

第1章 緒論

北海道の水稲は、明治以前より幕府・松前藩の保護と指導の元に幾つもの試作が行われていた。しかし、度重なる冷害凶作のため、稲作の普及定着は遅々としており、開拓使の設置された明治2年(1869)に322町歩、明治12年(1879)1033町歩、明治24年(1891)においても2153町歩に過ぎず、この88%が道南地方に分布していた¹⁾。明治20年代後半は、公共機関による本格的な試験研究が始まり、この成果が大きく明治30年代にはいと、道央地帯にも順調に普及した。米の増産が至上命題となった昭和20年度からは、急激な造田が進んだことから、昭和36年(1961)には20万ha、昭和44年(1969)には北海道米作史上最多の26万haに達した。

一方、米の自給動向は昭和39年(1964)を境に需要量が年々減少し、昭和46年(1971)から本格的な米の生産調整が行われた。特に、北海道に対しては食味・品質の差を理由に本州のどの県よりも多い生産調整が実施され、昭和58年(1983)には本州の2倍以上にあたる全水田面積の約5割近くに達した。そのため、水稲の作付け面積は年々減少し、平成15年(2003)以降は12万ha以下となっている。中でも、もち米や加工用米を除いた粳米の作付け面積は、平成16年度(2004)で10万6千haとなった²⁾。

この要因は、経済の発展による所得の増大が消費者の米に対する嗜好を変化させるとともに、食生活の多様化をもたらしたことが挙げられる。当時の北海道産米の食味に関しては、東北・北陸の美味しいといわれる米と比較すれば硬くて粘りが少なく、評価が低かった。このような状況の中で、北海道産米の食味・品質の向上に対する要請が高まり、昭和55年からは北海道立農業試験場のプロジェクト研究「優良米の早期開発試験」が開始され³⁾。これにより米の食味成分(アミロース含有量、タンパク質含有量、アミログラム最高粘度など)の解析が進み、アミロース含有量およびタンパク質含有量の低下が炊飯米の粘り・柔らかさの向上に重要であることが解明された^{3,4,5)}。これは品種育成にも活用されるようになり、その結果、「きらら397」「はしのゆめ」「ななつぼし」などの良食味品種が育成され、本州産米と比較しても遜色ない水準に達した³⁾。

しかし、現在の北海道産米は本州産米と比較して十分な評価を得るに至らず、価格も低迷している。米市

場では「コシヒカリ」「あきたこまち」銘柄の優位性が認められており、これに伍していくためには、特A(穀物検定協会評価)レベルの品質評価の獲得が不可欠となっている。先に述べた食味成分は年次により変動するが、北海道産粳米のアミロース含有量は平均180~220g kg⁻¹、タンパク質含有量が70~80g kg⁻¹程度⁶⁾であるのに対して、特A産米の水準はアミロース含有量が175g kg⁻¹、タンパク質含有量が61g kg⁻¹程度である。実需者ニーズに対する調査からは、タンパク質含有量70g kg⁻¹以下、アミロース含有量200g kg⁻¹以下が改善目標とされ^{2,7)}、ホクレンの高品質米のタンパク質含有量は68g kg⁻¹以下とされる。アミロース含有量は品種による変動が大きく、タンパク質含有量は産地や栽培技術による影響の大きいことが明らかにされている^{8,9)}。特A産米の代表とも言える「魚沼産コシヒカリ」は「コシヒカリ」という品種と「魚沼」という産地が銘柄として合わさることで認知された。したがって、北海道産米についても、品種開発による一層のアミロース含有量低下とともに、より低タンパク質な米生産を目指した栽培技術の開発が望まれる。

米粒中のタンパク質含有量は、これまでの研究から稲が吸収した窒素の玄米生産効率(精玄米重/総窒素吸収量)と負の相関関係を示すことが知られている^{9,10,11)}。玄米生産効率の高い稲を目指すには、まず第一に上記の式の分子である精玄米重の収量構成要素(穂数、一穂粒数)を十分に確保する必要があり、これには移植後の初期生育(分けつ、穎花形成)の旺盛なことが望ましい。次に、生育の中期では形成された分けつや穎花のロスを少なくすることが重要であり、特に不稔発生の抑制や、登熟には至らないと予想される遅れ穂の発生を少なくする栽培管理技術の導出が求められる。生育後期(出穂以降)では、葉身光合成能を高く維持することにより、稲体の登熟力を高め、形成された各粒に十分な炭水化物(主にデンプン)を配分することによる粒重増加が最終的な精玄米重の増加に不可欠である。このような条件では、タンパク質含有量の低下効果以外にも、良質粒歩合や玄米白度、千粒重などの外観品質も改善が期待される。しかし、生育量の増加が窒素吸収量に主導される場合は、玄米生産効率の分母も多くなるため、その効率はむしろ低下することになり、米粒中のタンパク質含有量を高める

可能性も考えられる。また、窒素過多による過繁茂は葉身間の光競合による登熟不良や、倒伏などによる登熟停止などをもたらす可能性もあるため望ましくない^{12,13,14)}。さらに、生育後期に吸収される窒素は、米粒中のタンパク質含有量を高めることが指摘されている^{15,16,17,18)}。したがって、低タンパク質米生産を目指すには、生育初期から健全かつ適正な生育を確保するとともに、これを窒素依存ではない他の要因、例えばケイ酸などのミネラル成分などを活用して達成することが重要と考えられる。

本研究の目的は、低タンパク質米の生産を主眼に置いた高品質米生産のための肥培管理技術を研究することにある。最初に、水稻生産基盤である北海道水田土壌化学性の実態を明らかにし、その問題点と改善策の一端を示した。次に、有機物（稲わら残渣）分解に伴う初期生育の阻害要因を解析し、その耕種的対応技術について検討した。窒素吸収の接点からは、初期生育を促進し、かつ後期窒素の吸収を高めないような施肥法について検討した。さらに、土壌中のケイ酸肥沃度を高めることによる初期生育の向上とケイ酸施肥による不稔軽減や登熟力の向上について試験を実施し、効果を明らかにした。本研究で得られた、北海道産米の低タンパク・高品質米生産に関する幾つかの新しい知見を取りまとめた。これらの知見は北海道における米品質向上に貢献するものである。

第2章 北海道の水田土壌における化学性の現状と改善方向

2-1 既往の知見

1) 北海道の水田土壌診断

北海道における118万haの広大な農耕地は¹⁹⁾日本の北端に位置するため寒冷な気象の影響を受け、台地では風化の進んだ細粒質土壌、低地ではこの堆積物による沖積土と泥炭土の分布が認められる。加えて火山灰や蛇紋岩に由来する土壌も多い。したがって以前から、多様な土壌の分類と地力評価が必要とされてきた。

全国的規模の土壌調査事業としては、施肥改善調査(1953~1963)と地力保全基本調査(1959~1978)が食糧の増産、林産業の振興と国土資源の管理などを目的に実施され、これにより北海道における水田地力の概要が明らかにされた²⁰⁾。しかし、この調査に示されている化学性は古いもので40年以上が経過したことに加え、この間にほとんどの水田で土壌改良や基盤の整備が実施されてきたことから²¹⁾、水田土壌における化学性の現状を必ずしも反映していない恐れがある。

また、地力保全基本調査の後を受けて開始された土壌環境基礎調査²²⁾は、地力の推移をモニタリングする長期事業であるため、水田の調査地点が全道でも200地点程度であり、中には転換畑も含んでいる。また火山性土が比較的少ないこともあり、実際に水稻作付けをしている水田土壌を評価するうえでは課題があるとともに、メッシュ地図のようなビジュアル化は行われなかった。また土壌環境基礎調査では可給態ケイ酸の分析法がpH4.0酢酸抽出法であるのに対して、現場では良食味・高品質米の生産に活用することを勘案し、作物の吸収をより良く反映する40℃-7日間湛水保温静置培養法²³⁾が普及している。さらに湛水後における還元を抑制し、健全な根伸長に重要とされる遊離酸化鉄や易還元性マンガンについて評価されていない。

今後、特に良食味米生産を目指すためには土壌の改良と適切な施肥対応が重要な課題となるため、水田土壌の化学性を適正に把握することが必要となる。さらに地域や土壌タイプ別の課題を抽出し、それに対応した改善が重要となる。

2) 水田土壌の鉄およびケイ酸地力の増進

水稻の生育と収量に対しては、窒素栄養条件とともに、特にケイ酸栄養条件が重要であることは以前から多くの知見がある^{24,25)}。具体的には、水稻のケイ酸栄

養改善が葉面積の拡大とそれに伴う光合成量の増加、受光態勢の改善、根活性の向上や枯れ上がり抑制、耐病害虫性の向上などの複合的な効果があるとされる。したがって、安定・多収のために各種ケイ酸質肥料の施用が指導されており²⁶⁾、近年は稲穂のケイ酸強化が産米のタンパク質含有量の低下に対しても、良い影響を与えるとの報告もある²⁷⁾。

また、鉄は硫黄との関係が重要と考えられ、道内水田の全硫黄濃度の平均は 0.62 g kg^{-1} であるが、 1.0 g kg^{-1} 以上の水田も散見され²⁸⁾、水稻の生育に対する影響が懸念されている。実際、遊離酸化鉄と硫黄濃度の比(Fe/Sモル比)が5以下の場合には根腐れが多く発生し^{29,30)}、全硫黄濃度が高い十勝岳泥流地帯では、酸化鉄含量の高いアルミニウム精錬砕の施用による生育の改善効果が認められるなど^{31,32)}、道内水田土壌の遊離酸化鉄濃度の向上も重要となっている。

現在、北海道では作土深の浅い泥炭や礫質土壌に対する耕土補給、砂質土に対する物理性改善に主眼がおかれた客土が実施されており、泥炭土に対するケイ酸補給効果の報告¹⁴⁾もあるが、他の土壌に対する効果や成分についての知見は少ない。さらに、道内には適当な客土材を近くで確保することが困難な地域も多い。そこで、遊離酸化鉄およびケイ酸濃度が低く、潜在的な水稻生育の抑制要因となっている水田に対する客土や鉄資材、ケイ酸資材施用の効果についての解明が重要な課題となる。

2-2 実験方法および結果

2-2-1 北海道における水田土壌の化学性

調査方法

1) 供試試料

1990年から1994年の5ヶ年間に北海道における水田の全域から合計1578筆(1990年:297筆,1991年:360筆,1992年:403筆,1993年:241筆,1994年:277筆)の作土を採取、分析した。採取時期は10月中旬から11月上旬である。作土はコンバイン走行跡を避け、一筆の水田から2ヶ所、水田表面のわらを除去して採取した。採取した土壌は風乾砕土し、2mmの篩を通して分析試料とした。

2) 分析方法

pH(H₂O, KCl)は蒸留水および1N-KCl2.5倍懸濁液一

ガラス電極法^{36,37)}, Y1 (置換酸度) は1N-KCl抽出液法^{35,37)}で, 培養窒素は湛水保温静置法 (40°C-7日間培養, 土:液比=1:10), 有効態リン酸 (P₂O₅) はブレイNo2法 (土:液比=1:10), 交換性塩基 (カリウム (K₂O), カルシウム (CaO), マグネシウム (MgO)) は1N-酢酸アンモニウム抽出法で分析した³⁴⁻³⁷⁾. 培養ケイ酸 (SiO₂) は湛水保温静置法 (40°C-7日間培養, 土:液比=1:6) による上澄み液を定量した²³⁾. 遊離酸化鉄 (Fe₂O₃) は浅見・熊田法^{35,37)}, 易還元性マンガン (Mn) は1N-酢酸アンモニウム液 (0.2%ハイドロキノ含有) 抽出法³⁷⁾ で測定した.

