

水稻における潮風害の予測、被害把握および
被害軽減技術の開発に関する研究

2 0 0 9 . 9

岩手大学大学院
連合農学研究科

森 静 香

第1章 序章	1
第2章 2004年台風15号に伴う潮風害の特徴と被害の実態	13
2-1：序論	13
2-2：材料と方法	14
(1)2004年台風15号の気象的特徴	15
(2)市町村別収量・一等米比率	15
(3)1穂当たりの塩化ナトリウム付着量の分布	15
2-3：結果	15
(1)2004年台風15号の気象的特徴の解析	15
(2)市町村別収量および一等米比率	22
2-4：考察	25
2-5：要約	29
第3章 電気伝導度を利用した水稻穂部塩分量の簡易測定法の開発	31
3-1：序論	31
3-2：材料と方法	32
(1)試料	32
(2)穂へ付着した塩分量の測定	32
3-3：結果	33
3-4：考察	38
3-5：要約	42
第4章 潮風害の発生機構の解明および減収率の推定	44
4-1：序論	44
4-2：材料と方法	45
(1)海岸線からの最短距離と1穂塩化ナトリウム量との関係式の作成と塩化ナトリウムの推定	45
(2)「はえぬき」における台風通過後の枝梗枯れ数歩合、登熟歩合、精玄米粒数歩合	46
(3)品種別の精玄米重、構成要素、品質、玄米タンパク質含有率、推定枝梗枯れ数歩合および減収率	46
(4)品種別の被害程度別の登熟歩合	47

4-3 : 結果	48
(1) 海岸線からの最短距離と1穂塩化ナトリウム量との関係式について	48
(2) 台風通過後の「はえぬき」における海岸線からの距離による推定1穂塩化 ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合との関係, ならびに枝梗枯れ数歩合と登熟歩合 および精玄米粒数歩合との関係	48
(3) 品種別および被害程度別の精玄米重, 構成要素, 品質, 玄米タンパク質含有率	53
(4) 推定1穂塩化ナトリウム量および推定枝梗枯れ数歩合と減収率との関係	57
4-4 : 考察	57
4-5 : 要約	66
第5章 圃場レベルにおける潮風害の再現方法の開発	68
5-1 : 序論	68
5-2 : 材料と方法	70
5-3 : 結果	71
5-4 : 考察	76
5-5 : 要約	81
第6章 ケイ酸による潮風害の軽減効果	82
6-1 土壌のケイ酸供給量のことなる水田における時期別ケイ酸吸収 速度の解析	82
6-1-1 : 序論	82
6-1-2 : 材料と方法	83
6-1-3 : 結果	
(1) 水稻による時期別ケイ酸吸収量および速度	83
6-1-4 : 考察	93
6-1-5 : 要約	97
6-2 ケイ酸資材の幼形期施用の有用性	99
6-2-1 : 序論	99
6-2-2 : 材料と方法	100
(1) 土壌条件	100
(2) 耕種条件	100
(3) 試験区	102

(4)測定項目	103
6-2-3：結果	104
(1)ケイ酸施用法別の収量および収量構成要素	104
(2)ケイ酸施用法別のケイ酸吸収量	104
(3)ケイ酸施用が窒素吸収に及ぼす影響	109
6-2-4：考察	113
6-2-5：要約	116
6-3 ケイ酸による潮風害軽減技術の有用性	118
6-3-1：序論	118
6-3-2：材料と方法	120
(1)土壌条件	120
(2)耕種条件	120
(3)試験区	120
(4)海水散布	121
(5)穂の塩分測定と籾被害度調査	121
(6)乾物重およびケイ酸吸収量	123
(7)収量，収量構成要素，整粒歩合	123
6-3-3：結果	124
(1)出穂期および海水散布前のケイ酸吸収量	124
(2)海水散布時の気象	125
(3)海水散布後の1穂塩分量	128
(4)収量に対するケイ酸施用効果	128
(5)海水散布後のケイ酸含有率および吸収量	133
6-3-4：考察	134
6-3-5：要約	138
第6章 総括	139
摘要	148
引用文献	152

第 1 章 序章

急速に拡大した人類の産業活動により大気中の二酸化炭素・メタン・二酸化窒素等の温室効果ガス濃度が急増し、地球温暖化の可能性が指摘されている (Bouwman 1990, 宇沢 1995). 気象変動に関する政府間パネル (IPCC 2000) によると 1989 年～1998 年に化石燃料の燃焼等により大気中に放出された二酸化炭素量は炭素換算で毎年約 6.3GtC, また, 森林の伐採等の土地利用の変化により年間放出された炭素量は約 1.6GtC とされる. そのうち, 大気中には年間約 3.3GtC の炭素が蓄積したと考えられている. IPCC 第 4 次報告書の気温上昇予測によれば, 1980 年～1999 年と比較して, 21 世紀末に, さらに 1.1℃～6.4℃の気温上昇が予測されている (IPCC 2007). このように, 地球規模で気温が上昇すると氷河の融解による海面上昇や気候変動による異常気象の発生頻度の増加をもたらし, 自然生態系や農業, 生活環境等にさまざまな影響を与えると考えられている (巽 2007). また, 局地的な気候の変動が大きくなり, 高温や低温・日照不足, 台風による風害・潮風害, 豪雨や干ばつ等により農業生産が大きな影響を受けると考えられる (巽 2007).

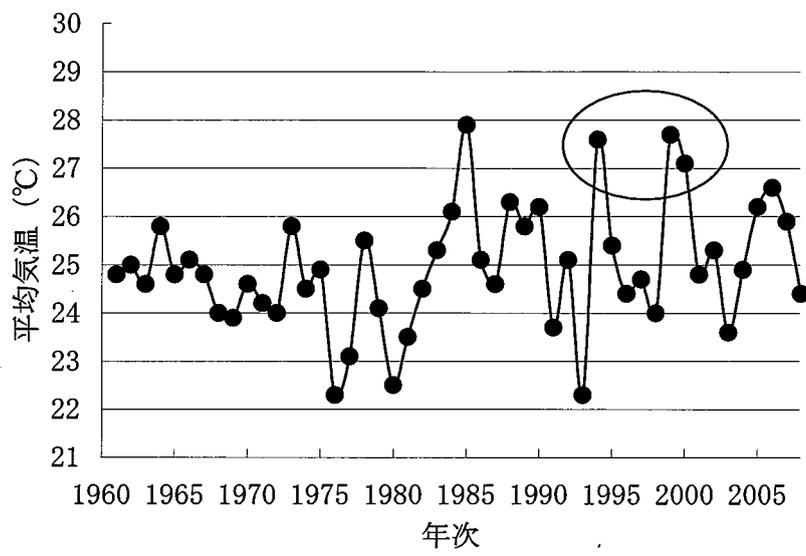
さらに, 世界人口は現在約 67 億人で 2050 年には約 92 億人まで増加することが予想されていて (FAO 2008), 食料需要は一層増大することが予測されている. 世界の穀物需要 (飼料用+食用) の予測によれば (FAO 2006), 穀物需要は 1999-2001 年の 3 ケ年の平均値である 18.8 億トから 2030 年には 26.8 億ト, 2050 年には 30.2 億トと大きく増加することが想定されている. それに対して, 世界人口 1 人当たりの耕地面積は, 1950 年の 0.24ha から 2000 年の 0.11ha へ減少し, 世界人口が増加し耕地面積が現状のまま推移した場合は 2030 年には 0.08ha まで低下することが予想される (渡部 2003).

これらのことは, 農業生産, すなわち食糧生産を取り巻く環境の

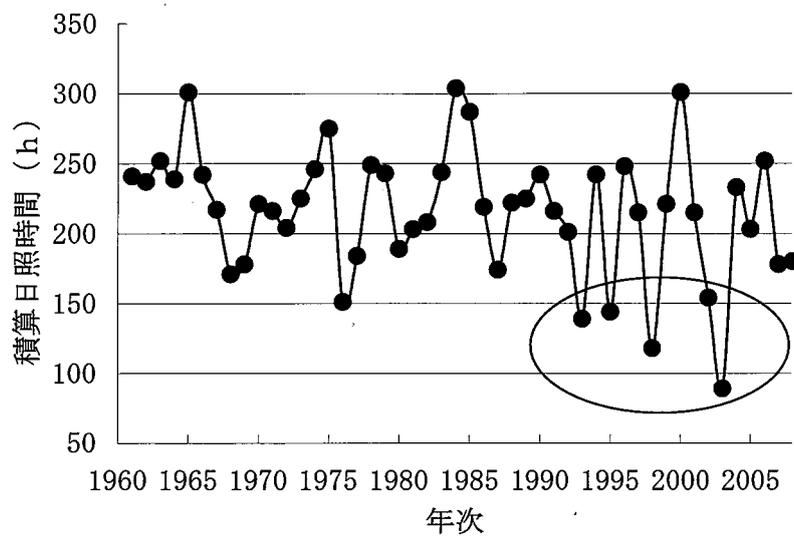
変化（地球温暖化に伴う異常気象，人口増加等）に対応した生産技術の構築により，更なる食料確保が必要であることを示している．

地球規模の気象変動に対応して山形県においても気温の上昇は例外でない．第 1-1 図に示すように水稲生産に大きな影響を及ぼす登熟期間である酒田市の 8 月の平均気温は，白未熟粒発生など品質低下に関与する出穂後の 20 日間の気温で 27 度以上（森田 2005）の年次の出現頻度は 1990 年以前 1 回に対して 1990 年以降 3 回と高くなっている（気象庁，気象統計情報 1960-2006）．同様に，収量に影響する酒田市の 8 月の積算日照時間（第 1-2 図）を見ると，作況指数が 100 未満となる積算日照時間 150 時間未満の出現頻度は 1990 年以前 1 回に対して 1990 年以降 4 回と高くなっている（気象庁，気象統計情報 1960-2006）．これらの気象条件が水稲の収量や品質に及ぼす影響について 1990 年を境に前後 15 年について見ると，山形県庄内地域の水稲の作況指数および一等米比率（山形県農林水産部 2006）は，収量が低下した年次（作況指数 100 未満）は，前半の 15 年間で 3 回，後半の 15 年間で 6 回，品質が低下した年次（一等米比率 80% 未満）が前半の 15 年間で 3 回，後半の 15 年間で 6 回と後半の 15 年間で収量・品質が低下する年次が増加している．後半の 15 年間の収量・品質低下を気象災害別に分類すると，生育期間（特に幼穂形成期から登熟期間）の日照不足・低温による収量・品質低下が 1992 年，1993 年，1995 年，1998 年および 2003 年，登熟期間の高温に伴う白未熟粒発生による品質低下は 1994 年および 1999 年，さらに台風に伴う潮風害による収量・品質低下は 2004 年と，1991 年～2005 年の後半の 15 年間で気象災害に伴う収量・品質低下が 8 回発生し，気象災害の発生頻度が高くなっていることが伺える（藤井ら 2008）．

その中で，2004 年 8 月 20 日に襲来した台風 15 号に伴う潮風害は気象観測が始まって以来，山形県での初めての大規模な潮風による



第1-1図 8月平均気温の推移 (酒田市)



第1-2図 8月の積算日照時間の推移 (酒田市)

農作物災害であった。1960年代以降の我が国の潮風害としては、1961年の第2室戸台風（九州地方）（陣野ら 1962, 中路ら 1962）、1985年の台風13号（九州地方）（土居ら 1986）、1987年の台風12号（北海道地方）（北海道農政部編 1988）、1991年の台風17・19号（九州地方）（市丸ら 1992、前田ら 1992、山本ら 1993、山本ら 1995）、2004年の台風15号（東北地方）（森ら 2008b）、および2006年の台風13号（九州地方）（山本ら 2007）での報告があり、いずれも水稻に甚大な被害を与えている（水稻被害金額：2006年台風13号で約172億円、2004年台風15号で約766億円、1999年台風19号で約400億円、1991年台風17・19号で約471億円）。山本ら（1995）は、暖地において安定的に水稻生産を確保するためには、台風の通過によりもたらされる潮風害の発生機構を解析し、被害の軽減・回避する技術を構築する必要があることを指摘している。地球温暖化に伴う異常気象が頻発し夏の日本海の海水温が高い状態が続いている近年では、これまで潮風害の発生が極めて少なかった東北地域の日本海側における発生も懸念される。

次に、収量および品質に影響を及ぼす気象災害のうち冷害および登熟期間の高温障害の被害の実態、被害発生メカニズムおよび被害軽減対策の開発および農業現場における普及状況について概括してみる。

一般に冷害と言われる低温障害については、障害型冷害と遅延型冷害に分類される。障害型冷害を引き起こす不受精は穂孕期の①温度、②日射量、③養分吸収に影響されることが示されている。障害型冷害に関する穂孕期の低温と不稔発生（不受精）との関係によれば、不稔が少しでも発生する限界温度は18～20℃前後、冷害の危険性のある温度は15～17℃前後、完全に不稔になるのは10～12℃前後であることが示された（西山 1985）。障害型冷害と日射量との関係

について、日射不足による光合成の低下、地水温の上昇を妨げていることも冷害を助長していると考えられている（島崎ら 1964b, 佐竹 1976）。障害型冷害と養分吸収との関係について、窒素が多いと不受精が増加し（佐々木ら 1975）、リン酸の施用量が増すことにより拮抗的に冷害を防止していること（志賀ら 1977a, 志賀 1977b）、堆肥施用によって根が形態的・生理的に健全に保たれ、冷害の軽減に対する有効性が示された（天野 1984）。一方、開花期の不受精は、温度と日射に強く影響され、特に開花および受精適温よりも温度が低下すると不受精が増加することが明らかにされている（田中 1962, 柴田ら 1970）。遅延型冷害を引き起こす登熟不良は直接的には登熟期の冷温によるものであるが、出穂期の遅延には幼穂の発育や出穂の遅延のほかに移植、活着や初期生育の遅延もその原因となることが指摘されている（中田ら 1973）。さらに、冷温により登熟が不良になった時には、青米の増加、胴切米や茶米の発生などによる玄米品質の低下や食味の低下することが明らかにされている（長戸ら 1960, 武田 1984）。

障害型冷害の大きな原因である不受精の発生メカニズムについて見ると、冷気温に対する感受性器官は減数分裂期での穎花中の葯であることが明らかにされている（西山ら 1969）。そして、冷温によって糖代謝系が攪乱して（村上 1958, Nishiyama 1970, 伊藤 1980）、タペート細胞から花粉細胞の小胞子への糖の転流阻害が起こり、タペート細胞の糖濃度・膨圧が増加し、タペート細胞が肥大し花粉形成を阻害することによって発生することが示された（Nishiyama 1984, 西山 1985）。

冷害の防止および軽減する技術については、品種と作期の選定、栽培管理による方策が示されている。その中で、品種の選定は冷害防止効果が大きく、冷害に強い品種の選定は重要である（佐竹 1980）。

さらに，障害型冷害の危険期である穂孕期と開花期が冷温に遭遇しないような作期の選定も重要である（八柳 1960，坪井 1976）．栽培管理では，健苗を育成することが重要である（星川 1985）．施肥法では，窒素肥料の多肥が冷害を助長し（佐々木ら 1975），リン酸施用が冷害を軽減することが指摘されている（志賀ら 1977a，志賀 1977b）．穂孕期の不受精に対しては危険期に深水管理を行うことが有効な防止法であることが報告されている（酒井 1949b，佐竹 1980）．一方，穎花分化期から小孢子初期に至る穂孕期の前歴期間における深水が冷害防止に有効であることも指摘され（佐竹ら 1984），実際に農業現場でも実践されている．さらに，ヤマセ等の冷風が冷温要因の場合，防風林、防風ネットが有効な昇温手段に効果的であることが指摘されている（泊ら 1980）．

高温障害については主に登熟期間に見られる．この期間の高温により不稔粒数の増加，玄米千粒重の低下，白未熟粒の発生による外観品質の低下等の登熟障害を起こすことが指摘されている（松島ら 1957，長戸ら 1960，長戸ら 1965，Satoら 1971，Osadaら 1973，Yoshidaら 1977，西山ら 1981）．登熟期の高温により発生が増加する白未熟粒の種類は乳白粒，背白粒および基部未熟粒であること（長戸ら 1965，Nagatoら 1969），死米の発生も高温により増加することが指摘された（長戸ら 1960）．これらは，高温に遭遇する出穂後日数や高温の程度によって，発生する未熟粒が異なり，出穂後 8 日頃の高温では死米，出穂後 8～20 日頃では乳白粒，出穂後 20 日頃では背白粒が多発することが示された（Tashiroら 1991）．高温によって米粒の充実不足，特に千粒重の低下も指摘され（森田ら 2004，森田 2007），その場合，昼の高温よりも夜の高温の方がより千粒重を低下させることも明らかにされている（森田ら 2002）．

高温による白未熟粒発生のメカニズムとしては，胚乳へのデンプ

ンの蓄積不良によってデンプン粒の集積が粗くなり空隙ができて白濁部が生じること(田代ら 1975, Tashiroら 1991, Zakariaら 2002), 玄米側の光合成産物受入れ能力(シンク能)が低下すること(佐藤ら 1973, 田代ら 1975, 森田ら 2004, 梅本 2001, 松田 2004), ソース能の低下による光合成産物量の不足によって白未熟の発生が助長されること等が指摘されている(今野ら 1991, 小葉田ら 2004, 古賀ら 2004).

高温障害を防止する技術としては, 登熟期の高温を回避する技術と高温条件下でも登熟を良化する技術の2つの視点から構築されている. 登熟期の高温を回避する技術としては, 出穂期を移動するために作期移動, 直播等の利用があげられる(森田 2005). さらに, 水田地温や水稻の温度を下げるために, 夜間の入水やかけ流しが有効であること(森田ら 2004), 品種の草型で穂の位置が止葉より低く, 止葉の陰により穂温が上がりにくい品種の選択等も指摘されている(丸山ら 2006). 高温条件下でも登熟を良化する技術としては, 高温耐性品種の開発と利用(小牧ら 2005, 石崎 2006), 光合成産物の分配先である籾数の適正化(森ら 2003), 地力増強による登熟期間中の稲体活力(光合成能力)の低下の軽減(寺嶋ら 2001, 高橋 2004b, 松村ら 2006), 栽植密度で16~18株/m²の疎植にすると葉色が向上し白未熟粒の発生を軽減すること(高橋 2004a), 水管理では早期落水は白未熟粒の発生を助長すること(佐々木ら 1983, 今野ら 1991)も指摘され, 現場において実践されている.

このように, 冷害や高温等の温度変化に伴う水稻の収量・品質に対する影響については, そのメカニズムおよび技術的対応策が検討され現場への普及が図られている.

次に, 潮風害について同様に, 発生の実態, 発生メカニズムおよび技術的対応策等について見る. 実態調査によれば, 塩分付着量

と水稻精玄米重との間に負の相関関係が認められることから、塩分が穂に付着することによって付着部が白化して登熟が停滞し減収すると推論されている（市丸ら 1992, 山本ら 1993, 山本ら 1995, 森ら 2008b）。また、出穂期後 9～13 日に潮風害に遭遇した場合には、千粒重が低下し、くず米が増加したこと、海岸の堤防に近いほど登熟が悪く低収であったこと等が報告されている（陣野ら 1962, 土居ら 1986, 市丸ら 1992）。しかし、潮風害のような災害調査は、十分な準備と調査時間が得られない場合が多く、実態を示すにとどまる場合が多く、潮風害の発生メカニズムや減収率の推定法や簡易に行える被害推定法など研究事例は、上記に示した冷害（低温、日照不足）や高温障害に比べて少ない。

実際に現場において潮風害が発生した場合、各種の対策（産米の収量・品質向上対策、共済対応、次年度の種子対策等）を早急に講ずるために、①潮風害による被害程度・範囲の推定②減収量の推定を行う必要がある。しかし、現場の普及センターやJAの有する分析機器を用いた水稻穂部の塩分量の簡易で迅速な測定による潮風害の被害程度や範囲を把握する方法が確立されていない。さらに、減収量の推定についても 1953 年のデータを基に枯死枝梗数歩合から作成した減収尺度が用いられている（農林水産省経済局統計情報部 1982）。しかし、作付け品種や肥培管理が過去と大きく異なるとともに都道府県によって気象条件や水稻の出穂時期等も異なることから、山形県を含めた東北地域に適合した減収量の推定式を早急に作成する必要がある。併せて、潮風害に関する研究事例が少ない要因としては、冷害や高温障害の場合、再現方法が確立されているのに対して、潮風害の再現方法については問題が残されていることがあげられる。例えば、坪井ら（1961）および山本ら（1996, 1997）はポット栽培の水稻に風洞を用いて風と塩水処理を行うことにより、潮風

害を再現して収量および品質への影響を検討した。しかし、この方法では、根から塩分を吸収する塩害も潮風害と同時に起こっている可能性が高く、潮風害単独のメカニズムの解析は難しいものと考えられる。さらに、ポット条件での報告にとどまり圃場での再現性にも疑問がある。

山本ら（1997）は、暖地において安定的に水稻生産を行うためには、台風に伴う潮風害による被害を軽減・回避する技術を構築する必要があることを指摘している。しかし、潮風害の軽減・回避技術については、被害後に水を散布して塩分を洗い流すといった水田のような広い面積には対応できない報告にとどまっている（山本ら 1997）。このように、被害防止（軽減）方策が示されている冷害や高温障害に比べて、現実的な被害防止（軽減）方策が示されていないので、潮風害に対して脆弱な状況にあり、軽減対策の開発が強く求められている。

ところで、2004年台風15号に伴う潮風害の発生時に、ケイ酸資材を継続的に施用していた水田で、潮風害による減収を軽減することが確認された（山形県 2004）。このことは、ケイ酸を施用すると、水稻のケイ酸含有率が高まり、表層へのケイ酸沈着量が増加して、潮風害による塩分の組織内部への侵入を軽減できることを示唆していて、ケイ酸施用による潮風害の被害軽減技術の確立の可能性を示していると考えられる。

ケイ酸は植物に対する必須元素ではないが、水稻など特定の作物に対する有用元素の1つに位置づけられている（吉田 1960, Takahasiら 1990, Epstein 1994）。近年、ケイ酸についての研究は、水稻のケイ酸吸収を司る遺伝子の単離と機能解析（Maら 2004, Maら 2006）、水田土壌のケイ酸供給力の評価（住田ら 1991, 北田ら 1992, 加藤ら 2000, Makabeら 2009）、ケイ酸資材の溶出特性・資材のケイ

酸供給力の評価（加藤ら 1996a, 加藤ら 1996b, 加藤ら 1996c, 三枝ら 1998a, 三枝ら 1998b, 森ら 2006）など、様々な視点から行われている。水稻に対する役割について見ると、ケイ酸は葉身の水分状態を良好にして気孔コンダクタンスを低く維持し単葉の光合成速度を向上させること（間藤 1991）、下位葉の光合成速度の低下を軽減すること（東江ら 1992）、さらに、葉身が直立することによって受光態勢が向上し、群落としての光合成量が増加すること（岩田ら 1962, 高橋 1987, Andoら 2002）、根の酸化力の向上に關与すること（奥田ら 1962）が報告されている。また、光合成能力の向上により、乾物生産量が増加して収量が向上し、玄米中のタンパク質含有率の低下による食味が向上することも報告されている（宮森 1996, 藤井ら 1999a,b, 松田ら 2000a,b, 吉川ら 2007）。さらに、植物組織の物理的強度の向上を通して、いもち病等の発病軽減（赤井 1953, 早坂ら 2000, 前川ら 2001, 前川ら 2002, Hayasakaら 2005, Hayasakaら 2008）やニカメイチュウ等の食害軽減（笹本 1959）などの病虫害耐性の向上、稈の物理的強度の向上による耐倒伏性の向上（志茂山 1958）にも寄与している。ケイ酸処理によって水分ストレス条件下における蒸散量を抑制する効果が高いことも指摘されている（馬 2006）。このことから、水稻は、ケイ酸を根から選択的・積極的に吸収して葉身や籾殻への沈積量を多くすることにより生物学的ストレス（病虫害）および非生物学的ストレス（気象, 水分）を軽減していると考えられている（Maら 2000, 馬 2006, 藤井ら 2008）。これらのことから、ケイ酸の吸収量の増大は、潮風害による穂部への塩分付着量が多くなるストレスに対する抵抗性の増大の可能性も示唆される。

潮風害対策の一環として実施されているモニタリング調査によれば、台風通過時の作物への塩分付着は海岸線からかなり離れた内陸

部においても確認されている（柴田ら 2009）。これは、台風の通過するコースや規模等によっては海岸線を有するすべての都道府県でいつでも発生しうる気象災害といえる。このように、潮風害は全国レベルで甚大な被害を及ぼす緊急性の高い気象災害といえるが、前述の如く、他の気象災害（冷害・高温障害等）と比較すると被害予測や技術対策に対する研究進度は極めて低い。

そこで、本論文では 2004 年台風 15 号に伴う山形県庄内地域における潮風害を解析して、(1)潮風害発生時の台風の特徴、被害発生メカニズムから見た潮風害発生予測項目の提示、(2)電気伝導度計を用いた迅速で簡易な測定法による被害程度の把握に基づいた減収率の推定法、(3)潮風害による被害の軽減技術を明らかにすることを目的に以下の検討を行った。第 2 章では 2004 年台風 15 号に伴う潮風害の特徴と被害の実態について、第 3 章では電気伝導度を利用した水稻穂部塩分量の簡易測定による潮風害の被害程度・範囲の把握について、第 4 章では潮風害の発生メカニズムの解明および減収率の推定法について検討し、潮風害発生時の台風の特徴、被害発生メカニズムから見た潮風害発生予測項目の提示、電気伝導度計を用いた被害程度の把握および被害把握に基づいた減収率の推定法について明らかにした。さらに、第 5 章では、圃場レベルにおける潮風害の再現方法について明らかにした。第 6 章では 2004 年台風 15 号の潮風害発生時にケイ酸施用によって収量低下の軽減効果が認められたことから、第 5 章で述べた潮風害の再現方法を用いて潮風害による被害軽減に対する幼穂形成期（以下、幼形期）のケイ酸施用効果を検討した結果、潮風害による被害軽減に対するケイ酸の有用性が高いことを明らかにした。

本論文をまとめるにあたり、山形大学農学部教授安藤豊博士から懇切な御指導と御校閲を賜った。また、御校閲を賜りました、岩手大

学農学部教授黒田栄喜博士，弘前大学農学部准教授松山信彦博士に衷心より感謝の意を表します。

さらに，本研究の実施と論文の作成にあたり，山形大学農学部教授藤井弘志博士，山形県農業総合研究センター農業生産技術試験場庄内支場松田裕之博士（現山形県庄内総合支庁産業経済部庄内農業技術普及課），同柴田康志氏（現山形県農業総合研究センター水田農業試験場）には，適切な御指導と御校閲，数々の便宜およびご助言をいただいた。

本研究は，山形県農業試験場庄内支場，山形県農業総合研究センター農業生産技術試験場庄内支場（いずれも，現山形県農業総合研究センター水田農業試験場）の職員のご協力を得て行われた。特に，分析および調査において，高橋譲氏，佐藤克則氏，富樫博喜氏，加藤史津氏，武山勝宏氏，石川利美子氏，ならびに兵藤由紀枝氏には精度の高い，卓越した技能をもって作業補助をしていただいた。

以上の方々に心から感謝申し上げます。

第2章 2004年台風15号に伴う潮風害の特徴と被害の実態

2-1 序論

2004年の山形県庄内地域の作況指数は87で、未曾有の大冷害であった平成5年の88を下回り過去35年で最低の作況指数であった。この原因としては8月20日の台風15号により山形県・秋田県の日本海側の各地で発生した潮風害があげられる。山形県災異年表（山形県，山形気象台1990）によれば1725年（享保10年）「7月28日（現在9月3日）庄内大風，別けて酒田，横山辺，汐風にて樹木葉落ちて，焼木の如し。」の記載があるだけで，気象観測が始まって以来，山形県での初めての大規模な潮風による農作物災害であった。1960年代以降の我が国の潮風害としては，1961年の第2室戸台風（九州地方）（陣野ら1962，中路ら1962），1985年の台風13号（九州地方）（土居ら1986），1987年の台風12号（北海道地方）（北海道南農試1987），および1991年の台風17・19号（山本ら1995）（九州地方）が報告されている。しかしながら，東北地方における潮風害による被害の報告は見られない。

山本ら（1995）は，暖地において安定的に水稻生産を確保するためには，台風の通過によりもたらされる潮風害の発生機構を解析し，被害の軽減・回避する技術を構築する必要があることを指摘している。地球温暖化に伴う異常気象が頻発し夏の日本海の海水温が高い状態が続いている近年では，これまで潮風害の発生が極めて少なかった東北地域の日本海側における発生も懸念される。そこで，2004年の台風15号に伴い東北地方の日本海側で発生した潮風害の発生要因を台風の特徴，潮風害の地域性および水稻の生育時期の関係から解析した。また，潮風害の発生を予測する手順についても考察する。

2-2 材料と方法

(1)2004 年台風 15 号の気象的特徴

1991 年～2004 年にかけて 8 月に東北地域に襲来した台風の気温・降水量・風向・風速（やまがたアグリネット・アドバンスシステム 2004）などの気象データと最高波高・有義波高（国土交通省東北地方整備局酒田港湾事務所 2004）・海水温などの海象データ（舞鶴海洋気象台 2004）、台風の進路（国立情報研究所 2004）を用いた。

(2)市町村別収量・一等米比率

山形県庄内地域における 2004 年の市町村別収量は統計情報事務所（山形統計事務所 2004）、一等米比率は全農庄内（2004、12 月 29 日現在）のデータより作成した。なお、市町村別の収量の平年値は過去 7 ケ年（1997 年～2003 年）のデータ（山形農林水産統計年報 2005）を平均して求めた。

(3)1 穂当たりの塩化ナトリウム付着量の分布

台風 15 号通過 3 日後（8 月 23 日）に、庄内地域の 16 ケ所から稲株各 3 株を採取した。1 株当たり 1 / 2 穂について 250ml のポリビンに入れ脱塩水 200ml を加えて 30 分振とう後ろ過し、さらに、0.20 μ m メンブランフィルターでろ過したろ液について 25 倍に希釈後イオンクロマトグラフィー（DIONEX 社製、DX-500）でナトリウムイオンを定量した。これを塩化ナトリウムに換算して、1 穂当たりの塩化ナトリウム量を算出した。なお、潮風害を受けていないサンプルとして海岸から 80km 内陸に位置する山形市（山形県立農業試験場）のコシヒカリも併せて調査した。

2-3 結果

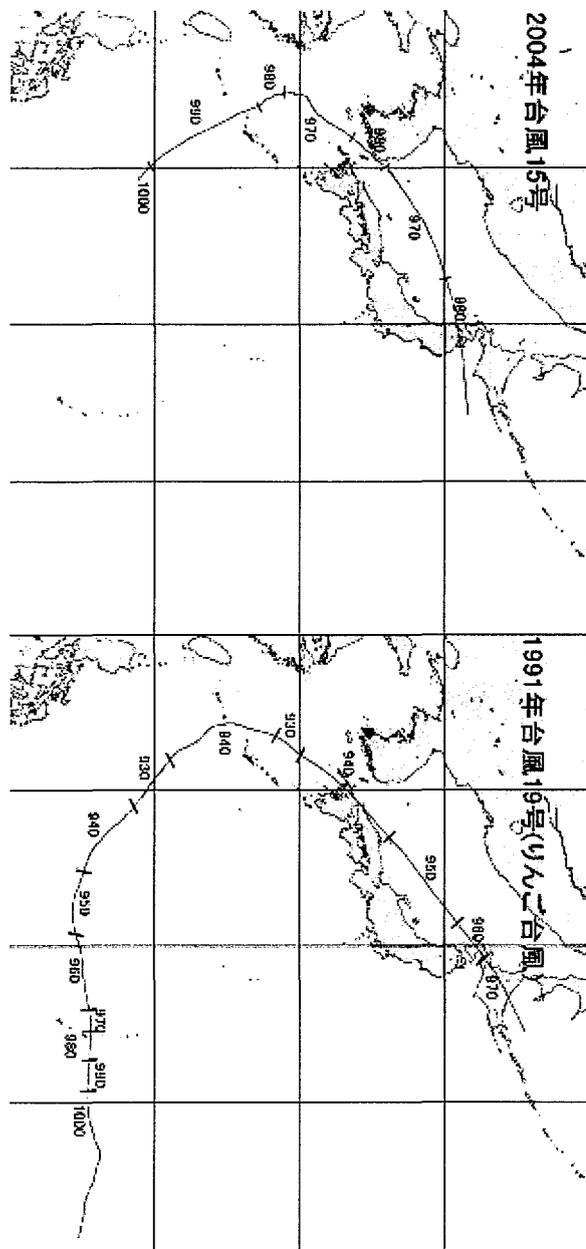
(1)2004 年台風 15 号の気象的特徴の解析

第 2-1 図には、2004 年の台風 15 号と 1991 年の台風 19 号（通称りんご台風）の経路図を示した。2004 年の台風 15 号は、フィリピン東海上で発生し、沖縄本島の西を通過時は強い勢力ではなかった。

東シナ海から対馬海峡（対馬海峡西水道）を通過し，日本海を北上中に発達して勢力を拡大し，青森県津軽半島に上陸するまで台風の中心部は海上を進行したため，どこにも上陸せず海からのエネルギー供給を断たれることがなかった．また，8月中旬の日本海（舞鶴）の海水温は平年に比べて2～3℃高く（舞鶴海洋気象台 2004）台風に必要なエネルギーを供給できたことも台風 15 号の勢力が衰えなかった要因と考えられる．なお，台風 15 号の経路は、東北地方のりんごを中心にした果樹に甚大な被害を及ぼした 1991 年 19 号に酷似している．

第 2-1 表には 1991 年～2004 年にかけて 8 月に東北地方に襲来した台風の概要について示した（やまがたアグリネットアドバンスシステム 2004）．2004 年台風 15 号は，1991 年以降 8 月に山形県庄内地域に襲来した台風としては，最大風速（ 23.5ms^{-1} ），風速 10ms^{-1} 以上の継続時間（9 時間）および最高波高（17m），有義波高 5m 以上の継続時間（9 時間）の気象要素が最大であった．この要因としては，台風 15 号の勢力が強いこととともに酒田沖における台風の移動速度が 20kmh^{-1} と非常に遅かったことがあげられる（2004 年台風 16 号は 65kmh^{-1} ，2004 年台風 18 号は 90kmh^{-1} であった）．さらに，台風通過後 24 時間の降水量が 3.5mm と非常に少なく典型的な風台風であった．潮風害の発生要因として波について言及した報告は少ない．第 2-2 図には台風通過時における最大風速と最高波高との関係，第 2-3 図には時間平均風速 10ms^{-1} 以上継続時間と最高波高との関係を示した．これによれば，南西風の場合最大風速および継続時間と最高波高との間には高い正の相関関係が認められた．一方，東風の場合は最大風速および継続時間が高くても最高波高は低いことも明らかであった．

第 2-4 図には，山形県庄内地域における穂へ付着した塩化ナトリ



第2-1図 台風の経路図比較

左図：2004年15号、右図：1991年19号(ウんご台風)

第2-1表 東北に8月に襲来した台風の比較（1991年～2004年）

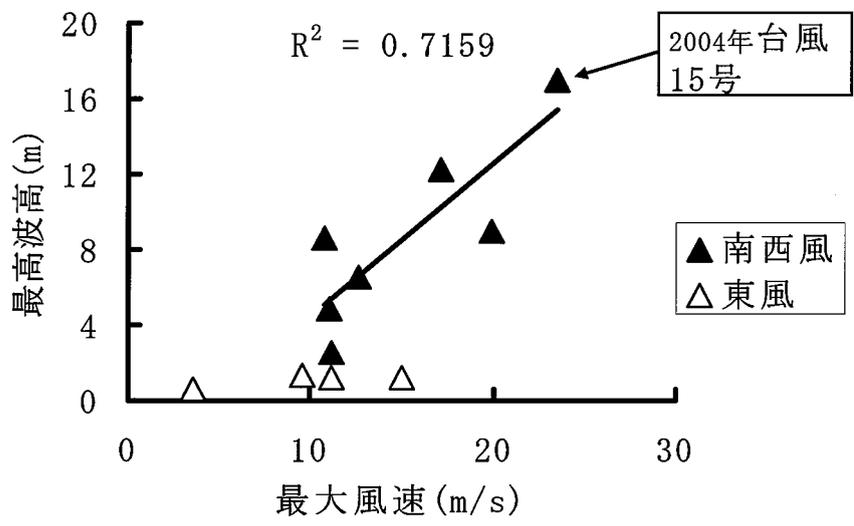
年次	台風番号	最大風速	同風向	風速10m以上継続時間	同西風継続時間	通過後降水量※1	最大風速記録日	最高波高	有義波高※2 5m以上継続時間
☆1991年H3年	19号	19.6	SW	11	7	2.9	9月28日	-	-
1991年H3年	14号	7.5	W.WSW	0	0	0.6 (2)	8月31日	-	-
1992年H4年	10号	11.1	SW	1	1	2.6 (3)	8月9日	2.6	0
1993年H5年	7号	12.6 (4)	SW	7 (2)	7 (2)	10.0 (5)	8月11日	6.5 (5)	0
1993年H5年	11号	11.0	WSW	3	3	13.5	8月28日	4.8	0
1994年H6年	11号	10.7	WSW	4	4	0.0 (1)	8月2日	8.6 (4)	0
1996年H8年	12号	9.1	ESE	0	0	39.0	8月15日	-	-
1997年H9年	11号	11.5	WSW	6 (3)	6 (3)	1.5	8月10日	-	-
2001年H13年	11号	11.8 (5)	ESE	2	0	15.0	8月22日	-	-
2004年H16年	15号	23.5 (1)	SW	9 (1)	9 (1)	3.5 (4)	8月20日	17.0 (1)	9 (1)
2004年H16年	16号	19.9 (2)	SW	6 (3)	6 (3)	15.0	8月31日	9.0 (3)	2 (3)
2004年H16年	18号	17.1 (3)	SW	6 (3)	6 (3)	8.0	9月8日	12.3 (2)	4 (2)

