

福岡県農業総合試験場特別報告

第15号

土壌溶液組成の制御による農産物の品質改善に 関する基礎的研究

平成12年3月

福岡県農業総合試験場

(福岡県筑紫野市大字吉木)

SPECIAL BULLETIN
OF
THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

NO.15

A Fundamental Study on Quality Agricultural Production
by Control of Soil Solution Composition

by

ODAHARA Koji

THE FUKUOKA AGRICULTURAL RESEARCH CENTER

Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan

March 2000

土壌溶液組成の制御による農産物の品質改善に 関する基礎的研究

小田原 孝 治

2000

*九州大学審査学位論文

序

高品質な農産物の安定生産のためには、施肥や水管理などによって作物の根圏環境を制御することが重要であり、これまで、作物ごとに施肥量や灌水量に関して多くの研究が取り組まれてきた。作物の根からの養分吸収は土壌中の溶液に依存している。この土壌中の溶液は、施肥や灌水によって様々に変化しており、作物の生育に大きく影響を与えているが、溶液組成をどのように制御する必要があるのか、さらにはそれを制御するための技術については明らかにされていない点が多い。

本研究は、このような背景のもとに土壌溶液組成を制御することによる農産物の品質改善に関する基礎的技術を明らかにしたものであり、貴重な成果を得ることができたので、ここに特別報告として公表することとした。これらの研究成果は、農産物の品質改善のための土壌溶液組成制御技術の開発、普及に寄与するものであり、今後必要となる環境保全に配慮した肥培管理技術の開発に対しても重要な基礎資料になると考えられる。

なお、本研究は1988年から1992年にかけて県単研究「ナバナの安定栽培技術の確立」および「北部九州産米の食味に関する研究」に関連する試験成績を取りまとめたもので、福岡県農業総合試験場豊前分場普通作物研究室（現在、豊前分場普通作物・野菜研究室）において行なったものである。

本論文の取りまとめにあたって、ご指導、ご助言を頂いた九州大学農学部教授江頭和彦博士、同教授池田元輝博士ならびに同助教授和田信一郎博士に厚くお礼を申し上げますとともに、福岡県農業総合試験場豊前分場普通作物研究室職員の方々の協力により、成果をあげることができたことを付記し、関係各位に深く感謝の意を表する。

平成12年3月

福岡県農業総合試験場長

吉 村 大三郎

目 次

第1章 序 論	1
第2章 土壌の陽イオン交換特性が土壌溶液組成に及ぼす影響	5
2.1 土壌の陽イオン交換特性が土壌溶液組成に及ぼす影響	5
2.2 陽イオン交換特性の異なる水田土壌の土壌溶液組成の施肥に対する反応	13
2.3 水分含量変化にともなう土壌溶液組成の変化とその予測手法	17
2.4 水分含量変化にともなう土壌溶液組成の変化とその機構	26
第3章 土壌溶液組成制御による米の食味改善	31
3.1 米の食味に影響する要因	31
3.2 土壌の理化学性および土壌溶液組成の差異が稲体および産米の成分組成 に及ぼす影響	39
3.3 ゼオライト施用による土壌溶液組成の制御	46
3.4 ゼオライト施用による米の食味改善の実証	53
第4章 土壌溶液組成制御による野菜のカルシウム含量向上	58
4.1 各種カルシウム塩添加による土壌溶液カルシウム濃度上昇効果の比較	58
4.2 硝酸カルシウム施用によるツケナのカルシウム含量向上	66
4.3 硫酸アンモニウム追肥と土壌水分管理によるツケナのカルシウム含量向上	74
4.4 硫酸カルシウム施用によるツケナのカルシウム含量向上	81
第5章 総合考察	89
引用文献	94
Summary	101

第1章 序 論

現在、少なくとも先進諸国においては、食糧の絶対的不足は解消されている (Japan Almanac 1996)。そのため、食糧には、栄養要求を満たすことに加えて、嗜好に合うことや、健康維持に有用であることなどが強く求められるようになっていく。さらに食物栄養学や健康科学の発展によって、嗜好性や健康増進と食品に含まれる特定成分との関係が明らかにされつつある。これらを反映して、作物の育種や栽培においては、嗜好性に関連する成分を適当な割合で含むことや、健康維持に有用な成分を多く含む、あるいは逆に有害成分含量を低くすることが目標とされるようになっていく。たとえば、水稻では米の食味に高い関心がはらわれているが、良食味米ではアミロース含量が低いことから、低アミロース米の育種が試みられている (稲津 1988-b)。また、野菜では、有害な NO_3^- イオンやシュウ酸含量が低く、ビタミン C 含量が高いこと (建部ら 1995-a, -b, 加藤ら 1995) や Ca 含量が高いこと (林田ら 1995) 等が求められ、品質評価の基準の一つとなりつつある。