3) 調査地点の土壤群の特定方法

北海道立中央農業試験場「農耕地評価のためのマッピングシステム」より水田作土を採取した地点の3次メッシュ (1 km四方) を抽出し, 各メッシュの土壤ID (地力保全基本調査成績における土壤区の番号) から

全国土壤統分類の土壤群を特定した. さらに便宜上これを火山性土系 (黒ボク土・多湿黒ボク土・黒ボクグライ土), 台地土系 (褐色森林土・灰色台地土・グライ台地土), 褐色低地土, 灰色低地土, グライ土, 泥炭土系 (泥炭土・黒泥土) の6土壤区分に分類して取り扱った.

調査結果

1) pHとY1

pH (H₂O) は4.5~6.9の範囲に分布し, 平均値5.5 (中央値5.5) であった (図1). pH (KCl) は3.4~5.5の範囲に分布し, 平均値4.4 (中央値4.4) となった (図1). 北海道における土壤診断基準値³⁸⁾では, 非湛水期間の適正なpH (H₂O) が5.5~6.0とされており, 水田土壤のpH (H₂O) は基準値の下限値に近かった.

Y1は0.1~61.3の範囲にあり, 平均値5.5 (中央値3.9)

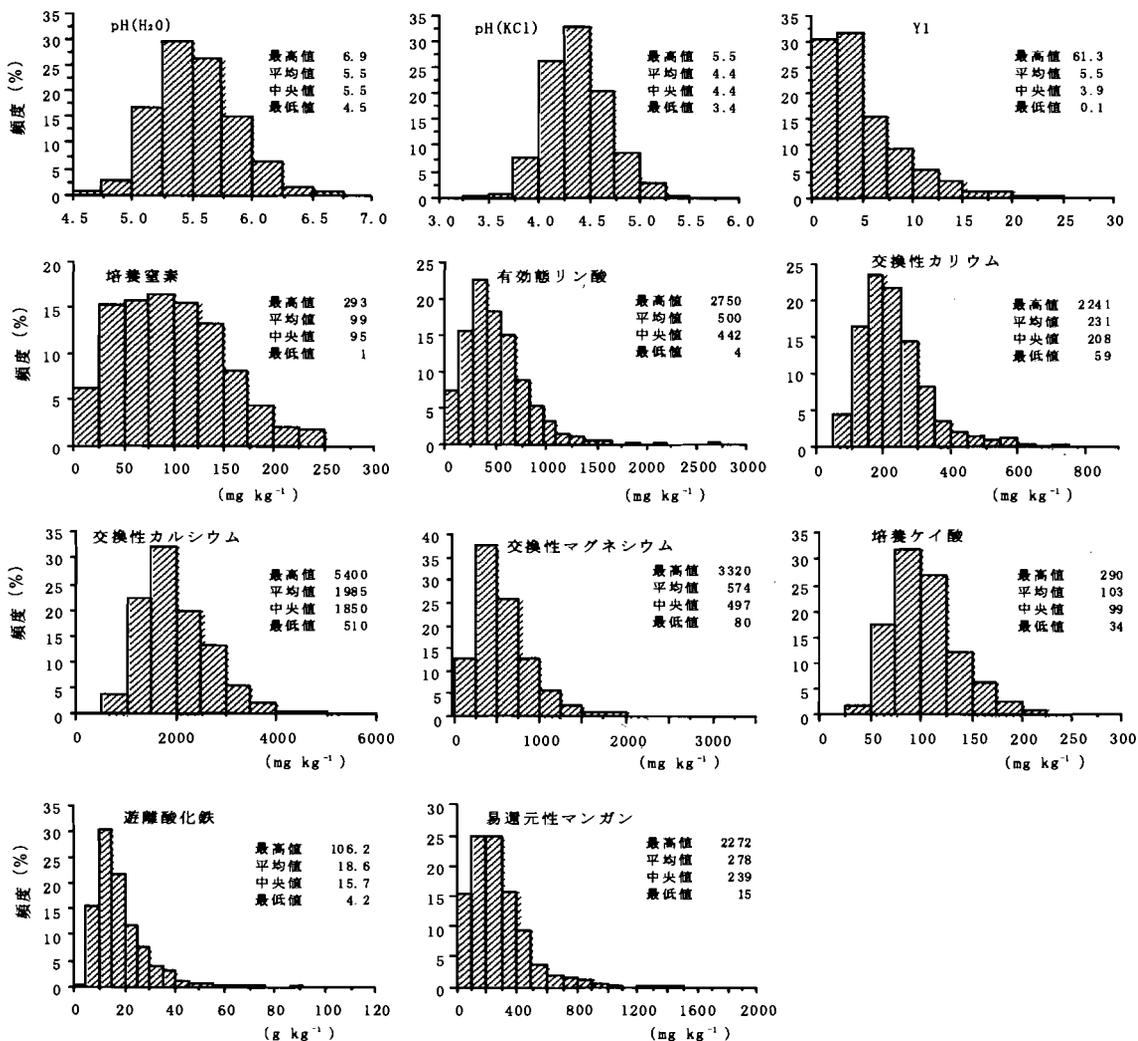


図1. 北海道水田作土の化学性頻度分布

であった(図1)。Y1は6以上で強酸性、14以上で極強酸性とされており、北海道の水田土壌は強酸性が22.9%、そのうち4.3%が極強酸性であった。

2) 培養窒素

培養窒素は1~293mg kg⁻¹の範囲に分布し、平均値99mg kg⁻¹(中央値95mg kg⁻¹)であった(図1)。70~150mg kg⁻¹の水田が半数程度であったが、地力窒素過多と考えられる200mg kg⁻¹以上の水田も4.6%あり、反対に診断基準の下限値(70mg kg⁻¹)より低い割合も37.3%認められた。また標準偏差が54.1と変動幅は大きかった。

3) 有効態リン酸

有効態リン酸は4~2750mg kg⁻¹に分布し、平均値500mg kg⁻¹(中央値442mg kg⁻¹)であった(図1)。北海道における土壌診断基準値は100mg kg⁻¹以上であるが、本調査の96.4%が基準を満たし、平均値が基準下限値のほぼ5倍であった。

4) 交換性塩基

交換性カリウムは59~2241mg kg⁻¹の範囲に分布し、平均値231mg kg⁻¹(中央値208mg kg⁻¹)であった(図1)。北海道の土壌診断下限値150mg kg⁻¹以下の水田は約2割程度と比較的少なく、平均値は150~300mg kg⁻¹の適正領域にあった。

また交換性カルシウムは510~5400mg kg⁻¹の範囲に分布し、平均値1985mg kg⁻¹(中央値1850mg kg⁻¹)であった。交換性マグネシウムは80~3320mg kg⁻¹の範囲に分布し、平均値574 mg kg⁻¹(中央値497mg kg⁻¹)であった(図1)。マグネシウムは適正領域に87%が分布し

たのに対して、カルシウムは1500mg kg⁻¹以下の低濃度領域に26%程度が分布していた。

5) 培養ケイ酸

培養ケイ酸は34~290mg kg⁻¹の範囲にあり、平均値103mg kg⁻¹(中央値99mg kg⁻¹)であった(図1)。100mg kg⁻¹以下の不足域にある土壌が半数以上あり、ケイ酸供給能の不足は北海道における水田土壌の特徴であった。

6) 遊離酸化鉄と易還元性マンガン

遊離酸化鉄は4.2~106.2g kg⁻¹の範囲に分布し、平均値18.6 g kg⁻¹(中央値15.7g kg⁻¹)であった。易還元性マンガンは15~2272mg kg⁻¹の範囲に分布し、平均値278mg kg⁻¹(中央値239mg kg⁻¹)であった(図1)。遊離酸化鉄は調査土壌の46%で基準値を下回った。易還元性マンガンは下限値100mg kg⁻¹以下の土壌が15%あった。

7) 土壌区分別の化学性

土壌群の特定された分析値のある3次メッシュ(473メッシュ)から土壌区分ごとの平均値を算出した(表1)。pHは火山性土系が若干高い傾向にあるが、その他の土壌間に有意差は認められなかった。Y1は灰色低地土で高く、台地土系とグライ土がそれにつき、褐色低地土や泥炭土系、火山性土系は比較的低かった。このように酸性化が進んだ土壌の多い灰色低地土やグライ土、台地土系は水田メッシュの約5割を占めた。

培養窒素はグライ土が顕著に高く、火山灰土系が有意に低かった。しかし、同一土壌区分の中でも変動が著しく大きかった。有効態リン酸は土壌間に有意な差違が認められなかった。培養ケイ酸は台地土系で88mg

表1. 土壌区分別の化学性の比較

項目	火山性土系	台地土系	褐色低地土	灰色低地土	グライ土	泥炭土系
pH (H ₂ O)	5.78 a	5.58 b	5.57 b	5.55 b	5.54 b	5.55 b
pH (KCl)	4.57 a	4.35 b	4.38 b	4.31 b	4.37 b	4.35 b
Y1	3.91 a	6.26 bc	5.79 ab	7.47 c	6.04 bc	4.89 ab
培養窒素 (mg kg ⁻¹)	82 a	118 cd	100 b	104 bc	131 d	114 bcd
有効態リン酸 (mg kg ⁻¹)	485 a	430 a	467 a	453 a	425 a	470 a
交換性カリウム (mg kg ⁻¹)	184 a	236 b	233 b	227 ab	247 b	242 b
交換性カルシウム (mg kg ⁻¹)	2372 ab	2095 bc	2053 c	2225 abc	2121 bc	2405 a
交換性マグネシウム (mg kg ⁻¹)	499 ab	531 ab	468 a	603 bc	609 bc	688 c
培養ケイ酸 (mg kg ⁻¹)	119 a	88 c	97 b	104 b	100 b	121 a
遊離酸化鉄 (g kg ⁻¹)	11.9 a	17.2 b	16.4 b	18.3 b	21.7 c	17.6 b
易還元性マンガン (mg kg ⁻¹)	1476 a	2955 c	2603 bc	2438 bc	2763 bc	2196 ab
調査メッシュ数	40(15.4)	76(26.4)	119(19.6)	76(14.4)	107(13.1)	55(11.2)