※1 風が西風に変わってから24時間の間の降水量

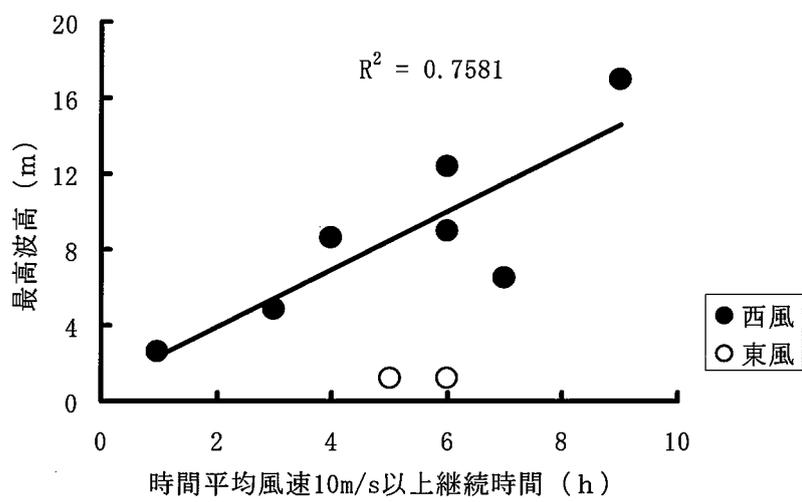
※2 連続する波を観測したとき、波高の高いほうから順に全体の1/3の個数の波を選び、これらの波高を平均したもの。

☆りんご台風（9月の台風であるが、台風の強さの指標として示した。

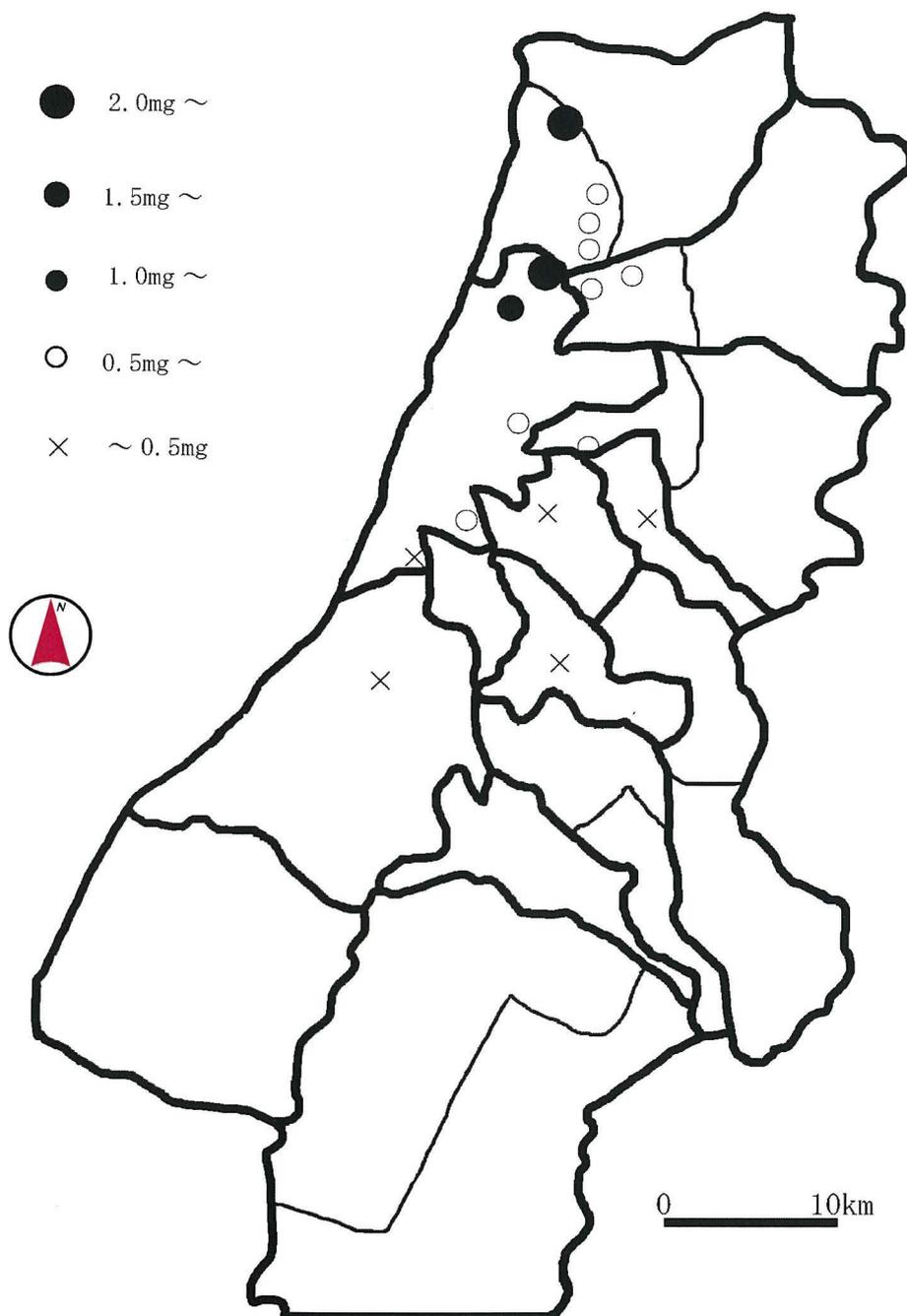
（ ）内は順位。



第2-2図 最大風速と最高波高との関係



第2-3図 時間平均風速10m/s以上継続時間と最高波高との関係



第2-4図 山形県庄内地域における台風15号通過後の1穂当たりNaCl付着量(mg)

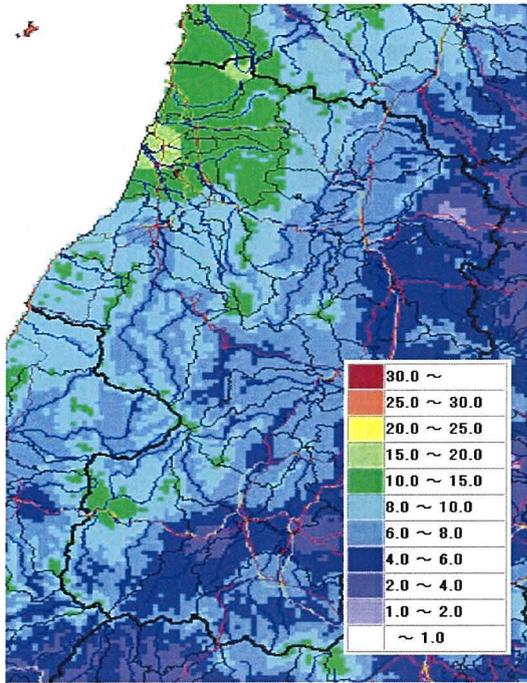
ウム量の分布について示した。これによれば、潮風害の影響の無い（海岸から 80km 内陸に入った山形市）穂の塩化ナトリウム量は 1 穂当たり 0.07mg であるのに対して、海岸から 15km 内陸に入った地域でも穂への塩分の付着（0.3~0.4mg）が認められたことから、台風 15 号によって広範囲に海塩粒子が飛散したことが伺える。穂へ付着した塩化ナトリウム量が多い地域は北部地域で、しかも、海岸に近いほど多い傾向であった。北部地域で南部地域に比べて 1 穂当たり塩化ナトリウム量が多い一つの要因としては、北部地域で南部地域に比べて風の強かったこと（第 2-5 図）があげられる。

以上より、2004 年台風 15 号の特徴からみた潮風害発生の要因として、南西風の最大風速が強く、風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いことによって、波高が高くなり、海塩粒子が内陸部まで飛散したことと降雨が少ないことにより塩分の洗い流しが無かったことがあげられる。

さらに、水稲の生育時期をみると台風 15 号襲来時の出穂後日数は、ササニシキで 16~20 日、はえぬきで 12~18 日、コシヒカリで 7~12 日でいずれの品種も乳熟期~糊熟期であり潮風害の影響を受けやすい時期であった（前田ら 1992, 陣野ら 1962, 中路ら 1962）。このことも潮風害の被害を大きくした要因であると考えられる。

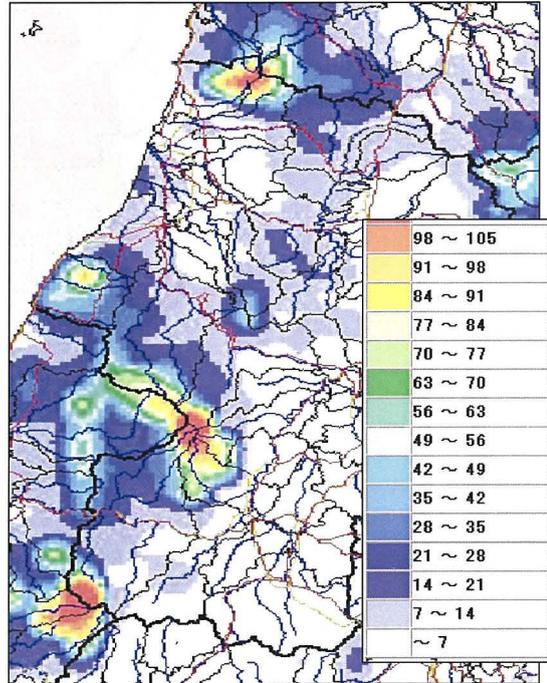
(2). 市町村別収量および一等米比率

第 2-6 図には 2004 年の山形県庄内地域における市町村別収量の平年比について示した。台風 15 号に伴う潮風害により各市町村の収量は平年を下回った。また、市町村によって収量的には大きな差が認められ北部地域ほど、また、海岸に近いほど減収割合が高かった。北部地域で南部地域に比べて収量が低下した一つの要因としては、風の強さがあげられる。第 2-5 図に示した台風通過時の風速によれば、南部地域に比べて北部地域で風速が強いことが認められた。



8月20日 4:00

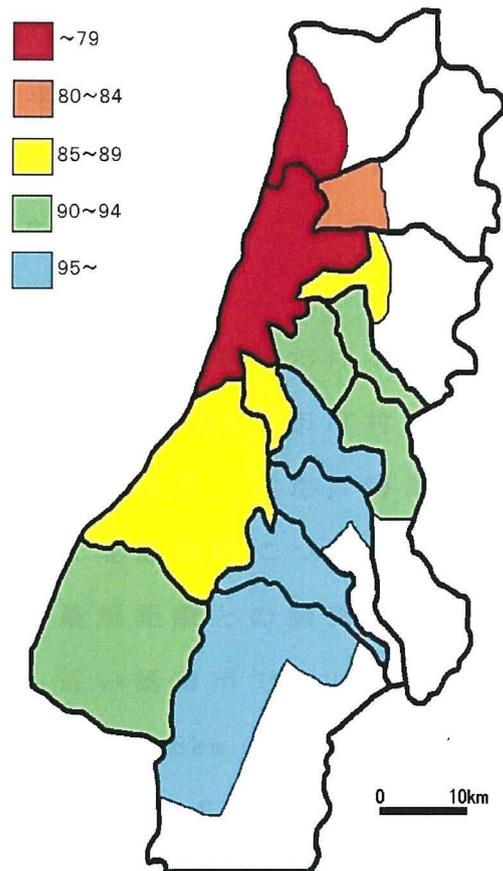
風速 (m)



8月20日 1:00 ~ 22日 24:00

降水量 (mm)

第2-5図 2004年台風15号通過時の気象



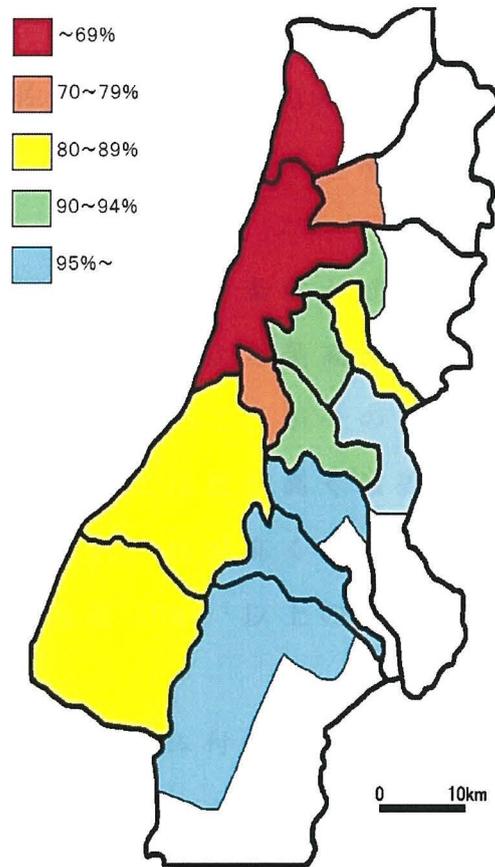
第2-6図 山形県庄内地域における市町村別10a当たり収量（過去7ヵ年平均に対する比）

北部地域について各市町村別水稻収量の平年比と海岸の最短距離との関係について検討した。海岸線から市役所・町役場までの距離をその市町における海岸からの距離とした。海岸からの距離が2.9kmで最も近い酒田市 $460 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ (平年比 74%)、次いで4.6kmの遊佐町で $442\text{kg}10\text{a}^{-1}$ (平年比 73%) と低い水準で、9.8kmの八幡町で $477 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ (平年比 81%)、11.5kmの平田町で $500 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ (平年比 85%)、14.6kmの松山町 $527 \text{ kg}10\text{a}^{-1}$ (平年比 90%)と海岸から内陸部に入るにしたがい、市町村ごとの2004度の収量および平年比は増加する傾向を示した。

第2-7図には山形県庄内地域における市町村別の一等米比率を示した(2004年12月29日現在)。市町村別の一等米比率は収量と同じ傾向であり、北部地域ほど、また、海岸地域ほど低い傾向が認められた。収量と同様に北部地域について各市町村の一等米比率と海岸の接線方向からの最短距離との関係についてみると、海岸からの距離が2.9kmで最も近い酒田市で9.3%、次いで4.6kmの遊佐町で16.6%と低い水準で、9.8kmの八幡町で74.7%、11.5kmの平田町で90.1%、14.6kmの松山町で86.9%と海岸から内陸部に入るにしたがい、市町村ごとの一等米比率は高まる傾向を示した。市町村別の収量および一等米比率を示した第2-6, 2-7図と1穂当たり塩化ナトリウム量を示した第2-4図から、1穂当たり塩化ナトリウム量の多い地帯ほど減収および1等米比率の低下が認められ、減収および品質低下の要因として穂への塩の付着が考えられる。

2-4 考察

過去において潮風害を発生させた台風をみると、1987年台風12号(北海道道南農試1987)および1991年台風17号(山本ら1995)も風台風であり、今回の2004年台風15号と同様であった。山本(2004)は、農作物の潮風害発生には①台風の通過時の強風、②通

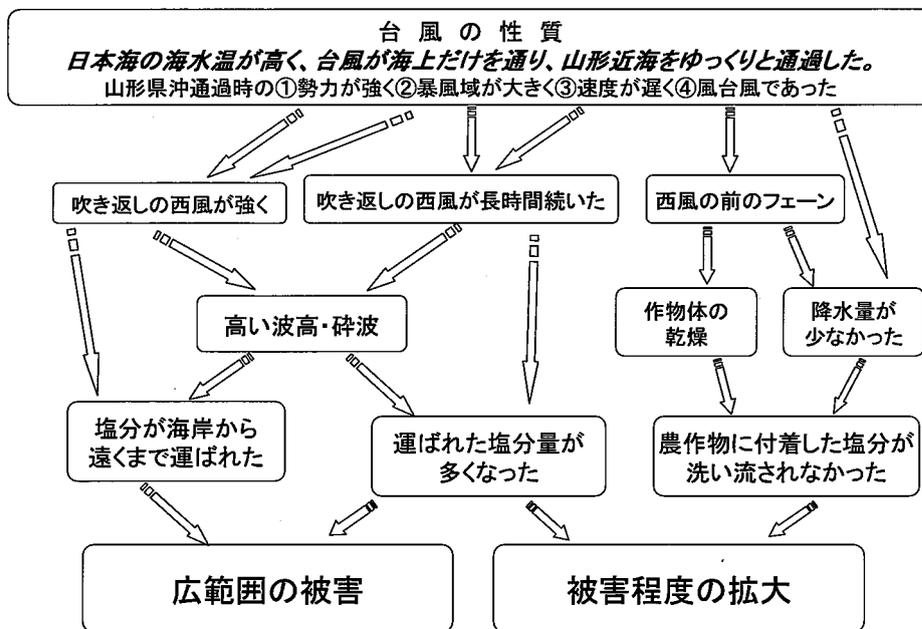


第2-7図 山形県庄内地域における市町村別一等米比率 (はえぬき・ひとめぼれ・ササニシキ)
2004年12月29日現在,全農庄内調べ

過時の風向，③通過後の降水の状況が大きく関係していることを示している．1991年台風17号による潮風害の被害が甚大であった佐賀県（作況指数64）における気象データをみると，最大風速 25.6ms^{-1} で，台風通過時の降水量 0mm ，風速 10ms^{-1} 以上強風時間5時間であり，最大風速および降水量は2004年の台風15号の山形県沖通過時と同程度であった．一方，2004年台風15号の風速 10ms^{-1} 以上の強風時間は9時間で佐賀県における1991年台風17号のそれよりも長い．また，いずれの台風も海塩粒子が海岸から内陸部に飛散しやすい風向（西風）であった．これらのことから，2004年台風15号は，気象要因からみた潮風害発生の条件が満たされていると考えられる．さらに，2004年台風15号による最高波高が高いのは風速が強い南西風～西風の継続時間が長いことがその要因としてあげられる．したがって，潮風害の発生には波が高く波砕することも飛塩を助長する重要な要因と考えられ，波が高くなるには①風向は南西風で，②最高風速が強く，③風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いことが条件と考えられる．

1穂当たり塩化ナトリウム付着量は山形県の庄内地域の北部地域で南部地域に比べて多く，しかも，北部地域では海岸線に近いほど多い傾向であった．北部地域で南部地域に比べて1穂当たり塩化ナトリウム付着量が多い1つの要因としては，北部地域で南部地域に比べて風が強かったことがあげられるが，このような塩化ナトリウム付着量の地域差については風速だけでは説明できないところがあり，今後，地形（標高）と風向などの視点から解析する必要がある．いずれにせよ，これらの結果は，山形県庄内地域における大幅な減収・品質低下には潮風害が大きく影響していることを示し，山本ら（1995）が報告した事例と同様な傾向であった．

第2-8図には，台風の特徴からみた潮風害のメカニズムを示した．



第2-8図 潮 風 害 発 生 の メ カ ニ ズ ム

①南西風で風速が強く (15ms^{-1} 以上), 風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いこと (5 時間以上) によって, 飛散した海塩粒子が平野の内陸部まで運搬されたこと, ②波が高いことによって波が海岸線に打ち寄せられ波しぶきが上がったこと, ③降雨が少ないことによって, 農作物に付着した塩分が洗い流されなかったこと, ④水稻の生育時期が潮風害の被害を受けやすい時期であったことが相互に重なりあって潮風害を広範囲にしかも被害程度の拡大につながったと考えられる.

なお、現場において潮風害が発生した場合, ①潮風害の被害範囲の推定, ②各種対策を早急に講ずるため潮風害の発生に伴い減収量の推定, ③収量確保・品質向上対策である刈取時期の判断や網目の選択を行うことが必要になる. そこで, 東北地方 (日本海側) では次の手順で潮風害の発生を予測する必要があるものと考えられる. 潮風害の一次予測として台風襲来前に準備する情報としては①台風の進路, ②台風が日本海を進む場合は, 日本海の海面水温の情報を入手する. そして, 台風が海上 (日本海) だけを通り, しかも日本海の海面水温が高く山形近海をゆっくり通過し, 山形県沖通過時の勢力が強く (暴風域が大きく), 風台風と判断される時には潮風害発生の危険性が高いことを予想する. 次に潮風害の二次予測として①台風通過後に収集した情報 (風向, 風速, 波高, 降水量) のうち, 南西風の最高風速が 15ms^{-1} 以上, 10ms^{-1} 以上の南西風～西風の継続時間が 5 時間以上, 波が高く, 降水量が少ない場合は潮風害の発生を疑い, ②水田ほ場より稲株を採取して穂の塩分量を測定し, 被害の範囲および程度を判断して, ③減収率の推定, ④収量確保・品質向上対策を実施する.

2-5 要約

2004 年の台風 15 号に伴い東北地方の日本海側で発生した潮風害

の発生要因を台風の特徴から総合的に解析して、今後の東北地域の日本海側における潮風害発生に対する資料とするとともに、台風の特徴から潮風害の発生を予測する手順についても考察した。

(1) 台風の特徴からみた潮風害の発生要因としては、①南西風で風速が強く (15ms^{-1} 以上)、風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いこと (5時間以上) によって、飛散した海塩粒子が平野の内陸部まで運搬されたこと、②高い波が海岸線に打ち寄せられ波しぶきが上がったこと、③降雨が少ないことによって、農作物に付着した塩分が洗い流されなかったこと、④水稻の生育時期が潮風害の被害を受けやすい時期であったことが相互に重なりあって潮風害の被害地域および被害程度の拡大につながったと考えられる。

(2) 市町村によって収量的には大きな差が認められ、北部地域または海岸に近い地帯ほど減収割合が高かった。北部地域で南部地域に比べて収量が低下した一つの要因としては、南部地域に比べて北部地域で風が強く、海塩粒子が内陸部まで運搬されたことが考えられた。

(3) 潮風害の一次予測として台風襲来前に準備する情報としては①台風の進路、②台風が日本海を進む場合は、日本海の海面水温の情報を入手する。そして、台風が海上(日本海)だけを通り、しかも日本海の海面水温が高く山形近海をゆっくり通過し、山形県沖通過時の勢力が強く(暴風域が大きく)、風台風と判断される時には潮風害発生の危険性が高いことを予想する。次に潮風害の二次予測として①台風通過後に収集した情報(風向、風速、波高、降水量)のうち、南西風の最高風速が 15ms^{-1} 以上、 10ms^{-1} 以上の南西風～西風の継続時間が5時間以上、波が高く、降水量が少ない場合は潮風害の発生を疑い、②水田ほ場より稲株を採取して穂の塩分量の測定を行う。

第3章 電気伝導度（EC）を利用した水稻穂部塩分量の簡易測定法の開発

3-1 序論

台風による潮風害では強風によって海塩粒子が飛散して、水稻の穂へ付着することによって著しい収量・品質低下が起こる（山本ら 1992, 山本ら 1995, 藤井ら 2006）。水稻の被害程度は、穂への塩分付着量によって影響され、潮風害の発生が出穂 4～15 日後の場合、1 穂当たり塩分量が約 1mg および約 2mg で、減収率がそれぞれ約 40% および約 70% であることが報告されている（市丸ら 1992）。現在、潮風害を受けた水稻に対する栽培技術での軽減対策はないが、穂への塩分の付着量を現場で迅速・簡易に測定し、減収による収入減を軽減する共済対応、次年度の種子対策など、収量確保のための刈取時期・別刈りの作業計画と集荷計画作成、品質維持のための選別機（網目選択・色彩選別など）の準備などを各農協・個々の農家に正確に伝達することが重要である。

しかし、現状における穂への塩分付着量の測定については、原子吸光光度、イオンクロマトグラフィー（長谷川ら 1995a, 長谷川ら 1995b）、硝酸銀滴定（市丸ら 1992）による測定が主で、これらの測定法は精度が高いと考えられるが、簡便性・迅速性に欠けるとともに、現場の普及機関・農協では設備等の点からこれらを用いての対応は困難な状況にあると考えられる。一方、土壌溶液中の塩分濃度を簡便に測定する方法としては電気伝導率（以下、EC とする）が用いられている（亀和田 1997）。現場において潮風害を予測するために穂に付着した塩分量を EC により迅速に測定した報告はない。そこで、2004 年の台風 15 号に伴って山形県庄内地域で発生した潮風害による被害程度が異なるほ場 9ヶ所から稲株を採取し、電気伝導率計（以下、EC メーターとする）を用い、穂部へ付着した塩分量

について、既知濃度の塩化ナトリウム溶液から求めた検量線を利用した簡易測定を行った。そして、ECによる簡易測定および同一サンプルのイオンクロマトグラフィーによる測定から求めた穂部塩分量と、水稻の潮風害の被害程度および被害範囲の関係を検討し、ECによる水稻の潮風害の被害程度および被害範囲の把握が可能かどうかについて検討した。

3-2 材料と方法

(1) 試料

2004年台風15号通過3日後（8月23日）に、潮風害の被害程度が異なると思われる9ヶ所のほ場から1ほ場当たり平均的な稲株3株を採取した。品種は、出穂期が8月4日～6日の「はえぬき」を供試した。籾被害度は、それぞれの稲株から約10本の穂を選び少しでも脱色および褐色の発生した籾を被害籾として、総籾数に対する被害籾数割合を達観により10%きざみに0から10までの11段階に分類した。台風通過時の8月20日から稲株を採取した8月23日までの降水量は3.5mmと極めて少なかった。なお、潮風害を受けていないサンプルとして海岸から80km内陸に位置する山形市の山形県農業総合研究センターに生育する「コシヒカリ」も併せて供試した。

(2) 穂へ付着した塩分量の測定

1) 穂へ付着した塩分の抽出

試料として穂約10本を250mLポリビンに入れて、脱塩水200mLを加えて室温で30分振とう後、No131ろ紙（ADVANTEC）でろ過し、ろ液を塩分抽出液とした。

2) ECメーターによる測定

1)で得られたろ液についてECメーター（TOA DDK社製，TOA CM-40S）でEC（ dSm^{-1} ）を測定した。穂に付着した塩類のうち塩化ナトリウム以外の塩はわずかであると推察されるので、ECメーターの

検量線は塩化ナトリウム溶液（25 mg L⁻¹， 50 mg L⁻¹， 75 mg L⁻¹， 100 mg L⁻¹， 125 mg L⁻¹， 250 mg L⁻¹の 6 レベル）について作成し，これに基づいて穂に付着した塩分量を穂数で除して 1 穂当たり塩分量として表した．

3) イオンクロマトグラフィー法による測定

1) で得られたろ液について 0.20 μm メンブランフィルター（ニトロセルロース製， ADVANTEC， 25AS020AN） で再度ろ過したろ液について， 25 倍に希釈後， ナトリウムイオンをイオンクロマトグラフィー（DIONEX 社製， DX-500） で測定し， 塩化ナトリウム量に換算し， 供試した穂数で除して 1 穂当たり塩化ナトリウム量とした．

3-3 結果

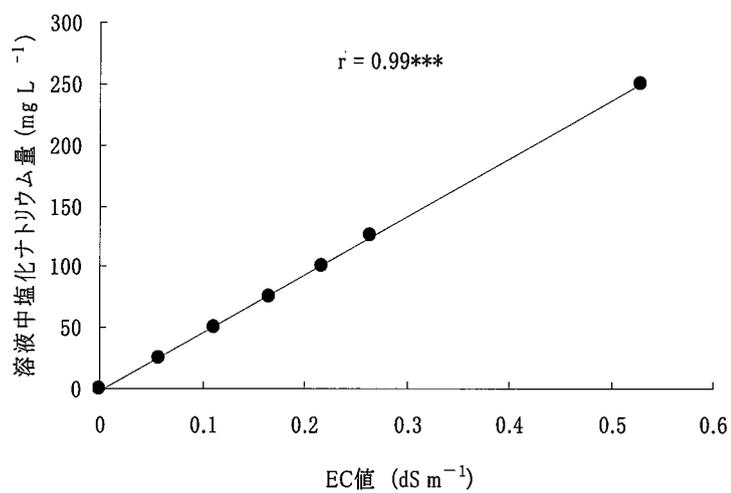
第 3-1 表に，台風 15 号通過後に採取した稲株の籾被害度と海岸線からの最短距離を示した．籾被害度は 1.0 から 8.0 まで大きな幅が認められた．第 3-1 図に EC と溶液中塩化ナトリウム量との関係を示した．両者の関係は $r=0.99$ で非常に高い相関が認められた．そこで，この第 3-1 図を検量線として試料の EC 値から一穂当たり塩分量を求め，同じ試料について，イオンクロマトグラフィーでナトリウムイオン量を定量した．その結果 EC メーターで測定した塩分量とイオンクロマトグラフィーによる塩化ナトリウム量との間には密接な直線的関係が認められ（相関係数 $r=0.93$ ， 第 3-2 図），EC によって溶液中の塩化ナトリウム量が推定できることがわかった．

次に，EC で推定した穂へ付着した塩分量と実際の籾被害度の関係を第 3-3 図に示した．穂へ付着した塩分量が多くなると籾被害度が高くなる傾向が認められ，1 穂当たり塩分量が 1 mg 以上になると籾被害度は 5（籾の約半数に被害が認められる）以上となった（第 3-3 図）．イオンクロマトグラフィーで求めた同一サンプルの 1 穂当たり塩化ナトリウム量と籾被害度の関係においても同様の傾向が認めら

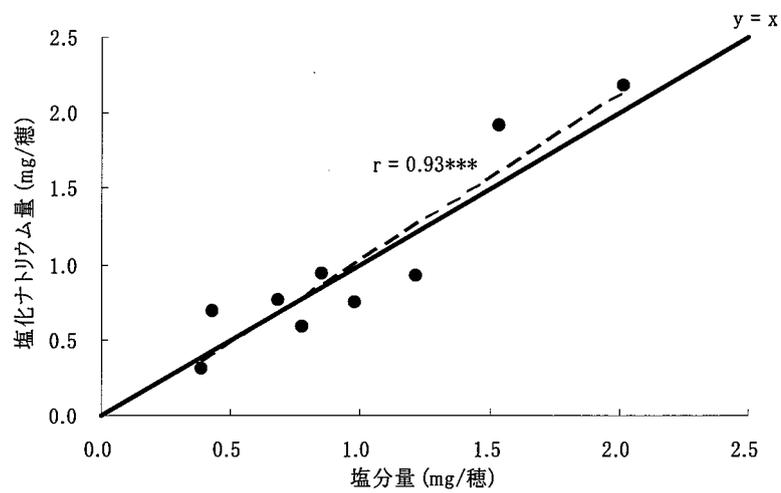
第3-1表 台風15号通過後の籾被害度と海岸線からの最短距離.

地点	籾被害度	海岸線からの最短距離 (km)
1	1.0	9
2	1.0	11
3	1.0	14
4	1.7	6
5	3.7	5
6	4.7	5
7	5.3	2
8	6.3	7
9	7.3	2
参考(山形農研セ)	0.0	80

籾被害度:約10本の穂について少しでも脱色および褐色の発生した籾を被害籾として、総籾数に対する被害籾数割合を達観により10%きざみに分類し、0～10で示した。



第3-1図 EC値と標準溶液中塩化ナトリウム量との関係.
***:0.1%水準で有意(N=7).

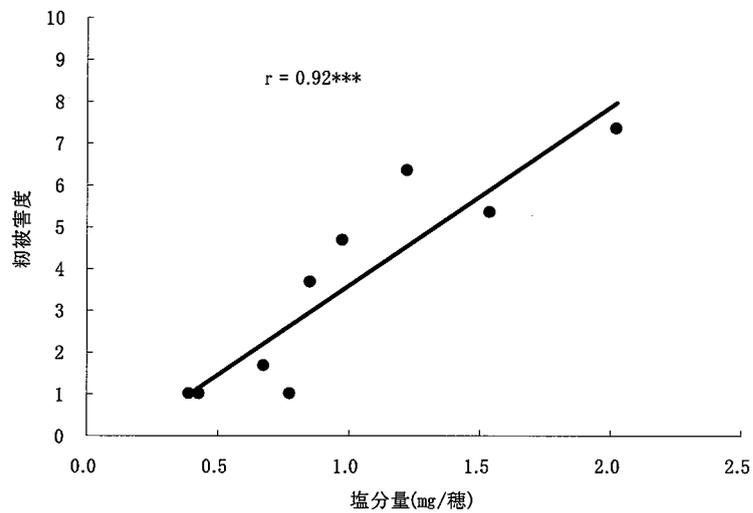


第3-2図 穂の塩分抽出溶液におけるECメーターで求めた塩分量とイオンクロマトグラフィーで定量した塩化ナトリウム量の関係。

***:0.1%水準で有意 (N=9)。

塩分量:穂約10本に脱塩水200mLを加え30分振とう後,そのろ液のEC値とNaCl標準液の検量線により塩分量を算出し穂数で除した。

塩化ナトリウム量:塩分量の測定で用いたろ液をイオンクロマトグラフィーによりNaイオン量を測定し,穂数で除した。



第3-3図 穂に付着した塩分量と穂被害度との関係.

***:0.1%水準で有意(N=9).

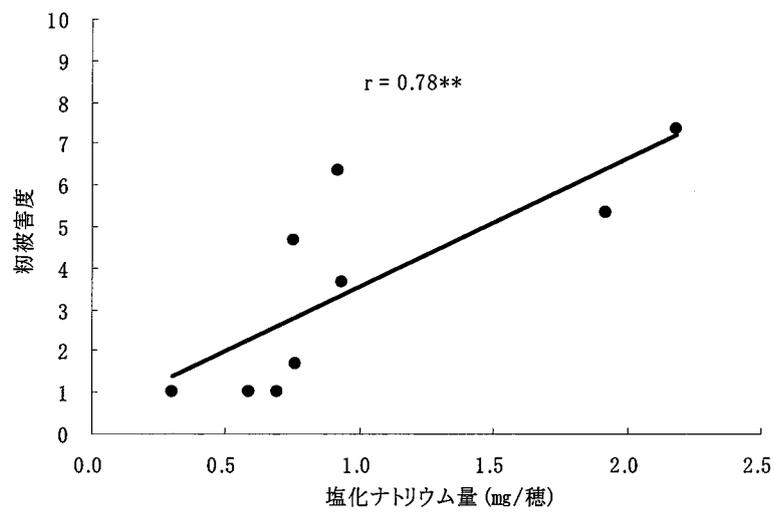
塩分量:穂約10本に脱塩水200mLを加え30分振とう後、そのろ液のEC値とNaCl標準液の検量線より塩分量を算出し穂数で除した.

穂被害度:10本程度の穂について少しでも脱色および褐色の発生した穂を被害穂として、総穂数に対する被害穂数割合を遠観により10%きざみに分類し0~10で示した.

れた（第 3-4 図）。このことから，EC から求めた 1 穂当たり塩分量により潮風害の被害程度の推定が可能であると考えられた。また，稲株を採取したほ場の海岸からの最短距離と EC で測定した穂へ付着した塩分量との関係を第 3-5 図に示した。これによれば，海岸からの最短距離が近いほど，1 穂当たり塩分量が多くなる傾向が認められた（相関係数 $r = 0.90$ ）。この関係は，イオンクロマトグラフィーで求めた同一サンプルの 1 穂当たり塩化ナトリウム量と海岸からの最短距離の関係においても同様の関係（相関係数 $r = 0.83$ ）であった（第 3-6 図）。

3-4 考察

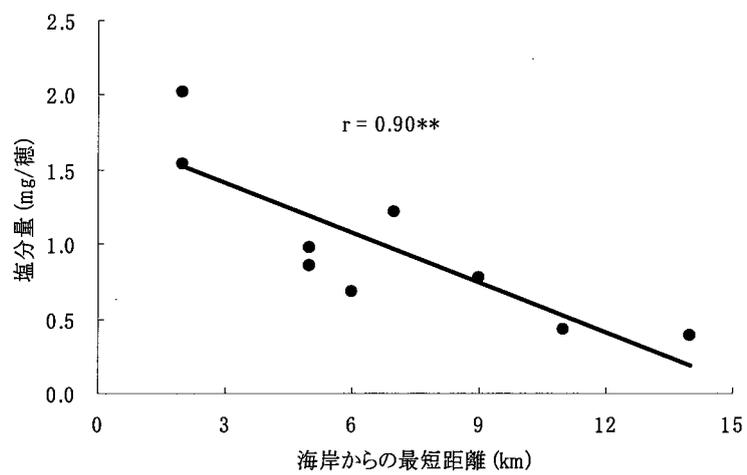
台風に伴う潮風害による水稻の被害程度には，これまで，穂部に付着した塩化ナトリウム量を指標とした報告があり，1 穂当たり塩化ナトリウム量が 1mg 以上になると被害が顕著に現れるとされている。硝酸銀滴定や原子吸光光度，イオンクロマトグラフィーによる塩化ナトリウム量の定量精度は高いが，簡便性・迅速性に欠け，設備の点からも現場における対応は難しい状況にある。そこで，2004 年の台風 15 号によって潮風を受けた水稻の穂部に付着した塩分量の測定に，簡便な方法として土壌溶液中の塩類濃度の測定に用いられている EC 計を利用する方法を試みた結果から EC 測定時に既知濃度の塩化ナトリウム溶液による検量線を用いることにより，穂に付着した塩分量を試験研究機関に限らず普及機関などの現場に近い施設でも，迅速・簡便に把握できると考えられた。また，EC メーターについては機種により測定値の誤差が生じる可能性があるため，測定機ごとに検量線を作成する必要があると考えられた。海水中の塩分濃度は約 3.5% でそのうちの約 80% が塩化ナトリウムであり，残りの 20% には塩化マグネシウム，硫酸マグネシウム，硫酸カルシウム，塩化カリウムが含まれる。穂に付着する塩分の組成が常に変化



第3-4図 穂に付着した塩化ナトリウム量と穂被害度との関係.

