

緒 論

北海道の稲作地帯は日本の最北部に位置し、生育期間の気象条件が日本で最も冷涼である（第Ⅰ—1表）。そ

第Ⅰ—1表 北海道と東北地域の稲作地帯における平年と穂ばらみ期から開花期までの長期冷温による冷害が発生した1993年の7、8月での平均気温。

地域 市町名	緯度 (北緯)	年次	7月	8月
北海道				
北見市	43.82°	平年 1993年	18.6 17.1	19.9 18.3
旭川市	43.77°	平年 1993年	20.4 19.0	21.2 19.7
岩見沢市	43.22°	平年 1993年	19.7 18.0	21.2 19.3
大野町	41.88°	平年 1993年	19.1 16.7	21.3 18.8
東北				
青森県十和田市	40.60°	平年 1993年	19.9 16.4	21.8 19.4
青森県黒石市	40.65°	平年 1993年	21.1 18.2	22.8 20.1
秋田県秋田市	39.72°	平年 1993年	23.2 21.1	24.8 21.9
岩手県盛岡市	39.70°	平年 1993年	21.6 18.7	23.3 20.5
宮城県古川市	38.60°	平年 1993年	21.8 18.5	23.8 21.2
山形県山形市	38.25°	平年 1993年	23.1 20.5	24.7 21.9
福島県福島市	37.75°	平年 1993年	23.3 20.0	25.2 22.4

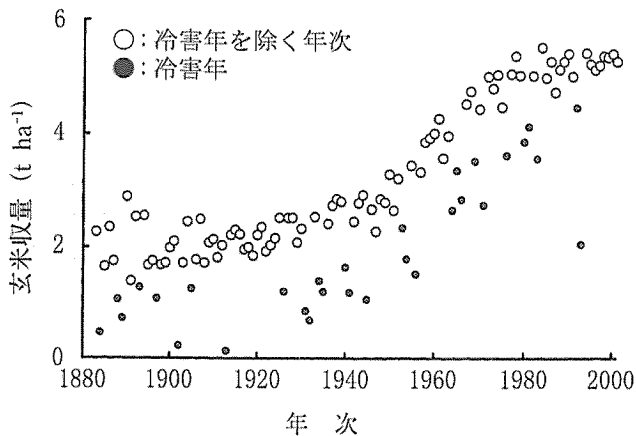
平年は1971～2000年の平均。1993年における各地の作況指数は、以下の通り。北海道40、青森県28、秋田県83、岩手県30、宮城県37、山形県79および福島県61。

のため、北海道では1884年以降の119年間に作況指数90以下の冷害が29回発生し、これは4年に1回の頻度であった（第Ⅰ—2表）。また、東北地域で最も気象条件の厳しい青森県では、1886～1998年の113年間に冷害が23回発生し、5年に1回の頻度であった（青森県農業試験場2000）。北海道では、冷害年には平年に比べ、119年間の平均でおおよそ1.0～1.5 t ha⁻¹減収した（第Ⅰ—1図）。冷害の発生は、西南暖地なども含め日本全国で認められるが（西山 1985）、とくに北海道と東北地域では安定生

第Ⅰ—2表 北海道における冷害年の水稲収量と冷害の型。

年次	収量 (t ha ⁻¹)	作況 指数	平年 収量 (t ha ⁻¹)	冷害 の型	障害型冷害を 受けた生育期
1884(明治17)	0.45	28	1.61	遅延型	
1888(21)	1.05	63	1.66	—	
1889(22)	0.71	42	1.68	—	
1893(26)	1.27	74	1.72	遅延型	
1897(30)	1.05	59	1.77	並行型	
1902(35)	0.22	12	1.84	並行型	
1905(38)	1.24	66	1.87	障害型	
1913(大正 2)	0.12	6	1.97	遅延型	
1926(15)	1.19	56	2.12	並行型	
1931(昭和 6)	0.84	38	2.19	遅延型	
1932(7)	0.67	30	2.20	遅延型	
1934(9)	1.38	62	2.23	障害型	
1935(10)	1.17	52	2.24	遅延型	
1941(16)	1.17	51	2.31	並行型	
1945(20)	1.05	44	2.36	遅延型	
1953(28)	2.33	81	2.89	障害型	穂ばらみ期
1954(29)	1.77	60	2.93	遅延型	
1956(31)	1.50	51	2.93	並行型	開花期
1964(39)	2.64	68	3.89	並行型	穂ばらみ期
1965(40)	3.34	86	3.89	障害型	穂ばらみ期
1966(41)	2.83	73	3.89	障害型	穂ばらみ期
1969(44)	3.51	86	4.06	並行型	穂ばらみ期
1971(46)	2.73	66	4.11	障害型	穂ばらみ期と開花期
1976(51)	3.61	80	4.51	遅延型	開花期
1980(55)	3.85	81	4.75	障害型	開花期
1981(56)	4.13	87	4.77	遅延型	
1983(58)	3.55	74	4.82	遅延型	
1992(平成 4)	4.45	89	5.02	障害型	穂ばらみ期と開花期
1993(5)	2.03	40	5.03	並行型	穂ばらみ期と開花期

農林省農林経済局統計調査部（1972）に追加。平年収量は1948年以降しか作成されていないので、それ以前については直線回帰より求めた傾向値。1888、1889年は冷害型の記載がない。障害型冷害を受けた生育期については、佐竹（1981a, 1994）、北海道立農業試験場・北海道立畜産試験場（1993）および北海道立中央農業試験場（1994）を参照し、1945年以降についてのみ記載。なお、1976年は遅延型冷害年であるが、開花期冷温による不稔発生も一部地域にみられた。1993年は並行型冷害年であるが、減収の主因は障害型冷害。



第 I—1 図 北海道における過去119年間（1883～2001年）の単位面積当たり水稲玄米収量の推移。

産の大きな障害になっている。

冷害は冷温により不稔が発生し減収する障害型冷害と、冷温のため生育が遅れ成熟前に秋冷により登熟障害を生じる遅延型冷害、および障害型冷害による不稔発生と遅延型冷害による登熟障害が同時に生じる並行型冷害に分けられる（酒井 1952）。さらに、障害型冷害は、冷害発生の影響を受ける生育期により、穂ばらみ期障害型冷害と開花期障害型冷害に分別できる。穂ばらみ期障害型冷害では、出穂前10～11日を中心とするほぼ1週間の冷温によって不稔が発生するのに対し、開花期障害型冷害では開花期の冷温によって開花が抑制され、その抑制期間が長期化することによって不稔が発生する（佐竹 1994）。冷害についての比較的詳しいデータが残っている戦後1946年から現在までの55年間において、北海道では冷害が14回発生し、10回は並行型を含む障害型冷害であった。この中で、穂ばらみ期と開花期の両時期にわたる冷温による冷害が3回、開花期のみの冷温による冷害が2回であった。また、一部の地域で開花期の冷温による不稔を同時に生じた遅延型冷害が1回あった。すなわち、北海道で発生する冷害のおよそ3回に2回は障害型冷害であり、5回に2回は開花期の冷温による不稔発生を含んでいた（佐竹 1981a, 1994, 北海道立農業試験場・北海道立畜産試験場 1993, 北海道立中央農業試験場 1994）。

たとえば、1980年は、開花期の冷温による不稔発生が認められた典型的な冷害年であった。岩見沢市では、開花期に当たる8月中旬に15～18℃の平均気温が6日間続き、全道の作況指数は81となった（佐竹 1981a）。また、1993年は近年の大きな冷害年であり、作況指数は北海道全体で40、網走、胆振、渡島、檜山支庁ではそれぞれ8、8、3、2であった。稲作地帯における同年の7月および8月の平均気温は、それぞれ16.7～19.0℃お

び18.3～19.7℃であった（表 I—1）。幼穂形成期から開花期までの長期冷温によって、穂ばらみ期だけでなく開花期にも冷温の影響を受けた（北海道立中央農業試験場 1994）。

さらに、20世紀以降の青森県における開花期冷温による不稔発生の代表的年次として、穂ばらみ期から開花期までの長期冷温による1902年（作況指数44（青森県農業試験場 2000））、1905年（同66）、1980年（同47）および1993年（同28）と、開花期以降に冷温が続いた1953年（同91）および1976年（同91）があげられる（和田 1981, 青森県農業試験場 2000）。また、1976、1980年および1993年では、東北地域の他県においても開花期冷温による不稔発生が認められた（農林省東北農業試験場編 1978, 農林水産省東北農業試験場編 1981, 1995）。

以上のように、開花期冷温による冷害は多数発生し、とくに穂ばらみ期から開花期にわたる長期冷温による被害が大きい。北海道や東北地域の稲作において、開花期冷温への対策を確立することは、安定生産のために極めて重要である。

冷害を回避する方法には、栽培法の改善によるものと栽培水稲品種（以下、水稲品種の水稲は略す）の耐冷性向上を図ることの2つがある。遅延型冷害に対しては、健苗育成、葉齢の進んだ苗の使用、および水温を上昇させる水管理などにより初期生育を促進する栽培技術と、晩生品種に収量性が劣らない早生や中生の多収品種が開発された。また、穂ばらみ期の障害型冷害に対しては、多肥栽培を避けることおよび深水灌漑が指導されるとともに、育成品種の耐冷性向上が図られた。すなわち、遅延型冷害および穂ばらみ期の障害型冷害については、栽培法と品種育成の両面から多くの研究が行われて大きな成果が得られ、北海道や東北地域における水稲の安定生産に寄与してきた。しかし、開花期の障害型冷害については、出穂期の異なる品種を配合して作付けることにより危険分散を図るほかに現在のところ栽培上の対策がなく、また育種事業においても、奨励品種決定試験に供試している品種・系統の一部が検定されているにすぎず（注：1981～1985、1989～1993年度 水稲新品種育成試験成績書 北海道立上川農業試験場、1981～1984、1987～1997年度 水稲新品種育成試験成績書 青森県農業試験場藤坂支場）、選抜法も十分確立されていない。

そこで本研究では、まず育種事業で利用可能な開花期耐冷性の簡易検定法を開発し、次に、日本の主要品種および中国雲南省の品種について開花期耐冷性を評価し、今後の育種に資するために遺伝資源を明らかにしようとした。第 I 章では開花期耐冷性の研究を、主に穂ばらみ

期耐冷性との対比から概括した。第Ⅱ章では簡易な開花期耐冷性検定のための検定植物体の育成法とそれを用いた検定法、および到穂日数の長い品種を省力的に扱うための短日処理を利用した検定法を明らかにした。第Ⅲ章では北海道と東北以南の日本品種、および耐冷性の遺伝資源として注目されている中国雲南省の品種における開花期耐冷性を評価するとともに、穂ばらみ期耐冷性との関係を検討した。最後に、第Ⅳ章では開花期耐冷性の検定法と育種におけるその利用について、残された問題点を整理した。

本論文をとりまとめるにあたり、北海道大学大学院農学研究科教授岩間和人博士にご指導とご校閲をいただいた。記して深謝する。また、ご校閲の労をおとりいただいた同教授山口淳一博士、同教授幸田泰則博士、同教授佐野芳雄博士に謹んで感謝する。さらに、北海道大学名誉教授後藤寛治博士、同名誉教授中世古公男博士、元北海道立滝川畜産試験場長国井輝男氏、元北海道立上川農業試験場長土屋武彦博士（以下、北海道立は略し、農業試験場は農試と記す）、前中央農試場長相馬暁博士、現中央農試場長下野勝昭博士および現植物遺伝資源センター場長吉田俊幸氏には終始ご指導と激励をいただいた。記して感謝する。

本研究は、1993～1994年に中国雲南省昆明市にある雲南省農業科学院、および1996～2000年に上川農試において行った。上川農試において、元水稲育種科長新橋登博士、元水稲育種科長菊地治己博士および前稲作科長沼尾吉則氏には、本研究のご指導をいただき、実験遂行の機会を与えられるとともに、そのためのご配慮や本稿のご校閲をいただいた。さらに、上川農試では前川利彦氏（現植物遺伝資源センター）、木内均氏、平山裕治氏（現中央農試）、木下雅文氏をはじめとする稲作科およびほかの職員の方々に、本研究の遂行に当たり多大なるご協力をいただいた。とくに、本論文に示した1999、2000年の実験は、木下雅文氏と共同して行ったものであり、大変お世話になった。