各項目の異なるアルファベット間には5%水準において有意差があることを示す。調査メッシュ数の()内は3次メッシュ地図における各土壌の比率

表 2. 土壌化学性の相関係数

	pH(H ₂ O)	pH(KCl)	Y1	培養窒素	有効態リン酸	交換性カリウム	交換性カルシウム	交換性マグネシウム	培養ケイ酸	遊離酸化鉄	易還元性マンガン
pH (H ₂ O)		***	***	ns	ns	ns	***	***	***	***	***
pH (KCl)	0.73		***	ns	**	***	***	***	***	**	***
Y1	-0.51	-0.65		ns	***	***	***	ns	**	ns	***
培養窒素	-0.04	0.00	-0.01		***	***	***	ns	***	ns	***
有効態リン酸	-0.02	0.06	-0.09	0.18		***	ns	***	*	***	***
交換性カリウム	-0.03	-0.12	0.10	0.22	0.10		***	***	**	ns	ns
交換性カルシウム	0.49	0.43	-0.19	0.22	-0.05	0.17		***	ns	***	**
交換性マグネシウム	0.29	0.17	-0.03	0.01	-0.12	0.15	0.56		ns	**	***
培養ケイ酸	-0.16	-0.18	0.07	-0.15	0.06	0.07	0.05	0.02		*	***
遊離酸化鉄	-0.20	-0.07	0.01	0.00	-0.35	0.02	-0.19	-0.07	-0.06		***
易還元性マンガン	0.14	0.17	-0.10	-0.10	-0.29	0.01	0.07	0.18	-0.28	0.37	

相関行列表の計算に用いた分析点数は1558点、有意水準は5%を*、1%**、0.1%***、有意なしをnsと表示した。

kg⁻¹と顕著に低く、反対に火山性土系と泥炭土系で高い傾向にあった。遊離酸化鉄は土壌区分による差が大きく、特に火山性土系が土壌診断基準値より低い11.9 g kg⁻¹であった。

8) 化学性の相互関係

化学性の相互関係を検討するため、調査分析した1578点から欠測値を除く1558点を用いて相関行列(表2)を計算した。pH (H₂O) は交換性カルシウム、交

換性マグネシウムに対してそれぞれ r = 0.49, r = 0.29 の有意な正の相関が、Y1、遊離酸化鉄に対してそれぞれ r = -0.51, r = -0.20 の有意な負の相関を認めた。また交換性カルシウムと交換性マグネシウムには r = 0.56 の有意な正の相関を認めた。

有効態リン酸は遊離酸化鉄、易還元性マンガンに対して r = -0.35 (図2)、r = -0.29 の有意な負の相関関係にあり、遊離酸化鉄と易還元性マンガンには r = 0.37 の有意な正の相関を認めた。さらに偏相関係数は有効態リン酸と遊離酸化鉄が r = -0.31、有効態リン酸と易還元性マンガンが r = -0.21 となり、どちらも有意な負の相関を認めた(図3)。ただし偏相関係数は遊離酸化鉄が易還元性マンガンより高いことから、有効態リン酸には易還元性マンガンよりも遊離酸化鉄の影響が大きかった。

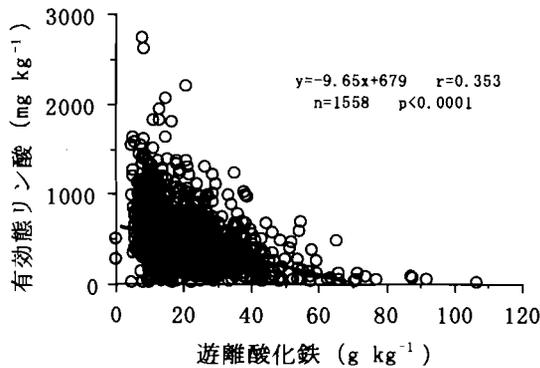


図 2. 遊離酸化鉄と有効態リン酸と遊離酸化鉄の関係

2-2-2 水田土壌における化学性の地域別特徴メッシュ地図作成方法

2-2-1における土壌分析結果と「農耕地評価のためのマッピングシステム」と国土数値情報における3次メッシュ(約1km四方)より推定したメッシュ地図を作成した。水田作土の採取地点の分析値を当該メッシュの分析データとした。ただし同一メッシュに複数の分析地点が含まれた場合は分析値の平均値を求め、1メッシュ1データに変換して分析値ファイルとした。

一方、作土を採取していない3次メッシュについては、当該メッシュの土壌区分を特定し、分析値ファイルからその土壌区分に該当するメッシュの分析値のみを抽出し、当該メッシュからの距離の逆数で加重平均した推定値で補完した。

