

第3章 有機物管理が土壌の還元と高品質米生産に与える影響

3-1 既往の知見

1) わら残渣の分解

稲わら残渣の管理に関しては「稲わらは堆肥化が最も望ましい。また、秋散布春すき込みは透水良好な中央部以南の水田でのみ可能であり、透水不良田では障害が大きいため使用すべきではない。」と指導⁵⁸⁾されている。しかし、稲わら管理の現状は堆肥化が2割、すき込み6割（内春すき込み3割）、焼却が1割程度である⁵⁹⁾。この理由としては、近年のコンバイン収穫では稲わらが裁断されてしまうため、回収には多くの労力が必要となることが挙げられる。さらに、北海道のような寒地では、収穫後における圃場の乾燥が進まないため、回収のための農機運行に伴う下層の圧密も懸念されることが挙げられる。さらに、現在はクリーン農業や有機農業の推進に伴い、水田圃場に投入される有機物の増加する可能性も高まっている。

このため多くの水田では、翌年の水稻栽培開始時に未分解の稲わらが土壌に残っており、前章で述べたように湛水後の分解に伴う土壌還元進行が見られる。また、土壌還元進行以外にも嫌氣的分解由来の有害有機酸⁶⁰⁾・ポリフェノール⁶¹⁾の生成などによる悪影響が懸念される⁶²⁻⁶⁴⁾。さらに、近年の研究では、未腐熟有機質を添加した湛水土壌から、多種の芳香族カルボン酸（安息香酸、2-フェニルカルボン酸、3-フェニルカルボン酸）が検出された^{65,66)}。また、これらによる水稻生育阻害作用が解明された。北海道における稲わら連用試験からも、前年の稲わら残渣の春すき込みは、水稻初期生育不良や後期窒素吸収などの要因となり、産米品質低下をもたらすことが報告されている^{67,68)}。

これに対して、前章では北海道水田土壌の酸化容量としての遊離酸化鉄濃度が不十分であり、その補給が水稻生育改善に有効である事を示した。本章では、土壌化学性以外の観点からその対応を考察する。第一に、翌春までに易分解有機物を減少する観点から、堆肥化が望ましいが、堆肥化が困難な場合は稲わらの秋すき込みが望ましいと考えられる。しかし、土壌の乾燥が不十分な条件でのすき込みは土壌の練り返しによる透水性の悪化が懸念されるため、多くの圃場で翌春まで放置される現状にある。その結果、湛水直前に未分解な有機物が土壌に混入することになり、嫌氣的分解に

伴う生育阻害物質濃度の増大が懸念される。そのため、北海道の土壌と稲わらの施用により、分解生成される土壌中の芳香族カルボン酸（安息香酸、2-フェニルカルボン酸、3-フェニルカルボン酸）の消長を、温度条件や土壌特性、有機物前歴の観点から検討する必要がある。また、地表面に限定した浅耕起により、収穫から翌年度入水前までの期間に稲わらの酸化的分解を促進し、湛水期間に分解される稲わらの乾物重や炭素量を減少させる技術開発が重要となる。

(2) 土壌還元の発達

圃場における透排水性の不良は土壌還元の進行を早め、水稻生育に悪影響を与えることは知られている⁶⁹⁾。道内の水田土壌は乾田型土壌22%、半湿田型土壌32%、湿田型土壌46%であり、潜在的に8割近い水田の透排水性が不十分であると考えられ⁷⁰⁾、さらに心土のち密度が従来より増加していること²²⁾や減水深が極めて小さいこと⁷¹⁾などが報告されている。

これに対し、北海道の水田圃場は昭和20年の「土地改良法」、44年の「農業振興地域の整備に関する法律」などを経て、土地基盤の整備が推進されてきた。特に、生産性向上という観点から「土地基盤改良（明渠・暗渠）」「土層改良（客土・混層耕・除礫等）」「土壌改良（土壌改良資材の投入）」は非常に有効であり、また、基盤整備工事の技術も年々向上している。排水改良に対しては暗渠排水の施工が最も有効とされ、その施工に関して疎水材の有無による暗渠排水の効果が大きく、モミガラ暗渠およびモミガラ心土破碎は従来の土埋め戻し暗渠に比べ良好な排水機能を発揮することが確認されている^{70,72-74)}。

ただし、排水改良のための暗渠は地下水位の低下に有効であるものの、圃場表面の乾燥や日減水深の向上に対しては不十分な例も多く、また経年変化によって暗渠機能の低下した事例も散見される。暗渠排水機能低下の直接的要因は埋め戻し土の土壌構造の消失など、土壌物理性の低下や疎水材の投入不足に起因する例が多く、さらに土壌圧縮に伴う硬盤層の形成による圃場排水性の低下が挙げられるなど、多くは暗渠管自体の不全ではなく、暗渠管上部の硬盤層の拡大・堅密化や大型機械作業による過度の代かきによることが指摘された⁷⁵⁾。

表10. 供試土壌の化学性

供試土壌	土性	pH (H ₂ O)	全炭素 g kg ⁻¹	遊離酸化鉄 g kg ⁻¹	易還元性マンガン mg kg ⁻¹	有効態リン酸 mg kg ⁻¹
上川農試, 有機物無施用	壤土	5.5	13	14	-	521
上川農試, 稲わら春混和	壤土	5.3	13	16	-	470
上川農試, 堆肥春混和	壤土	5.4	17	14	-	599
圃場A, 稲わら春混和	壤土	5.4	42	15	155	709
圃場A, 稲わら春混和, 客土	壤土	5.2	29	32	215	350
圃場B, 稲わら春混和	埴土	5.9	24	15	143	241
圃場C, 稲わら春混和	埴壤土	5.4	118	23	179	175

表11. 添加回収実験

	回収率 %
安息香酸	94.3
2-フェニルプロピオン酸	97.1
3-フェニルプロピオン酸	98.7

各成分とも10 μ g添加した。

10). 上川農試土壌における有機物施用の有無に関しては, 処理区間の差異が小さかった。圃場Aの客土圃場では, 客土により全炭素濃度の低下, 遊離酸化鉄および易還元性マンガンの増加が見られた。

回収実験の結果, 回収率は十分に高く, 土壌溶液評価には充分と判断された (表11)。

表12. 稲わら添加が芳香族カルボン酸濃度 (μ M) に及ぼす影響 (20°C培養)

1) 安息香酸

供試土壌	稲わら 添加	培養日数											
		4日	8日	13日	17日	20日	24日	28日	31日	36日	42日	49日	
上川農試	あり	0.35	0.63	2.23	2.08	0.85	0.48	0.42	0.35	0.30	0.32	tr	
	なし	0.21	0.25	0.33	0.24	0.19	0.20	0.42	0.16	0.13	0.36	tr	
圃場B	あり	0.64	0.67	0.70	0.67	0.58	0.47	0.46	0.37	0.37	0.32	tr	
	なし	0.36	0.52	0.40	0.44	0.49	0.20	0.35	0.28	0.35	0.27	tr	
圃場C	あり	0.60	0.49	2.57	6.23	14.45	3.04	0.54	0.43	0.48	0.32	tr	
	なし	0.14	0.26	0.20	0.48	0.33	0.23	0.33	0.38	0.16	0.24	tr	

2) 2-フェニルプロピオン酸

供試土壌	稲わら 添加	培養日数											
		4日	8日	13日	17日	20日	24日	28日	31日	36日	42日	49日	
上川農試	あり	tr	0.15	0.23	0.48	0.22	0.10	tr	0.01	tr	tr	tr	
	なし	tr	tr	tr									
圃場B	あり	tr	tr	tr	0.14	0.17	0.03	0.10	tr	tr	tr	tr	
	なし	tr	tr	tr									
圃場C	あり	tr	0.05	0.32	0.69	1.10	0.34	0.17	0.11	0.09	tr	tr	
	なし	tr	tr	tr									

3) 3-フェニルプロピオン酸

供試土壌	稲わら 添加	培養日数											
		4日	8日	13日	17日	20日	24日	28日	31日	36日	42日	49日	
上川農試	あり	0.06	0.69	1.72	1.47	0.15	0.05	tr	tr	tr	tr	tr	
	なし	tr	0.02	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	
圃場B	あり	tr	0.01	0.03	0.18	0.19	tr	tr	tr	tr	tr	tr	
	なし	tr	tr	tr	tr								
圃場C	あり	0.08	0.06	1.70	2.61	2.75	0.42	0.01	0.01	tr	tr	tr	
	なし	tr	tr	tr	tr								

供試土壌は, 上川農試: 有機物無施用, 圃場B・C: 稲わら春混和
trは測定限界以下で, 検出されず。

表13. 稲わら添加が芳香族カルボン酸濃度 (μM) に及ぼす影響 (30°C培養)

1) 安息香酸		培養日数						
供試土壌	稲わら 添加	4日	8日	10日	13日	15日	20日	24日
上川農試	あり	2.05	6.19	8.74	1.21	0.64	0.42	0.55
	なし	0.44	0.39	0.23	0.48	0.42	0.31	0.30
圃場A	あり	1.35	4.98	3.62	0.56	0.41	0.35	0.42
	なし	0.12	0.25	0.40	0.16	0.34	0.22	tr
圃場B	あり	1.36	2.35	3.93	0.77	0.60	0.35	0.39
	なし	0.13	0.43	0.55	0.39	0.25	0.28	tr
圃場C	あり	1.00	7.10	4.39	0.82	0.53	0.43	0.37
	なし	-	0.59	0.39	0.22	0.30	0.29	0.23

2) 2-フェニルプロピオン酸		培養日数						
供試土壌	稲わら 添加	4日	8日	10日	13日	15日	20日	24日
上川農試	あり	0.22	0.87	1.27	0.46	0.24	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場A	あり	0.17	0.52	0.82	0.09	tr	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場B	あり	tr	0.18	0.57	0.11	tr	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場C	あり	0.05	0.94	0.40	0.22	0.29	0.03	tr
	なし	-	tr	tr	tr	tr	tr	tr

3) 3-フェニルプロピオン酸		培養日数						
供試土壌	稲わら 添加	4日	8日	10日	13日	15日	20日	24日
上川農試	あり	3.25	4.91	5.60	1.14	0.21	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場A	あり	0.73	3.15	1.87	0.85	0.02	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場B	あり	0.29	0.36	1.48	0.21	tr	tr	tr
	なし	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
圃場C	あり	0.22	3.36	0.52	0.02	0.06	tr	tr
	なし	-	tr	tr	tr	tr	tr	tr

供試土壌は、上川農試：有機物無施用、圃場B・C：稲わら春混和
trは測定限界以下で、検出されず。

供試土壌に稲わらを添加して培養試験を行った結果、稲わら無添加条件では、培養温度20°C、30°Cとも2-フェニルプロピオン酸、3-フェニルカルボン酸の測定値が非常に小さく、安息香酸が少量検出されたのに対して、稲わら添加条件ではいずれの土壌でも著しく高まっていた(表12, 表13)。稲わら添加条件における各芳香族カルボン酸の推移を見ると、安息香酸のピークは上川農試土壌および圃場C土壌で高く、培養温度30°Cで8日~10日後頃、20°Cで13日~20日後頃であった(図19)。同様に2-フェニルプロピオン酸も、上川農試土壌および圃場C土壌で高く推移し、そのピークは培養温度30°Cで8日~10日後頃、20°Cで20日後頃であった(図20)。3-フェニルプロピオン酸は、安息香酸とほぼ同様の傾向を示した(図21)。上川農試水田で調査したデータでは、6月の地温(深さ10cm)の平均が15~20°Cの範囲内に推移していた(図22)。土壌間差異に関しては、20°Cの場合、圃場C土壌で最も高く、以下上川農試土壌、圃場B土壌の順であった(表12)。30°Cの場合は、上川農試土壌が最も高く、上川農試土壌>圃場C土壌>圃場A土壌>圃場B土壌の順であった(表13)。上川農試水田と圃場Aの水稲生育を比較した結果、圃場Aの幼穂形成期の窒素吸収量お

は培養温度30°Cで8日~10日後頃、20°Cで20日後頃であった(図20)。3-フェニルプロピオン酸は、安息香酸とほぼ同様の傾向を示した(図21)。上川農試水田で調査したデータでは、6月の地温(深さ10cm)の平均が15~20°Cの範囲内に推移していた(図22)。土壌間差異に関しては、20°Cの場合、圃場C土壌で最も高く、以下上川農試土壌、圃場B土壌の順であった(表12)。30°Cの場合は、上川農試土壌が最も高く、上川農試土壌>圃場C土壌>圃場A土壌>圃場B土壌の順であった(表13)。上川農試水田と圃場Aの水稲生育を比較した結果、圃場Aの幼穂形成期の窒素吸収量お

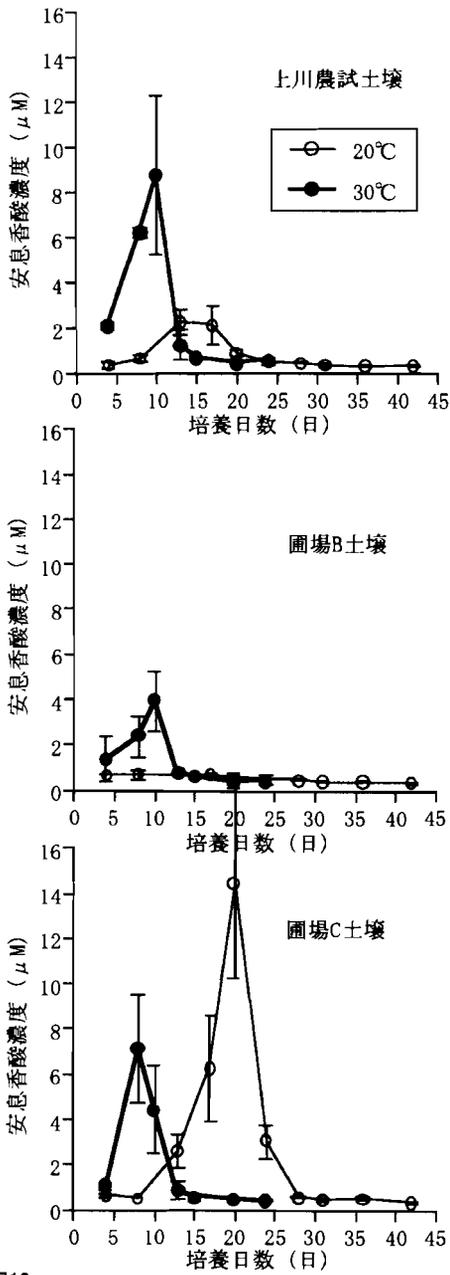


図19. 培養温度が安息香酸濃度に及ぼす影響 (稲わら1%添加)
 (有機物施用層は, 上川農試: 有機物無施用, 圃場B・C: 稲わら春混和)

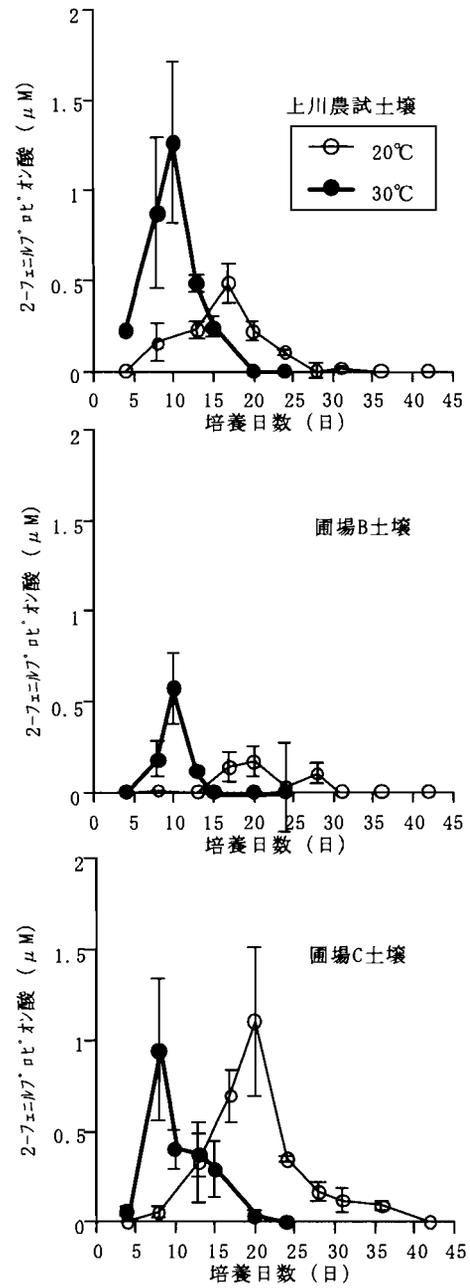


図20. 培養温度が2-フェニルプロピオン酸濃度に及ぼす影響
 (稲わら1%添加)
 (有機物施用層は, 上川農試: 有機物無施用, 圃場B・C: 稲わら春混和)

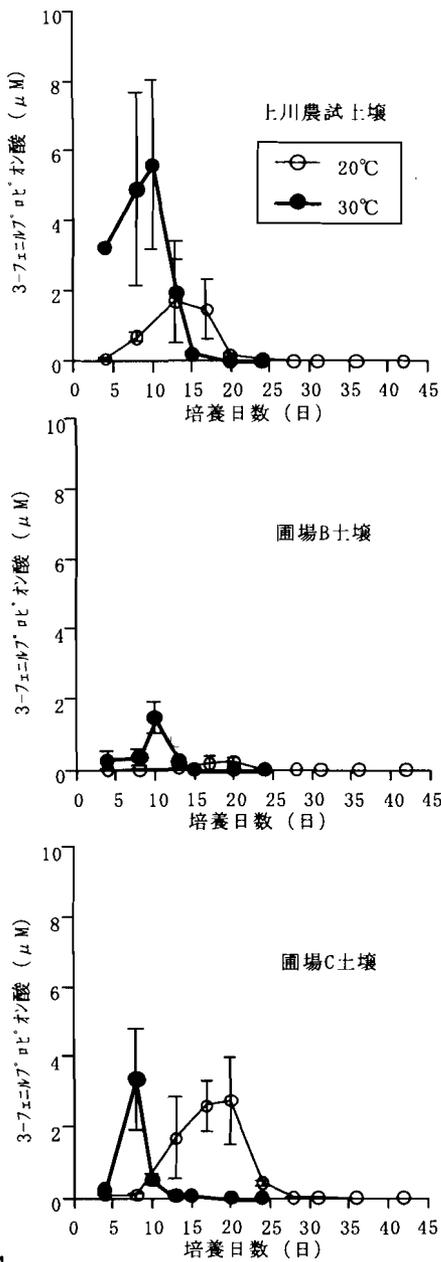


図21. 培養温度が3-フェニルプロピオン酸濃度に及ぼす影響 (稲わら1%添加)
(有機物施用層は、上川農試：有機物無施用、圃場B・C：稲わら春混和)