これらを満たすような農産物を生産するためにもっとも直接的な方法は、基本的には好ましい形質をもつ作物を育種することであろう。しかし現在のところ任意の形質をもつ作物を育種する技術は確立されていない。とくに NO_3^- イオンや Ca イオンなどの吸収特性を育種的に制御したという報告はない。また、たとえば同一水稻品種を栽培した場合でも土壌の種類により食味に有為な差が生ずることが報告されている (井出ら 1971, 茶村ら 1972, 岡本ら 1989)。したがって、上記目標にあった農産物を生産するには、育種と肥培管理の両面が重要であることは明らかである。

肥培管理による作物の品質制御の基本は、品質形成に直接・間接に関与する成分の吸収を制御することであり、そのためには土壌へのそれら成分の投入量を制御することである。しかし、同一品種に同一施肥管理を行っても、土壌の違いによる品質の差が生ずること (井出ら 1971, 茶村ら 1972) から、肥培管理による作物の品質制御を農業技術として確立するには、投入された成分の土壌中での存在形態や挙動を定量的に理解することが重要と考えられる。

従来植物に利用可能な養分は、一括して「可給態養分」として把握されてきた。一般的にこの可給態養分には、土壌溶液に溶存する養分のほか、土壌腐植や粘土鉱物に吸着保持されたもの、比較的溶解しやすい塩類として存在するもの、そして土壌鉱物の骨格成分として存在するものの一部が含まれると考えられる。しかし、現在行われている可給態養分の評価法を考えると、いわゆる可給態養分として評価される養分の主体は土壌腐植や粘土鉱物に比較的弱く吸着保持されているものであると考えられる。たとえば酢酸アンモニウム溶液による交換性塩基の抽出、リン酸塩による SO_4^{2-} イオンの抽出、酸溶液による可給態リン酸イオンの抽出、酸やキレート剤溶液による Cu, Zn をはじめとする可給態微量元素の抽出はいずれも、土壌腐植や粘土鉱物に吸着されている養分が主要な標的とされている。

ある可給態養分評価法が妥当であるかどうかは、その方法によって評価された可給態養分量と植物による吸収量との間の相関の高さによって評価される。このような可給態養分の評価法の研究は土壌学そのものと同じくらい長い歴史をもつが、現在でも決して満足すべき状態ではない。たとえば 0.1 mol L^{-1} 塩酸、ジチゾン等をはじめとするいくつかの抽出剤によって評価される可給態亜鉛と植物による吸収量との相関係数は $0.4 \sim 0.7$ 程度である (Martens 1968)。また、イオウについても $0.2 \sim 0.6$ 程度のことが多い (Bardsley and Kilmer 1963, Copper 1968, Hoesft et al. 1973)。Ca, Mg, K のような多量要素では成分間の拮抗作用のため、可給態成分の存在量と吸収量との関係は一層複雑である (Doll and Lucas 1973)。植物の養分要求量は無限ではないので、土壌中に可給態養分が十分にある場合には、いわゆる可給態養分量の測定値と吸収量の相関が低いことは当然である。しかし、上に引用した研究は、むしろ研究対象とする養分が欠乏気味の土壌が対象とされていることを考えると、土壌腐植や粘土鉱物に吸着された養分を対象とした抽出法には限界があると

考えられる。したがって、植物にもっとも利用されやすい形態の養分の量を制御することが、吸収量の制御を行うためには最も合理的である。そして以下に紹介する比較的最近の実験的研究によれば、植物による吸収と最も関係の深いのは土壤溶液に溶存する成分であると考えられる。

