

Ⅸ 冷害の発生と対策

1 北海道における冷害の特徴

(1) 過去の冷害と冷害の形態

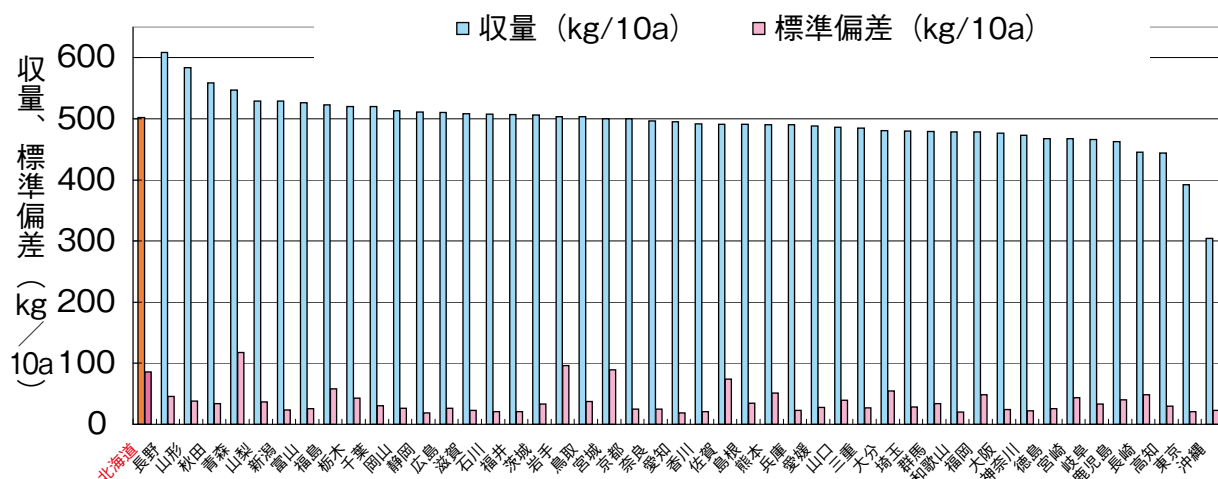
冷害は、1884年（明17）から2010年（平22）までの127年間に32回、ほぼ4年に1回発生し、温暖化が進んでいると言われている近年でも、2003年（平15）や2009年（平21）に発生している（表Ⅸ－1）。

表Ⅸ－1 北海道における冷害と稲の収量

年 次	10a当たり 収 量	作況指数	10a当たり 平年収量	冷害の形態
1884（明治17）	45kg	(28)	(161)kg	遅延型
1888（ 21）	105	(63)	(166)	
1889（ 22）	71	(42)	(168)	
1893（ 26）	127	(74)	(172)	遅延型
1897（ 30）	105	(59)	(177)	併行型
1902（ 35）	22	(12)	(184)	〃
1905（ 38）	124	(66)	(187)	障害型
1913（大正2）	12	(6)	(197)	遅延型
1926（ 15）	119	(56)	(212)	併行型
1931（昭和6）	84	(38)	(219)	遅延型
1932（ 7）	67	(30)	(220)	〃
1934（ 9）	138	(62)	(223)	障害型
1935（ 10）	117	(52)	(224)	遅延型
1941（ 16）	117	(51)	(231)	併行型
1945（ 20）	105	(44)	(236)	遅延型
1953（ 28）	233	81	289	障害型
1954（ 29）	177	60	293	遅延型
1956（ 31）	150	51	293	併行型
1964（ 39）	264	68	389	遅延型
1965（ 40）	334	86	389	障害型
1966（ 41）	283	73	389	〃
1969（ 44）	351	86	406	併行型
1971（ 46）	273	66	411	障害型
1976（ 51）	361	80	451	遅延型
1980（ 55）	385	81	475	障害型
1981（ 56）	413	87	475	遅延型
1983（ 58）	355	74	482	遅延型
1987（ 62） ¹⁾	472	90	490	障害型
1992（平成4）	445	87	502	併行型
1993（ 5）	209	40	498	〃
2002（ 14） ¹⁾	492	91	528	〃
2003（ 15）	385	73	528	〃
2009（ 21）	475	89	535	〃

1) 1987、2002年は冷害年と評価しない場合もあるが、北海道産米の販売上影響が少なからず大きい年であったことから記載した。なお、農林水産統計では、作況指数ではないものの、平年比94以下を不良としている。

