

第三章 土壤改良による北海道米食味の高位平準化の検討

第1節 食味向上を目的とした客土試験の経緯

1 背景と目的

「大ロットで均質な良食味米を安定的に供給しうる広域的な産地形成」の推進のためには、前章で示したようにAPSを指標とした、食味の地域間差解消が重要な目標となる。北海道内での食味の地域間差には、大きく分けて気象的な要因と土壌的な要因が存在する。気象的な食味変動は、前述の地帯区分（北海道農政部，2000）による優良品種の作付けや収・出荷の仕分けにより、解消されつつある。しかし、もう一方の土壌条件による産米の食味変動は依然として大きく、食味地域間差の大きな要因となっている。

稲津（1988）は北海道内での食味の変動要因として、土壌型を重要な要因として取り上げた。枠試験により土壌間の食味特性の違いを検討したところ、良い方から火山灰土>洪積植土、沖積植土≧沖積壤土>泥炭土の順であり、特に泥炭土水田の食味特性が劣ることを指摘し、これに対する食味向上技術の確立が必要であるとした。

そこで著者は、現況においてこれらの状況がどのように変化したかを知るために、1988年に空知管内193地点

において、土壌型と産米の食味に関する現地実態調査を実施した。表Ⅲ1-1に各土壌型毎に集計した食味特性値を示したが、泥炭土水田は他の土壌型に比較して特に蛋白含有率が高く、それに伴いAPSをはじめとする食味特性値が劣ることが明らかとなり、泥炭土水田の食味向上技術の確立が必要な状況は以前と変わらないことが明らかとなった。

以上のことから、北海道米の食味の地域間差を平準化するためには、道内水田面積の約21%を占める、泥炭地産米の食味を改善する技術が特に重要であると考えられた。そのため本章では、これを目的とした客土による改善技術について論じた。

泥炭地産米の食味を向上させる技術として、稲津ら（1978）は客土の有効性を示唆している。泥炭地水田に対する客土は従来、漏水防止、地耐力の向上など、主に物理的不良要因の改善を目的とし、過去の土地改良事業の中で繰り返行われてきた。物理的不良要因の改善効果や、増収効果についてはすでに多くの成績（北海道農業試験場，1969）があり、それらの成果を根拠とした客土の施工基準が設けられている。しかし、客土が産米の食味に与える影響については、稲津ら（1978）の報告が初めてであり、その後もなされていない。そのた

表Ⅲ1-1 土壌型による食味特性値の比較（平成元年空知管内調査）

土壌型区分	点数	アミロース含有率 (%)	蛋白含有率 (mg/g)	MV* (B.U)	H/-H** (T.U)	APS
褐色低地土・台地土	23	20.3	82	584	4.39	41.5
灰色低地土・台地土	69	20.7	82	575	4.49	38.7
グライ土・グライ台地土	58	20.8	83	574	4.48	37.6
泥炭土	43	20.9	89	553	4.59	32.2

*MV：アミログラム最高粘度

**H/-H：テクスチュログラム（硬さ/粘り）

表Ⅲ1-2 栽培法法の概要

処理	1987年	1988年	1989年	1990年
客土深 (cm)	0,10,20,30	0,10,20,30	0,10,20,30	0,10,20,30
客土材 (土性)	SL,LiC	SL,LiC	SL,LiC	SL,LiC
基肥N用量 (g/m ²)	4,8,12	4,8,12,16,20	4,8,12,16,20	4,8,12
供試品種	ともひかり	ゆきひかり	ゆきひかり	ゆきひかり、きら397
栽植密度	27.5株/m ²	27.5株/m ²	27.5株/m ²	27.5株/m ²

*試験区造成時（1987年）に土壤改良資材として重焼リン30g/m²を施用

*リン酸、カリは10、12g/m²を共通施用

*施肥は基肥のみ全層施肥とした

*耕起はロータリー耕により、耕起深13cmに調整した

めに、食味が向上する機作の解明や具体的な施工基準については明らかにされておらず、良食味米生産を目的とした客土事業の実施には至っていなかった。

そこで著者らは、泥炭地水田に対する客土を、新たな米の食味向上技術として捉え直し、この技術の確立と詳細な解析を行うために、客土施工から水稻栽培に至る試験を4年間にわたり実施した。本章では、この水稻栽培試験で得られたデータを中心に、客土による土壌環境の変化とそれともなう水稻生育、収量および養分吸収に与える影響を解析し、産米の食味特性向上の機作を考察する。さらに、解析結果を基礎に、良食味米生産を目的とした客土を施工するための、施工基準（要否判定・客土材の選定・量の算定、効果の持続性の検討）の策定を試みた。

2 客土試験の実施概要

2-1 圃場処理設計

客土と米の食味についての関係を、詳細に解析・検証するための水稻栽培試験を実施した。基本的な圃場処理は図Ⅲ1-1のとおりである。

1987年2月に、岩見沢市上幌向の中央農業試験場稲作部の泥炭地水田に、新たな客土を施工した。客土深は10,20,30cmで、粘土系(LiC)および砂質系(SL)の2種類の客土材を用いた。試験面積は各区500㎡、無客土対照区を含め合計3,500㎡の規模でおこなった。試験年次は1987年～1990年の4ヶ年間であった。各処理区内にはN用量試験を配置し、各区毎に水稻生育、収量調査を実施し、産米の食味について分析した。

2-2 水稻栽培方法

各年次毎の施肥処理および品種などは表Ⅲ1-2に示したとおりである。

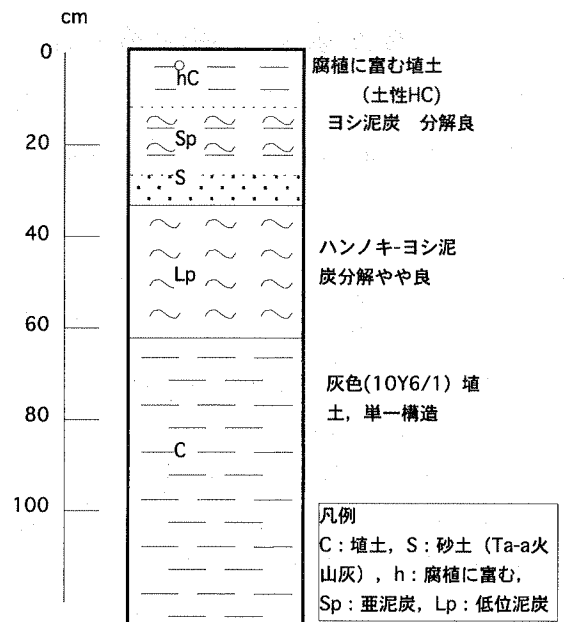
2-3 試験期間の気象条件および生育概況

1987年：移植期および6月中旬の低温により、初期生育

	10cm	20cm	30cm	粘土質客土材 (LiC)
無客土 (対照)	10cm	20cm	30cm	砂質客土材 (SL)

図Ⅲ1-1 客土試験処理区の概要

*各試験区にN4, 8, 12, 16, 20g/㎡の用量区を配置
*1試験区の面積は500㎡とし、1試験区2反復とした



図Ⅲ1-2 供試圃場の土壌断面図

は並～やや劣る程度であった。しかし、6, 7月は天候に恵まれたため、生育の遅れは回復し、幼形期はほぼ平年並であった。その後8月上旬は著しい寡照と低温に転じ、旬平均で平年より5℃程度低かった。さらに、8月31日の台風による強風と、それに続く極端な寡雨が茎葉の損傷と田面の著しい乾燥を促した。そのため登熟歩合や千粒重が低下し、作況は不良となった。

1988年：移植後の低温と強風のため活着は遅れ、6月上旬の日照不足によって初期生育は平年より劣った。7月中旬の低温により生育は再び停滞し、茎数は平年並かやや劣った。しかし、8月は平年よりも著しい高温となったため、茎数の増加が認められ穂数は平年を上回った。8, 9月の登熟期は高温によって極めて順調に推移し、登熟粉数が多かったため、収量は平年比102～106%となった。

1989年：移植直後の生育は平年並であったが、6月2半旬からの低温で生育は停滞し、幼形期は平年に比べ1週間程度遅れた。しかし、その後の高温で生育は急激に進み、出穂期はほぼ平年並となった。出穂期後の好天で初期の登熟は順調であったが、9月に入ってから曇雨天の日が続き後期の登熟は停滞した。収量は登熟粉数も多く千粒重が平年より重くなったため、平年比100～110%となった。

1990年：移植直後に低温に見舞われたものの、6月は高温・多照に推移したため活着・初期生育とも順調で、幼

表Ⅲ1-3 供試土壌の化学性

土壌	pH		T-C	T-N	可給態 ケイ酸 (g/kg)	交換性塩基(mg/kg)			CEC (cmol/kg)	土性
	K	Cl				CaO	MgO	K ₂ O		
稲作部原土	5.4	4.5	63	5	68	4630	810	140	31.9	HC
砂質客土	5.5	3.7	tr.	tr.	334	2040	910	120	14.9	SL
粘土質客土	5.4	4.0	tr.	tr.	292	3100	1510	120	20.4	LiC

注) 客土材は美瑛市峰延の土取り場より採取

表Ⅲ1-4 供試土壌の土性

土壌	粒径組成 (%)				土性	農学会法	農学会法
	粗砂	細砂	シルト	粘土		粘土 (%)	土性
原土壌	7.0	3.5	29.1	60.4	HC	87.4	埴土
SL客土材	62.8	14.0	13.5	9.7	SL	16.2	砂壤土
LiC客土材	18.7	27.3	26.8	27.1	LiC	45.5	埴壤土

表Ⅲ1-5 供試土壌の3相分布

土壌	容積重 (g)	3相分布 (%)			真比重
		固相	液相	気相	
原土壌	134.2	40.2	44.1	15.7	0.54
SL客土材	171.4	66.1	27.9	6.0	1.13
LiC客土材	174.8	67.4	28.2	4.4	1.18

形期は平年より8日程度早かった。その後も高温多照に推移したため、出穂期も平年より8日ほど早まった。登熟期間も全般的に高温・多照に推移したため、成熟期は平年より10日ほど早まった。玄米収量は籾数が少なかつたためそれ程多くなく、平年比103~109%であった。

2-4 供試土壌の理化学性と客土施工に伴う変化

客土材および原土壌の理化学性と、客土施工にともなう変化について検討した。供試水田の土壌断面を図Ⅲ1-2に示した。供試水田は、岩見沢市上幌向の中央農業試験場稲作部泥炭地水田である。当該水田圃場はこれまでに客土来歴がなく、河川の氾濫による無機堆積物と下層低位泥炭の混合層が作土層となっている無機質表層低位泥炭土(北海道の農牧地土壌分類, 第2次案)である(富岡ら, 1976)。Ta-a火山灰をはさみ、スゲ、ヨシ等で構成される分解の進んだ低位泥炭層を下層に持つ。60cm以下は堅密な粘土層となっている当該地域では一般的な泥炭地水田である。

客土は、1987年2月に、美瑛市峰延の洪積台地土取り場より客土材を採取し搬入した。客土材は国際法土性SLおよびLiCに区分される2種類の材をあらかじめ選定し、それぞれ供試水田に客土し、翌春に均平・区画作業を行い、共通試験方法に示した処理区を設定した。

水稻栽培試験は4ヶ年間にわたり実施し、試験終了後に作土試料を採取し分析に供した。土壌の分析は土壌標準分析・測定法(日本土壌肥料学会, 1986)、土壌養分分析法(土壌養分測定法委員会, 1986)、および土壌および作物栄養の診断基準(北海道立中央農業試験場ら, 1992)に従った。

本試験に用いた客土材および原土壌の一般理化学性を

表Ⅲ1-3に示した。試験実施土壌は、この地域の典型的な泥炭地水田の特徴(富岡ら, 1976)を持っており、有機物に富み、N供給力は極めて高い土壌である。一方の客土材にはほとんど有機物が含まれておらず、N、P供給力が乏しい土壌である。逆に、可給態ケイ酸含量が極めて高く、原土壌の4~5倍の値を示し、原土壌とは対照的な理化学性を示した。供試土壌の土性および3相分布を表Ⅲ1-4, 5に示した。土性は、原土壌は極めて粘質なHCであるのに対して、客土材はSLとLiCである。現行の客土事業実施基準には、客土材の土性に関して、農学会法粘土32.5%以上という規定があり、LiC客土材はこの基準に当てはまるが、SL客土材はこの基準には当てはまらない材である。

第2節 客土が水稻生育、収量および産米の食味に及ぼす影響

1 背景と目的

泥炭地に対する客土はこれまでに多くの試験が実施されてきた。しかし、これらの試験では収量関連性質以外の項目については、詳細な解析は行われてこなかった。客土と食味の関係を解析するためには、水稻の生育経過およびそれに伴う養分吸収の推移を明らかにすることが極めて重要であった。そこで本研究では客土と食味の関係を明らかにするために、植物栄養学的見地からの解析を試みた。

すでに多くの研究から明らかにされているように、泥炭地水田の大きな特徴は、土壌N供給力の豊富さと、それが水稻生育ステージの後半に多く発現することである

(北海道農業試験場, 1969) が, 客土はこれらの土壌環境を大きく変化させる土壌改良技術である. 本節では, 客土によるこのような土壌環境の変化が水稻の生育, 養分吸収, および収量に及ぼす影響について解析すると共に, 産米の食味特性に与える影響について検討した.

2 研究方法

水稻の生育調査は, 各年移植20日後, 幼穂形成期(以下幼形期), 出穂期, 成熟期におこない, 草丈, 稈長, 穂長, 茎数, 穂数を調査した. また, 生育時期毎に作物体のサンプリングをおこない, 乾物重, 吸収養分の分析をおこなった. 調査および分析は, 土壌および作物栄養の診断基準(北海道立中央農業試験場, 1992)に従った. 収量調査は成熟期に坪刈り(1区60株×4反復)をおこない, 玄米収量, 登熟調査, 玄米品質の測定をおこなった.

産米の食味特性値の測定は各処理区の収量調査から得た玄米試料を用いて以下の手順に従い実施した. 玄米試料は試験用精米機(山本製作所)により90%精白米を調製し, 炊飯米のテクスチャー分析および食味官能試験に用いた. さらに, 精白米をテストミル(ブラベンダー社)により微粉碎し, 50meshの篩を通過した粉末試料をアミロース含有率, 蛋白含有率およびアミログラム分析に供した. アミロース含有率は, オートアナライザー(ブランルーベ社), 蛋白含有率は, 近赤外分光光度計

(ブランルーベ社, インフラライザー400)を用い, アミログラム特性はビスコグラフ(ブラベンダー社)により最高粘度(MV)およびブレイクダウン(BD)を測定した. 測定時に硫酸銅溶液を加えアミラーゼ活性の影響を除いた. 炊飯米のテクスチャーは, 電気炊飯器により少量カップ炊飯した炊飯米試料を用いて, テクスチュロメーター(ゼネラルフーズ社)によりH(硬さ), -H(粘り)およびH/-H値を3粒法により測定した. 測定は30℃, 湿度100%の恒温室中で行った. 以上の測定は全て稲津(1988)の方法に従った. 炊飯米の食味官能試験は, 食糧研究所の方法(農林省食糧研究所, 1961)に準じ, 試験場職員をパネルとして実施した.