** : 1%水準で有意(N=9).

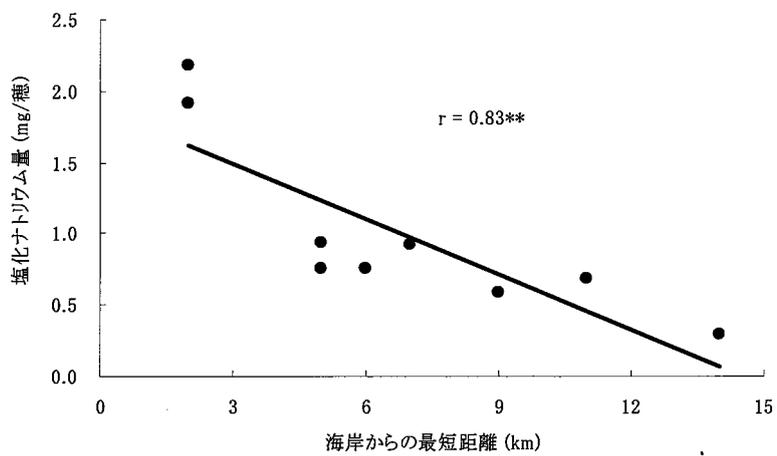
塩化ナトリウム量: 第3図の塩分量の測定に用いたろ液についてイオンクロマトグラフィーによりNaイオン量を測定し、穂数で除した.



第3-5図 海岸からの最短距離と一穂当塩分量との関係。

**：1%水準で有意(N=9)。

塩分量：穂約10本に脱塩水200mlを加え30分振とう後、そのろ液のEC値とNaCl標準液の検量線より塩分量を算出し穂数で除した。



第3-6図 海岸からの最短距離と穂に付着した塩化ナトリウム量との関係。

** : 1%水準で有意(N=9)。

塩化ナトリウム量 : 第5図の塩分量の測定に用いたろ液についてイオンクロマトグラフィーによりNaイオン量を測定し穂数で除した。

しなければ第 3-2 図の相関係数はもっと高くなるはずである。高くならなかった要因として、海水が飛散し穂へ付着するまでに混入した空中に存在する塩類の影響、潮風害により破損した穂の組織から漏出した塩類の影響が考えられる。これについては今後検討する必要があるが、海岸線からの最短距離が近いほど 1 穂当たり塩分量が多くなる傾向が認められ、これまで報告されている結果（山本ら 1993, 山本ら 1995）と同様の関係であった。このことから、EC による迅速かつ簡便な一穂当たり塩分量の測定により、潮風害の各地点の被害程度とともに、被害範囲の推定も可能であると考えられた。

しかし、穂への塩分付着量は海岸からの距離が同じでもこれまでの報告とは異なった。これは、水稻が潮風害を受けたときの風力・風向・標高・海岸線形・防風林の有無などによる影響もあると推察され、今後検討する必要があると考えられた。

3-5 要約

台風に伴う潮風害による水稻の被害程度には、これまで、穂部に付着した塩化ナトリウム量を指標とした報告があり、1 穂当たり塩化ナトリウム量が 1mg 以上になると被害が顕著に現れるとされている。硝酸銀滴定や原子吸光光度、イオンクロマトグラフィーによる塩化ナトリウム量の定量精度は高いが、簡便性・迅速性に欠け、設備の点からも現場における対応は難しい状況にある。そこで、2004 年の台風 15 号によって潮風を受けた水稻の穂部に付着した塩分量の測定に、簡便な方法として土壌溶液中の塩類濃度の測定に用いられている EC 計を利用する方法を試みた。

(1) その結果、既知濃度の塩化ナトリウム溶液と EC 測定値との関係から求めた水稻穂部の塩分量は、イオンクロマトグラフィーで定量した塩化ナトリウム量と近似しており、穂に付着した塩分量を EC によって推定することが可能であると考えられた。

(2) EC から求めた水稻穂部の塩分量が多いほど籾の被害程度は大きく、海岸線からの距離が近いというイオンクロマトグラフィーと同様の関係が示され、EC を利用した簡易診断によって潮風害程度・範囲の把握が可能であることがわかった。

第4章 潮風害の発生機構の解明および減収率の推定

4-1 序論

2004年8月に日本海を通過した台風15号は、日本海側の各地を暴風域に巻きこみ各地に甚大な農業災害を発生させた。2004年の山形県庄内地域における水稻の作況指数は87で、冷害であった1993年（平成5年）の88を下回り過去35年で最低であった。その要因は潮風害である。台風通過時の最高風速が23.5 m/sと強く、10 m以上の西風の継続時間が9時間と長く、最高波高が17 mと高く、降水量が極めて少なく、水稻の生育時期が潮風害に弱い時期であった（藤井ら2006）。潮風害については、塩分付着量と水稻精玄米重との間に負の相関関係が認められることから、塩分が穂に付着することによって減収すると推論されている（山本ら1993, 山本ら1995）。また、出穂期後9～13日に潮風害に遭遇した場合には、千粒重が低下し、くず米が増加したこと、海岸の堤防に近いほど登熟が悪く低収であったこと等が報告されている（陣野ら1962, 土居ら1986, 市丸ら1992）。潮風害のような災害調査は、十分な準備と調査時間が得られない場合が多く、実態を示すにとどまる場合が多い中で、市丸ら（1992）は、1991年の台風17号の潮風害について穂損傷程度（穂軸・枝梗の枯れ程度および籾の脱水・褐変程度の総計値）と1穂塩化ナトリウム量との関係、1穂塩化ナトリウム量と精玄米重および減収率の関係を解析しており、潮風害発生の限界濃度としての1穂塩化ナトリウム量は0.3 mgと推定し、1穂塩化ナトリウム量が1 mgで減収率42%、同2 mgで74%であると指摘している。潮風害が発生した場合、減収率は、現場における共済対応・次年度の種子生産対策などを迅速に進めるための重要な目安となる。これまで、出穂後12～20日頃に潮風害を受けた場合の減収尺度として1953年（昭和28年）のデータを基に枯死枝梗数歩合（全枝梗数に対する

1/2 以上枯死した枝梗数の割合) から作成した尺度が用いられている [農林水産省経済局統計情報部 1982. 夏作減収推定尺度. 8. 潮風害 (3):28-29]. しかし, 現在, 作付け品種 (良食味品種への移行) および肥培管理 (食味を重視した施肥体系の定着) が過去と大きく異なり, 各都道府県においても気象条件・品種特性なども異なることから地域にあった減収率について検討する必要がある. また, 減収率だけでなく被害程度と収量構成要素 (以下, 構成要素) との関係が解析されれば, 潮風害の被害程度別の減収メカニズムが明らかになると考えられる. そこで, 本研究では, 2004 年の台風 15 号が山形県庄内地域を通過後, 潮風害による枝梗枯れ数歩合・登熟状況を追跡調査し, 品種別 (「はえぬき」, 「ササニシキ」, 「ひとめぼれ」, 「コシヒカリ」) に精玄米重・構成要素・品質に及ぼす影響について検討した. 併せて, 品種別の減収率について, 枝梗枯れ数歩合および 1 穂塩化ナトリウム量との関係を検討した.

4-2 材料と方法

(1). 海岸線からの最短距離と 1 穂塩化ナトリウム量との関係式の作成と塩化ナトリウム量の推定

2004 年台風 15 号通過 3 日後の 8 月 23 日に, 山形県庄内地方の北部地域における被害程度の異なる現地ほ場 10 ケ所から, 「はえぬき」を 1 ほ場当たり 3 株採取し, 1 株当たり約 10 穂を 250 mL のポリビンに入れ, 脱塩水 200 mL を加え 30 分振とう後, No. 131 のろ紙でろ過し, ろ液について 0.20 μm メンブランフィルターでろ過した. ろ液について 25 倍に希釈後, イオンクロマトグラフィー (DIONEX DX-500) でナトリウムイオンを定量し, 塩化ナトリウムに換算して, 供試した穂数で除して 1 穂塩化ナトリウム量とした (森ら 2007). 次に, 海岸線からの最短距離と 1 穂塩化ナトリウム量との関係式を作成し 2, 3 で供試した各地点の海岸線からの最短距離から穂に付着し

た塩化ナトリウム量を推定した。

**(2). 「はえぬき」における台風通過後の枝梗枯れ数歩合，登熟歩合，
精玄米粒数歩合**

2004年台風15号通過10日後の8月30日（糊熟期）に，潮風害の被害の顕著であった山形県庄内地方の北部地域において2.5 kmメッシュ単位の40ほ場について枝梗枯れ程度と登熟歩合・精玄米粒数歩合について調査した。枝梗枯れ程度の調査法は，各地区のほ場の西側（潮風害を受けた風向側）から5，10，15，20，25条目の各条から，達観で被害程度が平均的な株を1株ずつ採取し，各株の全長が2番目に長い稈の穂について，合計5穂の平均で示した。1次枝梗についてⅠ健全：青みが有り異常なし，Ⅱ部分白化：枝梗の半分以上が白化または斑に白化，Ⅲ白化：枝梗全体が白化の3つに区分し，全1次枝梗数に対するⅡとⅢの合計1次枝梗数の割合を枝梗枯れ数歩合と表した。なお，被害程度は，枝梗枯れ数歩合90%以上を甚，80%以上90%未満を多，60%以上80%未満を中，40%以上60%未満を少，20%以上40%未満を微，20%未満を無の6段階に分類した。また，8月30日に採取したサンプルについて，登熟歩合は比重1.06 gの塩水による比重選で総粒数に対する塩水に沈降した粒数の割合で示した。精玄米粒数歩合（以下，粒数歩合とする）については籾すり後に1.9 mmの専用網によって篩別した粒数を総粒数に対する割合で示した。

**(3). 品種別の精玄米重，構成要素，品質，玄米タンパク質含有率，
推定枝梗枯れ数歩合および減収率**

潮風害を受けた地域の精玄米重・構成要素の調査には，潮風害の被害が顕著であった山形県庄内地方の北部地域の水稲を供試した。供試点数は，「はえぬき」が16点，「ササニシキ」・「ひとめぼれ」が8点，「コシヒカリ」が4点の合計28点で，対照として潮風害の被

害程度が微であった山形県農業生産技術試験場庄内支場（鶴岡市）の「ササニシキ」・「はえぬき」・「コシヒカリ」も併せて供試し、全体の供試点数は「はえぬき」が 17 点、「ササニシキ」・「ひとめぼれ」が 9 点、「コシヒカリ」が 5 点であった。なお、「ササニシキ」・「ひとめぼれ」は熟期がほぼ同じで供試点数が少ないため 2 品種合わせて解析した。各品種の出穂期は、「はえぬき」が 8 月 3 日～8 日（平均 8 月 5 日）、「ササニシキ」（以下、「ササニシキ」と示す場合「ひとめぼれ」を含む）が 8 月 1 日～4 日（平均 8 月 2 日）、「コシヒカリ」が 8 月 8 日～13 日（平均 8 月 11 日）であった。なお、「ササニシキ」と「コシヒカリ」の枝梗枯れ数歩合については、2. の「はえぬき」において作成した海岸線からの最短距離と枝梗枯れ数歩合との関係式を用い、各供試サンプルの地点までの海岸線からの最短距離から推定した。精玄米重は坪刈（60 株刈）で、構成要素は平均的な 3 株を採取し、 m^2 当たり籾数、千粒重、粒厚分布を常法により調査した。品質は 1.9 mm 以上の玄米（以下、精玄米とする）について品質判定器（サタケ RCQI10B）で調査した。また、玄米タンパク質含有率は精玄米についてケルダール法により定数に乗じて算出した。なお、各品種の減収率を算出するための平年精玄米重および玄米タンパク質含有率の平年値は「ササニシキ」および「はえぬき」では 1994～2002 年（平成 6 年～14 年の 7 ヶ年）、「コシヒカリ」では 2000～2002 年（平成 12～14 年の 3 ヶ年）の現地における平均精玄米重および平均玄米タンパク質含有率を用いた（山形県 21 世紀米づくり日本一推進運動実績書 1994～2002）。

(4). 品種別の被害程度別の登熟歩合

台風 15 号通過 16 日後の 9 月 5 日に調査した。供試サンプルは、3. の品種別の精玄米重を調査したほ場から採取した。供試点数は「ササニシキ」が 8 点、「はえぬき」が 10 点、「コシヒカリ」が 5 点であ

った。登熟歩合は比重 1.06 g の塩水による比重選で総粒数に対する塩水に沈降した粒数の割合で示した。

4-3 結果

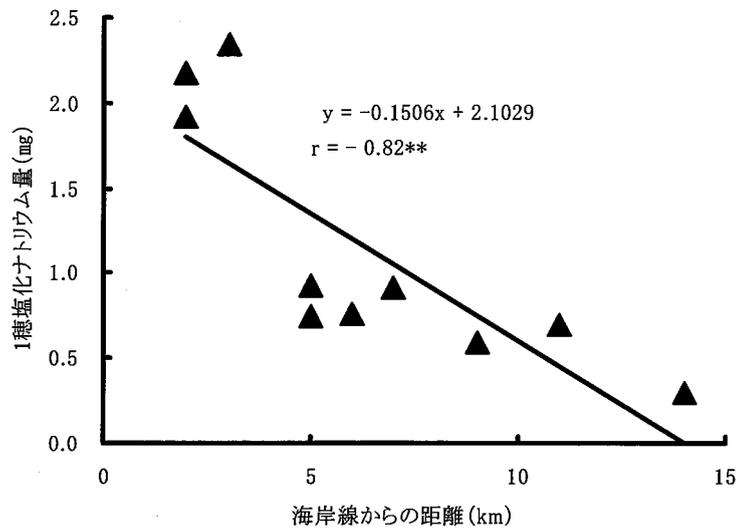
(1). 海岸線からの最短距離と 1 穂塩化ナトリウム量との関係式について

「はえぬき」における海岸線からの最短距離と 1 穂塩化ナトリウム量との関係は、高い負の相関が認められた (第 4-1 図)。

(2). 台風通過後 (8 月 30 日) の「はえぬき」における海岸線からの距離による推定 1 穂塩化ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合との関係、ならびに枝梗枯れ数歩合と登熟歩合および精玄米粒数歩合との関係

枝梗枯れ数歩合は海岸線からの最短距離が遠くなるほど低下する傾向で、海岸線から約 6 km までは枝梗枯れ数歩合は 80% 以上 (被害程度: 多~甚) に、6~10 km では枝梗枯れ数歩合は 50~70% (被害程度: 中) に、10~15 km では 20~40% (被害程度: 少~微) に、15 km 以上では 20% 未満 (被害程度: 無) に分類された (第 4-2 図)。第 4-1 図の関係式から推定した 1 穂塩化ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合との関係は、1 穂塩化ナトリウム量が 1 mg 未満では 1 穂塩化ナトリウム量が多いほど枝梗枯れ数歩合が高くなった (第 4-3 図)。一方、1 穂塩化ナトリウム量が 1 mg 以上になると枝梗枯れ数歩合は概ね 90% 以上で、被害程度の区分では多~甚に相当した (第 4-3 図)。

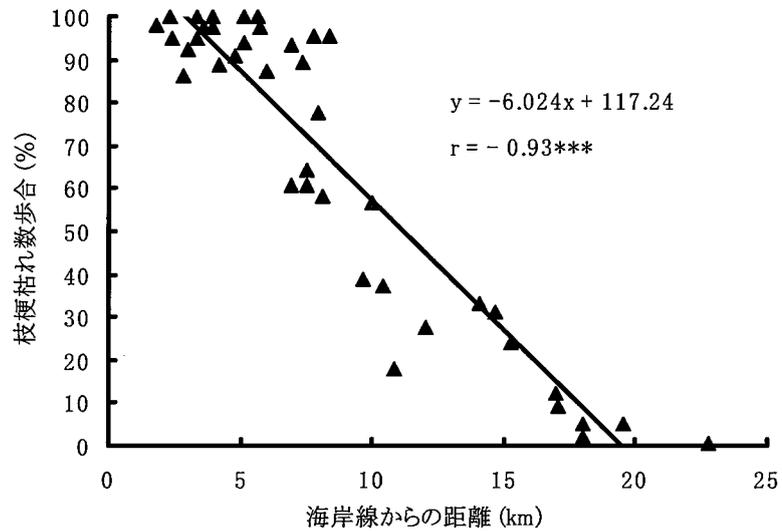
枝梗枯れ数歩合と登熟歩合および粒数歩合との関係は、枝梗枯れ数歩合が高くなると両者ともに低下する傾向であった。枝梗枯れ数歩合が 80% 以上では、登熟歩合は 40% 以下で粒数歩合は 20% 以下であった (第 4-4 図)。なお、供試した「はえぬき」の出穂期は 8 月 3 日~6 日、登熟歩合調査時期は出穂後 24~27 日で、供試サンプルの同一品種間の出穂期および調査時期の差は各品種とも 3 日が最高で、調査時期の登熟ステージはほぼ同一であった。



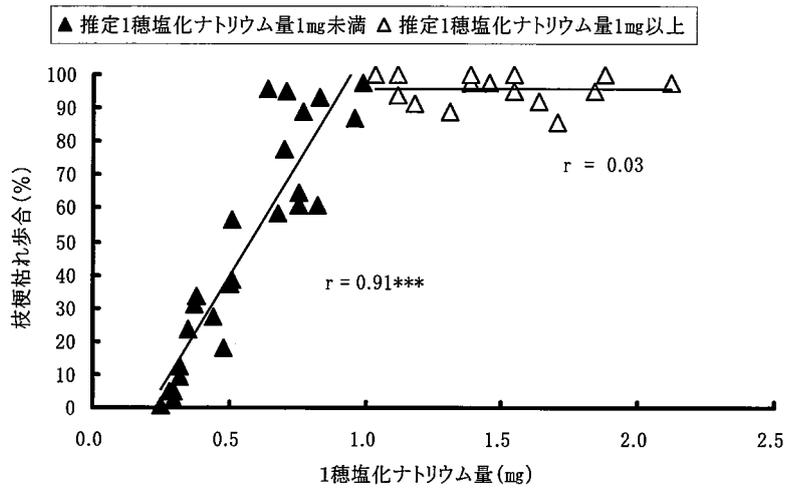
第4-1図 「はえぬき」における海岸線からの距離と1穂当り塩化ナトリウム量との関係(8月23日). **:1%水準で有意(N=10)

海岸線からの距離:海岸線からの最短距離.

1穂塩化ナトリウム量:約10穂/株を脱塩水200 mLに入れて振とう後,ろ過しイオンクロマトグラフィーでナトリウムイオンを定量し,塩化ナトリウム量に換算して穂数で除した.



第4-2図 「はえぬき」における海岸線からの距離と枝梗枯れ数歩合の関係 (8月30日).
 ***:0.1%水準で有意 (N=40)
 海岸線からの距離:海岸線からの最短距離.
 枝梗枯れ数歩合:1次枝梗の総数に対する白化, 部分白化のある1次枝梗数の割合.

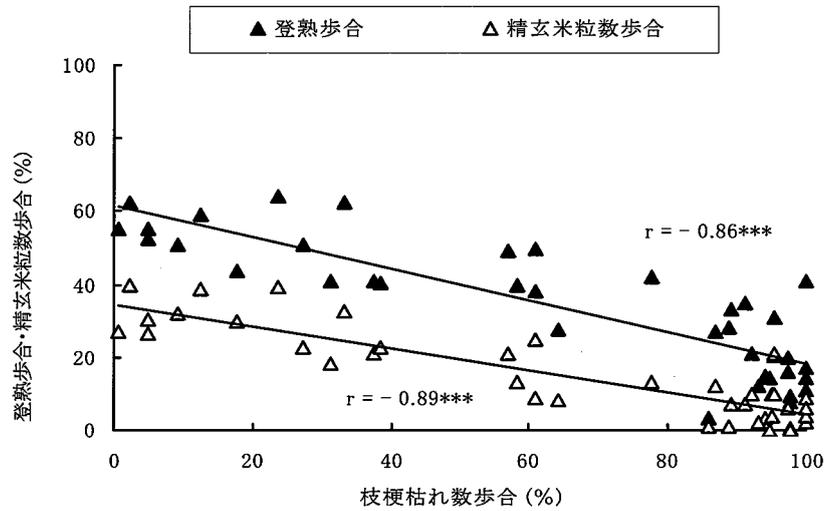


第4-3図 「はえぬき」における推定1穂塩化ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合との関係(8月30日).

***:0.1%水準で有意(▲, N=25;N=40のうち, 推定1穂塩化ナトリウム量1mg未満の25点について)

1穂塩化ナトリウム量:海岸線からの距離と1穂塩化ナトリウム量との関係式より, 海岸線の距離から算出した.

枝梗枯れ数歩合:1次枝梗の総数に対する白化, 部分白化のある1次枝梗数の割合.



第4-4図 「はえぬき」における枝梗枯れ数歩合と登熟歩合・精玄米粒数歩合との関係(8月30日). ***:0.1%水準で有意(N=40)

枝梗枯れ数歩合:1次枝梗の総数に対する, 白化, 部分白化のある1次枝梗数の割合.

登熟歩合:比重1.06の塩水による比重選で, 総籾数に対する塩水に沈降した籾数の割合.

精玄米粒数歩合:総籾数に対する, 粒厚1.9 mm以上の玄米(精玄米)の粒数の割合.

(3). 品種別および被害程度別（枝梗枯れ数歩合別）の精玄米重，構成要素，品質，玄米タンパク質含有率

「はえぬき」，「ササニシキ」，および「コシヒカリ」の各品種とも被害程度に対応して精玄米重が低下し屑米が増加する傾向であった。精玄米重の平均値は，「ササニシキ」458 kg/10a（平年比 82），「はえぬき」385 kg/10a（平年比 66），「コシヒカリ」285 kg/10a（平年比 54）の順であった。被害程度が多～甚での精玄米重は，「ササニシキ」406 kg/10a（平年比 73），「はえぬき」254 kg/10a（平年比 43），「コシヒカリ」241 kg/10a（平年比 46）となり，「はえぬき」・「コシヒカリ」で低収であった。屑米は，被害程度が高くなると増加し，「はえぬき」と「コシヒカリ」では顕著で，「はえぬき」では甚が180 kg/10a（平年比 305），多が119 kg/10a（平年比 202），中が115 kg/10a（平年比 195），少が101 kg/10a（平年比 171），微が66 kg/10a（平年比 112），「コシヒカリ」では甚が239 kg/10a（平年比 498），多が185 kg/10a（平年比 385），少114 kg/10a（平年比 217）であった（第4-1表，第4-2表，第4-3表）。

精玄米重と構成要素など（ m^2 籾数，千粒重，粒厚分布，屑米重）との相関関係をみると，精玄米重との相関関係の高い要素としては，屑米重，1.9 mm 以上粒厚歩合で，次が千粒重であり，逆に相関関係の低い要素は m^2 籾数であった（第4-1表，第4-2表，第4-3表）。

さらに，品質を示す整粒歩合も各品種とも被害程度が高くなると低下する傾向であった。特に，被害程度が甚では，各品種とも整粒歩合が58～63%で低い値であった（第4-1表，第4-2表，第4-3表）。一方，玄米タンパク質含有率の平均値は，被害程度が高くなると高まる傾向が認められ，被害程度が甚では，「ササニシキ」が8.2%，「はえぬき」が8.2%，「コシヒカリ」が8.4%といずれの品種も8%以上であり，平年の玄米タンパク質含有率より0.5～0.7%高い値で

第4-1表 「ササニシキ」・「ひとめぼれ」における被害程度別の推定塩化ナトリウム量、精玄米重、減収率、屑米重、千粒重、粒厚分布、 m^2 あたり初数、玄米タンパク質含有率、整粒歩合および未熟粒歩合。

被害程度	推定NaCl量 (kg/10a)	精玄米重 (kg/10a)	減収率 (%)	屑米重 (kg/10a)	千粒重 (g)	粒厚分布(重量%)							m^2 初数	玄米タンパク質含有率 (%)	整粒歩合 (%)	未熟粒歩合 (%)
						1.9以上	2.0以上	1.9以下	1.9~1.8	1.8~1.7	1.7以下					
無	0.40	588	0	28	22.1	94.3	75.9	5.7	3.1	1.2	1.4	35300	7.7	80.3	15.6	
少	0.50	509	9	55	22.0	84.3	57.0	15.7	7.0	3.2	5.5	37800	7.6	78.7	18.8	
	0.40	511	8	77	22.2	85.1	62.9	14.9	7.2	3.0	4.7	32400	7.1	69.7	25.5	
中	0.70	485	13	81	22.0	83.7	54.0	16.3	8.5	3.2	4.6	29590	7.4	77.5	20.2	
多	0.81	422	24	73	21.6	85.4	52.4	14.6	9.8	2.9	1.9	33450	7.8	72.3	26.0	
	0.88	462	17	65	21.6	86.2	57.3	13.8	9.2	2.5	2.1	28450	7.8	56.7	38.6	
甚	1.30	397	29	142	21.7	70.4	35.9	29.6	14.9	5.9	8.8	35690	8.2	68.2	30.2	
	1.37	386	31	145	22.0	67.7	34.4	32.3	17.1	6.7	8.5	40270	7.8	67.7	31.2	
平均	1.41	361	35	101	22.0	74.5	49.5	25.5	11.7	5.9	7.9	32600	8.7	54.2	41.3	
年平均値	0.86	458	18	85	21.9	81.3	53.3	18.7	9.8	3.8	5.0	33950	7.8	69.5	27.5	
年間係数	-0.93***			-0.82**	0.42	0.86**	0.87**	-0.86**				-0.12	-0.69*	0.68*	-0.78*	

相関係数: 精玄米重との相関係数. ***: 0.1%水準で有意, **: 1%水準で有意, *: 5%水準で有意, すべて $N=9$.
 被害程度: 推定被害歩合が90%以上で甚, 80%以上90%未満で多, 60%以上80%未満で中, 40%以上60%未満で少, 20%以上40%未満で微, 20%未満で無と示した.
 推定塩化ナトリウム量: 海岸線からの距離と種塩化ナトリウム量との関係式より, 各ササニシキ地方の海岸線からの距離から算出した.
 精玄米重: 粒厚1.9 mm以上の玄米の重量, 屑米重: 粒厚1.9 mm未満の玄米重, 千粒重: 粒厚1.9 mm以上の千粒重.
 減収率: 精玄米重の年平均値に対する精玄米重の減収割合を算出した.
 年平均値: 1994~2002年の平均値を山形県21世紀米づくり日本一推進運動実行書より算出した.
 粒厚分布: 玄米の粒厚別の重量割合.
 玄米タンパク質含有率: 粒厚1.9 mm以上の玄米について、ケルダール法により定数を乗じて算出した.
 整粒歩合および未熟粒歩合: 粒厚1.9 mm以上の玄米の、品質判定器(サタケRCQ110B)による測定値を示した.
 出穂期: 8月1日~5日.

第4-2表 「はえぬき」における被害程度別の推定塩化ナトリウム量、精玄米量、減収率、屑米量、千粒重、粒厚分布、 m^2 あたり粒数、玄米タンパク質含有率、整粒歩合および未熟粒歩合。

被害程度	推定NaCl量 (mg)	精玄米量 (kg/10a)	減収率 (kg/10a)	屑米量 (kg/10a)	千粒重 (g)	粒厚分布(重量%)						千粒数	玄米 整粒歩合 (%)	未熟粒歩合 (%)	
						1.9以上	2.0以上	1.9以下	1.9~1.8	1.8~1.7	1.7以下				
無	0.3	569	3	50	22.6	89.1	64.6	10.9	6.5	2.3	2.3	31100	8.0	82.1	12.1
微	0.4	502	14	58	22.7	90.5	66.8	9.5	5.5	2.0	2.0	23050	8.1	79.0	18.4
	0.39	547	6	73	22.2	86.0	62.1	14.0	7.2	2.8	4.0	39600	8.0	83.9	12.8
少	0.4	511	13	96	22.2	89.4	60.5	10.6	7.2	2.1	1.3	38170	8.1	82.9	28.7
	0.4	481	18	134	21.6	74.3	39.3	25.7	11.7	4.9	9.1	34460	7.8	86.1	12.1
	0.47	483	17	74	22.5	88.4	64.0	11.6	6.4	2.7	2.5	33330	8.1	85.4	13.3
中	0.6	359	39	91	22.0	92.2	71.5	7.8	4.4	1.5	1.9	30060	7.2	78.2	19.5
	0.69	516	12	75	22.0	85.4	53.4	14.6	8.8	2.8	3.0	32530	7.5	75.9	19.6
	0.57	430	26	144	21.7	90.0	63.8	10.7	6.5	1.8	2.4	31000	8.7	76.0	22.9
	0.94	390	33	150	21.1	72.2	45.6	27.8	14.1	8.2	5.5	32520	7.8	72.1	23.1
多	0.81	445	24	89	21.5	80.2	50.2	19.8	10.7	3.7	5.4	31750	7.6	82.1	35.8
	1.04	268	54	149	20.9	64.4	34.8	35.6	17.6	10.8	7.2	32500	8.1	68.1	31.2
甚	1.42	181	69	181	21.6	47.2	16.1	52.8	28.0	12.2	12.6	30240	7.9	66.4	29.9
	1.55	201	66	168	21.4	55.4	18.4	44.6	24.4	10.2	10.0	38750	8.1	52.8	44.6
	1.42	265	55	149	21.5	63.4	24.1	36.6	22.0	7.7	6.9	28080	8.3	66.5	26.9
	1.67	175	70	235	20.0	42.8	20.9	57.2	20.5	21.0	15.7	31500	8.2	58.2	43.1
平均	1.43	221	62	165	21.1	48.3	19.1	51.7	20.5	18.7	12.5	31600	8.4	62.1	41.2
平年値	0.95	385	34	122	22.4	74.1	45.6	28.0	13.1	6.8	6.1	32367	8.0	71.6	25.6
相関係数	-0.95***	584	59	59	22.4	92.1	78.1	7.9				31800	7.8		
					-0.88***	0.76***	0.90***	0.86***	-0.90***			0.11	-0.23	0.73***	-0.79***

相関係数: 精玄米量との相関係数。***: 0.1%水準で有意。**: 1%水準で有意。*: 5%水準で有意。すべて $n=17$ 。
 被害程度: 推定収獲量歩合が90%以上で甚、80%以上90%未満で多、60%以上80%未満で中、40%以上60%未満で少、20%以上40%未満で微、20%未満で無と示した。
 推定塩化ナトリウム量: 海岸線からの距離と推定塩化ナトリウム量との関係式より、各サンプル地点の海岸線からの距離から算出した。
 精玄米量: 粒厚1.9 mm以上の玄米の重量、屑米量: 粒厚1.9 mm未満の玄米量、千粒重: 粒厚1.9 mm以上の千粒重。
 減収率: 精玄米量の平年値に対する精玄米量の減収割合を算出した。
 平年値: 1994~2002年の平均値を山形県21世紀米づくり日本一推進運動実態調査より算出した。
 粒厚分布: 玄米の粒厚別の重量割合。
 玄米タンパク質含有率: 粒厚1.9 mm以上の玄米について、カルダール法により定数を乗じて算出した。
 整粒歩合および未熟粒歩合: 粒厚1.9 mm以上の玄米の、品質判定器(サテラRCQ10B)による測定値を示した。
 出穂期: 8月2日~8日。

第4-3表 「コンヒカリ」における被害程度別の推定塩化ナトリウム量、精玄米重、減収率、屑米重、千粒重、粒厚分布、 m あたりの粒数、玄米タンパク質含有率、整粒歩合および未熟粒歩合。

被害程度	推定NaCl量 (mg)	精玄米重 (kg/10a)	減収率 (%)	屑米重 (kg/10a)	千粒重 (g)	粒厚分布(重量%)					m粒数	玄米タンパク質含有率 (%)	整粒歩合 (%)	未熟粒歩合 (%)	
						1.9以上	2.0以上	1.9以下	1.9~1.8	1.8~1.7					1.7以下
少	0.40	459	12	114	21.9	80.5	41.5	19.5	11.8	3.6	4.1	27900	7.7	74.2	24.1
多	0.95	281	46	185	21.0	51.7	11.6	48.3	28.0	10.2	10.1	32770	7.7	72.2	26.7
甚	1.20	191	64	257	20.3	33.0	6.2	67.0	27.7	14.4	24.9	34190	8.4	48.4	48.9
	1.30	260	50	290	21.0	45.6	8.6	54.4	30.8	13.1	10.5	22100	8.6	45.5	52.8
	1.20	233	56	171	21.6	53.0	20.2	47.0	18.5	10.3	18.2	38470	8.3	78.9	20.1
平均	1.01	285	46	203	21.2	52.8	17.6	47.2	23.4	10.3	13.6	31086	8.1	63.8	34.5
平年値		524		48	22	91.1	62.7	8.9				27800	7.7		
相関係数	-0.94*			-0.73	0.75	0.96*	0.90*	-0.96*				-0.39	-0.7	0.45	-0.46

相関係数:精玄米重との相関係数。*:5%水準で有意,すべ $rN=5$ 。

被害程度:推定枝梗粒数歩合が90%以上で甚,80%以上90%未満で多,60%以上80%未満で中,40%以上60%未満で少,20%以上40%未満で微,20%未満で無と示した。

推定塩化ナトリウム量:海岸線からの距離と穂塩化ナトリウム量との関係式より,各サンプル地点の海岸線からの距離から算出した。

精玄米重:粒厚1.9 mm以上の玄米の重量。屑米重:粒厚1.9 mm未満の玄米重。千粒重:粒厚1.9 mm以上の千粒重。

減収率:精玄米重の平均値に対する精玄米重の減収割合を算出した。

平年値:2000~2002年の平均値を山形県21世紀米づくり日本一推進運動実績書より算出した。

粒厚分布:玄米の粒厚別の重量割合。

玄米タンパク質含有率:粒厚1.9 mm以上の玄米について、ケルダール法により定数を乗じて算出した。

整粒歩合および未熟粒歩合:粒厚1.9 mm以上の玄米の、品質判定器(サタRCQ10B)による測定値を示した。

出穂期:8月8日~13日。

あった（第 4-1 表，第 4-2 表，第 4-3 表）。

(4). 推定 1 穂塩化ナトリウム量および推定枝梗枯れ数歩合と減収率との関係

2004 年の台風 15 号により発生した潮風害の場合、「はえぬき」の関係式（第 4-1 図，第 4-2 図）から推定した各品種の推定 1 穂塩化ナトリウム量および推定枝梗枯れ数歩合が高まるほど，減収率が高まった（第 4-5 図，第 4-6 図）。同じ推定 1 穂塩化ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合で減収率を品種別にみると「コシヒカリ」および「はえぬき」が「ササニシキ」に比べて高くなる傾向で，「ササニシキ」，「はえぬき」および「コシヒカリ」で関係式が異なった（第 4-5 図，第 4-6 図）。被害程度別の減収率は，被害程度の平均値が中では，「ササニシキ」が 13% に対して「はえぬき」が 27%，多では，「ササニシキ」が 21% に対して「はえぬき」が 39% であった（第 4-4 表）。また，1953 年（昭和 28 年）のデータで作成された枯死枝梗歩合と減収率との関係と，2004 年台風 15 号による潮風害での各品種の枝梗枯れ数歩合と減収率との関係を比較すると，「はえぬき」および「コシヒカリ」の関係式は近似しているが，「ササニシキ」の関係式は異なった（第 4-6 図）。

4-4 考察

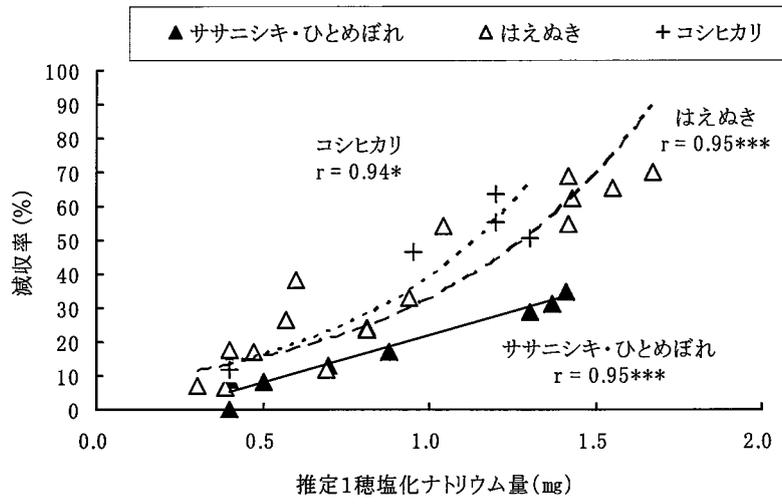
潮風による枝梗枯れ（籾枯れ）は日数の経過とともに進展し，葉身の被害状況の進展は 11 日程度までとの報告がある（山本ら 1972）ことから，枝梗枯れ数歩合および登熟歩合の調査の供試材料を 2004 年台風 15 号通過 10 日後の 8 月 30 日に採取した。また，精度を高めるため，台風通過後ほとんど降雨がない時点で 1 穂塩化ナトリウム定量のための供試材料を採取した。供試材料を採取したほ場の出穂期は品種毎にほぼ同一であることから，サンプリング時の生育ステージもほぼ同一であった。

第4-4表 「はえぬき」, 「ササニシキ」・「ひとめぼれ」,
「コシヒカリ」の被害程度と減収率.