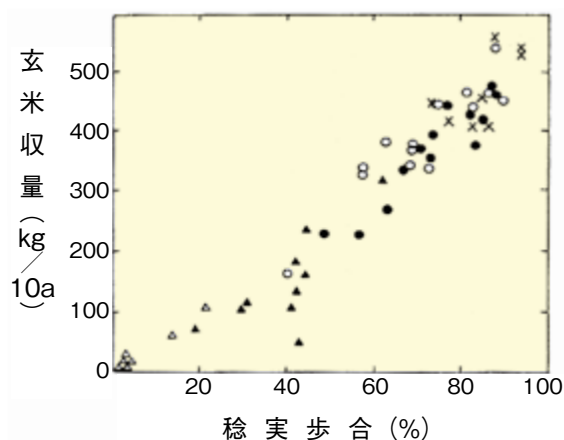
北海道の平年収量は2010年で535kg/10a、全国の都道府県で7位であるが、1993（平5）～2010年（平22）の18年間の平均収量は、502kg/10aで、同20位となっている（図Ⅸ－1）。また、収量の標準偏差は85kg/10aで、青森県、岩手県、宮城県に次いで大きい。これらの差異や変動には、1993、2003年などの冷害年が大きく影響している。このように北海道稲作には、今後とも冷害を回避し品質と収量の安定化を図ることは重要な課題である。



図Ⅸ－1 過去20年間（1993～2012年）の都道府県別収量とその標準偏差
（農林水産省大臣官房統計部編（1993～2010）による。）

冷害には、稲の生育に与える影響の違いにより、低温障害で不稔籽多発により減収する障害型（図Ⅸ－2）と、低温による生育遅延で減収する遅延型、および障害型と遅延型が併行して被害を与える併行型の3つに区分できる。

冷害の中で障害型冷害は、併行型も含め多くみられる。不稔の発生による減収とともに、籾殻形成期の低温およびそれに伴うことの多い寡照の影響により、籾殻が小さくなり千粒重が軽くなる（表Ⅸ－2）。また、籾殻が小さくなると割籾が増加するため、着色粒などの発生による品質を低下させる。さらに、不稔の発生が多いほど精米タンパク質含有率が高くなり（図Ⅸ－3）、食味を低下させる。



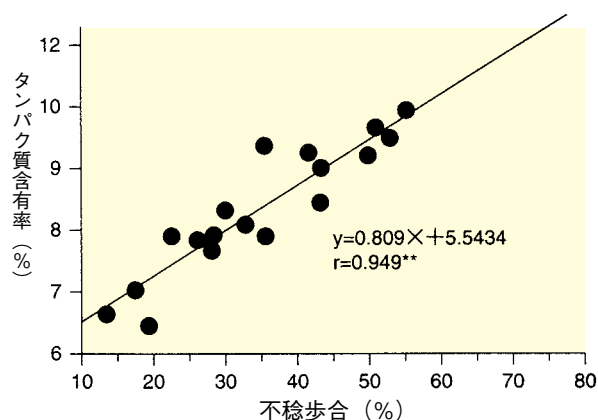
図Ⅸ－2 障害型冷害年（1971年）における北海道各地の水稲収量と稔実歩合との関係（佐竹 1994）

（農業試験場における育成系統生産力検定試験成績より作図）

△：北見農試 ▲：十勝農試
○：上川農試 ●：中央農試
×：道南農試

表Ⅸ－２ 穂孕期の遮光と割粳・粒重の関係
(「しおかき」上川農試 1973)

移植期	出穂前30～6日平均日射量 (cal)		割 粳 率 (%)		完全米千粒重 (g)	
	遮光処理	無処理	遮光処理	無処理	遮光処理	無処理
5/21	159	380	43.9	14.4	18.7	20.0
6/6	145	356	39.4	14.1	19.4	20.1



図Ⅸ－３ 不稔歩合と精米タンパク質含有率の関係 (上川農試 1987)

遅延型は、近年、葉令が進んだ成苗の比率が60%以上となり、さらに側条施肥など初期生育を促進する栽培法が導入されたため、その発生頻度は過去に比べて低くなった。しかし、重度の遅延型は登熟が秋冷に間に合わず登熟停止となり、収穫物に青米が多く混入すると収量や品質の低下は甚しく、そのままでは販売できない状況も考えられるため、その影響は大きい。

併行型も多く見られる。すなわち、北海道は平年でも東北以南に比べ登熟気温が低い。障害型冷害が発生した年には、少なからず生育も遅延するためいっそう登熟気温が低下し、収量や品質に影響するが多い。近年で被害が顕著に大きかった1993（平成5）年の冷害は、併行型であった。