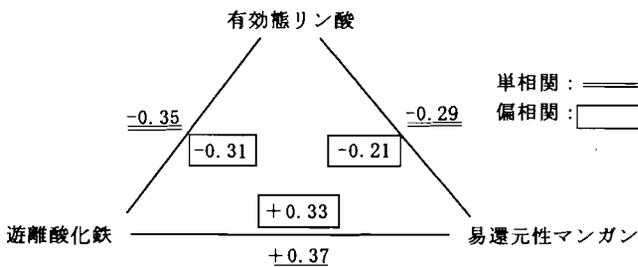
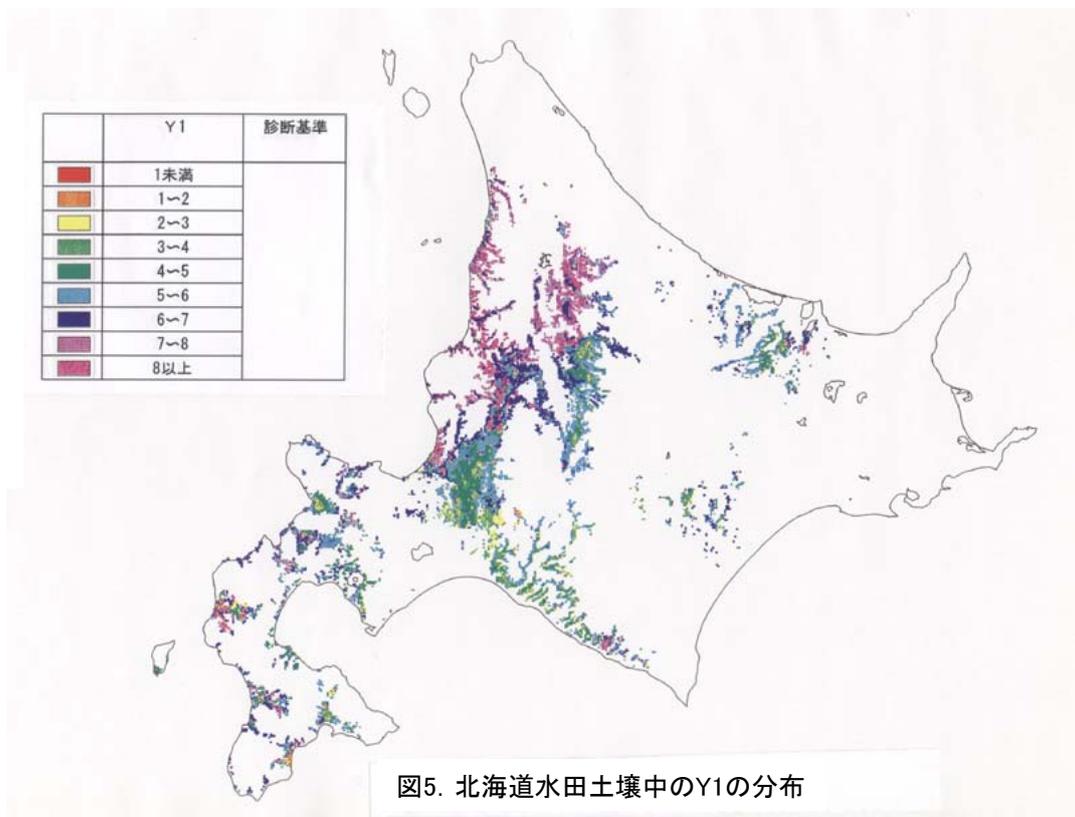
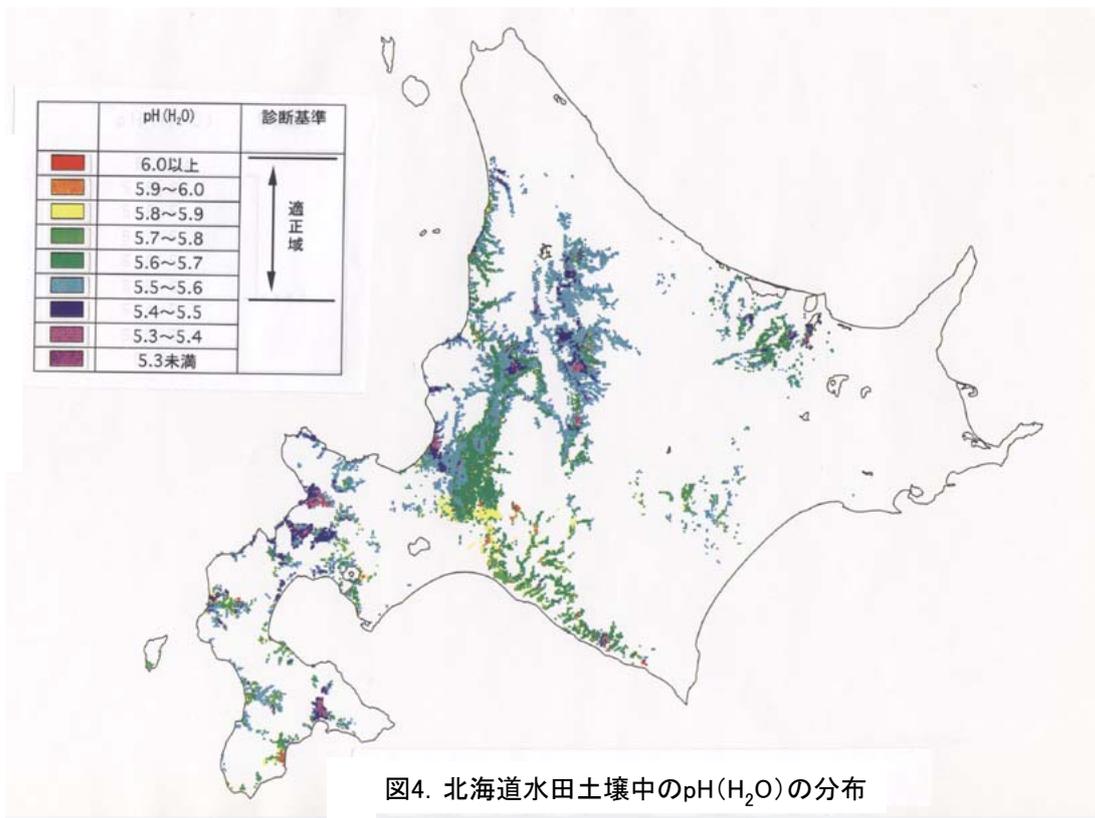
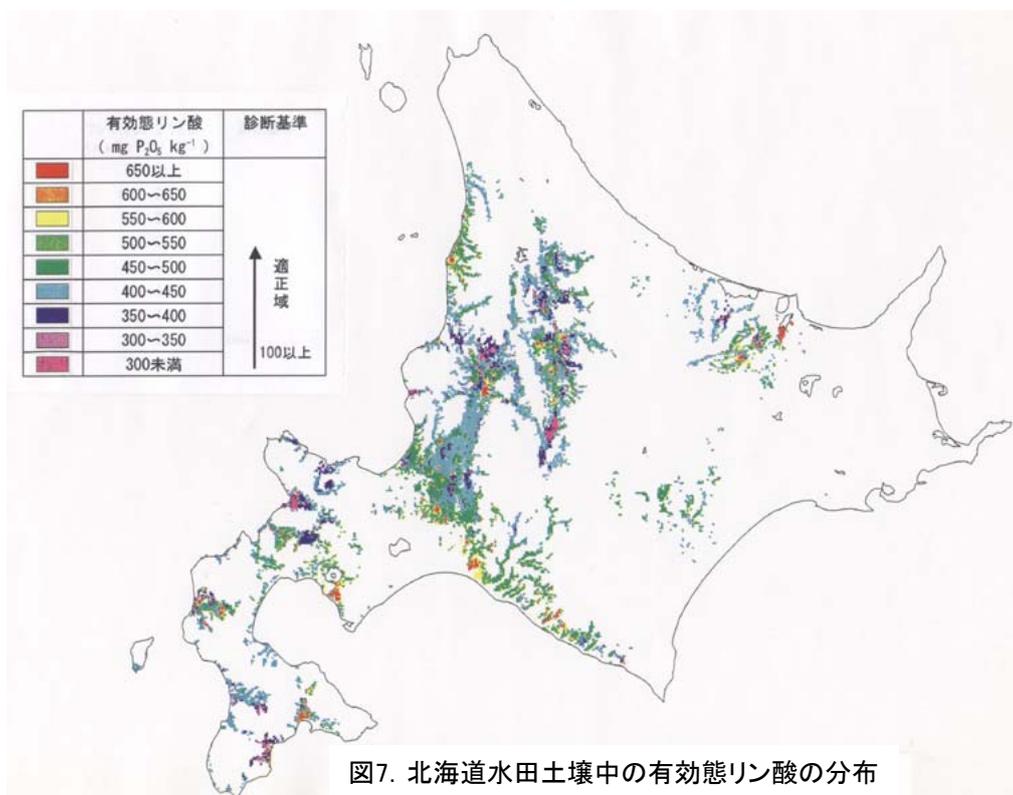
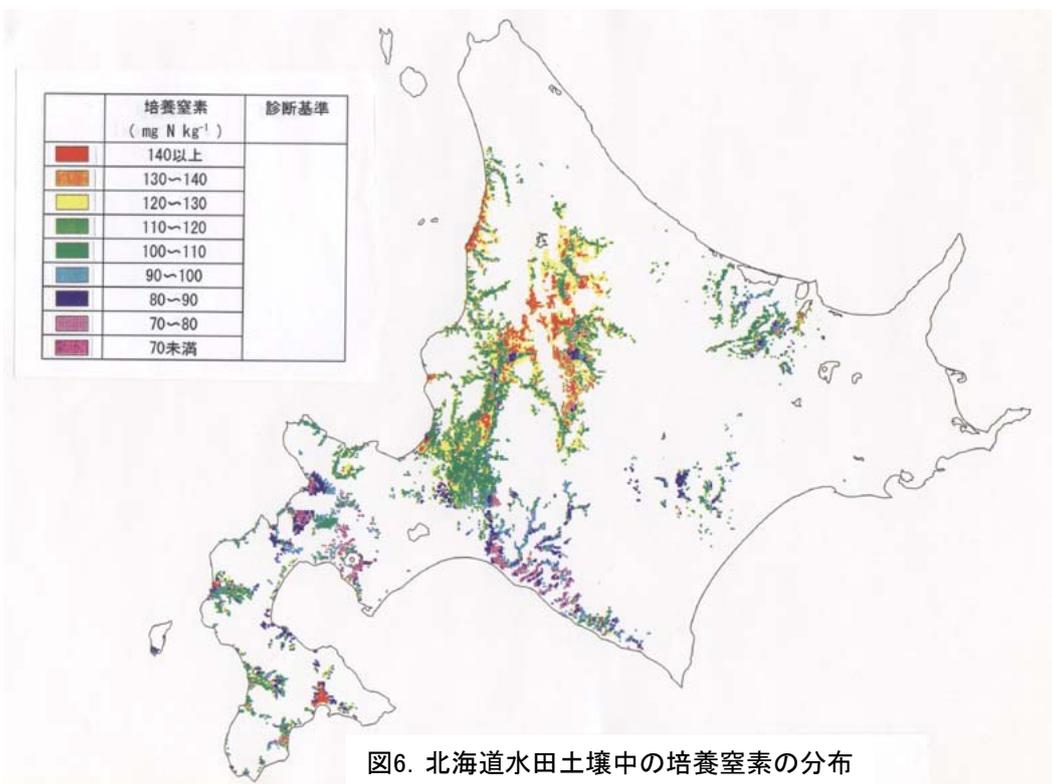


