するものの、遮光の影響は比較的少なく、鉄パイプや農業ビニールを利用するため安価で設置できる。チャンバーの幅を拡大すれば大面積の処理が可能であり、それに従って遮光の影響も低下する。また、温風導入路で加温するため効果は比較的安定している。本報では、使用する目的と日中の風向きの一定性に合わせて開発した4つの高温処理法を紹介する。

A 勾配タイプ温風導入型オープントップチャンバーの模式図



B 均一タイプ温風導入型オープントップチャンバーの模式図



C 温風導入型オープントップチャンバーの写真



図-3 風向が一定な地域に適した温風導入型オープントップチャンバー

らの効果により、導入路からの暖気のうちチャンバー上に逃げる割合が減少し、温風がチャンバー内を通過して排気路に向かうため、4.5mのチャンパー長のうち、温風導入路から3.15mまでの昼温がほぼ均一に1.2°C上昇させることができた(図-4B)。このタイプは、多くの株を均一の温度で高温処理できるので、収量への影響を解析する場合や、多系統の検定に利用できると考えられる。

(2) 日中の風向が一定しない地域

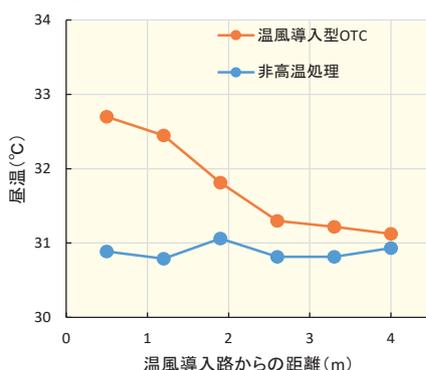
日中の風向が一定しない地域として、広島県福山市の農研機構近畿中国四国農業研究センター(現西日本農業研究センター)で試験を行った。試験圃場では、夏期は、朝(06:00~08:00)に北東、午前(09:00~11:00)に東、午後(12:00~17:00)に南南東の風が優占する(Chiba & Terao 2015)。

福山で、①の均一タイプの温風導入型オープントップチャンパーを設置したところ、日中の温度上昇は平均0.68°Cで(図-5A)、日中の風向が一定な上越(図-4B)に比べて、十分な温度上昇が得られなかった。そこで、風向が一定しない地域に対応した両方向タイプのオープントップチャンパー

を開発した。このタイプでは、オープントップチャンパーの両側に①の均一タイプの排気路と同様な形状のトンネルが設置してあり(図-6)、風向きに応じて温風導入路または排気路として機能することで多方向の風に対応する。チャンパーと同じ幅のトンネル(図-6B左)に加えて、トンネル入口幅を広げたタイプ(図-6右)も試験した。その結果、チャンパーと同じ幅のトンネルでは、平均1.08°Cの昼温の上昇が得られ、更にトンネル入口幅を拡大することによりその効果が増大し、平均1.28°Cの昼温上昇が認められた(図-5B)。したがって、この両方向タイプの温風導入型オープントップチャンパーにより、風向が不安定な地域でも高温処理が可能であり、トンネルの入口幅を拡大することにより、より高温での高温処理できると考えられる。

ただしこの方式は、風向が不安定な地域では良好な結果を示す反面、一

A 勾配タイプ温風導入型OTC



B 均一タイプ温風導入型OTC

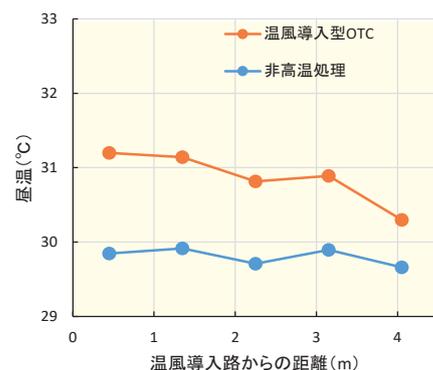
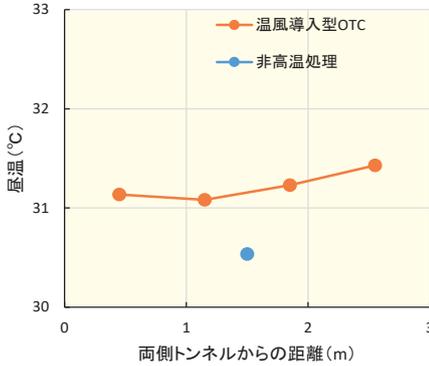