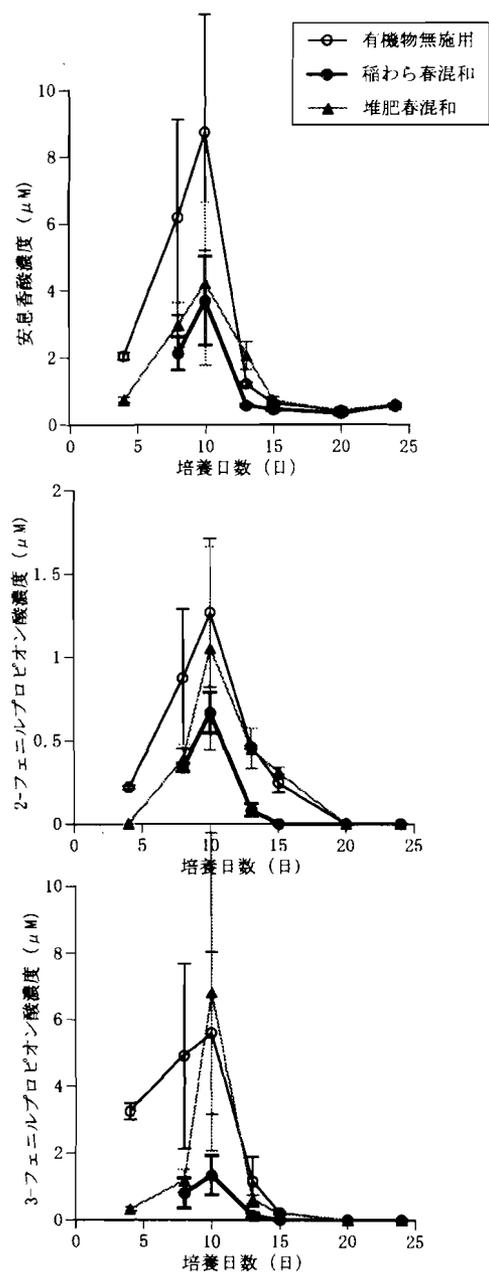


図23. 稲わら処理の前歴が芳香族カルボン酸濃度に及ぼす影響 (上川農試土壌、30°C培養)

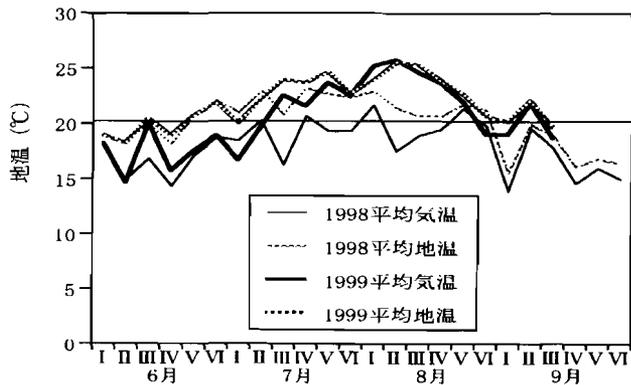


図22. 日平均気温および日平均水田地温 (深さ10cm)
(1998年、1999年上川農試水田圃場で測定)

表14. 供試土壌採取圃場における水稻初期生育および精玄米収量

調査圃場	稲わら処理	幼穂形成期の茎数 本 m ²			幼穂形成期 根重00年 g m ⁻²	幼穂形成期の窒素吸収量 g m ⁻²			精玄米収量 g m ⁻²		
		98年	99年	00年		98年	99年	00年	98年	99年	00年
上川農試	有機物無施用	556	767	876	-	3.9	6.1	4.8	625	541	610
	稲わら春混和	639	584	592	-	3.0	3.0	2.3	693	570	622
	堆肥春混和	745	948	931	-	3.8	5.2	4.8	674	565	616
圃場A	対照	-	388	376	3.16	-	1.3	1.7	-	460	437
	客土	-	531	553	4.88	-	1.9	2.4	-	518	506

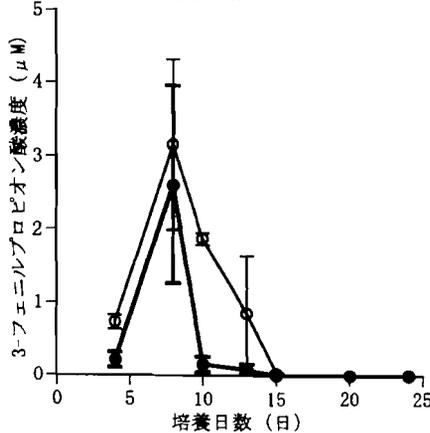
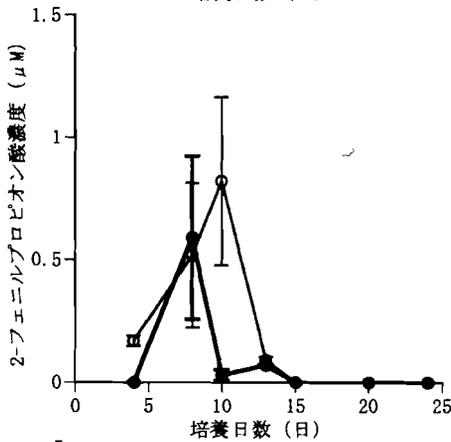
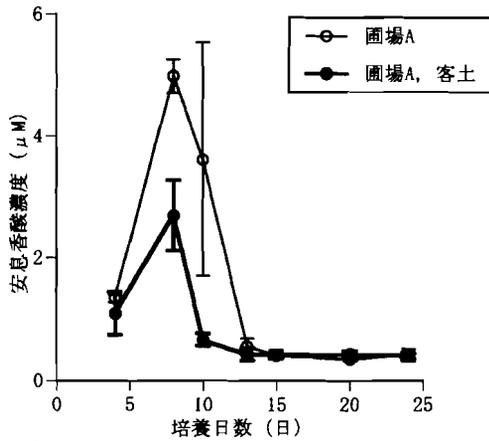


図24. 客土が芳香族カルボン酸濃度に及ぼす影響 (圃場A土壌, 30°C培養)

よび収量が著しく低かった (表14)。

各芳香族カルボン酸濃度は、有機物連用土壌において低下する傾向にあった (図23)。特に稲わら連用 (稲わら春混和) 土壌では、有機物無施用土壌の半分以下で推移した。

遊離酸化鉄を多く含む客土 (6 cm) 処理を行った土壌では、各種芳香族カルボン酸濃度のピークの低下が認められた (図24)。また、無施用に対して客土 6 cm 区では芳香族カルボン酸生成期間が短期間に抑えられており、これは3種類のカルボン酸に共通して認められた。

3-2-2 稲わらの分解促進技術が高品質米生産に与える影響

(1) 試験1. 室内培養試験

実験方法

1) 供試土壌: 1998年10月, 上川農業試験場水田圃場 (褐色低地土) の作土 (深さ 0~15cm) から採取した土壌 (表15) を風乾砕土後, 2 mmのメッシュで篩い, 常温保存したものを実験に供した。

2) 培養条件: 風乾土20gを培養UMビン100ml用 (口内径41mm×胴径55mm×高さ95mm) に充填し, 長さ3cmに切断した稲わら (T-C 386g kg⁻¹, T-N 7.11g kg⁻¹, C/N比 54.2) を乾物換算で5g, 不織布 (ポリエチレン・ポリプロピレン複合繊維, 以下同) に平面に広げるように包んで埋め込んだ。この比率は稲わら37500g m⁻² (耕起深15cm, 仮比重を1と仮定) に相当し, 慣行の400g m⁻²と比較して非常に多いが, 稲わらの炭素分析の際の必要量を考慮して設定した。培養UMビンはポリエチレンフィルムで覆い, 輪ゴムで締めた。土壌水分はほぼ圃場容水量に相当するpF1.8になるように2週に1度調整し, 5°Cおよび20°Cで12週間培養 (1999年3月23日~1999年6月15日) した。

3) 処理内容: 稲わらのみの場合を対照区とし, 肥料添加処理 (肥料A, B), 肥料と有機物分解促進資材の

表15. 供試土壌の理化学性

深さ (cm)	土性	作土の 容積重 (g L ⁻¹)	飽和 透水係数 (cm s ⁻¹)	pH (H ₂ O)	全炭素 (g kg ⁻¹)	全窒素 (g kg ⁻¹)	遊離酸化鉄 (g kg ⁻¹)	易還元性 マンガン (mg kg ⁻¹)
0~25	SCL	129	5.2×10 ⁻⁵	6.1	12.6	1.5	14.5	251
25~40	CL	131	5.5×10 ⁻⁶	6.0	13.8	1.3	14.2	174

1996年10月に土壌調査・分析を行った

併用処理（肥料A, B + 分解資材A, B, C）を設けた。肥料は肥料A（尿素複合液肥：窒素(N) 180g kg⁻¹, リン酸(P₂O₅) 125g kg⁻¹), 肥料B（腐熟促進肥料：窒素 125g kg⁻¹, リン酸60g kg⁻¹, アルカリ分300g kg⁻¹）で窒素30mg相当を添加した。有機物分解促進資材は微生物由来の分解資材であり、分解資材A（菌体・特殊腐植剤・有機活性剤などを混合発酵）、分解資材B（珪藻土に放線菌および糸状菌を添加発酵）、分解資材C（セルロース分解菌とリグニン分解菌など微生物を有機物やバーミキュライト等と混合発酵）を稲わらに対する各社指導量から算出した添加量（資材A：0.17g, 資材B：0.50g, 資材C：0.33g）で処理した。肥料および分解資材は不織布内で稲わらと混合した。混合時の資材の付着が良いように、稲わらには事前に若干の水分を霧吹きで与えておいた。試験は5反復で行った。

4) 調査項目：稲わらの乾物重は60℃通風乾燥後に秤量し、炭素含有量はチューリン法^{36,37)}によった。稲わら乾物重および炭素量の培養前と培養後の差を、培養前の乾物重および炭素量に対する割合で示し、各々の減少率とした。

実験結果

12週間培養後の乾物減少率と稲わら中の炭素減少率を表16に示した。5℃培養は各処理条件とも20℃培養と比較して、明らかに炭素減少率が低い。稲わらのみ

の炭素減少率は20℃培養で55.5%、5℃培養で27.9%であり、培養温度により大きく異なることが認められた。5℃培養の炭素減少率は稲わらのみと比較して肥料A添加で34.3%、肥料B添加では38.7%と6~10%増加した。また、分解資材と併用した場合を見ると、肥料A + 分解資材添加（4~6区）では39.8~42.0%、肥料B + 分解資材添加（7~9区）では45.1~47.7%と炭素減少率がさらに高まることが認められた。20℃培養試験においても同様の傾向にあったが、5℃培養に比べその効果は小さかった。分解促進資材間の比較については、培養温度および併用する肥料により傾向が異なった。

(2) 試験2. 圃場試験

実験方法

1) 供試圃場および耕種概要

1996年から1999年に、上川農業試験場水田で試験を実施した。供試品種は「きらら397」を用いた。施肥は化成肥料で窒素(N) - リン酸(P₂O₅) - カリウム(K₂O)が90-90-90g m⁻²となるように基肥全層施用、栽植密度m²当たり27.8株（畝間30cm×株間12cm）で移植した。

移植は1997年で5月24日、1998年で5月20日、1999年で5月19日に行った。収穫は1997年で9月26日、1998年で9月21日、1999年で9月8日に行った。

表16. 培養温度、肥料および分解資材添加が稲わら分解に及ぼす影響

処理区	培養温度 5℃		培養温度 20℃	
	乾物減少率 %	炭素減少率 %	乾物減少率 %	炭素減少率 %
1. 稲わらのみ	10.1 a	27.9 a	46.2 a	55.5 a
2. 肥料A添加	22.2 b	34.3 b	47.8 ab	58.6 a
3. 肥料B添加	24.8 cb	38.7 c	45.6 a	60.8 ab
4. 肥料A + 分解資材A添加	29.0 cb	41.0 c	56.1 b	66.2 cb
5. 肥料A + 分解資材B添加	25.9 cb	39.8 c	51.8 ab	61.2 ab
6. 肥料A + 分解資材C添加	28.5 cb	42.0 cd	52.5 ab	66.4 cb
7. 肥料B + 分解資材A添加	32.5 c	47.7 e	55.9 b	67.4 cb
8. 肥料B + 分解資材B添加	23.6 b	45.1 de	54.2 ab	67.3 cb
9. 肥料B + 分解資材C添加	28.1 cb	46.2 e	56.2 b	67.9 c

各培養温度の異なるアルファベット間には、Tukey-Kramerにより5%水準において有意差があることを表す。n=5

水管理に関して、入水は1997年で5月13日、1998年で5月11日、1999年で5月10日に行った。落水は1997年で8月13日、1998年で8月17日、1999年で8月13日に行った。

2) 試験処理

風乾物換算で400g m²相当の生わらを、長さ10~15cm程度に切断し、収穫後に散布した。稲わらの混和処理として秋混和（秋散布直後にロータリーで深さ5~8cm程度に浅耕混和し、さらに翌春に15cm混和）と春混和（秋散布後、地表面に放置した状態で越冬し、翌春ロータリーで深さ15cm混和）、および稲わら無散布の処理区を設けた。稲わらの散布および秋混和処理は1996年で10月1日、1997年で10月2日、1998年で10月2日、翌年の春混和処理は1997年で5月8日、1998年で5月6日、1999年で5月6日に行った。

さらに窒素肥料添加、および窒素肥料に有機物分解促進資材添加を併用した処理区を稲わら混和処理に組み合わせて設定し、稲わら秋散布時に処理した。窒素肥料の施用量は肥料Aおよび肥料Bで1996年秋散布は4gN m⁻²、1997・1998年秋散布は3gN m⁻²とした。有機物分解促進資材の施用量は1996年秋散布が50g m⁻²、1997・1998年秋散布が各社指導の添加量（資材A：10g m⁻²、資材B：30g m⁻²、資材C：20g m⁻²）とした。試験規模は1区35m²（5m×7m）で、反復なし。

また風乾物換算10gの稲わらを長さ10cmで切断して稲わらとの比率が試験区と同条件になるように資材を添加・混合し、平面に広げるように不織布に包み、圃場に設置した。混合時の資材の付着が良いように、稲わらには事前に若干の水分を霧吹きで与えておいた。秋混和処理の場合は稲わら混和処理後の深さ8cmに埋設し、春混和処理の場合は地表面に放置、両処理とも翌年の春混和前および水稻収穫後に回収した。収穫後回収するサンプルについては春混和前に一度取り出し、

深さ15cmに再度埋設した。供試した稲わらの炭素含有量は1996年で378g kg⁻¹、1997年で398g kg⁻¹、1998年で386g kg⁻¹であった。1996年と1997年は3反復、1998年は5反復で行った。

3) 調査項目

炭素含有量の分析はチューリン法^{36,37)}により、炭素量の施用前と回収後の差を埋設前の炭素量に対する割合で示し、その減少率とした。また、同時に湛水期間の炭素分解に伴って発生するメタンガス量を調査した。

4) メタンガス採取および分析方法

メタンはクローズドチャンバー法に従い^{36,37)}、水稻10株を覆えるチャンバー（透明なポリカーボネイト製の無底角箱型、底面60×60cm、高さ1.0m）を用いた。チャンバー内の空気は小型ファンで常時攪拌し、下部は水面下に埋設した塩ビ製の台座に設置することにより気密を図った。メタンの採取および保管にはテドラバック（1ℓ）を使用した。メタンフラックスの日変化は比較的小さい事例もあるが⁷⁶⁾、午後から夕方に高く、早朝に低いとの報告もあり⁷⁸⁾、本試験では比較的中庸と思われる午前9時から12時までに採取したサンプルを処理間および日発生量の推定に用いた。メタンフラックスはチャンバーセット直後、15分後にチャンバー内のガス採取を行い、測定したメタン濃度の増加速度からメタンフラックスを算出した⁷⁷⁾。メタン濃度は水素炎イオン化検出器（FID）のついたガスクロマトグラフ（島津製作所製GC-14A）で測定し、標準ガスは窒素/メタン混合ガス、CH₄濃度9.23ppmvを使用した。

入水日を0日、耕種概要に示した連続湛水処理が落水された日を最終日とし、その期間を湛水期間とした。湛水期間のメタンフラックスの測定は概ね2~3週間に1回程度行った。

湛水開始時にはメタン測定を行っていないため、メ

表17. 収穫後の地温（地表および深さ5cm）の推移（上川農試水田）

年	月	半旬	最低地温		最高地温		平均地温	
			地表	5cm	地表	5cm	地表	5cm
1998	10月	4	8.1	9.9	16.3	14.1	12.2	12.0
	10月	5	3.9	6.5	14.5	11.4	9.2	8.9
	10月	6	3.2	5.3	13.9	10.5	8.5	7.9
	11月	1	1.7	3.4	8.2	7.1	4.9	5.3
	11月	2	0.8	2.5	7.2	5.6	4.0	4.1
	11月	3	0.7	2.6	6.2	8.0	3.5	5.3
1999	4月	5	2.0	3.8	19.4	15.0	10.7	9.4
	4月	6	3.9	5.8	20.3	17.7	12.1	11.7

表18. 稲わら処理法、肥料および分解資材添加が冬期間（収穫後～翌春耕起前）の稲わら炭素減少率（%）に及ぼす影響

処理区	1996, 収穫後散布		1997, 収穫後散布		1998, 収穫後散布	
	1997, 耕起前回収	1998, 耕起前回収	1998, 耕起前回収	1999, 耕起前回収	1999, 耕起前回収	1999, 耕起前回収
1. 稲わら秋混和	34.9	a	44.1	b	37.7	bc
2. 稲わら秋混和+肥料A添加	42.1	cd	50.8	de	40.8	cde
3. 稲わら秋混和+肥料B添加	43.1	cd	47.9	c	41.7	de
4. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材A添加	46.2	de	-	-	46.5	f
5. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材B添加	49.1	e	52.0	e	48.1	f
6. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材C添加	46.2	de	50.3	cde	-	-
7. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材A添加	41.7	bc	48.7	cd	48.3	f
8. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材B添加	48.5	e	48.8	cd	43.4	e
9. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材C添加	48	e	50.4	cde	47.1	f
10. 稲わら春混和	-	-	39.4	a	32.9	a
11. 稲わら春混和+肥料A添加	-	-	47.9	c	35.8	ab
12. 稲わら春混和+肥料B添加	-	-	49.1	cd	40.9	cde
13. 稲わら春混和+肥料A+分解資材B添加	-	-	45.0	b	-	-
14. 稲わら春混和+肥料B+分解資材B添加	-	-	46.3	bc	41.2	de
15. 稲わら春混和+肥料B+分解資材C添加	-	-	49.5	cde	40.1	cd

1～9区：秋収穫後に土壌混和，10～15区：秋収穫後に散布して放置，翌年の春耕起前に回収した。

各年次の異なるアルファベット間には，Tukey-Kramer testにより5%水準において有意差があることを表す。

1997年と1998年取り出しは $n = 3$ ，1999年取り出しは $n = 5$

タンフラックスを $0\text{mgCH}_4\text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ とした。日発生量はメタンフラックス測定値を24時間に換算し，さらに各調査日データを連結した面積から湛水期間の推定メタン発生量とした。なお，データは示さなかったが非湛水期間のメタン発生量は非常に少なかったため，本試験では湛水期間のメタン発生量を水稻栽培期間のメタン発生量とした。

試験結果

本試験を行った上川農試水田における1998年収穫後～積雪前と1999年融雪～耕起前の調査では，深さ5cmの平均地温が10月下旬 8.4°C ，11月上旬 4.4°C ，融雪後の4月下旬が 10.5°C であった（表17）。

圃場に設置した稲わらの炭素減少率は（表18），秋混和+肥料（肥料A，肥料B）+分解資材添加（分解資材A，分解資材B，分解資材C）区（4～9区）が全般

的に高い傾向にあった。なお，肥料間および分解資材間の比較では，有意な差が認められない場合が多く，一定の傾向が得られなかった。

それ以下は分解率の大きい順から秋混和+肥料添加区（2～3区） \geq 春混和+肥料添加+分解資材添加区（13～15区） $>$ 春混和+肥料添加区（11～12区）となった。肥料および分解資材を添加しなかった稲わら秋混和区（1区），稲わら春混和区（10区）の場合には減少率が低かった。特に稲わら春混和区（10区）は36%程度であり，秋混和+肥料+分解資材添加区と比較して10～14ポイントも少なかった。

次に主要な処理区における水稻栽培期間中のメタンフラックスを測定し，湛水期間におけるメタン発生量を推定した（表19）。その結果，稲わら春混和区（10区）では $9.5\text{g CH}_4\text{ m}^{-2}$ （1998年）， $17.1\text{gCH}_4\text{ m}^{-2}$ （1999年）であった。一方，稲わら秋混和区（1区）では 5.2g

表19. 稲わら処理法、肥料および分解資材添加が水稻栽培期間の推定メタン発生量（ $\text{gCH}_4\text{ m}^{-2}$ ）に及ぼす影響

処理区	1997年	1998年	1999年
1. 稲わら秋混和	10.6	5.2 (55)	12.0 (70)
5. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材B添加	8.9	4.4 (46)	-
8. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材B添加	-	-	9.9 (58)
10. 稲わら春混和	-	9.5 (100)	17.1 (100)
13. 稲わら春混和+肥料A+分解資材B添加	-	8.0 (84)	-
14. 稲わら春混和+肥料B+分解資材B添加	-	-	12.5 (73)
16. 稲わら無施用	-	1.5 (16)	4.8 (28)

メタンフラックスの測定は1997年：5回，1998年：6回，1999年：7回

() 内の数値は稲わら春混和区を100とした指数

表20. 稲わら処理法、肥料および分解資材添加が水稻栽培期間(翌年の春耕起～収穫時)における稲わら炭素減少率(%)に及ぼす影響

処理区	1998年			1999年		
	秋収穫後～ 春耕起前	秋収穫後～ 翌年収穫時	水稻栽培 期間分	秋収穫後～ 春耕起前	秋収穫後～ 翌年収穫時	水稻栽培 期間分
	①	②	② - ①	①	②	② - ①
1. 稲わら秋混和	44.1±0.6	66.7±1.1	22.6	37.7±0.8	61.7±4.6	24.0
5. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材B添加	52.0±0.8	66.3±2.2	14.3	-	-	-
8. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材B添加	-	-	-	43.4±2.7	60.6±5.5	17.2
10. 稲わら春混和	39.4±0.1	66.7±1.9	27.3	32.9±2.0	64.2±4.7	31.3
13. 稲わら春混和+肥料A+分解資材B添加	45.0±1.8	67.2±1.6	22.2	-	-	-
14. 稲わら春混和+肥料B+分解資材B添加	-	-	-	41.2±2.0	63.8±2.7	22.6

1, 5, 8区: 秋収穫後に土壌混和, 10, 13, 14区: 秋収穫後に散布して放置し, 翌年の春耕起時に土壌混和
各区とも翌年の耕起前と水稻収穫時に回収した.