中国雲南省における研究は、雲南省農業科学院と農林水産省熱帯農業研究センター（現独立行政法人国際農林水産業研究センター）との間で行われた稲の遺伝資源利用に関する日中共同研究の一部として行った。共同研究の日本側研究担当者であった当時の春原嘉弘氏と伊勢一男氏、さらに中国側研究担当者であった蔣志農氏、（故）熊建華氏、戴陸園博士、葉昌榮氏のほか多くの研究員の方々にご協力をいただいた。

本論文の取りまとめに際し、現中央農試作物開発副部長佐々木忠雄氏、稲作科の職員の方々、現中央農試生産

システム部長稲津脩博士および栽培システム科の職員の方々には、多大なご協力をいただいた。また、現上川農試稲作科長佐藤毅博士には論文のご校閲をいただいた。これら皆様に深謝する。

第I章 開花期耐冷性の研究の現状と問題点

1. 栽培法による冷害対策

栽培法による遅延型冷害に対する回避対策は、穂ばらみ期の障害型不稔を生じさせない範囲で、可能な限り出穂期や成熟期を早くすることである。たとえば、北海道では、穂ばらみ期の冷温障害を受けないように日照と風速の影響を加えた気温の平年値から早限出穂期を、登熟期の冷温障害を受けないように気温の平年値から晩限出穂期を算出し、稲作地帯別の安全出穂期が策定されており、これに基づいて作付けの品種構成を決めた「水稲地帯別栽培指標」が作成されている(村上ら 1982, 村上・小田 1988, 北海道・北海道米麦改良協会 1989, 竹川 1991)。冷害を回避した安定生産のためには、この指標を守った品種の作付けを行うことが重要である。さらに、初期生育を促進するため、乾物重/草丈比が大きな活着の良い健苗を育成し、早植えを励行すること、稚苗よりも中苗、さらに成苗と葉齢が進んだ苗を使用すること、夜間から早朝にかけて入水するなど水温を上昇させる水管理を行うこと、多窒素を避け適正な施肥量とし、とくに初期生育の劣る地帯では側条施肥などを行うこと、強風地帯では防風網や防風林を設置すること、および透水不良田については暗きょ排水、心土破碎、および深耕などにより水田圃場の透排水性を良くするとともに、根の生育領域を広くすることなどがあげられる(佐竹 1994, 和田 1992)。

また、穂ばらみ期の冷温に対する栽培法の対策としては、危険分散のために熟期の異なる品種を配合して作付けすること、不稔発生を助長する多肥栽培を避けること、幼穂形成期から冷害危険期までの深水灌漑により幼穂を冷温から守ること、および地力向上のために稲わらは堆肥にして圃場に還元することが指導されている。

2. 育種における耐冷性検定法の確立

耐冷性の検定は、北海道では1936、1937年に上川農試において冷水掛け流し検定が試行され、その後一時中断されたが、1942年に再開された。検定の開始当初は、掛け流し処理を連日行ったため不稔が多発したことなどにより品種間差異を検出できなかったが、1943年に昼間(午前8時～午後3時)のみ掛け流すことにより良好な結果を得て検定法としてほぼ体系化された。しかし、それから年次によって冷水処理の強度が異なるため安定した検定結果が得られず、掛け流し処理の方法について

の検討が重ねられた(島崎ら 1967)。その結果、原則的には隔日に掛け流し処理を行い、気象条件の悪い場合には掛け流し処理日数を少なく、良い場合には掛け流し日数を多くし、さらに処理開始日からの検定圃場の水温経過にあわせて冷水処理日の頻度を逐次調整することにより、検定圃場の平均水温を19.0～19.5℃に近づけ、安定した水温の冷水処理を行なえるようにした(注:1968～1994年度 水稲新品種育成試験成績書 北海道立上川農業試験場, 1980～1999年度 水稲新品種育成試験成績書 北海道立中央農業試験場)。

冷水掛け流し処理に用いる冷水については、1972年からそれまでの自然灌漑水のみ利用から、自然灌漑水が19～20℃以上の場合に地下水を加えて水温を調整する方法に変更し、処理水温が気象条件に影響されにくくした。さらに1990年代前半から、灌漑水と地下水の混合後に測定した水温と冷水処理に必要な水温との温度差にあわせて、地下水の加水量を自動的に調整する方法を取り入れ、処理冷水の水温調節の精度を向上させた。また、同時期には、掛け流しに使用した冷水に地下水を加えて繰り返し利用する循環式を導入した。なお、農林水産省北海道農業試験場(現独立行政法人農業技術研究機構北海道農業研究センター、以下、北海道農試と記す)では、1990年から地下水を用いずに電気による冷却装置で作出した19.0℃の冷水を利用している。

冷水掛け流し検定圃場の水深については、1977年から冷害危険期に穂の大部分が冷水に覆われるようにするため、それまでの10cmから20cmとした(新橋 1998)。また、1982年には、北海道の穂ばらみ期耐冷性検定のための基準品種を選定した(北海道立上川農業試験場 1982)。

以上のような改良を重ね、冷水掛け流し検定法は、穂ばらみ期耐冷性について安定した評価の得られる検定法として確立した。現在、同検定法は上川農試のほか、北海道農試、道南農試および中央農試の北海道の水稲育種に係わる4場で実施されている。検定圃場の面積もこれら農業試験場の合計で1947年に5a(上川農試のみ)、1966年に40a、1977年に70a、1982年には135a、現在では183aと徐々に拡大されている(江部 1982, 佐々木 1986, 新橋 1998, 丹野 2002)。また、検定圃場では、集団選抜、系統選抜、生産力試験および奨励品種決定試験などの育種試験の全般にわたる供試材料について、穂ばらみ期耐冷性の検定や選抜が行われている(菊地 1997, 新橋

1998).

一方、1967年には上川農試に室内床面積4 m²の人工気象室が10基設置され、これを利用した耐冷性研究と検定が開始された(佐々木・和田 1975, 柴田ら 1969, 1970, 柴田 1975, 1976, 1977, 和田ら 1973). 1994年には、室内床面積9 m²の人工気象室が12基に拡張して更新された。ここでは穂ばらみ期耐冷性の検定が行われている。

以上のように、育種での穂ばらみ期耐冷性の選抜や検定法が確立され、検定の施設も拡充された結果、北海道の奨励品種の穂ばらみ期耐冷性は新しい品種ほど強くなった(沼尾 1995, 岩間ら 1998). また、良食味を指向する近年の社会情勢に応え、従来難しいといわれてきた良食味と耐冷性を兼ね備えた品種の育成に成功した。すなわち、1984年に育成された、当時としては画期的な良食味品種の「ゆきひかり」(和田ら 1986)、および1996年に育成された、現在でも北海道の栽培品種中最も良食味である「ほしのゆめ」(新橋ら 2003)の耐冷性は、主要な栽培品種の中では最強ランクの強に属する。さらに、これらの栽培品種よりも耐冷性の強い極強の系統が多数、育成されている(菊地 1997)。

東北地域においても、北海道と同様に冷水掛け流し検定法による検定と選抜が1930年代より行われてきた。近年では、処理水が循環式の恒温深水検定法が考案され、高精度で多数の系統を検定でき、東北各県の稲育成地において一般に使用されている。その結果、「ひとめぼれ」などの穂ばらみ期耐冷性が強い良食味品種や、従来の耐冷性品種よりも強い極強ランクの系統が育成されてきた(佐々木 1996)。

以上のように、穂ばらみ期耐冷性については育種の過程で十分な選抜が行われ、栽培品種の耐冷性向上が図られてきた。また、遅延型耐冷性については選抜は実施されてこなかったが、冷温による生育遅延度に基づく検定が奨励品種を決定する年次に行われ(柴田 1975, 1976, 1977)、とくに晩生品種に劣らない収量を示す早生や中生の品種が育成され、熟期のより早い品種を作付けすることによって遅延型冷害の被害を軽減することが可能になった。なお、1996年には中央農試に冷害気象実験ドーム(圃場面積485m²)が設置され、歴史が浅いため具体的な育成材料はまだ得られていないが、穂ばらみ期から開花期までの長期冷温処理による検定と選抜を開始している(田中ら 1995, 佐々木 1998)。

3. 冷温感受性と長期冷温による障害

冷温による不稔発生のため稔実粒数が減少し収量が低下するのは障害型冷害とされ、冷温を受ける時期により

開花期障害型冷害と穂ばらみ期障害型冷害の2つに分けられる。一方、移植期から分けつ期、幼穂形成期、出穂期および登熟期までのいずれか、あるいは複数の生育期の冷温による生育遅延のため、秋冷による登熟障害を生じ、粒重の低下と屑米の発生による減収や玄米品質の低下を生じるのは遅延型冷害とされる。また、遅延型と障害型が同時に生じた冷害は並行型冷害である。第I—2表に示すように、北海道において1946年以降55年間に発生した14回の冷害については、並行型も含め遅延型冷害を含む年次は8回、穂ばらみ期の障害型不稔を含む年次は6回とやや少なかった。

開花期の障害型不稔の発生頻度が穂ばらみ期の障害型不稔よりもやや少ない原因の一つに、冷温感受性は開花期の方が穂ばらみ期よりも低いことが考えられる(福屋・近藤 1939, 寺尾ら 1940a, 近藤 1952, Hayaseら 1969, 柴田ら 1970)。しかし、これまで両生育期の冷温感受性を比較した試験において、冷温処理期間は主に10日間以内である。浪岡ら(1985)は、20日間の長期処理では10日間の短期処理とは傾向が異なり、穂ばらみ期のみ処理よりも穂ばらみ期の後半に当たる花粉充実期から開花期までの処理により不稔が多発し、この現象は1980年に青森県の太平洋側地域に発生した障害型不稔と類似していることを報告している。このことは、青森県において同年のほかに、1902, 1905年および1993年の穂ばらみ期から開花期にかけての長期冷温により作況指数28~66の大冷害が、さらに1993年には、北海道においても同様な長期冷温により作況指数40の大冷害が発生したこととも一致する。このことから、栽培品種の開花期耐冷性の強化は、長期冷温による冷害の回避のためにも不可欠である。

4. 障害型不稔の発生の生理的要因

穂ばらみ期での障害型不稔の冷温を感受する器官は、雌しべではなく雄しべである(酒井 1937, 寺尾ら 1940b, Hayaseら 1969)。また、不稔の直接的原因は葯の裂開不良による柱頭の受粉率の低下であり(Itoら 1970)、柱頭上で5~10個の花粉が発芽しないと受精できないことが報告されている(戸刈・柏倉 1958, Satake and Koike 1983)。出穂前10~11日を中心とするほぼ1週間が、冷温による不稔を発生しやすい冷害危険期であり、とくに最大の冷害危険期は減数分裂期後の小孢子初期であることが明らかとなっている(Satake and Hayase 1970, Satake 1976)。穂ばらみ期耐冷性には品種間に大きな差異が認められており(上原 1996, 松永・佐々木

1985b, 藤井ら 1986), 葯当たり(充実)花粉数が多く, 花粉数と高い相関がみられる葯長が長い品種ほど(橋本 1961, 鈴木 1981, 1982, 刈屋ら 1986b, 熱帯農業研究センター 1985), また7~8葉期の溢泌液量が多い品種ほど(Yamamoto and Nishimura 1986), 耐冷性が強いことが報告されている. 冷温処理期間中の平均気温が同じ場合でも, ある程度昼夜の温度に較差があった方が不稔発生が少なくなり, 不稔を最少にする温度較差は平均気温が低いほど大きくなることも報告されている(柴田ら 1970).

一方, 開花期の障害型不稔については, 冷温を感受する器官は穂ばらみ期と同様に雄しべであり(Satake and Koike 1983), 熟度が進んで開花期に近い穎花ほど冷温に対する感受性が高くなること(佐竹 1979b), 開花受精終了後は感受性が急激に低くなり, 受精30分後には冷温による稔実への影響がほとんどなくなることが明らかとなっている(寺尾ら 1940c).