図 3. 有効態リン酸と遊離酸化鉄、易還元性マンガンの偏相関係数





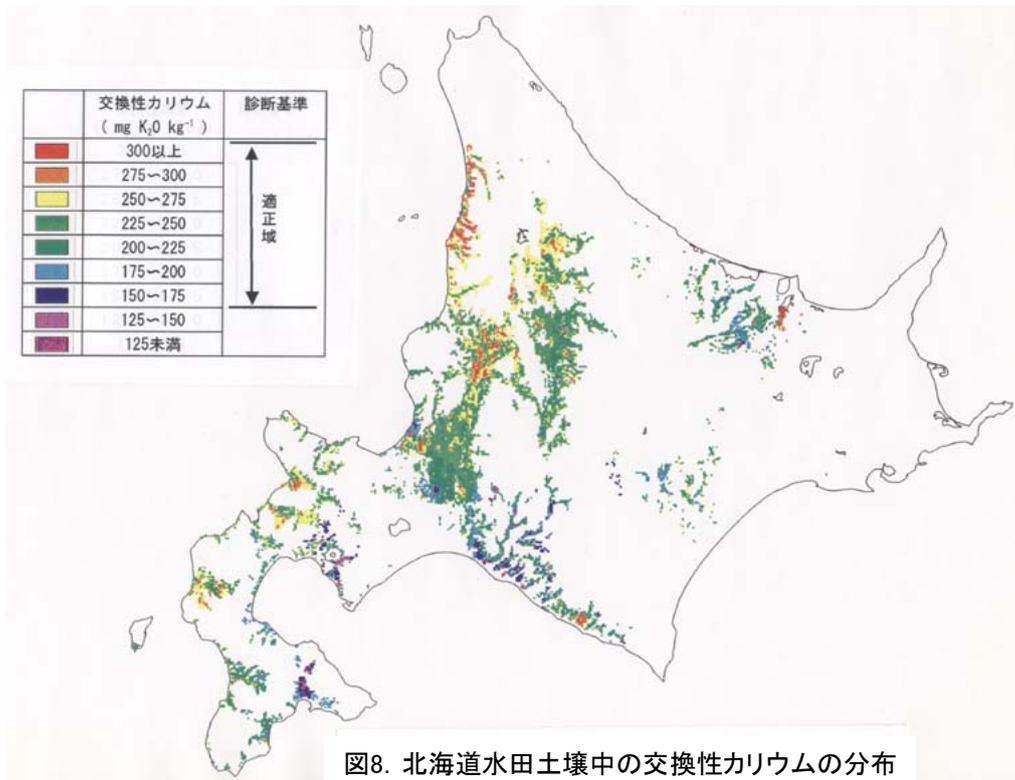


図8. 北海道水田土壤中の交換性カリウムの分布

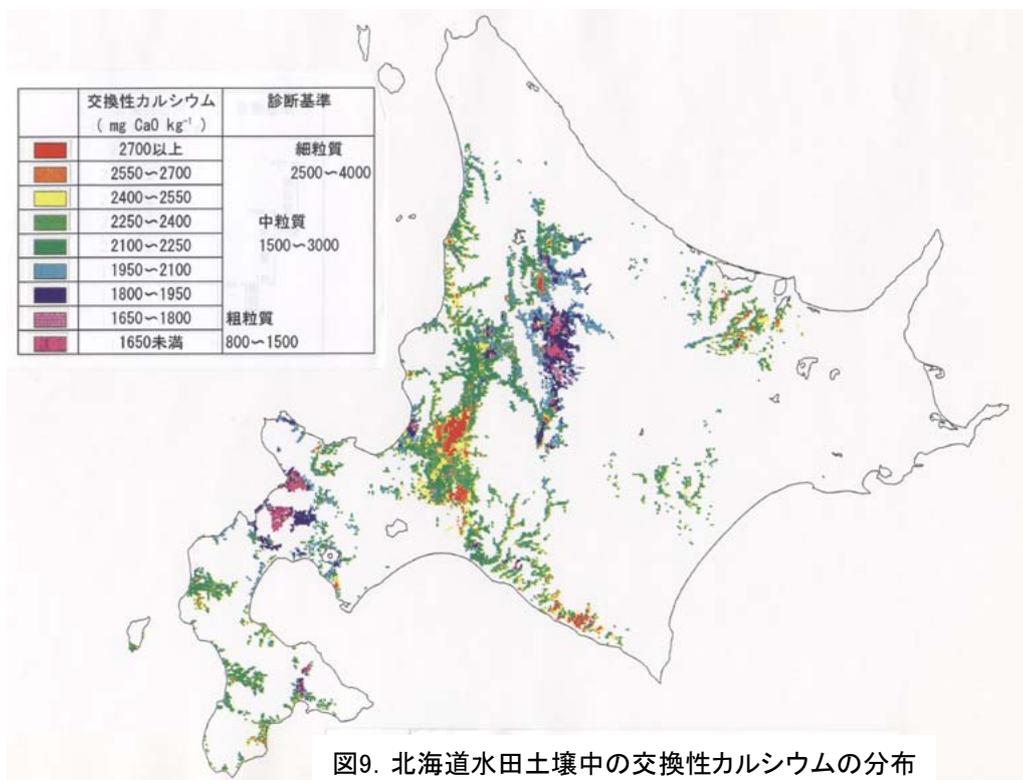
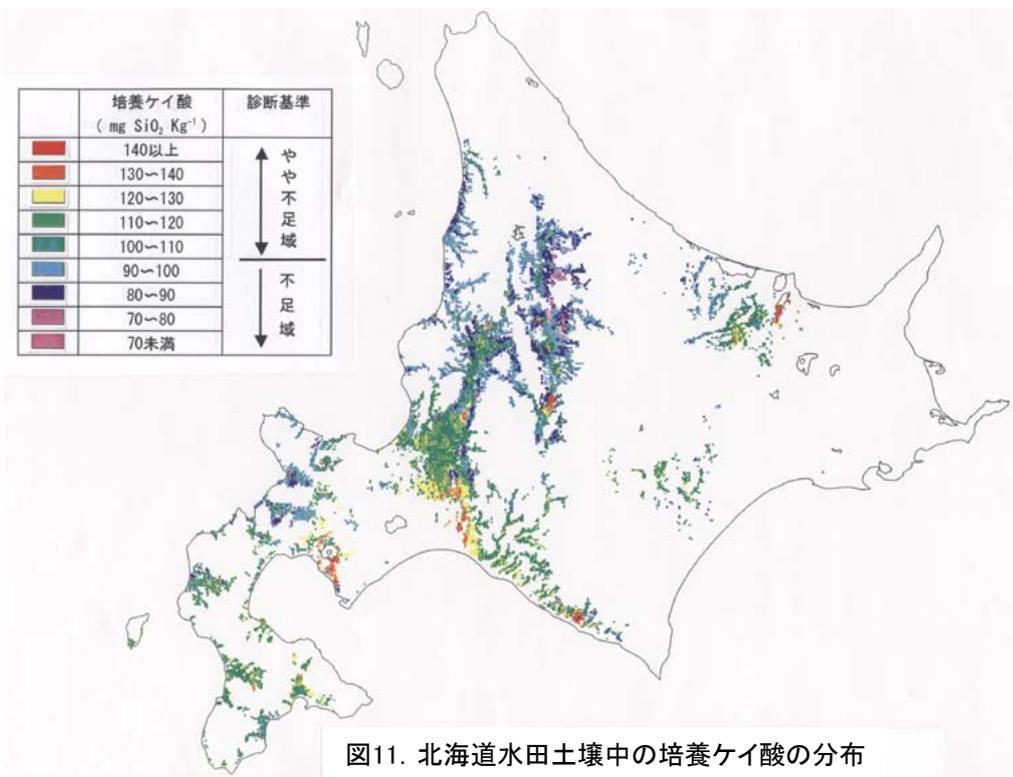
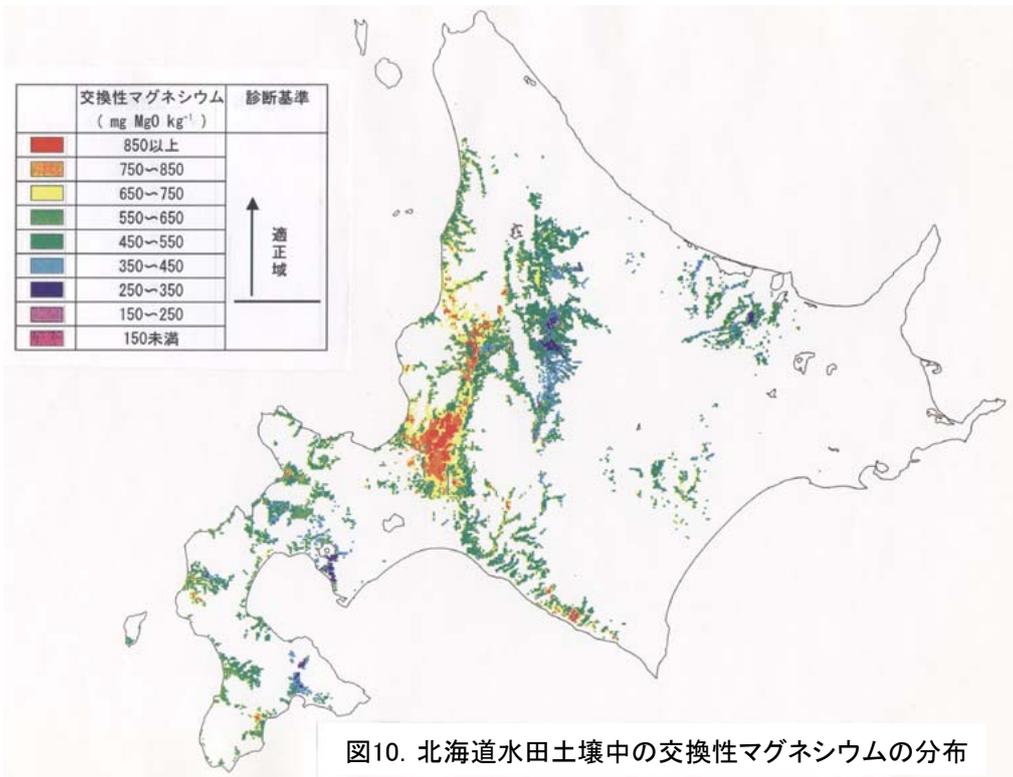


図9. 北海道水田土壤中の交換性カルシウムの分布



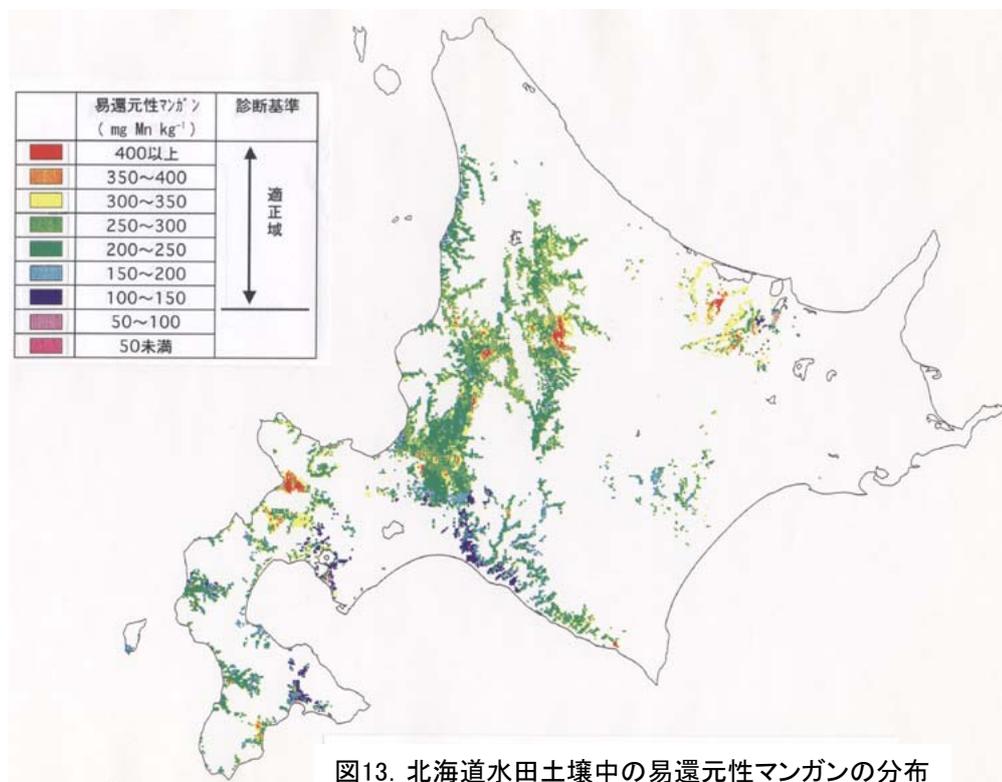
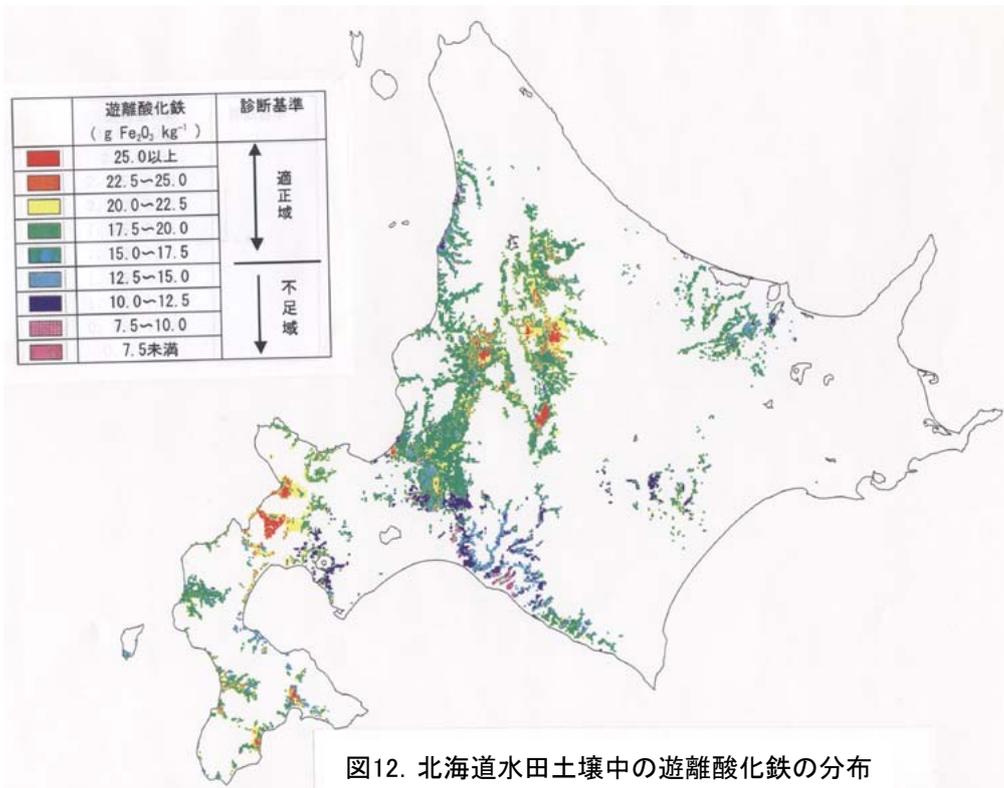