1998年取り出しは n=3, 1999年取り出しは n=5, ±標準偏差

表21. 稲わら処理法が収量及び品質に及ぼす影響

年次	処理区	精玄米 収量 g m ²	千粒重 g	玄米の外観品質		白米 タンパク質 含有量 g kg ⁻¹
				良質粒歩合 %	青未熟粒歩合 %	
1998年						
	5. 稲わら秋混和+肥料A+分解資材B添加	644	20.7	91.7	7.4	53
	10. 稲わら春混和	605	20.8	82.7	16.4	56
1999年						
	8. 稲わら秋混和+肥料B+分解資材B添加	517	22.2	94.6	4.1	67
	10. 稲わら春混和	476	22.2	94.8	3.9	69

精玄米収量には, 篩い目1.90mmを使用した. 外観品質の測定には精玄米を用いた.

CH₄ m⁻² (1998年), 12.0gCH₄ m⁻² (1999年) と秋混和によりメタン発生量が減少した. さらに, 稲わら秋混和+肥料A+分解資材添加区 (5区) で4.4gCH₄ m⁻² (1998年), 稲わら秋混和+肥料B+分解資材添加区 (8区) で9.9gCH₄ m⁻² (1999年) であり, 肥料および分解資材添加の処理区で各年ともメタン発生量が最も低かった. また, 稲わら秋混和+肥料 (A, B) +分解資材添加区 (5, 8区) におけるメタンフラックスは全期間を通じて稲わら秋混和区 (1区) より低く推移した (図表省略).

1998年と1999年の推定メタン発生量の軽減効果でみると, 農家慣行として多い稲わら春混和区 (10区) に対して 1. 稲わら秋混和区で発生量の35%, さらに秋混和+肥料 (A, B) +分解資材添加 (5, 8区) で54% (1998年), 42% (1999年) メタン発生量が軽減された. なお, 参考として行った稲わら無施用条件は1.5gCH₄ m⁻² (1998年), 4.8gCH₄ m⁻² (1999年) であり, この値は稲わら春混和 (10区) におけるメタン発生量の3割以下だった.

メタン生成の基質となる稲わら炭素の水稻栽培期間における減少程度を表20に示した. 水稻栽培期間にお

ける炭素減少率 (収穫後と春耕起前の差) は稲わら春混和区 (10区) と比較して稲わら秋混和区 (1区) で小さく, 秋混和+肥料 (A, B) +分解資材添加区 (5, 8区) ではさらに減少した. 水稻収穫までの炭素の累積減少率は60%程度と各処理区間で大差なく, 水稻栽培期間中の分解量は春耕起前までの炭素減少率の低い処理区で多かった.

収量・品質に関しては, 農家慣行として多い稲わら春混和区 (10区) と比較して, 1998年の秋混和+肥料A+分解資材B添加区 (5区), 1999年の秋混和+肥料B+分解資材B添加区 (8区) で精玄米収量が増加していた (表21). 千粒重の差は判然としないが, 白米中のタンパク質含有量は稲わら分解促進処理により低下する傾向にあった.

3-2-3 水田土壌に対する酸化的環境の導出技術

(1) 試験1. 圃場の水管理

実験方法

1) 供試圃場および耕種概要

1997年から1999年に, 上川農業試験場水田で試験を実施した. 耕種概要は3-2-2に準じる. 稲わら施

用に関しては、1997年が稲わら無施用、1998年～1999年は風乾物換算で300kg m⁻²の稲わらを春散布春混和（春耕起前に散布し、直後にロータリーで深さ15cm混和）した。

水管理に関して、入水は1997年で5月13日、1998年で5月11日、1999年で5月10日に行った。落水は1997年で8月13日、1998年で8月25日、1999年で8月13日に行った。中干しおよび間断灌漑の処理区以外は上記の入水～落水期間を通じて連続湛水した。

2) 試験処理

中干し処理区と間断灌漑処理区を設定した。中干し処理は幼穂形成期前（6月中旬～7月初旬）に落水し、土壌乾燥程度は地表面に大亀裂が形成される程度を目安とした。各年度の中干し期間は1997年（6/24～7/2）、1998年（6/24～7/2）、1999年（6/24～7/1）であった。

間断灌漑処理は中干し処理と同時期（6月下旬）および出穂期（8月上旬）以降に行い、2水準の落水強度で設けた。間断灌漑（強程度）は1997年が落水（4日）－湛水（2日）－落水（4日）で行った、1998および1999年は土壌水分 pF1.8程度を目標に土壌乾燥した（落水（3～5日）－湛水（2日）－落水（3～5日））。間断灌漑（弱程度）は1997年が落水（2日）－湛水（4日）－落水（2日）、1998と1999年は pF1.5程度を目標とした（落水（2～3日）－湛水（4日）－落水（2～3日））。さらに、出穂期以降にも同様の間断灌漑処理を行った。

幼穂形成期前の水管理（中干し、間断灌漑）処理以前は水田圃場を均一栽培管理した。水管理処理の直前に波板を用いて各区を仕切り、以降は各処理に応じて落水－湛水処理を行った。

試験規模は21m²（3m×7m）で、反復なし。

3) 調査項目

3-2-2に準じる。さらに、作土の酸化還元電位（Eh）および2価鉄濃度を測定した。

4) 作土の酸化還元電位（Eh）および2価鉄、土壌水分（pF）の測定方法

土壌の酸化還元電位の測定には、土壌用 Ehメータ（藤原製作所製、EHS-120型）を用いた。湛水期間の作土に湛水期間を通じて白金電極を差し込んだままにし、調査の際には田面水中に入れた比較電極と白金電極を接続して、各処理区3反復で測定した。測定の深さは作土中の5cmとした⁷⁹⁾。

土壌中の2価鉄濃度は湛水期間中の水稻条間（3カ所）の作土0～15cmから採取した生土を、根およびゴミを取り除いた後に混合し、塩化アルミニウム抽出法で抽出、ジピリジル比色定量法で定量した³⁰⁾。

土壌pFは長さ1mの塩ビパイプの先にポーラスカップを連結し、純水を注入後シリコン栓で密封したものをを用いた。これをポーラスカップの下端が深さ10cmになるように土壌に設置し、注射針を直結したハンディマノメータでパイプ内の減圧を測定、その数値をpFに換算した⁷⁹⁾。

実験結果

間断灌漑の強度と土壌水分（pF）および土壌還元状態を表22に示した。1997～1998年の幼穂形成期前に中干し処理を実施した中干し区（2区）は最高pF2.1～2.2に達した。間断灌漑（強程度）区（4区）は中干しに及ばないものの水分状態がpF1.9以上になっており、目視では土壌表面に若干の亀裂も観察された。また、データを示さなかったが、1999年はpF1.8に達した。一方、間断灌漑（弱程度）区（3区）の場合には最高pF1.5～1.6、表面水が排除された程度であった。また、出穂後の間断灌漑については、1997年と1999年は降雨のため乾燥が進まず、落水強度に関わらずpF1.5～1.6程度だったが、1998年は間断灌漑（強）区（4区）でpF1.8に達した。

表22. 水管理が土壌の酸化還元電位（Eh）、2価鉄含量に及ぼす影響

分析項目	1997年					1998年				
	測定時期	連続湛水	中干し	間断灌漑		測定時期	連続湛水	中干し	間断灌漑	
				弱	強				弱	強
幼穂形成期前処理最高pF	-	-	2.2	1.6	2.0	-	-	2.1	1.5	1.9
Eh (mV)	入水後56日 (7/8)	-195±16	-152±6	-187±8	-124±63	入水後60日 (7/10)	-240±30	-74±23	-172±22	-114±26
2価鉄 (mg kg ⁻¹)	入水後56日 (7/8)	2110	1630	2079	1740	入水後60日 (7/10)	2680	1410	2030	1620
出穂後処理最高pF	-	-	-	1.5	1.5	-	-	-	1.5	1.8
Eh (mV)	入水後88日 (8/9)	-219±21	-212±9	-186±13	-198±4	入水後105日 (8/24)	-200±12	-202±17	-146±28	-139±22

Ehは n = 3, ±は標準偏差

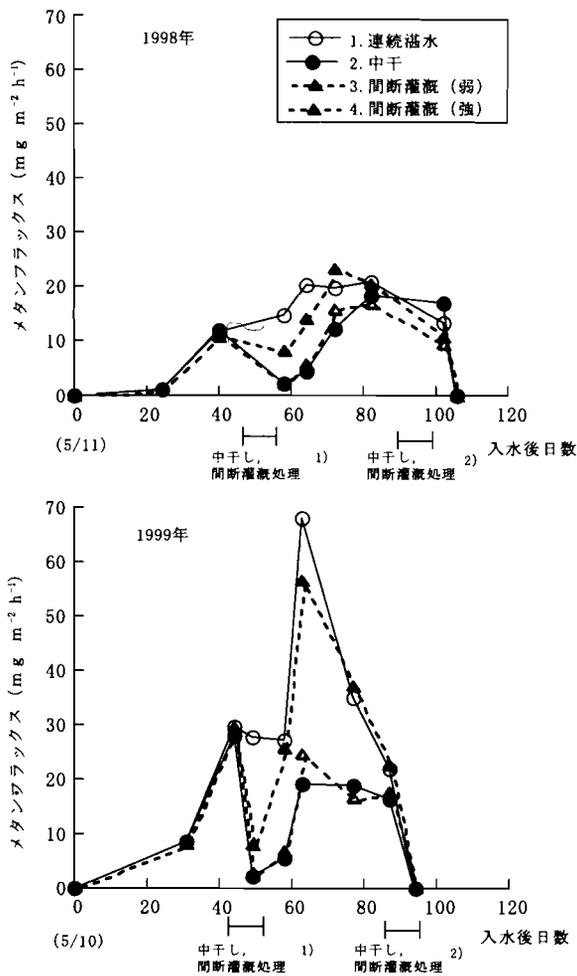


図25. 水管理がメタンフラックスに及ぼす影響
水管理は、1)幼穂形成期前と 2)出穂期以降の期間に行った。

また連続湛水区(1区)と比較して、中干し区(2区)では再度湛水しても土壌の酸化還元電位(Eh)が高く、反対に土壌2価鉄濃度は低かった(表22)。間断灌漑(強)区(4区)でも同様の傾向を示した。しかし、中干し区(2区)の場合、出穂期以降の調査では連続湛水に近いEh=-200mV以下の還元状態に戻ったのに対し、間断灌漑処理では出穂後に再び間断灌漑処理を行うことで土壌還元の発達が緩和されていた。

中干し区(2区)のメタンフラックスは、中干し処理直後に顕著に低下し、その後は緩慢に上昇するものの1.連続湛水区よりも低く推移した(図25)。一方、幼穂形成期前における間断灌漑(強)区(4区)でも処理後からメタンの発生が軽減され、1998年では中干し処理に近い軽減効果があった。これに対し、間断灌漑(弱)区(3区)ではメタンフラックスの低下が間断灌漑(強)区(4区)より小さかった。出穂後の間断灌漑ではメタンフラックスの低下の認められる場合もあったが、幼穂形成期前の中干し処理と比較して水稻栽培期間のメタン発生量に及ぼす影響は小さかった。

収量・品質に関しては、連続湛水(1区)と比較して、中干し処理および間断灌漑処理により精玄米収量は高まる事例が多かったが、その差は大きくなかった(表23)。玄米の外観品質について、1998年の中干し処理および間断灌漑処理により良質粒歩合が向上した。白米タンパク質含有量は、中干し処理および間断灌漑処理により低下する傾向にあり、これは全般的に低タンパク質含有量であった1998年でも認められた。

表23. 水管理が収量および品質に及ぼす影響

年次	水管理処理	精玄米収量 g m ⁻²	千粒重 g	玄米の外観品質		白米中の タンパク質 含有量 g kg ⁻¹
				良質粒歩合 %	青未熟粒歩合 %	
1998年						
	1. 連続湛水	607	21.3	84.5	14.7	60
	2. 中干し	619	21.1	88.1	10.5	58
	3. 間断灌漑(弱)	614	21.5	89.5	9.1	59
	4. 間断灌漑(強)	604	21.5	86.3	12.5	57
1999年						
	1. 連続湛水	483	22.1	91.5	3.2	77
	2. 中干し	491	22.0	92.5	3.6	72
	3. 間断灌漑(弱)	497	22.2	92.3	4.7	74
	4. 間断灌漑(強)	504	22.1	93.9	4.1	75

精玄米収量には、篩い目1.90mmを使用した。外観品質の測定には精玄米を用いた。

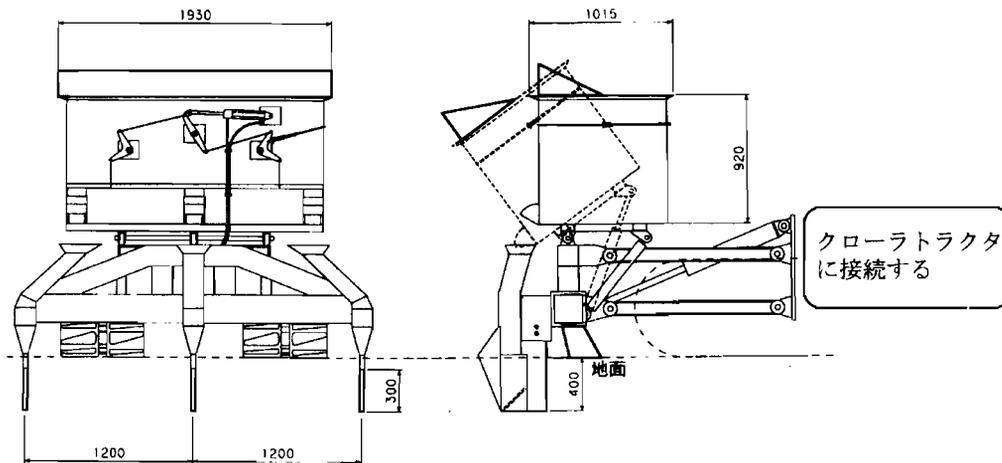


図26. 砂充填細溝心土破碎（砂心破）施工試作機

(2) 試験2. 圃場排水性の改良

実験方法

1) 供試品種および耕種概要

試験は1999年～2001年に灰色低地土（細粒質灰色低地土，上川郡鷹栖町）で行った。供試品種は「ほしのゆめ」，苗は中苗型粋苗であった。施肥量は，窒素(N)－リン酸(P₂O₅)－カリウム(K₂O)：85－152－79g m⁻²，ケイカル600～800g m⁻²であった。

2) 試験処理

南榛原開発株式会社（静岡県榛原郡相良町）に作成依頼した砂充填細溝心土破碎（砂心破）施工試作機を用いて（図26），1998年水稻収穫後の水田圃場で，施工処理を行った。処理区は無施工区，砂心破（砂充填細溝心土破碎）1.2m区（施工間隔1.2m，溝深さ40cm，溝幅2cm），砂心破2.4m区（施工間隔2.4m，溝深さ40cm，溝幅2cm）を設置した。充填材には，焼き砂（粒径2.5～5.0mm）を用いた。施工方向は，圃場暗渠排水の施工方向に斜め45度で交差するよう行った。

3) 施工機（試作機）

使用機械は超々湿地クローラ農用トラクター（キャタピラー三菱，総重量5150kg，レーザ自動勾配設定装置，エンジン出力50PS，走行速度は低速2速（220m hr⁻¹），接地圧0.15kg cm⁻²，ホッパ容量1.4m³）を用いた。弾丸暗渠の施工機を改造した物であり，主には施工溝カッター部と充填材のホッパを改造した（図26）。これにより，充填材を施工溝幅2cmで，田面より最大40cm（砂充填深さ30cm）に充填可能となった。

実験結果

本圃場の土性は粘質であり，透水係数も10⁻⁷cm s⁻¹と低く，斑紋が認められることから細粒質灰色低地土に分類される（図27）。化学性については，可給態ケイ酸が低かった。

砂心破施工の作業性等に関しては，作業速度が砂（本試験では粒径2.5～5.0mmの焼砂使用）の落下速度に制約されるため，施工目標（深さ40cm～10cm，幅2



図27. 試験圃場の土壌断面

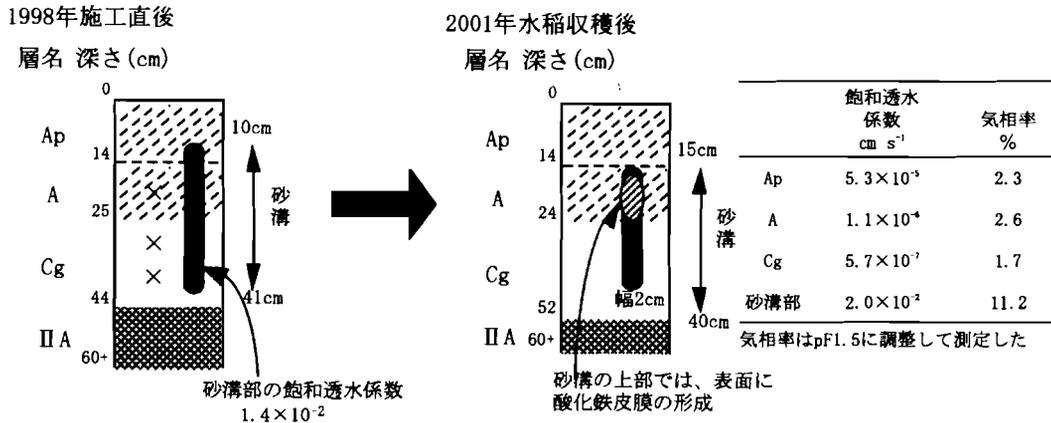


図28. 砂心破施工後の土壌断面状態

cm) を達成するには、2速・220m/時が限界であったが、砂心破施工は良好に実施された。施工直後の土壌断面調査では、施工深さ40~41cm (内上部10cmは溝のみ)、溝幅2cmという施工目標を概ね達成していた(図28)。また、砂溝部の透水性は著しく向上していた。さらに土壌断面調査では、溝と暗渠排水溝との連絡が確認されており、また一部暗渠の浅い部分では、暗渠管上に埋設したピリ砂利との接触も生じた(図表省略)。