図-4 日中の風向が一定な地域において温風導入型オープントップチャンパーによる高温処理が昼温に及ぼす影響

OTC: オープントップチャンパー。A および B はそれぞれ、中央農業研究センター北陸研究センター圃場(新潟県上越市)における2010年8月4日~9月9日および2011年7月23日~8月12日の平均昼温(06:00~18:00)。

A 均一タイプ温風導入型OTC



B 両方向タイプ温風導入型OTC

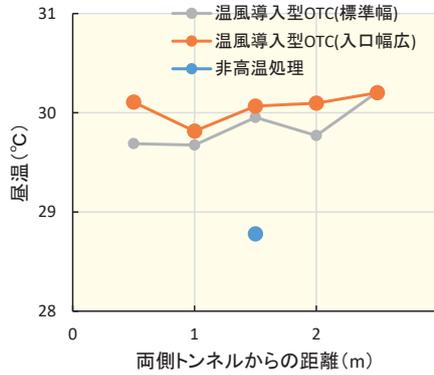


図-5 日中の風向が一定しない地域において温風導入型オーブントップチャンバーによる高温処理が昼温に及ぼす影響
OTC：オーブントップチャンバー。AおよびBはそれぞれ、近畿中国四国農業研究センター圃場（広島県福山市）における2012年8月17日～9月26日および2013年8月20日～9月29日の平均昼温（06：00～17：40）。

A 両方向タイプ温風導入型オーブントップチャンバーの模式図



B 両方向タイプ温風導入型オーブントップチャンバーの写真



図-6 風向が一定しない地域に適した温風導入型オーブントップチャンバー

(4) 既存の高温処理法との効果の比較

温風導入型オーブントップチャンバーによる圃場高温処理が白未熟粒発生に及ぼす影響を検証するために、石崎（2006）が選定した高温登熟耐性の基準となる13品種と「ササニシキ」を用いて、均一タイプ温風導入型オーブントップチャンバーと他の高温処理法との比較を行った。比較する高温処理法は、ビニールハウス、オーブントップチャンバー、透明筒、人工気象室である。人工気象室では、屋外で1/5000ワグネルポットを用いて栽培した水稻を高温処理したが、他の処理法では圃場で栽培した水稻を高温処理した。収穫後に、穀粒判別機（静岡製機ES-1000）を用いて、1.8mm以上の玄米の白未熟粒割合（乳白粒+基部未熟粒+腹白粒）を調査した。

その結果、温風導入型オーブントップチャンバーと他の高温処理法との間には、いずれも0.1%水準で有意な正の相関が認められた（表-2）。このことから、温風導入型オーブントップチャンバーによる高温処理は、既存の高温の処理法と同様に品種の高温登熟耐性を評価することが可能であると考えられる。

おわりに

高温登熟耐性が強い水稻品種が普及しつつあり、早植や施肥管理、肥培管理等の高温登熟対策技術の導入も

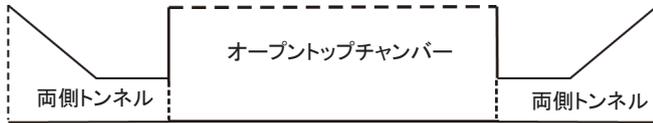
定方向からかなり強い風が吹く新潟県上越市で試した結果では、チャンバーの中央部では温度が上昇したものの、両側に位置するトンネルの入り口付近での温度上昇が十分では無かった（Chiba & Terao 2014）。

(3) 様々な風速や風向に対応した温風導入型オーブントップチャンバー

風向が安定な地域でも不安定な地域でも安定して温度上昇が得られるよう、両方向タイプのオーブントップチャンバーの温風導入トンネルに平行部を加えて、ここでの温度上昇効果を加えると共に、トンネル入り口での過剰な空気交換を抑えるように改良を行った（図-7）。また、検定サンプル数を増やすために、チャンバーの幅を6mに広げて検討した。このチャンバーを風向の安定した新潟県上越市で、昼間の主要な風向から0

度、30度、60度傾けて設置し、様々な方向からの風の影響を評価した。その結果、全天日射量が快晴時の半分である1.8MJ/m²/h以上であれば、0度（入口のトンネルから出口のトンネルまで直線的に風が通り抜ける）から90度（入口から直角方向から風が吹く）まで、どの方向から風が吹いても、約1.5°Cの昼温の上昇が得られた（図-8, Terao & Chiba 2016）。また、風速の影響については、風速5m/sを超える場合には温度上昇幅が小さくなるが、風速4m/sまでは約1.5°Cの温度上昇が得られ、通常の風速条件では使用可能であった（Terao & Chiba 2016）。したがって、温風導入トンネルに平行部を加えることにより、風向・風速にあまり影響されずに圃場で高温処理を行うことが可能である。