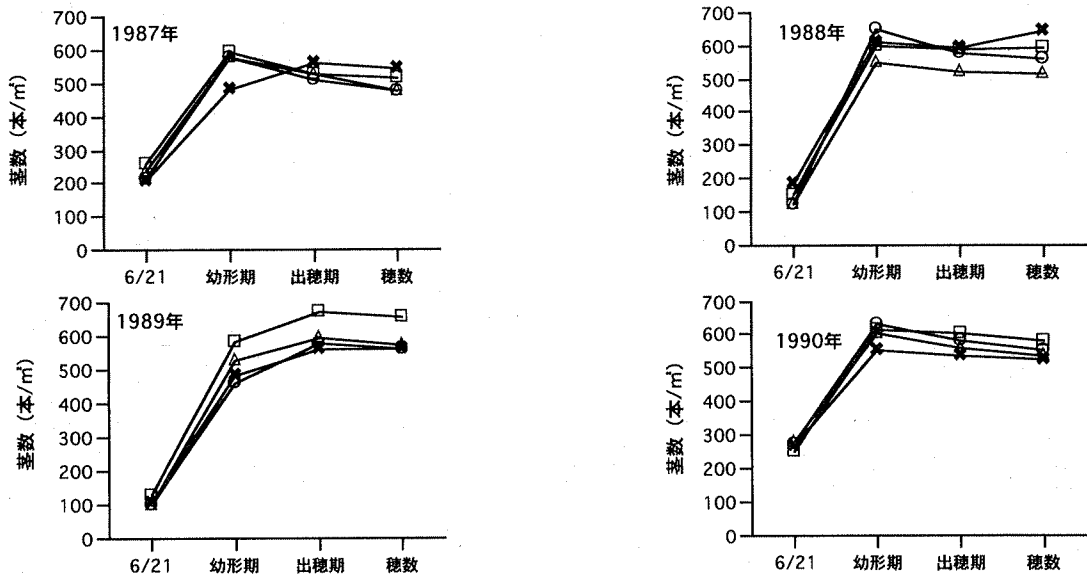
3 結果および考察

3-1 水稻生育

1) 茎数の推移

水稻生育に対する客土の影響を, 茎数および乾物重の推移を指標として解析した. 図Ⅲ2-1に各試験の茎数の推移を示した. 年次によるばらつきはあるものの, 成熟期での穂数はほぼ当該地域の平均的なレベルとなり, 最終的な穂数に, 客土の有無は大きく影響しなかった.

次に, 各試験区での茎数確保パターンを比較するために, 成熟期の穂数に対する幼形期, 出穂期での茎数の確保割合を計算しプロットしたのが図Ⅲ2-2である. 客土区と無客土区は茎数確保パターンが大きく異なった. すなわち無客土区は, 出穂期に至っても100以下の値を示



図Ⅲ2-1 試験期間の茎数の推移 (N4, 8, 12g/m²区の平均)

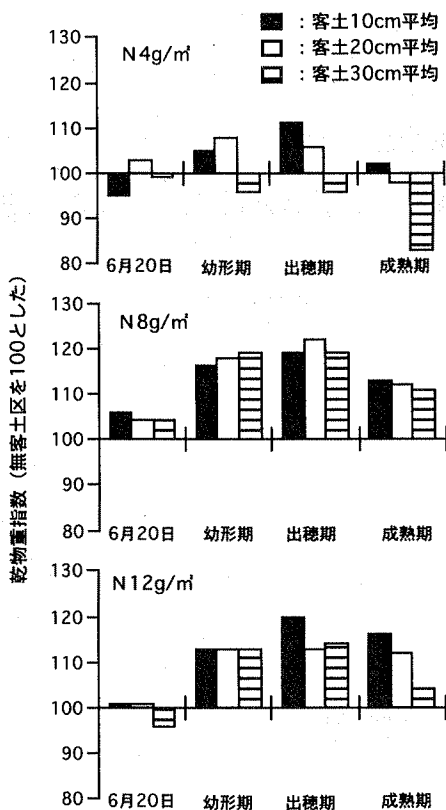
×: 無客土区, □: 客土10cm区, ○: 客土20cm区, △: 客土30cm区

しているのに対して、客土区は幼形期でほとんどの区が、さらに出穂期では全ての処理区が100以上に達しており有効茎が確保されていた。これは、客土区の生育が無客土区に比較して著しく旺盛となるために、有効茎の確保は幼形期で完了し、泥炭地水田の典型的な生育不良パターンである、遅れ穂の多発生が改善されていることを示していた。また、茎数の確保を示す生育パターンは、客土の量と種類によって大きく異なった。すなわち、客土量が増加するほど、また、LiC客土よりSL客土区で有効茎が早期に確保された。

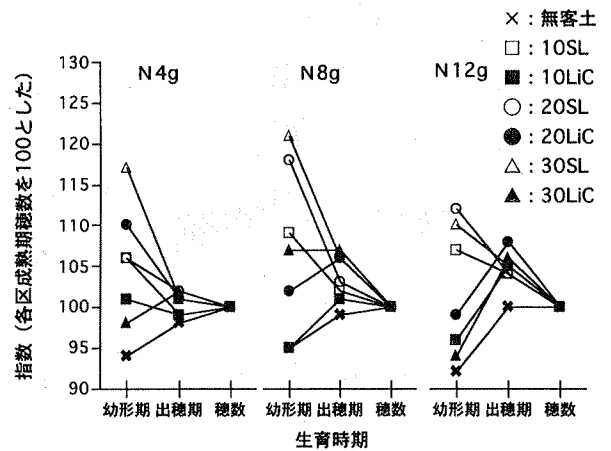
2) 乾物重の推移

次に乾物重の推移から、生育におよぼす客土の影響を解析した。図III 2-3には各生育時期毎に客土区の乾物重を、無客土区同一N施肥量を100とした指数で示した。

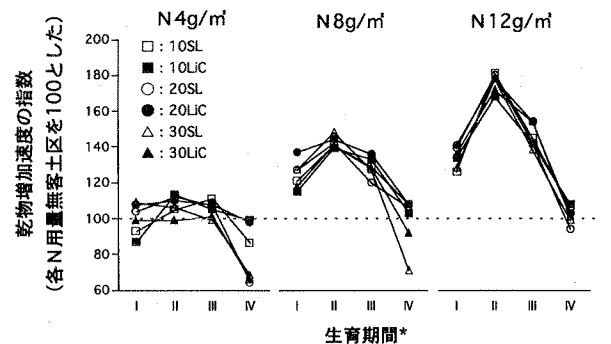
N4g/m²処理では成熟期での乾物重が無客土区に比較して大きく低下したが、他のN処理区ではいずれの生育時期においても無客土区に比較して概ね高く推移した。成熟期での総乾物生産量は、当該地域の標準施肥量であるN8g/m²区で無客土区の98~118%となった。経時的な推移をみると、客土区は生育の前半から乾物重の増加が大きく、水稻の成育が盛んになる幼形期~出穂期で無客



図III 2-3 客土処理間での乾物重の推移



図III 2-2 処理間での茎数確保推移の比較



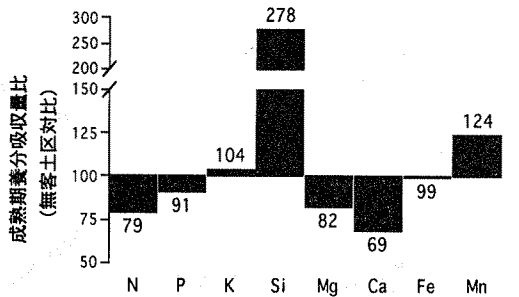
図III 2-4 処理間での乾物増加速度の推移

*生育期間：Ⅰ；移植~移植20日後、Ⅱ；~幼穂形成期、Ⅲ；~出穂期、Ⅳ；~成熟期

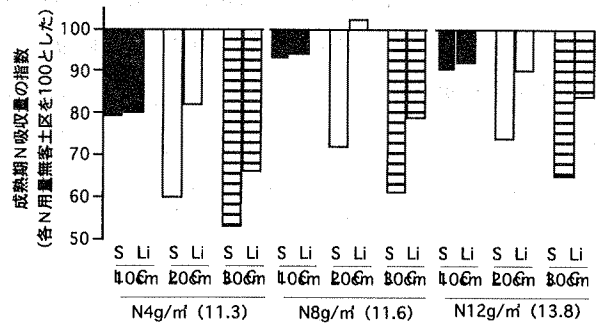
土区との差が最も顕著となった。客土によるこのような乾物重の推移をさらに詳細に検討するため、乾物増加速度 (g/m²・day) を求め、N用量との関係も含めて解析した。図III 2-4は各生育ステージ間での客土区の乾物増加速度の推移を、同一N用量の無客土区を100とした指数で示した。

N4g/m²区は、登熟期間に無客土区より低下する傾向が認められた。これは、N4g/m²という少肥条件は、元来N供給力の乏しい客土区で生育低下を起こした結果と考えられた。一方、標準的なN施肥量であるN8g/m²および多肥条件のN12g/m²区では生育前半、特に幼形期付近での生育速度が大きく、客土区の乾物増加速度は無客土区の140~170%に達した。

以上から、客土が水稻の生育におよぼす影響を整理すると、客土によって水稻の有効茎数確保の時期が早まり、泥炭地水田に特徴的な生育不良パターンである遅れ穂の多発生が抑制された。また、より多N条件での乾物増加速度が高まった。



図III 2-5 無客土区に対する客土区の成熟期養分吸収量比 (客土全試験区, N4,8,12g/m²処理込み)



図III 2-6 処理間での成熟期N吸収量の比較 ()内は無客土区のN吸収量 (g/m²)

3-2 養分吸収

客土による土壌環境の変化が水稻の養分吸収に及ぼす影響について検討した。客土にともなう養分吸収全体のバランス変化を概観するために、客土区での成熟期養分吸収量を無客土区に対する比で図III 2-5に示した。

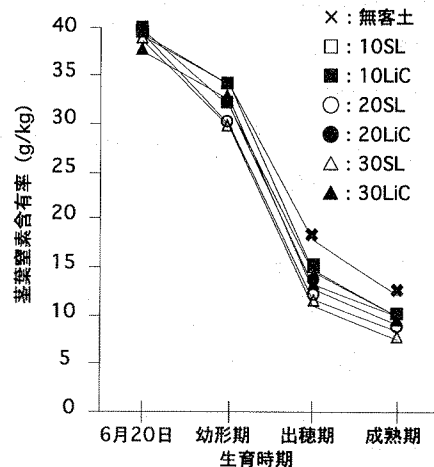
客土区の養分吸収量は無客土区と大きく異なった。客土区ではN, Mg, Caの吸収量が減少し, Si, Mnの吸収が増加した。中でもNとSiは吸収量比の違いが顕著であるだけでなく、水稻の栄養生理上極めて重要な要素であることから、これらに着目して解析を進めた。

1) N吸収の変化

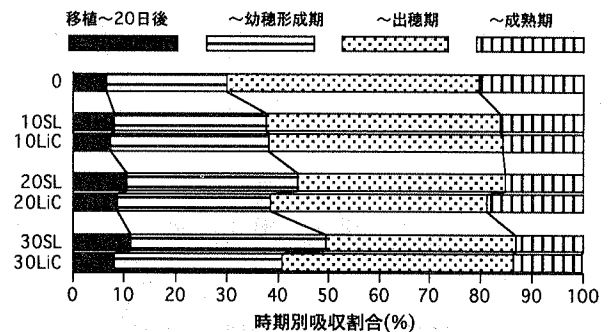
まず、水稻の生育、収量に最も大きな影響を及ぼすN吸収について、客土の影響を比較した。図III 2-6には成熟期茎葉のN吸収量 (g/m²) を同N施肥処理の無客土区に比較した指数で示した。

N吸収量は客土により大きく減少した。その傾向は客土量が多いほど、また、LIC客土よりSL客土で強かった。さらに、生育期間中における稲体の経時的窒素含有率を比較するため、図III 2-7に各生育時期での茎葉窒素含有率の推移を示した。幼形期までは客土区と無客土区の差は小さいが、それ以降での客土区窒素含有率の低下は大きく、出穂期および成熟期では無客土区に比較して2~4割程度も窒素含有率が低く推移した。

客土の有無による水稻のN吸収パターンをより詳細に比較するため、各生育期間に吸収したN量を全吸収量に対する割合で示した (図III 2-8)。客土区は無客土区に比較して栄養成長期間 (移植~幼形期) に吸収するNの割合が高まり、登熟期間 (出穂期~成熟期) の吸収割合が低下する事が明かとなった。これは、無客土区は生育後半まで土壌からのN放出が継続するのに対して、客土区は土壌中の有機物含量が極めて低いために、生育の前



図III 2-7 茎葉窒素含有率の推移



図III 2-8 時期別N吸収割合の処理間比較

半で施肥Nを吸収した後は土壌からのN放出は少なく、さらに客土20, 30cm区では下層からのN供給も客土層により遮断されるためと考えられ、このような土壌Nの放出パターンを反映しているものと判断された。

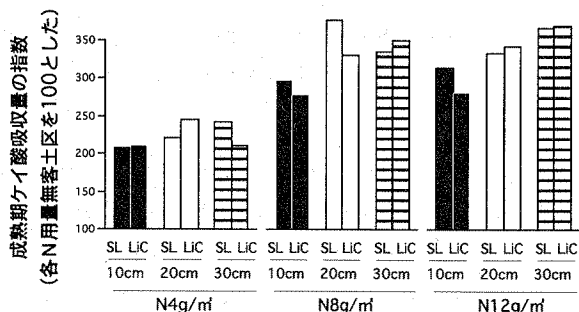
水稻によるN吸収は、土壌のN供給力、養分保持力、下層泥炭までの距離などの影響を反映し、客土区では、生育期間中の茎葉窒素含有率の大幅な減少とN吸収パターンの生育初期への前倒し傾向が認められた。

2) ケイ酸吸収の変化

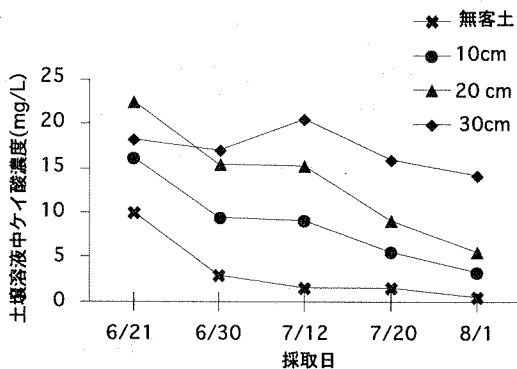
表III 2-1は各年次毎のケイ酸含有率および吸収量を示し、図III 2-9には無客土区に対する各客土試験区の4ヶ年を平均した成熟期の茎葉ケイ酸吸収量を比で示した。

表Ⅲ2-1 試験期間のケイ酸含有率および吸収量の比較

客土深 (cm)	土性	(g/kg, g/m ²)									
		1987年		1988年		1989年		1990年			
		含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量
0	-	56	38	38	30	38	29	54	42	49	38
10	SL	141	113	124	108	117	85	106	77	102	83
	LiC	136	102	110	95	107	80	102	78	95	75
20	SL	168	121	144	119	139	98	138	88	127	98
	LiC	155	120	127	107	138	100	108	92	121	99
30	SL	183	120	155	120	161	117	157	95	137	96
	LiC	172	125	139	108	152	117	130	100	128	94



図Ⅲ2-9 処理間での成熟期ケイ酸吸収量の比較



図Ⅲ2-10 生育期間中の土壌溶液中ケイ酸濃度の推移

客土区のケイ酸含有率および吸収量はいずれも無客土区の2~3.5倍の値を示し、その程度は客土量が多いほど多かった。また、客土材間の比較をすると、ケイ酸溶出量の多かったSL客土材の方がLiC客土材よりケイ酸含有率、吸収量とも高く、土壌分析値に対応する結果となった。

そこで、水稻生育期間における水田土壌からのケイ酸溶出量を解明するために、湛水期間中における土壌溶液のケイ酸濃度を経時的に測定し図Ⅲ2-10示した。

土壌溶液中のケイ酸濃度は常に客土区が無客土区よりも高く推移した。これは、実際的水稻栽培圃場条件下においても、土壌分析値に対応したケイ酸溶出が継続していることを示唆するものと考えられた。

以上のように、客土材からは圃場条件下においても豊富なケイ酸溶出が認められ、それは水稻のケイ酸吸収に極めて密接に反映されていた。このことから、客土のケ

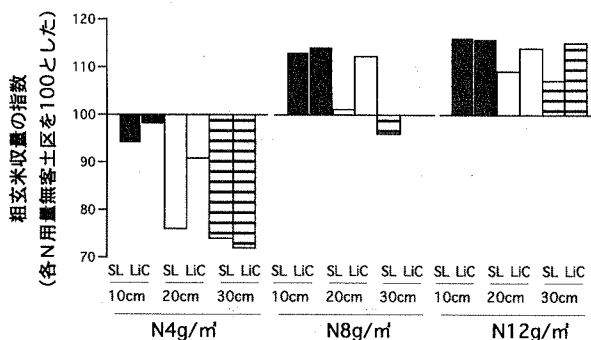
イ酸補給効果は非常に大きいことが裏付けられた。このように、客土によってケイ酸供給力が飛躍的に増大する要因については、本章の第4節であらためて示し、論議する。