Pavan et al. (1982-a, -b)は、コーヒーによる Al イオン吸収を調べ、交換性 Al などではなく、土壤溶液中の Al イオンの活量と葉の Al イオン濃度との間に高い相関があること、そしてその関係は水耕液の Al イオン活量と葉中 Al 濃度の関係とほとんど同じであることを示した (Pavan et al. 1982-b)。Scwab and Lindsay (1983) は、水稻による Mn の吸収と土壤溶液中の Mn イオン活量との間に高い相関があることを示した。日本においては、伊藤 (1984-b)が、水耕および3種の異なる土壌を用いた土耕により、キャベツの Mn 過剰障害の研究を行い、生育障害の程度と Mn 濃度との関係は水耕でも、異なる土壌での土耕でもほぼ共通であることを示した。多量要素については、おそらく元素間の拮抗作用のため、単に濃度や活量というより、土壤溶液中の濃度割合や活量比などと吸収量との相関が高いようであるが、土壤溶液組成との相関という点では共通している。たとえば、Howard and Adams (1965) は、土壤溶液の合計イオン濃度に対する Ca イオンの濃度比と根の伸長との間に土壌の種類によらない関係を報告している。伊藤 (1984-b) はキュウリ葉の Mg 含量と、土壤溶液の全イオンに占める Mg イオンの割合との間に高い相関があることを示している。また Adams and Pearson (1970) は、ワタとラッカセイについて、土壤溶液中の Ca に対する K と NH_4 濃度の比と、植物体中の K と N の合計含量の Ca 含量に対する比が高い相関関係を持つことを示した。

植物の培地としての土壤溶液の重要性は、水耕栽培の経験の蓄積とともに意識され始め、1800年代後半には M. Whitney や F.K. Cameron により、植物は土壤溶液から養分を吸収するという仮説が提出されている (Russel 1973)。そして 1866 年には Schloesing により、置換法による土壤溶液の採取と分析が行われている (Russel 1973)。その後 1920 年代にかけて土壤溶液採取法の開発、改良が行われ、Burgess (1922) により各種方法によって得られる土壤溶液組成の分析や比較検討が行われている。しかし、この時代の研究の主題は「真の土壤溶液を得るにはどのようにすればいいか」ということであり、土壤溶液組成と植物による養分吸収の対比研究は 1960 年を過ぎるまで行われていないばかりか、上に紹介したように、本格的な研究が始まったのは 1980 年代に入ってからである。

日本では山崎・木下 (1969) によって土壤溶液を採取できる遠心器が開発された。このほか溶媒置換法、圧膜法あるいは減圧法などの開発や改良により、比較的容易にしかも場合によっては現場で土壤溶液が採取できるようになった。このことを契機に、土壤溶液の研究が盛んになり、土壤溶液診断への関心も高まった。そして岡島らのグループが系統的な研究を行い、さまざまな形態の土地利用下の土壌の土壤溶液組成の特徴を明らかにし、この中で陰イオンが土壤溶液濃度を支配していることを指摘した (岡島 1981)。嶋田 (1967) は集約多肥栽培土壌の酸性化を土壤溶液の面から解析した。最近では土壤溶液のイオン組成の分析は、施設土壌の養分状態の管理のための土壤診断手法として取り入れられつつある (伊藤 1984-a, -b)。

現在でも土壤溶液組成と養分吸収との間の関係に関する実験データは、限られた養分、限られた作物に関して断片的に報告されているに過ぎず、一般的な法則などはまだ提案すらされていない。今後も、さまざまな環境下での土壤溶液組成の測定、土壤溶液組成と作物の養分吸収などに関する観察を蓄積する方向での研究は重要である。しかし現在、作物の養分吸収、品質形成にとって土壤溶液が重要であること事実はほぼ明らかである。したがって、肥培管理によって作物の品質の改善を目指すときには、土壤溶液組成を制御することが不可欠であろう。この考えに基づき、水稻、畑作物を対象として、土壤溶液組成制御による品質改善を目的として一連の研究を行ったのでその結果を述べる。