A 平行部を加えた両方向タイプ温風導入型オーブントップチャンバーの模式図



B 平行部を加えた両方向タイプ温風導入型オーブントップチャンバーの写真



図-7 様々な風速や風向に対応した温風導入型オーブントップチャンバー

進んでいる（農林水産省 2018b）。しかし、今後も温度上昇の持続が予測されている（ICPP Working Group I 2013, IPCC 2018）ことから、今後も高温登熟耐性品種の育種と更なる対策技術の開発は必要である。遮光の影響が小さく、安価で多くのサンプルを処理できる温風導入型オーブントップチャンバーは、その際の高温処理法としての利用が期待される。また、温暖化は麦類、豆類および野菜の生育にも影響を及ぼす（農林水産省 2018b）。温風導入型オーブントップチャンバーは、これらの作目における温暖化に対応した品種育成および対策技術の開発にも利用できると考えられる。

引用文献

千葉雅大・松村修 2006. 風の遮断による圃場高温処理法. 日作紀 74 (別 1):228-229.
Chiba, M. and T. Terao 2014. Open-Top Chambers with Solar-Heated Air Introduction Tunnels for the High-

表-2 高温処理法による品種の白未熟発生割合の相関係数

	温風導入型 OTC	OTC	ビニールハ ウス	透明筒	人工 気象室
温風導入型OTC	-	0.88	0.82	0.82	0.79
OTC	***	-	0.77	0.90	0.70
ビニールハウス	***	**	-	0.87	0.59
透明筒	***	***	***	-	0.53
人工気象室	***	**	*	ns	-

OTC:オーブントップチャンバー。*, **, *** はそれぞれ, 5%, 1%, 0.1% 水準で有意な相関があることを, ns は有意な相関がないことを示す。温風導入型オーブントップチャンバーでは, チャンバーの中央部の株をサンプリングした。

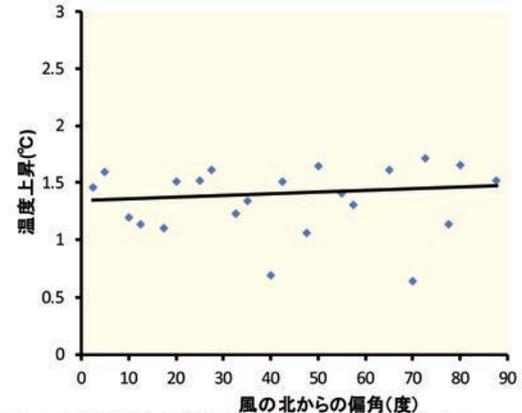


図-8 平行部を加えた両方向タイプ温風導入型オーブントップチャンバーの昼間上昇に対する風向の影響

Temperature Treatment of Paddy Fields. Plant Prod. Sci. 17:152-165.
Chiba, M. and T. Terao 2015. Improvement of High-Temperature Treatment Method using Solar Radiation under Unstable Wind Conditions. Plant Prod. Sci. 18:414-420.
船場貢ら 1997. 長崎県下の水稲作期策定に関する研究 第4報 高温豊熟に伴う品質の低下. 日作九支報 63:15-17.
ICPP Working Group I 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
IPCC 2018. Global Warming of 1.5 °C. <http://ipcc.ch/report/sr15/>
石崎和彦 2006. 水稲の高温登熟性に関する検定方法の評価と基準品種の選定. 日作紀 75:502-506.
気象庁 2017. 気候変動監視レポート 2017. https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2017/pdf/ccmr2017_all.pdf
近藤始彦ら 2006. 水稲の乳白粒・基白粒発生と登熟気温および玄米タンパク含有率との関係. 日作紀 75(別 2):14-15.
長田健二ら 2004. 登熟初期の気温が米粒

の胴割れ発生におよぼす影響. 日作紀 73:336-342.
農林水産省 2018a. 地球温暖化影響調査レポート 10. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/report-37.pdf>
農林水産省 2018b. 平成 29 年地球温暖化影響調査レポート. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/report-31.pdf>
高橋渉 2006. 気候温暖化条件におけるコシヒカリの白未熟粒発生軽減技術. 農及園 81:1012-1018.
寺尾 富夫ら 2010. イネ高温登熟耐性選抜のための簡便な穂温上昇装置. 日作紀 76:166-173.
Terao, T. and M. Chiba 2016. An Improved Open-Top Chamber with Solar-Heated Double Funnel That Can Adapt to All Wind Directions for Simulating Future Global Warming Conditions in Rice Paddy Fields. Agricultural Sci. 7:716-731.