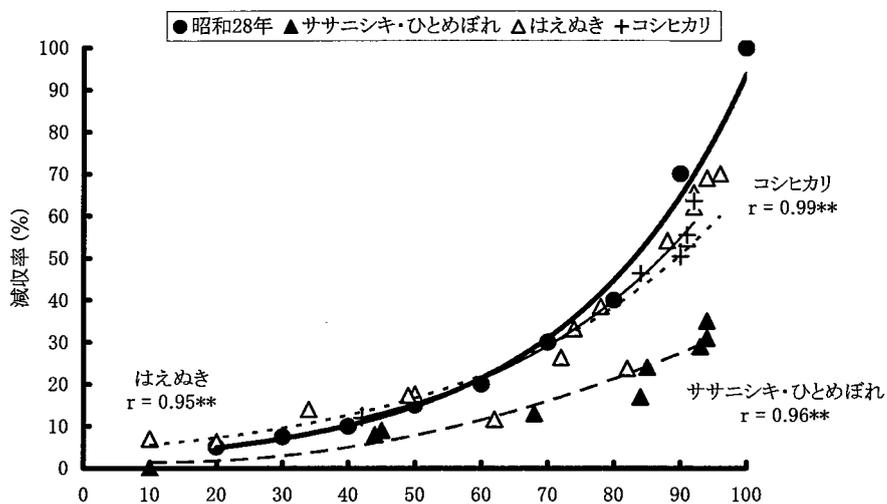
被害程度	はえぬき	減収率 (%)	
		ササニシキ・ ひとめぼれ	コシヒカリ
無	3(3)		
微	6~14(10)		
少	13~18(16)	9(9)	12
中	12~39(27)	13(13)	
多	24~54(39)	17~24(21)	45
甚	55~70(64)	29~35(32)	50~64(56)

被害程度: 推定枝梗枯れ数歩合が90%以上で甚, 80%以上90%未満で多, 60%以上80%未満で中, 40%以上60%未満で少, 20%以上40%未満で微, 20%未満で無と示した.

減収率: 精玄米重の平年値に対する精玄米重の減収割合を算出した. 表中()内は平均値.



第4-5図 推定1穂塩化ナトリウム量と減収率との関係。
 *:5%, ***:0.1%水準で有意
 (ササニシキ・ひとめぼれ:N=9, はえぬき:N=17, コシヒカリ:N=5)
 推定1穂塩化ナトリウム量:海岸線からの距離と1穂塩化ナトリウムとの関係式より, 海岸線からの距離から算出。
 減収率:精玄米重の平均値に対する精玄米重の減収割合。

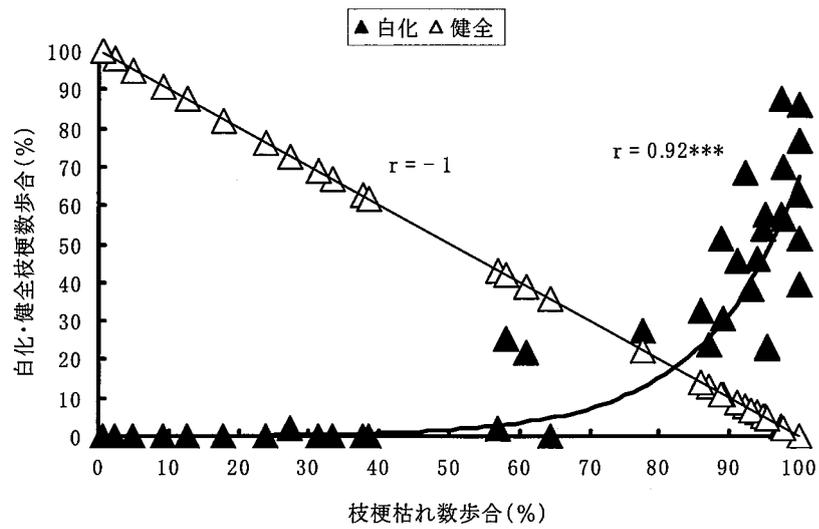


推定枝梗枯れ数歩合 (%)
 第4-6図 推定枝梗枯れ数歩合と減収率との関係。
 **:1%水準で有意

(ササニシキ・ひとめぼれ:N=9, はえぬき:N=17, コシヒカリ:N=5)

枝梗枯れ数歩合:1953年(昭和28年)は全枝梗数に対する1/2以上が枯れている枝梗数の割合。2004年は8月30日採取のサンプルにおける1次枝梗の総数に対する、白化、部分白化のある1次枝梗数の割合と海岸線からの最短距離との関係式を求め、関係式に減収率を求めたサンプルの地点距離を代入して算出した。
 減収率:精玄米重の平年値に対する2004年の各供試サンプルの精玄米重の減収割合。

2004年台風15号による潮風害は過去の報告（市丸ら1992）と同様に海岸からの距離と1穂塩化ナトリウム量に負の相関関係が認められ（第4-1図）、1穂塩化ナトリウム量が1mgおよび0.5mgになる海岸からの距離はそれぞれ5kmおよび12kmであった。一方、市丸ら（1992）の報告では、1穂塩化ナトリウム量が1mgおよび0.5mgになる海岸からの距離はそれぞれ2kmおよび3kmであり、2004年台風15号の方が内陸部まで飛塩したことを示している。本研究の供試地域である庄内地方北部は、特に大きな被害を受けた地域で、海塩粒子の飛散を起こした風向である南西方向の海岸線付近の標高が、庄内地方南部で100m以上であるのに比べて北部では30m以下と低かった。このことから、海上の風速が同じでも海岸線の標高が低い庄内北部では南部に比べて、内陸部まで海塩粒子が飛散しやすい条件だったと考えられる（柴田ら2009）。枝梗枯れ数歩合と海岸線の最短距離とは負の相関関係（第4-2図）、1穂塩化ナトリウム量とは正の相関関係（第4-3図）が認められ、枝梗で評価するか籾で評価するかの違いはあるが、過去の報告と同様であった（市丸ら1992、土居ら1986、前田ら1992、山本ら1993、山本ら1995）。枝梗の被害程度の内訳を細分して、白化の1次枝梗数のみを全1次枝梗数に対する割合で示した白化枝梗数歩合ならびに、健全な1次枝梗数のみを全1次枝梗数に対する割合で示した健全枝梗数歩合と、枝梗枯れ数歩合との関係をみると枝梗枯れ数歩合80%以上（被害程度多～甚）では枝梗枯れ（部分白化と白化）に占める白化の割合が多く、枝梗枯れ数歩合20%以上40%未満（被害程度微～少）では枝梗枯れに占める白化の割合はほとんどなく、大部分が部分白化と健全であり、枝梗枯れ数歩合の程度によって白化と部分白化の占める割合が異なった（第4-7図）。また、枝梗枯れ数歩合と登熟歩合および精玄米粒数歩合にも負の相関がみられた（第4-4図）。このように、枝



第4-7図 枝梗枯れ数歩合と白化・健全枝梗歩合との関係(8月30日).

***:0.1%水準で有意(N=40).

枝梗枯れ数歩合:1次枝梗の総数に対する,全白化・部分白化のある1次枝梗数の割合.

白化枝梗数歩合:1次枝梗の総数に対する,全白化の1次枝梗数の割合.

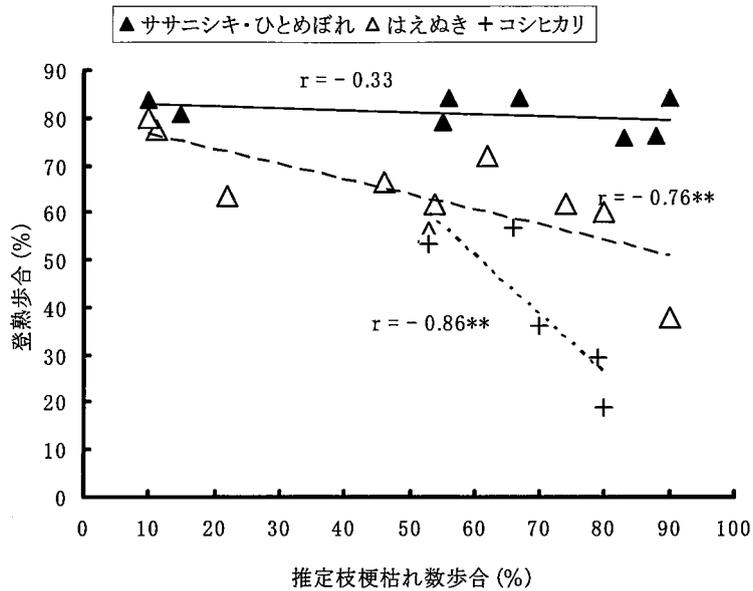
健全枝梗数歩合:1次枝梗の総数に対する,健全な1次枝梗数の割合.

梗の白化の程度を全白化と部分白化に分けて評価することは潮風害による枝梗枯れの被害程度の大小を把握するうえで重要であると考えられる。

現在、一般的に出穂後12～20日頃に潮風害に遭遇した場合は1982年に農水産省統計情報部で示した枯死枝梗数歩合による減収尺度が用いられている（農林水産省経済局統計情報部1982. 夏作減収推定尺度. 潮風害(3):28-29). また、潮風害による減収率については、水稻の生育ステージ（出穂後4～15日）の範囲で、1穂塩化ナトリウム量および穂の損傷程度と減収率との関係を明らかにした報告がある（市丸ら1992). 被害程度別の1穂当たりの推定塩化ナトリウム量の平均値を品種毎にみると、被害程度少では「ササニシキ」で0.45 mg, 「はえぬき」で0.42 mg, 「コシヒカリ」で0.40 mg, 中では「ササニシキ」で0.70 mg, 「はえぬき」で0.70 mg, 多では「ササニシキ」で0.85 mg, 「はえぬき」で0.93 mg, 「コシヒカリ」で0.95 mg, 甚では「ササニシキ」で1.36 mg, 「はえぬき」で1.50 mg, 「コシヒカリ」で1.23 mgと同じ傾向であった。しかし、精玄米重の平均値は「ササニシキ」458 kg/10a（平年比82）, 「はえぬき」384 kg/10a（平年比66）, 「コシヒカリ」258 kg/10a（平年比54）で、被害程度の大きい甚～多では、「ササニシキ」406 kg/10a（平年比73）, 「はえぬき」254 kg/10a（平年比43）, 「コシヒカリ」241 kg/10a（平年比47）となり潮風害による減収率は、穂に付着した塩分量が同じでも各品種で異なった（第4-1表, 第4-2表, 第4-3表）。2004年台風15号襲来時の出穂後日数は「ササニシキ」が出穂後15日～18日, 「はえぬき」が出穂後12日～17日, 「コシヒカリ」が出穂後7～11日で乳熟期～糊熟期に相当し、その中で「ササニシキ」と「はえぬき」は台風襲来時の出穂後日数がほぼ同じであったことから、ほぼ同じような減収率になると考えられたが、実際の精玄米重の平

均値は「ササニシキ」が「はえぬき」より重かった。このことから、各品種の減収率の違いを、台風襲来時の出穂後日数の違い、1穂塩化ナトリウム量の違いおよび枝梗枯れ数歩合の違いからは説明し難かった。潮風害の品種間差については、登熟期の初期に潮風害にあった場合に登熟歩合への影響が強く、登熟の進んでいた水稻では影響が少なかったと報告されている（前田ら 1992, 土居ら 1986）。庄内支場における登熟歩合（台風襲来時 8月 20日）をみると、「ササニシキ」（出穂期 8月 1日）が 35%、「はえぬき」（出穂期 8月 3日）が 13%であった。このことから、減収率の式が品種ごとに異なった要因として、台風襲来時における登熟歩合による影響が考えられたため、台風襲来後 16日経過した 9月 5日における品種毎の被害程度別サンプルについて登熟歩合を調査し、8月 30日の推定枝梗枯れ数歩合と登熟歩合との関係を検討した。「ササニシキ」・「ひとめぼれ」では推定枝梗枯れ数歩合に係わらず 80%前後の登熟歩合であったのに対して、「はえぬき」と「コシヒカリ」の登熟歩合は「ササニシキ」よりも低いとともに、枝梗枯れ数歩合に対応して低下する傾向が認められた（第 4-8 図）。このことから、適応する減収尺度を選択する要素として、台風襲来時の登熟歩合も大きな要素であると考えられた。つまり、枝梗枯れ数歩合が同じだとしても台風襲来時の登熟歩合が低いほど、台風通過後の登熟歩合の高まりは小さくなり減収すると考えられる。また、減収率に大きく関係する 1穂塩化ナトリウム量は、台風通過後、降雨がない条件でないと（降雨があると穂へ付着した塩が洗い流されるため）精度の高い減収尺度の推定には利用できないと考えられる。この点については、今後の課題として検討を要する。

精玄米重に対する各要素の影響については、千粒重、屑米重、粒厚（1.9 mm 以上）分布など登熟に関係する要素で相関係数が高く、通



第4-8図 推定枝梗枯れ数歩合と登熟歩合(9月5日)との関係。

** : 1%水準で有意。

(ササニシキ・ひとめぼれ N=8, はえぬき N=10, コシヒカリ N=5)

推定枝梗枯れ数歩合: 8月30日の調査での枝梗枯れ数歩合と海岸線からの最短距離との関係式から推定した。

登熟歩合: 比重1.06の塩水による比重選で、総籾数に対する塩水に沈降した籾数の割合。

常，精玄米重との相関が高い m^2 籾数との関係は認められないことも潮風害の大きな特徴と考えられた。これは，潮風害に限らず籾数が決定した後の登熟期に遭遇した気象災害であるため，登熟を制限する要因が登熟期以降に変動する要因に左右されると考えられる。また，食味を左右する玄米中タンパク質含有率は，被害程度が大きいほど千粒重が低下して窒素濃度が高まるため，増加する傾向が認められた（第 4-1 表，第 4-2 表，第 4-3 表）。以上から，潮風害による精玄米重低下のメカニズムは塩分が穂へ付着して枝梗枯れが発生し（1 穂塩化ナトリウム量によって白化割合が高くなる），そのことによって登熟が停滞し，屑米が増加し精玄米重が低下するという一連の流れであることが確認された。本報告では，「はえぬき」で作成した関係式を用いて「ササニシキ」「コシヒカリ」などの他の品種の枝梗枯れ数歩合を推定して考察したが，今後は品種による耐塩性（潮風害）についても検討する必要がある。

4-5 要約

山形県庄内地域で発生した 2004 年台風 15 号の潮風害による水稻の枝梗枯れ・登熟状況を品種別に調査し，精玄米重・品質に及ぼす影響，および減収メカニズムを検討した。

(1) 枝梗枯れ数歩合は，1 穂塩化ナトリウム量が 1mg までは塩化ナトリウム量が多いほど高くなり，1 穂塩化ナトリウム量が 1mg 以上では枝梗枯れ数歩合は概ね 80% 以上であった。

(2) 登熟歩合と整粒歩合は各品種とも枝梗枯れ数歩合が高いほど低下した。玄米タンパク質含有率は，枝梗枯れ数歩合が高くなると高まる傾向であった。精玄米重は枝梗枯れ数歩合が高いほど低下し屑米重が増加する傾向で，「ササニシキ」・「ひとめぼれ」（平年比 82），「はえぬき」（平年比 66），「コシヒカリ」（平年比 54）の順であった。

(3) 精玄米重との相関係数の高い要素としては，屑米重，1.9mm 以上

粒厚歩合で、逆に低い要素は m^2 籾数であった。

(4)潮風害による精玄米重の低下のメカニズムは、塩分が穂へ付着して枝梗枯れが発生し、登熟歩合が低くなり屑米重が増加し、精玄米重が低下するという一連の流れになることが確認された。

(5)精玄米重と枝梗枯れ数歩合との関係から減収率の推定を試みた。同じ枝梗枯れ数歩合でも減収率は、「はえぬき」が「ササニシキ」・「ひとめぼれ」に比べて高くなる傾向であり関係式が2本になった。この要因としては、台風襲来時における出穂後日数よりも登熟歩合に大きく左右された結果であると考えられた。

第5章 圃場レベルにおける潮風害の再現方法の開発

5-1 序論

これまで、潮風害については、1961年の第2室戸台風（九州地方）（陣野ら 1962, 中路ら 1962）、1985年の台風13号（九州地方）（土居ら 1986）、1987年の台風12号（北海道地方）（北海道道南農試 1987）、1991年の台風17号（市丸ら 1992, 前田ら 1992, 山本ら 1993, 山本ら 1995）および台風19号（山本ら 1993, 山本ら 1995）（九州地方）、2004年の台風15号（東北地方）（藤井ら 2006, 森ら 2008）の報告があり、最近では2006年の台風13号に伴う潮風害により九州地方で甚大な被害を受けた。水稻における潮風害は、台風により飛散した海塩粒子が穂部に付着することによって起こる。穂部への塩分付着量が多いほど精玄米重が低下し（山本ら 1993, 山本ら 1995, 森ら 2008）、海岸線に近いほど登熟が悪く低収であったことが報告されている（陣野ら 1962, 土居ら 1986, 市丸ら 1992）。気象災害の一つである潮風害については、災害調査として、十分な調査準備と調査時間が得られない状況の中で実態を示した報告がほとんどである。

潮風害は広義では塩害に含まれると考えるが、潮風害では植物体に塩分が付着した部分およびその周辺細胞が被害を受ける局所的発生であるのに対し、塩害では根から塩分が吸収されることにより植物体内の細胞全体が被害を受ける（以下、塩害は根から吸収される害を示す）。つまり、塩分の体内への侵入部が地上部である点と侵入範囲が部分的である点が塩害と異なる。塩害の条件は比較的容易に設定可能であるため多くの報告がある。水稻の塩害では、生育阻害程度と地上部ナトリウム濃度との間に正の相関があり、地上部へのナトリウム塩の集積が生育障害をもたらす（山内ら 1989）。また、塩害下では籾殻の蒸散を抑制する役割を果たすクチクラ・シリカ二

重層へのケイ素沈着量が低下し、過剰散が起こり白穂が発生すると報告されている (Tsuda ら 2000)。これらの報告から、潮風害においても海水中の塩に含まれるナトリウムイオンによって塩害と同様の生育障害を部分的に起こしているものと推察される。

一方、実際に台風に伴う潮風害を受けた時の実態解析にあるような、穂部への塩分付着量と収量および品質との関係については人為的に潮風害を再現した報告は少なく、坪井ら (1961) および山本ら (1996, 1997) がポット栽培の水稻に風洞を用いて風と塩水処理を行い、収量および品質などへの影響を検討しているもののみである。特に圃場レベルでの再現試験の報告はない。生産現場の水稻が受けたような潮風害を人為的に再現するには根からの塩水等の吸収がなく、地上部にのみ塩を付着させる条件をつくることが重要である。また、2004年台風15号に伴う潮風害では、登熟期間に穂部と上位葉部に塩分が付着し、付着部が白化して登熟が停滞し収量低下が起こっており、穂部の塩分付着量の違いによって白化程度および減収程度が異なった (森ら 2008) ことから、潮風害を再現するには特に穂部および上位葉部に塩を付着させる必要がある。

山本ら (1995) は、暖地において安定的に水稻生産を確保するためには、台風の通過によりもたらされる潮風害の発生機構を解析し、被害の軽減・回避する技術を構築する必要があることを指摘している。さらに、地球温暖化に伴う異常気象が頻発し夏の日本海の海水温が高い状態が続いている近年では、これまで潮風害の発生が極めて少なかった東北地域の日本海側における発生も懸念され、暖地のみならず全国規模の気象災害になりかねない。このことから、潮風害を人為的に再現する方法を確立し、台風通過後の実態解析にとどまらない解析を行うことが重要である。

そこで、水稻品種「はえぬき」において、2004年台風15号通過

時と同様の糊熟期に海水を散布することによって潮風害を再現し、散布量と穂部への塩分付着量との関係、ならびに 2004 年台風 15 号通過後の水稲への被害が再現した水稲にも同様に見られるか、被害程度、収量および品質について比較検討を行った。さらに、海水散布量と穂部への塩分付着量との関係についての再現性を確認するため、2005 年において再現試験を行い検討した。

5-2 材料と方法

水稲品種「はえぬき」の稚苗を山形県庄内地域では標準的な作期にあたる 5 月 12 日に機械移植した。基肥として窒素を 6 g m^{-2} ならびに幼形期の追肥として窒素を 2 g m^{-2} を施用し、その他の栽培管理は庄内支場の慣行とした。潮風害再現試験における海水散布は 2004 年台風 15 号通過 4 日後の 8 月 24 日（出穂後 20 日）に、潮風害の被害程度が軽微（1 穂塩分量 0.4 mg ，籾被害度 1，森ら（2007）の方法により測定）であった庄内支場のほ場（細粒強グライ土）において行った。鶴岡市湯の浜の海岸付近より採取した海水（塩分 3.15%，森ら（2007）の方法により測定）を 1 株当たり 0，5，10，および 15mL を散布した。散布に際しては、田面に海水が落ちないように（根からの海水吸収がないよう）全穂および上位葉（止葉，次葉）に 8 方位の稲株の側面および上面から、霧状に各処理ごと 1 株当たりの噴霧回数を同一にして 5 株に均一に散布した。散布 2 日後（8 月 26 日）に、稲株を各処理ごとに 2 株採取し、1 株ごとに以下のとおり測定を行った。すなわち、各株の穂を穂長の順に並べ長い方から交互に 2 組に振り分け、均等に 2 分した。2 分したうちの一方の穂を 250ml のポリビンに入れ、脱塩水 200ml を加え 30 分振とう後、No131 のろ紙でろ過し、ろ液について $0.20\mu\text{m}$ メンブランフィルターでろ過した。ろ液について EC メーター（TOA DDK 社製，TOA CM-40S）で EC (dS m^{-1}) を測定した。EC メーターの検量線は塩化ナトリ

ウム溶液により作成し，これに基づいて穂に付着した塩分量を穂数で除して1穂塩分量として表し，2株の平均値を各処理の代表値とした．また，籾被害度は，1穂塩分量を求めた稲株の他方の穂を脱色および褐色の発生した籾を被害籾として，総籾数に対する被害籾数割合を達観により10%きざみに0から10までの11段階に分類した（森ら 2007）．海水を散布した各処理の3株について，成熟期に達した9月14日の収量および品質（整粒歩合）を測定した．粒厚が1.9mm以上の玄米を精玄米としてその重量を収量と示した．精玄米について品質判定器（サタケRGQI10）で測定した．散布時の気象条件は，8月24日が曇天，ならびに8月25～26日が晴天であり，降雨はなかった．また，散布時の最高風速は8月24日が 9.5 m s^{-1} ，25日が 9.5 m s^{-1} および26日が 7.0 m s^{-1} で，2004年台風15号通過時の風速および風向とは異なるが無風状態ではなかった（第5-1表）．

再現試験との比較検討には，2004年台風15号に伴う潮風害を受けた水稻について，著者らが2008年の報告（森ら 2008）の際に用いた同様の現地のデータ（以下，現地とする）を用いた．すなわち，1穂塩分量と籾被害度との関係については，潮風害の被害程度が異なる9地点から台風通過3日目の降雨前に採取した水稻品種「はえぬき」のデータを用いた．1穂塩分量と減収率および品質との関係については，9地点の海岸線からの最短距離と1穂塩分量との関係（第5-1図）から推定した他の17地点の推定1穂塩分量とそれぞれの地点の粒厚1.9mm以上の収量（50株刈り）および整粒歩合（サタケRGQI10）から求めた．山形県稲作指針に定められた基本指標に記載された水準とされる収量 580 g m^{-2} を100とし，その収量に対する減収量の割合を減収率と示した．

5-3 結果

第5-1表 2004年台風15号通過時および2004年の海水散布試験時から
散布後2日目(稲株採取日)までの気象条件.

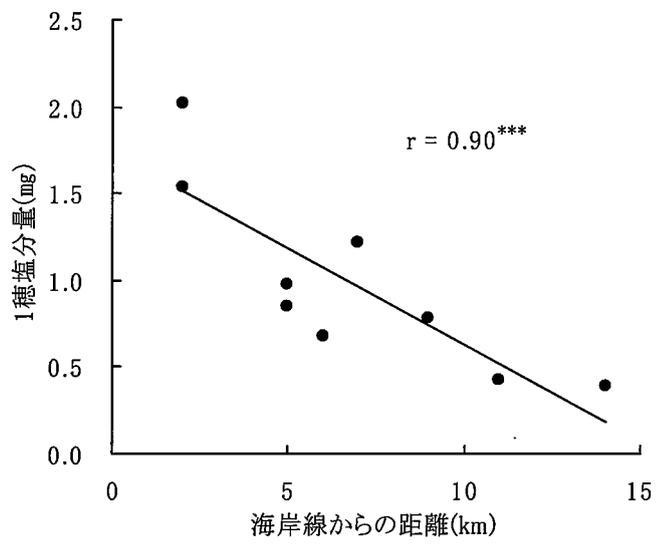
2004年

		8/19	8/20	8/21	8/22	8/23	8/24	8/25	8/26
気温 ℃	最高	33.1	29.2	27.2	28.1	22.8	27.2	26.7	29.6
	最低	22.4	18.3	16.7	14.7	18.1	19.5	17.3	14.1
	平均	26.6	22.6	21.6	21.5	20.3	22.4	21.8	21.9
降水量mm	6	4	0	10	39	0	0	0	
日照時間		7.7	4.6	11.5	11.4	1.3	4.2	11.7	9.7
風速 ms ⁻¹	最高	12.3	29.1	5.0	4.8	9.5	9.5	7.0	6.3
	平均	2.2	4.0	0.2	0.4	1.2	0.4	0.6	0.5
	風向	南東	西北西	北北西	北北西	南東	西北西	北北西	南東
湿度	最低	64.2	84.5	46.3	38.6	68.0	78.0	49.3	48.6
	平均	84.3	62.6	78.9	80.1	87.2	94.2	80.9	80.7

2004年台風15号は8月19日から20日にかけて通過した。

散布日は8月24日，散布後は晴天であった。

庄内支場内の気象観測装置による測定データ。

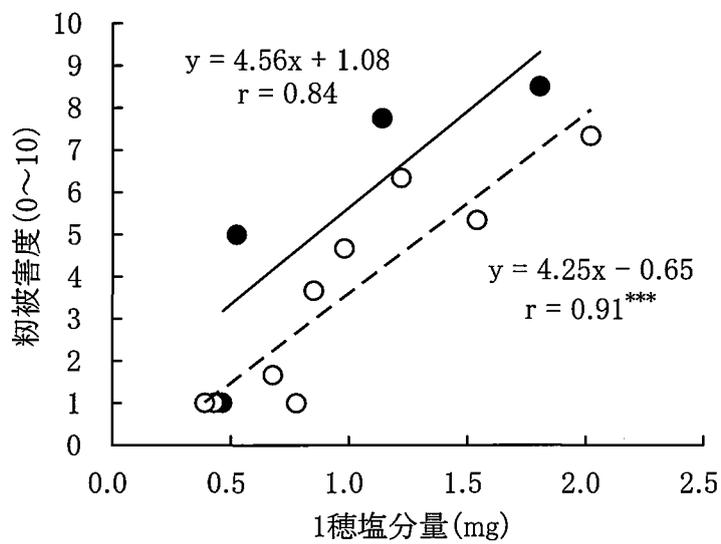


第5-1図 海岸線からの最短距離と
1穂塩分量との関係。
***:0.1%水準で有意 (n=9)。
森ら (2007) より引用。

2004年台風15号が通過した8月20日および再現試験を行った8月24日の気象条件は、風条件に違いはあるが、気温、降水量、日照および湿度において大きな差はなかった(第5-1表)。しかし、軽微ではあるが試験圃場においても2004年台風15号による潮風害を受けており(海水無散布で1穂塩分量0.4mg, 籾被害度1), 潮風害のない年次に比べ1穂塩分量は多かった。なお、潮風害のなかった2005~2007年(潮風害なし)に、測定された1穂塩分量の平均値は0.1mgであった。

再現試験において、1穂塩分量が多いほど籾被害度が高くなる傾向であった(第5-2図)。しかし、現地(実害データ)より再現試験では、同じ1穂塩分量でも籾被害度が高くなる傾向であった。現地の一穂当たり塩分量と籾被害度との関係式では、1穂塩分量が約1.3mg以上になると籾被害度が5以上となるのに対し、再現試験での関係式では1穂塩分量が約0.9mg以上になると籾被害度が5以上となった(第5-2図)。潮風害では、同一ほ場において風上側に位置する稲株の穂への塩分付着が多く、風下側に位置する稲株の穂、もしくは同一株内では稈長が短い穂への塩分の付着が少なく、籾被害度測定時の観察によると塩分が付着した風上側に位置する穂に着生した籾では褐色および白色が認められ、風下側に位置する籾には色の変化がほとんど認められなかった。風上側の変色程度は再現サンプルより大きかった。一方、再現試験では、籾被害度測定時の観察によると現地のサンプルの変色程度より小さいわずかな変色が認められる籾が多く、等しい塩分量でも再現試験の籾被害度が現地圃場よりも高くなった(第5-2図)。

1穂塩分量と減収率との関係は、現地と同様に再現試験において、1穂塩分量が多くなるほど減収率が高くなった(第5-3図)。1穂塩分量と減収率との関係式では、1穂塩分量が1mgになると現地の減

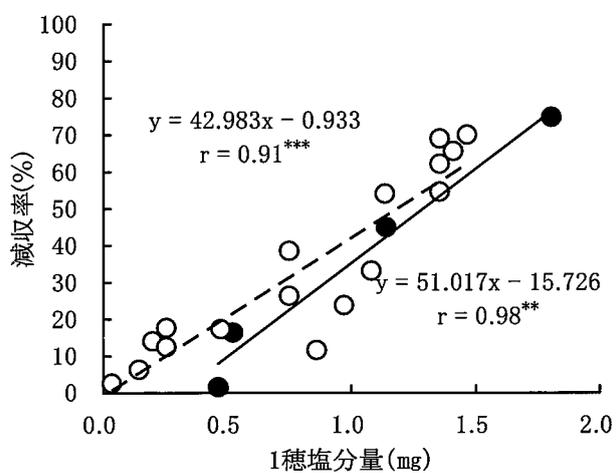


第5-2図 1穗塩分量と初被害度との関係。
 再現:海水散布したサンプルの測定値 (n=4).
 現地:潮風害を受けた現地のサンプルの測定値 (n=9).
 現地の測定値については森ら(2007)を引用。
 ●:再現, ○:現地, 実線:再現, 破線:現地。
 ***:0.1%水準で有意。

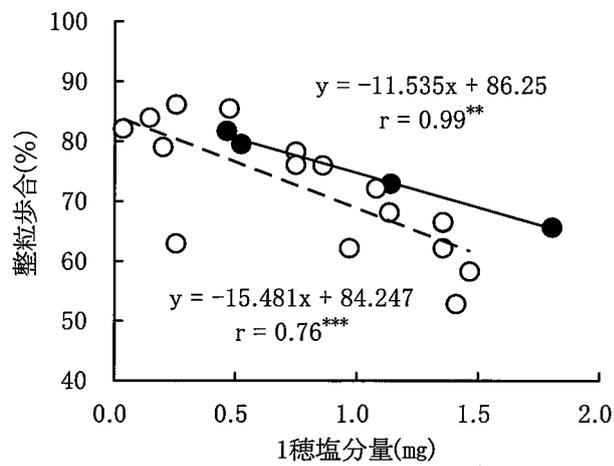
収率は 42% 程度となるのに対して、再現試験では約 35% と現地より 7% ほど低かった (第 5-3 図)。1 穂塩分量と整粒歩合との関係においても、現地と同様に再現試験では、1 穂塩分量が多いほど整粒歩合が低くなった (第 5-4 図)。現地の 1 穂塩分量と整粒歩合との関係式では、1 穂塩分量が 1mg になると現地の整粒歩合は 69% 程度に減少するのに対して、再現試験では約 75% と現地より 6% ほど高かった (第 5-4 図)。本試験において 1 株当たり 0, 5, 10, および 15mL の海水を散布した。海水散布量と 1 穂塩分量との関係を見ると、海水散布量が多いほど 1 穂塩分量は多くなった (第 5-5 図)。本試験で得られた関係式では、市丸ら (1992) が潮風害発生の限界値と報告した 1 穂塩分量が 0.3 mg になるのは海水散布量が 1 株当たり 0.13mL であり、被害が顕著となる目安である 1 穂塩分量 1 mg になるのは海水散布量が 1 株当たり 7.7mL であった (第 5-5 図)。

5-4 考察

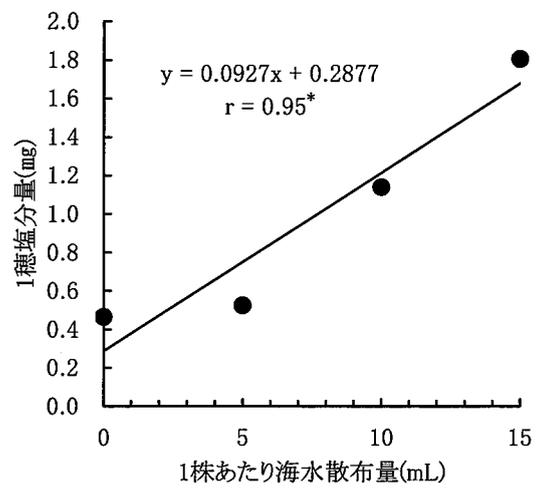
水稻における潮風害は、台風により飛散した海塩粒子が穂部に付着することによって起こり、穂部への塩分付着量が多いほど精玄米重が低下することが報告されている (山本ら 1993, 山本ら 1995, 森ら 2008)。生産現場の水稻が受けたような潮風害を人為的に再現するには根からの塩水等の吸収がなく、地上部にのみ塩を付着させる条件をつくることが重要である。潮風害を再現するには特に穂部および上位葉部に塩を付着させる必要があるが、穂部への塩分付着量と収量および品質との関係については再現試験によって検討した事例は少ない。そこで、2004 年台風 15 号通過時と同様の糊熟期に海水を 1 株当たり 0, 5, 10 および 15mL 散布することによって潮風害を再現し、散布量と穂部への塩分付着量との関係、被害程度、収量および品質について 2004 年台風 15 号による潮風害の実際のデータと比較検討を行った。海水散布量と 1 穂塩分量との関係を見ると、



第5-3図 1穂塩分量と減収率との関係。
 再現:海水散布したサンプルの測定値 (n=4).
 現地:潮風害を受けた現地のサンプルの測定値 (n=17).
 現地の測定値については森ら(2008)を引用。
 ●:再現, ○:現地, 実線:再現, 破線:現地。
 :1%水準, *:0.1%水準で有意。



第5-4図 1穂塩分量と整粒歩合との関係。
 再現:海水散布したサンプルの測定値 (n=4).
 現地:潮風害を受けた現地のサンプルの測定値 (n=17).
 現地の測定値については森ら(2008)を引用。
 ●:再現, ○:現地, 実線:再現, 破線:現地。
 :1%水準, *:0.1%水準で有意。



第5-5図 海水散布量と1穂塩分量 (n=4).
 *:5%水準で有意.