3-3 玄米収量および品質に及ぼす影響

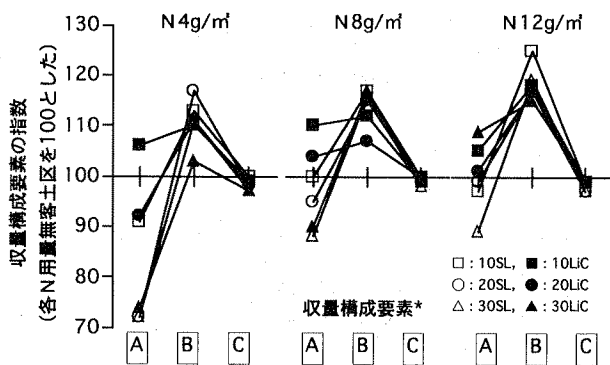
客土による増収に関する研究はこれまで数多くある(北海道農業試験場, 1969)。現在、泥炭地産米の収量水準が他の土壌型に比較して劣らない要因には、これまで繰り返し行われてきた客土事業が大きく貢献している。本節では、これまで検討されていない30cmまでの大量客土が水稻の収量に及ぼす影響について、収量構成要素の面から解析した。また、玄米の外見品質に及ぼす影響についても検討した。

1) 玄米収量および収量構成要素

図Ⅲ2-11は各区の粗玄米収量を、無客土区の同一N施肥区を100とした指数で示した。粗玄米収量を見ると、N4g/m²処理は無客土区に比較して客土区で大きく減少しているが、標準的なN施肥量であるN8g/m²および12g/m²処理では逆に大きな増収効果が認められた。増収の程度は客土量10cm>20cm>30cmの順となり、また、SL客土よりLiC客土で高い傾向にあった。客土によ



図Ⅲ2-11 処理間での粗玄米収量の比較



図Ⅲ2-12 処理間での収量構成要素の比較

*収量構成要素: A: 総粗穀, B: 登熟歩合, C: 千粒重

る増収効果は他の既往成果と同様であるが、本研究では、20cmおよび30cmという大量の客土量でも、また、SL土性の客土材によっても増収効果が得られることが示された。

次に、この増収要因を明らかにするために、収量構成要素の解析をおこなった。図Ⅲ2-12は、籾数/m²、登熟歩合および千粒重を同一施肥量の無客土区の値に対する指数で示した。

千粒重には客土処理による差が認められなかった。籾数/m²はN用量により傾向が異なった。N4g/m²処理では10cm・LiC区以外は客土区で籾数の減少が認められたが、N8g/m²、12g/m²処理では無客土区と同程度の籾数であった。登熟歩合は、いずれのN用量処理でも全ての客土区で向上していた。この傾向はN用量が高まるとともにまた、LiC客土よりSL客土でより顕著であった。登

熟歩合に最も大きな影響を与えるのは籾数/m²であることから、個々の試験区での籾数(×100粒/m²)と登熟歩合(%)をプロットしたのが図Ⅲ2-13である。

籾数の増加にともない登熟歩合が減少する傾向は、いずれの区でも同様であったが、無客土区と客土区は両者の関係に顕著な差が認められた。すなわち、客土区では無客土区に比較して同一籾数レベルでの登熟歩合が明らかに高く、当該地域で標準的な籾数/m²とされる35,000粒/m²では、客土により約10%登熟歩合が高まるということが明らかとなった。

以上から、各試験区での収量変動を総合的に解析すると、N4g/m²処理での客土区の減収要因は、籾数が低下したことによる影響が最も大きく、N8,12g/m²での客土区での増収に関しては、同一籾数レベルでの登熟歩合が顕著に高かったことによるものと判断された。

次に、客土による登熟歩合の向上要因についてさらに詳細な検討をおこなった。登熟歩合を決定する要素は、不稔歩合(不受精籾数/籾数×100%)と发育停止籾歩合(受精後不登熟籾数/籾数×100%)である。図Ⅲ2-14は客土の有無による比較をこれらの要因毎に示した。

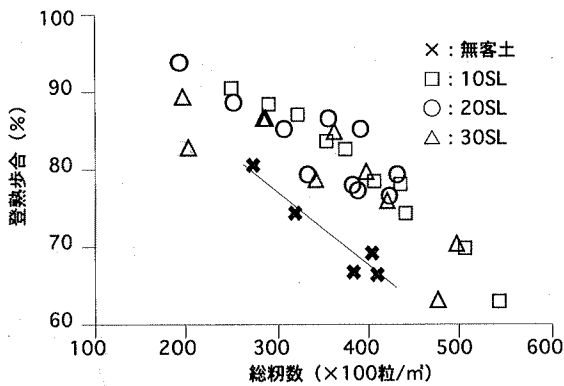
まず不稔歩合は、籾数が増加するとともに若干上昇する傾向が認められたが、客土区と無客土区に明瞭な差は認められなかった。すなわち、籾の受精率に関しては、客土による影響はないと判断された。

次に、发育停止籾歩合について検討した。发育停止籾歩合は、受精後登熟期間中に发育を停止し、完全登熟に至らない籾の割合を示したもので、一般に過剰な籾数や登熟期間中の天候不良などにより多く発生する。

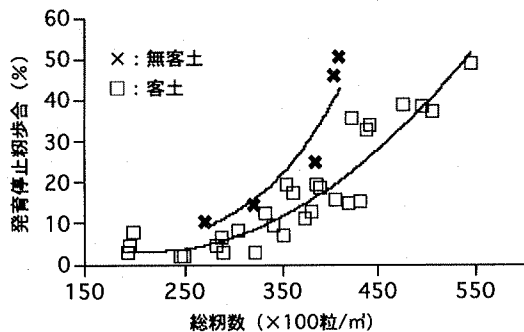
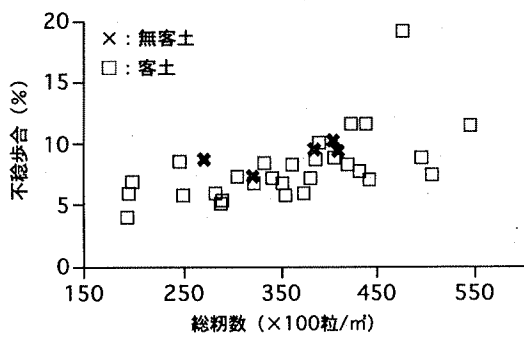
发育停止籾歩合は籾数の増加に比例して上昇し、さらに、客土区と無客土区で明瞭な差が認められた。すなわち、客土区の发育停止籾歩合は、同レベルの籾数であれば常に無客土区より低い値を示し、发育停止籾歩合が50%の点で比較すると、無客土区は38,000粒程度であるのに対して、客土区は約50,000粒であった。この違いは、同一気象条件で登熟可能な籾数が、客土により大幅に増加することを示しており、水稻の登熟能力自体が向上したことを示すものである。

2) 玄米品質

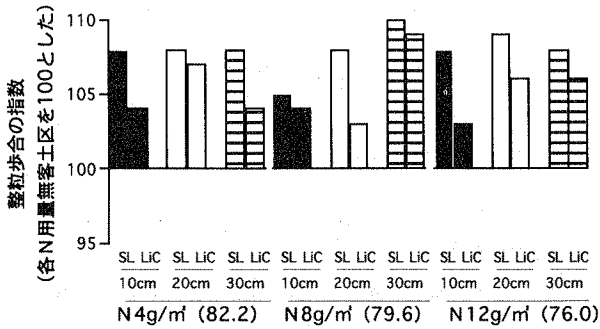
客土が玄米の外見品質に与える影響を検討した。図Ⅲ2-15, 16には各試験区の整粒歩合および未熟粒歩合(%)を無客土区の同一施肥処理区に対する比で示し



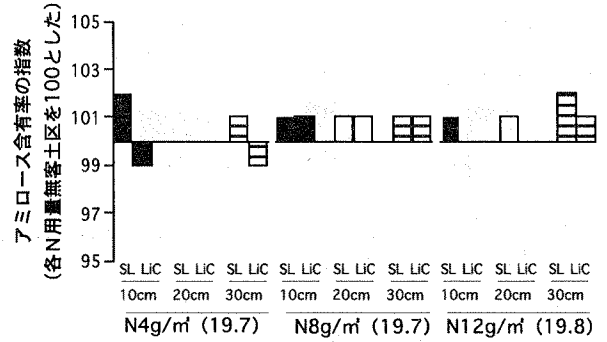
図Ⅲ2-13 総籾数と登熟歩合の関係



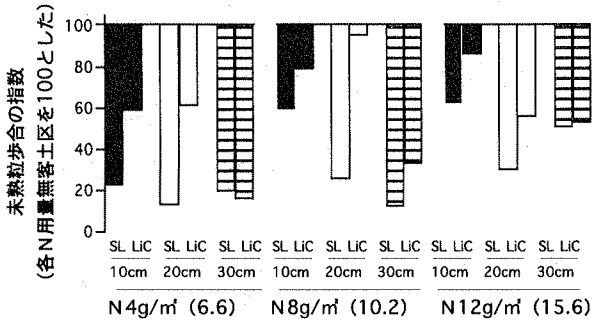
図Ⅲ2-14 総籾数と不稔歩合および发育停止籾歩合の関係



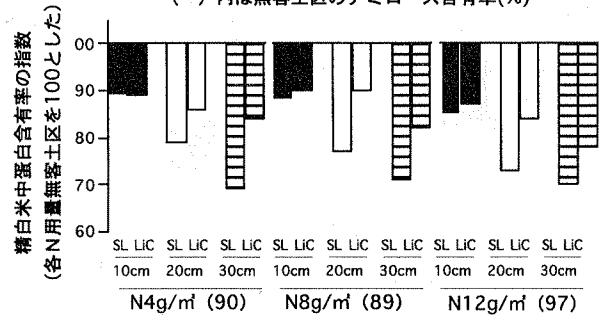
図III-2-15 処理間での整粒歩合の比較
()内は無客土区の整粒歩合(%)



図III-2-17 処理間でのアミロース含有率の比較
()内は無客土区のアミロース含有率(%)



図III-2-16 処理間での未熟粒歩合の比較
()内は無客土区の未熟粒歩合(%)



図III-2-18 処理間での精白米中蛋白含有率の比較
()内は無客土区の蛋白含有率(mg/g)

た。いずれの客土区でも整粒歩合は高まり、未熟粒歩合が大きく低下した。客土量による差は明確ではないが、LiC客土に比較してSL客土での玄米品質の向上効果がより大きかった。

このように、客土により玄米品質が向上した要因としては、前節で明らかにしたような、客土による遅れ穂の減少(→未熟粒の減少)と乾物生産力の増加による粒の充実度向上(→整粒歩合の増加)が影響しているものと考えられる。

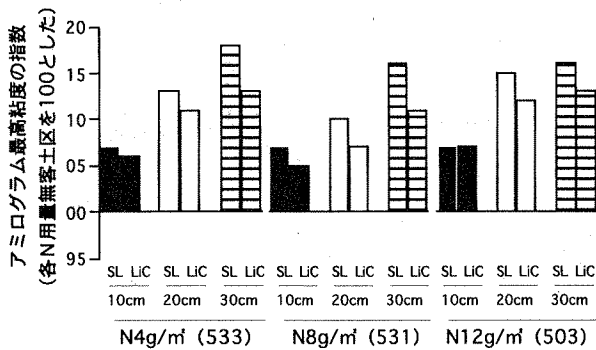
3-4 産米の食味に及ぼす影響

稲津は12cmまでの埴質土壌の客土試験をおこない、客土量に応じて泥炭地産米の食味特性値が向上する事を

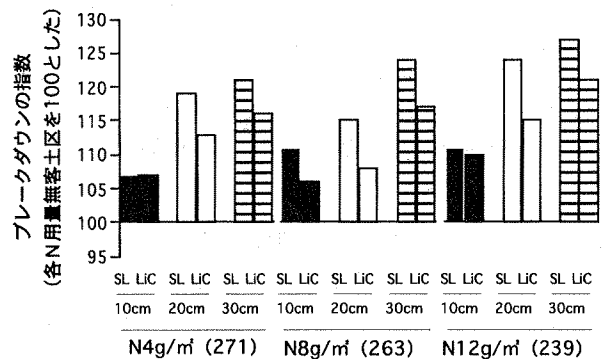
明らかにした。その主要因としては蛋白質含量の低下をあげており、食味向上の面からは12cm以上の多量客土が有効であろうと述べている(稲津ら, 1978)。本章ではこれをさらに発展させ30cmまでの客土と食味特性の関係について検討した。また、客土材の土性についても、砂質土壌も加えた設計とした。

1) アミロースおよび蛋白含有率

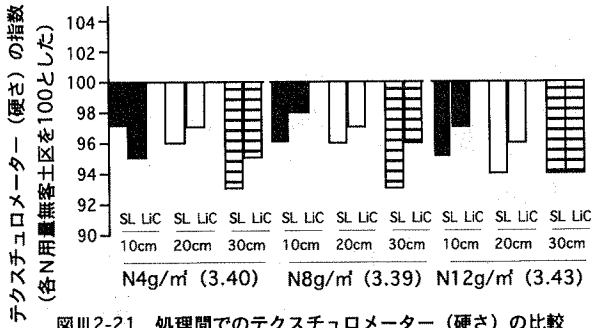
米の食味に影響を及ぼす2大成分である、アミロース含有率および蛋白含有率について検討した。図III-2-17には各試験区でのアミロース含有率を無客土区に対する比で示した。アミロース含有率は客土の有無およびN用量の違いによっても明確な差は認められなかった。稲津



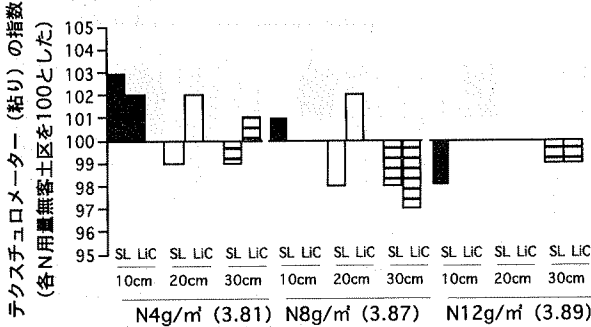
図III-2-19 処理間でのアミログラム最高粘度の比較
()内は無客土区のアミログラム最高粘度(B.U.)



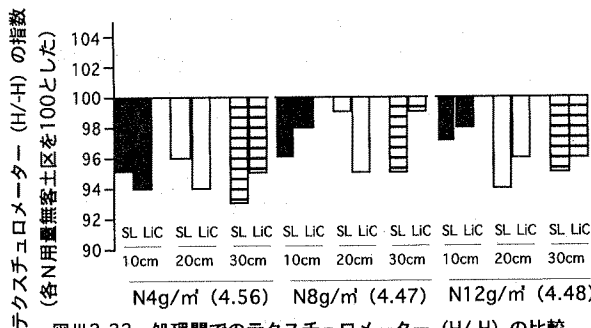
図III-2-20 処理間でのブレイクダウンの比較
()内は無客土区ブレイクダウン最高粘度(B.U.)



図Ⅲ2-21 処理間でのテクスチュロメーター（硬さ）の比較
()内は無客土区のテクスチュロメーター（硬さ）(T.U.)



図Ⅲ2-22 処理間でのテクスチュロメーター（粘り）の比較
()内は無客土区のテクスチュロメーター（粘り）(T.U.)



図Ⅲ2-23 処理間でのテクスチュロメーター（H/-H）の比較
()内は無客土区のテクスチュロメーター（H/-H）(T.U.)