圃場での調査によると開花は主に最高気温の影響を受け, その最適気温は31~32℃であり, 25℃前後以下になると急激に開花率が低下する(田中 1962). また, 開花前の不稔発生に影響し始める平均気温は18℃, 影響が顕著にあらわれる平均気温は16℃と推定されている(田中 1962). 不稔発生をもたらす原因の一つは, 冷温の影響による花粉発芽率の低下であり(高館ら 1979, 木野田ら 1985), 開穎3~4時間前から起こる花粉の糖化異常による(Koike and Satake 1987). また, 開花期の冷温による不稔発生は, 遮光により助長される(和田ら 1973, 細井 1989a).

開花期耐冷性には, 穂ばらみ期耐冷性と同様に大きな品種間差異が認められている(櫛淵ら 1970a, 佐竹・小池 1982, 細井 1989b, 刈屋 1992). しかし, 開花期耐冷性と冷温下の開花率との間に, 正の相関関係を認めた報告があるとともに(細井・谷口 1984), 一定の相関関係がないとする報告もある(松永ら 1985a, 佐竹・小池 1982). 開花期耐冷性の品種間差異を決定する開花期以前や開花受精の過程における生理的特性については, 不明な点が多い. さらに, 開花期耐冷性と穂ばらみ期耐冷性との間には, 正の相関関係を認めた報告(櫛淵ら 1970a, 刈屋ら 1986a)と一定の相関関係がみられなかったとする報告があり(佐竹・小池 1982, 松永ら 1985a), 解明すべき問題として残されている.

5. 不稔発生の防止対策

穂ばらみ期の障害型不稔に対する防止対策としては, 深水灌漑が有効である(酒井 1949, 藤原 1982, 和田

1992). すなわち, 5月下旬から7月中旬までの水温は気温よりも3~5℃高く, 水深を深くすると浅い場合よりも最低水温が高く保たれる. 深水灌漑の効果は, 過去の冷害年において実証されている. さらに, 穎花分化期から冷害危険期(穂ばらみ期)までの12~13日間(前歴期間)の深水は, 小胞子の分化を促進させ, また冷害危険期の深水は, 小胞子の退化および発育不全を抑制し, いずれも充実花粉数を増加させ受精率を高める(Satake 1989). このため, 深水灌漑の期間については, 幼穂形成期から冷害危険期までが奨励されている. 水深については, 冷害危険期以前にはほとんどの幼穂が水中に入る10cm程度で(Satakeら 1988), 冷害危険期には, 小胞子初期の穎花の80%を水中で覆うために17~20cmが必要である(小林・佐竹 1979). なお, 圃場における冷害危険期の推定には, 葉耳間長 ± 5 cmを指標にすることが指導されている(早瀬 1976, 佐竹 1994).

幼穂形成期から冷害危険期までの期間に窒素供給量が少なければ, 冷温による不稔発生は少なくなる(Satakeら 1987). さらに, 止葉期の葉身窒素含有率が最低となる少肥区の稔実歩合に対する相対値(稔実指数)を求めたところ, この値が90を示す区での葉身窒素含有率(葉身限界窒素含有率)には, 品種間差異が認められ, この含有率を適正な窒素施肥量を求める指標として利用することができる(天野 1984, 天野・森脇 1984a). 危険期の葉身窒素含有率が同じでも, 堆肥施与区は無施与区に比べ不稔発生が少ない(天野・森脇 1984b). リン酸とカリの効果については窒素ほど明瞭ではないが, とくにリン酸については, 多窒素条件下における施与が不稔発生を軽減する(佐々木・和田 1975, 柴田ら 1969).

なお, Satake and Shibata (1992)は耐冷性を理解するために受精に至るまでの過程を, (1)小胞子が分化, (2)分化小胞子が充実花粉に生育, (3)充実花粉が柱頭に落下し受粉, および(4)受粉した充実花粉が発芽・受精, の4生育時期に分けて考えることを提唱した. すなわち, $\text{受精率} = \text{穎花当り分化小胞子数} \times \text{分化小胞子当り充実花粉発育歩合} \times \text{充実花粉当り柱頭上の受粉歩合} \times \text{柱頭上花粉の受精効率}$, となる. 耐冷性の品種間差異や栽培条件による差異がいずれの受精率構成要素により生じるか, また各要素がいつ, どのように決まって, どのようにすれば耐冷性が強くなるかを解明すれば, 耐冷性を向上させる栽培技術の開発が一層進捗するとともに, 効率的な耐冷性育種が可能となる.

6. 耐冷性の検定方法

これまでに考案された穂ばらみ期耐冷性の品種間差異

を検定する方法は、人工気象室を利用する方法と圃場での冷水掛け流しを利用する方法の2つに大きく分けられる(斉藤・堀末 1992)。人工気象室を利用した検定法としては、葉耳間長により推定した冷害危険期から12℃で3～4日間の冷温処理を行い、この時の稔実歩合により耐冷性を評価する方法がある(Satake 1976)。しかし、冷害危険期での稔実歩合を正確に求めることは労力を要する。そのため、各品種で止葉が完全に展開した茎が各株に2本以上認められた日から、15℃で6～7日間の冷温処理を行い、処理開始後10～20日間に収穫した穂の平均稔実歩合により評価する方法がある(佐々木 1998)。また、耐冷性の評価に用いる冷温処理区の稔実歩合には、出穂日別の平均稔実歩合を算出し、最低の稔実歩合となった日を含み平均の稔実歩合が最も低くなる前後あわせて7日間に収穫した穂の平均稔実歩合を用いた例もある(注：1995～1996年度 水稲新品種育成試験成績書 北海道立上川農業試験場)。さらに、幼穂形成期から出穂始めまでの約30日間を19℃で処理し、同一株内での出穂が早くかつ生育がおう盛な(すなわち主要な)穂の稔実歩合で検定する方法も実施されている(上原 1996)。検定材料の養成は、一般に1/5000a ワグネルポット(以下、1/5000a ポットと略す)に2株(各株1～2本植え)で行い、とくに精密な試験では同ポットに円形20粒播きとする(佐竹 1972)。

しかし、育種事業における穂ばらみ期耐冷性の検定では、人工気象室よりも省力的に検定できる冷水掛け流し検定法が主に利用されている。すなわち、供試品種の中で出穂が最も早い極早生の止葉期から最も遅い晩生品種の出穂期までの期間に、平均19℃の冷水を水深20cmで掛け流す中期冷水掛け流し検定法、およびその改良法であり、早生の幼穂形成期から晩生品種の出穂期までの期間に、不稔発生のむらが生じないように大量の水を用いて、19℃の恒温を維持しながら循環灌漑を行う恒温深水検定法がある(斉藤・堀末 1992, 佐々木 1996, 上原 1996)。また、一部ではあるが、活着直後から成熟期まで長期に冷水を掛け流して、水口と水尻の温度差を利用する長期冷水処理法(水温傾斜法)や、ポット植えの材料を用いて、冷害危険期の数日間だけ13～15℃の冷水に、幼穂の高さに合わせた30～40cmの深さで浸す短期深水冷水処理法も行われている(角田ら 1968, 斉藤・堀末 1992)。

北海道農試では、温室やビニールハウスで熟苗を作り、電熱線を利用して灌漑水温を上昇させた水田に移植して生育を促進させ、6月末から7月中旬頃の気温の比較的低い時期と穂ばらみ期の障害型冷害の危険期とを合致さ

せることによって、不稔発生を助長させる検定法も利用された(小高・安部 1982, 安部・小高 1984)。さらに、穂ばらみ期耐冷性について品種の評価を行うに当たり、北海道、東北地域から温暖地までの各地域で、熟期ごとに耐冷性検定のための基準品種が選定されている(上原 1996, 藤井ら 1986)。

一方、開花期には、すでに感受性器官を有する穂が葉鞘外に伸長しており、穂ばらみ期のように冷水を利用した検定法は利用できない。そのため、これまで試みられた方法では、いずれも人工気象室が利用されている。以下に、これまで報告された主要な検定法を記す。

北海道農試において佐竹(1981b)と佐竹・小池(1982)は、1/5000a ポットに円形20粒播きした材料で、出穂後2日目(開花期)から、冷温処理による開花抑制が著しい条件として12℃で6日間および開花抑制がやや弱い条件として15℃で8日間の処理を行った。それらの冷温処理区の穂の稔実歩合により開花期耐冷性を評価した結果、両区の評価の間に高い正の相関を認めた。また、刈屋(1992, 1993)および戴・刈屋(1994)は、1/5000a ワグネルポットに円形20粒播きし、12℃で6日間処理した場合、出穂日から冷温処理開始日までの日数毎に整理すると、出穂後2～3日目あるいは3～4日目の個体で最も稔実歩合が低くなることを明らかにした。そこで、各品種で同時期の個体が最も多い日から、12℃で6日間の処理を行い、稔実歩合の最低値により開花期耐冷性を評価した。

青森県農試藤坂支場において櫛淵ら(1970a)は、ポット養成の材料(ポットの種類と栽植様式は不明)により17.5℃で7日間の処理を行い、処理開始前1～5日間に収穫した穂における稔実歩合の総平均で、開花期耐冷性を評価した。その後、高館ら(1979)は、1/5000a ポットに1株2本植えで、13℃で5日間から17℃で12日間までの冷温処理を行い、短期の強度処理よりも長期の軽度処理の方が不稔発生が多いことを認めた。さらに、三上ら(1986)は、1/5000a ポットに2株、各1本植えで、15～19℃の7～14日間の処理を行い、処理中の開花穎花率が高く不稔歩合の品種間差異が大きくなる18℃で14日間の処理を検定条件として適当であると結論している。その後同支場では、18℃で16日間の処理により評価を行っている(上原 1996)。

上川農試では従来、穂ばらみ期耐冷性の検定と同様に、1/5000a ポットに2株、各2本植えで養成した材料について、各ポットで5～6本出穂した日から15℃で8日間の処理を行い、処理開始前5日から開始後3日の間に収穫した穂の稔実歩合により開花期耐冷性を評価し

た(佐々木 1998)。

宮城県古川農業試験場において松永ら(1985a)は、1/5000aポットに円形20粒播きで材料を養成し、出穂した穂が1ポット当たり7本以上となった日から16℃で7日間の処理を行って検定した。

以上のような一定の冷温処理を行った穂の稔実歩合により開花期耐冷性を評価する方法とはやや異なるが、農林水産省東北農業試験場(現独立行政法人農業技術研究機構東北農業研究センター)において細井(1989a, 1989b)は、人工光型人工気象室内で水耕法により材料を養成し、弱日射条件で、17.5~22.5℃の6段階の気温条件で出穂日から20日間の処理を行った。その結果から、胚や胚乳における形、大きさおよび表面の色が正常な玄米の比率80%の稔実が可能な最低温度を求め、この値を用いて開花期耐冷性を検定する方法を開発した。

さらに、穂ばらみ期から開花期までの長期冷温条件(処理温度20.0~20.5℃、日射量が自然日射の25~30%)による検定と選抜が、中央農試で1995年から冷害気象実験ドームの圃場において行われている(田中ら 1995, 佐々木 1998)。利用開始からの年数はまだ少ないが、従来の穂ばらみ期耐冷性の極強品種・系統の中に、長期冷温に対する障害型耐冷性が極めて強い育成系統があることが報告されている(注:1998~2000年度 冷害気象実験ドームによる耐冷性検定試験結果 北海道立中央農業試験場)。

7. 耐冷性遺伝資源の評価と育種的利用

耐冷性育種を進めるためには、育種母材となる遺伝資源を広く探索することが重要である。宮城県古川農試では、多くの日本品種について穂ばらみ期耐冷性の評価を行い、その耐冷性が主に「愛国」と「神力」の2品種に由来することを明らかにした(松永・佐々木 1985b, 佐々木 1996)。さらに、日本品種について穂ばらみ期耐冷性の遺伝子を交配により集積し、従来の耐冷性日本品種を上回る耐冷性系統を育成した(松永ら 1994b)。また、北海道農試では、海外の穂ばらみ期耐冷性の遺伝資源を利用して耐冷性が極強の中間母本の育成を行っており、これまでにインドネシア、ペルーおよびマレーシアの品種を用いて、耐冷性の中間母本5系統を育成している(安部ら 1989, 農林水産省北海道農業試験場 1986, 1987)。同様に、上川農試においても、日本の耐冷性遺伝子の集積や海外の耐冷性遺伝子の導入により、耐冷性が極強の系統を多数、育成している(菊地 1997)。さらに、中国雲南省では、標高の高い地域でジャポニカ型の水稲が栽培されており、日本の耐冷性品種を上回る穂ば