(2) 冷害発生の機作

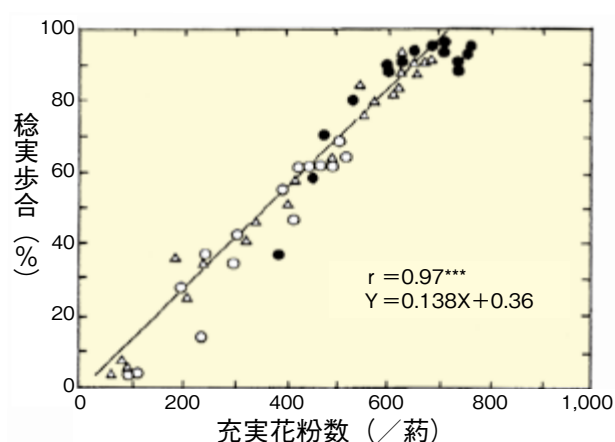
1) 障害型冷害

冷害は、幼穂分化期から開花受精期までの期間に低温に遭遇し、花粉分化数の減少、花粉の発育不全や受精不良によって不稔粒が多発し、減収する。稔実あるいは不稔いづれとなるかは、その受精可能な充実花粉の数が大きな影響をもつ（図Ⅸ－4）。

花粉のできる過程を述べると、幼穂形成期（えい花始原体分化初期）後、えい花の生長とともに葯の中で花粉の母細胞が分裂を始める。花粉母細胞は2分裂後、4つの小胞子に分裂し、小胞子の1つ1つが充実して花粉となる。えい花には、6本の葯と2つに分かれた柱頭と1つの子房がある（図Ⅸ－5）。1つの葯には1,000個近い花粉が入っている。開花と同時に葯が裂開し、花粉は柱頭に付着、受精して稔実する。低温は幼穂の分化始めから受精完了まですべてに影響し、不稔粒を多発させる。

その影響する時期は、大きく穂ばらみ期と開花期に分けられ（図Ⅸ－6）、さらに前者は前歴期間と危険期に分けられる。前歴期間となる幼穂形成期後10日間は、低温により小胞子（花粉の基になる細胞）の分化が抑制されて、花粉数が減少する。その後、出穂前11日を中心とする前後7日間は、（穂ばらみ期の）危険期とされ、低温に遭遇するとタペート（葯壁）細胞の肥大などにより、分化した小胞子が退化したり発育不全となり、充実した花粉数が減少する。さらに、開花・受精期の低温は、開花の遅延や開花しても葯の裂開不良を生じさせる。そのた

め、裂開しても花粉の飛散が不十分で柱頭への付着が少なくなり受精が阻害されたり、開花が遅延することにより花粉の発芽や受精能力が低下する。



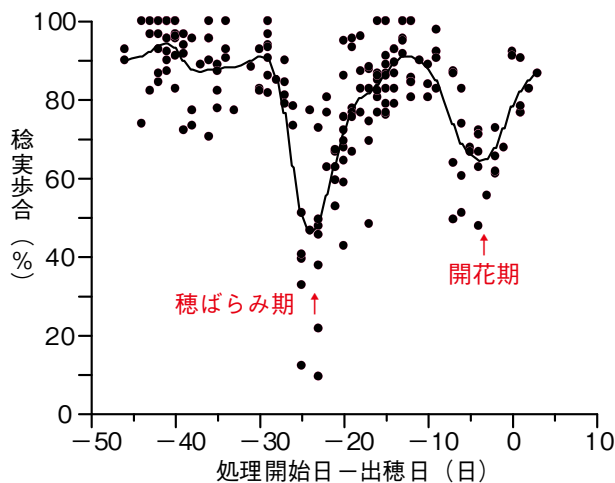
図Ⅸ－４ 生育時期別冷温処理実験における稔実歩合と葯当たり充実花粉数との関係 (satake 1991)

品種 (培養温度、冷温処理)

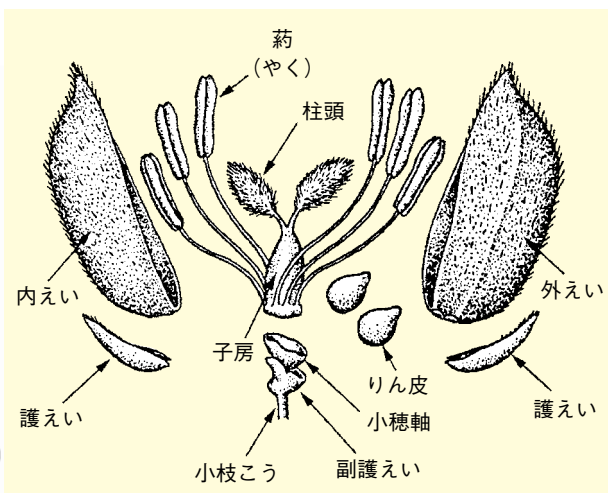
●：はやゆき (24/19、12℃・3日間)