表3. 各試験地における試験区と処理内容

試験区名	処理内容	褐色低地土	灰色低地土	泥炭土*
1. 無処理		○	○	○
2. 客土 2cm	遊離酸化鉄高濃度土壌 2cm客土	○	○	
3. 客土 4cm	遊離酸化鉄高濃度土壌 4cm客土	○	○	
4. 客土 6cm	遊離酸化鉄高濃度土壌 6cm客土	○		
5. Fe 0.5kg	鉄資材 0.5kg m ² 散布	○		
6. Fe 1kg	鉄資材 1kg m ² 散布	○	○	○
7. Si 100g	シリカゲル 100g m ² 散布	○	○	
8. Si 500g	シリカゲル 500g m ² 散布			○
9. Fe+Si100	鉄資材 1kg, シリカゲル100g m ² 散布	○	○	
10. Fe+Si500	鉄資材 1kg, シリカゲル500g m ² 散布			○

泥炭土の試験地は近隣に適当な客土材の確保が困難であったため、客土の試験を行わなかった。

調査結果

pH (H₂O) は北海道中央部太平洋岸 (胆振, 日高) を除いて概ね低く, Y1 は道央部 (石狩, 空知北部) および中央部以北 (上川) で高く, 道央南部 (空知南部) および中央部太平洋岸で低い傾向にあった (図4, 図5). 培養窒素は, 道南部 (渡島) および道央北部・道北 (空知, 上川) で高く, 中央部太平洋岸で低かった (図6). 有効態リン酸は全般的に高い傾向にあり, 地域差は不明瞭だった (図7). 交換性塩基については, 概して道北 (上川, 留萌) と道南部 (渡島) で少ない傾向にあり, 道央南部および中央部太平洋岸で高かった (図8, 図9, 図10). 培養ケイ酸濃度は, 道央部以北 (空知北部, 後志, 上川, 留萌) で低く, 中央部太平洋岸で高い傾向にあった (図11). 遊離酸化鉄濃度は, 顕著な地域間差が認められ, 特に中央部太平洋岸で低い傾向にあった (図12). 易還元性マンガン濃度は, 中央部太平洋岸と道南部で比較的低い, 概ね基準値を上回っていた (図13).

2-2-3 遊離酸化鉄・ケイ酸の供給と高品質米生産の関係

実験方法

1) 試験圃場および栽培概要

試験は1997年~2001年に褐色低地土 (腐植質褐色低地土, 旭川市永山), 灰色低地土 (普通灰色低地土, 上川郡鷹栖町), 泥炭土 (低位泥炭土, 空知郡北村) の3種類の土壌で行った。

供試品種は, 褐色低地土の1998年と2000~2001年は「ほしのゆめ」, 1999年は「きらら397」. 灰色低地土の1999年は「きらら397」, 2000年~2001年は「ほしのゆめ」. 泥炭土は試験期間を通じて「きらら397」であっ

た. 苗は褐色低地土が稚苗マツト苗, 灰色低地土は中苗型梓苗, 泥炭土は成苗ポット苗であった. 施肥量は, 褐色低地土で窒素-リン酸-カリウム=90-101-73 kg ha⁻¹. 灰色低地土は107-120-107kg ha⁻¹(1999年), 86-97-86kg ha⁻¹ (2000~2001年) であった. 泥炭土は28-28-28kg ha⁻¹(1998~1999年), 51-108-98kg ha⁻¹ (2000年), 58-118-104kg ha⁻¹(2001年)であった.

2) 試験処理

表3のように遊離酸化鉄に富む暗赤色土の客土 (2~6 cm), 鉄資材およびケイ酸資材の多量施用を行った. ただし, 泥炭土は近郊からの客土採取が困難であったため資材施用のみとした. 褐色低地土と灰色低地土に用いた客土材は上川郡鷹栖町で採取した土壌を用いた. 土壌の分析値は遊離酸化鉄48g kg⁻¹, 可給態ケイ酸 (40℃-1週間湛水保温静置培養法) 134mg kg⁻¹であった (表4). 鉄資材は鉄鉱石を原料に造粒化した

表4. 供試した客土材および鉄資材の分析値

	全炭素 g kg ⁻¹	全窒素 g kg ⁻¹	有効態 リン酸 mg kg ⁻¹	可給態 ケイ酸 mg kg ⁻¹	遊離 酸化鉄 g kg ⁻¹
客土材	6.5	0.3	15	134	48
鉄資材	-	-	100	15	680

資材であり, 遊離酸化鉄濃度は680g kg⁻¹, 可給態ケイ酸濃度は15mg kg⁻¹の試作品, ケイ酸資材としてはケイ酸濃度が990g kg⁻¹の市販シリカゲルをそれぞれ用いた.

試験規模は, 褐色低地土の客土区で概ね25 a, 資材施用区は12 a であり, 灰色低地土の客土区は35 a, 資材施用区は9 a であった. 泥炭土の資材施用区は約4 a であった.

表5. 施工後の土壌分析

処理区名	全炭素 g kg ⁻¹	全窒素 g kg ⁻¹	可給態 窒素 mg kg ⁻¹	可給態 ケイ酸 mg kg ⁻¹	遊離 酸化鉄 g kg ⁻¹	易還元性 マンガン mg kg ⁻¹	全硫黄 g kg ⁻¹	鉄/硫黄 モル比 (Fe/S)
褐色低地土								
1. 無処理	43.0	3.2	146	78	15.0	122	0.82	7.3
2. 客土2cm	31.6	2.3	103	87	19.3	138	0.71	10.9
3. 客土4cm	23.3	1.8	92	97	23.4	197	0.59	15.9
4. 客土6cm	29.4	2.4	61	102	28.5	177	0.54	21.2
5. Fe 0.5kg	38.9	2.0	131	82	17.5	84	0.77	9.1
6. Fe 1kg	38.8	2.4	129	85	20.0	67	0.76	10.6
7. Si 100g	44.3	3.4	146	109	15.3	117	0.79	7.8
9. Fe1+Si100	46.5	3.6	165	117	19.6	82	0.76	10.4
灰色台地土								
1. 無処理	32.6	4.1	127	88	12.3	217	0.42	11.8
2. 客土2cm	22.1	2.8	64	92	19.6	200	0.44	17.9
3. 客土4cm	23.1	2.8	71	114	21.6	372	0.37	23.4
6. Fe 1kg	27.3	3.8	106	85	20.3	268	0.40	20.4
7. Si 100g	30.9	4.0	121	109	18.0	193	0.40	18.1
9. Fe1+Si100	31.3	3.9	111	105	20.1	229	0.37	21.8

水田作土0~12cmを採取，風乾碎土後に常法で分析した。
可給態窒素は40℃-1週間湛水保温静置培養法で分析した

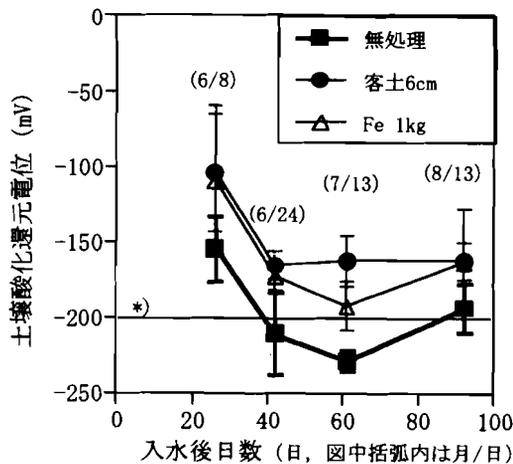


図14. 土壌酸化還元電位の推移 (1999年, 褐色低地土)

*) -200mV以下が，一般的に強還元状態とされる

3) 調査分析方法

土壌分析方法は2-2-1に準じる。土壌の酸化還元電位 (Eh) は土壌用Ehメータ (藤原製作所製) を用いた。作土に白金電極を差し込んだまま固定し，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⁷⁾。測定の深さは作土中の5cmとした。

実験結果

1) 土壌化学性および根域環境の改善

褐色低地土，灰色低地土いずれにおいても，客土により可給態ケイ酸濃度と遊離酸化鉄濃度，Fe/Sモル比が増加した (表5)。灰色低地土の可給態ケイ酸濃度は客土4cmでケイ酸指標値とされる100mg kg⁻¹以上となったが，褐色低地土では客土6cmが必要であった。これは，原土 (無処理) の可給態ケイ酸濃度が褐色低地土で灰色低地土より低かったことによる。鉄資材 (1kg m⁻²) やケイ酸資材 (100g m⁻²) 単独施用では遊離酸化鉄，可給態ケイ酸それぞれの指標値が，さらに併用によって両者の指標値が達成できた。

褐色低地土で測定した土壌の酸化還元電位は，無処理区で6月下旬から-200mV以下と強還元状態となっていたが，客土6cmおよび鉄資材1kg m⁻²施用により酸化還元電位が有意に上昇し，-200mV以上に推移した (図14)。一方，目視での観察ではあるが，急激な土壌還元に伴って発生するメタンガスによると思われる気泡 (ワキ) が客土や鉄資材施用によって減少した。

2) 水稻生育に対する影響

褐色低地土，灰色低地土における幼穂形成期の茎数は客土量の増加に伴って顕著に多くなった (図15)。また，鉄資材やケイ酸資材の施用によっても増加し，これらは客土や資材の施用による土壌中の遊離酸化鉄濃度の変化と同様な傾向を示した。また，窒素吸収量

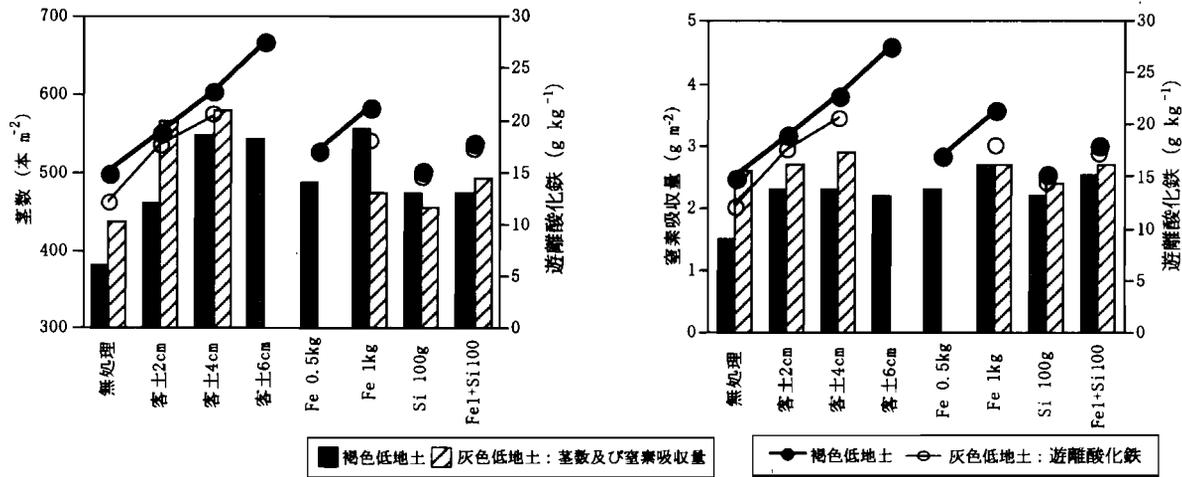


図15. 客土および資材施用が幼穂形成期の茎数と窒素吸収量、土壌の遊離酸化鉄濃度に及ぼす影響
(褐色低地土：1999～2000年平均， 灰色低地土：1999年～2001年平均)