らみ期耐冷性を持つ品種が報告されている(熱帯農業研究センター 1985)。

一方、日本品種の開花期耐冷性を広範に調査した報告は穂ばらみ期耐冷性に比べかなり少ない。その中で、細井(1989b)が地域的特徴について、強い品種の多くは東北地域に弱い品種の多くは西南暖地に分布し、また北海道においてはやや強からやや弱の範囲の品種しか存在せず、品種間の変異が特異的に小さいと報告した。さらに、松永ら(1985a)は、開花期耐冷性の強い品種は東北地方の中生品種に多く、関東以西の晩生品種は劣っていると報告した。

また、これまで海外遺伝資源の開花期耐冷性を評価した報告も限られる。佐竹(1981b)は、国際稲研究所(International Rice Research Institute)が幼苗期から開花期までのすべての時期に耐冷性を有すると評価した品種の開花期耐冷性を調査したが、日本品種に比べて開花期耐冷性が強い品種はなかった。また、戴・刈屋(1994)は、中国雲南省の品種と日本品種との比較を行ない、地域間の差異は認められなかったと報告している。

8. 開花期耐冷性研究の問題点

以上述べてきたように、開花期の障害型不稔に対しては、栽培技術的にも育種的にも軽減方法がほとんど確立されておらず、安定生産のための重要な課題として残されている。開花期耐冷性の育種がなされてこなかった主要因は、穂ばらみ期耐冷性における冷水掛け流し検定法のような育種に利用できる簡易な検定法が確立されていないことによる。すなわち、北海道における奨励品種決定試験の供試材料を評価するためには30~40品種・系統を、これより以前の育成試験段階での育成系統の耐冷性を評価するためには最低200系統以上を、毎年調査することが望ましい。しかし、これまでに開発された開花期耐冷性の検定法(細井 1989a, 刈屋 1992, 松永ら 1985a, 佐竹・小池 1982, 佐々木 1998, 熊 1995, 上原 1996)では、必要となる労力と施設の面から考えると、毎年30~40品種・系統を調査する場合でも困難が多く、さらに200系統を調査するのは全く不可能であった。

また、穂ばらみ期耐冷性について行われている新旧品種や新しい育成品種・系統に対する開花期耐冷性の評価が十分に行われていない。さらに、海外の遺伝資源について、開花期耐冷性を評価した例は極めて少なく、海外の遺伝資源を用いた開花期耐冷性の育種の例はこれまで報告されていない。

第Ⅱ章 開花期耐冷性の簡易検定法の確立

1. 材料の養成と冷温処理の方法

耐冷性の検定に関して、穂ばらみ期については北海道と東北地域全県の稲育成地において、通常の育種事業において実施されている。しかし、開花期耐冷性についての検定は、現在、上川農試と青森県農試藤坂支場において極少数の育成系統の評価を行っているに過ぎず、他の育成地ではほとんど実施されていない。

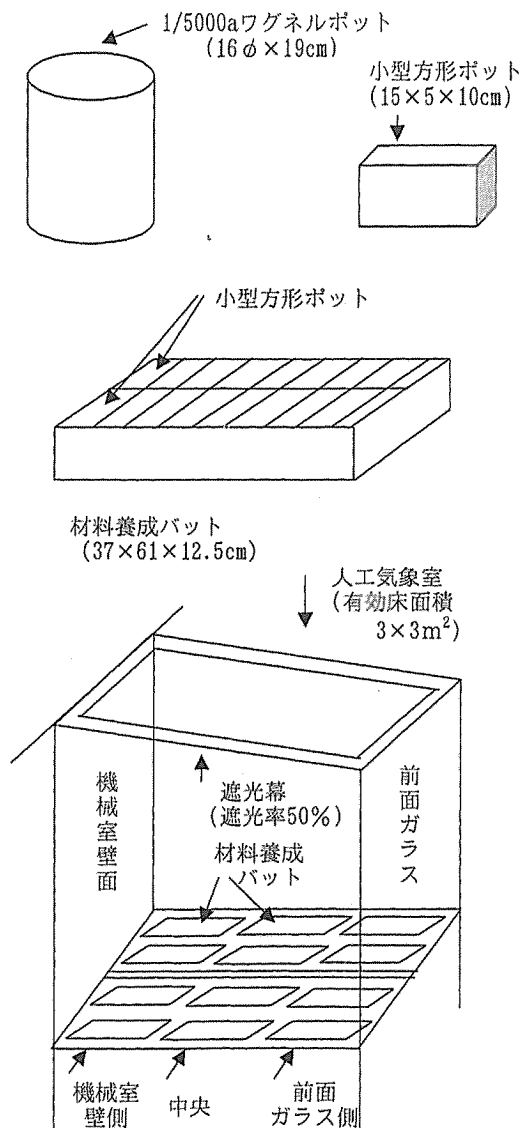
この原因として、開花期の障害型不稔の発生頻度が穂ばらみ期に比べて少ないこと、および穂ばらみ期耐冷性の検定で主に使われている冷水掛け流し検定法に比べて、開花期耐冷性の検定では、人工気象室などの稼働経費が大きい施設を必要とすることがあげられる。さらに、育種事業においては、多数の品種・系統を検定する必要があるため検定法は簡易でなければならないが、これまでに報告されている開花期耐冷性の研究（細井 1989a, 刈屋 1992, 松永ら 1985a, 三上ら 1986, 佐竹・小池 1982, 佐々木 1998, 熊 1995, 上原 1996）では、この視点からの検定法の検討が不十分であったことも大きな要因の一つである。たとえば、人工気象室を用いた試験では1/5000aポットを用いた例が多いが、このポットでの供試材料の養成や検定作業に多くの労力と大きな施設を要することが、検定実施のための制限要因となっている。

以上のことから、本試験では、使用ポットや栽植様式の簡易、省力化を図り、育種に利用可能な開花期耐冷性の検定のための簡易検定法を確立しようとした。

材料と方法

試験を上川農試において、1996～1998年の3カ年にわたって実施した。供試品種は、刈屋（1992）の報告から開花期耐冷性が大きく異なり、「赤毛」と「はやゆき」（長稈穂重型）や「キタアケ」と「きらら397」（短稈穂数型）を含む6～14品種（年次、試験により異なる）を選定した。

材料の養成には、縦15×横5×高さ10cmのプラスチック製の有穴方形ポット（第Ⅱ—1図参照。以下、とくに言及しない場合、このポットを使用）を用いた。各ポットには、同一品種を直列に8株、各2粒播きし、後に1本立てとし、6月2～14日に分けつを切除して主稈のみの密植栽培とした。播種日は年次により異なり、5月6～17日であった。ポットは有穴であり、深さ11cm程度に湛水したバット（材料養成には縦37×横61×高さ12.5cm、



図Ⅱ—1 簡易検定法におけるポットの形状および養成バットと人工気象室内における配置。

冷温処理には縦35×横51×高さ13cm)に、16～18ポット(/バット)を配置した。ポットに用いた土壌および肥料は、1996、1998年には畑土壌に化成肥料（N、P₂O₅、K₂Oをそれぞれ16、18、16%含む）をポット当たり窒素成分量で0.13g施用し、1997年には人工培土（1kg中N、P₂O₅、K₂Oをそれぞれ0.34、0.68、0.54g含む）を用い、ポット当たり窒素成分量を0.19gとした。

処理前の材料は、穂ばらみ期での冷温の影響を除くため、生育初期には加温装置付きガラス室で、その後6月20日頃に平均気温22℃（昼26—夜20℃、昼は朝9時から

夕方5時まで)に設定した自然光型人工気象室に移動して養成した。

冷温処理は、自然光型人工気象室内で実施した。ただし、直射日光による影響を小さくするために、人工気象室内の天井部に遮光率50%の遮光幕を張った。処理開始は夕方5時とした。処理は15℃で8日間の短期冷温処理および17.5℃で15日間の中期冷温処理の2条件で、さらに、供試材料をポット毎に、出穂から処理開始までの日数の異なる個体群に分けて処理した。すなわち、ポット内の個体毎に出穂日を連続して記録し、出穂数が最も多い日を出穂から処理開始までの日数=0日とし、短期冷温処理では1996年が0, 1, 2, 3, 4, 5, 6日目の個体群(区)、1997年は0, 1, 2, 3日目、中期冷温処理では1997年が0と1日目のみ、1998年は品種により-1, 0, 1, 2日目および0日目のみとした。出穂日は、前日の処理開始時刻以降から当日の処理開始直前までに、穂先が止葉葉鞘の先端からわずかにでも抽出した日とした。各処理区には、3~6ポット(無処理区は2ポット)を供試した。1ポット内の8個体については、肉眼により周縁効果による生育差がみられなかったため、全個体を調査対象とし、調査穂数は合計5穂以上とした。また、処理に当たり人工気象室内の日照条件が品種や処理区で偏らないように、施設により日照が遮られる程度が小さい方から、人工気象室の前面ガラス側、中央および機械室壁側の3域に、均等にポットを配置した。

調査は、成熟期に穂毎に触手による稔実調査を行い、出穂から処理開始までの日数別に稔実歩合を整理した。

なお、1998年には従来の栽培法との影響の違いを把握するため、8品種を供試し、1/5000aポットに2株、各2本植の普通株栽培とし、分けつを含めた主要な穂について出穂日を連続して記録し、出穂数が最も多い日に中期冷温処理を行った。施肥量は、化成肥料で窒素成分量をポット当たり0.44gとした。処理区と無処理区に、それぞれ4, 2ポットを供試した。

また、同年には、本試験で用いた各ポット栽培による材料と一般圃場で慣行栽培した水稲との形態特性の違いを比較するために、2品種につき4月14日に播種した中苗マット苗を、5月19日に栽植密度33.3×12cm、各株4本植で、圃場への移植を行った。肥料は全量基肥として、N, P₂O₅, K₂Oを成分量でそれぞれ90, 110, 80kg ha⁻¹を施与した。

統計計算は、Microsoft (R) Excel 97 SR-1および同Excel 2000を使用した。また、*, **はそれぞれ5, 1%水準で統計的に有意であること、nsは有意でないことを示した。

なお、次節以降の開花期耐冷性の検定における材料養成および冷温処理の方法は、以下の点を除いて、前述の方法と同じである。ポットに、1996, 1998年と同様に、畑土壌を入れて化成肥料を施与した。5月6~12日に播種し、6月8~18日(主に6月10日前後)に分けつを切除した。開花期の冷温処理前の養成材料を、6月10~20日(主に6月11日前後)に、加温装置付きガラス室から平均気温22℃の人工気象室に移動した。冷温処理は、中期冷温の出穂日開始処理とした。5~6ポットを養成し、10穂以上を目標に、3~5ポットの冷温処理を実施した。また、開花期耐冷性は、冷温処理区の稔実歩合が90%以上を極強、それ以下を15%刻みに均等に分けて極強(2)から極弱(8)までとし、計7ランクに分類した。

結 果

簡易検定法の主稈密植、従来の普通株栽培および一般圃場栽培の穂の形態特性を第II-1表に示した。普通株栽培での生育は、一般圃場栽培に比べて穂数が少なかったことを除き、ほぼ類似していた。これらに比べ簡易検定法の主稈密植栽培での成長は、稈長と穂長で約30~40%短く、一穂粒数については25~30粒と45~50%減少し、かなり小さかった。

第II-2表と第II-3表に、それぞれ1996, 1997年の短期冷温処理における出穂から処理開始までの日数別の稔実歩合を示した。各品種の稔実歩合が最も低い処理区でみると、1996年が17~56%(それぞれ「赤毛」~「きらら397」)、1997年が11~51%(それぞれ「しおかり」~「うりゅう」と「イシカリ」)と、開花期耐冷性に大きな品種間差異が認められた。この短期冷温処理により得られた出穂から最低稔実歩合となる処理開始までの日数は、各品種ともほぼ0~3日の範囲にあり、出穂日からその直後の計4日間が、冷温に最も敏感と考えられた。短期冷温処理では、最低稔実歩合および出穂から最低稔実歩合となる処理開始までの日数における品種間差異は、年次を変えてもほぼ類似していた(両年の間で、それぞれ $r=0.764^{ns}$ および 0.872^* , $n=6$, 第II-2表の供試品種に基づく)。