(1979)によると、アミロース含有率に最も大きな影響を与える変動要因は、出穂から成熟までの登熟温度であり、土壌や施肥量による影響は小さいことを明らかにしている。本試験でも出穂期の変動による登熟温度の変動は小さく、客土はアミロース含有率には影響を及ぼさなかったものと考えられる。

次に、蛋白含有率の比較を図Ⅲ2-18に示した。客土区の蛋白含有率は無客土区に比較して顕著に低下した。稲津(1988)の結果では12cmの埴質客土により約8%（無客土対比）の蛋白含有率低下が認められているが、本研究のLiC10cm客土でもほぼ同様の結果が得られた。さらに、これまで未検討であった、12cm以上の客土量の場合でも、30cmまでは客土量に応じて蛋白含有率が低下することが明らかとなった。また、SL客土材はLIC客土材より蛋白含有率の低下程度はさらに大き

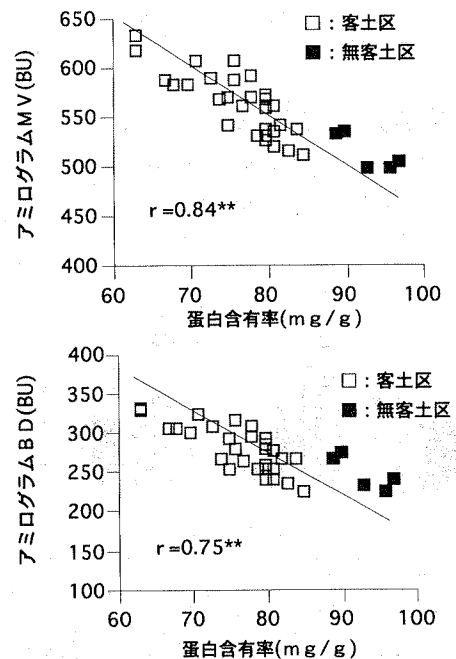
かった。

以上食味に関わる2大成分の測定から、客土による産米の食味向上効果は、アミロース含有率には関係せず、蛋白含有率の低下が主要因であることが明らかとなった。

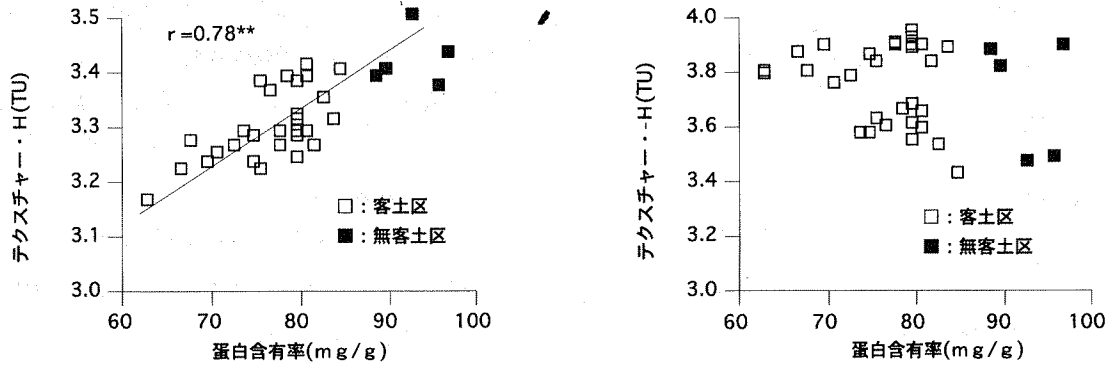
2) 熱糊化性およびテクスチャー

次に、米の食味に関わる特性値について検討を進めた。図Ⅲ2-19, 20には米の熱糊化性を示すアミログラム最高粘度とブレイクダウン（以下MVおよびBD）の比較を示した。両特性値とも客土により顕著に高まり、産米の熱糊化性が客土により大幅に向上することが明らかとなった。また、アミログラム特性値の向上効果は客土量とともに上昇し、さらにLIC客土材よりSL客土材でその効果が大きい傾向を示した。

次に、炊飯米のテクスチャーを示すテクスチュロメーター特性値を測定し、客土の影響を検証した。炊飯米の硬さを示すH値は、無客土区に比較して客土区で一般的に低下し、炊飯米がやわらかくなることが示された(図Ⅲ2-21)。また、炊飯米の付着性(粘り)を示す-H値について検討すると、客土区と無客土区での差はわずかで、明確な違いは認められなかった(図Ⅲ2-22)。炊飯米テクスチャーの総合的な指標である(H/-H)は、主に客土区でのH値の低下を反映して無客土区に比較して2~6%低下し、総合的なテクスチャーの向上が示唆され



図Ⅲ2-24 蛋白含有率とアミログラム特性値の関係



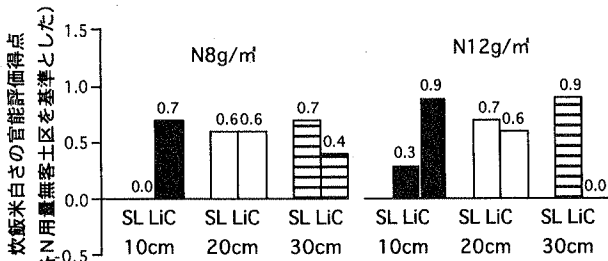
図III-2-25 蛋白含有率とテクスチュロメーター特性値の関係

た。また、他の特性値ほど顕著ではないが、客土量の増加とともに向上程度は大きくなり、LiCに比較してSL客土材の方が向上程度が大きい傾向が認められた(図III-2-23)。

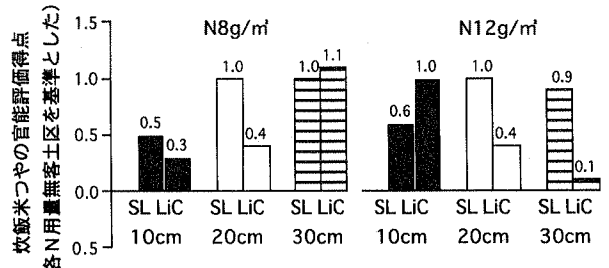
熱糊化性および炊飯米のテクスチャーが客土により向上した要因として、両特性値と蛋白含有率との関係を検討した。図III-2-24には、蛋白含有率とMVおよびBDの関係を示したが、両者には密接な負の相関関係が認められた。また、客土区と無客土区もほぼ同様の直線上に

あることから、熱糊化性の向上は蛋白含有率の低下が直接の要因であることが示された。これまで、米粉のアミログラムは主にアミロース含有率と密接な関係があることが明らかにされてきたが、アミロース含有率がほぼ同程度の場合には、蛋白含有率にも大きな影響を受けることが明らかとなった。

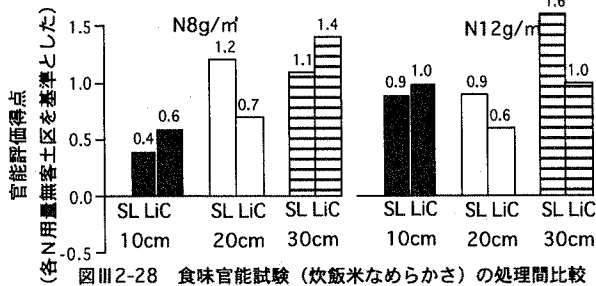
図III-2-25は蛋白含有率とテクスチャーの関係を示した。テクスチュロメーターで測定される硬さ(H)は蛋白含有率と密接な正の相関関係が認められたが、粘り



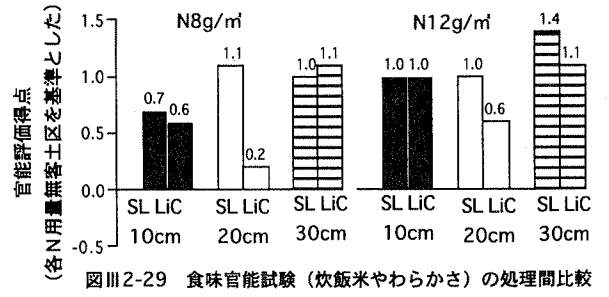
図III-2-26 食味官能試験(炊飯米白さ)の処理間比較



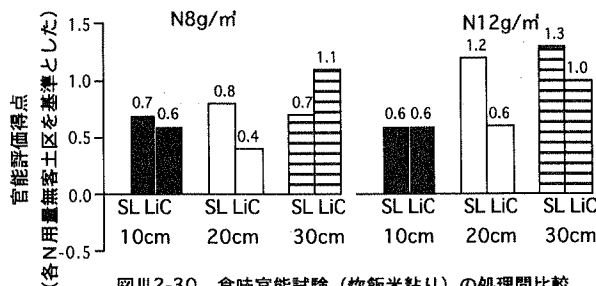
図III-2-27 食味官能試験(炊飯米つや)の処理間比較



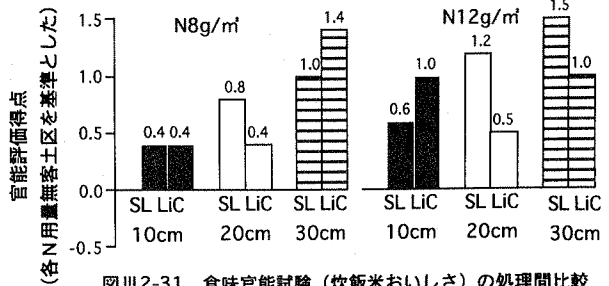
図III-2-28 食味官能試験(炊飯米なめらかさ)の処理間比較



図III-2-29 食味官能試験(炊飯米やわらかさ)の処理間比較



図III-2-30 食味官能試験(炊飯米粘り)の処理間比較



図III-2-31 食味官能試験(炊飯米おいしさ)の処理間比較

(-H)とは有意な関係はみられなかった。このことから、客土により炊飯米の硬さが低下した要因は蛋白含有率の低下に起因すると考えられたが、粘りに対しては明確な関係が認められなかった。

3) 食味官能試験

1990年産、N8および12g/m²処理区産米を用い、パネルによる食味官能試験を実施した。炊飯米外観(白さおよびつや)の評価値を図Ⅲ2-26, 27に示した。白さおよびつやとも客土区産米で評価が高まっており、客土により炊飯米の外観が向上することが明らかとなった。次に、炊飯米の口当たりに関する項目について比較した(図Ⅲ2-28~30)結果、客土により炊飯米はなめらかさ、やわらかさ、粘りとも評価値が高まり、口当たりが向上していた。総合的なおいしさに関しても他のデータと同様に客土区で大きく向上した(図Ⅲ2-31)。向上程度は客土量が多いほど高かった。一般的に品種選抜のための官能試験では、評価値0.5点の差を1ランクとしているが、それに当てはめると客土量10cm毎にほぼ1ランク

ずつ食味が向上する結果となった。稲津ら(1978)の研究では、客土により食味特性値(分析値)が向上することまで報告されていたが、本研究は官能試験による食味向上が初めて認められ、あらためて客土による米の食味向上効果が確認された。

客土が産米の食味に及ぼす影響をまとめると、客土により影響を受ける食味関連成分は主に蛋白含有率であり、大幅な低下が認められた。また、客土はアミロース含有率に影響を及ぼさなかった。この蛋白含有率の低下はアミログラム特性値(MVおよびBD)に影響し熱糊化性の向上をもたらした。同時に蛋白含有率の低下は、テクスチュログラムにより測定される硬さ(H)に影響し、炊飯米のテクスチャーを向上させる要因となった。これら特性値の向上により、官能試験による食味評価値は客土により著しく向上し、総合評価値は客土10cmで約1ランク、30cmでは3ランクの向上が認められた。また、客土材の種類ではLiC客土材よりSL客土材による効果がより大きかった。

第3節 客土による産米の食味向上要因の総合解析

1 背景と目的

前節までの水稻栽培試験から、客土により土壌環境、水稻生育、養分吸収および収量構成要素が大きく変化し、最終的に産米の食味が大きく向上する結果が得られた。本節では、これまで述べてきたこれら客土の影響がそれぞれどのように関連し合い、食味向上に結びついたかを総合的に解析した。

2 研究方法

生育、収量、養分吸収および食味特性に関するデータは第Ⅲ章・第2節より得た。群落構造に関する調査分析は、1988年出穂期に行った。無客土区および30cm・S L区において、層別刈り取りを実施し、葉位別地上高、葉面積、葉身重を測定した。また、各群落直上部に対する群落内の相対照度を、群落相対照度計により測定し、Monsi *et al.* (1953) による吸光係数を求めた。一連の調査は北条ら (1985) によった。葉身中へのケイ酸蓄積状況の観察は、出穂期に採取した葉身を熱フェノールで透明化し、光学顕微鏡により観察、写真撮影を行った。

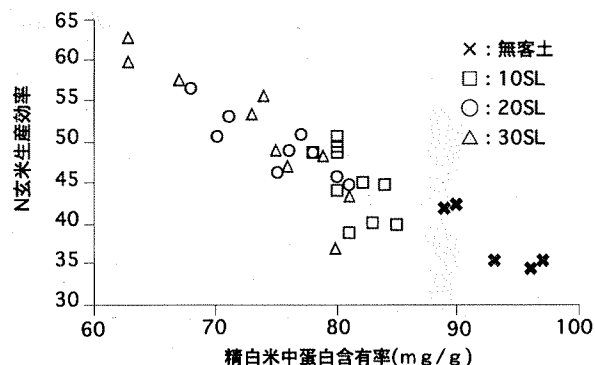
3 結果および考察

3-1 N玄米生産効率の向上要因

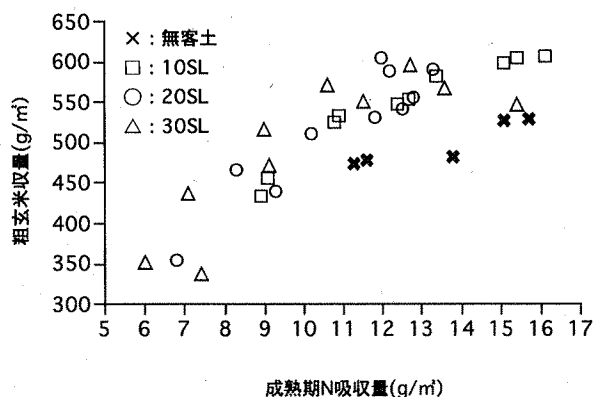
稲津ら (1986) は、さまざまな栽培環境による蛋白含有率の変動を統一的に説明する指標として、吸収Nの玄米生産効率(粗玄米収量/成熟期N吸収量)を用いた。すなわち、数多くの現地圃場調査から、蛋白含有率とN玄米生産効率には密接な関係があり、N玄米生産効率が低い圃場では蛋白含有率が低いことを明らかにした。

そこで、本試験のデータについても蛋白含有率とN玄米生産効率の関係を検討したところ、客土区では無客土区に比較してN玄米生産効率が向上しており、しかも客土の有無に関わらず、蛋白含有率とN玄米生産効率には密接な負の相関が認められた(図Ⅲ3-1)。このことから、本試験での客土による蛋白含有率の低下についても、N玄米生産効率の向上によりもたらされたことが明らかとなった。

次に、客土の有無によりN玄米生産効率に大きな差が生じた原因について、N吸収と玄米収量の関係を中心として詳細に検討することとした。まず、N吸収量と粗玄



図Ⅲ3-1 精白米中蛋白含有率とN玄米生産効率の関係



図Ⅲ3-2 成熟期N吸収量と粗玄米収量の関係

$$\begin{aligned} \text{N玄米生産効率} &= \text{粗玄米重} / \text{N吸収量} \\ &= (\text{総乾物生産量}) \times \text{HI} / (\text{N吸収量}) \\ &= (\text{総乾物生産量} / \text{N吸収量}) \times \text{HI} \end{aligned}$$

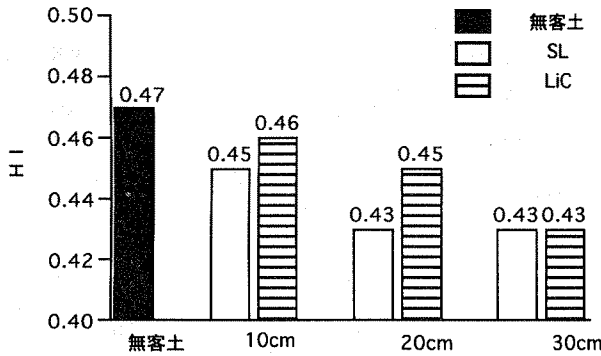
式Ⅲ3-1 N玄米生産効率の要素分解

米収量との関係を図Ⅲ3-2に示した。

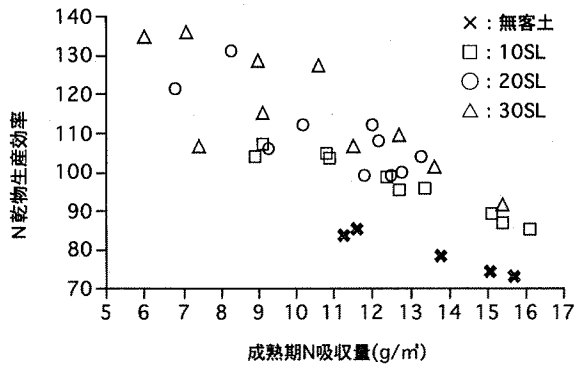
N吸収量と粗玄米収量との関係をみると、客土の有無に関わらずN吸収量の増加とともに玄米収量が増加する一般的な傾向が認められた。しかし、両者の関係は客土の有無により異なり、客土区では無客土区に比較して同一のN吸収量でより多くの玄米収量が得られることが明らかとなった。