表6. 客土および資材施用が精玄米収量(g m⁻²)に及ぼす影響

処理区	褐色低地土	灰色低地土	泥炭土
1. 無処理	458	491	494
2. 客土2cm	504	533	-
3. 客土4cm	526	521	-
4. 客土6cm	536	-	-
5. Fe 0.5kg	492	-	-
6. Fe 1kg	526	506	529
7. Si 100g	517	515	-
8. Si 500g	-	-	513
9. Fe1+Si100	526	516	-
10. Fe1+Si500	-	-	530

精玄米収量は各試験地における年次別結果の平均値

表7. 客土および資材施用がタンパク質含有量と品質に及ぼす影響

区 別	玄米白度	品質に及ぼす影響		
		良質粒歩合 %	白米中のタンパク質含有量 g kg ⁻¹	
客土 無処理	17.0	79.3	70	
	17.7	87.5	63	
	17.5	86.2	63	
資材 無処理	17.5	77.6	78	
	Fe ¹⁾	17.7	81.3	77
	Si ²⁾	17.9	81.8	76
	Fe+Si ³⁾	17.8	81.6	78

全試験年次(1998～2001年)の平均値
客土は褐色低地土・灰色低地土の平均値，資材は全試験地の平均値

1) Fe1kg区，2) 褐色低地土・灰色低地土はSi100g区，泥炭土はSi500g区

3) 褐色低地土・灰色低地土はFe1+Si100区，泥炭土はFe1+S1500区

も茎数と類似の変化を示し(図15)，精玄米収量も客土や資材施用により増加した(表6)。精玄米収量と幼穂形成期の茎数との間には，正の関係が認められた(図16)。客土や資材施用により玄米白度や良質粒歩合が上昇した(表7)。また，白米中のタンパク質含有量は客土により低下したが，鉄資材やケイ酸資材施用では効果が明瞭でなかった。

3) 遊離酸化鉄濃度の向上効果

褐色低地土および灰色低地土の土壌中の遊離酸化鉄と精玄米収量の間には正の相関があり，いずれの土壌でも20g kg⁻¹までは収量が増加した(図17)。また，Fe/Sモル比は客土や鉄資材施用により高まるが，Fe/Sモル比10程度以上では増収効果が小さいため，Fe/S

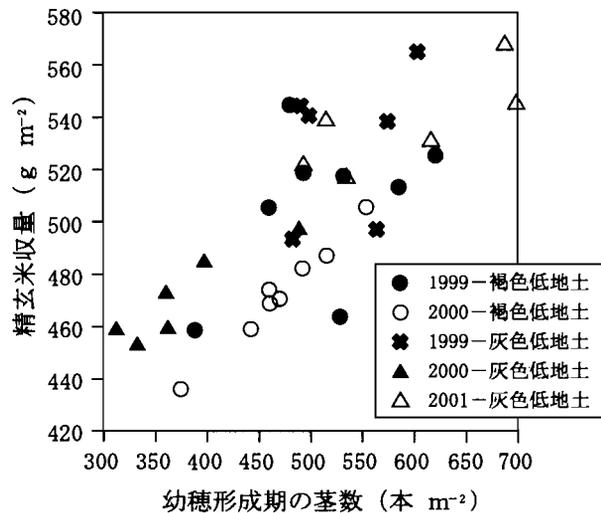


図16. 幼穂形成期の茎数と精玄米収量の関係

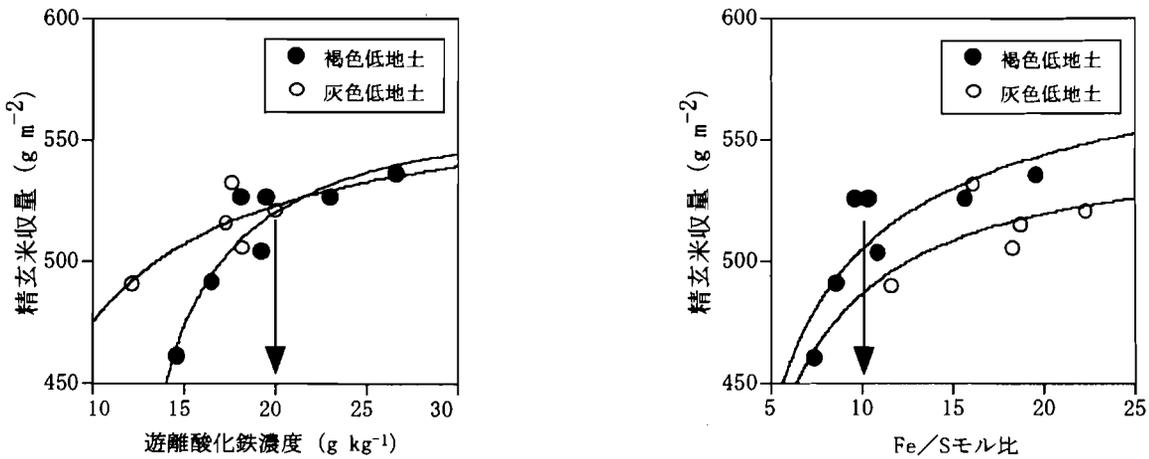


図17. 遊離酸化鉄濃度およびFe/S (遊離酸化鉄/硫黄) モル比と精玄米収量の関係
 精玄米収量は褐色低地土・灰色低地土における試験期間の平均値、矢印は本試験から求められた遊離酸化鉄及びFe/Sモル比の目標値

モル比は10程度を確保すればよいと考えられた (図17).

一方、全道水田の平均全硫黄濃度 0.62 g kg^{-1} (最小値N.D., 最大値 8.1 g kg^{-1}) に対して、Fe/Sモル比10になる遊離酸化鉄濃度は改訂前の基準値 15 g kg^{-1} に相当する (図18). しかし、本試験に用いた褐色低地土のように、全硫黄濃度が平均値以上の 0.8 g kg^{-1} に対しては、遊離酸化鉄 20 g kg^{-1} がFe/Sモル比10に相当する.

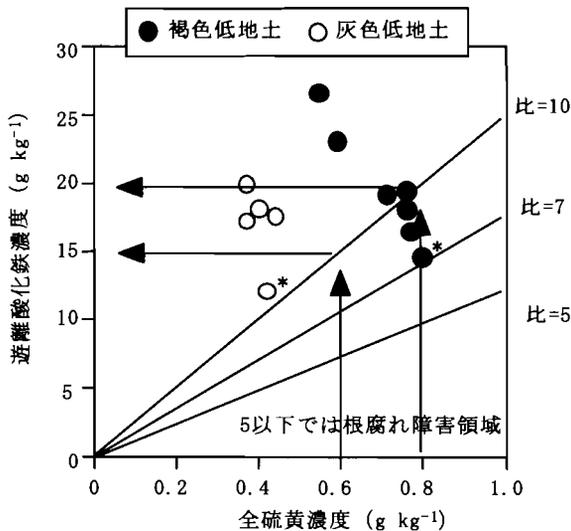


図18. 試験圃場の硫黄と遊離酸化鉄の関係
 全硫黄濃度 0.6 g kg^{-1} は全道水田の平均値,
 0.8 g kg^{-1} は本試験圃場 (褐色低地土) の数値
 *) 無施用区

2-3 論議

先に述べたように、アミロース含有量は品種による変動が大きく、タンパク質含有量は産地や栽培技術による影響の大きいことが知られている。したがって、北海道産米の食味向上には品種開発と栽培技術の両面から、その改善が必要となる。米の食味と米粒中のタンパク含有量は負の相関関係が認められることから、低タンパク米生産技術の開発が重要とされる^{4,5,39)}。米粒中のタンパク含有量は吸収された窒素当たりの玄米生産効率と負の相関関係にあり、これは米の収量を高めることが低タンパク米生産に重要なことを示唆している。そのためには健全な稲の生育が不可欠であり、北海道では従来から土壌理化学性の基準、土壌診断と土壌区分に基づく施肥対応などが作成され、普及指導が行われてきた^{38,40)}。

しかし、過去の土壌調査事業からかなりの年数が経過しており、水田土壌の現状とはやや異なる場合があるため、普及指導における判断を困難にしている。また、水稻の健全な生育や玄米生産効率に大きな影響を持つとされる培養ケイ酸、遊離酸化鉄、易還元性マンガニンなどについても従来の調査はデータが少なく、地域や土壌区分からの検討も不十分であった。低タンパク米生産技術の普及指導を実効あるものにするためには、これらの項目も含めた詳細な水田土壌の現状データと、その地域や土壌区分における特性を把握する必要がある。これにより、低タンパク米生産技術の開発課題は北海道全域に係わるものと、さらに地域や土壌区分別のものが抽出され、改善技術による対策が可能

表8. 北海道における水田土壌の化学性

項目	(単位)	全点数の平均値	道診断基準の下限值	同左以下の割合(%)
pH (H ₂ O)		5.5	5.5	49.7
pH (KCl)		4.4	-	-
YI		5.5	-	-
培養窒素	(mg kg ⁻¹)	98.6	70	37.3
有効態リン酸	(mg kg ⁻¹)	500	100	3.6
交換性カリウム	(mg kg ⁻¹)	231	150	21.2
交換性カルシウム	(mg kg ⁻¹)	1985	1600 ^(a)	26.0
交換性マグネシウム	(mg kg ⁻¹)	574	250	12.8
培養ケイ酸	(mg kg ⁻¹)	103	10	51.0
遊離酸化鉄	(g kg ⁻¹)	18.6	15	45.8
易還元性マンガン	(mg kg ⁻¹)	278	100	15.4