○：農林20号 (24/19、12℃・3日間)

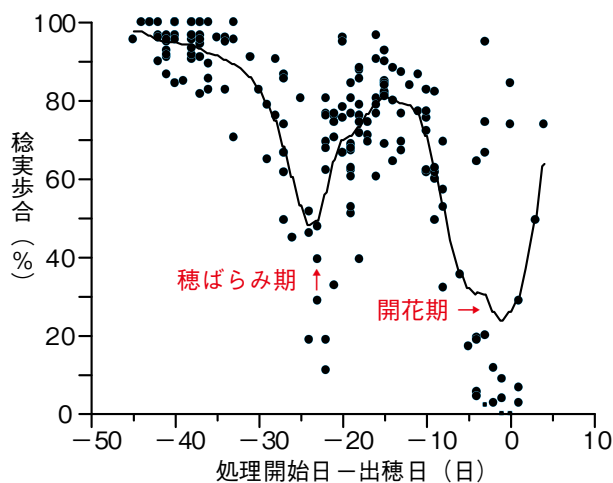
△：農林20号 (26/19、12℃・4日間)



きらら397
耐冷性、穂ばらみ期：やや強
開花期：やや強



図Ⅸ－５ イネのえい花の形態 (保木本敬一氏農業基礎講座より)

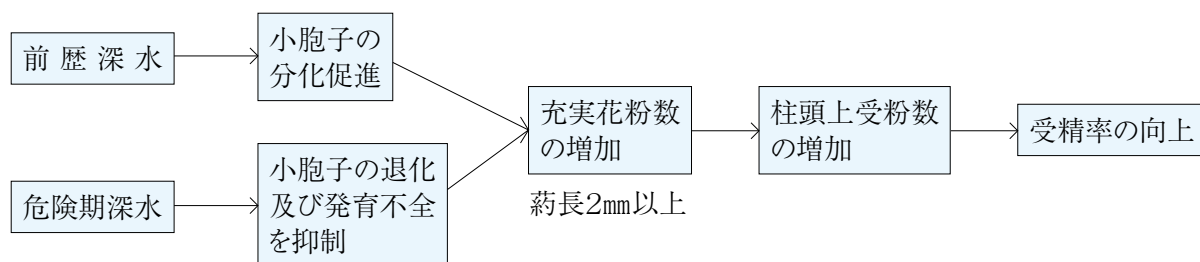


吟風
耐冷性、穂ばらみ期：やや強
開花期：極弱

図Ⅸ－６ 穂ばらみ期と開花期の不稔発生

17.5℃ 14日間処理による (上川農試 2006)

これらのことから、稔実を高めるためには、深水管理により幼穂を保温することにより、前歴期間では花粉の基となる小胞子の分化を増進し、危険期では小胞子の退化・発育不全を抑制する。このことにより、開花期に葯当たり充実花粉数を増加させ、その結果柱頭上の受粉数が多くなり、受精率が高まる (図Ⅸ－7)。



図Ⅸ－7 稔実歩合向上の模式図（北農試 1987）

葯中の花粉数は葯長と関係が深い。葯長が1.8mm以上では、不稔歩合は20%以下と低く、それ以下では葯長の短縮に伴い不稔歩合が増加する。これをもとに、葯長から不稔歩合を推定することができる（表Ⅸ－3）

一方、開花期の低温には直接、開花受精を促進する対応策がない。それでも稔実するには受精可能な充実花粉が一定数、受粉することが必要であるから、出穂前に葯内の充実花粉数を増やしておくことが、不稔発生の抑制に役立つと考えられる。

表Ⅸ－3 葯長による不稔歩合の推定（中央農試 1997）

葯長（mm）	不稔発生程度	不稔歩合（%）
1.2以下	極大	100～90
1.2～1.5	大	100～50
1.5～1.8	中	80～20
1.8～2.0	小	20以下
2.0以上	極小	10以下

注）葯長はFAA固定後の長さ

2) 不稔の発生气温

稔実歩合の低下に影響する最低限界温度は、幼穂形成期後約10日間は15～20℃、冷害危険期は13～15℃、開花期は日中の最高気温24℃以下が4日以上とされている。しかし、不稔発生の多少は、昼夜の気温差やその継続日数、日照時間、品種の耐冷性、稲体の窒素濃度などにより大きく変わる。表Ⅸ－4に「きらら397」の前歴期間、冷害危険期、開花期の気温と不稔発生の関係を示したが、これらによりある程度は予測することができる。