そこで、さらにこれらの関係について解析を進めるために、N玄米生産効率を求める式を分解した(式Ⅲ3-1)。粗玄米収量は総乾物生産量と収穫指数(Harbest Index, 以下HI)の積で表され、さらにこの式はN乾物生産効率とHIの2つの要素に分解できることから、これらの要素に分けて客土の有無による比較をおこなった。

まず、HIについて比較すると、図Ⅲ3-3に示したように客土区では無客土区よりむしろ低くなる傾向が認められ、玄米生産効率向上の原因とはなっていなかった。一方の乾物生産効率について比較するために、N吸収量と



図III-3-3 HIの処理間比較



図III-3-4 成熟期N吸収量とN乾物生産効率の関係

N乾物生産効率の関係を客土の有無に分けてプロットした(図III-3-4)。

N乾物生産効率がN吸収量の増加とともに減少する傾向は客土の有無に関わらず同様であるが、両者の回帰直線は大きく異なった。すなわち、客土区では同一N吸収量レベルで比較しても明らかにN乾物生産効率が高く推移し、12g/m²程度のN吸収量では約20もの差が認められた。

以上のことから、客土による蛋白含有率の低下は、N玄米生産効率の向上に起因するものであり、さらにその原因はHIの上昇によるものではなく、吸収N当たりの乾物生産量(=N乾物生産効率)が増加したことによるも

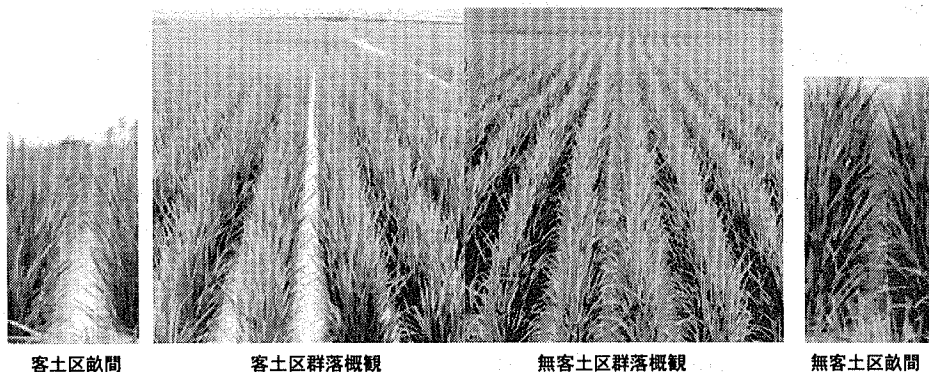
のであることが明らかとなった。

3-2 N乾物生産効率の向上要因

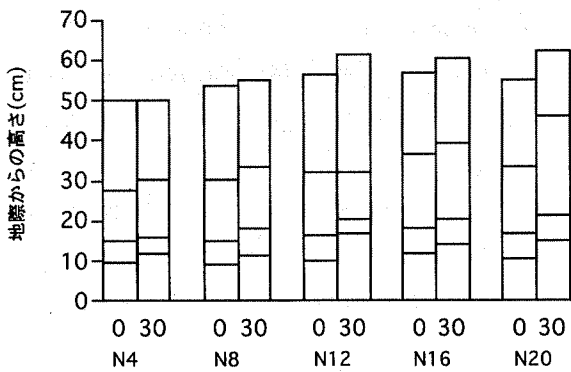
次にN乾物生産効率の向上要因の解析をおこなった。N乾物生産効率は、式III-3-1で示されるように乾物生産量とN吸収量の比である。そのためこの値を高めるためには、①分母である水稲によるN吸収の減少と、②分子である乾物生産力の増加という2つの要因が必要である。これまで述べてきたように、客土することにより、①、②両方の変化が同時に認められることが明らかとなった。そこで、①、②それぞれの要因について考察する。

前節で述べたように、客土区では同一施肥量の無客土区に比較して、成熟期でのN吸収量が大幅に減少した。これは客土材には有機物がほとんど含まれていないことと、客土量が多いため、耕起による下層泥炭の作土への混入がないことにより、客土区では作土層のN供給力が極めて低下した事を反映したものと考えられた。また、客土量の増加と共にN吸収量が減少したことから、客土により、下層土からのN供給が遮断された影響も大きいと考えられた。以上のように、N乾物生産効率の分母であるN吸収量が客土により減少した要因は、作土のN供給力の低下と、下層土からのN供給の遮断効果によるものと考えられた。

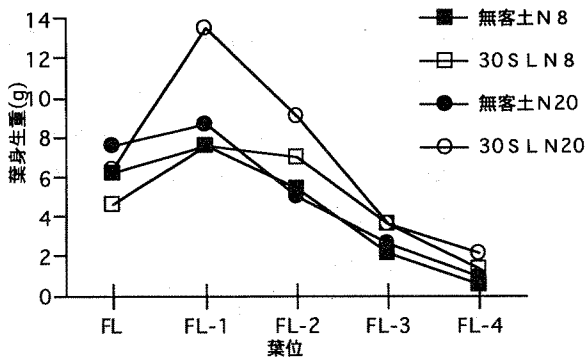
乾物生産効率の分子である成熟期の乾物重についても、前節で示したように客土により大幅に増加した。一般的に水稲の乾物重はN吸収と密接な関係があり、N吸収の増加に応じて乾物重が増加する。しかし、客土区ではN吸収が低下しているにも関わらず乾物重が増加しており、このことは生育期間中の乾物生産力すなわち光合成能力そのものが高まったことを示している。一般に圃場条件での光合成能力の変動要因としては、群落構造と



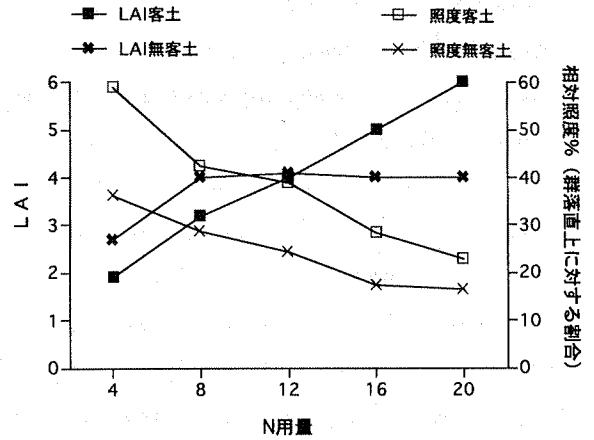
図III-3-5 客土の有無による水稲群落の比較



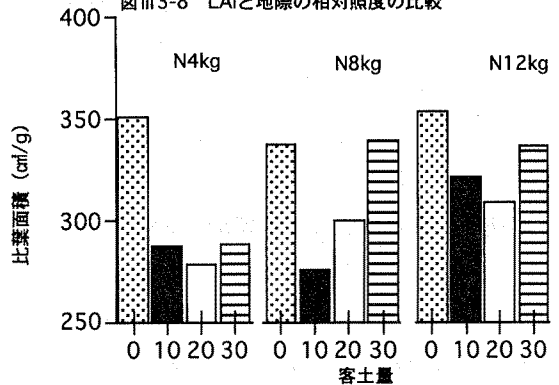
図III-3-6 葉位の空間配置の比較



図III-3-7 葉位別の葉身生重の比較



図III-3-8 LAIと地際の相対照度の比較



図III-3-9 客土量による比葉面積の比較

個葉の光合成能の2つの要因に分けられる，以下ではこれらについてそれぞれ解析をおこなった。

客土の有無による水稻群落構造を比較するために，生育盛期での畝間の状況を観察した。客土区では無客土区に比較して葉身が直立しており，畝間が明るい傾向が認められ，(図III-3-5) 群落内の光環境が異なっていることが推察された。そこで，客土による草型の変化と群落構造に関して若干の解析をおこなった。

客土による草型の変化について検討するために，無客土区と客土30cm・SL区について，葉位別の出葉高および葉身生重を測定し，各N用量毎に両区を比較して図III-3-6, 7に示した。客土区は各葉位の出葉位置は無客土区に比較して高い位置にあり，群落高全体として高い事が明らかとなった。また，葉身の大きさを比較すると，客土区は無客土区に比較して上位葉が小さく下位葉は大きかった。草型に関する客土区の特徴をまとめると，群落全体の草型が大きく，小さな上位葉と大きな下位葉で構成されていることがあきらかとなった。この条件はYosida (1981) によると，個体群光合成にとって理想的であるとされている。

次に，これら客土による草型の変化が群落内の光環境に実際どの程度の影響を及ぼしているかを調査するため，1998年出穂期における無客土区と客土30cm・SL区でN用量毎に，LAIおよび地際の相対照度を測定した(図III-3-8)。LAIは，客土区ではN用量とともに増加したが，無客土区ではN8~20区で差がなかった。地際の相対照度は同N用量区は常に客土区の方が高かった。特にN12, 16, 20区は客土区のLAIの方が大きいにも関わらず，無客土区の相対照度の方が低くなっており，草型の影響が群落内の光環境に大きな影響を及ぼしていた。

このような群落内の光環境の違いを総合的に評価するために，主に葉の傾斜角度(配置)に関する指標である吸光係数(Monsi et al., 1953)を求め，LAIとともに比較すると(表III-3-1)，客土区ではいずれのN用量でも無客土区より吸光係数が小さく，葉がより直立していた。

Yoshida (1981) によると，吸光係数が小さい群落ほど，一定の日射量を受け取るために高いLAIを必要とすることから，吸光係数が小さい直立群落の方がより多く

の光合成を行うことができるとしている。また、林ら (1962) は多数の水稻品種の吸光係数を調べ、これが小さい品種ほど同一生育時期の葉面積が大きく、出穂後の枯れあがり少なく乾物生産量が多いことを見だしている。これらの事から、客土区は葉が直立することにより、群落として光合成による乾物生産に有利な環境となっていたことが推察された。

次に、個葉の光合成能力の指標となる葉の厚さについて検討するため、各区での比葉面積 (cm^2/g) を測定し比較した。その結果、客土区の比葉面積は無客土区より小さいことから、葉面積当たりの重量が大きく葉厚が厚いことが明らかとなった (図Ⅲ3-9)。一般に厚い葉身の方が個葉の光合成能力が高いといわれていることから、客土により水稻個葉単位の光合成能力が高まったことが推察された。

3-3 乾物生産力の増加とケイ酸吸収の関係

乾物生産力とケイ酸吸収の関係について検討した。客土区と無客土区の葉身の内部構造を比較するために、それぞれの組織を透明化し顕微鏡により観察した (図Ⅲ3-11)。その結果、客土区は葉身機動細胞へのケイ酸の蓄積が、無客土区に比較して顕著に多いことが明確となった。第4節で明らかにしたように、客土区はケイ酸吸収量が飛躍的に増大したが、これらのケイ酸は図Ⅲ3-10のような形態で水稻組織に蓄積されていた。

水稻に対するケイ酸の生理的意義についてはこれまで多くの報告がある。奥田ら (1961a)、吉田 (1965) は、ケイ酸の欠乏により葉身は下垂し、ケイ酸の添加により葉身が直立する現象を観察している。この要因として吉田 (1965) は、葉身中へのケイ素の蓄積による物理的な葉身の硬さの増加とともに、葉身クチクラ層へのケイ酸の蓄積により蒸散が抑制されることをあげており、本研究圃場で観察された、客土区と無客土区での葉身の

下垂程度の違いについても、ケイ酸吸収の多少によるこれらの生理的要因に基づくことが推察された。

また、葉身へのケイ酸の蓄積と光合成について高橋ら (1966) は、ケイ酸吸収量の増加により、株当たりの CO_2 同化量が増加することを示している。さらに高橋 (1987) は、ケイ酸蓄積によるクチクラ蒸散の減少は、高日照条件での気孔開度を高く保つ上で有利であり、光合成に必要な二酸化炭素の取り込みが阻害されにくいとしている。

安藤ら (2000) はケイ酸新資材の施用により、基肥N利用率が無処理区に比べて4%高まることを示しており、その要因の一つとして処理区における根の酵素活性の高まりを指摘している。

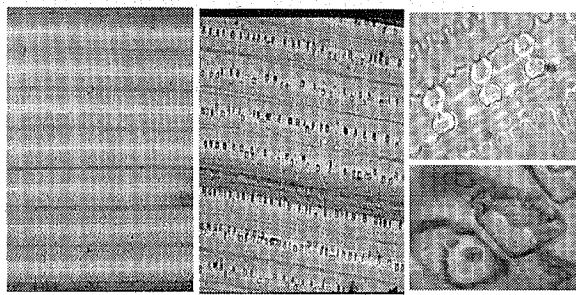
以上のことから、客土区で認められた群落構造の改善と個葉光合成能の増加による乾物生産力の向上は、客土によるケイ酸吸収の増加が密接に関わっているものと考えられた。また、この乾物生産力の向上と、N吸収の減少が同時に作用し、客土区でのN乾物生産効率の向上およびそれに伴う蛋白含有率の低下をもたらしたものと結論づけられた。

第4節 客土材中ケイ酸の特異性と供給源としての役割

1 背景と目的

前節までに、客土材に極めて多量の可給態ケイ酸が含まれていることを示し、それに伴い水稻のケイ酸吸収が大幅に増加することを示した。さらにこのことが、客土による光合成能力の増加に大きく貢献し、食味向上の重要な要因の一つとなっていること明らかになった。このため客土の持つケイ酸補給効果について積極的に検討を加えることには、重要な意義があるものと考えた。

水稻に対するケイ酸の栄養生理的意義については、吉田 (1965)、三井ら (1959)、奥田ら (1961a, b) により様々な面から検討されており、また北海道においても水野 (1987) により水稻の登熟に対するケイ酸の効果について検討されているが、現在でも水稻に対するケイ酸の生理的な必須性は証明されていない。しかし、無ケイ酸栽培では、極端に乾物重が減少することや、登熟歩合が低下し、収量が激減する結果が多く、そのような意



無客土

客土

図Ⅲ3-10 葉身へのケイ酸の集積

味から「農学的に必須の元素」(岡本, 1957)という考え方では一致している。これらの研究を背景にして、水田に対するケイ酸資材の施用基準が作成され(今泉ら, 1958), その施用が全国的に奨励されてきた。北海道においても土壌診断および土壌型による珪カル施用基準が設定されており(北海道農務部, 1984, 1986), 一般的にケイ酸含量が低い泥炭土ではケイ酸の施用効果が大きい事が認められている。

本節では、客土材に含まれるケイ酸の有効性を明らかにするために、量的、質的な特徴を、水田作土との比較から明らかにしようとした。また、客土材に可給態ケイ酸が多量に含まれる原因と、ケイ酸補給効果の持続性などについて詳細に検討した。

2 研究方法

2-1 ケイ酸の溶出実験

ケイ酸の溶出実験に用いた土壌は、水田作土5点、土取り場の異なる客土材4点(表Ⅲ4-1)である。水田作土のうちNo1~3については客土の来歴は無いが、No4および5は、客土来歴を持つため、客土材が混入している。また、客土材はいわゆる”山土”であり、北海道美唄市、北村の水田に実際に客土されている土壌である。

土壌からのケイ酸の抽出は以下に示す1~4の方法を用いておこなった。ケイ酸は、モリブデン青による比色法(京都大学農学部農芸化学教室, 1957)により定量した。

1. 可給態ケイ酸は、湛水保温静置法(日本土壤肥料学会, 1986)を採用した。すなわち、100mL容ポリビンに風乾細土10gをとり水60mLを加え、40℃の定温器中で1週間培養した後ろ液を定量に供した。2. pH別ケイ酸溶出実験は、pH4, 5, 6, 7にそれぞれ調製した酢

酸緩衝液を用い、40℃の温水浴中で5時間振とう培養後ろ過し、ケイ酸を定量した。なお、土液比は1:10に調整した。3. 抽出力別ケイ酸溶出実験は、各土壌にpH3.5酢酸ナトリウム緩衝液、pH4.0酢酸ナトリウム緩衝液、水をそれぞれ土液比1:6になるように加え、40℃で1週間培養し、濾液中のケイ酸およびアルミニウムを測定した。アルミニウムは、フレイムレス原子吸光光度計によって測定した。4. 連続培養実験は、フタつき遠沈管に風乾土と水を1:10の割合でとり、40℃で1週間湛水培養後、遠心分離により上澄液を採取しケイ酸の測定に供した。沈澱部分は35℃で1日乾燥させた後、再び水を加え同様の操作を繰り返した。