第II-3表と第II-4表に、それぞれ1997, 1998年での中期冷温処理における出穂から冷温処理開始までの日数別の稔実歩合を示した。前述の短期冷温処理試験に比べ、試験を実施した出穂から処理開始までの日数の幅は狭い。しかし、出穂日に処理を開始した穂の稔実歩合が、それ以降に処理を開始した穂の稔実歩合より低い傾向がみられた。また、開花期耐冷性には出穂日に冷温処理を

第Ⅱ—1表 簡易検定法の主稈密植，従来の普通株栽培および一般圃場栽培での稲の形態特性の比較（1998年）。

栽培法	品種名	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (株 ⁻¹)	一穂 籾数	稈実歩合 (%)
主稈密植	赤毛	60±1	11.6±0.2	1.0±0.0	30.1±1.1	96±2
	農林20号	65±2	10.5±0.2	1.0±0.0	29.5±1.8	87±3
	ゆきひかり	48±1	11.5±0.3	1.0±0.0	27.6±1.7	98±1
	きらら397	48±1	10.6±0.2	1.0±0.0	25.1±1.0	99±1
	平均 (調査個体数)	55(10)	11.1(10)	1.0(10)	28.1(10)	95(10)
普通株	赤毛	99±3	19.3±0.8	7.0±0.6	54.6±3.0	73±2
	農林20号	104±2	18.2±0.3	6.7±0.4	52.3±3.3	76±2
	ゆきひかり	69±1	17.5±0.4	10.8±0.9	54.2±3.9	93±2
	きらら397	67±1	15.8±0.6	9.5±0.6	47.6±3.0	94±1
	平均 (調査個体・穂数*)	85(10)	17.7(10)	8.5(5)	52.2(13-34*)	84(13-34*)
一般圃場	ゆきひかり	68±1	16.4±0.2	24.0±0.9	62.3±1.9	90±2
	きらら397	65±0	16.1±0.2	30.1±0.6	53.8±3.3	85±4
	(調査個体数)	(20)	(20)	(20)	(4)	(4)

簡易検定法の主稈密植：縦15×横5×高さ10cmの方形ポットに8株，各1本植，主稈のみ。従来の普通株：1/5000aワグネルポットに2株，各2本植。一般圃場：25株 m⁻²，標肥慣行法。育成年次は「赤毛」：1905年，「農林20号」：1941年，「ゆきひかり」：1984年，「きらら397」：1988年。数字は平均値±標準誤差。*は2～4個体の主要な13～34穂を調査。普通株区は平均気温22℃の人工気象室内で養成したが，品種により30%近い不稈発生が見られた。

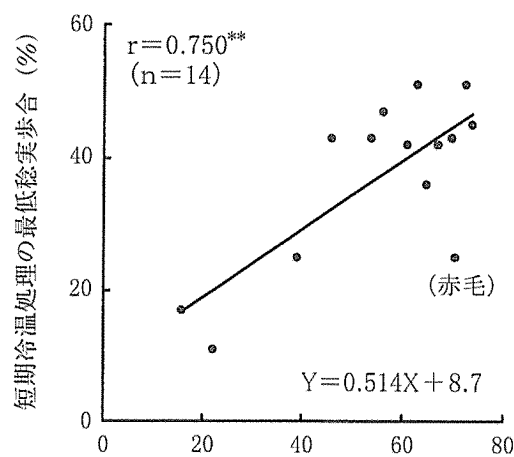
第Ⅱ—2表 1996年における短期冷温処理（15℃で8日間）の開始時期が稈実歩合 (%) に及ぼす影響。

品種名	育成年次	出穂から処理開始までの日数						無処理区	
		0	1	2	3	4	5		6
きらら397	1988	63±4 (17)	56±3 (17)	58±4 (12)	58±3 (10)	74±3 (9)	90±3 (7)	92±2 (8)	96±1 (24)
はやゆき	1968	61±3 (18)	45±3 (17)	42±3 (16)	54±3 (16)	73±3 (14)	81±3 (13)	87±3 (8)	95±1 (23)
キタアケ	1983	54±3 (14)	40±3 (14)	45±2 (12)	62±3 (12)	85±2 (10)	86±6 (8)	97±1 (6)	97±1 (24)
しまひかり	1981	62±4 (16)	39±3 (16)	30±2 (13)	42±3 (13)	60±3 (10)	67±4 (13)	81±3 (11)	96±1 (13)
農林20号	1941	39±2 (22)	22±2 (18)	25±2 (18)	47±3 (17)	70±3 (16)	78±4 (17)	90±2 (9)	87±2 (17)
赤毛	1905	17±1 (18)	27±2 (19)	49±4 (17)	71±2 (17)	79±2 (15)	86±2 (8)	85±2 (15)	87±2 (16)

太字は，同一品種において最も稈実歩合が低い区を示す。育成年次を除き，数字は平均値±標準誤差。()内の数字は調査穂数。

開始した区の稈実歩合で，1997年が8～80%（それぞれ「しまひかり」～「キタアケ」），1998年が10～75%（それぞれ「しまひかり」～「はやゆき」）と，かなり大きな品種間差異が認められ，さらに処理開始日に出穂した穂の稈実歩合における品種間差異は年次間でほぼ同様であった ($r=0.808^{**}$, $n=14$ ，第Ⅱ—3表の供試品種に基づく)。

短期冷温処理の最低稈実歩合における品種間差異は11～51%であったのに対し，出穂日開始処理による中期冷温では8～80%と，品種間差異が大きかった（第Ⅱ—3表）。しかし，第Ⅱ—2図に示すように，出穂日開始処理による中期冷温での稈実歩合と短期冷温処理の最低稈実歩合の間には，「赤毛」のように前者に比べ後者でやや低くなる例もあったが，全品種では有意な正の相関関係が得られた。



出穂日処理での中期冷温による最低稈実歩合 (%)
第Ⅱ—2図 出穂日処理での中期冷温（17.5℃で15日間）による最低稈実歩合と短期冷温処理（15℃で8日間）の最低稈実歩合との関係。
中期冷温処理は1997，1998年の平均，短期冷温処理は1997年のみ，**：1%水準で有意。

第Ⅱ—3表 1997年における短期冷温（15℃で8日間）および中期冷温（17.5℃で15日間）処理の開始時期が稔実歩合（%）に及ぼす影響。

品 種 名	育 成 年 次	出 穂 から 処 理 開 始 ま で の 日 数						無 処 理 区
		短 期 冷 温 処 理				中 期 冷 温 処 理		
		0	1	2	3	0	1	
キタアケ	1983	60±3 (18)	45±2 (21)	49±2 (23)	67±5 (8)	80±6 (8)	83±3 (10)	94±1 (11)
ゆきひかり	1984	42±3 (22)	51±2 (18)	58±3 (15)	69±7 (6)	74±6 (7)	76±4 (8)	96±1 (11)
きらら397	1988	43±7 (11)	47±4 (15)	48±5 (12)	49±5 (8)	73±5 (10)	71±5 (5)	94±2 (6)
うりゅう	1965	58±3 (18)	51±3 (17)	56±3 (26)	72±4 (12)	71±5 (10)	63±5 (6)	96±0 (6)
赤毛	1905	25±2 (17)	33±4 (14)	53±5 (17)	69±5 (17)	64±4 (8)	66±4 (8)	90±1 (8)
道北糯18号	1973	47±3 (26)	49±2 (25)	55±3 (13)	66±3 (13)	61±5 (7)	71±3 (5)	96±2 (7)
イシカリ	1971	55±3 (26)	51±6 (11)	57±3 (20)	60±3 (11)	61±6 (6)	78±6 (5)	94±2 (10)
はやゆき	1968	55±3 (10)	55±3 (13)	45±3 (12)	36±2 (14)	54±9 (8)	59±7 (9)	89±2 (11)
ユーカラ	1962	44±3 (23)	46±3 (6)	43±2 (14)	50±5 (8)	46±6 (9)	53±11 (6)	83±4 (3)
そらち	1967	57±3 (20)	45±4 (18)	42±5 (13)	55±3 (15)	47±6 (9)	50±12 (5)	94±2 (6)
ひめほなみ	1966	44±5 (11)	43±4 (13)	46±3 (13)	54±9 (6)	41±6 (8)	52±10 (5)	91±1 (8)
農林20号	1941	25±3 (14)	27±2 (27)	29±2 (26)	48±3 (10)	39±6 (10)	57±4* (3)	86±2 (11)
しおかり	1963	11±2 (13)	20±3 (15)	44±4 (16)	64±7 (6)	20±6 (7)	39±5 (9)	87±5 (7)
しまひかり	1981	34±5 (10)	25±2 (12)	25±3 (10)	17±5 (6)	8±10 (10)	10±4 (5)	91±4 (4)

太字は同一の冷温処理および品種において、稔実歩合が最も低いか（短期）、より低い（中期）区を示す。育成年次を除き、数字は平均値±標準誤差。（ ）内の数字は調査穂数。*は調査穂数が少ないため参考。

第Ⅱ—4表 1998年における中期冷温処理（17.5℃で15日間）の開始時期が稔実歩合（%）に及ぼす影響。

品 種 名	出穂から処理開始までの日数				無 処 理 区
	- 1	0	1	2	
はやゆき	77±2 (15)	75±3 (27)	80±3 (12)	91±1 (16)	95±1 (11)
うりゅう	69±3 (20)	70±2 (22)	72±4 (16)	76±4 (9)	100±0 (10)
赤毛	61±3 (16)	70±2 (32)	77±4 (17)	86±3 (10)	96±2 (10)
きらら397	70±5 (14)	68±2 (37)	76±3 (25)	84±4 (12)	97±1 (10)
キタアケ	67±4 (15)	64±2 (35)	77±3 (15)	81±5 (10)	93±1 (10)
イシカリ	51±3 (13)	55±3 (36)	64±4 (23)	79±2 (14)	97±1 (10)
農林20号	45±5 (14)	43±3 (32)	55±4 (21)	58±2 (14)	97±1 (10)
しおかり	13±2 (23)	22±2 (27)	28±4 (21)	50±4 (18)	94±1 (13)
しまひかり	4±1 (12)	10±2 (28)	21±4 (23)	29±4 (15)	97±1 (10)

太字は、同一品種での出穂以降の処理開始区（出穂から処理開始までの日数、0、1、2区）において、稔実歩合が最も低い区を示す。数字は平均値±標準誤差。（ ）内の数字は調査穂数。

この主稈密植栽培による稲個体は、普通株栽培に比べかなり小さいことから、処理効果に違いが生じる可能性がある。そこで、中期冷温処理における主稈密植と普通株栽培による検定結果を比較したところ、第Ⅱ—3図に示したように、稲個体の大きさが異なる材料間においても密接な正の相関関係が認められた。

以上の結果を基にして、検定に必要な穂数の推定を試みた。2つの標本平均値における最小有意差（L）は、次式（1）により与えられる。

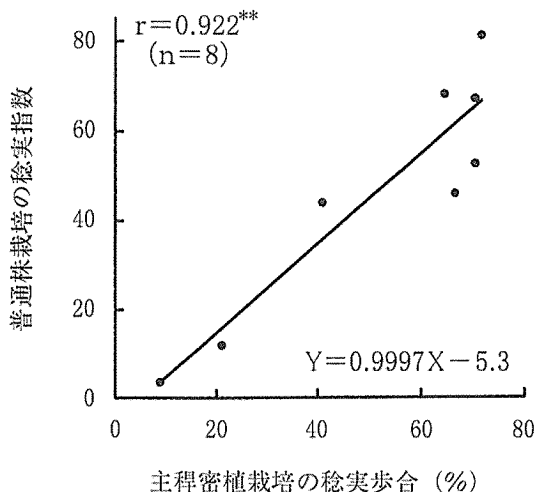
$$L = 1.96\sqrt{2s^2/n} \dots\dots\dots (1)$$

Lについてここでは5%水準を用い、s²は標本が抽出された母集団の分散で、nは標本数である。

すなわち、標本平均値の誤差が5%水準でLより小さくなるための標本数は、(1)式を変換した次式（2）により算出される。

$$n = 7.68s^2/L^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、nは、得られた平均値の誤差が5%水準で稔実歩合±12%より有意に小さいために必要な標本数である。±12%としたのは、以下の理由による。1997、1998