表Ⅸ－4 気温からみた不稔歩合の推定（中央農試 1997）

前歴期間 平均気温 （℃）	冷害危険期間 平均気温 （℃）	きらら397（推定不稔歩合%） ¹⁾		
		開花期間最高気温（℃）		
		20～20.9	21～22.9	23以上
16～17.9	16～16.9	100～85	100～80	100～80
	17～18.1	90～75	95～65	95～60
	18.2～18.9	70～45	50～25	35～20
	19以上	65～30	40～5	20～5
18以上	16～16.9	95～75	90～70	90～65
	17～18.1	90～55	85～40	80～35
	18.2～18.9	70～45	50～25	35～20
	19以上	65～30	40～5	20～5

1) 5～15%の不稔発生は、収量に影響しない。

3) 遅延型冷害

播種後から移植期、分けつ期、幼穂形成期、出穂期までの生育各時期あるいは複数の時期の冷温による出穂遅延のため秋冷により登熟不良となるか、出穂が遅延しなくても登熟期の低温により登熟不良となった場合に生じる。開花期の冷害では不稔発生とともに開花受精が遅れ、登熟開始が遅れるので同じ現象を生じる。収穫玄米に青米や屑米が多くなり、粒重も低下して減収する。

2 冷害防止対策

(1) 安全出穂期を守る品種と栽培法

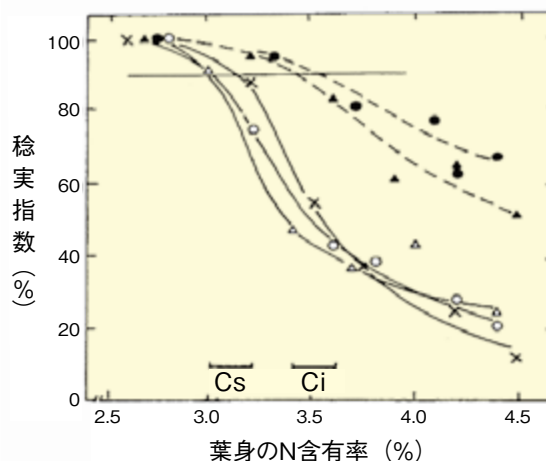
北海道では東北以南に比べ冷涼なため、稲の生育期間が限定される。すなわち、各地域において、出穂が早すぎると穂ばらみ期に低温に遭遇するので、その危険性の小さくなる早限出穂期と、出穂が遅くなると秋冷により登熟不良を生じるので、最も遅い登熟可能な晩限出穂期を定めている（Ⅲ章1節を参照）。それらを参考に、地域別的水稲作付指標を定めており、それらを参照に作付品種を選定する。また、直播と移植、あるいは移植の苗種類などの栽培方法を選択する場合にも、安全出穂期内に収穫が見込めることが前提となる。

(2) 品種の耐冷性と配合による危険分散

品種の耐冷性は穂ばらみ期と開花期の両期について明らかにされている（Ⅲ章4節を参照）。作付品種を選定する場合、品種の耐冷性と栽培地域の気象の両者に配慮する。さらに、実際の気象では、低温は長期間一様な低温ではなく、特定の時期に襲来するので、1品種のみでは危険期がちょうど低温に遭遇すれば壊滅的な不稔発生となる。また、障害型冷害は出穂の早い品種で、遅延型冷害は出穂が遅い品種に発生しやすい。これらのことから、出穂早晩の異なる複数の品種を作付けし、危険分散を図ることが望ましい。

(3) 健 苗

遅延型冷害を回避するには、葉令が基準に達し乾物重/草丈が高く、ずんぐりむっくり型の「健苗」をつくることが重要である（Ⅷ章2節を参照）。健苗は、発根力が強く、活着時の低温により生育遅延発生を生じさせない。また、健苗により初期生育を良くすることによって土壌中の窒素の吸収を早め、冷害危険期の稲体窒素濃度を低下させることは、障害不稔発生の防止にも役立つ（図Ⅸ-8）。



図Ⅸ-8 止葉期の葉身N含有率と稔実指数との関係（上川農試 1984）

しおか：—○—1976 イシカリ：—●—1978
—△—1977 —▲—1979
—×—1980
Cs、Ciは、それぞれ「しおか」、「イシカリ」の穂ばらみ期葉身限界窒素含有率