2-2 現地調査

1989年美唄市を対象に、客土後経過年数が0~22年までの異なる泥炭地水田30ヶ所を選定し、成熟期水稻のケイ酸吸収量と客土後の経過年数の関係について調査した。選定した水田は、同一の土取り場からの客土が行われており、客土量はほぼ同一(5cm)であった。

3 結果

3-1 ケイ酸の溶出実験

表Ⅲ4-1に客土材及び水田作土中の可給態ケイ酸含量を示した。水田作土に比較して客土材には多量の可給態ケイ酸が含まれていた。また、客土来歴のある水田作土(No4, 5)は他の水田作土に比較して高い値を示した。

客土材および水田作土からの、ケイ酸溶出条件の特徴を詳しく検討するために、抽出緩衝液のpHを変化させ、溶出するケイ酸量を測定した(表Ⅲ4-1)。いずれのpHでも客土材のケイ酸溶出量は水田作土に比較して多かったが、pHが低いほど溶出量が増加するという傾

表Ⅲ4-1 供試水田および客土材の性状とケイ酸抽出量

地目	No.	採取地点	土壌	土性	pH	可給態* ケイ酸	抽出pH*				pH7/ pH4
							4	5	6	7	
水田作土	1	岩見沢市上幌向	無客土泥炭土	HC	5.8	57	109	79	31	10	9.2
	2	"	グライ土	SIC	5.2	67	58	54	23	6	10.3
	3	北村豊里	"	CL	6.0	78	135	62	38	14	10.4
	4	北村大願	客土泥炭土	CL	5.7	121	184	92	45	17	9.2
	5	新篠津村	"	LIC	5.1	101	67	42	35	12	17.9
	平均				5.6	85	111	66	34	12	11.4
客土材	6	美唄市峰延	洪積土	SL	5.1	334	205	201	163	142	69.3
	7	"	"	LIC	5.4	232	224	198	120	99	44.2
	8	"	"	LIC	5.9	270	267	232	158	129	48.3
	9	当別町ビト工	"	CL	5.3	170	148	130	65	44	29.7
	平均				5.4	252	211	190	127	104	47.9

*ケイ酸抽出量
(mg/kg)

表Ⅲ4-2 各種抽出液とケイ酸溶出量の関係

地目	No*	ケイ酸抽出量(mg/kg)			抽出割合**	
		水	酢酸塩	酢酸塩	水	酢酸塩
水田作土	1	57	186	1055	5.4	17.6
	2	67	139	974	6.9	14.3
	3	78	277	1057	7.4	26.2
	4	121	296	1463	8.3	20.2
	5	101	176	1258	8.0	14.0
	平均	85	215	1161	7.2	18.5
客土材	6	334	515	2275	14.7	22.6
	7	232	396	1739	13.3	22.8
	8	270	523	1727	15.6	30.3
	9	170	318	1344	12.6	23.7
	平均	252	438	1771	14.1	24.8

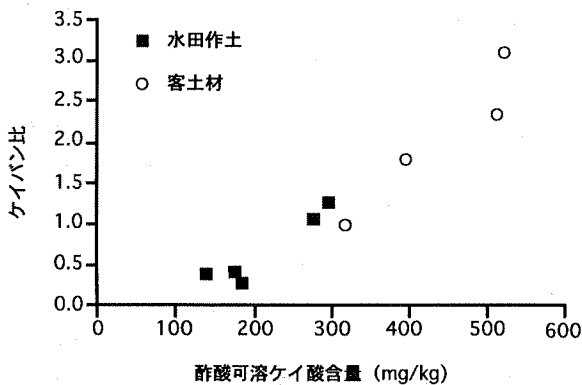
*土壌Noは表Ⅲ4-1と共通

**酢酸抽出量に対する割合(%)

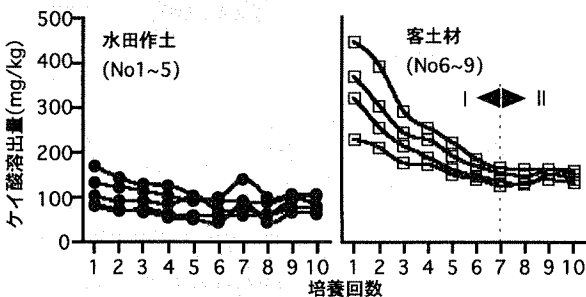
向は水田作土、客土材とも共通であった。しかし、水田作土と客土材のpHの変化に対するケイ酸溶出量を比較すると明らかな違いが認められた。すなわち、水田作土ではpHが中性になるに従い急激に溶出量は減少し、pH7での溶出量はpH4での溶出量の1~2割程度であった。一方、客土材ではその減少がゆるやかで、pH7でも3~7割もの溶出量が認められた。

このように、客土材からのケイ酸溶出は、水田作土と比較して量が多いのみでなく、pHの変化に対する溶出パターンも異なることが認められた。したがって、両者の可溶性ケイ酸はその溶解性に違いがあると考えられたため、抽出力の異なる溶媒を用いて溶出するケイ酸を測定し、その結果を表Ⅲ4-2に示した。

pH3.5酢酸塩可溶ケイ酸は、非晶質画分のケイ酸と考えられ、通常の水田状態で可溶化し得るケイ酸の潜在量を示すものと仮定した。また、酢酸塩および水可溶のケイ酸はより易溶性の画分であり、酢酸塩可溶画分に含まれると考えた。いずれの画分でもケイ酸溶出量は水田作土より客土材の方が多かった。しかも、酢酸塩可溶画分に対する酢酸塩および水可溶画分の比率で比較すると客土材の方が高いことから、客土材中のケイ酸は水田作土中のケイ酸に比較して量が多いだけでなく、より易溶性の画分の比率が高いことが明らかとなり、ケイ酸給源



図Ⅲ4-1 供試土壤の酢酸可溶ケイ酸含量とケイバン比の関係



図Ⅲ4-2 連続培養によるケイ酸溶出量の推移

表Ⅲ4-3 土取り場での可給態成分の移動集積状況 (mg/kg)

土取り場層位	深さ (cm)	備考	交換性塩基			可給態ケイ酸
			CaO	MgO	K2O	
ピトエ-1	0-20	地表	1350	220	170	177
	-2 20-100		2200	1120	70	362
	-3 100+		3160	1200	60	467
光珠内1-1	0-25	地表	3160	1630	90	219
	-2 25-70		2480	1450	70	283
	-3 70-120	鉄結核有	3160	1890	90	357
	-4 120-170	"	3290	2000	100	593
	-5 170+	"	2420	1400	70	454
光珠内2-1	0-20	地表	270	150	70	88
	-2 20-50		1280	970	120	179
	-3 50-80		1740	1140	130	370
	-4 80-110		2530	1540	170	334
	-5 110-140	鉄結核有	3800	2290	160	386
	-6 140+	"	2080	1160	150	441

物質の存在形態に違いがある事が予想されたため、次にこの点に関して比較検討した。

今泉ら (1958) は、土壤からのケイ酸の溶出は、アルミナの溶解と密接に関係していることから、可給態ケイ酸はおもにアルミナと結合しているものと推定している。そこで、供試した土壤について酢酸緩衝液で溶出されるケイ酸とアルミナの関係を検討し図Ⅲ4-1に示した。酢酸緩衝液可溶ケイ酸量とケイバン比 (SiO₂/Al₂O₃)には密接な正の相関が認められ、ケイ酸溶出量の多い試料は、ケイバン比が高いことが認められた。また、客土材と水田作土の比較では、客土材のケイバン比は高く、ケイ酸の存在形態は水田土壤と異なっていることが推定された。

次に、客土材からのケイ酸供給の持続性を検討するために、湛水培養と風乾を繰り返す、溶出するケイ酸量の推移を調べた。図Ⅲ4-2に示したように、水田土壤は培養の繰り返しかかわらずほぼ一定のレベルで推移した。一方、客土材では培養を繰り返す毎にケイ酸溶出量は減少し (図中 I) その後一定のレベルで推移 (図中 II) し、客土材では初期の高い溶出がそのまま持続するものではないことが明らかとなった。

次に、供試した客土材中にこのような易溶性ケイ酸含量が高い原因を知るために、表Ⅲ4-3に示す岩見沢近辺3ヶ所の土取り場で層位ごとに試料を採取し、pH、交換性塩基および可給態ケイ酸の土層内分布を調査した。土取り場はいずれも、洪積台地の切り崩し断面であり、客土材はこれらの丘陵を構成しているいわゆる山土である。いずれの土取り場でも地表部には有機物の集積が認められるが、下層は母材が異なる河川堆積物の集積層であり、有機物はほとんど認められない。また、下層には鉄の結核も認められ、層位集積後長期間にわたって物質

の移動集積が進んでいる様子うかがえた。

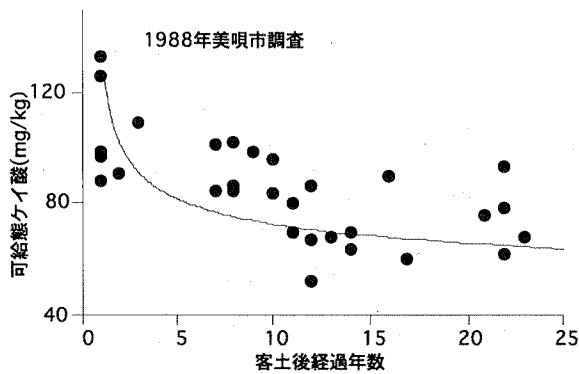
可給態ケイ酸含量の分布を見ると、上層部の値が低く、下層ほど高い傾向を示した。また、カルシウムおよびマグネシウムも下層に一部集積層が認められることから、土層内で溶脱された塩基およびケイ酸が下層に移動したと推定され、これが客土材中に存在する豊富な易溶性のケイ酸給源となっているものと判断された。

3-2 ケイ酸補給効果の持続性

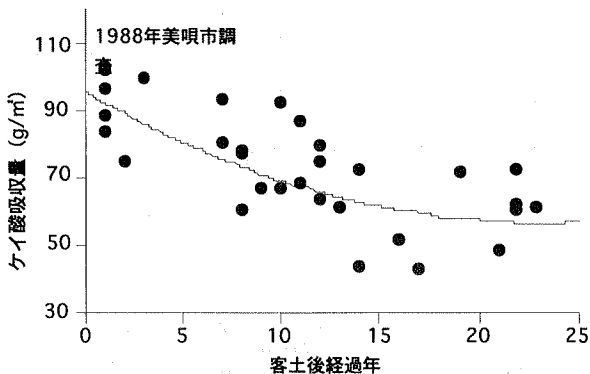
図Ⅲ4-2で示したように客土材からのケイ酸溶出は湛水培養の繰り返しにより徐々に減少する事が明らかになった。このことは、客土材からのケイ酸供給は有限で、経年変化によりその効果が薄れていくことを示唆している。そこで実際の水稻栽培圃場条件における、客土後の年数経過とケイ酸吸の関係について検討を加えた。

表Ⅲ4-4には水稻栽培試験における、試験期間4ヶ年間のケイ酸吸収量の推移を示した。圃場試験4ヶ年間のデータからは、客土後の年数経過とともに、ケイ酸吸収量は漸減する傾向が認められたが、10a当たりのケイ酸吸収量は無客土水田に比較してはるかに高いレベルにあり、ケイ酸補給の持続性を検討するためには、さらに長期的な検討が必要であった。

そこで現地圃場において、客土後の経過年数が0~22



図Ⅲ4-3 客土後経過年数と可給態ケイ酸含量の関係



図Ⅲ4-4 客土後経過年数と水稻によるケイ酸吸収量の関係

年まで異なる水田を調査し、水稻栽培年数とケイ酸供給力の関係について検討した。調査地域は、長年同一の土取り場から採取した客土材を客土してきた地域であり、客土量もほぼ5cmである。調査地点における客土後経過年数と可給態ケイ酸含量の関係を図Ⅲ4-3、水稻のケイ酸吸収量との関係を図Ⅲ4-4に示した。

土壤中可給態ケイ酸含量、水稻ケイ酸吸収量とも連続培養実験での推移と類似した経過を示した。すなわち、客土施工後から経年的に漸減し、その後10~15年程度で平衡に達した。

客土前の土壤条件や気象、栽培履歴が異なるため、この調査のみから客土のケイ酸補給効果の持続年数を一律に確定することは難しいが、5cm程度の客土で10~15年程度は効果が持続する事を明らかにした。

4 考察

4-1 客土材に含まれる易溶性ケイ酸の量的・質的な特徴

表Ⅲ4-1に示した通り、供試客土材には水田作土と比較して多量の可給態ケイ酸 (平均252mg/kg)が含まれていた。1987年に北村、1989年に美唄市で調査した泥炭地水田50点の湛水保温静置法による可給態ケイ酸含量は49~212mg/kgに分布し、平均が106mg/kgであることから、客土材がいかに可給態ケイ酸に富んでいるかを知ることができる。しかも、湛水培養という比較的穏やかな抽出条件にもかかわらずこのように多量のケイ酸が溶出することから、客土材に含まれる易溶性のケイ酸は、その量が多いだけでなく、溶解性あるいは結合形態などが水田土壤に含まれるケイ酸と異なっていると考えられた。

今泉ら (1958) によると、土壤からのケイ酸の溶解は中性から酸性側で増大することから、土壤中の易溶性ケイ酸の存在形式は「Silicate type」であるとしており、さらに同時に溶出した鉄アルミナとケイ酸の量的関係から、ケイ酸はおもにアルミナと結合していると推定している。本報告においても、客土材、水田作土とも、ケイ酸の溶出量が酸性側で増大することから、いずれの供試土壤においてもケイ酸の存在形式は「Silicate type」が主であると判断された。しかし、先に示したように中性付近のpHで溶出するケイ酸の比率は、水田作土と比較して客土材が明らかに高く、ケイ酸の溶解特性に違い

表III-4-4 成熟期茎葉のケイ酸含有率および吸収量 (g/kg, g/m²)

客土深(cm)	土性	1987年		1988年		1989年		1990年(きらら397)		1990年(ゆきひかり)	
		含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量	含有率	吸収量
0	-	560	38	38	30	38	29	54	42	49	38
10	SL	1410	113	124	108	117	85	106	77	102	83
	LiC	1360	102	110	95	107	80	102	78	95	75
20	SL	1680	121	144	119	139	98	138	88	127	98
	LiC	1550	120	127	107	138	100	108	92	121	99
30	SL	1830	120	155	120	161	117	157	95	137	96
	LiC	1720	125	139	108	152	117	130	100	128	94

が認められた。これは、客土材中ケイ酸の存在形態に何らかの違いがあることを示唆するもので、例えば高pHで溶解量が増加する「Silica type」のケイ酸が多く含まれていることも考えられる。湛水期間中の水田では、pHは徐々に上昇し6~7付近で推移するので、pHによるケイ酸の溶解性の相違は水稻に対する有効性という面から重要な意味を持つものと考えられた。今泉ら(1958)が、非火山灰土壌中の易溶性ケイ酸の形態もアロフェンに類似した性質を持つと推定していることや、結晶性の一次鉱物あるいは粘土鉱物の溶解性が低いことを考慮すると、蓚酸塩で抽出される非晶質画分のケイ酸量を可給態ケイ酸総量の1つの指標と考えることは妥当と判断されたため、本試験ではpH3.5蓚酸塩緩衝液を用いた40℃1週間培養条件によって抽出されるケイ酸を、通常の水田状態で可溶化し得る潜在量と仮定した。この画分の内、酢酸緩衝液および水で抽出される易溶性画分の比率が高いことは、土壌溶液中へのケイ酸の溶出速度が速いことを示している。

図III-4-5に見られるように、無客土区では幼形期の時点でケイ酸含有率が一次的に低下するが、客土区ではこの低下が認められない。これは水稻による旺盛なケイ酸吸収に対して、土壌からのケイ酸の溶出が速やかになされていることを示し、易溶性画分の比率が高いことを反映したものと考えられた。