第Ⅱ—3図 中期冷温出穂日処理 (17.5℃で15日間) における主稈密植栽培および普通株栽培の稔実歩合 (指数) の間の関係。

主稈密植栽培は1997, 1998年の平均, 普通株栽培は1998年のみ, 各栽培法の使用ポットおよび栽植様式は, 第Ⅱ—1表の脚注を参照。普通株栽培は, 無処理区に4~30%の不稔が発生したため (第Ⅱ—1表参照), 稔実指数 (処理区の稔実歩合を無処理区のもので除した値) を用いた。*: 1%水準で有意。

年の2カ年の中期冷温出穂日処理の結果から, 最も稔実歩合の高かった1997年での「キタアケ」の80%, 1998年での「はやゆき」の75%を開花期耐冷性が強, 「きらら397」の68~73%と「イシカリ」の55~61%をやや強, 「農林20号」の39~43%をやや弱, 常に低かった「しおかり」の20~22%を弱, 「しまひかり」の8~10%を極弱と考えた。そのあてはめにより, 90%以上を極強とし, 残りの90%以下を均等に6段階に分け, その値の15% (1ランク) に基づいて, 許容誤差を便宜上やや小さい $\pm 12\%$ (0.8ランク) とした。 s^2 は穂毎の稔実歩合を逆正弦変換し, 分散分析より求めた誤差分散である。Lは品種の平均値から許容できる最小の誤差であり, この場合は稔実歩合12%の差に対応する逆正弦変換値である。その値は稔実歩合に正比例する関係にないため, 各品種の平均稔実歩合 $\pm 12\%$ に対応する変換値の差の1/2を求め, その平均値である8.46とした。

なお, 1ランクの幅を決定するのに参考にした品種の中で, これまでの報告に重複して供試されている4品種の検定結果 (細井 1989b, 刈屋 1992, 松永ら 1985a, 佐竹・小池 1982) を極強から極弱まで7ランクに当てはめ平均をとると, 「はやゆき」と「イシカリ」がやや強~強, 「農林20号」は中, 「しおかり」は中~やや弱となる。これは本試験の結果に比べ, 中よりも弱い品種でより強く評価されている傾向がある。しかし, これらの

評価も耐冷性検定のための基準品種が確立されていないので, 同時に供試した他の品種の強弱によって多少変動しうる。たとえば, 既報 (松永ら 1985a, 佐竹・小池 1982) には, 外国品種も同時に供試され最も弱く評価されている例も含まれる。以上のことから, 本試験の評価とこれまでの報告の間に, わずかな差異が生じても大きな問題はないと思われる。

以上の試算方法によると, 必要穂 (標本) 数は10穂であった (第Ⅱ—5表)。一方, 実際に96品種について5ポットを用意し, 同一日に出穂した穂が多い3ポット

第Ⅱ—5表 稔実歩合の標本平均値の誤差を5%水準で有意に $\pm 12, \pm 10, \pm 7.5\%$ より小さくするために必要な標本数の推定。

供試 品種 数	各品種 の調査 穂数	誤差 分散	必要標本数		
			$\pm 12\%$	$\pm 10\%$	$\pm 7.5\%$
9	22~37	92.7	10.0	14.3	28.0

出穂日処理での中期冷温 (17.5℃で15日間) による結果に基づく (第Ⅱ—4表)。必要標本数 (n) の算出は, 以下の式による。最小有意差 $L=1.96\sqrt{2s^2/n}$ を変換し, $n=7.68s^2/L^2$, s^2 : 穂毎の稔実歩合を逆正弦変換し, 分散分析より得られた誤差分散, L: 稔実歩合12, 10, 7.5%の差に対応する逆正弦変換値。

(24個体) を選び, この検定に供試したところ, 97%で合計8穂 (1ポット当たり2.7穂) 以上, 72%は合計10穂以上の調査穂数 (出穂日と処理開始日が一致したもの) が得られており (平均11.0穂, 96品種), 冷温処理に供試するポット数は3~4ポットあれば十分であると考えた。

考 察

開花期耐冷性の検定での冷温処理の条件は, これまでに主に, 12℃で6日間, 15~16℃で7~8日間, および17.5~18℃で14~16日間の3条件が報告されている (刈屋ら 1986a, 松永ら 1985a, 熱帯農業研究センター 1985, 佐竹 1979a, 熊 1995, 上原 1996, 佐々木 1998)。刈屋 (1992) は12℃の6日間処理において, 稔実歩合が最低となる処理開始日は, ほぼ全品種とも出穂後3~4日目であることを認めている。さらに, 本試験における短期冷温処理 (第Ⅱ—2表と第Ⅱ—3表) と中期冷温処理 (第Ⅱ—3表と第Ⅱ—4表) の結果を考え合わせると, 強い冷温で短期間処理したものに比べ, 弱い冷温で長期間の処理したものほど, 出穂から最低の稔実歩合となる処理開始までの日数における品種間差異が大きくなり, 稔実歩合は出穂から処理開始までの日数に対して, 直線的に

比例して高くなると推察される。三上ら (1986) は、処理温度が高くなるほど検定のための処理期間が長くなり、同時に処理中の開花率が高くなり、また本試験の結果と同様に、15℃の7日間処理よりも18℃の14日間処理で品種間差異が明瞭になることを認めている。

これまでの研究では、冷温処理条件が12~16℃の6~8日間で、処理の開始日を35%出穂日や出穂後2日目のように品種間で同一とした試験例も見受けられる (佐竹 1981b, 佐竹・小池 1982, 松永ら 1985a)。しかし、この処理条件では、17.5~18℃の14~16日間処理 (中期冷温) と異なり、出穂日から最低稔実歩合となる処理開始日までの日数に品種間差異が認められることから、同一の処理開始日とする方法では、必ずしも検定のために必要な各品種の最低稔実歩合を調査することにならないので注意を要する。

本試験では、中期および短期冷温処理では開花への影響がやや異なったにもかかわらず、中期冷温処理と短期冷温処理とによる検定結果の間に有意な正の相関関係が得られた (第II-2図)。さらに、刈屋 (1992) が報告している12℃の6日間処理による検定結果と本試験での中期冷温処理の結果との間には、 $r=0.802^{**}$ ($n=14$) と有意な正の相関が認められた (中期冷温処理は2カ年平均、刈屋のデータは1品種が1回のみ、他は2回以上の測定平均)。このように、冷温処理による検定結果は、処理温度が12℃ (刈屋 1992)、15~16℃ (松永ら 1985a, 本試験)、および17.5℃ (本試験) と大きく異なる場合においても、処理期間を考慮すると近似していた。

検定材料の養成法は、1/5000aポットに2株、各1~2本植による例 (上原 1996, 佐々木 1998) があり、この場合には一般圃場の稲個体に類似した大きさの材料が得られる。一方、佐竹 (1972) は精密な冷害生理実験を行う必要から、1/5000aポットに円形20粒播きすることにより生育の揃った主稈を得る方法を考案した。しかし、同ポットを材料養成に用いた場合には、人工気象室やガラス室などの施設の大きさ、および灌水や処理前後の移動に要する労力の大きさが検定実施の制限要因であった。これらを解消するため、本法では、1/5000aポットに比べ、ポット当たり土壤容積量が1/5と少ないため軽量の縦15×横5×高さ10cmの方形ポットを用い、主稈8本の直播栽培とした。この栽培法では、佐竹の方法に比べ使用土壤量当たり栽植密度は2倍となり、養成された個体は当然、一般圃場で栽培した稲個体に比べ極めて小さい。しかし、このような小さな個体の材料から得られた結果でも、1/5000aポット栽培の一般圃場の稲の大きさに近い材料を用いて得た検定結果に近似して

おり、開花期耐冷性検定のための方法として利用可能である。

本法での検定に必要な最少穂数は1品種10穂、冷温処理に供試するポット数は3~4であった。なお、この必要穂数には、検定に要する労力が過大とならないように、評価結果に±12% (0.8ランク) の誤差を許容している。さらに、精度の高い検定を行う必要がある場合、たとえば±10% (0.67ランク) や±7.5% (0.5ランク) 以内の誤差にするには、それぞれ14穂と28穂の調査穂数が必要となる。このように、本法では、検定の目的にあった試験精度 (調査穂数) の設定ができる (第II-5表)。

育種事業の検定においては、作業労力の大小が、新方法が活用されるか否かの大きな要因となる。当然、それには検定法の精度が関係し、精度が低ければ反復を多く必要とし、労力も大きくなる。短期冷温処理では、出穂日から最低稔実歩合となる処理開始日までの日数が品種で異なり、出穂後0~3日と4日間にわたったが、この中期冷温処理ではいずれの品種においても、処理開始日に出穂した穂の稔実歩合を最低稔実歩合とみなせた。そのことから、処理と調査に必要な労力が、中期冷温処理では短期冷温処理の1/4であった。さらに、中期冷温処理における品種間差異は、短期冷温処理での品種間差異に類似し、かつ明瞭であることから、中期冷温処理が実際の育種における検定法として適切である。また、本法では、生育を揃えるため主稈のみの密植栽培とし、使用ポットは従来の1/5000aポットに比べ小さく軽いだけでなく、16~18ポットを1ポットで扱えるため水管理が容易である。すなわち、本法における冷温処理での品種平均の供試ポット数は3.4であった。1/5000aポットを用いて、冷温処理に最低の反復をとるために1品種に2ポットを用いる従来法に比べて、本法は検定時の人工気象室の占有面積は約50%と小さく、その総重量 (主に土壌) は35%と軽く、水管理は10%程度の少ない労力で済み、かなり省力的であった。

2. 短日処理による効率化

雲南省などの外国品種や日本全国の品種について開花期耐冷性を検定する場合、到穂日数 (播種日から出穂日までの日数) の変異が大きいため、材料養成のみならず検定に要する労力が極めて大きくなる。著者による北海道における試験例 (第III章1節で後述) では、北海道品種のみであれば到穂日数は54~72日であるが、東北以南の日本品種 (以下、東北以南の品種と記す) では長くなり、九州における最長の品種では132日にも達した。また、これらの品種を同一年次に検定するためには、出穂

が続く79日間にわたり出穂の確認や検定作業を行う必要があり、多大な労力が必要となる。国際稲研究所による「International Rice Cold Tolerance Nursery」によると、世界各国の耐冷性品種・系統のほとんどは北海道品種よりも出穂期が遅く（注：1990～1996年度 水稲新品種育成試験成績書 北海道立上川農業試験場）、外国品種の開花期耐冷性を検定するには、日本全国の品種以上に大きな労力が必要となる。

短日処理による到穂日数の短縮が開花期耐冷性に影響しないのであれば、短日処理を検定材料の養成法に取り入れ、省力化を図ることが可能である。日本の稲育成地においては、交配材料の出穂を早めるため一般に短日処理が行われているが（滝田 1996）、到穂日数の短縮程度の大小は品種によって異なっている。既報の開花期耐冷性の評価を行った試験での材料養成時の日長条件をみると、自然日長（松永ら 1985a）、人工光による12時間一定（佐竹 1981b, 細井 1989a, 1989b, 戴・刈屋 1994）、さらに北海道品種は自然日長、東北以南の品種あるいは外国品種は人工光による12時間一定（佐竹・小池 1982, 刈屋ら 1986a）とさまざまである。しかし、材料養成時における日長条件の違いが開花期耐冷性の評価に及ぼす影響についての知見はない。

そこで、東北以南の品種および中国雲南省の品種について、短日処理を行って到穂日数を短縮した材料および自然日長で養成した材料の開花期耐冷性を、第Ⅱ章1節に示した簡易検定法を用いて調査した。その結果から、短日処理による到穂日数の短縮が開花期耐冷性に及ぼす影響を明らかにするとともに、短日処理を利用した省力的な検定法の可能性を検討した。