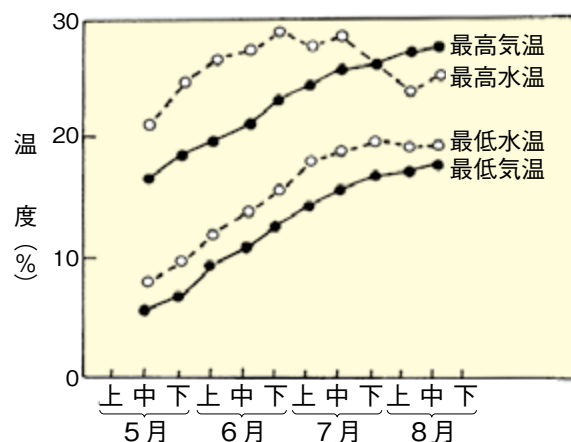
(4) 施肥量と施肥法

過剰な肥料は、稲体を軟弱徒長させ、低温による不稔発生を助長する。そのため、基準の施肥量を守る。また、全層施肥のみよりも

側条施肥を組み合わせることで初期生育を良くすることは、危険期の稲体窒素濃度を低下させ、遅延型のみならず障害型冷害の回避に有効である。

(5) 水温上昇のための管理法

5月下旬から7月中旬までの最高水温は最高気温よりも3～5℃高く、最低水温は最低気温よりも約3℃高い(図Ⅸ-9)。この時期、生長点のある稲の茎葉基部は水面下にあるので、生育は水温の影響を強く受ける。水温は生育の適温である25℃前後よりも低いので、上昇を図ることが基本である。

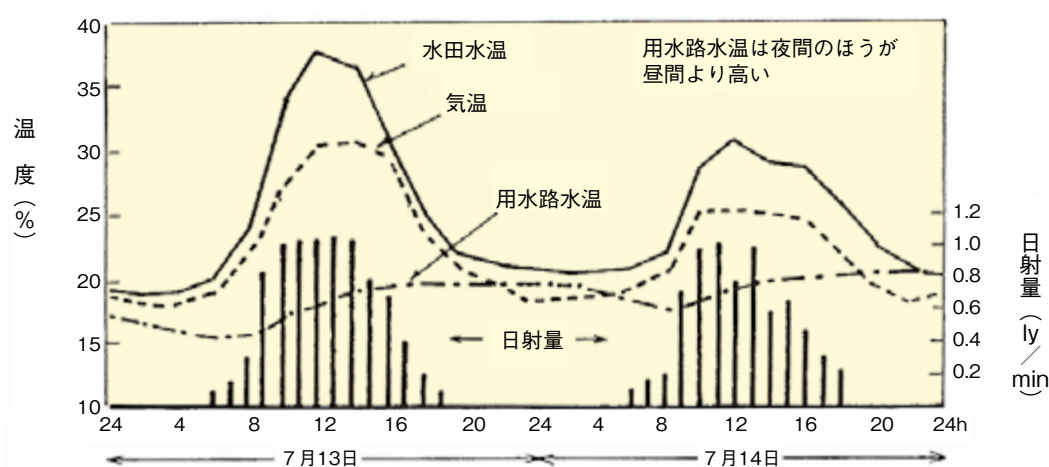


1) 灌漑水温の上昇と入水時間

河川の水温が低い地域では温水池が利用されている。また、水田の水温は早朝にかけて最低になる(図Ⅸ-10)。用水路の水温は日変化が少なく、水田との水温差が小さい夕方から早朝に水を入れるのが良い。

図Ⅸ-9 5～8月における旬別の気温と水田水温の推移(藤原 1982)

— 北海道農試、昭和15～24年の10年間の平均値



図Ⅸ-10 岩見沢市栗沢町大型水田における用水路および水田水温と気温・日射量の日変化(藤原 1982)

2) 防風網

防風網は風速を小さくするとともに、風による蒸発散による水温の低下を抑えて水温の上昇効果をもたらす(Ⅲ章 図Ⅲ-3 参照)。強風条件では、防風網の防風効果が高い地点ほど水温上昇効果が高い。例えば、高さの5倍地点で4℃、10倍地点で2℃の効果が認められている。

3) 深水灌漑

灌漑水温は気温よりも一般に数度高く、冷害危険期のえい花が水面下に入る深さを保てば冷気温から保護されるため、深水灌漑が奨励されてきた。冷害危険期のえい花の80%を覆うためには、18～20cmの水深が必要である（表Ⅸ－5）。

また、幼穂形成期から危険期直前までの前歴期間での深水も、不稔発生防止に効果のあることが明らかになった。この場合、不稔発生に対する前歴深水の単独効果は危険期深水の単独効果より大きく、両期深水の複合効果は相乗的に大きい。この前歴深水の水深は10cmである（表Ⅸ－6）。