施工後3年経過した2001年水稻収穫後の土壌調査では、砂溝の充填部分が15~40cmと若干減少していた(図28)。砂溝の上部は鉄の酸化皮膜が認められるものの、その他はほぼ施工時の原型を留めていた。また、砂溝部分の透水係数は10⁻²cm s⁻¹であり、非常に良好であった(図28)。しかし、2~3層目の砂溝周辺部は10⁻⁶~10⁻⁷cm s⁻¹であり、無施工区の土壌断面と比較して差異が判然としなかった。

縦浸透量の調査結果から、0~1.7mm day⁻¹に対して2.5~8.0mm day⁻¹と改善していた(表24)。ただし、施

表24. 砂心破施工による圃場縦減水深(mm day⁻¹)の改善

	無施工	砂心破 2.4m	砂心破 1.2m
1999年			
6月20日	1.0	4.0	6.0
7月6日	0.5	2.5	5.0
2000年			
6月19日	0.5	3.3	4.0
6月23日	0.3	2.6	3.6
6月26日	0.0	2.8	3.8
(落水処理、溝切り処理あり)			
7月11日	1.7	2.5	3.4
2001年			
6月15日	1.5	8.0	7.5
(落水処理、溝切り処理あり)			
6月29日	1.0	3.8	6.5
7月24日	1.0	3.5	3.0

工間隔の差は比較的小さかった。深さ5cmの地温を測定した結果、砂心破施工区の地温上昇が確認された。無施工区と比較して、砂心破1.2m区は平均+0.4℃、最高+1.7℃、最低-0.5℃となり、特に最高地温の増加が顕著であった(図29)。

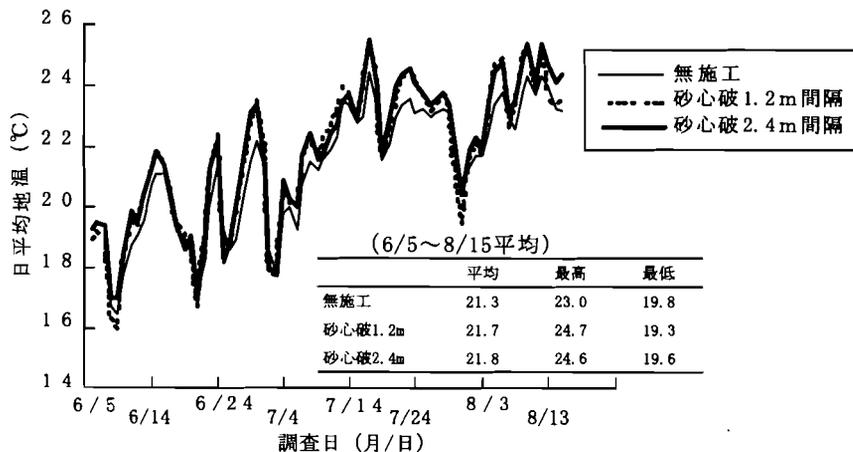


図29. 平均地温(深さ5cm)の推移(1999年)

表25. 土壌中の二価鉄とアンモニア態窒素濃度 (1998年)

	二価鉄 (g kg ⁻¹)			土壌アンモニア態N (g kg ⁻¹)		
	6/18	6/22	7/2	6/18	6/22	7/2
無施工	2050	3351	4312	44	32	71
砂心破2.4m	1248	1734	3351	59	49	61
砂心破1.2m	1256	1890	2963	69	52	70

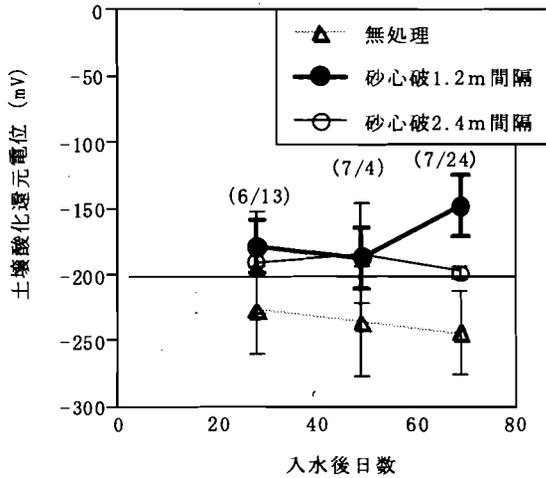


図30. 土壌酸化還元電位の推移 (2001年)

土壌酸化還元電位 (Eh) を測定した結果、無施工区では6月上旬の水稲活着時期からEh=-200mV以下という強還元状態に達していた (図30)。また、土壌中の二価鉄濃度は無施工区で6月中旬以降2000g kg⁻¹を越えていた (表25)。これに対して、砂心破施工区では土壌Ehは高く推移し、反対に土壌中の二価鉄濃度は低く推移しており、還元が比較的緩和されていた。アンモニア態窒素濃度に対する効果については明瞭でないが、生育初期のアンモニア態窒素濃度が高まる傾向にあった。

移植1ヶ月後の初期生育は、砂心破施工区で地上部・根部とも向上していた (表26)。2000年と2001年の調査では、地上部乾物重で6~24%、根部乾物重で10~26%増加していた。

水稲の無機成分分析の結果、窒素含有量に関しては一定の傾向が認められず、無施工と砂心破施工で大差なかった (表27)。成熟期における茎葉のケイ酸含有量およびケイ酸/窒素比は、砂心破施工により明らかに高まった。

砂心破の施工では、穂数および玄米収量が増加し、同時に玄米白度も高まる傾向にあった (表28)。1999

表26. 水稲生育初期の乾物重 (g m⁻²)

処理区	2000年 6/19		2001年 6/13	
	地上部	根部	地上部	根部
1. 無施工	11.1	5.3	14.1	7.0
2. 砂心破1.2m	11.9	6.7	15.0	8.3
3. 砂心破2.4m	10.3	6.5	17.5	7.7

表27. 砂心破が稲体の窒素・ケイ酸含有量に及ぼす影響

年次	処理	窒素 (g kg ⁻¹)				ケイ酸 (g kg ⁻¹)		ケイ酸/窒素比
		幼形期		成熟期		成熟期		
		茎葉	止葉期	茎葉	穂	茎葉	穂	
1999年	1. 無施工	32.7	-	5.9	10.3	82.5	36.2	13.9
	2. 砂心破1.2m	32.5	-	5.3	9.0	89.4	36.8	16.9
	3. 砂心破2.4m	33.9	-	5.7	9.8	89.2	32.4	15.7
2000年	1. 無施工	32.1	19.7	6.8	10.3	83.0	41.4	12.3
	2. 砂心破1.2m	30.5	17.6	7.0	9.7	91.6	45.7	13.2
	3. 砂心破2.4m	27.0	23.1	6.7	9.8	87.6	43.7	13.1
2001年	1. 無施工	33.9	17.3	6.2	9.8	67.6	-	11.0
	2. 砂心破1.2m	35.6	18.4	5.7	9.6	88.7	-	15.5
	3. 砂心破2.4m	34.3	22.1	6.3	9.7	91.7	-	14.5
2001年 稲わら搬出*	1. 無施工	38.0	19.0	6.5	10.5	79.6	-	12.2
	2. 砂心破1.2m	36.8	22.6	6.7	10.2	98.0	-	14.7
	3. 砂心破2.4m	38.4	21.3	6.7	10.2	97.0	-	14.5

表28. 砂心破が収量および品質に及ぼす影響

年次	処理	穂数 本 m ⁻²	総重	精玄米重	千粒重 g	白米 タンパク質 含有量 g kg ⁻¹	玄米白度	玄米の外観品質	
			g m ⁻²					良質粒 %	青未熟粒 %
1999年	1. 無施工	659	1095	488	23.3	59	18.9	91.1	8.6
	2. 砂心破1.2m	704	1197	530	22.5	55	19.2	93.2	6.7
	3. 砂心破2.4m	707	1185	521	22.8	52	19.4	94.1	5.7
2000年	1. 無施工	620	1274	553	23.0	62	18.4	94.0	5.7
	2. 砂心破1.2m	615	1339	590	22.9	60	18.3	94.1	5.8
	3. 砂心破2.4m	684	1316	561	22.6	62	18.3	93.8	5.6
2001年	1. 無施工	755	1323	525	22.2	63	15.5	67.1	31.3
	2. 砂心破1.2m	789	1317	533	22.2	58	16.1	74.7	23.2
	3. 砂心破2.4m	817	1325	541	22.1	56	16.3	75.4	22.7
2001年 稲わら搬出*	1. 無施工	766	1397	533	22.3	-	15.1	67.9	30.4
	2. 砂心破1.2m	806	1366	547	22.0	-	15.5	65.6	33.0
	3. 砂心破2.4m	886	1410	576	22.4	-	15.7	69.7	28.5
99~01 平均	1. 無施工	678	1231	522	22.8	61	17.6	84.1	15.2
	2. 砂心破1.2m	703	1284	551	22.5	57	17.9	87.3	11.9
*を除く	3. 砂心破2.4m	736	1275	541	22.5	57	18.0	87.8	11.4

年と2001年の白米タンパク質含有量は砂心破施工により低下した。ただし、本施工圃場における砂心破施工間隔1.2mと2.4mの比較では、収量・品質ともにその効果の差が判然としなかった。2001年度は、鷹栖圃場の一部に、稲わら持ち出し処理区を設けて水稻生育調査を行った。その結果、砂心破施工の有無に関わらず、稲わら持ち出し処理によって精玄米収量の増加が認められた(表28)。

3-3 論議

水稻の初期生育、特に根の伸長に影響を及ぼす要因として、2章では土壤中の可給態ケイ酸、遊離酸化鉄および硫黄の濃度や、土壤の還元条件下における遊離酸化鉄と硫黄のバランスに関して検討を行った。その結果、遊離酸化鉄濃度の高い客土や資材施用は、土壤還元の抑制に対して明らかな改善効果が認められた。ただし、水田土壤の還元発達を大きく左右する要因としては、稲わらなど有機物の湛水条件下での分解が挙げられる。

特に、近年の研究では、水稻初期生育抑制と養分吸収阻害について、すき込まれた有機物の嫌氣的分解に伴う芳香族カルボン酸生成が大きな要因であると考えられると報告^{65,66)}がある。北海道では芳香族カルボン酸生成を確認した例がなかったため、本試験でいくつかの培養試験を試みた。培養試験を行った結果、稲わ

ら無施用条件で芳香族カルボン酸(安息香酸, 2-フェニルプロピオン酸, 3-フェニルプロピオン酸)の測定値が非常に小さいのに対して、稲わら添加条件で著しく高まっていた(表12, 表13)。水稻種子根伸長に対する阻害作用は2-フェニルプロピオン酸濃度で0.5 μM程度から、3-フェニルプロピオン酸濃度で40 μMから認められている⁶⁶⁾。また、水耕における窒素吸収阻害活性は、2-フェニルプロピオン酸, 安息香酸, 3-フェニルプロピオン酸で各々1, 100, 100 μMで明らかに認められたことが報告されている⁶⁶⁾。本試験でも、2-フェニルプロピオン酸濃度で1 μMを越える事例があり、北海道の水田土壤において稲わらすき込み条件における芳香族カルボン酸の蓄積が、水稻の初期生育にダメージを与えている可能性がある。また、そのピークは30°Cで10日頃(積算温度300°C)、20°Cで13日~20日頃(積算気温260°C~400°C)であった。過去の北海道における調査から、土壤中のポリフェノール濃度は日平均積算気温で200°C~300°Cでピークが見られるとの報告⁶¹⁾もあり、本試験結果に類似している。本道水田の5・6月の水温・地温は20°C以下であり、具体的上川農試で調査したデータでは、6月の地温(深さ5 cm)の平均が15~20°Cの範囲内に推移していた(図22)。したがって水田での芳香族カルボン酸のピークは、一般的に入水が行われる5月中旬から約1ヶ月後頃の6月上旬~中旬、すなわち活着から茎数増

加にかけての非常に重要な時期に当たることが推察される。

次に芳香族カルボン酸の蓄積と土壌間差異の関係について検討した。本試験では腐植の少ない褐色低地土である上川農試土壌に対して、腐植の多い褐色低地土である圃場A土壌、腐植の少ない粘土質灰色低地土である圃場B土壌、泥炭土壌の圃場C土壌を比較した。その結果、温度が低いほど、見かけの生成ピークが遅れることは各土壌に共通した。20℃の比較では、安息香酸や2-フェニルプロピオン酸の生成量はともに泥炭土である圃場Cで最も高く、灰色低地土である圃場B土壌で低かった(表12)。その要因は、易分解性有機物量や分解菌(嫌気性菌)の存在量・状態、さらに土壌の還元進行程度もしくは酸化容量(土壌中の酸素、硝酸、易還元性マンガン、遊離酸化鉄を酸素に換算合計したもの)の大小が影響していると考えられる。

具体的には、上川農試の稲わら連用(稲わら春混和)土壌では、有機物無施用土壌より各種芳香族カルボン酸濃度が低く推移した(図23)。これは、稲わら連用により、水田土壌中における分解菌の活性が高まり、有機物分解の中間生成物である芳香族カルボン酸の滞留時間を短縮している可能性が考えられる。酸化容量の観点からは、本試験において遊離酸化鉄の補給(酸化容量の拡大)が芳香族カルボン酸の生成を抑制するか否かを検証した。その結果、3種類のカルボン酸に共通してピークは、無施用に対して客土区で低く、かつ短期間に抑えられていた(図24)。これは、遊離酸化鉄濃度の増加により、土壌還元の進行が緩和されていたのではないかと推察される。

また、上川農試水田と近隣の圃場Aの水稲生育を見た結果、稲わら春混和区では幼穂形成期の窒素吸収が少ないことが判る(表14)。これは、稲わら連用により土壌の分解活性が高まったとしても、未熟な稲わらが湛水直前に混和されることで一定程度の初期生育抑制が起こっていることを示唆している。また、圃場Aの幼穂形成期の窒素吸収量および収量は客土により向上しており、これは第2章で示したように、土壌中の遊離酸化鉄濃度の増加に伴う土壌還元抑制、硫黄とのバランス改善とともに芳香族カルボン酸の生成を緩和するうえでも有効であった可能性もある。このように、有機物由来の芳香族カルボン酸の影響は、北海道の水稲初期生育に関して、重要な要因と考えられることから、今後も検討が必要と考える。

このように、稲わら等未分解の有機物が湛水条件で

ある水田作に持ち込まれることは、嫌氣的分解生成物の観点から見て、望ましいことではないが、実際場面においてその搬出は容易でない。また、「有機農業」「クリーン農業」などに指向されるように、地力維持・土壌肥沃度の観点からは、有機物(稲わらも含めて)を用いた水稲栽培が求められる。ゆえに、予想される未熟有機物の分解や土壌還元、有害物質の蓄積などを緩和しつつ、有機物資源の有効活用を図らなければならない。本試験では、湛水以前の稲わらの好氣的分解を促進し、湛水後の分解基質を減少する方法、湛水期間の土壌還元を抑制し、有害物質の排除を行う方法について検討を行った。

近年、水田における有機物の嫌氣的分解は、それに伴って発生する温室効果ガスであるメタンガスについて研究が進んでおり、嫌氣的分解とメタンガス生成は深く連携していること、有機物の嫌氣的分解過程で大量に生成・放出されることが報告されている⁸¹⁻⁸⁴⁾。水田への分解基質持ち込みを減少する手法として、稲わらの圃場外への持ち出しや堆肥化による分解促進が有効である^{81,85)}。特に、積雪低温下にある北海道の水田では冬期間の酸化的な稲わら分解が極めて緩慢であるため、堆肥化するか収穫後の秋すき込みが指導されている⁸⁶⁾。しかし、北海道では稲わらの約6割が圃場に放置され、その多くが春にロータリー混和される実態にあるため⁸⁹⁾、したがって、その圃場内における分解促進手法が重要となる。過去にも分解促進のための資材について検討されているが、その効果は報告によって異なる⁸⁷⁻⁸⁹⁾。また、北海道における冬期間の水田地温は、本州以南と比較して低温に推移する^{90,91)}。本試験を行った上川農試水田における1998年収穫後～積雪前と1999年融雪～耕起前の調査では、深さ5cmの平均地温が10月4半旬で12.0℃、10月5半旬で8.9℃、10月6半旬で7.9℃、融雪後の4月5半旬が9.4℃、4月6半旬が11.7℃であった(表17)。したがって、非湛水期間で平均地温10℃以上を確保できるのは収穫時(9月)～10月下旬までと、4月下旬～5月上旬のわずかな期間に限られ、稲わらを酸化的に分解する微生物の活動は極めて低いと推測される。

しかし、培養試験の結果から稲わらの分解は5℃のような低温条件でも緩慢に進行しており、さらに窒素肥料および分解促進資材の添加で促進効果が認められた(表16)。一方、20℃培養では稲わらのみ区(1区)で乾物減少率46.2%、炭素減少率55.5%と5℃培養に比べて高かったものの、資材添加による分解促進効果

は5℃ほど顕著ではなかった。これは高い温度条件により、土着の微生物が十分に活動できる環境にあったためと考えられる。過去に行われた調査から北海道における冬期間の稲わら分解率(10月下旬~11月上旬に散布し、5月中旬~下旬に回収)は20~40%と報告⁹²⁾されており、先述のように収穫後の非湛水期間に平均地温10℃以上得られる期間は短いことから、本培養試験の条件では20℃より5℃条件の結果が実態に近いと考えられる。ただし、本試験は不織布内に稲わらと資材のみを混合しているため、土壌との接触による分解を過小評価している可能性がある。したがって、分解量の絶対値に関してはさらに検討が必要と考えられるが、本試験結果は稲わら分解促進資材が5℃程度の低温条件でもその効果を発揮し、北海道のような寒地でも稲わら分解促進に有効である可能性を示唆するものである。

実際の水稲栽培において稲わらをすき込みする場合、水田作土が多湿な条件で実施されることも多く、土壌の繰り返しによる透排水悪化と有機物分解の低下が懸念される。これに対して木村ら⁹³⁾、松本ら⁹⁴⁾は有機物を表層のみに浅く混和することでメタンの発生が少ないことを明らかにした。土壌表層は比較的水分が少ないために混和作業が容易であることや、深さ12~15cm程度の慣行のすき込みと比較して稲わらが表層に存在するため分解に必要な温度を得られやすいなどの利点が考えられる。本試験の結果は、稲わら秋混和の炭素減少率が稲わら春混和と比較して有意に高くなっており、秋の土壌混和が稲わら分解に有効であった(表18)。さらに秋混和に分解促進処理(肥料添加、分解資材添加)を組み合わせた場合では、分解が一層促進されていた。

また、本試験では嫌氣的有機物分解の指標として、メタンフラックスを測定した結果、稲わら無施用条件におけるメタン発生量が稲わら春混和区の16%(1998年)、28%(1999年)に過ぎず、稲わら由来のメタン放出は非常に大きいことが判る(表19)。農家慣行に多く見られる稲わら春混和と比較して、今回の稲わら秋混和における湛水期間の水田からのメタン発生量は54%(1998年)、70%(1999年)に過ぎず、さらに稲わら秋混和+肥料(A, B)+分解資材添加では46%(1998年)、58%(1999年)と、顕著なメタン発生量の軽減効果が認められた。また、稲わら秋混和+肥料(A, B)+分解資材添加区は稲わら秋混和区と比較した場合でも、3ヶ年ともメタン発生量が15%程度軽減