海水散布量が多いほど1穂当たり塩分量は多くなった。再現試験および現地（実害データ）ともに、1穂塩分量と減収率ならびに整粒歩合との関係はほぼ同様の傾向を示した。以上より、潮風害における塩分付着の害について、海水散布による潮風害の再現によって解析は可能であると考えられる。

現地と再現試験での関係式の違いは、再現試験時は台風通過時のような強風による物理的刺激やフェーンによる消耗がないなど、ほ場では再現が困難な気象要素が影響しているものと考えられる。しかし、地点により地力、栽培条件などが異なる中での比較であったが、再現試験および実害データともに、1穂塩分量と減収率ならびに整粒歩合との関係はほぼ同様の傾向を示し、実害データによる過去の知見（市丸ら 1992）で報告された関係とも傾向的には同じであった。このことから、本研究での再現試験は、実際の潮風害発生時と全く同じ条件の再現は不可能であるが、潮風害の一要因となる水稲への塩分付着害を海水散布により再現でき、この一要因の視点から潮風害を想定した解析は可能であると考えられた。

また、本試験の結果は、水稲品種「はえぬき」の糊熟期（出穂後20日）ごろについての数値であり、登熟ステージ、品種特性（穂長、ぼうの有無、止葉の長さおよび傾斜角度）などによっても異なる可能性がある。また、2004年台風15号の潮風害においては、品種により減収率が異なったのは台風襲来時の出穂後日数だけでなく登熟歩合の違いによる影響も考えられ（森ら 2008）、さらには籾数レベル、穂数レベルなど収量の構成要素の栽培条件による差や、品種間差が影響してくると考えられる。本研究では潮風害全体を再現することはできなかったが、塩分付着害を再現することが可能であった。このことから、潮風害常発地帯などにおいて必要とされる潮風害の軽減技術の開発に向けた同一品種の栽培管理の違いによる塩分付着害

の影響，塩分付着害の被害程度の品種間差の推定などに，この再現方法を用いることができると考えられる．さらに，塩分付着による被害発生メカニズムの基礎的な研究への利用も可能と考えられる．

5-5 要約

潮風害を再現するには特に穂部および上位葉部に塩を付着させる必要があるが，穂部への塩分付着量と収量および品質との関係については再現試験によって検討した事例は少ない．そこで，2004年台風15号通過時と同様の糊熟期に海水を1株当たり0，5，10および15mL散布することによって潮風害を再現し，散布量と穂部への塩分付着量との関係，被害程度，収量および品質について2004年台風15号による潮風害の実際のデータと比較検討を行った．

(1) 海水散布量と一穂当たり塩分量との関係をみると，海水散布量が多いほど1穂塩分量は多くなった．

(2) 再現試験および現地（実害データ）ともに，1穂塩分量と減収率ならびに整粒歩合との関係はほぼ同様の傾向を示した．

(3) 潮風害における塩分付着の害について，海水散布による潮風害の再現によって解析は可能であると考えられる．潮風害発生限界値（市丸ら1992）と指摘された1穂塩分量が0.3mgになるのは海水散布量が1株当たり0.13mLであり，被害が顕著となる目安である1穂塩分量1mgになるのは海水散布量が1株当たり7.7mLであった．

第 6 章 ケイ酸による潮風害の軽減効果

6-1 土壌のケイ酸供給量の異なる水田における水稲による時期別ケイ酸吸収量について

6-1-1 序論

台風に伴う潮風害に遭遇した場合に被害を軽減する技術対策については、2004 年台風 15 号に伴う潮風害の発生時に、ケイ酸資材を継続的に施用していた水田で、潮風害による減収を軽減することが確認された（山形県 2004）。このことは、ケイ酸を施用すると、水稲のケイ酸含有率が高まり、表層へのケイ酸沈着量が増加して、穂・枝梗部への塩分付着によって発生する潮風害軽減に対しても塩分の組織内部への侵入を軽減できることを示唆している。しかし、潮風害は登熟期間中の気象災害であり、ケイ酸による潮風害の被害軽減の作用機作や登熟期間中のケイ酸供給を促進する方策、稲体の各部位におけるケイ酸の分布など明らかにして、普遍的な潮風害の被害軽減技術を構築する必要がある。そのためには、水稲のケイ酸吸収特性として、土壌のケイ酸供給量の異なる水田における時期別ケイ酸吸収量を把握する必要がある。

水稲の時期別ケイ酸吸収については、培養液の養分濃度の変動が少ない大型流動水耕培養装置を用いた試験結果から、時期別のケイ酸吸収速度は生育後期（減数分裂期～成熟期）>生育中期（分けつ盛期～減数分裂期）>生育前期（移植～分けつ盛期）の順であることが報告されている（長谷部ら 1986）。熊谷ら（2004）は山形県における水稲のケイ酸濃度について土壌及び灌漑水から供給されるケイ酸量から検討した結果、早生品種が 7 月に出穂した区ではケイ酸吸収に重要な時期である幼形期から出穂期の期間が短くなり、ケイ酸吸収量が減少したことを報告している。このことは、水稲によるケイ酸吸収量において幼形期以降のケイ酸が重要であることを示唆し

ている。従って、ほ場条件で土壌のケイ酸供給量別に生育時期別の水稲によるケイ酸吸収量について検討することは、収量形成のみならず潮風害の被害軽減に対するケイ酸の幼形期以降の量的な解明が進み、水稲に対するケイ酸の肥培管理技術の一層の効率化が図られると考えられる。そこで、ケイ酸供給量の異なる水田土壌を供試して時期別の水稲によるケイ酸吸収量を検討した。

6-1-2 材料と方法

試験は2000年および2006年に山形県庄内地域の水田圃場で行った。北田ら(1992)の方法に準じた逐次上澄法でケイ酸分析を行い、ケイ酸(SiO_2 を示す)供給量(1日当たり)が $1.8\sim 2.0\text{mgkg}^{-1}$ 土壌(以下、ケイ酸供給量小とする)、 $3.8\sim 3.9\text{mgkg}^{-1}$ 土壌(以下、ケイ酸供給量中とする)、 $4.9\sim 5.1\text{mgkg}^{-1}$ 土壌(以下、ケイ酸供給量高とする)の3段階に区分した。2000年は、土壌のケイ酸供給量が小である鶴岡市伊勢横内・民田、中である鶴岡市藤島、高である酒田市関・本楯の計5ヶ所の水田を供試した。2006年は、土壌のケイ酸供給量が小である鶴岡市民田、中である鶴岡市藤島、高である酒田市本楯の計3ヶ所の水田を供試した。両年とも水稲品種「はえぬき」を供試し、栽植密度は 22.2株 m^{-2} (1株5本植)で、移植時期は2000年が5月10日、2006年が5月15日に手植えで行った。基肥窒素量は両年とも関および本楯 4g m^{-2} 、藤島 5g m^{-2} 、伊勢横内および民田 6g m^{-2} を全層に、追肥窒素量は各圃場で両年とも幼穂形成期に 2g m^{-2} を表層に施用した。栽培試験は2000年が縦5m、横10mの 50m^2 で単連、2006年が9株枠(縦45cm、横90cm)を18枠設置して行った。病虫害防除、水管理および除草等の肥培管理は農家慣行によった。収量(精玄米重)は、2000年は100株刈で、2006年は9株刈(3反復)により求めた。収量構成要素として成熟期に平均的な穂数を有する稲株を2株採取し m^2 当たり穂数、籾数、 1.9mm 以上の精玄米千粒重、

総粒数に対する精玄米の粒数の割合とする精玄米粒数歩合を求めた。分析用の試料採取は平均的な茎数（穂数）を有する稲株を1～3株採取して、70℃で通風乾燥後、乾物重を測定しケイ酸は硫酸－過酸化水素分解後に重量法（日本土壌協会 2001）で求めた。試料サンプリングは2000年の場合、6月6日、6月26日、7月19日、8月5日および9月8日の5回、2006年の場合、6月9日、6月30日、7月18日、8月14日および9月13日の5回行った。供試水田の土壌のケイ酸供給量については逐次上澄法で求めた。風乾土5gに脱塩水50mlを加えて30℃で培養し、約2週間間隔で上澄液をサンプリングして12週間継続し、上澄液中のケイ酸濃度についてはモリブデンブルー法で求めた。土壌からのケイ酸供給量についても北田ら（1992）の方法に準じ、層位25cm、仮比重1、移植から成熟期までの地温については2000年および2006年とも庄内支場の地表下5cm地温を用いて次の式にあてはめて算出した。ケイ酸供給量（ gm^{-2} ）＝1日当たりケイ酸量（ $\text{mg}100\text{g}^{-1}$ 土壌）×積算地温（移植～成熟期）/30℃

なお、供試土壌の全窒素および全炭素はC/Nコーダー（ヤナコMT700）、CECはセミマイクロ・ショーレンベルガー法により求めた。

6-1-3 結果

(1) 水稻による時期別ケイ酸吸収量

逐次水抽出法から求めた成熟期における土壌由来ケイ酸供給量（第6-1-1表）は、2000年の場合、関＞本楯＞藤島＞民田＞伊勢横内で、2006年の場合、本楯＞藤島＞民田で、ケイ酸供給量の高い水田土壌の土性がLiC～CLで、全窒素およびCECが高い傾向であった。各年次とも土壌由来ケイ酸供給量が高中低の3レベルの水田圃場を供試して（第6-1-1表）、時期別の水稻によるケイ酸吸収量（第6-1-1図、第6-1-2図）および速度（第6-1-2表）について検討した。2000年における時期別のケイ酸吸収速度（ $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ）によれば、移植から

第6-1-1表 供試水田土壌の化学性とケイ酸供給量 (g m^{-2})

場所	土壌型	土性	pH (H_2O)	全窒素 g kg^{-1}	全炭素 g kg^{-1}	CEC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
酒田市関	細粒強グライ土壌	LiC	5.7	4.0	39.2	32.9
酒田市本楯	細粒強グライ土壌	LiC	5.5	4.2	42.2	33.5
鶴岡市藤島	細粒強グライ土壌	CL	5.2	3.5	31.7	25.4
鶴岡市民田	礫質灰色低地土壌	L	5.3	2.4	23.9	16.8
鶴岡市伊勢横内	中粗粒褐色低地土壌	L	5.4	2.3	24.1	15.2

場所	ケイ酸量 mg kg^{-1}						Y=a*X	ケイ酸供給量 g m^{-2}	
	13日	23日	40日	52日	66日	80日		2000年	2006年
酒田市関	67	129	201	261	329	397	0.51	117	
酒田市本楯	69	127	187	243	303	361	0.49	113	116
鶴岡市藤島	52	96	146	200	253	305	0.39	90	92
鶴岡市民田	22	46	74	107	138	166	0.20	46	47
鶴岡市伊勢横内	23	45	68	92	116	141	0.18	41	

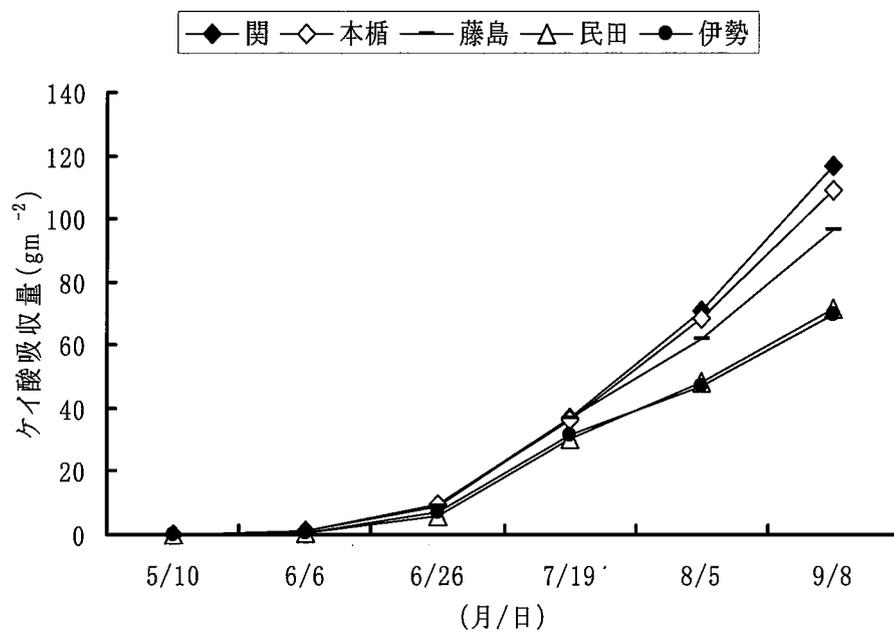
Y : 時間 X (日) までに溶出したケイ酸量 (mg kg^{-1})

ケイ酸量 : 逐次上澄液法 (30°C)

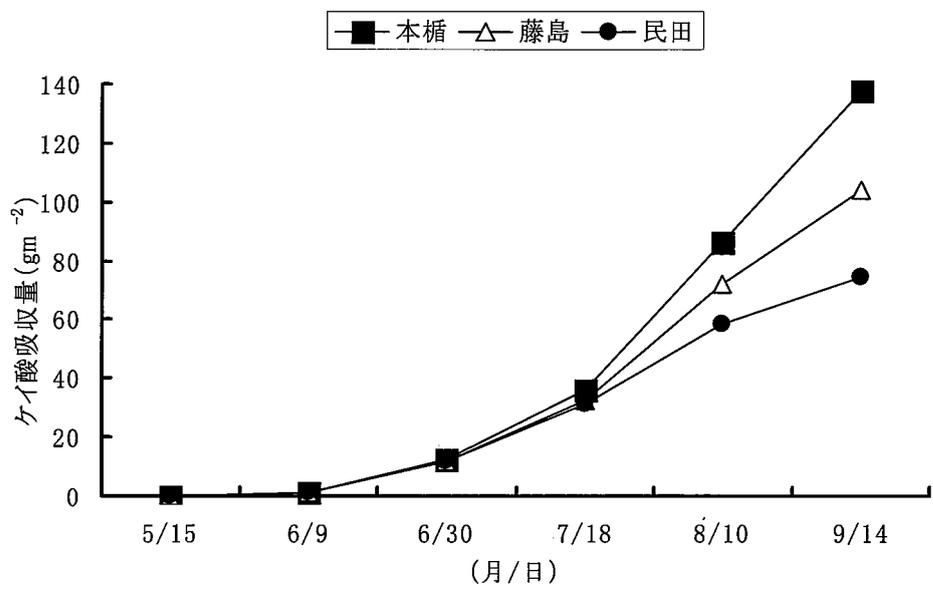
ケイ酸供給量 = 1日当たりケイ酸溶出量 × 積算地温 / 30°C × 1m²土壌重量 × 仮比重

積算地温 (°C) : 2000年 → 2764°C、2006年 → 2840°C

層位 : 25cm、仮比重 : 1



第6-1-1図 稲体ケイ酸吸収量の推移(2000年)



第6-1-2図 稲体ケイ酸吸収量の推移(2006年)

第6-1-2表 時期別ケイ酸吸収速度 ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)
「2000年」

場所	I 期	II 期	III 期	IV 期	V 期
酒田市関	0.044	0.42	1.25	2.11	1.43
酒田市本楯	0.033	0.42	1.22	2.02	1.26
鶴岡市藤島	0.043	0.39	1.27	1.58	1.08
鶴岡市民田	0.027	0.27	1.09	1.14	0.72
鶴岡市伊勢横内	0.028	0.31	1.11	0.99	0.72

ケイ酸吸収速度：各時期毎のケイ酸吸収量/各時期毎の日数

I 期：5/10-6/6 (移植～分げつ初期)

II 期：6/7-6/26 (分げつ初期～有効分げつ期)

III 期：6/27-7/19 (有効分げつ期～幼穂形成期)

IV 期：7/20-8/5 (幼穂形成期～穂揃期)

V 期：8/6-9/8 (穂揃期～成熟期)

「2006年」

場所	I 期	II 期	III 期	IV 期	V 期
酒田市本楯	0.045a	0.55a	1.31a	2.28a	1.45a
鶴岡市藤島	0.046a	0.50a	1.14a	1.80b	0.93b
鶴岡市民田	0.051a	0.50a	1.08a	1.25c	0.43c

ケイ酸吸収速度：各時期毎のケイ酸吸収量/各時期毎の日数

I 期：5/15-6/9 (移植～分げつ初期)

II 期：6/10-6/30 (分げつ初期～有効分げつ期)

III 期：7/1-7/18 (有効分げつ期～幼穂形成期)

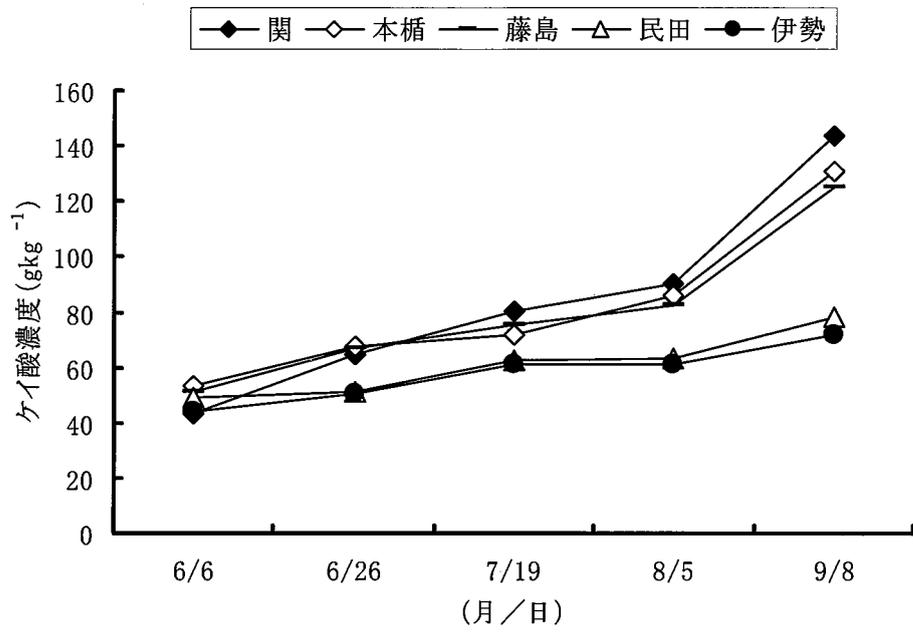
IV 期：7/19-8/10 (幼穂形成期～穂揃期)

V 期：8/11-9/14 (穂揃期～成熟期)

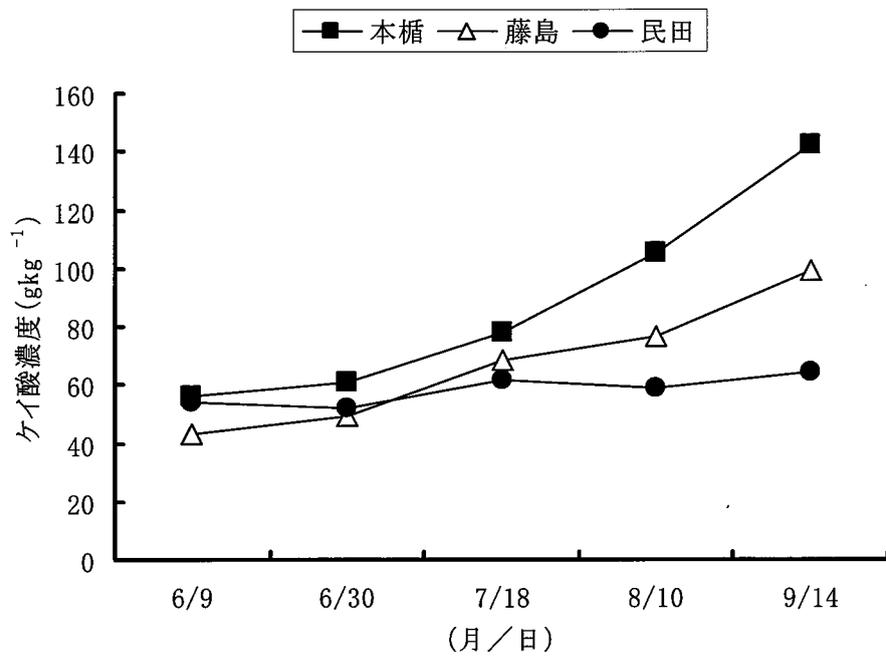
Fishers LSD ($p < 0.05$) により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは 5%水準で有意差あり。

分けつ初期までのⅠ期（以下Ⅰ期とする）では0.03～0.04，分けつ初期から有効分けつ期までのⅡ期（以下Ⅱ期とする）では0.27～0.42，有効分けつ期から幼形期までのⅢ期（以下Ⅲ期とする）では1.09～1.27，幼形期から穂揃期までのⅣ期（以下Ⅳ期とする）では0.99～2.11，穂揃期から成熟期までのⅤ期（以下Ⅴ期とする）で0.72～1.43で，同様に2006年における時期別のケイ酸吸収速度($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)によればⅠ期では0.05，Ⅱ期では0.50～0.55，Ⅲ期では1.08～1.31，Ⅳ期では1.22～2.28，Ⅴ期では0.43～1.45であった．ケイ酸吸収速度を土壌のケイ酸供給量別に比較すると，Ⅰ期～Ⅲ期まではケイ酸吸収速度の土壌間差（本楯のケイ酸吸収速度/民田のケイ酸吸収速度比）は，2000年の場合Ⅰ期1.3，Ⅱ期1.3，Ⅲ期1.1，2006年の場合Ⅰ期0.9，Ⅱ期1.1，Ⅲ期1.2で小さかった．一方，Ⅳ期以降（幼形期以降）のケイ酸吸収速度が増加する時期からは土壌間差（本楯のケイ酸吸収速度/民田のケイ酸吸収速度比）は，2000年の場合Ⅳ期2.0，Ⅴ期1.8，2006年の場合Ⅳ期1.8，Ⅴ期3.4で大きくなった．茎葉におけるケイ酸濃度の推移（第6-1-3図，第6-1-4図）は稲体のケイ酸吸収量と同様にケイ酸供給量の多いほ場では幼形期以降もケイ酸濃度が向上する傾向であった．茎葉のケイ酸濃度を土壌のケイ酸供給量別に比較すると，Ⅰ期～Ⅲ期まではケイ酸濃度の土壌間差（本楯のケイ酸濃度/民田のケイ酸濃度比）は，2000年の場合Ⅰ期1.1，Ⅱ期1.3，Ⅲ期1.2，2006年の場合Ⅰ期1.0，Ⅱ期1.2，Ⅲ期1.3で小さかった．一方，Ⅳ期以降（幼形期以降）の土壌間差（本楯のケイ酸濃度/民田のケイ酸濃度比）は，2000年の場合Ⅳ期1.4，Ⅴ期1.7，2006年の場合Ⅳ期1.8，Ⅴ期2.2で大きくなった．

なお，精玄米重は両年とも幼形期以降ケイ酸吸収量の多い圃場で高い傾向であった（第6-1-3表）．収量構成要素からみると主に幼形期以降に決定される精玄米粒数歩合および千粒重はケイ酸吸収量の



第6-1-3図 茎葉ケイ酸濃度の推移(2000年)



第6-1-4図 茎葉ケイ酸濃度の推移(2006年)

第6-1-3表 精玄米重および収量構成要素
「2000年」

場所	精玄米重 (gm^{-2})	穂数 (本 m^{-2})	籾数 (粒 m^{-2})	精玄米粒数 歩合 (%)	千粒重 (g)
酒田市関	685	508	35100	90.4	21.6
酒田市本楯	650	512	33600	88.7	21.8
鶴岡市藤島	645	502	33600	89.7	21.4
鶴岡市民田	600	537	34100	82.6	21.3
鶴岡市伊勢横内	605	531	35100	80.5	21.4

「2006年」

場所	精玄米重 (gm^{-2})	穂数 (本 m^{-2})	籾数 (粒 m^{-2})	精玄米粒数 歩合 (%)	千粒重 (g)
酒田市本楯	655	504	32400	92.3	21.9
鶴岡市藤島	640	540	31700	92.2	21.9
鶴岡市民田	570	535	29900	88.3	21.6

精玄米重：1.9mm以上玄米重

千粒重：1.9mm以上玄米千粒重

精玄米粒数歩合：総籾数に対する精玄米の粒数の割合

多いほ場で高まる傾向であった(第 6-1-3 表)。ケイ酸供給量の高いほ場は窒素供給量も高い傾向があり精玄米重についてケイ酸だけの評価でなく窒素も含めた評価を行う必要があり、この点については今後の検討課題である。

ケイ酸吸収速度の土壌間差が大きくなる幼形期を中心にして移植～幼形期，幼形期～成熟期に区分して時期別の稲体のケイ酸吸収量(gm^{-2})および速度($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)によれば(第 6-1-5 図，第 6-1-6 図，第 6-1-4 表)，両年とも移植～幼形期(2000 年 5 月 10 日～7 月 19 日，2006 年 5 月 15 日～7 月 18 日)の稲体のケイ酸吸収量および速度は，土壌のケイ酸供給量による土壌間差が小さくほぼ同じ値を示した。一方，幼形期から成熟期(2000 年 7 月 20 日～9 月 8 日，2006 年 7 月 19 日～9 月 14 日)の稲体のケイ酸吸収量は幼形期以降のケイ酸吸収量は土壌間差が大きくなり，土壌由来ケイ酸供給量が高い土壌で稲体のケイ酸吸収量が多くなることが明らかであった。

6-1-4 考察

水稲による時期別ケイ酸吸収速度はⅣ期>Ⅲ期=Ⅴ期>Ⅱ期>Ⅰ期で幼形期以降の吸収速度が高くなり住田ら(1992)・長谷部ら(1986)の結果と一致した。このことは，土壌由来のケイ酸供給量に対応して幼形期以降ケイ酸吸収速度が向上していることを示唆している。幼形期以降の水稲のケイ酸吸収速度が土壌からのケイ酸供給量によって異なる要因は，住田ら(1992)や長谷部ら(1986)が指摘しているように水稲によるケイ酸の吸収速度の上昇(要求度の向上)に対して，土壌側のケイ酸の供給量(土壌溶液中のケイ酸濃度)の高低によると考えられる。さらに，幼形期以降に稲体のケイ酸吸収速度が上昇する稲体側の要因としては，ケイ酸の集積部位である糊殻が形成される時期にあたること，根量および根数も最大に達する時期(松尾ら 1990)にあたることと考えられる。

第6-1-4表 時期別ケイ酸吸収量およびケイ酸吸収速度
「2000年」

場所	土壌由来ケイ酸 供給量 (gm ⁻²)	ケイ酸吸収量 (gm ⁻²)		ケイ酸吸収速度 (gm ⁻² d ⁻¹)	
		移植期～幼形期	幼形期～成熟期	移植期～幼形期	幼形期～成熟期
酒田市関	117	37	80	0.54	1.67
酒田市本楯	113	36	73	0.52	1.52
鶴岡市藤島	90	37	60	0.54	1.25
鶴岡市民田	46	30	41	0.44	0.85
鶴岡市伊勢横内	41	31	39	0.45	0.81

移植期～幼穂形成期：69日

幼穂形成期～成熟期：48日

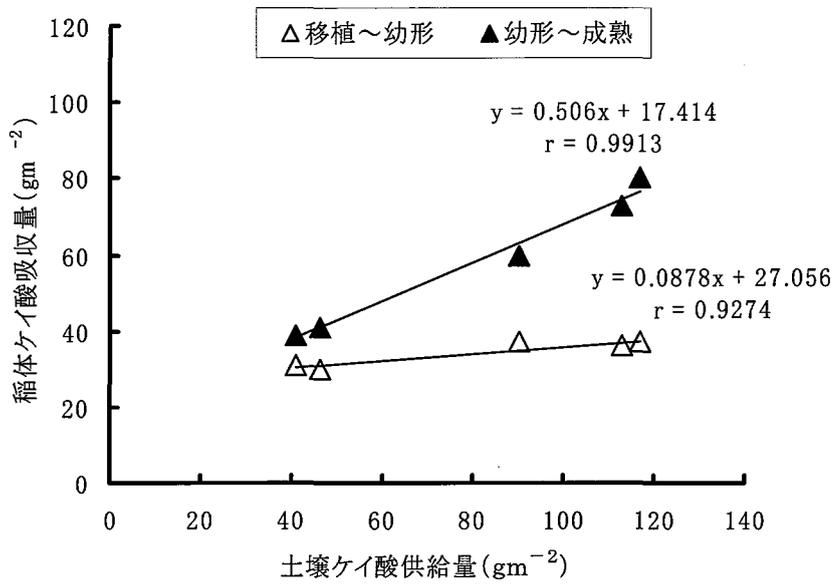
「2006年」

場所	土壌由来ケイ酸 供給量 (gm ⁻²)	ケイ酸吸収量 (gm ⁻²)		ケイ酸吸収速度 (gm ⁻² d ⁻¹)	
		移植期～幼形期	幼形期～成熟期	移植期～幼形期	幼形期～成熟期
酒田市本楯	116	36a	102a	0.57a	1.79a
鶴岡市藤島	92	32a	72b	0.51a	1.26b
鶴岡市民田	47	31a	43c	0.49a	0.75c

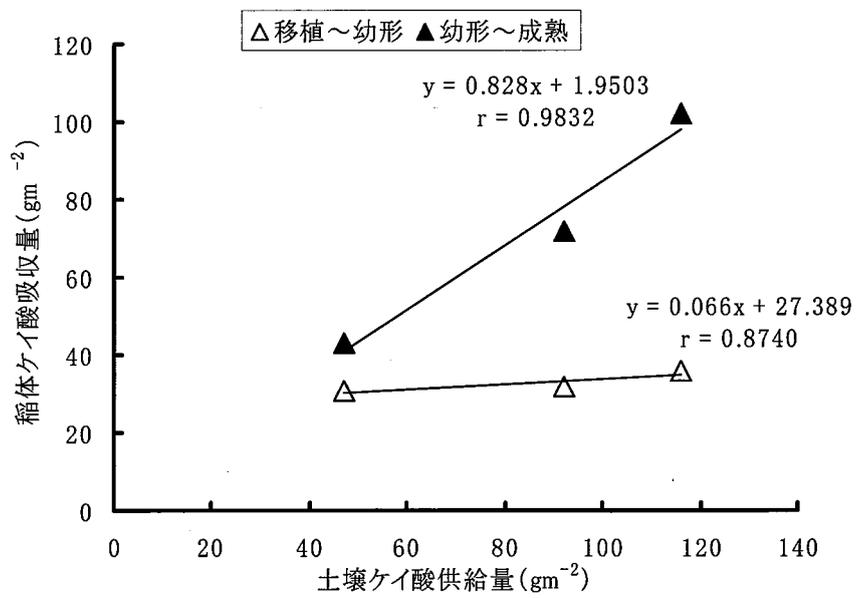
移植期～幼穂形成期：63日

幼穂形成期～成熟期：57日

Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。



第6-1-5図 土壤ケイ酸供給量と時期別稲体ケイ酸吸収量の関係 (2000年)



第6-1-6図 土壤ケイ酸供給量と時期別ケイ酸吸収量との関係 (2006年)

ケイ酸の水稲に対する役割からみた収量形成上重要な要因としては①光合成能力の向上，②根の酸化力の向上，③耐倒伏性の向上等があげられる。本報告においても，土壌のケイ酸供給量の高いほ場（幼形期以降のケイ酸吸収速度の増加程度の大きいほ場）において精玄米重が高い傾向であり，その要因として精玄米粒数歩合や千粒重が高い傾向が認められ，登熟期間中の光合成能の向上が考えられる。

さらに，登熟期間に発生する潮風害の軽減効果に対するケイ酸の役割を促進するためには，幼形期以降のケイ酸吸収速度の増加程度の小さいほ場では，ケイ酸供給力の向上を図る肥培管理が重要である。この視点からケイ酸の追肥対応も有用な技術であると考えられる。この点について，住田ら（1991）が行った水稲の時期別ケイ酸吸収量に及ぼすケイ酸石灰の施用時期について検討した結果によれば，耕起前施用は水稲の生育初期および中期におけるケイ酸吸収を促進し，分けつ期施用は生育中期のみならず後期にもケイ酸吸収を促進する効果があることから示唆される。

以上のことから，水稲によるケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し，土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念され，ケイ酸による潮風害の被害軽減の視点からも，ケイ酸質肥料の追肥も含めた効率的なケイ酸施用技術を開発する必要がある。

6-1-5 要約

ほ場条件で土壌のケイ酸供給量別に生育時期別の水稲によるケイ酸吸収量について検討することは，収量形成のみならず，潮風害の被害軽減に対するケイ酸の幼形期以降の量的な解明が進み，水稲に対するケイ酸の肥培管理技術の一層の効率化が図られると考えられる。そこで，ケイ酸供給量の異なる水田土壌を供試して時期別の水

稲によるケイ酸吸収量を検討した。

(1)水稲による時期別ケイ酸吸収速度は幼形期から穂揃期 > 有効分げつ期から幼形期 = 穂揃期から成熟期 > 分げつ初期から有効分げつ期 > 移植から分げつ初期で幼形期以降の吸収速度が高くなった。

(2)稲体の幼形期以降のケイ酸吸収量は土壌間差が大きくなり、土壌由来ケイ酸供給量が高い土壌で稲体のケイ酸吸収量が多くなることが明らかであった。

(3)水稲によるケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し、土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念され、ケイ酸による潮風害の被害軽減の視点からもケイ酸質肥料の追肥も含めた効率的なケイ酸施用技術の開発が必要である。

6-2 ケイ酸資材の幼形期施用の有用性

6-2-1 序論

前節の結果から、水稲によるケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し、土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念され、ケイ酸による潮風害の被害軽減の視点からも、ケイ酸質肥料の追肥も含めた効率的なケイ酸施用技術を開発する必要がある。

しかし、生産者の高齢化、米価の低迷などによる労働力不足やコスト削減から、ケイ酸資材の施用量が減少（珪酸石灰肥料協会 1980-2004）しており、山形県においては灌漑水からのケイ酸供給量の減少も報告されている（熊谷ら 1999）など、水稲に対するケイ酸供給量が減少している。また、全層施用されたケイ酸質カルシウム肥料（以下、ケイカル）中のケイ酸は一作期間に約 20 % (200 g kg^{-1}) が水稲に利用されるにとどまり、ケイカルによる水稲の収量やケイ酸吸収量に対する肥効は多量連用した場合を除き一般的に小さいと考えられている（住田ら 1989、住田ら 1991）。

このため、近年、ケイカル施用量の半量程度でもケイカルと同等以上の収量やケイ酸吸収量が期待されるケイ酸資材が登録され（谷口ら 1999）、新資材を利用したケイ酸施用量の減量対応など効果的な施用技術の開発が必要とされている。

水稲の幼形期以降のケイ酸吸収量は、成熟期のケイ酸吸収量の約 60～80 % に達し、1 日あたりのケイ酸の吸収速度は幼形期以降がそれ以前（栄養生長期）の約 2 から 4 倍の速さとなり、幼形期以降のケイ酸吸収速度は土壌からのケイ酸供給量が多い土壌ほど高まる（奥田ら 1961、森ら 2008a）。このことから水稲のケイ酸要求度は幼形期以降に大きくなると考えられ、この時期以降のケイ酸供給を維持することが乾物生産を維持し、収量を向上させるだけでなく、

潮風害の被害軽減を促進すると考えられる。

そこで、水稻のケイ酸吸収速度が高くなる幼形期に、ケイカルより少量でもケイカルと同等以上の水稻収量やケイ酸吸収量が期待されるケイ酸資材（加工鉍さいりん酸肥料，シリカゲル肥料）をケイカルの1/3量に減量して施用した場合，水稻のケイ酸吸収，および収量・品質などにどのような影響があるかケイカルの作付前の全層施用と比較して検討した。また，幼形期は窒素の追肥時期であることから，ケイ酸を窒素と同時施用による，水稻の追肥窒素吸収に及ぼす影響についても検討した。

6-2-2 材料と方法

本試験は2002年が現地ほ場，2005年および2006年については庄内支場の同一ほ場で行った。試験区の構成を第6-2-1表に示した。

(1) 土壌条件

2002年の試験は酒田市広岡新田で行った。土壌は中粗粒グライ土で， $CEC16.1\text{ cmol}_e\text{ kg}^{-1}$ ，作土の土壌中可給態ケイ酸量（酢酸緩衝液抽出法） 91 mg kg^{-1} であった。2005および2006年の試験は山形県農業試験場庄内支場で行った。土壌は細粒強グライ土で， $CEC18.5\text{ cmol}_e\text{ kg}^{-1}$ ，作土の土壌中可給態ケイ酸量 141 mg kg^{-1} であった。

(2) 耕種条件

(ア)2002年

水稻品種「はえぬき」を，4月16日に乾籾で苗箱当たり 150 g を播種し，育苗した稚苗を5月13日に機械植えした。基肥窒素は5月1日に 6 g m^{-2} を全層に，追肥窒素は7月17日（出穂前19日）に 2 g m^{-2} を表層に施用した。基肥には塩加りん安化成肥料（窒素 120 g kg^{-1} ，りん酸 180 g kg^{-1} ，加里 140 g kg^{-1} ）を，追肥には塩安系化成肥料（窒素 160 g kg^{-1} ，加里 180 g kg^{-1} ）を施用した。病虫害防除，水管理および除草などは慣行とした。1区の面積は縦 4.2 m ，

第6-2-1表 試験区の構成

試験年次	区名	供試資材	現物施用量 g ^m ⁻²	ケイ酸成分施用量 g ^m ⁻²	施用時期	施用法	重窒素 施用の有無
2002年	02無施用	無	—	—	—	—	—
	02ケイカル全層	ケイカル	120	36	耕起後	全層	—
	02A幼形	加工鉍さいりん酸肥料	40	12	幼形期	表層	—
	02B幼形	シリカゲル肥料	12	12	幼形期	表層	—
2005年	05無施用	無	—	—	—	—	○
	05ケイカル全層	ケイカル	120	36	耕起後	全層	—
	05A幼形	加工鉍さいりん酸肥料	40	12	幼形期	表層	○
	05B幼形	シリカゲル肥料	12	12	幼形期	表層	○
2006年	06無施用	無	—	—	—	—	○
	06ケイカル全層	ケイカル	120	36	耕起後	全層	○
	06A幼形	加工鉍さいりん酸肥料	40	12	幼形期	表層	○
	06B幼形	シリカゲル肥料	12	12	幼形期	表層	○

重窒素施用：幼穂形成期施用

資材価格：ケイカル→720円（20kg）、加工鉍さいりん酸肥料→1,600円（20kg）、シリカゲル肥料→1,850円（5kg）

横 9.0 m の 37.8 m² で， 2 区制で行った．

(イ) 2005 および 2006 年

水稻品種「はえぬき」を， 2005 年は 4 月 18 日， 2006 年は 4 月 14 日に乾籾で苗箱当たり 150g を播種し， 育苗した稚苗を 2005 年は 5 月 9 日， 2006 年は 5 月 16 日に移植した． 移植は 6 株枠（縦 450 mm， 横 600 mm， 高さ 146 mm の木製の枠）をほ場に深さ 100 mm 程度まで埋設して行った． 6 株枠内の栽植密度 22.2 株 m⁻² ， 1 株 5 本で手植えを行い， 4 区制とした． 基肥窒素は両年次ともに移植当日に枠を設置後， 2005 年については 6 g m⁻² を， 並びに 2006 年は 5 g m⁻² を手作業により全層処理した． 基肥には塩加りん安化成肥料（窒素 120 g kg⁻¹， りん酸 180 g kg⁻¹， 加里 140 g kg⁻¹）を施用した． 追肥についての詳細は（3）（イ）に示す． 病虫害防除， 水管理および除草などは慣行とした．

(3) 試験区

(ア) ケイ酸処理

2002 年， 2005 年および 2006 年とも同一の処理を行った． ケイ酸資材を施用しないケイ酸無施用区を 02 無施用区， 05 無施用区および 06 無施用区とし， ケイカルをケイ酸成分で 36 g m⁻² 作付前に全層施用した区を 02 ケイカル全層区， 05 ケイカル全層区および 06 ケイカル全層区とした． 加工鉍さいりん酸肥料（以下， 資材 A）およびシリカゲル肥料（以下， 資材 B）をケイ酸成分でケイカル全層区の 1/3 に相当する 12 g m⁻² を幼形期に窒素施用と同時に表層施用した区を 02A 幼形区および 02B 幼形区， 05A 幼形区および 05B 幼形区， 06A 幼形区および 06B 幼形区とした． 2002 年， 2005 年および 2006 年における両ケイ酸資材の施用は， それぞれ 7 月 17 日（出穂前 19 日）， 7 月 11 日（出穂前 24 日）および 7 月 10 日（出穂前 27 日）に行った．

(イ)2005年および2006年の幼形期の窒素処理

追肥窒素は2005年については 1.5 g m^{-2} を7月11日(出穂前24日)に,2006年は 2 g m^{-2} を7月10日(出穂前27日)に施用した.追肥窒素の利用率を測定するため,2005年は05無施用区,05A幼形区および05B幼形区について重窒素(硫安, $5.09 \text{ atom \% excess}$)を施用し,2006年については,すべての試験区で重窒素(硫安, $5.09 \text{ atom \% excess}$)を施用した.