表Ⅸ－5 冷害危険期の花が50%及び80%含まれる水の深さ（北農試 1978）

品 種	危険期の花の比率	
	50%	80%
農林20号	17.0cm	20.8cm
ゆうなみ	15.6	18.6
しおかり	15.0	19.0

表Ⅸ－6 前歴深水と危険期深水による冷害防止効果（佐竹ら 1987）

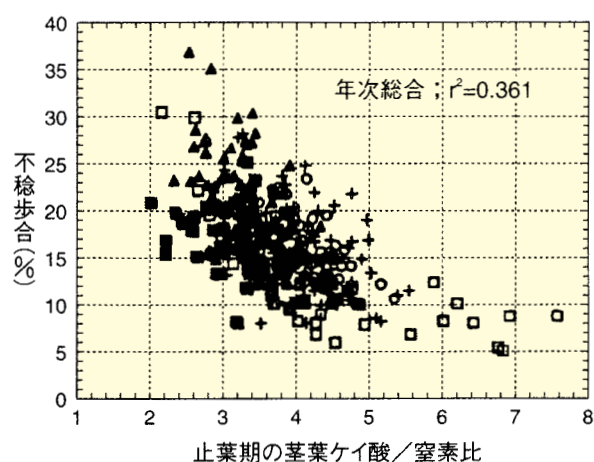
前歴水温	水 深		ポット当たり籾重 g (%)	稔実歩合 (%)
	前 歴	危険期		
21℃	3 cm	3 cm	4 (9)	10
		10	6 (13)	13
		20	8 (17)	17
	10cm	3 cm	13 (28)	25
		10	14 (30)	32
		20	26 (55)	58
24℃	3 cm	3 cm	17 (36)	32
		10	21 (45)	42
		20	33 (70)	71
	10cm	3 cm	35 (74)	72
		10	38 (81)	72
		20	42 (89)	90
対照 (常温) 区			47 (100)	88

* 危険期水温はいずれも18℃

(6) 土地基盤の改良

透排水が不良な圃場では、地温の上昇が遅く、土中の酸素供給が悪く、有害物質が滞留し、初期生育が不良化し生育遅延を生じ、冷害を受けやすくなる。暗きょ排水、心土破碎、深耕などにより水田の透排水性を良くするとともに、根の生育領域を広げる。地力を培養するために、わらは堆肥にしているか、少なくとも秋鋤き込みにして分解を促進する。