まず第2章では、土壤溶液組成制御技術の基礎として、陽イオン選択性の土壤溶液組成に対する影響を調べた実験と土壤の水分含量変化による土壤溶液組成変化の予測の可能性に関する検討の結果を述べる。土壤溶液は、土壤の固相と非常に強く相互作用している。そのうち最も重要なもののひとつが陽イオン交換反応であり、土壤に施用された陽イオンは陽イオン交換特性を通して土壤溶液と土壤の固相に分配されると考えられる。土壤のイオン交換特性については、Bruggenwert and Kamphorst (1979) や Goulding (1983) の総説にみられるように、さまざまな粘土鉱物や土壤のCa-K交換平衡について数多くの研究がなされてきた。最近ではLevy et al. (1988) がカオリナイトおよびカオリナイト質土壤におけるCa-K交換について研究している。Poonia and Niederbudde (1990), Dhillon and Dhillon (1991-a, -b) は自然の土壤有機物やきゅう肥が土壤のK選択性に及ぼす影響について研究している。Datta and Sastry (1991) は雲母様鉱物を主とする土壤の不活性なKの放出のための基準となるK濃度を測定した。しかし、これらの研究の多くはCa-K交換平衡の熱力学的平衡定数や交換体の活量定数、粘土鉱物のK特異吸着サイトの特徴づけに終始しており、土壤溶液組成を制御することを目的として、陽イオン選択性が施用した陽イオンの土壤固相と土壤溶液の間の分配に及ぼす影響について踏み込んだ考察が行われていないように思われる。

そこでまずイオン交換体組成を異にする土壤試料を採取してCa-K交換平衡実験を行い、土壤のK選択性を測定した。その結果に基づいて数値計算を行い、選択性が土壤溶液のKイオン濃度にどのように影響するかを評価した。そして実際に2点の水田土壤を用いて同量の施肥を行い、イオン選択性の差が土壤溶液のイオン濃度にどのように影響し、イオン濃度の差がイオン交換特性によってどのように説明されるのかを調べた。

次に土壤溶液組成の変化を予測するために、より実用的な立場から AR^K の不変性に関する経験則について考察した。これは土壤の水分含量が変化しても、 AR^K と呼ばれるKイオンとCa, Mgイオンとの活量比は不変であるという経験則である。もしこれが十分な精度で成立するなら、陽イオン交換選択性の測定なしに土壤溶液組成の水分含量変化にともなう変化の予測に応用することが可能であると考えられるからである。そして実際に土壤の水分含量を変化させたときの土壤溶液組成が、どのように変化するかを、施設土壤を用いて調べ、その変化を予測する上での問題点について議論した。

ついで第3章では、土壤溶液組成制御による米の食味改善を目的として行なった圃場試験の結果について述べる。米の食味が関係する要因のなかで重要なものは品種、気象、土壤条件である(執行・小野 1991)。このうち米の食味の土壤間差異が何によってもたらされるのかを明らかにすることは、良食味米生産のための栽培法を確立するために不可欠である。そこで、いくつかの土壤型からなる地域において同一栽培条件で生産した米の食味に関連する理化学的特性について調べた。さらに米の食味と強く関係するNおよびKなどの無機成分(岡本ら 1985)の水稻による吸収を明らかにするため、土壤-水稻系を土壤、土壤溶液、稲わら、玄米および精米の5要素に分けて調べた。次に、食味に強く関与しているとみられるNおよびKの吸収を制御することを目的に、 NH_4 イオンとKイオンに選択性の強いゼオライトを産米の食味が劣る黒ボク土水田に施用し、水稻生育中の土壤溶液組成と産米の食味への影響を調べた。

そして第4章では、土壤溶液組成の制御による野菜のCa含量向上を目的として行なった圃場試験の結果について述べる。圃場試験に先立ち、土壤に添加するカルシウム塩の種類と量による土壤溶液Ca濃度の上昇効果の違いと土壤溶液組成がどのように変化するかということについて調べた。圃場試験にはCa要求量の大きいアブラナ科野菜のツケナを供試した。まず、石灰質資材として一般に使用されている消石灰と水に易溶性の硝酸カルシウムを被覆して緩効性肥料に加工した硝酸カルシウムとを施用して、ツケナの生育期間中の土壤溶液組成と収穫物のCa含有率などの養分吸収

への影響を明らかにした。次に同一土壌条件においては窒素施用と土壌水分管理が土壌溶液組成を制御する要因となるが、これらの要因が土壌溶液組成とツケナの Ca 吸収に及ぼす影響について調べた。さらに、硫酸カルシウムは土壌中に集積しているカルシウム塩のうち炭酸カルシウム、硝酸カルシウムとならんで量的にも多く、水に対する溶解度がこれらのカルシウム塩の中間的な性質を示すため土壌溶液 Ca 濃度にも強く影響を及ぼすと考えられる。そのため、硫酸カルシウムの施用がツケナの Ca 吸収に及ぼす影響を土壌水分含量との関係で調べた。