(4)測定項目

すべての区において生育経過,部位別(2002年:茎葉と穂,2005年:茎葉と穂,2006年:茎葉(止葉と次葉を除く茎葉)と上位葉(止葉と次葉)と穂)の窒素およびケイ酸吸収量を測定し,収量および収量構成要素,玄米中タンパク質含有率,品質を測定した.2005年および2006年の重窒素を施用した区については,追肥窒素利用率を求めた.また,2006年については,成熟期のほかに,7月18日(出穂前19日),8月8日(出穂後2日)および8月28日(出穂後22日)の窒素およびケイ酸吸収量,追肥窒素利用率を測定した.窒素および玄米中タンパク質含有率はケルダール法(植物栄養実験法編集委員会編1990)で,ケイ酸は試料の一定量を湿式分解し,ろ過,熱水洗浄後,残渣をろ紙ごと磁器製のつぼに入れ,電気炉で灰化し,重量法で求めた(日本土壌協会2001).追肥窒素利用率は試料の一定量を湿式分解後,一定量に定容し,発光分光分析法(狩野ら1974)により重窒素吸収量を求め,追肥窒素施用量に対する割合として示した.収量は粒厚 1.9 mm 以上の玄米を精玄米とし,その重量を収量と示した.収量構成要素として, m^2 あたりの穂数,籾数,精玄米の千粒重,総粒数に対する精玄米の粒数の割合とする精玄米粒数歩合を測定した.品質を示す整粒歩合は,2002年は静岡精機のRS1000,2005年および2006年はサタケのRGQI10により測定した.

6-2-3 結果

(1) ケイ酸施用法別の収量および収量構成要素

各年次における本試験での生育状況は、草丈、莖数および葉色ともに一般の水田における生育状況と同様であった。各年次とも、処理区間での生育に大きな差はなくほぼ同様に経過した(データ省略)。収量について3年間の平均値で比較すると、無施用区の収量を100とした場合、A幼形区(106) > B幼形区(104) = ケイカル全層区(104) > 無施用区(100)の順であり、2005年のケイ酸無施用区の収量とケイ酸施用区の収量および2006年のケイ酸無施用区の収量とケイカル全層区の収量との間には有意差が認められた(第6-2-2表)。さらに、施用されたケイ酸成分量 1 g m^{-2} 当たりの収量増加量((ケイ酸施用区収量 - ケイ酸無施用区収量) / 施用したケイ酸成分量)はケイカル全層区で 0.67 g m^{-2} に対してA幼形区で 2.58 g m^{-2} 、B幼形区で 2.17 g m^{-2} とケイ酸の幼形期施用で高まる傾向であった。収量構成要素である m^2 当たり粒数は、ケイ酸施用によってケイ酸無施用よりも増加する傾向であった。 m^2 当たり粒数を穂数で除した一穂粒数は、ケイカル全層区 57.7 粒 = B幼形区 57.7 粒 = A幼形区 57.1 粒 > 無施用区 54.6 粒でケイ酸施用によってケイ酸無施用よりも増加する傾向であった。これらは統計的には有意な差ではなかった(第6-2-2表)。一方、千粒重および精玄米粒数歩合はケイ酸施用の有無による差がなかった。また、玄米タンパク質含有率および品質については処理間の差がなくほぼ同等であった。

(2) ケイ酸施用法別のケイ酸吸収量

成熟期における稲体のケイ酸吸収量について3年間の平均値で比較すると(第6-2-3表)、無施用区のケイ酸吸収量を100とした場合、B幼形区(112) \div A幼形区(111) > ケイカル全層区(108) > 無施用区(100)の順であり、2002年のケイ酸無施用区およびケイ酸全層区の

第6-2-2表 ケイ酸施用による収量・構成要素・クハク・品質への影響

試験年次	区名	収量		ケイ酸成分1 m^2 当たり 収量増加量(g m^{-2})	収量増加量(g m^{-2})	粗数 $\text{m}^2 \times 100$	一穂粗数・穂数		千粒重 g	粒数歩合(%) 1.9mm以上	玄米タンパク g/kg $^{-1}$	整粒歩合 %
		g m^{-2}	比				本 m^{-2}	g				
2002年	02無施用	565a	100	—	—	272a	57.7a	470a	23.7a	88a	72a	90a
	02ケイカル全層	551a	98	-0.39	—	270a	58.2a	464a	23.7a	89a	72a	91a
	02A幼形	585a	104	1.67	—	282a	58.6a	481a	23.7a	88a	73a	91a
	02B幼形	581a	103	1.42	—	275a	58.8a	467a	23.7a	89a	72a	91a
2005年	05無施用	602a	100	—	—	333a	55.0a	605a	20.8a	87a	77a	79a
	05ケイカル全層	635b	105	0.92	—	345a	58.8a	587a	21.0a	86a	76a	80a
	05A幼形	665b	110	5.25	—	349a	59.2b	590a	20.9a	87a	75a	78a
	05B幼形	640b	106	3.17	—	347a	60.2b	576a	21.2a	88a	76a	80a
2006年	06無施用	500a	100	—	—	263a	51.1a	515a	22.0a	89a	74a	67a
	06ケイカル全層	554c	111	1.50	—	296b	56.2b	527a	22.0a	87a	73a	71a
	06A幼形	512a	102	1.00	—	275a	53.6a	513a	22.2a	87a	75a	71a
	06B幼形	521ab	104	1.75	—	267a	53.9a	495ab	22.2a	89a	73a	69a
平均	無施用	556	100	—	—	289	54.6	530	22.2	88	74	78
	ケイカル全層	580	104	0.67	—	304	57.7	526	22.2	87	74	81
	A幼形	587	106	2.58	—	302	57.1	528	22.3	87	74	80
	B幼形	581	104	2.17	—	296	57.7	513	22.4	89	74	80

施用したケイ酸成分量1 m^2 当たり収量増加量=(ケイ酸施用区収量-ケイ酸無施用区収量)/施用したケイ酸成分量
Fislers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

ケイ酸吸収量と A 幼形区および B 幼形区のケイ酸吸収量，2005 年および 2006 年のケイ酸無施用区のケイ酸吸収量とケイ酸施用区のケイ酸吸収量の間には有意差が認められた。さらに，施用したケイ酸成分 1 g m^{-2} 当たりのケイ酸吸収増加量（（ケイ酸施用区ケイ酸吸収量－ケイ酸無施用区ケイ酸吸収量）／施用したケイ酸成分量）はケイカル全層区で 0.19 g m^{-2} に対して A 幼形区で 0.83 g m^{-2} ，B 幼形区で 0.92 g m^{-2} とケイ酸の幼形期施用で高まる傾向であった。

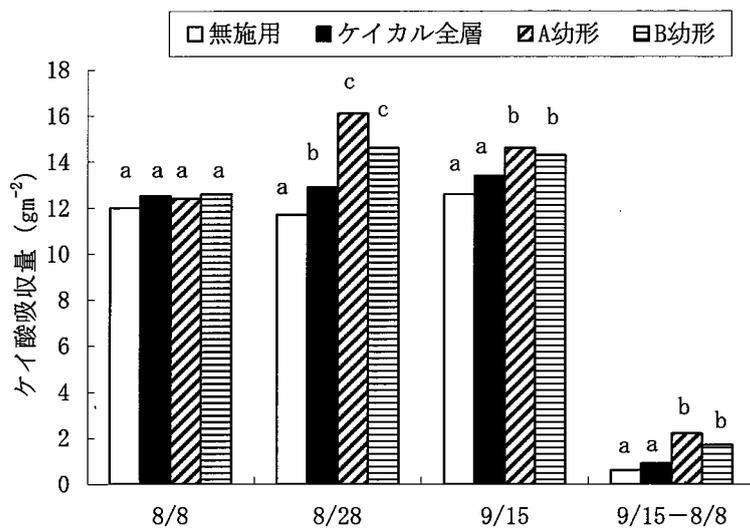
茎葉のケイ酸吸収量を施用法別にみると，無施用区の 59.3 g m^{-2} に対し，ケイカル全層区で 63.5 g m^{-2} （無施用区対比 107），A 幼形区 64.6 g m^{-2} （同比 109），B 幼形区 65.4 g m^{-2} （同比 110）とケイ酸施用で多くなる傾向であった。穂のケイ酸吸収量を施用法別にみると，無施用区の 30.4 g m^{-2} に対し，ケイカル全層区で 33.2 g m^{-2} ，A 幼形区 35.3 g m^{-2} ，B 幼形区 35.2 g m^{-2} とケイ酸施用で多く，幼形期施用区が最も多かった。この結果は，資材 A または資材 B については，ケイ酸成分でケイカル全層区の $1/3$ に相当する 12 g m^{-2} を幼形期に施用することで，ケイカル全層施用区と同等のケイ酸吸収量が得られることを示している。

そこで，2006 年については，作付前のケイカル全層区と A および B 資材の幼形期施用区における稲体各部位のケイ酸吸収量の推移を把握するため光合成活性中心部位の上位葉とその他の茎葉に分けて経時的に解析した（第 6-2-1 図）。7 月 18 日（資材施用後 8 日）から出穂期頃（8 月 8 日）にかけて稲体のケイ酸吸収増加量は無施用区で 33.3 g m^{-2} に対し，ケイカル全層区で 32.4 g m^{-2} ，A 幼形区で 35.7 g m^{-2} ，B 幼形区で 37.2 g m^{-2} とケイ酸の幼形期施用で多くなる傾向であった。7 月 18 日から成熟期のケイ酸吸収増加量は無区で 59.9 g m^{-2} に対し，ケイカル全層区で 63.8 g m^{-2} ，A 幼区で 66.9 g m^{-2} ，B 幼区で 66.5 g m^{-2} とケイ酸施用で多くなる傾

第6-2-3表 ケイ酸施用によるケイ酸含有率・ケイ酸吸収量への影響

試験年次	区名	ケイ酸含有率 (乾重%)		ケイ酸吸収量 (g m ⁻²)		ケイ酸成分1g m ⁻² 当たり ケイ酸吸収増加量 (g m ⁻²)
		莖葉	穂	莖葉	穂	
2002年	02無施用	67.5a	38.1a	40.3a	26.8a	67.1a
	02ケイカル全層	71.2a	39.6a	43.4a	27.8a	71.2a
	02A幼形	77.8b	37.4a	48.2b	27.0a	75.2b
	02B幼形	78.6b	39.6a	48.7b	28.5a	77.2b
2005年	05無施用	127.0a	50.9a	80.5a	35.5a	116.0a
	05ケイカル全層	130.0a	50.1a	87.5b	39.7b	127.2b
	05A幼形	129.1a	53.1b	85.8b	44.5b	130.3b
	05B幼形	129.2a	54.2b	87.8b	43.1b	130.9b
2006年	06無施用	89.1a	54.1a	57.1a	28.8a	85.9a
	06ケイカル全層	93.7a	56.1a	59.7a	32.2a	91.9b
	06A幼形	94.9a	60.9a	59.6a	34.6a	94.2b
	06B幼形	93.6a	60.1a	59.6a	34.1a	93.7b
平均	無施用	95	47	59.3	30.4	90 (100)
	ケイカル全層	99	48	63.5	33.2	97 (108)
	A幼形	101	50	64.6	35.3	100 (111)
	B幼形	101	51	65.4	35.2	101 (112)

2002年、2005年、2006年：莖葉、穂
 施用したケイ酸成分量1g m⁻²当たりケイ酸吸収増加量 = (ケイ酸施用区ケイ酸吸収量 - ケイ酸無施用区ケイ酸吸収量) / 施用したケイ酸成分量
 () : ケイ酸無施用区のケイ酸吸収量を100とした場合の各区の指数を示す。
 Fishers LSD (p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。



第6-2-1図ケイ酸施用による上位葉のケイ酸吸収量の推移(2006年)

(9/15-8/8) : 出穂期から成熟期にかけてのケイ酸吸収量の増加量を示す。

上位葉 : 止葉+次葉

Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

向であった（第 6-2-4 表）。上位葉のケイ酸吸収量は，出穂期頃（8 月 8 日）から成熟期にかけて無施用区で 0.6 g m^{-2} ，ケイカル全層区で 0.9 g m^{-2} ，A 幼形区で 2.2 g m^{-2} ，B 幼形区で 1.7 g m^{-2} 増加し，無施用区およびケイカル全層区のケイ酸増加量と資材 A および B の幼形期施用区のケイ酸増加量との間には有意差が認められた（第 6-2-1 図）。登熟期間における光合成活性の中心部位である上位葉における出穂期，出穂後 22 日および成熟期におけるケイ酸含有率（乾物換算）は，ケイ酸無施用区でそれぞれ 89, 126 および 137 g kg^{-1} ，ケイカル全層区でそれぞれ 84, 139 および 141 g kg^{-1} ，A 幼形区でそれぞれ 88, 147 および 157 g kg^{-1} ，B 幼形区でそれぞれ 88, 134 および 155 g kg^{-1} であり，出穂期から成熟期にかけてのケイ酸濃度の増加は無施用区で 48 g kg^{-1} ，ケイカル全層区で 57 g kg^{-1} ，A 幼区で 69 g kg^{-1} ，B 幼区で 67 g kg^{-1} でケイ酸の幼形期施用区でケイカル全層施用区に比べて優る傾向であり，有意差が認められた（第 6-2-2 図）。

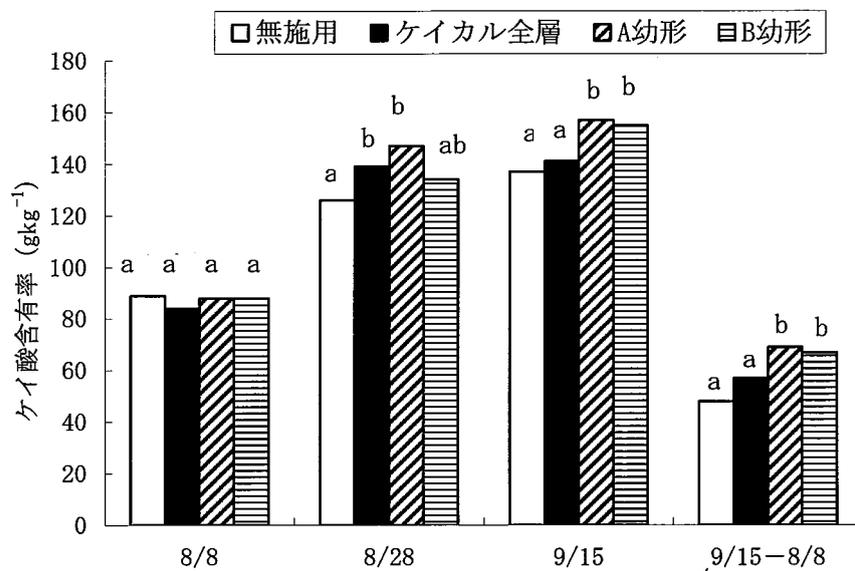
（3）ケイ酸施用が窒素吸収に及ぼす影響

成熟期の窒素吸収量について 3 年間の平均値で比較すると（第 6-2-5 表），無施用区の窒素吸収量を 100 とした場合，A 幼形区 (108) > B 幼形区 (104) ≒ ケイカル全層区 (104) > 無施用区 (100) の順であった。2005 年はケイ酸施用区の窒素吸収量とケイ酸無施用区の窒素吸収量の間には有意差が認められた。一方、有意差の認められなかった 2006 年の場合は，出穂前 30 日から出穂後 40 日の間における日射量は平年比 75 で著しい日照不足年次であったことも影響していると考えられる（廣川ら 1993）。茎葉の窒素吸収量は各区とも $3.2 \sim 3.4 \text{ g m}^{-2}$ でほぼ同程度であった。一方，穂の窒素吸収量は無施用区の窒素吸収量を 100 とすると，A 幼形区 (109) > B 幼形区 (106) > ケイカル全層区 (103) > 無施用区 (100) の順で，ケイ酸施用で多く

第6-2-4表 2006年における稲体ケイ酸吸収量の推移

区名	ケイ酸吸収量 (gm ⁻²)				
	7/18	8/8	8/28	9/15	9/15-7/18
無施用	26.1a	59.3a	81.4a	85.9a	59.9a
ケイカル全層	28.1a	60.5a	88.6b	91.9b	63.8b
A幼形	27.3a	63.0a	95.0bc	94.2b	66.9c
B幼形	27.1a	64.3a	91.9b	93.7b	66.5c

Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベット5%水準で有意差あり。



第6-2-2図ケイ酸施用による上位葉のケイ酸含有率の推移(2006年)

(9/15-8/8) : 出穂期から成熟期にかけてのケイ酸含有率の増加を示す。
 上位葉 : 止葉+次葉
 Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

第6-2-5表 ケイ酸施用による窒素含有率・窒素吸収量への影響

試験年次	区名	窒素含有率 (gkg ⁻¹)		窒素吸収量 (gm ⁻²)		合計
		茎葉	穂	茎葉	穂	
2002年	02無施用	5.7a	10.1a	3.4a	7.1a	10.5a
	02ケイカル全層	5.9a	9.7a	3.6a	6.8a	10.4a
	02A幼形	6.3a	10.4a	3.9a	7.5a	11.4b
	02B幼形	5.6a	10.3a	3.5a	7.4a	10.9ab
2005年	05無施用	5.1a	10.8a	3.2a	7.6a	10.8a
	05ケイカル全層	5.3a	10.2a	3.6a	8.1b	11.7b
	05A幼形	5.2a	10.5a	3.5a	8.9b	12.3bc
	05B幼形	4.9a	10.5a	3.3a	8.3b	11.6b
2006年	06無施用	4.8a	10.1a	3.1a	5.4a	8.5a
	06ケイカル全層	4.7a	10.0a	3.0a	5.7a	8.7a
	06A幼形	4.4a	9.8a	2.8a	5.5a	8.4a
	06B幼形	4.5a	9.8a	2.8a	5.6a	8.4a
平均	無施用	5.2	10.3	3.2	6.7	9.9 (100)
	ケイカル全層	5.3	10.0	3.4	6.9	10.2 (104)
	A幼形	5.3	10.3	3.4	7.3	10.7 (108)
	B幼形	5.0	10.2	3.2	7.1	10.3 (104)

2002年、2005年および2006年：茎葉，穂

()：ケイ酸無施用区の窒素吸収量を100とした場合の各区の指数を示す。

Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

なる傾向であった。茎葉および穂における窒素濃度は各区ともほぼ同程度であり、統計的な有意差は認められなかった。

2005年の追肥窒素利用率は、茎葉で05無施用区が15%であるのに対し、05A幼形区およびB幼形区が16%でほとんど差がなかったが、穂は05無施用区で28%であるのに対し、05A幼形区で41%、05B幼形区で37%と幼形期のケイ酸施用で高まる傾向であり、5%水準で有意差が認められた(第6-2-6表)。2006年の追肥窒素利用率は2005年と同様に茎葉および上位葉では全区でほとんど差がないが、穂は06無施用区で29%であるのに対し、06ケイカル区で35%、06A幼形区で34%、06B幼形区で32%とケイ酸施用で高まる傾向であった(第6-2-6表)。ただし、統計的に有意差は認められなかった。

6-2-4 考察

資材AおよびBの幼形期施用による収量はケイカルの作付前の全層施用の収量と同等であり、ケイ酸無施用に比べて増収した。その要因を収量構成要素からみると、ケイ酸施用により籾数(m^2 当たり、一穂)が増加したためと考えられる。籾数の決定は、穎花分化および退化が影響しており、分化数は穎花分化後期までの窒素吸収量が多くなるほど増加し、退化数は穎花分化後期から出穂期までの乾物生産量が多いほど少なくなる(和田ら1969)。一方、千粒重および精玄米粒数歩合は無施用とケイ酸施用で同等であった。

本試験では、ケイ酸施用により無施用に比べて追肥窒素利用率が高まる傾向であり、穂の窒素吸収量が多くなる傾向であった。ケイ酸施用での籾数の増加は、幼形期に施用した窒素が一要因になっているものと考えられる。また、ケイ酸施用のアルカリ効果による地力窒素の可給態化(Jianrongら1999)あるいは根の活力の向上による地力窒素吸収量が向上したことも要因として考えられる。ケイ酸施用により籾数が増加しても、千粒重および精玄米粒数歩合が低

第6-2-6表 2005年および2006年における成熟期の追肥窒素利用率 (%)

区名	2005年			2006年			
	茎葉	穂	合計	茎葉	上位葉	穂	合計
無施用	14.8a	28.4a	43.2a	9.9a	8.2a	28.7a	46.8a
ケイカル全層				9.6a	9.6a	34.5a	53.7a
A幼形	16.5a	40.6b	57.1b	9.4a	9.2a	33.6a	52.2a
B幼形	16.2a	36.8b	53.0b	10.0a	8.8a	32.0a	50.8a

2005年：茎葉，穂

2006年：茎葉（止葉と次葉を除く他の茎葉），上位葉（止葉と次葉），穂

Fishers LSD(p < 0.05)により有意差検定を行った。それぞれ，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

下しないのは、上位葉でのケイ酸含有率および吸収量の向上が光合成活性の維持に影響していることが一要因となっているものと考えられる（高橋 1987、藤井 2002）。これらのことから、ケイ酸を施用したことにより、ケイ酸無施用より追肥窒素利用率が高まって籾数の増加に影響を及ぼし、ケイ酸が上位葉に集積し登熟期間中の光合成産物量が増加し収量が高まったと考えられる。

さらに、幼形期でケイ酸を表層施用した場合、全層施用より穂および上位葉のケイ酸吸収量が多い傾向であった。この要因は次のように考えられる。ケイ酸資材の全層施用の場合、作付開始時点で作土全体に資材が分布しており、根の伸長に伴ない施用されたケイ酸の吸収が可能となることから、作付期間全般にわたりケイ酸が吸収される。また、吸収されたケイ酸は蒸散に伴ない葉身、葉鞘および籾殻などに集積する。さらに、窒素のようにほかの部位に転流するということはないため、作付期間を通して資材由来のケイ酸が吸収され、そのケイ酸が株全体に集積する。一方、加工鉍さいりん酸肥料およびシリカゲル肥料を幼形期施用（表層施用）した時期は、最高分げつ期を過ぎ、表層付近への根の発生・伸長が多くなる時期にあたる。また、表層付近に限らず、幼形期から出穂期にかけて発生した冠根（1次根）の数および根の直径は全期間を通して最大に達し、出穂期以降もこれらの1次根から多次根が多数発生し、登熟期間の根の活性を維持している（松尾ら 1990）。このように、表層に施用されたケイ酸が根によって吸収されやすい条件にあり、結果として幼形期以降のケイ酸の吸収が促進され、そのケイ酸が上位葉や籾へ集積すると考えられる。さらに、幼形期施用に用いたケイ酸資材 A（加工鉍さいりん酸肥料）はケイ酸溶出量が高まるように製造方法を改良してケイ酸吸収を促進する成分（リン酸）を加えた資材であること（谷口ら 1999）、資材 B（シリカゲル肥料）は比表面積

が著しく大きく水中でのケイ酸の溶解性が高い資材（加藤 2002）であることから，ケイ酸溶出量がケイカルよりも高いことも稲体のケイ酸吸収の促進に寄与していると考えられる。

資材 A および B の幼形期施用技術について収量性および収益性から評価すると，施用されたケイ酸成分量 10 kg ha^{-2} 当たりの収量増加量はケイカル全層区で 6.7 kg ha^{-1} に対して A 幼形区で 25.8 kg ha^{-1} ，B 幼形区で 21.7 kg ha^{-1} とケイ酸資材の幼形期施用で高まる傾向であった。1 ha 当たりの費用対効果については，ケイカル全層施用の場合，資材費 43,200 円（費用）に対して増収 240 kg（1kg 価格 250 円）の価格 60,000 円（効果）で 16,800 円の増益，資材 A の場合，資材費 32,000 円に対して増収 310 kg の価格 77,500 円で 45,500 円の増益で，資材 B の場合，資材費 44,400 円に対して増収 250 kg の価格 62,500 円で 18,100 円の増益で，ケイカルの全層施用と比べて，資材 A および B の幼形期施用ではそれぞれ 171% および 8% 増益であった。

以上より，ケイ酸溶出量がケイカルよりも高い資材（加工鉱さいりん酸肥料およびシリカゲル肥料）について，ケイ酸施用量をケイカルの全層施用量の $1/3$ に減量して対応した幼形期施用は，ケイ酸成分当たりの収量および費用対効果がケイカルの全層施用よりも優ることが確認された。このことから，加工鉱さいりん酸肥料およびシリカゲル肥料の幼形期施用は有用な技術であることが認められた。さらに，水稻によるケイ酸吸収に効率的な幼形期のケイ酸施用は潮風害の発生要因である籾・枝梗等の塩分付着部位におけるケイ酸含有率を高め潮風害の被害を軽減する可能性を示唆している。

6-2-5 要約

ケイ酸溶出量がケイカルよりも高いケイ酸資材を幼形期施用した場合，水稻のケイ酸吸収および収量・品質等にどのような影響があ

るか慣行的なケイ酸施用法であるケイカル全層施用と比較して検討した。

(1) 収量は、A 幼形区 (106) > B 幼形区 (104) = ケイカル全層区 (104) > 無施用区 (100) の順であった。施用されたケイ酸成分量 1 g m^{-2} 当たりの収量増加量 ((ケイ酸施用区収量 - ケイ酸無施用区収量) / 施用したケイ酸成分量) はケイカル全層区で 0.67 g m^{-2} に対して A 幼形区で 2.58 g m^{-2} 、B 幼形区で 2.17 g m^{-2} とケイ酸の幼形期施用で高まる傾向であった。さらに、費用 (資材費) 対効果 (収益) もケイ酸の幼形期施用でケイカル全層施用よりも優った。

(2) ケイ酸施用による増収要因を収量構成要素からみると、 m^2 当たり籾数はケイカル全層施用区 30,400 粒 > 幼形期施用区 30,100 粒 > ケイ酸無施用区 28,900 粒で、ケイ酸施用により籾数が増加して、千粒重および精玄米粒数歩合はケイ酸無施用区と同様であった。

(3) 茎葉のケイ酸吸収量は、幼形期施用区 65 g m^{-2} (ケイ酸無施用区対比 110) > ケイカル全層施用区 63.5 g m^{-2} (107) > ケイ酸無施用区 59.3 g m^{-2} (100)、穂のケイ酸吸収量は幼形期施用区 35.3 g m^{-2} (ケイ酸無施用区対比 116) > ケイカル全層施用区 33.2 g m^{-2} (109) > ケイ酸無施用区 30.4 g m^{-2} (100) で、全層施用より施用時期が遅く、施用量が少ない幼形期施用でケイカル全層施用と同等以上のケイ酸吸収量であり、潮風害の発生要因である籾・枝梗等の塩分付着部位におけるケイ酸含有率を高め潮風害の被害を軽減する可能性を示唆している。

(4) 窒素吸収量はケイ酸施用区 > ケイ酸無施用区であり、ケイ酸施用 (全層施用および幼形期表層施用) により幼形期における追肥窒素利用率が高まることが明らかであった。ケイ酸施用による籾数の増加は幼形期の追肥窒素利用率が高まり、窒素吸収量が多くなったことが影響していると考えられる。

6-3 ケイ酸による潮風害軽減技術の有用性

6-3-1 序論

台風に伴う潮風害に遭遇した場合に被害を軽減する技術対策については、2004年台風15号に伴う潮風害の発生時に、ケイ酸資材を継続的に施用していた水田で、潮風害による減収を軽減することが確認された(山形県 2004)。このことは、ケイ酸を施用すると、水稻のケイ酸含有率が高まり、表層へのケイ酸沈着量が増加して、穂・枝梗部への塩分付着によって発生する潮風害軽減に対しても塩分の組織内部への侵入を軽減できることを示唆している。

潮風害は広義では塩害に含まれると考えるが、潮風害では植物体に塩分が付着した部分およびその周辺細胞が被害を受ける局所的発生であるのに対し、塩害では根から塩分が吸収されることにより植物体内の細胞全体が被害を受ける(以下、塩害は根から吸収される害を示す)。つまり、塩分の体内への侵入部が地上部である点と侵入範囲が部分的である点が塩害と異なる。水稻の潮風害は、登熟期間に穂部と上位葉部に塩分が付着すると、付着部が白化して登熟が停滞し収量低下が起こる(市丸ら, 1992; 森ら, 2008b)。穂部の塩分付着量の違いによって白化程度および減収程度が異なり、塩分付着時の登熟歩合、品種および生育時期によって減収程度は異なる(山本ら, 1972; 森ら, 2008b)。山形県庄内地域において、2004年の台風15号による水稻「はえぬき」の被害程度は塩分付着量が一穂当たり1 mg以上になると減収率が30%以上であった(森ら, 2008b)。一方、水稻の塩害では、生育阻害程度と地上部ナトリウム濃度との間に正の相関があり、地上部へのナトリウム塩の集積が生育障害をもたらす(山内ら, 1989)。また、塩害下では籾殻の蒸散を抑制する役割を果たすクチクラ・シリカ二重層へのケイ酸沈着量が低下し、過剰散が起こり白穂が発生すると報告されている(Tsuda ら, 2000)。

また、塩害条件下でケイ酸を施用すると、収量低下が軽減されたという報告がある（間藤ら,1991；根の事典,1998）。これは、ケイ酸処理によってクチクラ・シリカ二重層へのケイ酸沈着量を増加させ、葉身からの過蒸散を抑制しているためと考えられる。地上部局部の外部ストレスの一つであるいもち病菌感染では、水稻の表面に侵入する際、クチクラ・シリカ二重層にケイ酸の急激な沈着が認められ、ケイ酸を施用した水稻ではいもち病感染が低下すると報告されている（早坂ら,2000；前川ら,2002, Hayasakaら 2005, Hayasakaら 2008）。また、ケイ酸処理によって水分ストレス条件下における蒸散量を抑制する効果が高いことも指摘されている（馬,2006）。このことから、水稻は、ケイ酸を根から選択的・積極的に吸収する特性により生物学的ストレス（病虫害）および非生物学的ストレス（気象,水分）を軽減していると考えられている（Maら,2004；馬,2006；藤井ら,2008）。これらのことから、ケイ酸を施用すると、水稻のケイ酸含有率が高まり、表層へのケイ酸沈着量が増加して、穂・枝梗部への塩分付着によって発生する潮風害軽減に対しても塩分の組織内部への侵入を軽減できると考えられる。

そこで前節では、水稻のケイ酸吸収特性を土壌・ケイ酸資材の違いから検討した。それによれば、ケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し、土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念されることを明らかにした。ケイ酸の吸収速度が高まる幼形期以降のケイ酸吸収を効果的に行う方法として、ケイ酸溶出量がケイカルよりも高い資材（加工鉍さいりん酸肥料・シリカゲル肥料）について、ケイ酸施用量をケイカルの全層施用量の1/3に減量して対応した幼形期施用は、ケイ酸成分当たりの収量および幼形期以降のケイ酸吸収がケイカルの全層施用よりも優ることを明らかにした。

実際に，ケイ酸施用が潮風害の被害軽減技術として有用であることを確認するためには，第5章で明らかにした潮風害を再現する方法である穂部に海水を散布することにより塩分付着害を人為的に発生させ（森ら，2009），登熟期の水稻穂部への海水由来塩分付着害に対するケイ酸の幼形期前後の追肥による減収の軽減効果を検討した。

6-3-2 材料と方法

本試験は山形県農業総合研究センター農業生産技術試験場庄内支場において2005年から2006年に行い，兩年次とも同一ほ場で行った。

(1) 土壌条件

土壌は細粒強グライ土（西山統）で，全窒素が 2.4gkg^{-1} ，全炭素が 20.7gkg^{-1} ，陽イオン交換容量（CEC）が 18.1cmolckg^{-1} ，および土壌中可給態ケイ酸量（pH6.2 磷酸緩衝液抽出法，土壤環境分析法，1997）が 220mgkg^{-1} であった。

(2) 耕種条件

水稻品種「はえぬき」について，乾籾で苗箱当たり 150g を播種した稚苗を機械植えした。基肥窒素量は2005年が 6gm^{-2} で2006年が 5gm^{-2} ，追肥窒素量は2005年が 1.5gm^{-2} で2006年が 2gm^{-2} を施用し，病虫害防除，水管理および除草などは慣行とした。

(3) 試験区

2005年は，ケイ酸資材を施用しないケイ酸無処理区を05対照区とし，出穂前10日に加工鉍さいりん酸肥料をケイ酸成分で 12gm^{-2} 表層処理した区を05ケイ酸区とした。また，2006年は，ケイ酸無処理区を06対照区とし，出穂前29日に加工鉍さいりん酸肥料をケイ酸成分で 12gm^{-2} 表層施用した区を06ケイ酸区とした。2005年については1区 36m^2 の3反復，2006年については1区 71m^2 の2反復で行った。

(4) 海水散布

2005年および2006年両年次ともに、各区の生育調査区の15株の穂数の平均値を求め、1株当たりの平均値(2005年 25 ± 2 本、2006年 21 ± 3 本)に相当する株を、1区当たり20株選定した。選定株のうち、1区10株に2005年は8月23日(出穂後19日)、および2006年は8月25日(出穂後17日)に海水を1株当たり5mLを全穂および上位葉(止葉・次葉)に8方位の稲株の側面および上面から霧状に散布した(森ら、2009)。第6-3-1表に庄内支場の観測装置測定データにより海水散布時の気象条件を示したとおり、海水散布は散布前後に雨天がない日を設定した。ただし、2005年の海水散布15時間前に降雨があったが、散布時には植物体が乾いていることを確認し海水散布を行った。海水は、鶴岡市湯野浜の海岸より採取した。海水中の塩分濃度は、電気伝導率計(TOA DKK社製、TOA CM-40S, 以下、ECメーター)により、既知濃度の塩化ナトリウム溶液とECメーター測定値との関係から求めた。海水中の塩分濃度は2005年が 27.4gkg^{-1} 、および2006年が 30.8gkg^{-1} であった。

(5) 穂の塩分測定と籾被害度調査

2005年は海水散布2日後(8月25日)、および2006年は海水散布1日後(8月26日)に、森らの方法(森ら、2007)により穂の塩分量を測定した。穂数による選定株の中から、2005年は05対照区の海水無散布の稲株と海水散布した稲株、05ケイ酸区については海水散布した稲株を1区当たり2株を採取した。2006年については、06対照区と06ケイ酸区における海水無散布の稲株と海水散布した稲株を1区当たり1株を採取した(散布および無散布でそれぞれ該当株数を採取)。採取した稲株は、1株ごとに切り離した穂を穂長の順に並べ長い方から交互に2組に振り分け2分した。2分したうちの一方の穂を250mLのポリビンに入れ、脱塩水200mLを加え30分振

第6-3-1表 2004年台風15号通過時、2005年および2006年の海水散布前日から散布後4日までの気象条件

	2004年 ^{*1}				2005年 ^{*2}				2006年 ^{*3}					
	8/19	8/20	8/21	8/22	8/23	8/24	8/25	8/26	8/24	8/25	8/26	8/27	8/28	
気温℃	最高	33.1	29.2	27.2	31.6	29.1	31.3	27.6	30.1	29.4	30.1	31.5	31.0	29.8
	最低	22.4	18.3	16.7	24.1	20.3	18.5	22.2	24.3	20.8	20.2	19.1	21.2	22.6
平均	26.6	22.6	21.6	26.8	24.6	24.9	24.9	26.2	24.8	24.7	25.4	25.5	25.1	
降水量mm	6.0	4.0	0.0	6.5	29.5	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	21.5	
日照時間h	7.7	4.6	11.5	6.1	9.0	12.0	8.9	4.6	9.4	10.6	11.8	11.4	7.3	
風速 ms-1	最高	12.3	29.1	5.0	8.2	7.4	8.5	17.4	12.9	7.7	6.6	7.5	10.7	11.1
	平均	2.2	4.0	0.2	1.4	2.0	2.0	6.7	2.6	1.9	1.8	1.9	4.8	3.4
風向	南東	南東	西北西	西北西	西北西	南東	南東	南東	北西	北西	北西	東南東	南東	南東
	最低	64.2	62.6	46.3	62.1	57.9	50.6	68.7	70.6	56.7	51.4	50.3	54.6	72.4
平均	84.3	84.5	78.9	88.1	83.2	77.2	78.3	88.6	84.0	80.7	76.0	72.4	84.8	
天候(観察)	-	-	-	曇天	雨→晴	晴	晴→曇	曇→雨	晴天	晴天	晴天	晴天	曇→晴	

*12004年台風15号通過時の気象条件、台風通過8月19日-20日

*2散布日:8月23日(出穂前19日),降雨(8月23日17時観測)がなくなつて15時間後に散布、散布前後晴天

*3散布日:8月25日(出穂前17日),散布前後晴天
庄内支場内の気象観測装置による測定データ。

とう後，No131のろ紙でろ過し，ろ液について0.20 μ mメンブランフィルター（ADVANTEC，セルロース）でろ過した．ろ液についてECメーターでECを測定した．ECメーターの検量線は既知濃度の塩化ナトリウム溶液により作成し，これに基づいて穂に付着した塩分量を求め穂数で除して一穂塩分量として表した．また，2分した他方の穂について，籾被害度を求めた．籾被害度は，脱色および褐色の発生した籾を被害籾として，総籾数に対する被害籾数割合を達観により10%きざみに0から10までの11段階に分類した（森ら，2007）．

（6）乾物重およびケイ酸吸収量

2005年は出穂後2日の8月6日，海水散布直前（出穂後19日，8月23日）および成熟期（9月16日），2006年は出穂前1日の8月7日，海水散布4日前（出穂後13日，8月21日），海水散布7日後（出穂後24日，9月1日），ならびに成熟期（9月20日）についての乾物重，ケイ酸吸収量を測定した．穂数による選定株の中から，2005年は05対照区の海水無散布の稲株と海水散布した稲株（散布以前については無散布のみの稲株），05ケイ酸区については海水散布した稲株（散布以前については無散布の稲株）を，2006年については，06対照区と06ケイ酸区における海水無散布の稲株と海水散布した稲株（散布以前については無散布のみの稲株）を1区当たり2株採取し（散布および無散布それぞれ2株採取し），部位別に茎葉（上位2葉を除いた茎葉），上位2葉（止葉と次葉）および穂に分けて測定した．さらに，2006年については8月14日，25日，9月1日，8日，13日，25日の6回，各区の平均的な穂数を有する2株を採取し枝梗のケイ酸吸収量も測定した．ケイ酸は試料の一定量を湿式分解し，ろ過，熱水洗浄後，残渣をろ紙ごと磁製るつぼに入れ，電気炉で灰化し，重量を求めた（土壌，水質及び植物体分析法，2001）．

（7）収量・収量構成要素，整粒歩合

穂数による選定株の中から、2005年は05対照区の海水無散布の稲株と海水散布した稲株、05ケイ酸区については海水散布した稲株を、2006年については全区の海水無散布の稲株と海水散布した稲株を1区当たり3株採取し（散布および無散布それぞれ3株採取し）、稲株ごとに収量・収量構成要素（籾数、穂数、千粒重、粒数歩合）および品質（整粒歩合）を測定した。粒厚が1.9mm以上の玄米を精玄米としてその重量を収量と示した。精玄米について千粒重を常法により測定し、全籾数に対する精玄米の粒数の割合を粒数歩合と示した。精玄米について穀粒判別器（サタケRGQI10）で整粒歩合および未熟粒歩合を測定した。さらに、2006年には、海水散布後5日（8月30日）、10日（9月4日）、14日（9月8日）および25日（9月19日）における平均的な2株について、比重1.06の塩水選による登熟歩合調査を06対照区の海水無散布区、06対照区および06ケイ酸区の海水散布区で行った。

6-3-3 結果

(1) 出穂期および海水散布前のケイ酸吸収量

ケイ酸吸収量の違いと海水散布による水稻への被害程度の違いを検討するため、2005年は出穂前10日、2006年は出穂前29日にケイ酸の処理を行った。2005年の出穂後2日のケイ酸吸収量は05対照区（ 86gm^{-2} ）より05ケイ酸区（ 101gm^{-2} ）で多い傾向であり、ケイ酸含有率も同様の傾向であった（第6-3-2表）。2006年の出穂前1日のケイ酸吸収量は06対照区（ 55gm^{-2} ）より06ケイ酸区（ 65gm^{-2} ）で多い傾向であるが、ケイ酸含有率は両区でほぼ同等であった（第6-3-3表）。

2005年の海水散布直前（出穂後19日）のケイ酸吸収量は、05ケイ酸区の茎葉および穂部で05対照区より多い傾向で、上位2葉では5%水準で有意に多かった（第6-3-2表）。2006年の海水散布前4日

(出穂後 13 日) のケイ酸吸収量においても, 06 ケイ酸区が 06 対照区より多い傾向であった (第 6-3-3 表). 2006 年は幼形期から穂揃期にかけて平年 (過去 30 年の平均値) に比べ 7 割程度の日照時間であり, 曇天および雨天の日が多かったため, 乾物重およびケイ酸吸収量が 2005 年より少なくなった. ケイ酸吸収量は 06 対照区より 06 ケイ酸区で多い傾向であり, ケイ酸処理による海水散布の被害程度の違いを, ケイ酸吸収量の差により試験区間で比較できる条件であった.