ケイ酸給源物質の存在形態を推定するために酢酸緩衝液可溶のケイ酸(SiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)の量比から、給源物質の存在形態をアルミノケイ酸塩と仮定して組成式を算出すると、水田土壌:SiO₂(Al₂O₃)1.52に対して客土材:SiO₂(Al₂O₃)0.50となる。これは、客土材中のケイ酸給源物質は水田作土に比較して約3倍もケイ酸に富んでいることを示唆しており、客土材が易溶性ケイ酸に富む一つの要因と推定される。しかし、ケイ酸が全てアルミナと結合しているかどうかは不明であり、他の元素と結合した形態であることも否定できない。このような物質の詳細な構造の究明は、今後の研究課題である。

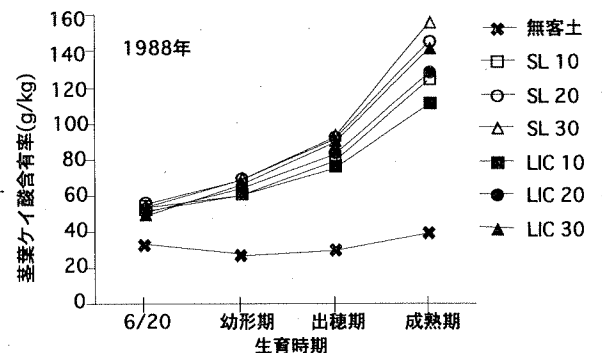
4-2 客土材中易溶性ケイ酸の集積

連続培養実験でのケイ酸溶出の推移から、客土材には極めて易溶性で、培養の繰り返しにとめない速やかに溶出し失われてしまう画分(I)と、水田作土からの溶出と同様に、一定量の溶出を繰り返す画分(II)の2つが認められた(図III-4-2)。そしてそのうち画分(I)が客土の持つケイ酸供給力の主体となり水稻のケイ酸吸収に大きな影響を与えていると考えられた。

次に、このようなケイ酸が客土材の土取り場で集積する機作について若干の考察を加える。日本のような気温、降水量の地域では、年間を通じて土壌水分の移動方向は下降方向が主であることから(菅野, 1964)、一次

表III-4-5 客土後の経過年数と可給態ケイ酸含量の関係

客土深	客土材	可給態ケイ酸含量 (mg/kg)			
		原土	1年後	2年後	3年後
無客土	-	68	68	59	56
10cm	SL	334	231	180	215
	LiC	292	171	176	151
	平均	313	201	178	183
20cm	SL	334	359	155	249
	LiC	292	212	170	172
	平均	313	286	163	211
30cm	SL	334	276	268	262
	LiC	292	228	-	184
	平均	313	252	268	223
客土区平均		313	246	203	206



図III-4-5 生育期間中の茎葉ケイ酸含有率の推移

鉱物の分解により土壌溶液中へ溶出した塩基、ケイ酸は水の移動にともない徐々に層外へ容脱されると考えられる。しかし、下層土の透水性や降水量の条件によっては1次鉱物の分解により放出されたケイ酸が、前述のような形態のケイ酸給源物質として土層中にとどまり集積する可能性が予測された。これを検証するために行った土取り場の調査では、可給態ケイ酸の下層での集積が明らかであった。また、カルシウム、マグネシウム、カリウムもケイ酸ほどではないが下層に集積層が認められ、この仮説を裏付けていると考えられた。しかし、このような物質の移動・集積は、母材の性質、地形、気象など多くの条件により相違するものと考えられる。従って、土取り場でのケイ酸の移動集積を普遍的な現象と判断するにはさらに多くの客土材土取り場について分析を重ね、集積の条件を明確にする必要がある。

4-3 ケイ酸供給力の持続性

可給態ケイ酸は作付期間、水稻のケイ酸吸収により漸減するが、翌春にはほぼ元の水準に復することが明らかにされている（高橋ら、1986）。表Ⅲ4-5は無客土区お

よび客土区における可給態ケイ酸の経年変化を示した。無客土区での可給態ケイ酸含量は毎年ほぼ同水準であり、この知見と一致する結果であったが、客土区の可給態ケイ酸含量は年数経過とともに減少し、これと異なる結果を示した。

これは、客土材からの易溶性ケイ酸の溶出は、連続培養実験でのI画分の推移と同様に、水稻栽培の繰り返しによって毎年減少することを示しており、客土によるケイ酸補給効果の持続年数には限りがあると考えられる。どの程度の持続年数があるかは、客土の更新時期の判断のために重要である。本報告では、客土後の経過年数の異なる水田の調査から持続年数を推定した。現地の客土水田では、水稻栽培の繰り返しにより可給態ケイ酸含量が減少し、それにともない水稻によるケイ酸吸収量も減少してゆく実態が明確になった。また、客土材の性質、客土量によって相違することを考慮しなければならないが、調査地域での5cmの客土では、ケイ酸補給効果は図Ⅲ4-3, 4から判断してほぼ10~15年と推定された。

第5節 良食味米生産のための客土施工基準の策定

1 背景と目的

従来の国営、道営客土事業は、泥炭地水田の物理的改善および増収を目的として実施されており、そのための基準（客土材、客土量など）が設けられている。しかし、産米の食味向上を目的とした客土事業を実施するためには、従来とは異なった新たな施工基準が必要となる。

本節では、これまでの解析から得られた知見に基づき、良食味米生産のための客土事業の施工に必要な項目について検討し、新たな施工基準を提案する。

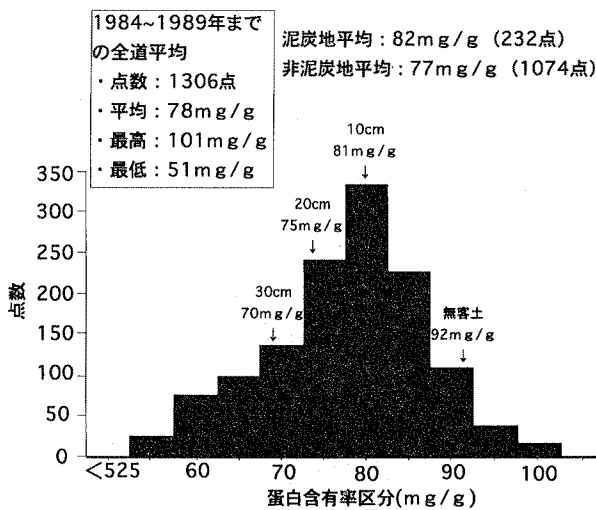
2 客土施工基準の策定

2-1 食味向上目標の設定

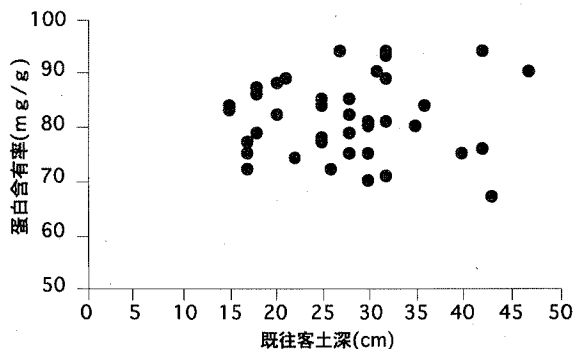
前節で得られた、客土による食味の向上効果を現地水田圃場に適用するために、まず食味改善目標を設定する必要があった。食味向上の指標値として、食味特性と密接に関わり、かつ客土により制御可能な特性である蛋白

含有率を用いることが最も適当と判断した。

図Ⅲ5-1には1984年～1989年に実施した全道食味調査（のべ1306点）から、泥炭地水田および他の土壌型水田での蛋白含有率の頻度分布を比較した。また、図中に前節水稲栽培試験4ヶ年間の各客土深の平均蛋白含有率を示し、全体での位置を知る目安とした。泥炭地水田232点の平均82mg/gに対して他の土壌タイプ1074点の平均は77mg/gであり、客土が数回行われてきた現在でもなお泥炭地産米の蛋白含有率は他の土壌型の産米に比べて高いことが明らかである。また、供試圃場の無客土水田は客土来歴はないが沖積による無機質表層が15～20cmあり、全体の中で蛋白含有率は高い方であるがそれ程極端な水田とは考えられず、供試圃場での結果を現地に適用することに大きな問題は無いと判断された。蛋白含有率は窒素施肥によっても大きく影響を受けることから窒素施肥量についても調査したが、泥炭地水田ではむしろ施肥量は少なく、蛋白含有率が高いことは土壌条件による影響が大きいことを示している。また、泥炭地水田では蛋白含有率80mg/g以上の水田の割合が56.5%と高く他の土壌タイプの産米との格差を無くすためには、まず80mg/g以上の米をそれ以下に下げることが必要と判断されたこと、およびこれが、品種育成過程での目標値であることから、本節では産米の蛋白含有率を80mg/g以下に下げること为目标として基準の設定をおこなった。



図Ⅲ5-1 全道の精白米中蛋白含有率の頻度分布と試験区的位置



図Ⅲ5-2 既往客土深と蛋白含有率の関係

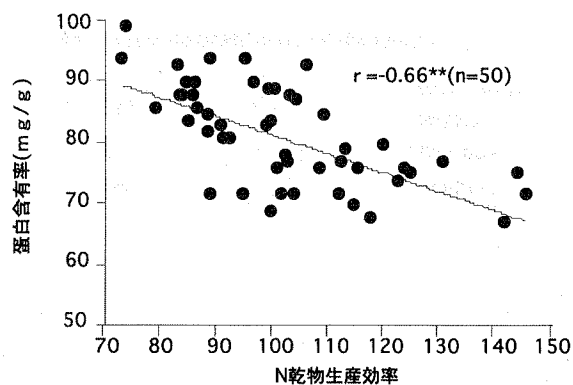
2-2 既往客土の評価による客土要否判定基準

既往客土の評価をおこなうため、まず、現地での既往客土量について検討した。1985年に新十津川町、1986年に新篠津村、1987年に北村で行った調査の事例から得られた既往客土量の実態を、表Ⅲ5-1に示した。既往の客土層の厚さは平均すると約28cmであったが、15cm程度の水田から50cm近くある水田まで様々であった。客土量と産米の食味との関係を知るため、両者の関係を図Ⅲ5-2に示した。

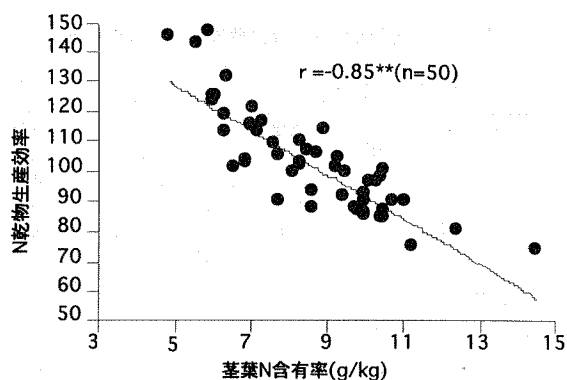
しかし、図から明らかなように客土層の厚さと蛋白含

表Ⅲ5-1 現地圃場における客土深の実態

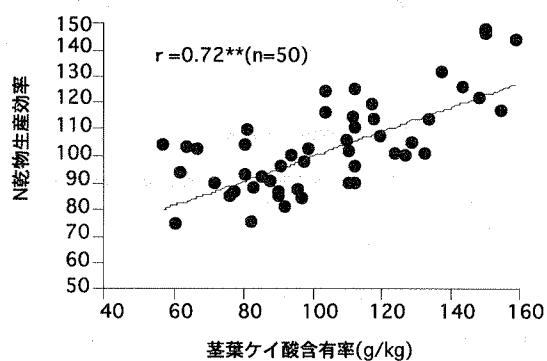
調査地点	点数	客土深(cm)		
		平均	最低値	最高値
新十津川町	4	26.5	19.0	39.0
新篠津村	21	24.6	15.0	32.0
北村	18	31.3	17.0	47.0
合計	43	27.6	15.0	47.0



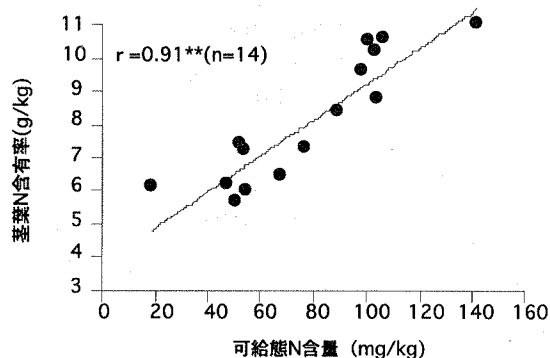
図III 5-3 N乾物生産効率と蛋白含有率の関係



図III 5-4 茎葉N含有率とN乾物生産効率の関係



図III 5-5 茎葉ケイ酸含有率とN乾物生産効率の関係



図III 5-6 可給態N含量と茎葉N含有率の関係

有率の間にはほとんど相関が認められず、単純に既往客土の量だけで新たな客土の要否判定を行うのは困難であると考えられた。これは、後述するように客土の食味に対する効果は、主に土壌化学性の改良を通じて発現すると考えられるため、同一の既往客土量であっても客土材や客土後の経過年数の違いにより、その評価が異なるためと考えられる。そこで、これら多くの要因を統一的に評価できる指標を見い出すことを検討した。前節で考察したように、客土による食味の向上は窒素供給量の減少と乾物生産力の増大による窒素乾物生産効率の上昇によると考えられたため、窒素乾物生産効率を客土効果の指標とすることを検討した。図III 5-3に現地調査での窒素乾物生産効率と蛋白含有率の関係を示したが、この図から明らかなように両者には現地水田においても密接な関係が認められ、窒素乾物生産効率を既往客土評価の指標にするのが良いと考えられた。

前項で設定した目標値、蛋白含有率80mg/gに当たる窒素乾物生産効率を図III 5-3から求めると103となるが、年次・地域間差を考慮するとほぼ98~108に当たると判断された。そのため、この範囲を客土考慮水準として、これ以下の水田に対して客土“要”に、以上の水田に“不要”の判定になるように基準を作成することを目

標とした。

前節での解析のとおり、窒素乾物生産率は水稻による窒素およびケイ酸吸収と密接に関係することから、これらの土壤中可給態量を用いた土壌診断により既往客土の評価と客土の要否判定を行うことを検討した。図III 5-4, 5に現地調査における窒素乾物生産効率と窒素含有率、ケイ酸含有率の関係を示したが、いずれにも高い相関が認められ、前節までの結果と一致した。また、茎葉窒素含有率とケイ酸含有率の間には有意な負の相関が認められたためケイ酸含有率、窒素含有率をそれぞれ一定にした場合の偏相関係数を表III 5-2に示した。窒素乾物生産効率との相関係数は若干低くなったが依然有意な相関が認められ、それぞれ単独の要因として関与していると考えられることから、窒素とケイ酸を組み合わせる用いることが妥当と判断された。

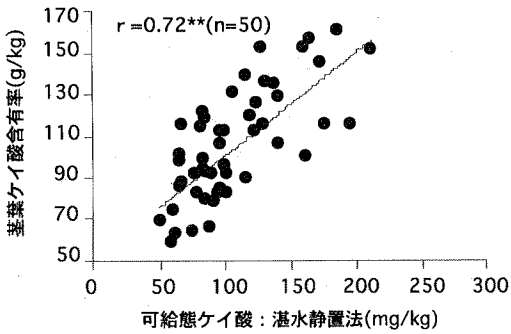
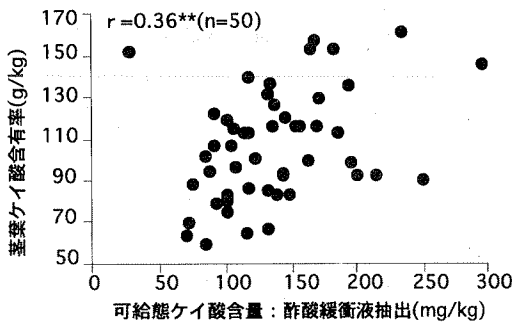
まず、茎葉窒素含有率を土壌診断から推定する事を検討した。図III 5-6には茎葉窒素含有率と水田土壌の可給態窒素である培養窒素の相関を示した。窒素含有率は施肥量・施肥法の影響を受けるため、相関係数はあまり高くないが有意な相関が認められた。

一方、茎葉のケイ酸含有率推定のための可給態ケイ酸含量の測定法について検討した。地力保全調査やケイカ

表Ⅲ5-3 可給態Nおよびケイ酸含量を用いた客土の要否判

可給態N*	可給態ケイ酸*	L	M	H
		~80	81~130	131~
L	~100	考慮 (-)	考慮 (108)	不要 (122)
M	101~150	要 (91)	要 (96)	考慮 (101)
H	151~	要 (90)	要 (96)	考慮 (-)