さらに、ケイ酸吸収を高めることが不稔発生を軽減する（図Ⅸ－11）ので、土壤改良材として施与するなど基準を下回らな

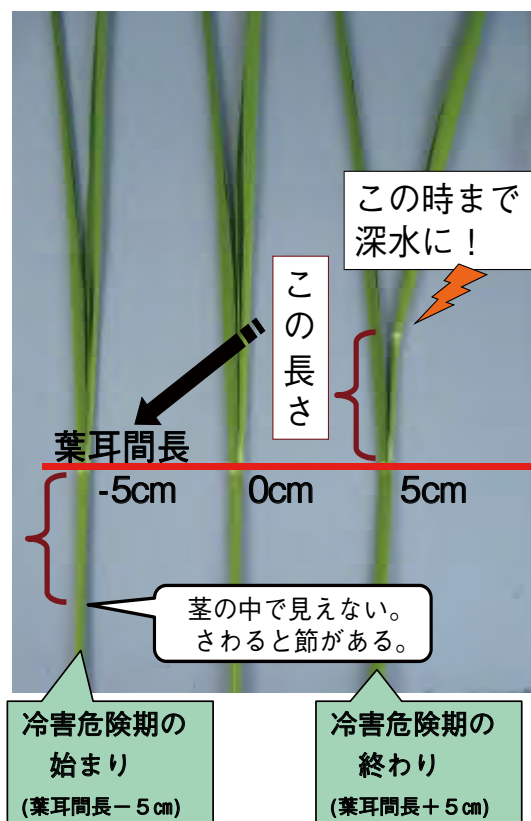


図Ⅸ－11 止葉期の茎葉ケイ酸／窒素比と不稔（上川農試 1999）

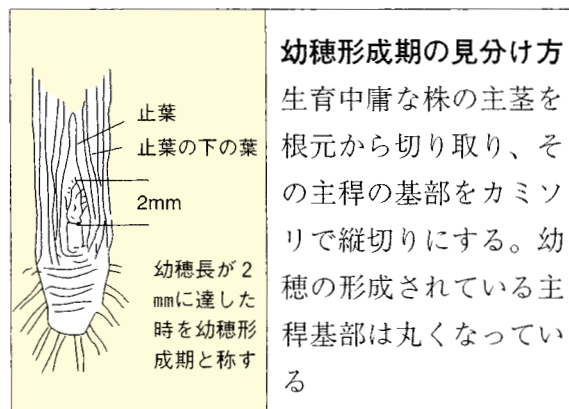
いようにする。

3 前歴・冷害危険期深水管理の実際

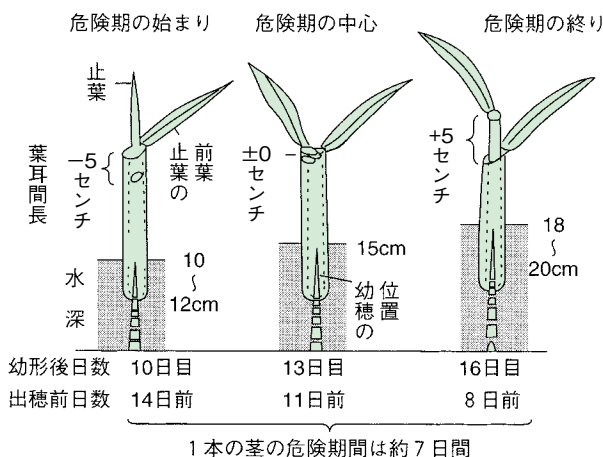
- (1) 最初に、主稈の幼穂形成期を確認し（図Ⅸ-12）、前歴期間の始まりを把握する。幼穂形成期後10日目頃に主稈の葉耳間長が-5cmであることを確認できると、前歴期間の終わりとなる（図Ⅸ-13、写真Ⅸ-1）。
- (2) 前歴期間は徐々に水を深くして、できるだけ水温を上昇させるため、最大水深は10cmを限度とする。入水は、日照が多いと予報された早朝に行う。早朝入水、昼夜止水管理を励行し、できるだけ平均水温（21℃以上）の上昇に努め、小孢子（花粉母細胞）の分化増進を図る。



写真Ⅸ-1 葉耳間長と冷害危険期



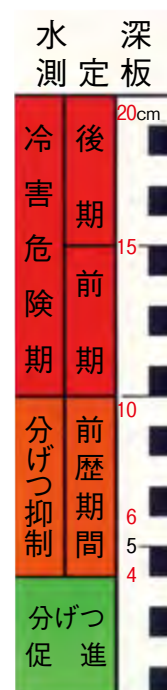
図Ⅸ-12 幼穂形成期の見分け方



図Ⅸ-13 冷害危険期の見分け方

- (3) 冷害危険期は、主稈の葉耳間長が-5cmから、全茎（約80%の茎）の葉耳間長が+5cmになるまでの期間である。従って、水田・品種ごとの葉耳間長をよく観察して、深水灌漑を実施し、小孢子の退化・発育不全を防止する。
- (4) 冷害危険期に達したらさらに水深を幼穂長に合わせて徐々に深くし、最大水深は18～20cmを保ち、低温から幼穂を保護する。入水・水管理方法は、前歴期間と同じにして、できる限り水温を上昇させる。

- (5) 水深を正しく維持するため、「水深測定板」(写真Ⅸ－２、棒に印を付けたものでもよい)などを、水田ごとに設置する。低温予報が出されてから一斉に深水灌漑を行うと地域全体の用水量は不足しがちになり、また水温が上昇しないため保温効果も期待できなくなるので、連続高温の予報がない限り深水灌漑を継続する。
- (6) 幼穂形成期から冷害危険期までは湛水状態のため、根の周囲は酸素不足である。冷害危険期が終了したら直ちに落水し、出穂直前まで中干しをして根圏に酸素を供給するとともに、地表面を固め倒伏防止を図る。
- (7) 前年の秋か当年の春には、18～20cmの深水管理ができるように畦の補修を行う。



写真Ⅸ－２ 水深測定板

4 稲体窒素濃度と不稔・食味の関係

7月の稲体窒素濃度は、培養窒素が多い水田や基肥の多窒素、追肥の施用や施肥ムラ、6月の低温や日照不足による窒素吸収の遅れなどで高くなる。この窒素吸収過多やケイ酸吸収量の不足により、不稔率が高まり（図Ⅸ－８）、タンパク質含有率が高くなり（図Ⅸ－３）食味の低下などを招く。従って、培養窒素の評価に基づき適正な基肥窒素の施用を行い、施肥ムラをなくし、追肥の施用も避けなければならない。

また、耐冷性を高めるには、止葉期の稲体炭水化物の含有率を高め、茎葉の窒素含有率を低くし、茎葉のケイ酸含有率を高める必要がある（図Ⅸ－11）。従って、初期生育を促進する栽培法を行うとともに、ケイ酸の基肥施用や追肥が重要である。

（道総研中央農業試験場生産研究部水田農業グループ 研究主幹 丹野 久）