していた。

稲わらの分解時期の観点から、冬期間および水稲栽培期間における稲わら中の炭素含有量の変化を見ると、水稲収穫時までの炭素の累積減少率は60%程度で各処理区間差は小さく、湛水期間の分解量は春耕起までの炭素減少率が低い場合に高まる傾向にあった(表20)。既往の報告^{95~97)}から推察すると水稲の作付け後までに稲わらの易分解性画分(全糖、デンプン、ヘミセルロースなど)が分解され、収穫時には難分解性画分(リグニンなど)が残存したものと考えられる。稲わら分解促進処理がメタン発生の軽減に有効であったのは、湛水前までに易分解性画分の多くが分解されたためと推察される。

最終的な水稲生育に関しても、分解促進処理区は農家慣行に多い稲わら春混和(秋散布後放置)と比較して、収量・品質とも優っていた(表21)。以上のことから、秋収穫後の稲わらの浅い土壌混和、さらに分解促進処理(肥料、分解資材添加)が、北海道のような寒地水田における稲わらの分解促進と翌年の嫌氣的分解の緩和に実用的かつ効果的であると判断する。

続いて、水管理は土壌の酸化還元電位(Eh)に大きな影響を及ぼす。中干し処理に関しては十分な土壌乾燥を行うことで、処理後に酸化還元電位が急速に上昇し、その後も比較的高く推移することが知られている^{98,99)}。これは中干し処理によって水田土壌中に多量の酸素が供給されることで、土壌の表層がより酸化的状態に移行していることを示すものである。先に述べたように有機物分解に伴うメタン生成はEh=-150~-200mV以下の嫌氣的条件で生成することが知られており¹⁰⁰⁾、中干し処理は酸化還元電位を高めることで、メタンの生成を軽減するものと理解される。

北海道の水田は土壌の還元に伴う水稲の初期生育抑制を緩和するため、透排水不良田、わら施用田に対して幼穂形成期前(6月下旬)に「田面に亀裂が生じ、足で歩いて跡が付く程度」の中干し処理を行う技術指導が行われている¹⁰¹⁾。しかし、これは気象と土壌、水稲生育を考慮して行う必要があり、常に十分な土壌の乾燥を得るのは容易でない。また落水期間の延長は幼穂に対する低温障害の危険性もある。本試験圃場における水稲の幼穂形成期は1997年で7月5日、1998年で7月2日、1999年で7月2日であり、1998年と1999年においては中干し期間が幼穂形成期とほとんど重なる結果となった。水稲生育ステージは年次変動が大きいが、現場指導上は幼穂の低温障害を避けることが優

先し、早々に落水をうち切られるため、安全にかつ十分な落水期間を得ることは容易でない。そこで本試験では、中干しと比較して落水期間が短いため土壌乾燥は劣るが、一定の土壌酸化効果が期待される間断灌漑について検討を行った。

幼穂形成期前（6月下旬～7月初旬）における強程度（ $pF1.8 \sim 2.0$ ）の間断灌漑はメタン発生量を軽減する効果が認められ、ほぼ中干しに準じる効果があった（図25）。しかし、 $pF1.5$ 以下の弱程度の間断灌漑ではメタンの発生量の軽減効果が低かった。このようなメタン発生軽減効果の差は土壌水と大気との交換、またそれに伴う鉄・マンガンなどの酸化^{102,103}程度が異なることによると考えられる。つまり $pF1.5$ 以下の場合には、土壌中の粗大孔隙のみが排水され、そこに大気との侵入が行われた状態であり、土壌と酸素の接触面積が比較的少ないため酸化の程度も弱く、その効果も粗孔隙部に局在している。これに対して $pF1.8$ 以上になると土壌中の細孔隙の毛管水の一部とも大気との交換が進むため¹⁰⁴、土壌酸化される表面積が拡大するとともに、土層全体へ及んだためと推察される。このように適切な幼穂形成期前の間断灌漑は中干し処理に近いメタン発生軽減効果が期待できる。しかし、そのためには一定の落水強度が必要であり、その目安としては土壌表面の亀裂がわずかに観察される程度、すなわち作土の水分ポテンシャル（ pF ）が1.8以上に達する程度と考えられる。ただし、落水による土壌酸化のばらつきも予想されることから、水稻栽培現場で間断灌漑を行うためには、簡易で安定した土壌酸化程度の評価手法が必要と考える。

水稻生育に関しては、中干し処理および間断灌漑処理により精玄米収量は高まる事例が多かったが、その差は大きくなく、間断灌漑強度の差も判然としなかった（表23）。これは、本試験で用いた上川農試圃場が、排水良好な褐色低地土であったことから、落水後の土壌酸化は比較的速やかであったためであると推察される。ゆえに、表面水排除のみで急速に土壌還元を緩和し、有機物分解生成物による生育抑制を一定程度軽減できた可能性を示唆すると考えられるが、この点について透排水条件の異なる圃場での確認が必要である。また、白米タンパク質含有量に関しては、平年並みの気象推移で低タンパク質であった1998年と気象が高温に推移してタンパク質含有量が高かった1999年とも中干し処理および間断灌漑で低下する傾向にあることから、総じて中干しおよび間断灌漑は水稻生育と低タン

パク質米生産の観点から望ましいと考えられる。

出穂後の間断灌漑に関しては、出穂後の間断灌漑でメタンフラックスの低下する場合も見られるが、幼穂形成期前の処理と比較してメタン発生量に及ぼす影響は小さかった。これは出穂後（8月上旬）処理では有機物分解のピークが過ぎていたことと、北海道では出穂後の湛水期間が非常に短いことによる。つまり、北海道の水稻栽培は収穫時の地耐力を得るために出穂後2週目頃（8月中旬）に湛水終了するのが一般的であり、そのため、出穂後の間断灌漑は幼穂形成期前に実施する間断灌漑と比較して効果が小さいと考えられる。

次に、圃場の排水改良に関する観点から検討した。既存の暗渠排水の施工は広く行われているが、土壌条件・施工方法によってはその効果を十分に引き出せない場合や、局所的な改善が地表面全体の乾燥には不十分な場合もある。本試験では、暗渠排水に対する新たな補助工法である砂充填細溝心土破碎（砂心破）を開発し、細かい排水溝を圃場全体に密に形成することを試みた。

今回は、暗渠に対して45度に斜交して施工しており、暗渠管との連絡と施工作業の観点から一般的な補助暗渠の施工と同様でよいと考えられる。施工には超々湿地用のクローラクターを用いていたので、高水分の軟弱条件でも施工可能であった。しかし、一般的な超々湿地用クローラ程度でも、耕うん・収穫作業時の平均地耐力 4 kgf/cm^2 でも支障はないと考えられる。

強粘質な土壌での無材心破は、水稻作付けにより溝の再連結が起こり、その排水機能の持続性について懸念されるが、砂心破の充填溝は施工3～4作後にも十分な排水機能を維持していた（図28）。その結果、砂心破処理区は、湛水期間の縦浸透量および暗渠排水量が増加し、落水後の作土水分低下が認められた。排水性の向上は、暖められた田面水の土壌への浸透を促進したと予想され、砂心破処理区では地温の上昇も認められた。特に、浸透水による酸素供給は、湛水期間の土壌還元進行の緩和に有効であり、根圏環境の改善に効果を示した。ただし、排水能および土壌乾燥等に関しては施工間隔の差異（1.2mおよび2.4m間隔）は判然としなかった（表24）。

水稻初期生育は、無施工区と比較して砂心破施工区で優る傾向にあり、根重の増加にも効果が認められた（表26）。さらに、成熟期茎葉のケイ酸含有量やケイ酸/窒素比も砂心破施工区で増加しており（表27）、土壌環境改善による根活力向上が生育後半まで、生育に対

して良好な影響を与えたものと考えられる。水稻収量に関しては、1～8%程度の増収効果が得られた。しかし、圃場排水機能と同様に、施工間隔による水稻生育・収量の差異（1.2mおよび2.4m間隔）は判然とせず、ゆえに2.4m間隔の施工でも、十分な排水効果を得られたものと判断する。このような速やかな地表水排除と乾燥は、湛水期間の土壌還元を緩和すると同時に、秋収穫後の稲わらすき込みなど有機物管理についても作業を容易にすることから、実用場面のニーズに合致するものであると考える。

類似したものに、過去におけるモミガラ心破の報告^{73, 105, 106)}があり、増収効果が1～5%程度であったことと比較すると、今回の砂心破の効果は同等以上であったと考えられる。また、近年はモミガラの確保が困難になってきていることから、本施工方法はモミガラ心破に替わる新たな補助工法として期待できる。

以上のように、北海道のような寒地水田において、有機物（特に稲わら残渣）施用が水稻の生育に及ぼす影響は古くから重要な課題である。現行の技術体系において、稲わらを一時搬出して、堆肥化後に再度圃場還元することは一般的ではないため、未熟残渣が湛水後に嫌氣的分解されて、芳香族カルボン酸生成などにより、水稻の初期生育を抑制しているものと推察される。これに対処するためには、前年収穫後～次年度湛水までの低温条件下でいかに多く酸化的分解処理を進めるかが重要となる。本試験からは、収穫後速やかに作土表層に浅耕混和することが有効であり、その際には適当な窒素肥料および微生物資材の併用がさらに望ましいと考えられた。また、湛水後の土壌還元を緩和することも、水稻生育改善の観点から有効であり、幼穂形成期前の間断灌漑の実用性が高く、新たな圃場排水技術として砂充填細溝心土破碎（砂心破）も有効であると判断した。

第4章 白米タンパク質含有量の低下を目指した窒素の合理的施肥法

4-1 既往の知見

1) 基肥窒素施肥

北海道米の食味は「きらら397」、「ほしのゆめ」などの良食味品種の育成と肥培管理技術の開発などにより大きく向上してきたが、白米タンパク質含有量は依然高い⁹⁾。白米タンパク質含有量は高いほど食味評価値が劣り、米飯の粘性、弾性も低下する。この傾向は白米タンパク質含有量 85 g kg^{-1} 以上で顕著であることが報告されている^{4, 39, 107)}。食味官能試験では、タンパク質含有量の差が 5 g kg^{-1} 以上で判別が可能であり、 10 g kg^{-1} 以上では明らかな差が認められるとの報告もある¹⁰⁸⁾。また、販売・流通・実需においては、生産地域内における白米タンパク質含有量の変動幅の縮小も求められている。

白米タンパク質含有量の変動は水稻の窒素吸収の影響が大きく、水稻の窒素吸収量は施肥量と施肥法に関係している。水稻に対する窒素施肥技術は、これまでに多くの研究が行われ、その中には重窒素を用いた施肥窒素の利用率に関する報告もある^{109, 110)}。これらの報告を見ると、特に、北海道における施肥窒素の利用率は、全層施肥窒素(8 g m^{-2})の平均値が27~35%であった¹⁵⁾。ただし、北海道の基肥施用技術は近年になり全層施肥以外に、表層施肥^{98, 99)}、側条施肥^{113~116)}が開発され指導・普及されてきた。具体的には表層施肥が作土表層0~5 cmに、側条施肥が株横3 cm、深さ3~5 cmの局所に条施する方法である¹¹⁷⁾。これらは生育初期の吸収が高く、生育の促進が求められる寒地稲作において重要な技術であるが、両施肥法とも土壌窒素肥沃度の低い場合には生育後期の凋落も見られるため、全層施肥との組み合わせ(全層+表層、全層+側条)が推奨されている。ただし、これらの施肥技術は主に水稻の安定多収を目的としており、白米タンパク質含有量に及ぼす影響は未検討な点が多い。

2) 追肥窒素施肥

寒冷地の北海道では、冷害対策の観点から様々な窒素追肥・分施肥技術が確立されてきた。幼穂形成期の窒素追肥は、穂数や総粒数が増加するため高温年には有効であるが^{118~120)}、冷害年には不稔の発生が多く、むしろ収量低下が懸念されること¹²¹⁾、側条施肥との組み合わせの場合に有効であること¹²²⁾が報告されている。一方、追肥時期を幼穂形成期後7日目にした場合

は穂数と一穂粒数をやや増加させる作用があり、倒伏や無効分けつも小さく、気象条件の変動にも対応できることから冷害時の影響も小さい。このため、基肥量を8~9割に押さえて、残り1割~2割は気象を見極めて幼穂形成期後7日目に追肥することが昭和38年以降の基本技術となっている^{38, 122, 123)}。また、止葉期(葉耳間長0の茎が40~50%抽出した日、減数分裂期に相当)の追肥は総粒数を増加させることなく登熟や千粒重を高め、冷害年の安定生産に有利であることから、中苗移植においては基準施肥量より少ない目の基肥とし、窒素 2 g m^{-2} 程度の止葉期追肥が普及されている^{118, 119)}。

このように、北海道において幼穂形成期後7日目の追肥と止葉期の追肥技術は普及しているが、これは主に安定・多収を目的としていた。過去の報告から、北海道における幼穂形成期追肥窒素の利用率は高温年で50%、低温年で30~40%であったが、基肥窒素の利用率より明らかに高かった¹⁵⁾とされる。これに対し、本州における追肥窒素の利用率は移植直後の追肥で3~18%、穂肥で30~84%、実肥で51~74%であり、年次により大きな変動も認められている¹²⁴⁾が、通覧すると本州各県の追肥窒素利用率は北海道の事例より高い傾向にある。また、東北において幼穂形成期から穂揃期にかけての追肥は、吸収した窒素の65~80%が玄米に移行することが認められ、穂揃期に近いほど玄米に移行する割合が高まった¹⁶⁾。穂揃期前後の追肥では穂の窒素保有量の58~74%程度が追肥後に吸収された窒素であり、無追肥のものよりも白米タンパク質含有量が高く、食味の低下が認められた¹²⁵⁾。しかし、北海道のような寒地水稻の生育全般にわたる追肥時期と吸収された施肥窒素の分配、白米タンパク質含有量の関係については十分な検討がされていない。また、これまでの報告では追肥窒素の穂および玄米への移行について報告されているが、白米タンパク質含有量に対する影響を解析するうえでは窒素の白米への移行・集積の検討が重要であり、このため重窒素標識窒素をトレーサーとして用いることが有効である。

4-2 実験方法および結果

4-2-1 窒素の施肥法別利用率と各器官への分配 実験方法

1) 供試圃場および栽培概要

試験は1991年～1993年に北海道旭川市永山の上川農業試験場水田(腐植質褐色低地土)で実施した。作土の土色は暗灰、土性がCL、化学性は全炭素含量: 64.6g kg⁻¹, 全窒素含量: 4.9g kg⁻¹, CEC: 27.4cmol. kg⁻¹, pH(H₂O): 5.8であり、60cm以下に砂礫層が出現する排水良好な土壌である。試験区は1連制で水田圃場内に木枠を組み、木枠の左右2カ所には幅5cm程度の穴を設け、代かき時以外は田面水を枠外と連絡させた。試験規模は1.2m²(1.2m×1.0m)で実施した。

供試品種は北海道の奨励品種である「きらら397」を用いた。中苗箱マット苗を用いて条間30cm, 株間12cmで、8株×4列=32株を手植え(4本植)した。移植は1991年で5月21日, 1992年で5月21日, 止葉期(葉耳間長0の茎が40～50%抽出した日, 減数分裂期に相当)は1991年で7月21日, 1992年で7月24日, 成熟期は1991年で9月18日, 1992年で9月28日であった。稲わらは毎年圃場から搬出し、水管理は移植から8月上旬まで連続湛水した。

2) 窒素施肥法と施肥量

窒素は硫酸を用いて全量全層施肥, 全層+表層施肥および全層+側条施肥を行い, 全量全層施肥および全層と組み合わせた。表層, 側条施肥分の窒素には重窒素標識硫酸を用いた。全量全層施肥処理では施肥窒素量0, 4, 8, 12, 16g m⁻²区を設け, 全層+表層施肥および全層+側条施肥処理では全量全層8g m⁻²区を標準として, 全層4g m⁻²+表層4g m⁻²(以下, 全層+表層区), 全層4g m⁻²+側条4g m⁻²(以下, 全層+側条区)で施肥した。重窒素標識硫酸の重窒素濃度は, 全量全層4g m⁻²区と表層および側条施肥では7.12atom%, 全量全層8, 12, 16g m⁻²区では4.13atom%のものを用いた。リン酸(P₂O₅)とカリ(K₂O)はPK化成肥料で各々8g m⁻²となるように全量全層施肥で与えた。

全層施肥は耕起時に施用し, 深さ15cmまで混和した。表層施肥は代かき後に落水し, 表面施用してから深さ5cmを目安に土壌と混和した。側条施肥は代かき後に落水し, 稲株の横3cm, 深さ5cmの溝を作って施用した。

3) 調査分析方法

各処理の茎葉分析用試料として, 止葉期に試験枠の4列目の8株の茎数, 成熟期には試験区の枠内2列目に位置する8株の穂数を調査し, その中から中庸な株(止葉期2株, 成熟期3株)を抜き取った。成熟期のサンプルは稈, 葉鞘, 葉身, 穂に区分し, 穂以外の画分を70℃で乾燥, 粉碎した。全窒素の定量はケルダール

法によった。また, 重窒素の定量は硫酸を受液としてケルダール法により蒸留, 受液をホットプレート上で濃縮したものを, 昭光通商(株)に分析依頼した。分析には質量分析計¹²⁶⁾(日立RMI-2型)を用いて定量した。

穂部は試料と別に枠内から20株を収穫し, 脱穀して稲わらと籾の重量を測定した。その後, 籾摺りをして籾殻と玄米に分画し, この玄米重と栽植密度から収量を算出した。さらに, 得られた玄米は搗精歩合90%になるように設定した小型精米機(ケツ社, パーレスト)を用い, 糠と白米に分画した。これらを茎葉と同様に乾燥, 粉碎, 分析した。これにより得られた吸収窒素量の施肥窒素量に対する割合を施肥窒素の利用率, 吸収された総施肥窒素量に占める各器官の比率を吸収された施肥窒素の分配率とした。

分析用の抜き取り調査および収穫調査では, 地際刈りとして地上部のみを取り扱い, 地中の茎部および根は圃場に残留した。成熟期の茎葉部の窒素吸収量の算出には, 茎葉試料の稈, 葉鞘, 葉身乾物重の比率を, 脱穀により得られた稲わらの乾物重に掛け合わせて得られた換算重量を用いた。穂部の場合は, 脱穀後に得られた各画分の乾物重を用いた。また, 白米タンパク質含有量は白米中の窒素含有量に5.95を乗じて乾物当たりで示した。

実験結果

1) 全量全層施肥における窒素量別の窒素利用率および各器官への分配

試験は1991年と1992年の2カ年で行ったが, 両年もほぼ同様の傾向にあったので, 本報では主に平均値を用いて検討する。成熟期の総窒素吸収量は施肥窒素量に伴って増加し, 2カ年平均で最低の全量全層4g m⁻²区が9.98g m⁻², 最高の16g m⁻²区が16.4g m⁻²であった(表29)。また, 0g m⁻²区における成熟期の総窒素吸収量は6.52g m⁻²であった。重窒素分析により得られた成熟期の施肥窒素吸収量も施肥窒素量に伴って増加し, 2カ年平均で最低の全量全層4g m⁻²区が1.30g m⁻², 最高の16g m⁻²区が6.58g m⁻²となった(表29)。成熟期の総窒素吸収量から施肥窒素吸収量を差し引いた土壌由来の窒素吸収量は, 若干であり有意な差ではないことが多いものの, 施肥量に伴って増加する傾向にあった。

成熟期の窒素吸収量に占める施肥由来窒素の割合は2カ年平均で4g m⁻²区が13.0%, 8g m⁻²区が24.3%, 12g m⁻²区が32.6%, 16g m⁻²区が40.1%であり, 施肥窒素量の増加に伴って直線的に高まった(表29)。同様