材料と方法

到穂日数の短縮処理試験を1999、2000年に、上川農試において行った。供試品種は、東北以南の主要な14品種および中国雲南省の耐冷性由来3品種（熊 1995）である（第Ⅱ—6表）。1999年には、自然日長条件下で養成した材料について開花期耐冷性を調査し（自然日長区）、2000年には、短日処理を行い到穂日数を短縮させて養成した材料について開花期耐冷性を調査した（短日処理区）。ただし、自然日長区における「麗江新団黒谷」は2000年、「中母42」、「はえぬき」および「キヌヒカリ」の3品種は1999、2000年の2カ年に供試し、2カ年に供試した3品種については、検定誤差を小さくするための反復と考え平均値を用いた。

材料養成および冷温処理方法は、以下の点を除いて、第Ⅱ章1節と同じである。短日処理は、ガラス室内に設

置された暗幕による短日処理装置を用い、夕方5時から翌朝9時まで暗黒条件とし、その他は自然光による8時間日長である。8時間日長としたのは、上川農試において北海道以外で育成された交配母本の出穂を早めるために、以前から用いてきたことによる。処理期間は、5.5葉期頃に当たる6月13日から14日間とした。

処理開始日を6月13日としたのは、以下の理由による。1998年に東北の6品種、「日本晴」および中国雲南省の2品種、計9品種を供試して、6月16日～7月14日（28日間）の短日処理により予備試験を行ったところ、中国雲南省の品種が最も早く7月20日に、出穂を始めた。短日処理による穂ばらみ期耐冷性への影響を避けることを考慮すれば、冷温による穂ばらみ期の不稔発生が生じる出穂前23日間（Satake 1991）より以前に、短日処理が終了する必要があると考えた。すなわち、7月20日から37日（14日+23日）を差し引いて求めた日、すなわち6月13日が短日処理開始日となる。処理終了後は、人工気象室内（平均気温22℃、自然日長）で養成した。なお、短日処理区では、処理終了後23日目に最も早い品種の出穂日となった。

自然日長区においては、冷温処理区で8～11穂（平均8.9穂）および対照区で7～13穂（9.9穂）を、短日処理区においては、冷温処理区で4～16穂（10.6穂）および対照区で6～16穂（13.1穂）を調査した。

結 果

到穂日数は、自然日長区で86～132日、平均で108日であった（第Ⅱ—6表）。一方、短日処理区では70～97日、平均で80日であり、自然日長区に比べ3～54日、平均で28日短くなった。自然日長区の到穂日数は、育成地の緯度が低い品種ほど長かった（自然日長区の到穂日数と育成地の緯度との相関係数は、 $r = -0.732^{**}$, $n = 17$ 。日本品種のみでは $r = -0.869^{**}$, $n = 14$ ）。また、自然日長区における到穂日数が長い品種ほど、短日処理による短縮程度は大きかった（第Ⅱ—4図）。

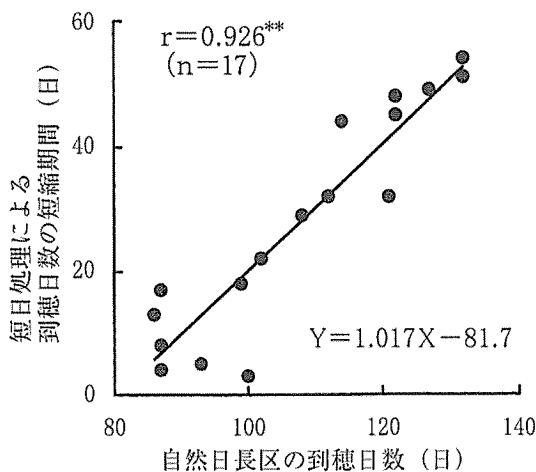
開花期耐冷性の検定での処理開始日となる出穂日の分散の大きさを検討するため、各品種の到穂日数から最短品種の到穂日数を減じた日数の標準偏差を算出した。得られた標準偏差は自然日長区では16.5日であるのに対し、短日処理区では6.8日であり、短日処理により出穂日の品種間変異が小さくなった。

対照区の稔実歩合は、短日処理区の「Xiao Ma Gu」が67%と低かった。しかし、同品種の自然日長区では96%であり、短日処理の影響による不稔発生と思われた。その他の品種については、両区とも84%以上で、平均95～

第Ⅱ—6表 自然日長区および短日処理区で養成した材料における開花期耐冷性の検定結果.

品 種 名	育 成 地	育 成 年 次	自 然 日 長 区 (1999年)					短 日 処 理 区 (2000年)					短 日 処 理 区 による 差 異	
			冷 温 処 理 区			対 照 区		冷 温 処 理 区			対 照 区			
			到 穂 日 数	稔 実 歩 合 (%)	調 査 個 体 数	稔 実 歩 合 (%)	調 査 個 体 数	到 穂 日 数	稔 実 歩 合 (%)	調 査 個 体 数	稔 実 歩 合 (%)	調 査 個 体 数	到 穂 日 数	稔 実 歩 合 (%)
藤坂5号	青森	1947	86±0	77±5	9	100±1	10	73±0	59±4	12	99±1	15	-13	-18
レイメイ	青森	1963	87±0	52±7	8	99±1	10	83±0	42±7	8	98±1	15	-4	-10
中母42	青森	—	87±0	90±2	10	97±4	9	70±0	80±3	14	99±1	16	-17	-10
亀の尾	山形	—	87±0	9±4	8	91±5	10	79±0	13±5	7	84±3	16	-8	4
キヨニシキ	秋田	1966	93±0	15±6	9	98±1	12	88±0	19±7	4	97±1	15	-5	4
オオトリ	青森	1955	99±1	78±6	8	100±0	10	81±0	84±5	12	99±1	7	-18	6
トヨニシキ	秋田	1966	100±0	9±3	9	87±9	10	97±0	38±6	12	93±3	15	-3	29
はえぬき	山形	1990	102±0	68±4	11	99±1	9	80±0	80±3	14	98±1	16	-22	12
染分	福島	—	108±0	59±7	9	99±1	10	79±1	84±3	9	99±1	16	-29	25
キヌヒカリ	新潟	1983	112±0	53±7	9	98±1	13	80±0	87±2	16	97±1	16	-32	34
Xiao Ma Gu	雲南	—	114±0	58±3	9	96±1	12	70±0	31±3	11	67±4	15	-44	-27
日本晴	愛知	1961	121±0	1±1	10	94±3	10	89±0	3±1	12	97±1	16	-32	2
アキニシキ	新潟	1969	122±0	23±10	9	85±10	10	77±1	58±6	9	99±1	8	-45	35
攀農1号	雲南	—	122±0	55±5	9	93±4	7	74±0	75±4	10	98±1	15	-48	20
農林22号	兵庫	1941	127±0	66±3	8	99±0	8	78±1	81±4	11	97±3	6	-49	15
ミナミニシキ	宮崎	1972	132±0	12±3	9	96±1	10	81±0	46±5	11	96±2	8	-51	34
麗江新団黒谷	雲南	—	132±0	61±6	9	87±3	8	78±1	75±5	9	85±5	7	-54	14
品種平均 (n=16*, 17)			108	46*	8.9	95*	9.9	80	58*	10.6	96*	13.1	-28	12*

1999年には自然日長栽培で、2000年には短日処理栽培で養成した材料を検定に供試。ただし、自然日長栽培について「麗江新団黒谷」は2000年、「中母42」、「はえぬき」および「キヌヒカリ」は1999、2000年の2カ年に供試し、2カ年供試した3品種については平均で示した。短日処理は5.5葉期頃から14日間。短日処理による差異は、短日処理区の値をA、自然日長区の値をBとすると、A-B。到穂日数と稔実歩合は平均値±標準誤差。育成地の雲南は中国雲南省。「Xiao Ma Gu」では、短日処理区の対照区における稔実歩合が67%と他品種に比べ著しく低かったため、稔実歩合と短日処理による稔実歩合の差異の平均値(*)算出に当たって除外した。

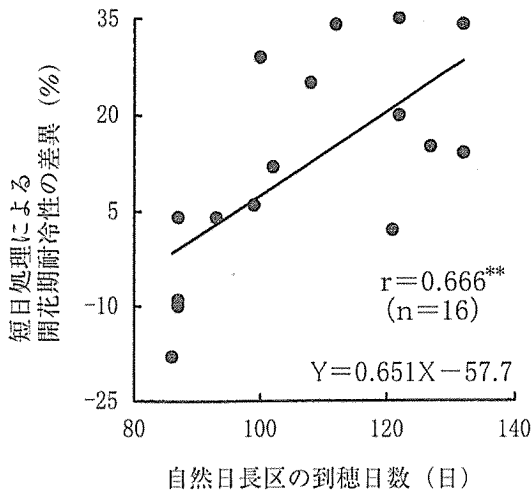


第Ⅱ—4図 自然日長区の到穂日数と短日処理による到穂日数の短縮期間との関係.

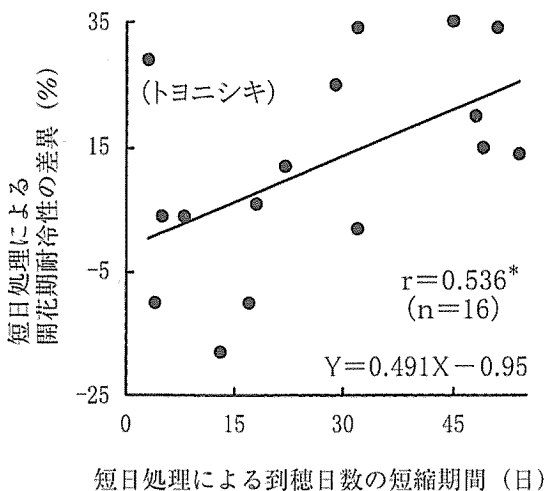
**：1%水準で有意.

96%であり、材料養成時の短日処理や冷温による影響は小さかった。なお、「Xiao Ma Gu」については、以下に示す稔実歩合およびこれを用いて算出した特性の平均値や相関係数の算出から除いた。

開花期耐冷性の指標となる冷温処理区の稔実歩合は、自然日長区では1~90% (平均46%)、短日処理区では3~87% (平均58%)と、いずれも大きな品種間差異がみられたが、平均値では短日処理区の方が自然日長区より12%高かった。短日処理が開花期耐冷性の検定結果に及ぼす影響を検討するために、短日処理区(A)と自然日長区(B)との差異(A-B)を冷温処理区の稔実歩合について算出し、開花期耐冷性に及ぼす短日処理の影響の指標(短日処理による開花期耐冷性の差異,%)とした。この指標と自然日長区の到穂日数および短日処理



第II—5図 自然日長区の到穂日数と短日処理による開花期耐冷性（冷温処理区の稔実歩合）の差異との関係。短日処理による開花期耐冷性の差異は、短日処理区における冷温処理区の稔実歩合をA、自然日長区における同稔実歩合をBとすると、A - B。**：1%水準で有意。



第II—6図 短日処理による到穂日数の短縮期間と短日処理による開花期耐冷性（冷温処理区の稔実歩合）の差異との関係。短日処理による開花期耐冷性の差異は、第II—5図の脚注を参照。*：5%水準で有意。

による到穂日数の短縮期間との関係を、それぞれ第II—5図および第II—6図に示した。短日処理による開花期耐冷性の差異と自然日長区の到穂日数とは $r = 0.666^{**}$ ($n = 16$, 以下同じ)、また短日処理による到穂日数の短縮期間とは「トヨニシキ」が他の品種と傾向を異にしていたが、 $r = 0.536^*$ のいずれも正の相関関係を示した。

次に、短日処理による平均日照時間の差異（短日処理区における冷温処理区の平均日照時間をA、自然日長区における同平均日照時間をBとすると、A - B）が、開花期耐冷性の検定の評価に及ぼす影響を検討した。開花期耐冷性の検定への日照の影響は、冷温処理開始（出穂日）翌日から始まる。そこで、出穂後1日、出穂後1日