(2) 海水散布時の気象

海水散布時 (2005 年: 8 月 23 日, 2006 年: 8 月 25 日) の気象条件は, 両年次とも晴天であり一穂当たり塩分量を測定するために稲株を採取した日 (2005 年: 8 月 25 日, 2006 年 8 月 26 日) まで晴天で降雨がなく経過した (第 6-3-1 表). 実際に潮風害を受けた 2004 年の台風 15 号通過時 (8 月 20 日) と, 海水散布試験を行った 2005 年および 2006 年の気象条件について比較すると, 2005 年および 2006 年の最高風速および平均風速とも 2004 年の台風 15 号のそれよりも低かった. (第 6-3-1 表). 台風 15 号通過時と気象条件に違いはあるが, 2005 年および 2006 年両年次ともに, 海水散布後降雨が確認されたのは散布後 3 日目であった (第 6-3-1 表). このことから, 海水散布により稲体に付着した塩分は, 付着後に海水中の水分が蒸発する前に降雨によって洗い流されることはなかったと考えられる. 2004 年の台風 15 号通過時のような強風による物理的的刺激および稲体の消耗等はない条件であるが, 潮風害のような塩分付着による被害は 2004 年の台風 15 号通過時のように降雨がない条件で発生するため, 本試験では塩分付着害を再現した条件であったと考えられる. また, 2004 年台風 15 号の潮風害の被害程度である一穂塩分量 1 mg 以上で減収率 30% 以上の条件は, 満たしていると考えられる.

第6-3-2表 2005年における稲体の部位別風乾重, クイ酸含有率およびクイ酸吸収量

出穂後2日(8月6日, 莖葉)

区名	乾物重 g m ⁻²	クイ酸含有率 g kg ⁻¹	クイ酸吸収量 g m ⁻²
05対照	947	a	86
05クイ酸	1082	a	101

海水散布前(8月23日, 出穂後19日)

区名	乾物重 g m ⁻²		クイ酸含有率 g kg ⁻¹		クイ酸吸収量 g m ⁻²	
	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉
05対照	580	a	119	a	375	a
05クイ酸	651	a	134	a	410	a
	合計		合計		合計	
	1074	a	103	a	127	a
	1195	a	110	a	137	a
	合計		合計		合計	
	118	a	118	a	118	a

成熟期(9月16日)

区名	海水散布の有無		乾物重 g m ⁻²		クイ酸含有率 g kg ⁻¹		クイ酸吸収量 g m ⁻²	
	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉
05対照	無	a	516	a	104	a	699	a
05クイ酸	有	a	528	a	106	a	656	b
	合計		572	a	109	a	719	a
	合計		1400	a	126	a	163	a
	合計		131	a	131	a	131	a

Fisher's PLSD (P<0.05, m=3)により有意差検定を行った。それぞれ, 異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。
 莖葉: 上葉および2葉を除く莖葉, 上位2葉: 上葉および2葉。

第6-3-3表 2006年における稲体の部位別風乾重、クイ酸含有率およびクイ酸吸収量

出穂前1日(8月7日, 莖葉)

区名	乾物重 g m ⁻²	クイ酸含有率 g kg ⁻¹	クイ酸吸収量 g m ⁻²
06対照	705	a	78.7
06クイ酸	772	a	83.6
			55
			65

海水散布4日前(8月21日, 出穂後13日)

区名	乾物重 g m ⁻²		クイ酸含有率 g kg ⁻¹		クイ酸吸収量 g m ⁻²	
	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉
06対照	604	a	155	a	239	a
06クイ酸	594	a	156	a	250	a
					998	a
					82	a
					116	a
					92	a
					50	a
					18	a
					21	a
					23	a
					23	a
					101	a
					合計	89
					合計	101

海水散布7日後(9月1日, 出穂後24日)

区名	乾物重 g m ⁻²		クイ酸含有率 g kg ⁻¹		クイ酸吸収量 g m ⁻²	
	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉
06対照	489	a	153	a	501	a
06クイ酸	483	a	146	a	400	a
					1029	a
					94	a
					132	b
					63	b
					45	a
					19	b
					25	b
					89	b
					23	b
					31	a
					108	a
					合計	96
					合計	106

成熟期(9月20日)

区名	乾物重 g m ⁻²		クイ酸含有率 g kg ⁻¹		クイ酸吸収量 g m ⁻²	
	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉	莖葉	上位2葉
06対照	451	a	122	a	622	a
06クイ酸	480	a	115	a	567	a
					1162	a
					96	a
					168	a
					66	a
					46	a
					19	a
					37	a
					102	a
					48	a
					23	a
					43	a
					114	a
					合計	109
					合計	109

Fisher's PLSD (P<0.05, n=2) により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。
莖葉: 止葉および次葉を除く莖葉, 上位2葉: 止葉および次葉

(3) 海水散布後の一穂塩分量

2005年の海水散布後2日目の一穂塩分量は、海水無散布の05対照区が0.1mg、海水散布した05対照区が1.0mg、および05ケイ酸区が1.0mgで海水処理別にみると同量の塩分量であった(第6-3-4表)。2006年では海水散布後1日目の一穂塩分量は海水無散布の06対照区および06ケイ酸区が0mgで、海水散布の06対照区が1.3mgおよび06ケイ酸区が1.9mgであり(第6-3-4表)であった。2005年および2006年で一穂塩分量が異なる要因として、各試験区の穂数、一穂籾数および m^2 当たり籾数が2006年で2005年より少なかったこと(第6-3-5表)、海水中の塩分濃度が2005年で $27.4gkg^{-1}$ 、および2006年で $30.8gkg^{-1}$ と2006年の方が2005年より高かったことがあげられる。ケイ酸処理の有無に関わらず、 m^2 穂数および m^2 籾数が多くなるほど一穂当たりの塩分量が少なくなることが確認された(第6-3-1図、第6-3-2図)。

(4) 収量に対するケイ酸施用効果

2005年の海水散布による籾被害度をみると、海水無散布の05対照区の0に対し、海水散布した05対照区で3.4、05ケイ酸区で2.5で、ケイ酸処理により籾被害度は低下する傾向であった(第6-3-4表)。2006年においても海水散布した06対照区の籾被害度が8.6で、06ケイ酸区が5.5で2005年と同様にケイ酸処理により籾被害度は低下する傾向であった(第6-3-4表)。

2005年の収量は、海水無散布の05対照区が $567g m^{-2}$ であるのに対し、海水散布した05対照区が $407g m^{-2}$ (海水無散布05対照区の収量に対する割合、72%)、および05ケイ酸区が $471g m^{-2}$ (同、83%)であり、海水散布した05対照区より、05ケイ酸区で収量が5%水準で有意に多かった(第6-3-5表)。2006年においても同様の傾向であった(第6-3-4表)。海水散布条件においてケイ酸処理により収量

第6-3-4表 海水散布後の一穂塩分量と籾被害度

2005年^{*1}

区名	海水散布 の有無	一穂塩分量 mg		籾被害度 1-10	
05対照	無	0.12	b	0.0	b
	有	1.01	a	3.3	a
05ケイ酸	有	1.02	a	2.6	a

2006年^{*2}

区名	海水散布 の有無	一穂塩分量 mg		籾被害度 1-10	
06対照	無	0.01	c	0.6	c
	有	1.25	b	8.6	ab
06ケイ酸	無	0.01	c	0.8	c
	有	1.91	ab	5.5	b

^{*1}2005年は8月23日(出穂後19日)に海水を散布し、海水散布2日後に測定した。

^{*2}2006年は8月25日(出穂後17日)に海水を散布し、海水散布1日後に測定した。

Fisher'sPLSD (P<0.05,2005年はn=3,2006年はn=2)により有意差検定を行った。

それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

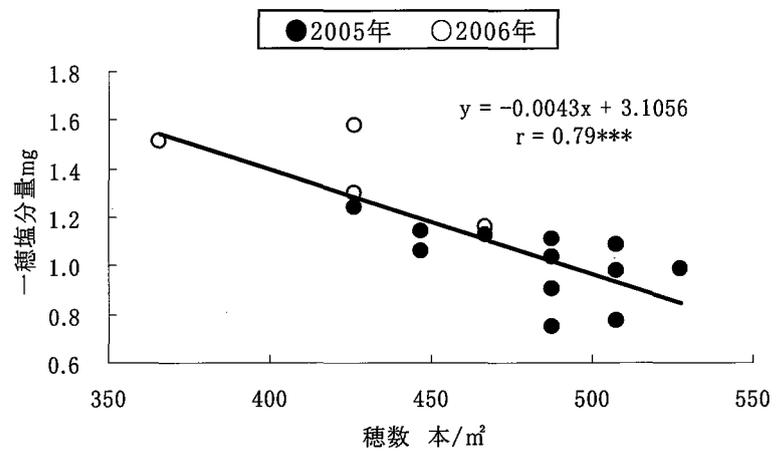
第6-3-5表 収量, 収量構成要素, 整粒歩合, および未熟粒歩合

区名	海水散布の有無		収量		千粒重		粒数歩合		粒数		種数		整粒歩合		未熟粒歩合	
	有	無	gm ²	比	g	%	m ² *100	一穂	m ² *100	一本	m ²	%	%	%	%	
05対照	有	無	407	72	20.5	55	335	64.9	516	62	36	62	17	36	62	17
	有	無	471	83	20.9	68	332	66.5	499	71	28	71	28	71	28	28

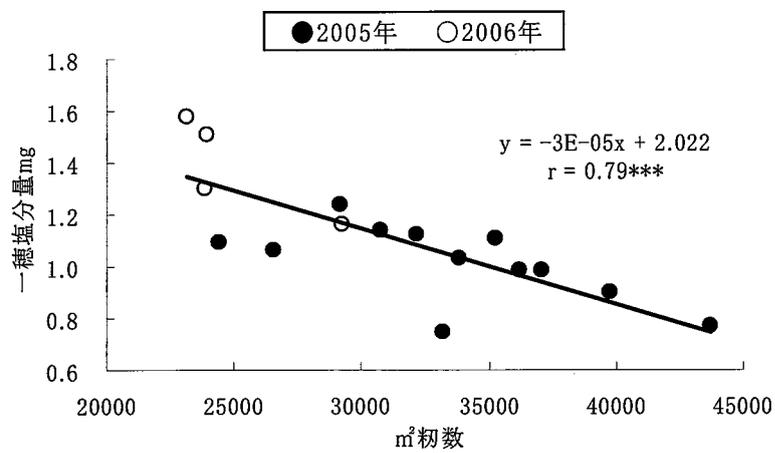
2006年

区名	海水散布の有無		収量		千粒重		粒数歩合		粒数		種数		整粒歩合		未熟粒歩合	
	有	無	gm ²	比	g	%	m ² *100	一穂	m ² *100	一本	m ²	%	%	%	%	
06対照	有	無	265	61	21.0	53	251	51.6	462	59	32	59	32	59	32	32
	有	無	458	106	21.4	84	261	58.9	442	75	20	75	20	75	20	20
06ケイ酸	有	有	313	72	20.8	57	279	64.9	452	62	29	62	29	62	29	29

Fisher'sPLSD (P<0.05, 2005年| \ln =3, 2006年| \ln =2)により有意差検定を行った。それぞれ, 異なる7ルブレットは5%水準で有意差あり。



第6-3-1図 穂数と一穂塩分量との関係
 ***:0.1%水準で有意(2005年と2006年の測定値を
 あわせてn=16で解析)



第6-3-2図 m²初数と一穂塩分量との関係
 ***:0.1%水準で有意(2005年と2006年の測定値を
 あわせてn=16で解析)

が対照より多くなった要因について収量構成要素から見ると、2005年は粒数歩合が高いこと（5%水準で有意）、2006年は粒数歩合が高く m^2 粗数が多いことがあげられる（第6-3-4表）。また、品質の良さを示す整粒歩合がケイ酸処理により対照より高まった（第6-3-4表）。これは、ケイ酸処理した区で粒数歩合が高まったことにより、整粒歩合が高まったと考えられる。

（5）海水散布後のケイ酸含有率および吸収量

海水散布以降、2005年は成熟期に、2006年は海水散布後7日目（出穂後24日）および成熟期にケイ酸含有率およびケイ酸吸収量を測定した（第6-3-2表、第6-3-3表）。2005年の成熟期における茎葉のケイ酸含有率は、海水無散布の対照区が 123 gkg^{-1} 、海水を散布した対照区が 120 gkg^{-1} であったのに対し、ケイ酸処理かつ海水散布を行った05ケイ酸区が 126 gkg^{-1} で有意な差はなかった（第6-3-2表）。2005年の成熟期における上位2葉のケイ酸含有率は、海水無散布の対照区が 155 gkg^{-1} 、海水を散布した対照区が 146 gkg^{-1} であったのに対し、ケイ酸処理かつ海水散布を行った05ケイ酸区が 163 gkg^{-1} と高かった（第6-3-2表）。2005年の成熟期における穂のケイ酸含有率は、海水無散布の対照区が 50 gkg^{-1} 、海水を散布した対照区が 53 gkg^{-1} であったのに対し、ケイ酸処理かつ海水散布を行った05ケイ酸区が 57 gkg^{-1} と高い傾向であった（第6-3-2表）。

2006年の成熟期における茎葉のケイ酸含有率は、海水無散布の対照区が 93 gkg^{-1} 、海水を散布した対照区が 96 gkg^{-1} であったのに対し、06ケイ酸区の海水無散布の区および海水を散布した区で、 97 gkg^{-1} および 106 gkg^{-1} で06ケイ酸区の海水散布した区で有意に高かった（第6-3-3表）。上位2葉および穂については有意な差がなかった。しかし、2006年の海水散布後7日目（出穂後24日）のケイ酸含有率は、上位2葉で対照よりケイ酸処理した区で有意に高く、穂では

海水散布した 06 ケイ酸区で高い傾向であった（第 6-3-3 表）。上位 2 葉および穂のケイ酸含有率に有意な差が認められた，2005 年の成熟期および 2006 年の海水散布後 7 日目（出穂後 24 日）におけるケイ酸吸収量は，2005 年では茎葉および穂で 05 対照区より 05 ケイ酸区で多く，2006 年では上位 2 葉および穂で，06 対照区より海水散布した 06 ケイ酸区が多かった（第 6-3-3 表）。

6-3-4 考察

本報告において，水稻のケイ酸吸収速度が向上する幼穂形成期前後（森ら，2008，森ら 2009a）にケイ酸処理を行い，水稻のケイ酸吸収量および水稻へのケイ酸供給量を高めたケイ酸処理区とケイ酸無処理区に対する，糊熟期における穂部・上位葉部への海水散布により収量を比較した。ケイ酸処理区の収量が無処理区の収量に比べて，2005 年 15.7%，2006 年 18.1% 増収した。水稻穂部および上位葉への塩分付着害による，幼穂形成期前後のケイ酸処理の減収軽減効果が得られた要因として次の 2 点が考えられる。

水稻は，ケイ酸を根から選択的・積極的に吸収する特性により生物的ストレス（病虫害）および非生物的ストレス（気象，水分）を軽減していることが指摘されている（Ma et al., 2000；馬，2006；藤井ら，2008）。本試験における塩分付着害は非生物的ストレスであり，減収メカニズムは潮風害と同様に穂部へ塩分が付着し枝梗枯れが発生し，光合成産物の転流阻害が起こり，登熟の不良・停滞により収量が低下する（森ら，2008）と考えられる。

ケイ酸処理によって潮風害で損傷した部位へのケイ酸の集積を促進することによって，枝梗枯れや籾の被害を軽減していることが考えられる。第 6-3-6 表には 2006 年の枝梗におけるケイ酸吸収量の推移を示した。これによれば，ケイ酸処理によって枝梗のケイ酸吸収量が向上し，ケイ酸無処理区のケイ酸吸収量を 100 とすると海水散

布処理後 12 日, 17 日および 29 日後のケイ酸処理区のケイ酸吸収量はそれぞれ 125, 133 および 130 でいずれも 5% 水準で有意であった。このことは, ケイ酸処理によって塩分付着害による枝梗や籾の損傷部位へのケイ酸の集積を促進する効果があり, そのことが枝梗枯れや籾の被害度を軽減して, 登熟を向上させ (海水処理後 12 日目および 21 日目の 06 対照区の登熟歩合に比べて 06 ケイ酸区のそれは, それぞれ 4.7% および 6.9% 向上した), 最終的な 1.9mm 以上の粒数歩合も向上し, 減収を軽減していることが考えられる (第 6-3-5 表, 第 6-3-7 表)。枝梗部へケイ酸が集積するメカニズムについては, ケイ酸処理を行っていない海水散布区でも枝梗部へのケイ酸吸収量が増加する傾向が認められることから, 塩分付着によって損傷を受けた部位からの蒸散量が増加することによってケイ酸の集積が起こることが考えられるが, 詳細については今後の検討課題である。

さらに, 潮風害による被害が軽減されるもう一つの要因として, ケイ酸を処理した区では対照区より籾数が増加する傾向があるため, 1 籾あたりの塩分量が対照区より少なくなり, 1 籾ごとに被害が分散されて軽減したものと考えられる。本試験においても, 一穂塩分量測定株の穂数と一穂塩分量との関係, および一穂塩分量測定株の籾数を m^2 あたりに換算した m^2 あたり籾数と一穂塩分量との関係をみると, 穂数が少ないほど, 籾数が少ないほど一穂塩分量が多くなる傾向であった (第 5-4-1 図, 第 5-4-2 図)。以上より, ケイ酸による非生物学的ストレスである塩分付着害に対する減収の軽減効果が確認され, 生産現場における潮風害に対する被害軽減の有用な技術と考えられる。

しかし, 本研究では, ケイ酸処理時期の違い (基肥・出穂後) および塩分付着時期の違いによるケイ酸の被害軽減効果, 被害軽減程度, ならびにケイ酸による被害軽減の作用機作などについては検討

第6-3-6表 2006年における登熟期間の枝梗のケイ酸吸収量

区名	海水散布 の有無	枝梗のケイ酸吸収量 gm^{-2}											
		8月14日	8月25日	9月1日	9月8日	9月13日	9月25日						
06対照	無	0.54	a	0.88	a	0.85	a	1.26	a	1.35	a	1.71	a
	有					1.09	b	1.26	a	1.48	a	1.82	a
06ケイ酸	無	0.65	a	0.92	a	1.01	ab	1.28	a	1.41	a	1.95	a
	有					1.19	b	1.57	b	1.97	b	2.38	b

Fisher'sPLSD ($P < 0.05, n=2$)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

第6-3-7表 2006年における登熟歩合の推移

区名	海水散布 の有無	登熟歩合 (%)			
		8月30日	9月4日	9月8日	9月19日
06対照	無	41.1	77.2	80.2	90.5
	有	38.6	a 53.4	a 59.1	a 61.6
06ケイ酸	有	38.8	a 54.4	a 63.8	a 68.5

Fisher'sPLSD (P<0.05,n=2)により有意差検定を行った。それぞれ、異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

されていないため、今後更に検討する必要がある。

6-3-5 要約

登熟期の水稻穂部に塩分付着害を人為的に発生させ、海水由来塩分付着害に対するケイ酸の幼穂形成期前後の追肥による減収の軽減効果を検討した結果は以下のとおりである。

(1)2005年は出穂前10日、2006年は出穂前29日のケイ酸処理により、海水散布前のケイ酸吸収量は両年次ともに対照区よりケイ酸処理区で多い傾向であった。

(2)海水を1株当たり5mL散布した各試験区の一穂塩分量は2005年の海水を散布した全区において1.0mg、2006年の海水を散布した対照区で1.3mg、ケイ酸処理区で1.9mgであった。海水無処理の試験区は0~0.1mgであった。

(3)籾被害度は、両年次ともに海水を散布した対照区より海水を散布したケイ酸処理区で低い傾向であった。

(4)収量は、両年次ともに海水を散布した対照区よりケイ酸を散布したケイ酸処理区で多い傾向であり、ケイ酸処理区で対照区対比16~18%増収した。ケイ酸処理区における増収要因として粒数（登熟）歩合が高いことがあげられる。

(5)海水を散布した対照区より、海水を散布したケイ酸処理で成熟期のケイ酸含有率が高い傾向であった。特に、枝梗部位におけるケイ酸吸収量が対照区に比べて30%向上した。

以上の結果から、海水散布条件下でのケイ酸処理により対照区に比べ、海水が付着した部位のケイ酸含有率が対照区より高くなる傾向があり防御効果が高まった。さらに、ケイ酸処理した区では粒数歩合が対照区より低下せず、ケイ酸により塩分付着害による収量低下が軽減された。

第 6 章 総括

潮風害のような突発的な気象災害の場合は、調査・解析のための十分な準備と調査時間が得られないため、潮風害の実態を示すにとどまる報告が多く、潮風害の発生メカニズム、被害率（減収率）を推定するための方法等の研究事例が冷害や登熟期の高温障害に比べて少なく、被害範囲や被害程度を把握した共済対応や次年度の種子等の対策を講じることが困難な状況にある。その要因としては、①簡易に行える被害推定法、②被害把握に基づいた減収率の推定法、③潮風害の再現方法等が確立されていないことがあげられる。さらに、潮風害の軽減・回避技術については、被害後に水を散布して塩分を洗い流すといった、水田のような広い面積には対応できない報告にとどまっている（山本ら 1997）。この点についても、被害防止（軽減）方策が示されている冷害や高温障害に比べて、現実的な被害防止（軽減）方策が示されていないので、潮風害に対して極めて脆弱な状況にあり、軽減対策の開発が生産現場から強く求められている。そこで、本論文では(1)潮風害発生時の台風の特徴、被害発生メカニズムから見た潮風害発生予測項目の提示、(2)電気伝導度計を用いた被害程度の把握・被害把握に基づいた減収率の推定法、(3)潮風害による被害の軽減技術を明らかにすることを目的として以下の検討を行った。

(1) 台風の特徴および被害の実態から見た潮風害の発生メカニズム

台風（2004 年台風 15 号）の特徴からみた潮風害のメカニズムについては、①南西風で風速が強く（ 15ms^{-1} 以上）、風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いこと（5 時間以上）によって、飛散した海塩粒子が平野の内陸部まで運搬されたこと、②波が高いことによって波が海岸線に打ち寄せられ波しぶきが上がったこと、③降雨が少ないことによって、農作物に付着した塩分が洗い流されなかったこと、④

水稻の生育時期が潮風害の被害を受けやすい時期であったことが相互に重なりあって潮風害を広範囲にしかも被害程度の拡大につながったと考えられる（藤井ら 2006）。

2004 年台風 15 号以降に日本海を北上した 2005 年台風 14 号および 2006 年台風 13 号が山形県庄内沖を通過する時の山形県庄内地域における海塩粒子の飛散状況によれば、いずれの台風に伴う海塩粒子も庄内地域の北部地域で南部地域より多く付着し、北部地域では海岸線に近いほど多くなる傾向であった。この結果は、山形県の庄内地域の農作物に甚大な被害を及ぼした 2004 年台風 15 号による 1 穂当たり塩分付着量の分布図（第 2-4 図）と同様の傾向を示した。酒田測候所における台風通過時の最大風速および台風通過後 24 時間の降雨量は 2005 年台風 14 号が 15.7ms^{-1} および 1.0mm 、2006 年台風 13 号が 9.8ms^{-1} および 10mm と 2004 年台風 15 号同様に風台風であり海塩粒子の飛散を可能とした。しかし、潮風害の発生に関与する台風通過時の平均的な「はえぬき」の生育時期は、2005 年台風 14 号の場合、出穂期が 8 月 5 日で出穂後 33 日目（黄熟期）、2006 年の台風 13 号の場合、出穂期が 8 月 10 日で出穂後 40 日目（黄熟期～完熟期）、2004 年の台風 15 号の場合、出穂期が 8 月 3 日で出穂後 17 日目（糊熟期）であり、2004 年台風 15 号以外は潮風に感受性の高い時期（乳熟期～糊熟期）を過ぎていることから、減収を伴う潮風害の発生は認められず、一部で籾の白化を確認するに留まった（柴田ら 2009）。以上のことから、海塩粒子の飛散量は、風速が強いほど、海岸線からの距離が近いほど多くなる傾向であった。このことは、山形県の庄内地域では台風通過時が潮風害の感受性の高い時期であれば、潮風害の発生が起こることを示唆している。さらに、潮風害の発生に関与する台風の勢力は、暖かい海面から供給された水蒸気が凝結して雲粒になるときに放出される熱をエネルギーとして

発達する。台風の勢力維持と関連する海水温は、地球温暖化に伴い上昇している。日本海における 2007 年までの約 100 年間にわたる海水域平均海面水温の上昇率は、日本海の北海道側の日本海北東部では長期的変化傾向は認められなかった。一方、北海道の江差付近から新潟付近までの日本海中部では $+1.7^{\circ}\text{C}/100$ 年、富山付近から島根付近までの日本海南部では $+1.2^{\circ}\text{C}/100$ 年上昇していて、世界全体や北大西洋全体における海面水温の上昇率（それぞれ、 $+0.50^{\circ}\text{C}/100$ 年、 $+0.46^{\circ}\text{C}/100$ 年）の 2~3 倍であり（気象庁、舞鶴海洋気象台）、台風へのエネルギーの供給がなされ、これまで、潮風害の発生が極めて少なかった東北地域の日本海側における発生が懸念され、暖地のみならず全国規模で潮風害等の大きな気象災害の発生が考えられる。

被害の実態から見た水稲における潮風害の特徴と減収メカニズムは次のようにまとめることができる。潮風害の発生に伴う枝梗枯れ数歩合は海岸線からの最短距離が遠くなるほど低下する傾向で、海岸線から約 6 km までは枝梗枯れ数歩合は 80% 以上（被害程度：多～甚）に、6~10 km では枝梗枯れ数歩合は 50~70%（被害程度：中）に、10~15 km では 20~40%（被害程度：少～微）に、15 km 以上では 20% 未満（被害程度：無）に分類され、推定した 1 穂塩化ナトリウム量と枝梗枯れ数歩合との関係は、1 穂塩化ナトリウム量が 1 mg 未満では 1 穂塩化ナトリウム量が多いほど枝梗枯れ数歩合が高くなった。一方、1 穂塩化ナトリウム量が 1 mg 以上になると枝梗枯れ数歩合は概ね 90% 以上で、被害程度の区分では多～甚に相当した。台風に伴う海塩粒子の付着による潮風害による減収メカニズムを明らかにするため、精玄米重に対する各要素の影響について解析すると、千粒重、屑米重、粒厚（1.9 mm 以上）分布など登熟に関係する要素で相関係数が高く、通常、精玄米重との相関が高い m^2 籾数との

関係は認められないことも潮風害の大きな特徴と考えられた。これは、潮風害に限らず籾数が決定した後の登熟期に遭遇した気象災害であるため、登熟を制限する要因が登熟期以降に変動する要因に左右されると考えられる。また、食味を左右する玄米中タンパク質含有率は、被害程度が大きいほど千粒重が低下して窒素濃度が高まるため、増加する傾向が認められた。以上から、潮風害による精玄米重低下のメカニズムは塩分が穂へ付着して枝梗枯れが発生し（1穂塩化ナトリウム量によって白化割合が高くなる）、そのことによって登熟が停滞し、屑米が増加し精玄米重が低下するという一連の流れであることが確認された（森ら 2008a）。

(2) 実際の潮風害の被害評価法および減収率の推定法

台風に伴う潮風害による水稻の被害程度には、これまで、穂部に付着した塩化ナトリウム量を指標とした報告があり、1穂当たり塩化ナトリウム量が1mg以上になると被害が顕著に現れるとされている（市丸ら 1992）。硝酸銀滴定（市丸ら 1992）や原子吸光光度、イオンクロマトグラフィー（長谷川ら 1995a, 長谷川ら 1995b）による塩化ナトリウム量の定量精度は高いが、簡便性・迅速性に欠け、設備の点からも現場における対応は難しい状況にある。そこで、2004年の台風15号によって潮風を受けた水稻の穂部に付着した塩分量の測定に、簡便な方法として土壌溶液中の塩類濃度の測定に用いられている（亀和田 1997）EC計を利用する方法を試みた結果、既知濃度の塩化ナトリウム溶液とEC測定値との関係から求めた水稻穂部の塩分量は、イオンクロマトグラフィーで定量した塩化ナトリウム量と近似しており、穂に付着した塩分量をECによって推定することが可能であると考えられた。ECを利用した簡易診断によって潮風害程度・範囲の把握が可能であることが明らかになった（森ら 2007）。

潮風害による被害程度別の1穂当たりの推定塩化ナトリウム量と

減収率について、山形県の庄内地域の主力品種である「はえぬき」について示すと、1穂当たり塩化ナトリウム量が1.51 mg以上の被害程度甚で減収率55~70%、0.91~1.5 mgの被害程度多で減収率24~54%、0.71~0.90 mgの被害程度中で減収率12~39%、0.51~0.70 mgの被害程度小で減収率13~18%、0.5 mg以下の被害程度微で減収率3~14%に分類された。ECによる1穂塩分量の簡易測定法を用いた減収率の推定を本研究では検討していないが、推定することは可能であろうと考えられた。

(3) 現場における潮風害の発生予測項目と手順

現場において潮風害が発生した場合、①潮風害の被害範囲の推定、②各種対策を早急に講ずるため潮風害の発生に伴い減収量の推定、③収量確保・品質向上対策である刈取時期の判断や網目の選択を行うことが必要になる。そこで、東北地方（日本海側）では次の手順で潮風害の発生を予測する必要があるものと考えられる。潮風害の一次予測として台風襲来前に準備する情報としては①台風の進路、②台風が日本海を進む場合は、日本海の海面水温の情報を入手する。そして、台風が海上（日本海）だけを通り、しかも日本海の海面水温が高く山形近海をゆっくり通過し、山形県沖通過時の勢力が強く（暴風域が大きく）、風台風と判断される時には潮風害発生の危険性が高いことを予想する。次に潮風害の二次予測として①台風通過後に収集した情報（風向、風速、波高、降水量）のうち、南西風の最高風速が 15ms^{-1} 以上、 10ms^{-1} 以上の南西風~西風の継続時間が5時間以上、波が高く、降水量が少ない場合は潮風害の発生を疑い、②水田ほ場より稲株を採取して、3章で示した電気伝導度を利用した簡易測定法を用いて穂の塩分量を測定し、被害の範囲および程度を判断して、③4章で示した減収率の推定式より現場における減収程度の推定を行うとともに、④当該年度の収量確保・品質向上対策および

次年度の生産対策（種子対策、技術対策等）の実施を迅速に行うことを提示した。

(4) 潮風害による被害の軽減技術

台風に伴う潮風害に遭遇した場合に被害を軽減する技術対策については、2004年台風15号に伴う潮風害の発生時に、ケイ酸資材を継続的に施用していた水田で、潮風害による減収を軽減することが確認された。このことは、ケイ酸を施用すると、水稻のケイ酸含有率が高まり、表層へのケイ酸沈着量が増加して、穂・枝梗部への塩分付着によって発生する潮風害軽減に対しても塩分の組織内部への侵入を軽減できることを示唆している。しかし、潮風害は登熟期間中の気象災害であり、ケイ酸による潮風害の被害軽減の作用機作や登熟期間中のケイ酸供給を促進する方策、稲体の各部位におけるケイ酸の分布など明らかにして、普遍的な潮風害の被害軽減技術を構築する必要がある。

そこで、水稻のケイ酸吸収特性を土壌・ケイ酸資材の違いから検討した結果、水稻による時期別ケイ酸吸収速度は幼形期から穂揃期 > 有効分げつ期から幼形期 = 穂揃期から成熟期 > 分げつ初期から有効分げつ期 > 移植から分げつ初期で幼形期以降の吸収速度が高くなること、稲体のケイ酸吸収量は幼形期以降の土壌間差が大きくなり土壌由来ケイ酸供給量が高い土壌で稲体のケイ酸吸収量が多くなることを明らかにした。水稻によるケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し、土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念され、ケイ酸質肥料の追肥も含めたケイ酸施用に留意する必要があることを明らかにした（森ら2008b）。