(a) 交換性カリウムの基準は粗粒質800、中粗粒質1500、細粒質2500の平均値

となる。

本調査で得られた北海道における水田土壌の化学性を診断基準値と対比すると(表8), pH (H₂O)は診断基準に示された下限値以下の割合が49.7%と多く, 酸性化が進んでいることから水稻根の伸長や養分吸収に対して悪影響が懸念される。本調査に用いた土壌は10月中旬から11月上旬に採取され, 風乾砕土されたものである。この条件では還元状態から落水により酸化状態になっており, Fe²⁺が酸化されることによってH⁺やAl³⁺が交換座に侵入する⁴¹⁾。この酸性化の程度は交換性塩基類の存在量に影響され, 強酸性の要因としては水田土壌の交換性塩基, 特に交換性カルシウムの低いことが原因と考えられる。

しかし, 交換性マグネシウムは平均値で574mg kg⁻¹あり, 診断基準以下の割合は12.8%と少ない。水野⁴²⁾は北海道の中心部を横断する蛇紋岩地帯の理化学性を解析し, 蛇紋岩土壌はマグネシウム含有量が高くアルカリ性を示すが, マグネシウムが溶脱すると強酸性化することを究明した。また, その周辺に分布する土壌はマグネシウムが高いことを明らかにしている。したがって, 蛇紋岩地帯がその中心を横切っている道央部の水田地帯で交換性マグネシウムが高かったのは, 母材の特性に由来したものと考えられる。

水田土壌の培養窒素は水稻の生産力に関する重要な項目であるが⁴³⁾, 従来の基準は収量性を重視している。これに対し, 近年は産米の低タンパク含有量が新たな目標とされるが, この目標値に合致した適正な培養窒素水準の設定と改善対策は未解決である。一般に稲体の窒素は施肥から20~30%, 残り70~80%が土壌由来の窒素で構成されている⁴⁴⁾。したがって低タンパ

ク米の生産には生育後半に吸収される土壌窒素の制御が必要となり, 培養窒素の評価と適正化が求められる。特に, 窒素過多が懸念されていた泥炭土の培養窒素がグライ土より低いのは, これまで多量の客土が行われたことが影響していると考えられる(表1)。また褐色低地土や火山性土系の培養窒素が低いのは, 圃場の透排水性が比較的良好であり, 腐植の分解が進んだためと考えられた。ただし, 培養窒素は土壌区分内の変動が非常に大きいため, 実際の窒素施肥対応では, 湛水前に作付け圃場の窒素診断が必要である。

有効態リン酸は平均値で500mg kg⁻¹であり, 診断基準の下限値100mg kg⁻¹の5倍ときわめて高く, リン酸の蓄積傾向が認められた。北海道における1900年代の稲作研究では冷害を克服するための技術開発が主要であり, 遅延型冷害に対するリン酸施肥の効果が高かった⁴⁵⁾。このためリン酸は水稻の吸収量をはるかに上回る施肥が行われ, 蓄積が進んだものと考えられる⁴⁶⁾。このリン酸は活性Al, Feに保持された画分が大部分を占められると思われるが, グライ土や灰色低地土などでは鉄に保持されている割合が多いと推察される⁴⁷⁾。津高ら⁴⁸⁾も活性2価鉄とCa型リン酸の散布図を示し, この両者に双曲線状の相関を認めている。本調査においても, 有効態リン酸と遊離酸化鉄の関係はこれと類似する双曲線状の散布図が得られ, 有意な負の相関が認められている。この双曲線状の関係は易還元性マンガンにも認められたが, 偏相関係数の結果を加味するとリン酸の可給化には遊離酸化鉄が強く関係すると推察された。したがって, 遊離酸化鉄の著しく高い土壌に対してはリン酸肥沃度にも注意を払うことが必要と考えられる。

また、有効態リン酸の蓄積に対しては減肥対応が指導され、 300mg kg^{-1} 以上の場合のリン酸施肥は標準量の半量 (4g m^{-2}) とされている。しかし 500mg kg^{-1} 以上のような著しいリン酸過剰に対して、さらなるリン酸減肥が可能であるか判断する材料はない。反面、北海道でのリン酸の肥効は移植期から幼穂形成期の地温の低い時期に重要であり、この時期は還元の発達が小さいため、土壌からの供給は少ないためとも考えられる。したがって施肥リン酸の役割は大きく、無施用には懸念があるため、リン酸肥沃度に関する基準と施肥対応の再検討には十分な注意が必要である。

ケイ酸吸収は葉の水分状態を良好に保ち光合成の促進⁴⁹⁾、いもち病⁵⁰⁾、葉鞘褐変病の軽減⁵¹⁾、食味の向上²⁷⁾ など各種効果が明らかにされている。このためケイ酸質肥料は全国各地の水田で利用されており、施肥量は1980年： 36.1g m^{-2} 、1993年： 19.7g m^{-2} であり、その利用率は20～50%、平均30%と見積もられている⁵²⁾。また吸収されたケイ酸は大部分が稲体中でプラントオパールとなるが、これは風化に対する抵抗性が強く⁵³⁾、住田⁵⁴⁾は稲わらや稲わら堆肥に含まれるケイ酸の利用率をそれぞれ6%、3%であるとしている。北海道の水稲のケイ酸吸収量を仮に 100g m^{-2} (稲体乾物 1000g m^{-2} 、ケイ酸含有量 100g kg^{-1} と仮定) とすると、稲わらや稲わら堆肥から $3\sim 6\text{g m}^{-2}$ が供給されるため、ケイ酸質肥料 (20g m^{-2} と仮定) から $4\sim 10\text{g m}^{-2}$ 供給されることになる。この条件では土壌や灌漑水から $84\sim 93\text{g m}^{-2}$ 相当量のケイ酸供給が必要とされる。

北海道の稲作ではケイ酸含有量を高めることにより、吸収した窒素の玄米生産効率を向上し、低タンパク米生産のための培養ケイ酸の適正域を 160mg kg^{-1} 以上、 $100\sim 160\text{mg kg}^{-1}$ をやや不足域、 100mg kg^{-1} を不足域とした²⁷⁾。これに対して本調査の培養ケイ酸は平均値で 103mg kg^{-1} ときわめて低く、51.0%の水田で診断基準の下限値である 100mg kg^{-1} を下回っていた (表8)。土壌区分では台地土系と褐色低地土で低く、火山性土系と泥炭土系で高い。

培養ケイ酸の低い地域に関してはケイ酸質肥料の施肥が特に重要となるため、培養ケイ酸濃度を3次メッシュに展開した (図11)。 160mg kg^{-1} 以上の適正域にある水田はすべての3次メッシュで認められず、ほぼ半分がやや不足域、残り半分が不足域であった。特に水田面積の多い北海道中央部で低いことが大きな問題であり、ケイ酸供給力を勘案したケイ酸質肥料の施肥対

応が求められるが、 80mg kg^{-1} 以下の著しい不足域の水田に対しては泥炭土における客土³⁹⁾などのケイ酸供給技術の活用も必要である。

本試験では、泥炭土以外の土壌も含めて客土やケイ酸資材施用を検討した。客土やケイ酸資材施用による土壌ケイ酸肥沃度の増進は、水稻体中のケイ酸濃度を高め、精米中のタンパク質含有量を低下させたと考えられる。特に、客土では可給態ケイ酸の補給に加え、有機物含量の少ない客土材の多量投入による土壌有機物の希釈と可給態窒素の低下により、タンパク質含有量低下も加えられると推察される。したがって、資材施用より客土の方がより効果的な方法であると判断される。

遊離酸化鉄の平均値は 18.6g kg^{-1} と診断基準の下限値 (15.0g kg^{-1}) を上回ったが、変動も大きく45.8%の水田でこれを下回り、 10.0g kg^{-1} 以下も15.2%認められた。Fe²⁺の生成は易分解性有機物含量および遊離酸化鉄含量ならびにこれの相対的割合に規制される⁵⁵⁾。北海道の水田土壌は泥炭土、グライ土など易分解性有機物の高い土壌型が多いことから酸化還元電位が低下し易いと考えられる。さらに遊離酸化鉄含有量が低い水田に対する稲わらなどの新鮮有機物の投入は土壌酸化還元電位の急速な低下をまねき、水稻の生育に悪影響を与えることが懸念される。また、過去には秋落水田における硫化水素の発生が土壌中の遊離酸化鉄濃度の低い土壌で多いこと⁵⁶⁾、含鉄資材及び客土材の施用でその生成が抑制されること⁵⁷⁾ が報告されている。北海道でも水野ら³⁹⁾は硫黄 (S) 1に対し遊離酸化鉄 (Fe₂O₃) として5以下では水稻根の生育が顕著に抑制されることを明らかにした。さらに硫黄を多く含む十勝岳泥流地帯において、遊離酸化鉄を多く含むアルミニウム精錬鉱滓の施用により、水稻生育の改善が認められている³²⁾。

これらのことから水田土壌における遊離酸化鉄は、稲わらなど易分解性有機物の分解が起こっても土壌酸化還元電位の低下による水稻根の障害が見られない程度、また土壌中の硫黄に対するバランスを維持できる程度に高めることが肝要と考えられた。特に土壌区分から見た火山性土系や地域性から見た中央部太平洋岸など、遊離酸化鉄濃度が低いと予想される場合には、遊離酸化鉄の適正な水準を目指した客土もしくは含鉄資材の施用による土壌改良が求められる。

これに対し、本試験における客土および含鉄資材施用では、土壌の遊離酸化鉄濃度を高め、根圏環境を改

善して根活性を向上させることにより、幼穂形成期の茎数増加から収穫期の穂数増加をもたらす、最終的には精玄米収量の増加としてその効果が発現したと考えられる。特に増収効果が褐色低地土で大きかったことは、作土の硫黄含量がやや高く、Fe/Sモル比が低かったことから、遊離酸化鉄濃度の低いことが潜在的に水稻生育を抑制していたためと推察される。遊離酸化鉄濃度の適正值に関しては、全硫黄濃度 0.8 g kg^{-1} 以下の水田土壌における遊離酸化鉄の適正水準を 20 g kg^{-1} (Fe/Sモル比10) 以上とし、全硫黄濃度 0.8 g kg^{-1} 以上の水田土壌の場合には遊離酸化鉄濃度が 20 g kg^{-1} 以上であっても、Fe/Sモル比10を目標に遊離酸化鉄濃度を高めるべきと判断する。

以上のように、化学性の観点からみた北海道の水田土壌は、交換性塩類が少ない強酸性土壌の分布が多く、加えて可給態のケイ酸と遊離酸化鉄含有量の少ない、老朽化水田に類似した土壌の多いことを明らかにした。この改善には、交換性カルシウム補給によるpHの改善やケイ酸肥沃度の向上、土壌酸化容量である遊離酸化鉄の適正化が重要な課題であり、これを解決することにより水稻生産性向上と食味改善が図られるものと考えられる。