表29. 窒素吸収に及ぼす窒素施用量および施肥位置の影響

項目	全量全層区 施肥窒素量 (g m ⁻²)					全層+表層区 (g m ⁻²)	全層+側条区 (g m ⁻²)
	(0)	(4)	(8)	(12)	(16)	全4+表(4)	全4+側(4)
成熟期窒素吸収量 A (g m ⁻²)	6.52 a	9.98 ab	11.7 ab	13.9 bc	16.4 c	10.7 ab	12.3 bc
成熟期施肥窒素吸収量 B (g m ⁻²)	—	1.30 a	2.84 b	4.52 c	6.58 d	0.95 a	1.48 a
土壌由来の窒素吸収量 (A-B)	6.52 a	8.68 ab	8.81 ab	9.35 ab	9.84 b	—	—
成熟期窒素吸収量に占める 施肥由来窒素の割合 (%)	—	13.0 a	24.3 b	32.6 c	40.1 d	—	—
施肥窒素の利用率 (%)	—	32.4 ab	35.5 ab	37.7 ab	41.2 b	23.8 a	37.0 ab

成熟期は1991年：9月18日，1992年：9月28日
 施肥窒素の吸収量および利用率は ()内の施肥窒素を対象とする
 1991年，1992年の平均値
 各項目における異なる英小文字は，Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。

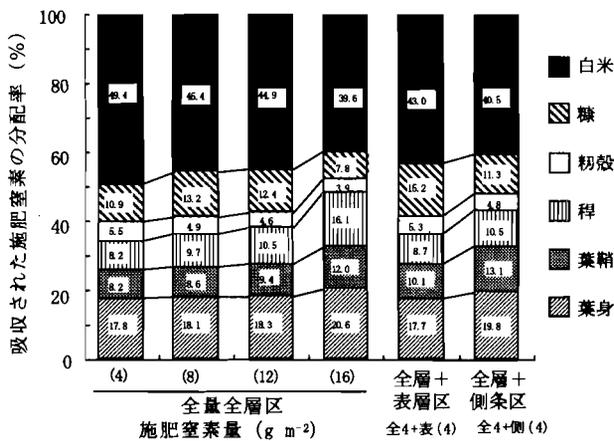


図31. 吸収された施肥窒素の各器官への分配率
 1991年，1992年の平均値。
 分配率は ()内の施肥窒素を対象とした。

に，施肥窒素の利用率も2カ年平均で4 g m⁻²区が32.4%，8 g m⁻²区が35.5%，12 g m⁻²区が37.7%，16 g m⁻²区が41.2%であり，施肥窒素量の増加に伴って高まる傾向にあった。

水稻に吸収された施肥窒素の各器官への分配率を図に示した(図31)。茎葉(葉身，葉鞘，稈)の分配率は，施肥窒素量の増加に伴って高まったが，白米への分配率は施肥窒素量の増加に伴って低下した。北海道における施肥窒素量は概ね8~9 g m⁻²程度であるが⁵⁹⁾，本試験の8 g m⁻²区の分配率でみると，葉身18.1%，葉鞘8.6%，稈9.8%，籾殻4.9%，糠13.2%，白米45.4%であり，葉身合計が36.5%に対し，穂部が63.5%と大きかった。

白米タンパク質含有量については有意な差ではないが，最低が4 g m⁻²区71.8 kg⁻¹，最高が16 g m⁻²区84.9 g kg⁻¹であり，0 g m⁻²区の73.6 g kg⁻¹を除いて全層施肥窒素量の増加に伴って高まった(表30)。また，2カ

表30. 窒素施用量および施肥位置が収量構成要素に及ぼす影響

項目	全量全層区 施肥窒素量 (g m ⁻²)					全層+表層区 (g m ⁻²)	全層+側条区 (g m ⁻²)
	(0)	(4)	(8)	(12)	(16)	全4+表(4)	全4+側(4)
総粒数 (×1000粒 m ⁻²)	14.7 a	24.2 ab	29.5 ab	37.4 b	38.7 b	24.7 ab	31.3 b
千粒重 (g)	22.3 a	21.1 ab	21.0 ab	20.5 b	20.2 b	21.1 ab	20.9 ab
不稔歩合 (%)	4.9 a	6.7 a	15.7 b	17.4 b	33.3 c	10.0 ab	11.5 ab
稈実粒数 A (×1000粒 m ⁻²)	14.0 a	22.6 ab	24.9 ab	30.9 b	25.8 ab	22.2 ab	27.8 ab
精玄米収量 (g m ⁻²)	299 a	448 a	510 a	549 a	525 a	452 a	517 a
白米へ分配された施肥窒素吸収量 B (g m ⁻²)	—	0.64 ab	1.29 bc	2.04 cd	2.60 d	0.41 a	0.60 ab
白米当たり分配到された施肥窒素量 B/A (1000粒当たりの窒素mg)	—	28.4 ab	51.5 bc	66.2 c	100.8 d	18.4 a	21.9 a
白米タンパク質含有量 (g kg ⁻¹)	73.6 a	71.8 a	73.8 a	78.1 a	84.9 a	69.9 a	71.4 a

施肥窒素の吸収量および利用率は ()内の施肥窒素を対象とする。
 1991年，1992年の平均値
 各項目における異なる英小文字は，Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。

年平均の精玄米収量は 0g m^{-2} 区が 299g m^{-2} と最も低く、 4g m^{-2} 区～ 12g m^{-2} 区は施肥窒素量に伴って増加し、 16g m^{-2} 区では 12g m^{-2} 区と比較して若干減少した(表30)。収量構成要素を見ると、総粒数と不稔歩合は施肥窒素量に従って増加し、反対に千粒重は低下した。特に、 16g m^{-2} 区では不稔歩合の増加が顕著だった。また、白米当たりの分配施肥窒素量(1000粒当たりの吸収施肥窒素mg)は、施肥量の増加に伴って顕著に高まった。

2) 施肥法別の窒素利用率および各器官への分配

成熟期の総窒素吸収量は2カ年平均で全層+表層区が 10.7g m^{-2} 、全層+側条区が 12.3g m^{-2} 、重窒素分析により得られた表層および側条に施用された施肥窒素(4g m^{-2})の吸収量は全層+表層区が 0.95g m^{-2} 、全層+側条区が 1.48g m^{-2} であった(表29)。

表層および側条に施用された施肥窒素(4g m^{-2})の2カ年平均の利用率は全層+表層区が23.8%、全層+側条区が37.0%であり、全量全層区 4g m^{-2} 区および全量全層 8g m^{-2} 区と比較して全層+表層区で低く、全層+側条で同程度または高い傾向にあった。

寒冷な北海道では水稻の生育が遅く、最高分け時期は幼穂形成期以降に現れ、その後止葉期頃までに形成された穎花の退化が起こるとされる¹⁹⁾。穎花の退化防止は窒素含有量と相関があり、止葉期までの窒素吸収が総粒数の確保に重要であることから、1992年の試験では止葉期以前と以降における施肥法別の窒素吸収についても検討した。表層および側条施肥の窒素吸収は全てが止葉期前であるのに対して、全層施肥では止葉期以降でも施肥窒素の吸収が行われていた(図32)。

止葉期以降の施肥窒素の吸収は、全層施肥窒素量が多いほど増加した。止葉期以前の総窒素吸収量(施肥由来と施肥由来以外の加算)は全層+側条区で全量全層 8g m^{-2} 区より多かった。

1991年と1992年の2カ年平均の吸収された表層および側条施肥窒素の茎葉への分配率は、全層+表層区が36.5%、全層+側条区が43.4%であり、全量全層 8g m^{-2} 区の36.5%の場合と比較して全層+側条区が高かった(図31)。さらに茎葉を区分すると、全量全層 8g m^{-2} 区と比較して、特に全層+側条区で葉鞘への分配が高かった。白米への分配率は、全量全層 8g m^{-2} 区が45.4%であるのに対して、全層+表層区が43.0%、全層+側条区が40.5%となり、特に全層+側条区では穂部および白米への窒素の移行が少なかった(図31)。

2カ年平均の白米タンパク質含有量は全層+表層区が 69.9g kg^{-1} 、全層+側条区が 71.4g kg^{-1} であり、総施肥量が同等である全量全層施肥 8g m^{-2} 区よりも低かった(表30)。収量構成要素を見ると、総粒数は全層+側条区>全量全層施肥 8g m^{-2} 区>全層+表層区の順であり、不稔歩合は全量全層施肥 8g m^{-2} 区が全層+側条区や全層+表層区より高く、精玄米収量は全層+側条区≒全量全層施肥 8g m^{-2} 区>全層+表層区の順であった。

4-2-2 追肥窒素の時期別利用率と各器官への分配

実験方法

1) 供試圃場の特徴と栽培概要

試験は1994年～1995年に上川農業試験場水田(上川

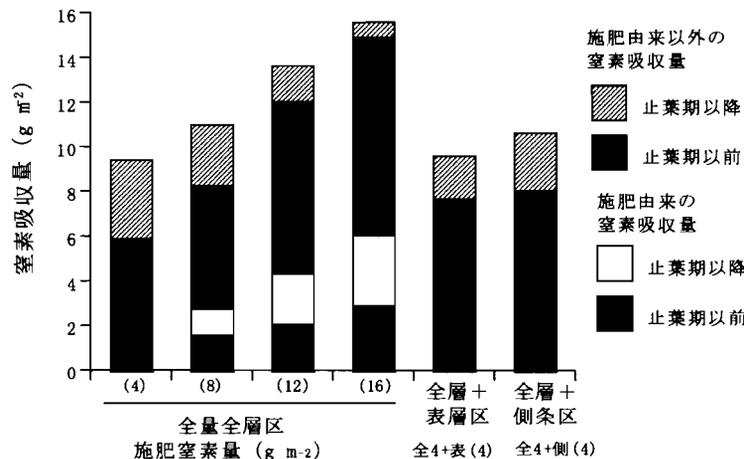


図32. 時期別の吸収窒素量

1992年の分析値。

施肥窒素の吸収量は()内の施肥窒素を対象とした。

全層+表層区および全層+側条区では、「施肥由来以外の窒素吸収量」に全層施肥窒素 4g が含まれる。

郡比布町)で実施した。圃場は褐色低地土で、作土の上色は黄褐色、土性がSCL、全炭素含量：12.6g kg⁻¹、全窒素含量：1.5g kg⁻¹、CEC：13.2 cmolc kg⁻¹、pH(H₂O)：6.1、可給態窒素(30℃、4週間湛水培養法)：70mg kg⁻¹であり、基盤整地時の圧密により作土下の緻密度が少し高いものの、排水性は比較的良好である。

試験は水田圃場を波板によって区切った。試験区は1連制、試験規模は1.44m²(1.2m×1.2m)で行った。供試品種は北海道の奨励品種である「きらら397」を用いた。枠内には中苗箱マット苗を用いて条間30cm、株間12cmで、10株×4列=40株を手植え(4本植)した。波板の左右2カ所には幅5cm程度の隙間を設け、代かき時および追肥時以外は田面水を枠外と連絡させ、移植から8月上旬まで連続湛水した。追肥の際には、追肥時～追肥後1週間程度隙間をふさぎ、田面が露出しない程度にバケツで用水を与えた。稲わらは毎年圃場から搬出した。

2) 窒素施肥

基肥窒素は非標識硫酸を用いて全層基肥3水準(1994年は窒素4, 8, 12g m⁻²、1995年は窒素6, 8, 10g m⁻²)で施用し、これに追肥を組み合わせた。本試験では、北海道における施肥窒素量(追肥含む)が概ね8~9g m⁻²程度^{38,39)}であることから、8g m⁻²を基肥の標準と考えて処理した。追肥は幼穂形成期、幼穂形成期後7日目(1995年のみ)、止葉期、出穂期、出穂期後10日目、出穂期後20日目、出穂期後30日目、出穂期後40日目に追肥時期を変えて各1回ずつ重窒素標識硫酸を用いて窒素2g m⁻²施用した。重窒素標識硫酸は重窒素の濃度が1994年で7.03atom%、1995年で7.22

atom%のものを用いた。1995年は、基肥窒素のみの無追肥処理区を設けた。リン酸(P₂O₅)とカリ(K₂O)は各年ともPK化成肥料で各々8g m⁻²となるように全量全層施肥で与えた。

3) 調査分析方法

各処理に関する茎葉分析用試料は、成熟期に試験区の枠内中央部から8株の穂数を調査し、その中から中庸な3株を採取した。これを稈・葉鞘、葉身、穂に区分した。試料の分析方法は、4-2-1に準じて行った。

茎葉部の窒素吸収量の算出には、茎葉分析用試料の稈・葉鞘、葉身乾物重の比率を、脱穀により得られた稲わらの乾物重に掛け合わせ、これで得られた稈・葉鞘と葉身の換算乾物重量を用いた。穂部は、脱穀で得られた籾の乾物重を用いた。本試験では、(追肥窒素由来の総吸収窒素量)/(追肥窒素量)×100を追肥窒素の利用率とし、(各部位に吸収された追肥窒素量)/(追肥窒素由来の総吸収窒素量)×100として得られる部位別の割合を吸収追肥窒素の各器官への分配率とする。また、(追肥窒素由来の白米吸収窒素量)/(追肥窒素量)×100を白米利用率、(追肥窒素由来の白米吸収窒素量)/(白米の総吸収窒素量)×100を白米窒素中の追肥由来の窒素比率として記述する。

実験結果

1) 追肥した窒素の利用率

基肥窒素量の異なる条件において、追肥時期が異なる場合の追肥窒素の利用率について検討した(図33)。幼穂形成期～出穂期の追肥窒素の利用率は、基肥窒素

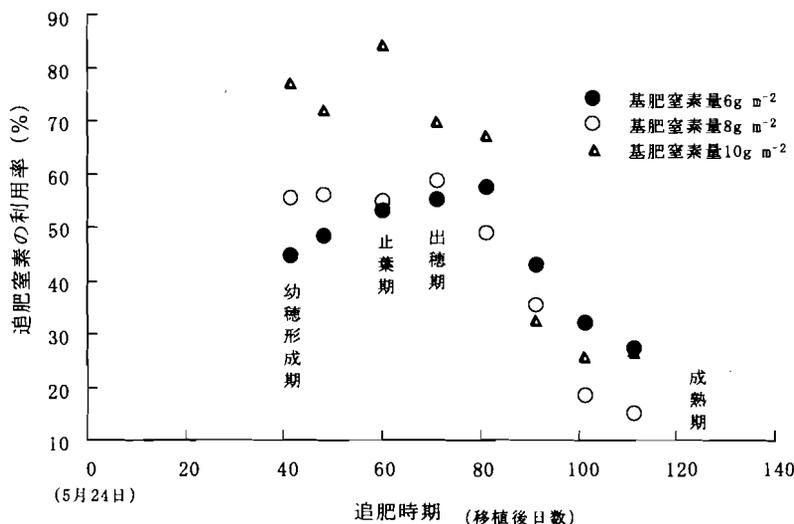


図33. 追肥時期と追肥窒素の利用率の関係(1995年)

表31. 全層基肥窒素量を異にした追肥窒素の各器官への分配 (%) (1995年)

追肥処理時期	全層基肥窒素量 6g m ²			全層基肥窒素量 8g m ²			全層基肥窒素量 10g m ²		
	稈・葉鞘	葉	穂	稈・葉鞘	葉	穂	稈・葉鞘	葉	穂
幼穂形成期	29.4	21.1	49.5	31.1	23.0	45.9	41.7	22.8	35.5
幼穂形成期後7日目	29.2	20.5	50.3	28.5	22.0	49.5	24.7	22.2	53.1
止葉期	28.6	16.2	55.2	21.2	14.5	64.3	25.6	22.9	51.5
出穂期	21.8	13.3	64.9	28.5	16.4	55.1	27.6	17.1	55.2
出穂期後10日目	25.8	16.4	57.8	24.2	11.3	64.5	23.9	11.8	64.2
出穂期後20日目	33.7	16.6	49.7	22.5	10.5	67.0	16.0	9.8	74.2
出穂期後30日目	39.0	24.5	36.6	34.5	14.5	51.0	18.7	11.3	70.0
出穂期後40日目	79.2	7.6	13.2	56.6	17.7	25.7	48.8	15.1	36.0

10g m²区 > 8g m²区 > 6g m²区の順であったが、出穂期後20日目以降の追肥では基肥窒素 6g m²区が 8g m²区と10g m²区に勝っていた。慣行的な追肥ステージで比較すると、幼穂形成期追肥が基肥窒素 6g m²区で45.1%，基肥窒素 8g m²区で55.7%，基肥窒素 10g m²区で77.2%，幼穂形成期後7日目追肥が基肥窒素 6g m²区で48.4%，基肥窒素 8g m²区で56.3%，基肥窒素 10g m²区で72.0%，止葉期追肥が基肥窒素 6g m²区で53.4%，基肥窒素 8g m²区で55.2%，基肥窒素 10g m²区で84.5%となった。基肥窒素 6g m²区の利用率は追肥時期が出穂期に近くなるほど高くなり、出穂後10日目がピークとなった。基肥窒素 8g m²区では出穂期にピークを示すものの幼穂形成期～出穂期の利用率は概ね同等であり、基肥窒素 10g m²区では止葉期にピークを示した。

2) 追肥した窒素の水稻各器官への分配

ここでは主に追肥が行われる幼穂形成期～出穂期における追肥窒素の水稻各器官への分配率を検討した。穂への分配率は基肥量によって異なるものの出穂期追肥 (55.1～64.9%，平均58.4%) ≥ 止葉期追肥 (51.5～64.3%，平均57.0%) > 幼穂形成期後7日目追肥 (49.5～53.1%，平均51.0%) > 幼穂形成期追肥 (35.5～49.5%，43.6%)の順に高かった (表31)。穂への分配率の推移を見ると、全層基肥窒素量 6g m²では出穂期が、基肥窒素 8g m²区と基肥窒素 10g m²区では出穂期後20日目追肥をピークとして、以降で低下した。また、基肥窒素 6g m²区と基肥窒素 8g m²区では、穂部への分配がピークの以降速やかに低下するのに対して、基肥窒素 10g m²区では出穂期後30日目追肥まで高い水準にあった。

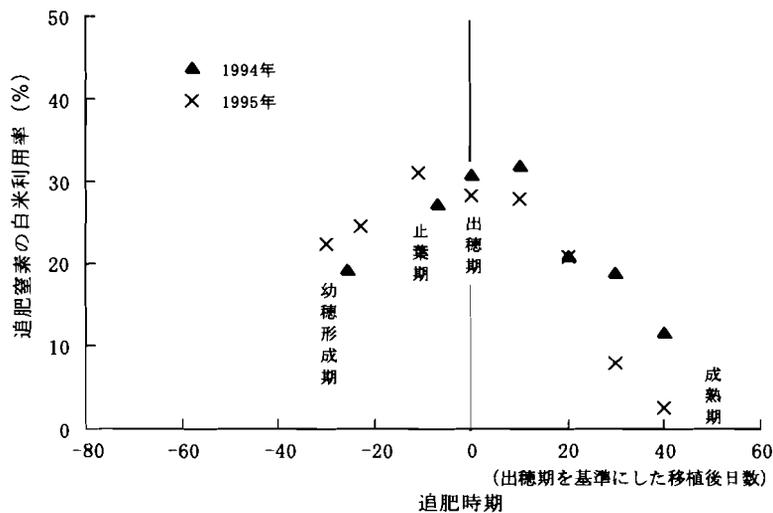


図34. 追肥時期と追肥窒素の白米利用率の関係

全層基肥窒素は 8g m²施用した。

出穂期 (1994年: 7月28日, 1995年: 8月2日) を基準とした

主な生育ステージは 幼穂形成期: -24日 (1994年), -28日 (1995年)