ケイ酸溶出量がケイカルよりも高い資材（加工鉍さいりん酸肥料およびシリカゲル肥料）について、ケイ酸施用量をケイカルの全層

施用量の 1/3 に減量して対応した幼形期施用は、ケイ酸成分当たりの収量および費用対効果がケイカル[®]の全層施用よりも優ることが確認された。このことから、加工鉍さいりん酸肥料およびシリカゲル肥料の幼形期施用は有用な技術であることを明らかにした（森ら 2009b）。

実際に、ケイ酸施用が潮風害の被害軽減技術として有用であることを確認するためには、潮風害を再現する方法の確立が必要である。潮風害の再現試験については、坪井ら（1961）および山本ら（1996, 1997）がポット栽培の水稻に風洞を用いて風と塩水処理を行うことにより、潮風害を再現して収量および品質への影響を検討している。しかし、この場合、根から塩分を吸収する塩害も潮風害と同時に起こっている可能性が高いと考えられ、ポット条件での報告にとどまっている。潮風害を再現するには特に穂部および上位葉部に塩を付着させる必要があるが、穂部への塩分付着量と収量および品質との関係については再現試験によって検討した事例は少ない。そこで、2004 年台風 15 号通過時と同様の糊熟期に海水を 1 株当たり 0, 5, 10 および 15mL 散布することによって潮風害を再現し、散布量と穂部への塩分付着量との関係、被害程度、収量および品質について 2004 年台風 15 号による潮風害の実際のデータと比較検討を行った。海水散布量と一穂当たり塩分量との関係をみると、海水散布量が多いほど 1 穂塩分量は多くなった。再現試験および実害データともに、1 穂塩分量と減収率ならびに整粒歩合との関係はほぼ同様の傾向を示した（森ら 2009a）。潮風害における塩分付着の害について、海水散布による潮風害の再現によって解析は可能であると考えられる。

海水散布による潮風害の再現方法（糊熟期における穂部・上位葉部への海水散布）を用いて、水稻によるケイ酸吸収速度が向上する幼形期前後のケイ酸施用によって収量がケイ酸無施用区の収量に比

べて、2005年16%、2006年18%増収した。水稻穂部および上位葉への塩分付着害による、幼形期前後のケイ酸処理の減収軽減効果が得られた要因として次の2点が考えられる。ケイ酸処理によって枝梗のケイ酸吸収量が向上し、ケイ酸無処理区のケイ酸吸収量を100とすると海水散布処理後12日、17日および29日後のケイ酸処理区のケイ酸吸収量はそれぞれ125、133および130でいずれも5%水準で有意であった。このことは、ケイ酸処理によって塩分付着害による枝梗や籾の損傷部位へのケイ酸の集積を促進する効果があり、そのことが枝梗枯れや籾の被害度を軽減して、登熟を向上させ（海水処理後12日目および21日目の06対照区の登熟歩合に比べて06ケイ酸区のそれは、それぞれ4.7%および6.9%向上した）、最終的な1.9mm以上の粒数歩合も向上し、減収を軽減していることが考えられる。枝梗部へケイ酸が集積するメカニズムについては、ケイ酸処理を行っていない海水散布区でも枝梗部へのケイ酸吸収量が増加する傾向が認められることから、塩分付着によって損傷を受けた部位からの蒸散量が増加することによってケイ酸の集積が起こることが考えられるが、詳細については今後の検討課題である。さらに、潮風害による被害が軽減されるもう一つの要因として、ケイ酸を処理した区では対照区より籾数が増加する傾向があるため、1籾あたりの塩分量が対照区より少なくなり、1籾ごとに被害が分散されて軽減したものと考えられる。本試験においても、一穂塩分量測定株の穂数と一穂塩分量との関係、および一穂塩分量測定株の籾数を m^2 あたりに換算した m^2 あたり籾数と一穂塩分量との関係をみると、穂数が少ないほど、籾数が少ないほど一穂塩分量が多くなる傾向であった。以上より、ケイ酸による非生物学的ストレスである塩分付着害に対する減収の軽減効果が確認され、生産現場における潮風害に対する被害軽減の有用な技術と考えられる（森ら 2009c）。

(5) 今後の発展方向

山形県では、2004年の台風15号以降に日本海を北上する台風が通過する際に水田での海水飛散状況を調査し、山形県の日本海沿岸地帯では毎年海水飛散があること、また飛散範囲は海岸線だけでなく内陸部まで及ぶことを確認している(柴田ら 2009)。これらのことから、台風の通過するコースや規模等によっては海岸線を有するすべての都道府県でいつでも発生しうる気象災害といえる。このように、潮風害は全国レベルで甚大な被害を及ぼす緊急性の高い気象災害といえるが、他の気象災害(冷害・高温障害等)と比較すると被害予測や技術対策に対する研究進度はきわめて低い。

今後は、潮風害の発生予測(被害推定)と軽減技術対策を一体化したシステムの構築が重要である。特に、潮風害は、気象要因(台風の時期や進路、波高、風速、風向、降雨の有無等)、地形要因(山や丘陵、防風林、建築物等)、水稻生育要因(生育ステージ等)が相互に関わって発生する。そこで、これらの要因を組み合わせる潮風害に関する気象モデルと塩分飛散予測モデルを融合したモデル、および全国どこでも被害リスクマップを作成できる技術を開発する必要がある。最終的には、本研究で開発した「潮風害予測技術」および「幼形期のケイ酸処理による被害軽減技術」を搭載した水稻潮風害 Web 情報発信システムを開発することが望まれる。これは農業気象災害である潮風害に対応したものとして、全国どこでも誰でも活用可能なシステムとすることが重要である。潮風害に対するリスクマップを用いることによって、地域毎の潮風害に対する被害程度が把握でき、短期的には被害軽減対策(ケイ酸施用)の啓蒙、中長期的には防風帯の設置等への利活用が期待される。

摘要

潮風害対策の一環として実施されているモニタリング調査によれば、2004年以降台風通過時の作物への塩分付着は海岸線からかなり離れた内陸部においても確認されている(柴田ら 2009)。これは、台風の通過するコースや規模等によっては海岸線を有するすべての都道府県でいつでも発生しうる気象災害といえる。このように、潮風害は全国レベルで甚大な被害を及ぼす緊急性の高い気象災害といえるが、他の気象災害(冷害・高温障害等)と比較すると被害予測や技術対策に対する研究進捗は極めて低い。そこで、本論文では(1)潮風害発生時の台風の特徴、被害発生メカニズムから見た潮風害発生予測項目の提示、(2)電気伝導度計を用いた被害程度の把握・被害把握に基づいた減収率の推定法、(3)潮風害による被害の軽減技術を明らかにすることを目的として以下の検討を行った。

(1) 台風の特徴および被害の実態から見た潮風害の発生メカニズム

台風の特徴からみた潮風害のメカニズムについては、①南西風で風速が強く(15ms^{-1} 以上)、風速 10ms^{-1} 以上の継続時間が長いこと(5時間以上)によって、飛散した海塩粒子が平野の内陸部まで運搬されたこと、②降雨が少ないことによって、農作物に付着した塩分が洗い流されなかったこと、③水稻の生育時期が潮風害の被害を受けやすい時期であったことが相互に重なりあって潮風害を広範囲にしかも被害程度の拡大につながったと考えられる。潮風害による精玄米重低下のメカニズムは塩分が穂へ付着して枝梗枯れが発生し(塩分付着量によって白化割合が高くなる)、そのことによって登熟が停滞し、屑米が増加し精玄米重が低下するという一連の流れであることを明らかにした。

(2) 実際の潮風害の被害評価法および減収率の推定法

台風に伴う潮風害による水稻の被害程度には、これまで、穂部に

付着した塩化ナトリウム量を指標とした報告があり、2004年の台風15号によって潮風を受けた水稻の穂部に付着した塩分量の測定に、簡便な方法として土壌溶液中の塩類濃度の測定に用いられているEC計を利用する方法を試みた結果、ECを利用した簡易診断によって潮風害程度・範囲の把握が可能であることが明らかになった。潮風害による被害程度別の1穂当たりの推定塩化ナトリウム量と減収率について、山形県の庄内地域の主力品種である「はえぬき」について示すと、1穂当たり塩化ナトリウム量が1.51 mg以上の被害程度甚で減収率55～70%、0.91～1.5 mgの被害程度多で減収率24～54%、0.71～0.90 mgの被害程度中で減収率12～39%、0.51～0.70 mgの被害程度小で減収率13～18%、0.5 mg以下の被害程度微で減収率3～14%に分類された。ECによる1穂塩分量の簡易測定法を用いた減収率の推定を本研究では検討していないが、推定することは可能であろうと考えられた。

(3)現場における潮風害の発生予測項目と手順

東北地方（日本海側）における潮風害の一次予測として①台風の進路、②台風が日本海を進む場合は、日本海の海面水温の情報を台風襲来前に入手する。そして、台風が海上（日本海）だけを通り海面水温が高く山形近海をゆっくり通過し、山形県沖通過時の勢力が強く風台風と判断される時には潮風害発生の危険性が高いことを予想する。次に、二次予測として①台風通過後に収集した情報（風向、風速、波高、降水量）のうち、南西風の最高風速が 15ms^{-1} 以上、 10ms^{-1} 以上の南西風～西風の継続時間が5時間以上、降水量が少ない場合は潮風害の発生を疑い、②水田ほ場より稲株を採取して、EC計を利用した簡易測定法により穂の塩分量を測定し、被害の範囲・程度を判断して、③減収率の推定式より現場における減収程度の推定を行うとともに、④当該年度の収量確保・品質向上対策、⑤次年度の生

産対策（種子・技術対策等）の実施を迅速に行うことを提示した。

（4）潮風害による被害の軽減技術

2004年台風15号に伴う潮風害の発生時に、ケイ酸資材を継続的に施用していた水田で、潮風害による減収を軽減することが確認された。そこで、水稻のケイ酸吸収特性を土壌・ケイ酸資材の違いから検討した結果、ケイ酸吸収速度は幼形期以降に向上し、土壌からのケイ酸供給量の小さいほ場においては幼形期以降のケイ酸供給量が不足することが懸念されることを明らかにした。ケイ酸の吸収速度が高まる幼形期以降のケイ酸吸収を効果的に行う方法として、ケイ酸溶出量がケイカルよりも高い資材（加工鉍さいりん酸肥料・シリカゲル肥料）について、ケイ酸施用量をケイカルの全層施用量の1/3に減量して対応した幼形期施用は、ケイ酸成分当たりの収量および幼形期以降のケイ酸吸収がケイカルの全層施用よりも優ることを明らかにした。実際に、ケイ酸施用が潮風害の被害軽減技術として有用であることを確認するためには、潮風害を再現する方法の確立が必要であり、2004年台風15号通過時と同様の糊熟期に海水散布による再現試験を行い、実害データの1穂塩分量と減収率ならびに整粒歩合との関係はほぼ同様の傾向を示し、海水散布による潮風害の再現が可能であることを明らかにした。

海水散布による潮風害の再現方法（糊熟期における穂部・上位葉部への海水散布）を用いて、水稻によるケイ酸吸収速度が向上する幼形期前後のケイ酸施用によって収量がケイ酸無施用区の収量に比べて、2005年16%、2006年18%増収した。幼形期前後のケイ酸処理の減収軽減効果が得られた要因として次の2点が考えられる。ケイ酸施用によって塩分付着害による枝梗や籾の損傷部位へのケイ酸の集積を促進する効果があり、そのことが枝梗枯れや籾の被害度を軽減して、登熟を向上させ減収を軽減していること、ケイ酸を施用

した区では対照区より籾数が増加する傾向があるため，1 籾当たりの塩分量が対照区より少なくなり，1 籾ごとに被害が分散されて軽減したものと考えられる．以上より，ケイ酸による非生物学的ストレスである塩分付着害に対する減収の軽減効果が確認され，生産現場における潮風害に対する被害軽減の有用な技術であることを明らかにした．

引用文献

- 東江栄・森和一・窪田文武・Kaufman P.B. 1992: 水稻の光合成・乾物生産に対するケイ酸の生理的役割, 第1報 ケイ酸および遮光処理の影響, 日作紀, 61, 200-206
- 赤井重恭 1953: 稻胡麻葉枯病に関する研究 VII 水稻に対する珪酸施用と稻胡麻葉枯病並びに稻熱病発生との関係について, 日植病報, 17, 109-112
- 天野高久 1984: 水稻の冷害に関する作物学的研究, 北海道農試研報 46, 1-67
- Ando H., Kakuda k., Fujii H., Suzuki K. and Ajiki T. 2002: Growth and Canopy structure of rice plant grown under field condition as Affected by Si. Soil Sci. Plant Nutr., 48, 429-432
- Bouwman, A.F. 1990: Soils and Greenhouse Effect, 575pp, John Wiley & Sons, New York.
- 土居健一・真鍋尚義・菊地一幸・松永靖雄・竹藤賢次郎 1986. 1985年の台風13号による水稻の潮風害. 日作九支報 53: 13-16
- 土壤環境分析法編集委員会編 1997: 土壤環境分析法, 195-197, 博友社, 東京
- Epstein E. 1994: The anomaly of silicon in plant biology. Proc. Natl. Acad. Sci. 91, 11-17
- FAO 2006: World Agriculture: Towards 2030/2050.
- FAO 2008: FAO Statistics Division 2008, <http://faostat.fao.org/>
- 藤井弘志・早坂剛・横山克至・安藤豊 1999a: シリカゲルの苗箱施用が水稻苗の活着および初期生育に及ぼす影響, 土肥誌, 70, 785-790
- 藤井弘志・安藤豊・渡部幸一郎 1999b: 水田土壌における土づくりの必要性, 農業技術, 54, 462-467

- 藤井弘志 2002: 水稻の生育・収量・食味に及ぼすケイ酸の効果, 日本土壤肥料学会編, ケイ酸と作物生産, 40-77, 博友社
- 藤井弘志・小田九二夫・柴田康志・森静香・今川彰教・安藤豊 2006. 2004年台風15号の特徴と山形県における潮風害の実態. 日作紀75, 459-464.
- 藤井弘志・森静香・安藤豊 2008: 水稻に対する日照不足条件下におけるケイ酸の効果. 土肥誌, 79, 471-477
- 長谷川利広・鳥潟隆雄 1995a. 平成5年・早期水稻潮風害実態調査報告 第1報. 潮害調査専門家等検討会(九州東海大学):9-11
- 長谷川利広・鳥潟隆雄 1995b. 平成6年・早期水稻潮風害実態調査報告 第2報. 潮害調査専門家等検討会(九州東海大学):12-18
- 長谷部亮, 飯村康二 1986 水耕培地のケイ酸供給濃度と水稻の生育, 土肥誌, 57, 42-48
- 早坂剛・藤井弘志・安藤豊・生井恒雄 2000: イネ苗いもちのケイ酸資材シリカゲル育苗混和による発病抑制. 日植病報, 66, 18-22
- Hayasaka, T., Fujii, H., and Namai, T. 2005: Silicon content in rice seedlings to protect rice blast fungus at the nursery stage. J Gen Plant Pathol. 71:169-173
- Hayasaka, T., Fujii, H., and Ishiguro, K. 2008: The role of Silicon in preventing appressorial penetration by the rice blast fungus. Phytopathology. 98:1038-1044
- 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫 1993: 日照, ケイ酸施用, 降下浸透が水稻の穂肥窒素利用率に及ぼす影響, 土肥誌, 64, 650-654
- 星川清親 1985: 食用作物, 126-127, 養賢堂, 東京
- 北海道農政部編 1988: 昭和63年普及奨励並びに指導参考事項, 昭和62年潮風害に伴う水稻の登熟障害と種子粗の発芽力, 81-84, 北海道

- 市丸喜久・牧山繁生・水田徳美・土橋利則・釘本忠人・岩田誠一郎 1992.
1991年の台風17号による水稲潮風害の実態について. 日作九支
報 59:13-15.
- 伊藤延男 1980:イネ障害型冷害における葯の生理学的異常及びその
出現時期, 北海道農試研報 125, 41-75
- IPCC 2000:A Special Report:Land Use, Land-Use Change andForestry
IPCC 2002:Climate Change 2001:The Scientific Basis.
IPCC 2007:Climate Change 2007.The Physical Science Basis.
Summary for Policymaker.
- 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
- 岩田岩保・馬場尅 1962:水稲品種の耐肥性に関する研究,第2報 光
合成から見た水稲の耐肥性と珪酸との関係, 日作紀, 30, 237-240
- 亀和田國彦 1997. 電気伝導率 (EC)(1:5水浸出法). 土壤環境分析
法編集委員会編, 土壤環境分析法. 博友社, 東京. 202-204.
- 加藤直人, 尾和尚人 1996a: 鉍さいケイ酸質肥料の溶解性に及ぼす
pH, カルシウムの影響, 土肥誌, 67, 626-632
- 加藤直人, 伊森博志, 尾和尚人 1996b: 鉍さいケイ酸質肥料の湛水
土壌中における溶解過程, 土肥誌, 67, 640-647
- 加藤直人, 尾和尚人 1996c: 土壌溶液のケイ酸濃度を決定する要因
—土壌溶液 pH, カルシウム濃度, 二酸化炭素および鉍さい施用の
影響, 土肥誌, 67, 655-661
- 加藤直人 2001: pH6.2リン酸緩衝液抽出による水田土壌の可給態ケ
イ酸の簡易評価法, 平成11年度総合農業の新技术, 農業研究セン
ター, つくば, 146-150
- 加藤直人 2002: ケイ酸質資材の普及拡大に向けた最近の研究動向,
ケイ酸と作物生産, 120-151, 博友社, 東京

- 狩野宏美・米山忠克・熊澤喜久雄 1974：発光分析法による重窒素の定量法について，土肥誌，45，549-559
- 珪酸石灰の出荷量の推移，珪酸石灰肥料協会・1980-2004
- 気象庁（気象統計情報）1960～2008：<http://www.data.jmago.jp/obd/stats/etm/>
- 気象庁（舞鶴海洋气象台）：海洋の健康診断，海面水温の長期的変化傾向
- 北田敬宇，亀川健一，秋山豊 1992：逐次上澄液法による輪換田土壌ケイ酸の有効化過程の解明，土肥誌，63，31-38
- 古賀潤弥・土谷大輔・岳田司・佐田利行 2004：水稻の高温登熟による背白粒の発生を抑える施肥条件，九州沖縄農業研究成果情報，19（上），53-54
- 国土交通省東北地方整備局酒田港湾事務所 2004
- 国立情報研究所 2004：<http://agoraex.ni.ac.jp/digital-typhoon/>
- 舞鶴海洋气象台 2004：<http://www.maizuru-jma.go.jp/>
- 小牧有三・若松謙一・福井清美・桑原浩和・重水剛・東孝行 2005：背白・基白粒の発生程度を利用した水稻の高温耐性検定法の基準品種，九州沖縄農業研究成果情報，20，55-56
- 今野周・今田孝弘・中山芳明・宮野斉・三浦浩・高取寛・早坂剛 1991：登熟期の環境要因及び生育条件が水稻の登熟，収量及び品質に及ぼす影響，山形農試研報，25，7-22
- 小葉田亨・植向直哉・稲村達也・加賀田恒 2004：子実への同化産物供給不足による高温下の乳白米発生，日作紀，73，315-322
- 熊谷勝巳，今野陽一，黒田潤，上野正夫 1999：山形県における農業用水のケイ酸濃度，土肥誌，68，636-637
- 熊谷勝巳，今野陽一，佐藤之信，中川文彦，長沢和弘，上野正夫 2004：山形県内の水田におけるケイ酸供給力の評価，山形農事研報，37，

- Jianrong Fu, Ho Ando and Ken-ichi Kakuda 1999: Nitrogen Mineralization in Two Paddy Soils as Affected by Silica Source Addition, Bulletin of the Yamagata University (Agricultural Science) 13-2, 173-180
- Ma, J. F. Mitani, M., Nagao, S., Konishi, S., Tamai, K., Iwashita, T. and Yano, M. 2004: Characterization of Si uptake system and molecular mapping of Si transporter gene in rice. Plant Physiol. 136: 3284-3289.
- Ma, J. F., Miyake, Y. and Takahashi, E. 2006: Silicon in Agriculture, Chapter 2 Silicon as a Beneficial Element for Cropplants, Ma, J. F., Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, M., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y. and Yano, M. Silicon transporter in rice. Nature, 440: 688-691
- 馬建鋒 2006: イネのケイ酸要求性と吸収特性, イネの生産性, 品質と栄養生理, 37-54, 博友社, 東京
- 前田英俊・田崎信幸・竹内公博・小川義雄・船場貢 1992. 長崎における平成3年大型台風による水稲被害の実態と解析 第3報 県央地域における台風17,19号による水稲被害の実態と生態的解析, 日作九支報 59 9-12
- 前川和正, 渡辺和彦, 相野公孝, 岩本豊 2001: 各種ケイ酸資材施用による育苗期のイネいもち病の発病抑制, 土肥誌, 72, 56-62
- 前川和正, 渡辺和彦, 神頭武嗣, 相野公孝, 岩本豊 2002: イネ葉身におけるいもち病菌侵入部位でのケイ素の蓄積, 土肥誌, 73, 103-108
- Makabe S, Kakuda K, Sasaki Y, Ando T, Fujii H and Ando H 2009: Relationship between mineral composition or soil texture and

- available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan. Soil Sic. Plant Nutr. 55, 300-308
- 間藤徹・村田伸治・高橋英一 1991: イネへのケイ酸施用が有用である理由, 土肥誌, 62, 248-251
- 松田裕之・藤井弘志・安藤豊・柴田康志・横山克至・森静香・小南力 2000a: 精米一粒当たり窒素量および一穎花当たり窒素量と精米一粒重が精米中タンパク質含有率に与える影響, 土肥誌, 71, 41-46
- 松田裕之・藤井弘志・安藤豊・森静香・小南力・柴田康志 2000b: 一穂穎花数の多少が精米中のタンパク質含有率に与える影響, 土肥誌, 71, 697-699
- 松田智明 2004: イネの登熟期の子房における転送系の構造と貯蔵物質の蓄積, 日作紀, 73 (別 1) 300-301
- 松尾孝嶺, 清水正治, 角田重三郎, 村田吉男, 熊澤喜久雄, 蓬原雄三, 星川清親, 前田英三, 山崎耕宇編 1990: 稻学大成, 第 1 巻形態編, 第 2 章, 農文協
- 松村修・千葉雄大 2006: 高温登熟状況下で高品質を維持する稲作生産者の諸特徴, 日作紀, 75 (別 2) 54-55
- 松島省三・角田公正 1957: 水稻収量成立と予察に関する作物学的研究 水稻登熟機構の研究(6), 生育各期の気温較差が水稻の登熟に及ぼす影響, 日作紀, 25, 204-206
- 丸山篤志・大場和彦 2006: TGC を用いた水稻 8 品種の受精率に対する高温の影響評価, 日本農業気象学会 2006 春季大会講演要旨集, 34
- 宮森康雄 1996: 低タンパク米生産におけるケイ酸の役割とその診断指標, 土肥誌, 67, 696-700
- 森静香・柴田康志・横山克至・安藤正・藤井弘志 2003: 土壤乾土効

- 果が大きい年次における中干しおよび幼穂形成期追肥窒素量の調節による籾数の制御効果, 土肥誌, 74, 823-825
- 森静香・藤井弘志・安藤豊 2006: ロックウールマット育苗による水稻苗のケイ酸含有率向上効果, 土肥誌, 77, 185-189
- 森静香・柴田康志・小田九二夫・藤井弘志・安藤豊 2007. 電気伝導率を利用した水稻穂部塩分量の簡易測定における潮風害程度・範囲の把握. 日作紀 76, 379-382.
- 森静香・松田裕之・柴田康志・藤井弘志 2008a. 2004年台風15号の潮風害による水稻被害の特徴と減収率の推定. 日作紀 77:13-21.
- 森静香・藤井弘志・安藤豊 2008b: 水稻の時期別ケイ酸吸収速度に及ぼす土壌のケイ酸供給量の影響, 土肥誌, 79, 387-391
- 森静香・柴田康志・松田裕之・藤井弘志 2009a: 2004年台風15号の潮風害を受けた水稻と塩分を付着させた水稻との被害程度の比較. 日作紀, 78, 87-91
- 森静香・藤井弘志 2009b: 水稻におけるケイ酸資材の幼穂形成期施用の有効性, 土肥誌, 80, 136-142
- 森静香・柴田康志・松田裕之・藤井弘志 2009c: 登熟期の水稻穂部への海水由来塩分付着害に対するケイ酸による減収の軽減効果, 土肥誌, 80 (掲載証明書)
- 森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2002: 高温が水稻の登熟に及ぼす影響—高夜温と高昼温の影響の違いの解析—, 日作紀, 71, 102-109
- 森田敏・白土宏之・高梨純一・藤田耕之輔 2004: 高温が水稻の登熟に及ぼす影響—穂・茎葉別の高夜温・高昼温処理による解析—日作紀, 73, 77-83
- 森田敏 2005: 水稻の登熟期の高温によって発生する白未熟粒, 充実不足および粒重低下, 農業技術, 60, 442-446

- 森田敏 2007: イネの高温登熟障害に関する生理生態学的解析, ほか
移動大学学位論文, 1-162
- 村上寛一・川口数美・水島宇三郎 1958: 低温下での稲の蒴の組織化
学的以上とその品種間差違について, 育雑 8, 119-127
- 長戸一男・江幡守衛 1960: 登熟期の気温が水稻の稔実に及ぼす影響,
日作紀, 28, 275-278
- 長戸一男・江幡守衛 1965: 登熟期の高温の穎果の発育ならびに米質
に及ぼす影響, 日作紀, 34, 59-66
- Nagato, K and F. M. Chaudhry 1969a: A comparative study of ripening
process and kernel development in japonica and indica rice.
Proc. Crop. Sci. Soc. Japan. 38, 425-433
- Nagato, K and F. M. Chaudhry 1969b: Ripening of Japonica and Indica
type rice as influenced by temperature during ripening period.
Proc. Crop. Sci. Soc. Japan. 38, 657-667
- 中路富士夫・吉富研一・山本栄 1962. 佐賀県における第2室戸
台風による水稻の潮風害について. 日作九支報 19: 3-6
- 中田信雄・小高真一 1973: 低温による水稻の開花遅延と稔実, 北海
道の農業気象 24, 36-38
- 根の事典編集委員会編 1998: 根の事典, p290, 朝倉書店, 東京
- 西山岩男・伊藤延男・早瀬広司・佐竹徹夫 1969: 水稻の障害型冷害
防止に対する水温および水深の効果, 日作紀, 38, 554-555
- Nishiyama, I. 1970: Male sterility caused by cooling treatment
at the meiotic stage in rice plants. IV. Respiratory activity
of anthers following cooling treatment at the meiotic stage.
Proc. Crop. Soc. Japan 39, 65-70
- 西山岩男・佐竹徹夫 1981: イネの高温による障害の研究, 熱帯農業
25, 14-19

- Nishiyama, I. 1984: Climatic influence on pollen formation and fertilization, *In* Biology of Rice Tsunoda, S. and N. Takahashi, Japan Sci, Soc. Press, Tokyo/Elsevier, Amsterdam, 153-171
- 西山岩男 1985 : イネの冷害生理学 北大図書刊行海, 札幌
- 日本土壌協会編 2001: 土壌, 水質及び植物体分析法, p322, 東京
- 日本土壌協会 2001: 土壌, 水質及び植物体分析法, 322, 東京
- 農林水産省経済局統計情報部 1982: 夏作減収推定尺度, 8, 潮風害 (3) 28-29
- 奥田東・高橋英一 1961: 作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について, 第2報, ケイ酸欠除の時期が水稻の生育ならびに養分吸収におよぼす影響, 土肥誌, 32, 481-488
- Osada, A., V. Sasiprapa, M. Rahong, S. Dhammanuvong and H. Chakarababandhu 1973: Abnormal occurrence of empty grains of indica rice plant in dry, hot season in Thailand. Proc. Crop. Sci. Soc. Japan 42 103-109
- 三枝正彦, 山本晶子, 渋谷暁一 1998a: 多孔質ケイ酸カルシウム水和物のケイ酸資材としての評価, 土肥誌, 69, 576-581
- 三枝正彦, 山本晶子, 渋谷暁一 1998b: 多孔質ケイ酸カルシウム水和物のケイ酸資材としての実用性と水稻ケイ酸栄養の改善効果, 土肥誌, 69, 612-617
- 酒井寛一 1949b: 稲の冷害と深水灌漑, 農及び園 24, 405-408
- 佐々木一男・和田定 1975: イネの冷害不稔発生に及ぼす窒素, 磷酸及び加里の影響, 日作紀 44, 250-254
- 笹本馨 1959: 珪酸と害虫 VII 水ガラス・鉍さい施用水稻に対するニカメイチュウの加害と接触行動, 日本応用昆虫学会誌, 3, 153-156
- 佐竹徹夫 1976: イネの冷害, 作物—その形態と機能—, 下巻 北條

- 良夫・星川清親編，農業技術協会，東京，196-212
- 佐竹徹夫 1980:イネ冷害の気候と栽培的対策，農業気象 35, 251-261
- 佐竹徹夫・小池節夫・李善竜 1984:イネの穂ばらみ期耐冷性を向上させるための前歴水温と水深，日作紀 53 (別 2) 182-183
- Sato, K. and M. Takahashi 1971: The development of rice grains under controlled environment. The effects of temperature, its daily range and photoperiod during ripening on grain development, Tohoku J. Agr. Res 22 57-68
- 佐々木康之・今井良衛・細川平太郎 1983: 高温下で登熟する玄米品質の劣化防止技術，新潟農試研報，33, 45-54
- 佐藤庚・稲葉健五 1973: 高温による水稻の稔実障害に関する研究，第 2 報，穂と茎葉を別々の温度環境下においた場合の稔実，日作紀，42, 214-219
- 柴田康志・小田九二夫・森静香・藤井弘志 2009: 山形県庄内地域における 2004 年台風 15 号からみた潮風害リスクマップの作成，日作紀，78 (掲載証明書)
- 柴田和博・佐々木一男・島崎佳郎 1970: 時期別の気温・水温処理が水稻の生育に及ぼす影響 第 1 報，昼夜別気温・水温及び処理日数と不稔歩合との関係，日作紀 39, 401-408
- 志賀一一・宮崎直美・遠藤和雄 1977a: 寒地における高収水稻のための窒素供給法，第 2 報，幼穂形成期及び止葉期の追肥について，北海道農試研報 117, 31-44
- 志賀一一・宮崎直美 1977b: 寒地における高収水稻のための窒素供給法，第 3 報，高収水田類似の窒素供給法，北海道農試研報 118, 63-80
- 志茂山貞二 1958: 水稻の出穂期前後における倒伏ならびに風害軽減に及ぼす珪酸の効果，珪酸資材の導入による農産物の究極収量向

- 上に関する研究，奥田東編著，文部省試験研究費研究報告，48，
57-59
- 島崎佳郎・佐竹徹夫・渡辺潔・伊藤延男 1964b：穂ばらみ期の昼夜
温ならびに遮光処理が不稔発生におよぼす影響，水稻冷害の解析
的研究，IV，北海道農試研報 83，10-16
- 植物栄養実験法編集委員会編 1990：植物栄養実験法，p206，博友社
- 住田弘一，野副卓人，大山信雄 1989：ケイ酸石灰の多量施用による
水稻のケイ酸吸収促進，東北農業研究，42，99-100
- 住田弘一，大山信雄 1991：水稻のケイ酸吸収促進に及ぼす有機物お
よびケイ酸石灰の施用効果，土肥誌，62，386-392
- 住田弘一，大山信雄 1991：水稻のケイ酸吸収促進に及ぼす有機物お
よびケイ酸石灰の施用効果，土肥誌，62，386-392
- 住田弘一・大山信雄 1992：水稻のケイ酸吸に対する窒素栄養の影響，
土肥誌，63，633-638
- 高橋英一 1987：ケイ酸植物と石灰植物，110-118，農文協，東京。
- Takahashi E., Ma J. and Miyake Y. 1990: The possibility of silicon
As essential element for higher plants. Comments Agric. Food
Chemistry, 2, 99-122
- 高橋渉 2004a：気候温暖化条件下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
- 高橋渉 2004b：コメの白未熟粒などの発生と品質向上対策(富山県)，
農業技術大系(農文協)，追録第26号，第2-②巻，技522の29
の51の16-26
- 武田和義 1984：低温による子房の伸長促進とくびれ米の発生，イネ
における穎と子房の相互関係，x，育雑34，346-355
- 谷口秀美，前川敬治，稲津脩 1999：肥効の高い新規けい酸質肥料の
開発(1) 可給態けい酸含有量を高めたけい酸質資材の施用効果，

- 土肥要旨集, 45, 239
- 田中稔 1962: 水稻の冷水並びに出穂遅延障害に関する研究, 青森農試研報 7, 1-107
- 田代亨・江幡守衛 1975: 腹白米に関する研究, 第4報 白色不透明部の胚乳細胞の形態的特徴, 日作紀, 44, 205-214
- Tashiro, T. and I. F. Wardlaw 1991: The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice. *Aust. J. Agric. Res.* 42 485-496
- 寺島一男・斉藤祐幸・酒井長雄・渡部富雄・尾形武文・秋田重誠 2001: 1999年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響, 日作紀, 70, 449-458
- 巽二郎 2007: 地球環境と作物, 14-15 博友社
- 泊功・石黒忠之・藤原忠 1980: 防風施設による冷害気象改善に関する研究, 北海道農試研報 127, 31-76
- 坪井八十二 1961. 水稻の暴風被害に関する生態学的研究. 農技研報 A8:134-139.
- 坪井八十二 1976: 冷害の対策, 異常気象と農業 坪井八十二・根本順吉編, 朝倉書店, 東京, 109-121
- Tsuda Makoto, Morita M, , Makihara D, and Hirai Y, 2000. The involvement of silicon deposition in salinity-induced white head in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod. Sci.* 3(3) : 328-334.
- 梅本貴之 2001: 温度条件が米でんぷん生成に及ぼす影響, 東北地域における夏季の異常高温が水稻生育および米品質に及ぼす影響の解析と今後の対策, 東北農業試験場, 5-8
- 宇沢弘文 1990: 地球温暖化を考える。p212, 岩波書店
- 山形气象台 1990: 山形県災異年表, p10, 山形

- やまがたアグリネットアトマーションシステム (2004) : <http://www.agrin.jp/>
- 山形農林水産統計報 2005 <http://www.yamagata.info.maff.go.jp/>
- 山形県農林水産部 2006 : 米に関する資料
- 山形県 2004 : 平成 16 年度試験成績書, 100-104
- 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而 1992. 台風 9117 号および 9119 号による水稲被害. 農業気象 48:175-180.
- 山本晴彦・早川誠而・鈴木義則 1995. 1991 年台風 17 号・19 号による水稲の潮風害の実態. 日作紀 64 : 815-821
- 山本晴彦・早川誠而・鈴木義則 1996. 風洞実験による水稲の潮風害の影響評価. 日作紀 65:181-188.
- 山本晴彦・早川誠而・鈴木義則・大矢正史 1997. 散水による水稲の潮風害の軽減. 日作紀 66:499-500.
- 山本晴彦 2004 台風による水稲の潮風害の実態と被害の回避・軽減, 農業技術体系, 作物編 2 イネ 基本技術 522 の 29 の 51 の 38-48 農文協
- 山本晴彦・岩谷潔・白水隆之・古賀敦子 2007 : 2006 年台風 13 号の気象的特徴と風水害の実態. 自然災害科学西部地区部会報・論文集, 31, 5-8
- 山本勇・中村大四郎・雪竹照信・福田敬・三原実・松雪セツ子・横尾浩明・広田雄二 1993. 佐賀県における 1991 年大型台風の気象特性と水稲被害の実態および解析. 佐賀農セ研報 81-106.
- 山本良三・大田武治・石川雅士 1972. 水稲潮風害における付着塩分量の移行集積と穂ならびに葉の被害発現について. 日作紀 41(別 1):87-88.
- 山内益夫 1989. イネにおける耐塩性の品種関差の発現機構. 土肥誌 60 : 210-219
- 八柳三郎 1960 : 東北地方における稲作の計画栽培について, 3, 農

及園 35, 1248-1252

吉田昌一 1960:植物のケイ素栄養をめぐる二,三の諸問題,土肥誌,
31, 42-48

Yoshida, S. and T. Hara 1977: Effects of air temperature and light
on grain filling of an indica and a japonica rice under
controlled environmental condition. Soil. Sci. Plant Nutr. 23
93-107

吉川正巳・松本清治 2007:有機物長期連用水田における玄米窒素含
有率と稲体の珪酸吸収および土壌の可給態ケイ酸値との関係, 近
畿中国四国農研, 11, 16-23

和田源七 1969:水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響, 特に出穂
以後の窒素の重要性について, 農技研報, A16, 27-157

Zakara, S., T. Matsuda, S. Tajima and Y. Nitta 2002: Effect of high
temperature at ripening stage on the reserve accumulation in
seed in some rice cultivars. Plant Prod. Sci 5 160-168

渡部忠世 2003:環境・人口問題と食料生産, 4-11 農文協, 東京

陣野久好・木崎原千秋・田中甫 1962. 第2室戸台風による水稻の
潮風害について. 日作九支報 19: 7-9

全農庄内. 平成16年度産米農協別集荷実績表(日報, 平成16年12
月29日)