～2日間、出穂後1日～3日間のように、出穂後1日から1日刻みに出穂後15日（検定の冷温処理が終了）まで長くした期間の平均日照時間の差異と、短日処理による

第II—7表 短日処理による平均日照時間の差異と開花期耐冷性（冷温処理区の稔実歩合）の差異との相関係数（16品種）。

平均日照時間の期間	相関係数
冷温処理の開始日（出穂日）以前	
出穂前7日～出穂日	-0.183 ^{ns}
出穂前6日～出穂日	0.137 ^{ns}
出穂前5日～出穂日	0.238 ^{ns}
出穂前4日～出穂日	0.361 ^{ns}
出穂前3日～出穂日	0.455 ^{ns}
出穂前2日～出穂日	0.316 ^{ns}
出穂前1日～出穂日	0.260 ^{ns}
出穂日	0.124 ^{ns}
冷温処理の開始日（出穂日）以降	
出穂後1日	0.268 ^{ns}
出穂後1日～2日	0.500*
出穂後1日～3日	0.486 ^{ns}
出穂後1日～4日	0.588*
出穂後1日～5日	0.622*
出穂後1日～6日	0.622*
出穂後1日～7日	0.617*
出穂後1日～8日	0.534*
出穂後1日～9日	0.544*
出穂後1日～10日	0.520*
出穂後1日～11日	0.400 ^{ns}
出穂後1日～12日	0.470 ^{ns}
出穂後1日～13日	0.512*
出穂後1日～14日	0.551*
出穂後1日～15日	0.553*

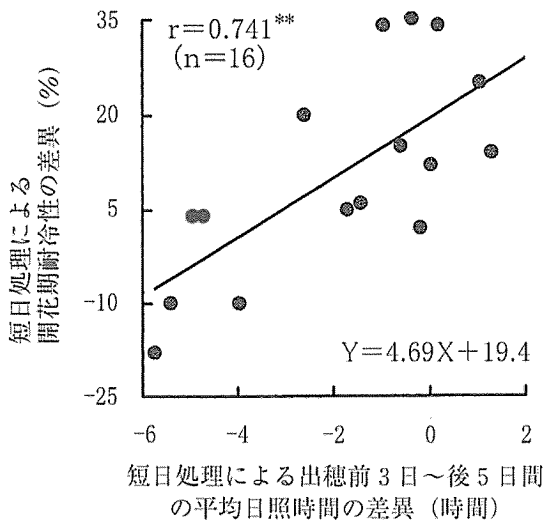
短日処理による平均日照時間の差異は、短日処理区における平均日照時間をA、自然日長区における平均日照時間をBとすると、A - B。短日処理による開花期耐冷性の差異は、第II—5図の脚注を参照。*：5%水準で有意。ns：有意性無し。

第II—8表 短日処理による平均日照時間の差異における最小値、最大値、平均値および標準偏差（16品種）。

平均日照時間の期間	短日処理による平均日照時間の差異		
	最小値	最大値	標準偏差
出穂前3日～出穂日	-10.02	1.18	2.91
出穂後1日～5日間	-9.42	5.68	3.96
出穂前3日～後5日間	-5.74	2.71	2.63

短日処理による平均日照時間の差異は、第II—7表の脚注を参照。各数値は、試験を行った北海道比布町での1999、2000年、7～9月の日照時間（注：<http://www.data.kishou.go.jp/>）に基づいて算出。

開花期耐冷性の差異との相関係数を求めた(第Ⅱ-7表と第Ⅱ-8表)。その結果, 出穂後1日~5日間および同1日~6日間の平均日照時間の差異との間に, 最も大きい有意な正の相関関係があった(いずれも $r=0.622^*$, 以下, 期間がより短い出穂後1日~5日間の平均日照時間により検討を進める)。また, 同様に処理開始日から出穂前7日まで(穂ばらみ期の冷害危険期がほぼ終了), 相関係数が最も大きくなる期間を求めたところ(第Ⅱ-7表), 出穂前3日~出穂日間の平均日照時間で, 相関係数は 0.455^{ns} であった。それらの両期間をあわせた出穂前3日~後5日間の平均日照時間の差異と開花期耐冷性の差異との間には, $r=0.741^{**}$ の有意な正の相関関係が認められた(第Ⅱ-7図)。同期間の平均日照時間の差異は, 自然日長区の到穂日数と $r=0.670^{**}$ の有意な正の相関が, 短日処理による到穂日数の短縮期間とは, 有



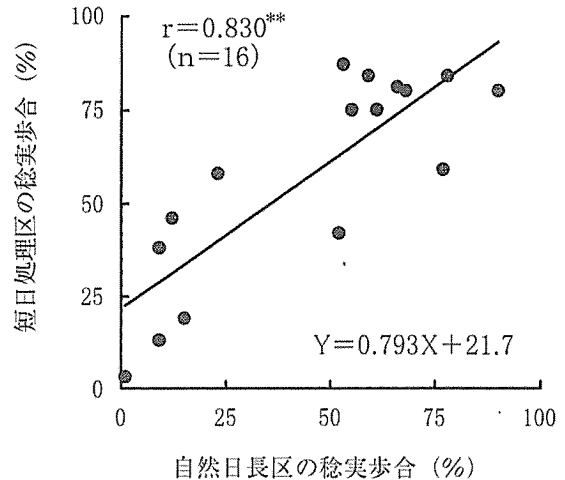
第Ⅱ-7図 短日処理による出穂前3日~後5日間の平均日照時間の差異と開花期耐冷性(冷温処理区の稔実歩合)の差異との関係。
短日処理による出穂前3日~後5日間の平均日照時間の差異は, 第Ⅱ-7表の脚注を参照。短日処理による開花期耐冷性の差異は, 第Ⅱ-5図の脚注を参照。**: 1%水準で有意。

意ではないが正の相関関係 ($r=0.485^{ns}$) が認められた。

最後に, 短日処理による開花期耐冷性の差異がみられたが, 自然日長区と短日処理区の開花期耐冷性の間には, $r=0.830^{**}$ の有意な高い正の相関が認められた(第Ⅱ-8図)。

考 察

外国品種の到穂日数は, 東北地域で極晩生とされる「日本晴」(松永ら 1985a) より70日間以上も長いことがある(熱帯農業研究センター 1985)。到穂日数が長い



第Ⅱ-8図 自然日長区および短日処理区における開花期耐冷性(冷温処理区の稔実歩合)の間の関係。
**: 1%水準で有意。

ことは検定に要する労力や経費上の問題となり, 検定実施が困難となる場合も生じる。本試験では, この問題を解決するために, 東北以南の品種と中国雲南省の品種を供試し8時間日長14日間の短日処理をしたところ, 到穂日数が自然日長区に比べ品種平均で28日間短くなった。さらに, 育成地の緯度が低い品種ほど自然日長区の到穂日数が長く, 短日処理による到穂日数の短縮程度が大きかった。このため, 供試品種の出穂日は, 短日処理区の方が自然日長区よりも短期間に集中した。以上のことから, 短日処理を行うことにより養成期間が短くなり, また開花期耐冷性の検定に必要な冷温処理の作業を集中して行うことができ, 検定の労力を軽減できた。

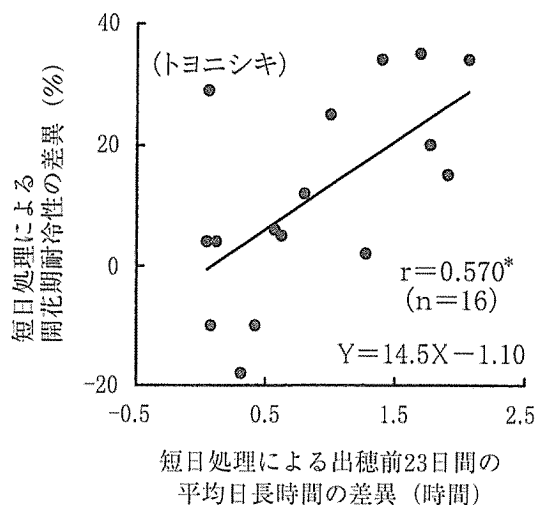
一方, 到穂日数が短くなり栄養生長量が少なくなると, 穂ばらみ期の茎葉窒素含有率が高くなる可能性がある。茎葉窒素含有率が高くなると穂ばらみ期の冷温による不稔発生率が高くなることが知られている(天野 1984, 天野・森脇 1984a, Satakeら 1987) ので, 短日処理による到穂日数の短縮が, 茎葉窒素含有率の影響を介して, 冷温処理による稔実歩合の低下を助長することが考えられる。しかし, 本試験結果では, 冷温処理区の稔実歩合は自然日長区よりも短日処理区の方が12%高かった。この理由としては, 本検定法における材料養成は小さな方形ポットに密植条件で行われており, 一般の圃場栽培の稲に比べ茎葉窒素含有率はかなり低いと思われる。したがって, 短日処理により到穂日数を短縮しても, 密植により茎葉窒素含有率が低く冷温による不稔発生を助長しない(天野 1984, 天野・森脇 1984a) のであれば, 穂ばらみ期耐冷性や開花期耐冷性への影響は小さいと考える。

これまで、短日処理により検定材料の到穂日数を短縮させ、開花期耐冷性を検定した報告はない。本試験では、自然日長区に比べて短日処理区の出穂前3日～後5日間の平均日照時間が長い品種ほど、開花期耐冷性が強く評価される傾向があった(第II-7図)。開花期の低日照条件は、同時期の冷温による不稔発生を助長することが報告されている(和田ら1973, 細井1989a)。また、出穂前の日照条件が開花期耐冷性に及ぼす影響についての報告はないが、出穂直前における光合成量が、開花期の冷温による不稔発生に影響を及ぼすことも考えられる。なお、自然日長区の到穂日数および短日処理による到穂日数の短縮期間は、短日処理による平均日照時間の差異と正の相関関係を示した。すなわち、自然日長区の到穂日数が長く、短日処理による到穂日数の短縮期間が長い品種ほど、自然日長区に比べ短日処理区の出穂前3日～5日間の平均日照時間が長い傾向があり、そのことが開花期耐冷性が強く評価された要因の一つと推察された。

また、幼穂形成期から穂ばらみ期に当たる出穂前23日間は、冷温による穂ばらみ期の障害型不稔が生じる期間であり(Satake 1991)、感光性が強く短日処理により到穂日数が大きく短縮する品種においては、同期間の短日条件により穂ばらみ期耐冷性が低下することも報告されている(岡本ら2001)。そこで、出穂前23日間の日長時間(日本気象協会北海道本部1998, 1999)が開花期耐冷性へ及ぼす影響を検討した。

その結果、出穂前23日間の平均日長時間は、品種平均で短日処理区が14時間58分であり、自然日長区よりも59分間長かった。また、短日処理による出穂前23日間の平均日長時間の差異(短日処理区における出穂前23日間の平均日長時間をA、自然日長区における同平均日長時間をBとすると、A-B)には、品種間で2分～2時間14分の変異があり(標準偏差47分)、自然日長区の到穂日数が長く、短日処理による到穂日数の短縮期間が長い品種ほど大きかった(それぞれ $r=0.956^{**}$, 0.992^{**})。さらに、自然日長区に比べ、短日処理区での出穂前23日間の平均日長時間が長い品種ほど開花期耐冷性が強く評価されることが示唆された(第II-9図)。しかし、材料養成時の日長条件と開花期耐冷性との関係についてこれまで報告された事例はなく、今後さらに検討する必要がある。

以上のような短日処理による開花期耐冷性の差異があったにもかかわらず、本試験における自然日長区と短日処理区とにおける検定結果(冷温処理区の稔実歩合)の間には、 $r=0.830^{**}$ の有意な高い正の相関関係があった(第II-8図)。すなわち、短日処理区と自然日長区と



第II-9図 短日処理による出穂前23日間の平均日長時間の差異と開花期耐冷性(冷温処理区の稔実歩合)の差異との関係。

短日処理による出穂前23日間の平均日長時間の差異は、短日処理区における出穂前23日間の平均日長時間をA、自然日長区における同平均日長時間をBとすると、A-B。短日処理による開花期耐冷性の差異は、第II-5図の脚注を参照。*: 5%水準で有意。

の評価は厳密には一致しないが、両者の関係は統計的に有意であり、育種事業においては十分利用できる。

なお、中国雲南省の品種の「Xiao Ma Gu」においては、短日処理の影響によると思われる不稔発生がみられた。短日処理によって到穂日数が大きく短縮する感光性が強い品種においては、短日処理により不稔が発生することが報告されている(岡本ら2001)。「Xiao Ma Gu」は、短日処理による到穂日数の短縮期間が44日間と、供試品種の中では大きい品種であった。したがって、感光性が著しく強く短日処理によって不稔が発生した品種については、得られた開花期耐冷性の検定結果の扱いには注意が必要である。