* (mg/kg)

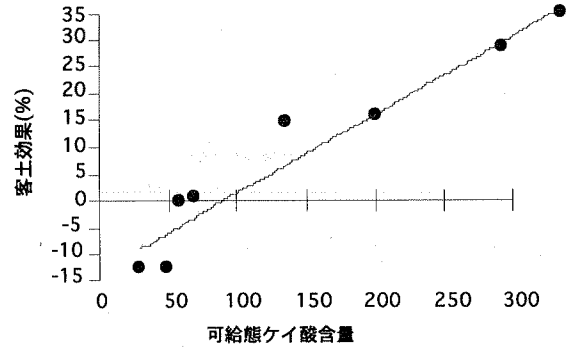


図Ⅲ5-7 従来法および新法による可給態ケイ酸含量と茎葉ケイ酸含有率の関係

ルの施用基準では、現在pH4.0酢酸バッファー抽出法が公定法となっているが、ケイ酸資材を施用した場合には、時には異常に高い値を出し、水稻のケイ酸吸収とほとんど相関関係を示さなくなるという報告が多い。本試験においても図Ⅲ5-7に示したように相関係数はあまり高いとは言えず、より優れた分析法を用いることが必要と考えられた。そこで、新たに湛水保温静置法（土壤標準分析・測定法委員会編，1986）を用いたところ高い相関関係が認められ可給態ケイ酸の定量法はこの方法を用

表Ⅲ5-2 N乾物生産効率と成熟期茎葉成分含有率の相関

N乾物生産効率との相関係数	N含有率	ケイ酸含有率
単相関係数	-0.851**	0.715**
偏相関係数	-0.763**	0.511**



図Ⅲ5-8 客土材の可給態ケイ酸含量と客土効果の関係

いるのが適当と判断された。

以上の相関から窒素乾物生産効率98~108に相当する可給態窒素含量101~150mg/kgおよび可給態ケイ酸含量(81~130mg/kg)をそれぞれM水準として、それ以上をH、以下をLと区分して両者の2元表から客土の要否判定基準を表Ⅲ5-3のように作成した。なお()内の数字は実態調査での各区分に属する水田での窒素乾物生産効率の実数である。また、表にL, M, H水準にそれぞれ対応する、前記の回帰式から求めた各指標値の値を示した。

2-3 客土材の選定

客土材の選定基準を策定するため客土材の違いと客土効果の関係について検討した。表Ⅲ5-4には、稲作部圃場において同一の客土量で様々な客土材を用いた場合の効果の違いを示した。客土効果は窒素乾物生産効率の無客土区に対する上昇割合で示した。表Ⅲ5-4から明らかとなっており砂質客土材であっても客土効果は十分認められ、すでに述べたように土性についての現在の基準（農

表Ⅲ5-4 客土材の違いと客土効果

客土母材	客土量	pH	T-C	T-N	交換性塩基			CEC	遊離酸	遊離酸化鉄	可給態Mn	可給態ケイ酸	土性	客土効果*
					CaO	MgO	K ₂ O							
					(mg/kg)			(cmol)	(mg/kg)	(g/kg)	(mg/kg)			
稲作原土	-	5.4	63	5	4630	810	140	31.9	174	9.0	370	68	HC	0
稲作部SL	10cm	5.5	tr	tr	2040	910	120	14.9	9	3.9	1090	334	SL	35
稲作部LiC	10cm	5.4	tr	tr	3100	1510	120	20.4	16	14.4	460	292	LiC	28
月越	10cm	5.2	25	2	260	80	160	18.4	0	18.0	1340	29	-	-13
SL25%	10cm	-	48	4	3980	840	140	27.7	133	7.7	550	135	-	14
SL50%	10cm	-	32	3	3340	860	130	23.4	92	6.5	730	201	-	15
月越25%	10cm	-	54	4	1600	700	130	15.8	5	7.4	1150	59	-	-1
月越50%	10cm	-	44	3	1150	500	140	16.7	2	11.0	1220	49	-	-13

* 稲作原土に対する各客土区のN乾物生産効率の上昇割合

表Ⅲ5-5 土取り場での可給態成分の移動集積状況 (mg/kg)

土取り場層位	深さ (cm)	備考	交換性塩基			可給態 ケイ酸
			CaO	MgO	K2O	
ピトエ-1	0-20	地表	1350	220	170	177
	-2 20-100		2200	1120	70	362
	-3 100+		3160	1200	60	467
光珠内1	0-25	地表	3160	1630	90	219
	-2 25-70		2480	1450	70	283
	-3 70-120	鉄結核有	3160	1890	90	357
	-4 120-170	"	3290	2000	100	593
	-5 170+		2420	1400	70	454
光珠内2	0-20	地表	270	150	70	88
	-2 20-50		1280	970	120	179
	-3 50-80		1740	1140	130	370
	-4 80-110		2530	1540	170	334
	-5 110-140	鉄結核有	3800	2290	160	386
	-6 140+	"	2080	1160	150	441

表Ⅲ5-6 客土材の適否基準

地質	化学性	物理性
洪積台地および丘陵に分布する山土であることを原則とする	①有機物を含まないことが望ましい ②可給態ケイ酸含量250mg/kg以上	粗砂含量73%以下 (粘土含量は問わず)

$$\text{客土量(cm)} \geq (1950 - 15B) / (A - B)$$

A: 客土材の可給態ケイ酸含量 (mg/kg)
B: 原土の "

式Ⅲ5-1 客土量の算出

学会法粘土含量32.5%以上)は満たす必要が無いと考えられた。土壤化学性についてみると、有機物含量が少なく可給態ケイ酸含量が多い土壤ほど客土効果が高く、原土よりも可給態ケイ酸が少ないような土壤では逆にマイナス効果になることが明らかとなった。客土材中の可給態ケイ酸含量と客土効果の関係を図Ⅲ5-8に示したが、両者には密接な関係が認められ、客土材の選定に当たっても可給態ケイ酸含量が化学性の指標となると考えられた。現地調査の中で最も可給態ケイ酸が少ない水田は、約60mg/kgであった。この水田に5cmの客土をし、作土15cmの可給態ケイ酸含量を130mg/kg以上にするには250mg/kg以上の客土材であることが必要と考えられた。

現在使われている客土材の実態を知るため美唄市峰延、当別町ピトエの土取り場断面から深さ別に土壤を採取し、交換性塩基と可給態ケイ酸含量の層内分布を調査した(表Ⅲ5-5)。これによると客土材中には一般的に可給態ケイ酸が多い。また、交換性の塩基とともに表層から溶脱し下層に集積している事が明らかとなった。そのため、いわゆる“山土”客土の土取り場では、極表層の部分を除けば、一般的に可給態ケイ酸や塩基類が集積

していると考えられ、これらを客土材に用いれば可給態ケイ酸の基準は満たされると考えられた。

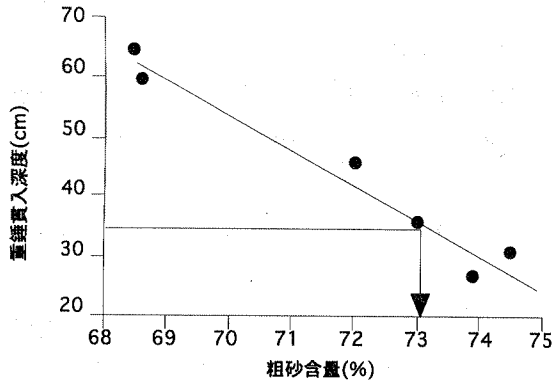
前述の通り客土材の土性に関して粘土含量の枠を外すことを提案したが、砂含量が非常に高い客土材を多量に客土した場合、土壤硬度が高くなり移植作業に支障をきたす恐れが考えられた。そこで、砂含量と代かき土壤硬度の関係について検討した。評価は115gの重錘を10cmの高さから自由落下させ、その貫入深度から土壤硬度を測定する中村ら(1985)の方法である。この方法により種々の土壤に対して実用範囲内の的確な土壤硬度を測定できる。図Ⅲ5-9に粗砂含量と重錘貫入深度の関係を示した。この測定法による深度が35mm以上であれば移植作業に支障がないと判断されることから、図より求めた粗砂含量73%以下であることを基準とするのが良いと考えられた。以上をまとめて客土材の適否基準を作成し、表Ⅲ5-6に示した。

2-4 客土量の決定

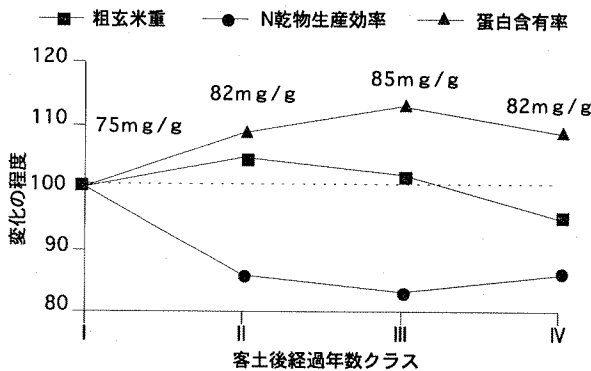
客土量は前述の通り客土材と原土壤の組み合わせにより、作土層(15cm)の可給態ケイ酸含量が130mg/kg以上になるように決定することが合理的であると考えられた。その算出は式Ⅲ5-1により行う。この式によれば客土量の上限はない。しかし、大量の客土(20cm以上)を一度に搬入した場合、不等沈下や春先の均平化が困難になるなどの、圃場施工上の問題点が多い。また、農作業のための機械走行や前述の収量と食味に関するデータを考慮して、一度に行う客土量の上限は10cmとする事が必要と考えられる。

2-5 客土効果の持続年数の検討

客土効果の持続年数の目安を知るために、最後の客土を行ってからの経過年数と、それに伴う土壤条件・窒素吸収量・玄米収量・窒素乾物生産効率および蛋白含有率の変化について検討した。調査は1987年北村、1989年美唄市で実施した中で、アンケートにより最後の客土実施年が明らかになった農家40地点を対象にした。農家は客土後の経過年数により以下のように大きく4つにクラスわけした。Ⅰ:客土後0~5年まで(12点)、Ⅱ:6~10年(12点)、Ⅲ:11~15年(9点)、Ⅳ:16年以上(7点)表に各クラス毎の可給態窒素、ケイ酸、窒素吸収量、総量、粗玄米重、窒素乾物生産効率、蛋白含有率を平均値で示し、またこれらの推移をより明らかにするために図Ⅲ5-10では、クラスⅠを100とした指数で年数



図III-5-9 粗砂含量と重錘貫入深度の関係



図III-5-10 客土後の経過年数と収量, 乾物生産効率および蛋白含有率

経過に伴う変化を示した。

まず、土壌条件の変化についてみると、可給態窒素は年数経過とともに増加し、逆に可給態ケイ酸含量は減少することが明らかとなった。これは、毎年の耕起や代かき作業により、下層土からの有機物の混入が少しずつ進行してゆくことと、水稻の旺盛なケイ酸吸収により可給態ケイ酸が減少してゆくためと考えられた。一方、粗玄米重および総量は、11~15年後まではやや増加傾向で推移するが、16年以上経過した水田では低下した。また、窒素乾物生産効率は年数経過とともに低下し、蛋白含有率は6~10年で80mg/gを越えた。しかし、過剰な窒素吸収量を施肥の調整で減少させれば蛋白含有率はこの年数では80mg/g以下にすることは容易であると考えられる。この調査での例のように客土後の年数経過に伴い収量および食味に対する客土の効果は次第に薄れていくが、客土前原土壌の条件、客土材・量の違いなどによりその持続年数は異なると考えられるため、客土施工後10年程度を目安として再び土壌診断による客土の要否判定を行うことが必要と考えられた。

第6節 小括

食味の地域間差を解消するための技術として、泥炭地水田に対する客土の効果の詳細に解析するための水稻栽培試験を4年間にわたり実施した。客土による土壌環境の変化とそれともなう水稻生育、収量および養分吸収に与える影響を解析し、産米の食味特性向上の機作を考察した。さらに、解析結果を基礎に、良食味米生産を目的とした客土を施工するための、施工基準の策定を試みた。

1) 客土が水稻の生育・収量におよぼす影響を整理すると、客土によって水稻の有効茎数確保の時期が早まり、泥炭地水田に特徴的な生育不良パターンである遅れ穂の発生が抑制された。また、N乾物生産効率が高まり、より多N条件での乾物増加速度が高まることが明らかとなった。水稻によるN吸収では、客土区での成熟期N吸収量、生育期間中の茎葉N含有率の大幅な減少、N吸収パターンの生育初期への前倒し傾向が認められた。また、客土材からは圃場条件下においても豊富なケイ酸溶出が認められ、水稻のケイ酸吸収に極めて密接に反映されていた。このことから、客土のケイ酸補給効果は非常に大きいことが裏付けられた。客土による増収効果は、20cmおよび30cmという大量の客土量でも、また、SL土性の客土材によっても得られることが明らかとなった。客土区での増収要因は、同一籾数レベルでの登熟歩合が顕著に高まった事であり、このことは水稻の登熟能力自体が向上したことを示すものであった。

2) 客土が産米の品質および食味におよぼす影響を整理すると、いずれの客土区でも整粒歩合は高まり、未熟粒歩合が大きく低下した。客土量による差は明確ではないが、LiC客土に比較してSL客土での玄米品質の向上効果がより大きかった。このように、客土により玄米品質が向上した要因としては、客土による遅れ穂の減少(→未熟粒の減少)と乾物生産力の増加による粒の充実度向上(→整粒歩合の増加)が影響していた。客土により影響を受ける食味関連成分は主に蛋白含有率であり、大幅な低下が認められた。しかし、客土はアミロース含有率には影響を及ぼさなかった。蛋白含有率の低下はアミログラム特性値(MVおよびBD)に影響を及ぼし熱糊化性の向上をもたらすと同時に炊

飯米のテクスチャーに影響を及ぼし、炊飯米を柔らかくした。これら食味特性値の向上により、官能試験による食味評価値も客土により向上し、総合評価値では客土10cmで約1ランク、30cmでは3ランクの向上を示した。また、客土材の種類ではLiC客土材よりSL客土材の向上がより大きかった。

- 3) 客土による蛋白含有率の低下は、N玄米生産効率の向上に起因するものであり、さらにその原因は吸収Nあたりの乾物生産量 (=N乾物生産効率) が増加したことによるものであることが明らかとなった。N乾物生産効率の分母であるN吸収量が客土により減少した要因は、作土のN供給力の低下と、下層土からのN供給の遮断効果によるものと考えられた。客土区では葉身の直立化と群落高および葉位別葉身重構成が変化し、光合成効率に有利な群落構造になっていたことが明らかになった。また、葉身厚の増加と旺盛なケイ酸吸収による葉身へのケイ酸集積により、個葉の光合成能も高まっていたと推察される。この乾物生産力の向上が、N吸収の減少と共に作用し、客土区でのN乾物生産効率の向上をもたらしたものと結論づけた。
- 4) 客土材からのケイ酸溶出は、水田作土に比較して量が多いのみでなく、pHの変化に対する溶出パターンも異なることが認められ、より易溶性の画分の比率が

高いことが明らかとなった。また客土材と水田作土の比較では、客土材のケイバン比は高いことから、ケイ酸給源物質の存在形態は水田土壌と異なっていることが推定された。土取り場断面の可給態ケイ酸含量の調査から、土層内で溶脱された塩基およびケイ酸が下層に移動したと推定され、これが客土材中に存在する豊富な易溶性のケイ酸の給源となっていた。

- 5) 産米の米粒中蛋白含有率を80mg/g以下に下げること为目标として良食味栽培を目的とした客土の基準の設定をおこなった。その結果、土壌中可給態窒素、可給態ケイ酸含量(湛水保温静置法)は、成熟期茎葉の窒素、ケイ酸含有率と高い相関があることから、これにより客土要否判定基準を作成した。客土による食味向上効果は、客土材の化学性によって違いが認められた。また土性では砂質客土で効果が高く、粘土含量による従来の基準は適当でないと考えられ、可給態ケイ酸含量により客土材の基準を作成した。また、客土量は原土と客土材の可給態ケイ酸含量から客土後作土のケイ酸含量が130mg/kg以上になるように算出した。客土による食味向上効果の持続年数は、客土材の理化学性と客入量によって異なると思われるが、客土後10年程度を目安として土壌診断により客土の要否判定することの必要性を明らかにした。