止葉期: -7日 (1994年), -11日 (1995年)

成熟期: +46日 (1994年), +55日 (1995年)

表32. 全層基肥窒素量と追肥窒素が窒素吸収に及ぼす影響

追肥処理時期	1994年				1995年			
	全層基肥 窒素量	成熟期 窒素吸収量	白米利用率	白米窒素中 の追肥由来 の窒素比率	全層基肥 窒素量	成熟期 窒素吸収量	白米利用率	白米窒素中 の追肥由来 の窒素比率
	g m ⁻²	g m ⁻²	%	%	g m ⁻²	g m ⁻²	%	%
幼穂形成期	4	9.2	22.3	9.2	6	10.3	19.4	8.7
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	6	10.7	20.5	8.9
止葉期	4	9.4	29.6	11.6	6	11.3	25.3	10.4
出穂期	4	8.7	28.8	12.1	6	10.4	30.7	13.3
出穂期後10日目	4	8.5	24.7	11.2	6	10.2	29.3	13.6
出穂期後20日目	4	8.8	21.4	9.4	6	10.4	18.9	8.9
出穂期後30日目	4	8.2	14.2	6.7	6	10.3	10.3	5.0
出穂期後40日目	4	8.7	8.9	4.1	6	9.7	3.1	1.8
幼穂形成期	8	10.1	19.3	7.6	8	12.5	22.4	8.2
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	8	13.2	24.5	8.4
止葉期	8	10.2	26.8	10.5	8	13.5	31.1	9.8
出穂期	8	10.5	29.8	11.0	8	13.0	28.2	10.3
出穂期後10日目	8	10.5	31.4	12.4	8	12.8	27.9	10.5
出穂期後20日目	8	10.4	21.1	8.2	8	12.6	20.9	7.8
出穂期後30日目	8	10.5	18.9	7.3	8	12.0	8.0	3.1
出穂期後40日目	8	9.2	11.5	5.3	8	11.9	2.7	1.1
幼穂形成期	12	13.1	17.0	5.7	10	13.5	22.6	8.4
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	10	13.9	32.4	10.4
止葉期	12	13.8	25.5	8.1	10	14.3	37.1	11.6
出穂期	12	13.9	26.2	8.1	10	14.2	33.0	11.6
出穂期後10日目	12	14.6	31.1	9.1	10	13.8	37.2	13.5
出穂期後20日目	12	13.0	22.3	7.8	10	13.5	19.4	7.3
出穂期後30日目	12	13.2	25.1	8.1	10	13.9	15.4	5.4
出穂期後40日目	12	13.0	15.7	6.0	10	13.1	7.5	2.6

3) 追肥した窒素の白米利用率

1994と1995年に行った基肥窒素 8g m⁻²区に追肥した結果を見ると、追肥窒素の白米利用率は1994年で出穂期後10日目追肥、1995年で止葉期追肥が最も高くなる山型を示した(図34)。全層基肥窒素量の増加に伴って成熟期の窒素吸収量は明らかに増加していたが、必ずしも白米利用率は増加しなかった(表32)。主な生育ステージにおける基肥窒素量3水準の白米利用率は幼穂形成期追肥が1994年で17.0~22.3%、1995年で19.4~22.6%、幼穂形成期7日目追肥が1995年で20.5~32.4%、止葉期追肥が1994年で25.5~29.6%、1995年で25.3~37.1%、出穂期追肥が1994年で26.2~29.8%、1995年で28.2~33.0%、出穂期後10日目追肥が1994年で24.7~31.4%、1995年で27.9~37.2%に分布し、基肥量に関わらず出穂期後10日目追肥≒出穂期追肥≒止葉期追肥>幼穂形成期7日目追肥>幼穂形成期追肥となった(表32)。

白米に蓄積された窒素中の追肥由来の窒素比率を検討したところ、出穂期~出穂期後10日目の追肥が最も高く、白米中窒素のほぼ1割以上が出穂期~出穂期後10日目の追肥窒素由来であった(表32)。それ以降の追肥では、追肥由来の窒素比率が急速に低下していたが、基肥量との間に一定の傾向は認められなかった。

4) 白米タンパク質含有量に対する追肥時期の影響

白米タンパク質含有量は、基肥窒素量の増加に伴って高まる傾向にあった(表33)。追肥時期の比較では、各基肥窒素量とも生育ステージの進行に伴って上昇し、止葉期~出穂期後10日目をピークにそれ以降で低下した。出穂期後10日目追肥以前の生育ステージの比較では、概ね出穂期後10日目≒出穂期≒止葉期>幼穂形成期後7日目>幼穂形成期であった(表33)。また、1995年の全層基肥窒素区(無追肥)における白米タンパク質含有量は、基肥窒素 6g m⁻²区が61g kg⁻¹、基肥窒素 8g

表33. 全層基肥窒素量と追肥窒素が収量および白米タンパク質含有量に及ぼす影響

追肥処理時期	1994年				1995年			
	全層基肥 窒素量	総粒数 ×1000粒	精玄米 収量	白米 タンパク質 含有量	全層基肥 窒素量	総粒数 ×1000粒	精玄米 収量	白米 タンパク質 含有量
	g m ⁻²	m ⁻²	g m ⁻²	g kg ⁻¹	g m ⁻²	m ⁻²	g m ⁻²	g kg ⁻¹
幼穂形成期	4	29.9	547	62	6	33.6	611	64
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	6	35.4	613	67
止葉期	4	23.7	510	67	6	30.9	586	70
出穂期	4	22.5	487	67	6	28.8	545	73
出穂期後10日目	4	23.9	487	67	6	28.3	528	70
出穂期後20日目	4	24.2	502	66	6	27.5	499	68
出穂期後30日目	4	23.1	478	63	6	29.7	542	66
出穂期後40日目	4	22.2	461	62	6	29.2	554	65
幼穂形成期	8	32.3	593	62	8	40.3	647	68
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	8	38.9	651	69
止葉期	8	28.7	576	68	8	35.6	645	74
出穂期	8	29.6	584	68	8	34.0	618	76
出穂期後10日目	8	28.7	577	68	8	34.3	613	74
出穂期後20日目	8	29.3	579	64	8	35.0	611	73
出穂期後30日目	8	28.5	573	64	8	34.8	632	69
出穂期後40日目	8	28.6	570	62	8	35.0	629	70
幼穂形成期	12	42.9	653	65	10	41.7	621	67
幼穂形成期後7日目	—	—	—	—	10	39.2	620	72
止葉期	12	38.7	654	74	10	36.7	632	79
出穂期	12	38.5	650	77	10	36.8	603	79
出穂期後10日目	12	36.6	653	76	10	36.4	602	77
出穂期後20日目	12	34.3	608	68	10	36.8	626	75
出穂期後30日目	12	33.4	642	68	10	36.5	599	74
出穂期後40日目	12	32.6	603	61	10	36.9	606	72
基肥窒素量別の 平均値	4	24.2 a	496 a	65 a	6	30.4 a	560 a	68 a
	8	29.4 b	579 b	65 a	8	36.0 b	631 b	72 ab
	12	36.7 c	638 c	70 a	10	37.6 b	614 b	74 b

精玄米収量には、篩目1.90mmを使用した。

生育各ステージの平均値の異なる英小文字は、全層基肥窒素施肥量別におけるTukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。

m²区が66g kg⁻¹、基肥窒素10g m⁻²区が67g kg⁻¹であった（図表省略）。

白米当たり分配到された追肥窒素量（1000粒当たりの窒素mg）を見ると、2カ年とも止葉期～出穂期後10日目の追肥をピークにした山型を示した（図35）。詳細に見ると標準施肥量である基肥窒素8g m⁻²区は、幼穂形成期追肥が1994年で11.9mg、1995年で11.2mg、幼穂形成期後7日目追肥が1995年で12.6mgであるのに対して、止葉期追肥が1994年で18.7mg、1995年で17.5mg、出穂期追肥が1994年で20.1mg、1995年で16.6mg、出穂期後10日目追肥が1994年で21.9mg、1995年で16.2mgとなり、止葉期～出穂期後10日目で明らかに高かった。基肥窒素量との関係では1994年で、基肥窒素4g m⁻²区 > 基肥窒素8g m⁻²区 > 基肥窒素12g m⁻²区のように、基肥窒素量が少ないほど白米当たり分配到され

る追肥窒素量が増加した。これに対して1995年は、基肥窒素量の影響が判然としなかった。

5) 収量に対する追肥時期の影響

総粒数は基肥窒素量の増加に伴って増加した。各生育ステージの追肥が総粒数に及ぼす影響を見ると、総粒数は基肥窒素量に関わりなく、幼穂形成期～幼穂形成期後7日目の追肥で増加した（表33）。出穂期以降の追肥では、総粒数に与える影響は判然としなかった。精玄米収量についても総粒数の増加を反映しており、1994年は基肥窒素量の増加に伴って増加したが、1995年の基肥窒素8g m⁻²区は、有意な差ではないが基肥窒素10g m⁻²区より勝っていた。追肥時期との関係を見ると、幼穂形成期≒幼穂形成期後7日目追肥 > 止葉期追肥 ≧ 出穂期追肥 > 出穂期後10日目以降の順に高かった。

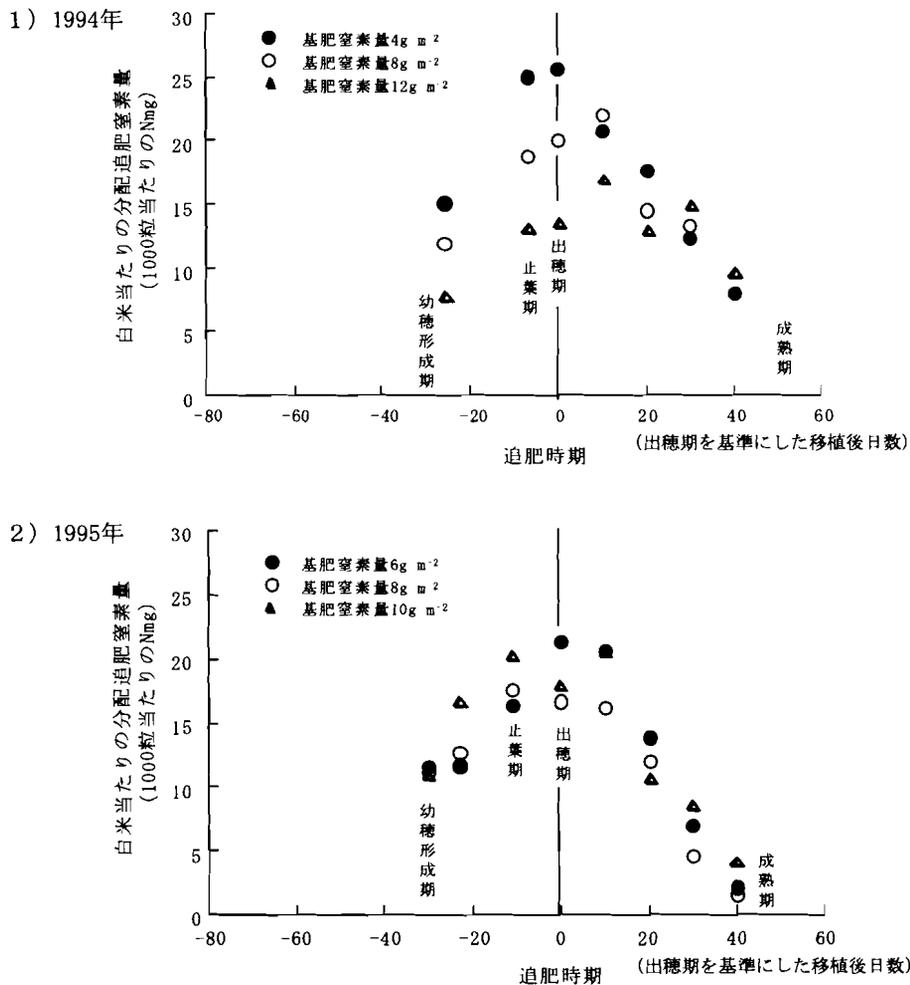


図35. 追肥時期と白米当たりの分配追肥窒素量の関係
生育ステージについては図34を参照。

4-2-3 白米タンパク質含有量に対する止葉期追肥の影響

実験方法

1995年に旭川周辺の農家圃場8カ所において止葉期の窒素追肥試験を行った。土壌型は褐色低地土6カ所、灰色低地土1カ所、グライ低地土1カ所で、栽植密度は18.6~27.3m²であった。基肥窒素施肥量が7.5~12.8g m⁻²であった圃場に、重窒素標識硫安を用いて止葉期に窒素2g m⁻²の追肥を行った。重窒素標識硫安は重窒素の濃度が5.09atom%のものを用いた。調査分析方法は4-2-2に準ずる。

実験結果

窒素吸収量は茎葉および穂ともに増加したが、特に穂での増加が大きかった(表34)。精玄米収量は一部で増収する事例もあったが、止葉期追肥による増収効果は平均13g m⁻²であり、追肥なしと比較して有意な差ではなかった。これに対して白米タンパク質含有量は追肥によって明らかに増加し、追肥なしと比較して平均で8.4g kg⁻¹の差があり、これはt検定で5%水準の有意差であった。止葉期追肥が精玄米収量と白米タンパク質含有量の増減に及ぼす影響を個々の圃場でみた場合、精玄米収量が顕著に増加したのは1筆のみで

表34. 農家圃場における止葉期追肥が白米タンパク質含有率に及ぼす影響

止葉期追肥	精玄米収量 (g m ⁻²)	茎葉部の 窒素吸収量 (g m ⁻²)	穂部の 窒素吸収量 (g m ⁻²)	追肥窒素 の利用率 (%)	追肥窒素の 白米利用率 (%)	白米タンパク質 含有量 (g kg ⁻¹)
なし	535 (75) a	3.03 (0.58) a	6.29 (1.04) a	—	—	63.9 (3.9) a
あり	549 (58) a	3.38 (0.54) a	6.96 (0.73) a	58.9 (8.2)	35.3 (2.6)	72.3 (6.2) b

括弧内の数値は標準偏差
各項目における異なる英小文字は、Tukey-Kramer testにより5%水準で有意差があることを示す。

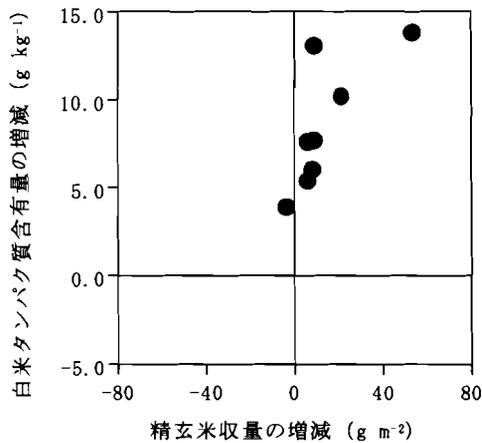


図36. 止葉期追肥が精玄米収量と白米タンパク質含有量の増減に及ぼす影響

各現地農家圃場の無追肥区の精玄米収量および白米タンパク質含有量を基準として、止葉期の追肥区における精玄米収量および白米タンパク質含有量の増減を示した。

あり、その際は同時に白米タンパク質含有量も明らかに高まった(図36)。農家圃場試験8カ所における追肥窒素の利用率は平均値58.9%、白米利用率は平均値35.3%であった(表34)。

4-2-4 施肥窒素の水田土壌中における経年的消長

実験方法

供試圃場および栽培概要、試験処理は4-2-1に準ずる。1991年に重窒素標識硫酸を用いた施肥の処理を行った圃場において、1992年と1993年に同様の施肥を非標識硫酸で行い、初年目に施肥した窒素の残効を調査した。1993年の移植は5月20日、止葉期(葉耳間長0の茎が40~50%抽出した日、減数分裂期に相当)は7月27日、成熟期は1993年10月4日であった。

分析方法も4-2-1に準ずる。収穫後に枠内の作

土(深さ0~15cm)の土壌を採取・風乾した後、ケルダール法³⁴⁾により全窒素を分析し、重窒素についても硫酸分解液を用いて作物体と同様に処理した後、分析依頼した。これにより得られた窒素を土壌残存窒素とし、施肥窒素から水稻吸収窒素と土壌残存窒素を差し引いた値を消失窒素(脱窒、溶脱、流失の合計)として取り扱った。

実験結果

施肥初年目(1991年)における施肥窒素の利用率は、各区で異なるが24.0~44.3%の範囲にあった(表35)。その後、本試験では1991年の試験区と同様の処理を3カ年にわたって継続栽培し、初年目に施肥された窒素の追跡を試みた。

2年目(1992年)では全量全層区(4, 8, 12, 16g m⁻²区)で2.9~4.1%、全層+表層区で2.7%、全層+側条区で2.5%であった(表35)。3年目(1993年)には各区とも2%以下となった。3カ年間に合計した施肥窒素利用率は全量全層区(4, 8, 12, 16g m⁻²区)で41.9~48.6%、全層+表層区で27.7%、全層+側条区で46.2%であった。

土壌に残存した施肥窒素について見ると、初年目の収穫後には全量全層16g m⁻²区を除いて施肥窒素の30%以上が土壌に残存していた(表35)。その後2年目、3年目と減少したが、3年目終了後においても全量全層区で17.0~26.2%、全層+表層区で13.3%、全層+側条区で13.5%が土壌に残存していた。差し引き法による消失窒素の年次累積は全量全層施肥で施肥初年目に16.0~29.9%、2年目に26.5~38.2%、3年目に31.9~38.8%と増加した。表層施肥の消失窒素は施肥初年目に42.9%と多いが、2年目の増加は少なく48.8%、3年目は59.0%になった。側条施肥は初年目の消失窒

表35. 施肥窒素の利用率と土壌残存および消失の経年推移

施肥処理	全層施肥 窒素 (g m ²)	施肥窒素の利用率 A %				施肥窒素の土壌残存率 B %			差し引き法による消失窒素率 (100-年次累積A-当年B) %		
		1年目	2年目	3年目	合計	1年目	2年目	3年目	1年目	2年目	3年目
全量全層区	(4)	36.0	4.1	1.8	41.9	48.0	33.4	26.2	16.0	26.5	31.9
	(8)	35.5	4.0	1.8	41.3	37.1	22.3	19.9	27.4	38.2	38.8
	(12)	39.2	2.9	1.6	43.7	33.5	25.9	18.0	27.3	32.0	38.3
	(16)	44.3	3.0	1.3	48.6	25.8	17.0	17.0	29.9	35.7	34.4
全層+表層区	全4+表(4)	24.0	2.7	1.0	27.7	33.1	24.5	13.3	42.9	48.8	59.0
全層+側条区	全4+側(4)	41.7	2.5	2.0	46.2	45.0	20.9	13.5	13.3	34.9	40.3

施肥窒素の利用率および土壌残存窒素は()内の施肥窒素を対象とする
消失窒素は、1年目の施肥窒素量から「各年次の窒素吸収量の累積」と「当年の土壌残存窒素量」を差し引いて求めた
1991年~1993年に継続調査。

素が各施肥法の中で最も少ない13.3%であるが、2年目に増加して34.9%となった。

さらに、全量全層施肥(4, 8, 12, 16g m⁻²区)の3カ年の利用率をプロットし、回帰曲線を図37に示した。4年目以降は試験場移転に伴う廃耕によりデータが得られなかったため、同式を延長して表示した。回帰曲線から推定される4年目以降の利用率は全ての施肥窒素用量で1%以下となった。

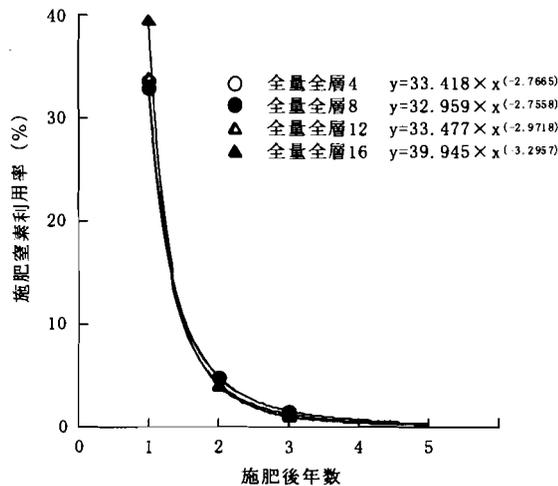


図37. 施肥窒素利用率の経年推移

実線は全層施肥処理(1~3年後)から求めた回帰式を示す。また、4年目以降は同式を用いて推定した。

4-3 論議

北海道の水田において用いられる基肥窒素の施肥法は全層施肥、および全層施肥と局所施肥の組み合わせ(全層+表層, 全層+側条)がある。また、いくつかの窒素追肥技術も普及しているが、これらは主に水稻の安定・多収を目的としていた。しかし、近年求められるのは安定・多収とともに白米タンパク質含有量を高めない窒素施肥技術である。本試験では、北海道における白米タンパク質含有量の低減技術導出の基礎資料を得るため、重窒素標識硫酸を用いた施肥窒素量および表層施肥、側条施肥に関する試験を水田圃場で実施し、窒素の利用率とこれの分配、白米タンパク質含有量、さらにその経年的消長に関する影響を解析した。また、活着期から登熟期まで水稻の各生育ステージにわたって窒素の追肥試験を実施し、窒素の追肥時期と利用率、稲体内における分配、特に白米タンパク質含有量に及ぼす影響についても検討した。

全層施肥は湛水前に施肥・混和するために窒素成分の大部分が還元層に入り、脱窒作用を受けにくく、肥

効が高い。このような利点から、北海道の水田における施肥法は全層施肥が基本となっている。本試験における施肥窒素の利用率は全量全層施肥の場合、ほぼ30~40%の範囲にあり、施肥窒素量の増加に伴って多くなる傾向にあった(表29)。施肥窒素利用率は北海道における標準的な施肥量(8g m⁻²)の2倍程度の多肥(16g m⁻²)条件までは頭打ちとならず、土壌由来の窒素吸収量に上乗せされると考えられる。

成熟期の窒素吸収量に占める施肥由来窒素の比率も直線的に高まった。これは、全量全層区(4, 8, 12, 16g m⁻²区)の土壌由来窒素の吸収量が全量全層区で8.68~9.84g m⁻²と若干増加しているのに対し、施肥窒素の吸収量(表29, A-B)は施肥量によって1.30~6.58g m⁻²と顕著に増加するためである。

施肥窒素量の増加に伴う施肥窒素利用率の増加については施肥による根域拡大作用と Added Nitrogen Interaction(ANI: 窒素添加交互作用)という概念が報告されている^{127, 128)}。ANIでは、施肥された重窒素の有機化量に見合うだけの土壌無機窒素の残存量が増加するという「代理効果」により、見かけの無機化を促進するのように見えるとされる。したがって、本試験における土壌由来の窒素吸収量の増加傾向も根域拡大作用とANIによる可能性が高い。また、施肥窒素の有機化は土壌微生物に由来するため、炭素源を伴わずに窒素のみを倍量施用しても、有機化量が2倍になるものではない。その結果、施肥窒素量の増加にともなって有機化される施肥窒素の比率が減少し、施肥窒素の利用率が増加した可能性もある。これは土壌由来の窒素(表29, A-B)が無窒素区と窒素施肥した区の間では差が大きいのに対して、施肥窒素量の増加に伴う差が比較的小さく、直線的に増加するものでないことから推察される。

稲体に吸収された施肥窒素は水稻の各器官に分配・転流された後、その多くが米粒中に移行する^{125, 129)}。移行した結果として稲体における分配を見ると、吸収された窒素の穂部への分配率は全量全層4g m⁻²区で65.8%、8g m⁻²区で63.5%、12g m⁻²区で61.9%、16g m⁻²区で51.3%であり、特に白米部への分配率は全量全層4g m⁻²区で49.4%、8g m⁻²区で45.4%、12g m⁻²区で44.9%、16g m⁻²区で39.6%と施肥窒素量の増加に伴って低下した。反対に、葉鞘および稈への分配率は施肥窒素量の増加に伴って増加する傾向にあった(図31)。その要因として、施肥窒素量の増加に伴って茎葉が繁茂するものの、不稔歩合の増加や登熟歩合の

低下をもたらすことが挙げられる(表30)。吸収された窒素の穂部への分配率の低下は、一見白米タンパク質含有量の低下につながるようにも考えられるものの、施肥窒素量に伴う施肥窒素吸収量の増加(8g m²区: 2.84g m²→16g m²区: 6.58g m²)が大きいことにより、分配率を乗じた白米への分配施肥窒素量(8g m²区: 1.29g m²→16g m²区: 2.60g m²)が増加した(表30)。8g m²区に対して16g m²区の白米へ分配された施肥窒素量が約2倍になっているのに対して、総粒数の増加は1.23倍にすぎなく、不稔歩合も2倍以上になっていたため、稔実粒数は1.03倍であった(表30)。このため、白米当たりへ分配された施肥窒素量(1000粒当たりの窒素mg)は8g m²区で51.5mg、16g m²区で100.8mgと明らかに高まることから、結果的に白米中のタンパク質含有量(8g m²区: 73.8g kg⁻¹→16g m²区: 84.9g kg⁻¹)が高められることになったものと考えられる。

生育前期に吸収された窒素は、茎葉に一度蓄積された後、出穂後に穂部に転流されると考えられるが、16g m²区のように不稔が増すと吸収した窒素の転流先となるシンク能が十分でなくなる。そのため、葉、葉鞘および稈に蓄積された窒素の多くが転流しないまま成熟期に達した結果、吸収された施肥窒素の葉鞘や稈および葉身への分配率が12g m²以下の区より高くなったと考えられる(図31)。また、16g m²区では、葉身への分配率と比較して葉鞘や稈への比率の増加が顕著であり、穂部への転流は葉鞘や稈より葉身で優先された可能性がある。

精玄米収量は12g m²区が最も高かったが、白米中のタンパク質含有量の差異は8g m²区(標準施肥水準)の白米タンパク質含有量(73.8g kg⁻¹)に対して、12g m²区で4.3g kg⁻¹、16g m²区で11.1g kg⁻¹増加していた(表30)。近年の北海道の研究において、「きらら397」の白米タンパク質含有量と食味官能値の関係を検討したところ、一般的に評価基準とされる「日本晴」を越えるには、白米タンパク質含有量を75g kg⁻¹以下に低下することが必要であった¹³⁰⁾。現在求められているのは売れる米作りであることから、良食味米生産が収量性に優先すると考えられる。したがって一定以上の食味水準には、低タンパク質米生産が必須であり、この観点から標準施肥水準を維持すべきであると判断される。

次に、表層施肥と側条施肥はともに苗移植時の根近傍に窒素を施肥することにより、初期生育の促進を目

的としている。これらの窒素施肥法は下位分けつの促進を通じて早期に基数を確保でき、寒冷な北海道でも安定・多収が得られるとされる。したがって、これらの窒素施肥法では生育初期の茎葉の形成に対する関与が大きく、穂への窒素の転流は少ないことが予想された。

表層施肥の利用率は全層施肥より低く、側条施肥に比較するとさらに低かった(表29)。また、側条施肥は全層施肥に比較して、穂部および白米への窒素の移行が少ない特徴があった(図31)。茎葉に関して詳細に見ると、側条施肥で葉身と葉鞘、特に葉鞘への分配が高まっていた。葉鞘への分配が大きいことは、水稻初期の窒素吸収が高まったことで分けつが促進され、分けつした茎の形成に必要な窒素が葉鞘に移行したためと考えられる。出穂後には茎葉から穂へ窒素の転流が起こるものの、個体を維持していくために窒素を葉鞘および稈に保持する必要がある、茎葉に分配された窒素が高く維持されたものと推察される。

全層施肥由来の窒素は止葉期以降においても吸収されているが、表層および側条施肥に由来する窒素はほとんどが止葉期以前に吸収されていた(図32)。このことは施肥位置によって窒素の利用率が異なるだけでなく、吸収時期や稲体各器官への分配が相異したことを示すものと考えられる。吸収窒素の穂部への分配率は、幼穂形成期と比較して出穂期で大きいことが指摘されている。このことから、全層施肥された窒素は生育後半まで吸収が持続し、生育後半に吸収された窒素の多くが穂部に移行したと推察される。全層+表層区で白米タンパク質含有量が低くなる原因としては、窒素の利用率が全層施肥に比べて低いことと、施肥窒素の吸収が生育の前期に集中するため穂部へ分配される窒素量が少なくなることが考えられる。全層+側条区における白米タンパク質含有量の低下は、施肥窒素の利用率が高いものの、全層+表層区と同様に窒素吸収が生育の前期に行われること、及び茎葉部への分配と比較して穂部への分配が小さくなることに由来すると考えられる。また、不稔歩合は総施肥窒素量が同等の全量全層8g m²区と比較して全層+側条区では少ない傾向にある(表30)。図32の止葉期以前の総窒素吸収量(施肥由来と施肥由来以外の加算)が多いことから、全層+側条区は初期生育が盛んになり、有効茎を早期に確保できたことが不稔の発生を少なくしたと推察される。これに対して、全量全層施肥では止葉期以降の窒素吸収も多く、遅発分けつから出穂した粒が総粒数

に含まれており、結果的に不稔歩合が高まった可能性がある。ゆえに、全層＋側条区では全量全層 8g m^{-2} 区と比較して稔実粒数が明らかに多い。白米当りに分配された施肥窒素量（1000粒当たりの窒素mg）は全量全層 4g m^{-2} 区の 28.4mg と比較して、全層＋側条区の側条分 4g m^{-2} で 21.9mg と少ないことも、白米タンパク質含有量の低下に関与したと推察される。

次に、水稻の各生育ステージにわたって行った追肥試験を見ると、幼穂形成期以降の追肥窒素の利用率は、止葉期～出穂期後10日目追肥をピークにする傾向を示した（図33）。出穂期以降の利用率は概ね生育の進行に伴って減少する傾向にあった。これは出穂期頃までは水稻根の発達に伴い、追肥窒素を効率的に吸収できるようになったことを意味するが、出穂期以降は一般に新根の伸長はほとんど停止し¹³¹⁾、反対に老化が進むことにより吸収能が低下したことが影響しているものと考えられる。追肥窒素の利用率に対する基肥窒素量の影響を見ると、幼穂形成期から出穂期の追肥窒素の利用率は、基肥窒素量の増加に伴って上昇する傾向を示した（図33）。これは、基肥窒素量が少ない条件では追肥前の茎葉および根の生長量が少なく、追肥窒素を吸収する能力が劣ったためと推察する。出穂期以降については、全体的には急速に低下していくものの、むしろ基肥窒素量の少ない基肥窒素 6g m^{-2} 区で利用率の低下が緩慢であった。このことについて十分な解析は難しいが、穂部への乾物蓄積が影響していると考えられる。窒素化合物および光合成同化産物に対する栄養生長期のシンクは新葉および根であり¹³²⁾、根の生長に必要な窒素の多くが地上部から供給されている¹³³⁾。これに対し、生殖生長期は穂部が強いシンクとなり、根への分配が減少する。また、シンクである穂を切除することにより、同化葉以外の葉および根への光合成産物の蓄積が進む¹³⁴⁾。すなわち、総粒数が少ない基肥窒素 6g m^{-2} 区では出穂以降のシンク能が小さいため、光合成同化産物の穂部への分配が少なく、根部への配分が維持されることで旧根の活性を維持し、新根の伸長を促進したのではないかと推察する。また、稲の下位葉は根との関係が深く、下位葉から根に送り込まれた同化産物は根の呼吸に消費され、そのエネルギーによって養分が吸収される¹³⁵⁾。したがって、多肥条件では過繁茂になり、下位葉への日射が不足することで根への同化産物供給が不足したものとする。

追肥窒素の分配率を生育ステージ別で見ると、出穂期までは生育の進行に伴って穂部への分配が高まる傾

向を示した（表31）。特に幼穂形成期後7日目追肥と止葉期追肥を比較すると、止葉期は追肥窒素の利用率が高いことに加えて、基肥窒素 6g m^{-2} 区と基肥窒素 8g m^{-2} 区の場合に同化部位である葉身への分配が低下するのに対して、貯蔵部位である穂の分配が高まっていた。これは、止葉期追肥の時期になると茎数や穂数がほぼ決定しているため、窒素の多くが形成過程にある穂部に蓄積したものと考えられる。さらに、登熟後半の追肥によって吸収された窒素の稈・葉鞘への分配が高まったのは、穂においては開花後30～40日程度で粒の養分集積がほぼ終了し¹³⁶⁾、これに加えて葉身は出穂以降は老化が進み始めたため^{137,138)}、残された稈・葉鞘に対して窒素の集積が起こったものと考えられる。

追肥窒素の各器官への分配に対する全層基肥窒素量の影響を見ると、穂部への分配のピークや低下が始まる追肥時期は基肥窒素量が高いほど遅くなる傾向にあり、特に基肥窒素 10g m^{-2} 区では出穂期後30日目追肥まで穂部への分配率が高かった（表31）。これは、基肥窒素量が高まるほど穂数・総粒数が増加し、そのため株内に登熟の遅れる穂および粒が増えていたことによるものと考えられる。

1994年と1995年の基肥窒素 8g m^{-2} 区に追肥した結果を見ると、追肥窒素の白米への利用率は出穂期後10日目≧出穂期≧止葉期>幼穂形成期7日目>幼穂形成期となった（図34）。これは、追肥窒素の利用率が止葉期～出穂期後10日目にピークとなったことや、稲体内における吸収窒素の各器官への分配先が生育の進行とともに変化したことによるものと考えられた。

白米に蓄積された窒素中の追肥由来窒素は、止葉期～出穂期後10日目の追肥時期で、白米中窒素の1割以上であった（表32）。また、止葉期～出穂期後10日程度程度の追肥処理は、全層基肥窒素区（1995年無追肥）における白米タンパク質含有量と比較すると、白米タンパク質含有量で $8\sim 13\text{g kg}^{-1}$ 高まったことになる（表33）。これは、低タンパク質米を指向していく上で無視できるものではないと考えられる¹³⁹⁾。これに対し、幼穂形成期～幼穂形成期後7日目の範囲では、白米タンパク質含有量の増加が $0\sim 6\text{g kg}^{-1}$ 程度であったことから、食味に及ぼす影響も比較的小さいと判断する。また、近年の北海道の研究において、「きらら397」の白米タンパク質含有量と食味官能値の関係を検討したところ、一般的に評価基準とされる「日本晴」を越えるには、白米タンパク質含有量を 75g kg^{-1} 以下に低下することが必要であった¹³⁹⁾。止葉期～出穂期後10日目の追肥

では、白米タンパク質含有量を75g kg⁻¹以上となることが多く見られ、この間の窒素追肥技術は近年求められている低タンパク質米生産の観点から指導技術として不適切である。

止葉期追肥の増収要因は、登熟歩合の向上や千粒重の増加に起因し、その増収効果は幼穂形成期の追肥に及ばないとされている¹²⁰⁾。幼穂形成期の追肥は増収効果が高いものの、低温年には登熟歩合低下によるマイナス効果が高い危険があるとされる¹²¹⁾。本試験における各生育ステージの追肥が総粒数や収量に及ぼす影響を見ると、総粒数は生育の早いステージにおける追肥で多くなった。精玄米収量は幼穂形成期⇨幼穂形成期後7日目追肥>止葉期追肥⇨出穂期追肥⇨出穂期以降の各追肥処理となっており、ほぼこれまでの結果と一致していた(表33)。本試験のように地力窒素の低い土壌(褐色低地土)では、安定多収の観点から幼穂形成期⇨幼穂形成期後7日目の追肥が最も効果的であることを示していると判断される。但し、本試験は気象的に平年並み以上の良好な2カ年の結果であったことから、冷害年の危険も考慮して実用上は幼穂形成期後7日目の追肥が望ましいと考える。

幼穂形成期後7日目追肥は、追肥窒素の利用率が基肥より高く、穂への分配率および白米への利用率が以降の追肥と比較して低く、総粒数を増加する働きの大きいことが認められる(表31, 表32)。このため、幼穂形成期後7日目追肥により吸収された窒素は個々の白米に転流する窒素が希釈され、白米当たりの分配追肥窒素量は高くはないことから、産米の白米タンパク質含有量はあまり高まらない。止葉期追肥では、追肥窒素の利用率が幼穂形成期後7日目より高いとともに、総粒数を増加させる効果が小さいため(表33)、白米当たりの分配追肥窒素量は高く、産米の白米タンパク質含有量を高めると考えられる。この傾向は、基肥窒素量を増加した場合でも同様に認められた。出穂期以降の追肥に関しては、概ね出穂期⇨出穂後10日目をピークに以降の追肥窒素の利用率が低下するとともに(図33)、穂への分配率が明らかに高くなることから(表31)、この時期の追肥は止葉期追肥以上に白米タンパク質含有量を高めると判断される。特に、基肥窒素量の高い条件では、穂部の生育量が多いためこの傾向はより顕著に現れると考えられる。出穂期後20日目以降の追肥は、利用率とともに穂部への分配率も減少する傾向にあり、白米タンパク質含有量に及ぼす影響も小さくなる。

このように、北海道の稲作において基本技術とされ

てきた止葉期追肥は白米タンパク質含有量を著しく高めることが明らかとなった。さらに、農家圃場における検証でも、止葉期追肥が精玄米収量に与える効果は小さく、白米タンパク質含有量を高めることが明らかに認められた(表34, 図36)。したがって、農家圃場においても農試圃場試験と同様の結果が得られたことから、農試圃場試験の結果を一般的な現象として評価できると考える。

最後に、施肥窒素の残留と次年度以降への影響に関して検討した結果、施肥された窒素の利用率は施肥方法および施肥窒素量によって異なるが、施肥窒素は初年目にほとんどが利用され、2年目は初年目の1/10程度、3年目は初年目の1/20程度であった(表35)。さらに、全量全層施肥(4, 8, 12, 16g m⁻²区)の3カ年の利用率をプロットしたが、回帰曲線から推定される4年目以降の利用率は全ての施肥窒素用量で1%以下となり、水稲への影響は極めて小さくなると考えられる(図37)。

差し引き法による消失窒素は、全層+表層区で施肥初年目に、全層+側条区で2年目に多い結果となった。全層+表層区は作土表面の酸化層に分布する肥料が多いことから脱窒を受けやすく、また灌漑水による肥料流亡も多いことから、初年目の消失分が大きかったと推察される。全層+側条区は、初年目の土壌残存が多く、これは側条に施肥された窒素の拡散範囲が限定され、部分的に集中して存在し、生育初期に多く利用されることから、灌漑水などによる肥料の流亡が小さかったものと考えられる。2年目以降については、代かきを行うことで全層施肥と同様になったものと推察される。また、施肥後3作終了時においても施肥窒素の13.3~26.2%が土壌に残存していることが明らかとなった(表35)。先に述べたように3年目以降の水稲への利用率は著しく低いことから、無機化⇨有機化を繰り返す過程で若干が系外に持ち出されていく程度であり、施肥法による残存窒素量の差が後年次の白米タンパク質含有量に与える影響は小さいと推察される。

以上の結果から、白米タンパク質含有量の低下には、生育初期の窒素吸収を促進し、なおかつ生育後期の窒素吸収を少なくすることにより達成されることが考えられ、全層施肥と側条施肥の組み合わせが合理的と判断できる。追肥に関しては、玄米収量と白米タンパク質含有量を勘案した場合、止葉期以降の追肥は行わず、幼穂形成期後7日目に追肥を行うことが効果的と判断できる。