第5章では、上述の一連の研究を通じて得られた知見と、土壌溶液組成の制御による作物の養分吸収と農産物の品質改善に関する今後の研究課題について考察した。

本研究は1988年から1992年にかけて県単独試験「北部九州産米の食味に関する研究」および「ナバナの安定栽培技術の確立」などの研究として、福岡県農業総合試験場豊前分場普通作物研究室（現在、豊前分場普通作物・野菜研究室）において行なったものである。

本研究の大半は日本土壌肥料学会（小田原・和田 1992, 小田原ら 1994-a, -b, 1997, Wada and Odahara 1993, 和田ら 1994）、日本作物学会（小田原ら 1992, 松江ら 1996, 1997）、福岡県農業総合試験場研究報告（小田原ら 1995）に発表してきたが、それらと未発表の成績も含めてここに体系的にまとめて報告する次第である。

本研究の遂行にあたって、温情ある研究指導と有益な助言を賜った福岡県農業総合試験場豊前分場普通作物研究室長（現在、農産研究所水稻品種研究室長）松江勇次博士に心から感謝の意を表す。研究を実施するにあたって労苦を共にし、協力を惜しまれなかった主任技師比良松道一氏（現在、九州大学農学部附属農場）、技師浜田喜弘氏、技師橋詰文男氏、技師竹本孝博氏をはじめ豊前分場の関係各位に対して心から感謝申し上げる。豊前分場在任中の豊前分場長平川一郎氏、野田政春氏ならびに平川孝行氏には研究に対する助言と激励をいただいたことに感謝申し上げる。元京都農業改良普及所技術主査松本敏満氏（故人）には、ツケナの研究を実施するにあたって有益な指導助言をいただいたことに深く感謝申し上げるとともに、ご冥福をお祈りする。

本論文の取りまとめにあたって、懇篤な指導と助言を賜った九州大学農学部教授、江頭和彦博士に対して心から感謝し、厚くお礼を申し上げる。

また、本論文の作成にあたって懇切な指導と校閲を賜った九州大学農学部教授、池田元輝博士、ならびに本研究の端緒を与えていただき、その遂行と取りまとめにあたり終始指導と助言を賜った九州大学農学部助教授、和田信一郎博士に対して心から感謝の意を表す。

第2章 土壤の陽イオン交換特性が土壤溶液組成に及ぼす影響

2.1 土壤の陽イオン交換特性が土壤溶液組成に及ぼす影響

2.1.1 序 文

序論で述べたように、土壤溶液組成が作物の養分吸収に第一の重要性をもつことを支持する実験結果が集積しつつあり、土壤溶液組成を制御することにより作物の品質を改善することは技術目標としては合理的である。しかし水耕栽培の培地と異なり、土壤溶液は土壤の固相と非常に強く相互作用しており、溶液組成を任意に制御するのは容易でない。相互作用のうち最も重要なもののひとつが陽イオン交換反応である。たとえば、アンモニウム塩を土壤に添加すると、その大部分は土壤に吸着され、その代わりに土壤が吸着保持していたCaイオンなどが放出される。

また、土壤溶液中のある陽イオンたとえばCaイオンが作物に吸収されると、交換平衡が移動し、Caイオンが交換体から土壤溶液に移行することもある。しかも、一般には土壤溶液に溶存する陽イオンの量と、交換性陽イオンの量を比較すると後者が圧倒的に多い。つまり、交換性陽イオンは土壤溶液に対するイオンの給源として作用する。したがって、土壤溶液のあるイオンの濃度を制御するためには、この陽イオン交換を考慮する必要がある。陽イオン交換の重要性についてはこれまでも認識されており、さまざまな粘土鉱物や土壤の陽イオン交換平衡について数多くの研究がなされてきた。しかしこれらの研究の多くは交換平衡の熱力学的平衡定数や交換体の活量定数、粘土鉱物のKに対する特異吸着サイトの特徴づけに終始しており、陽イオン選択性が施用した陽イオンの土壤固相と土壤溶液間の分配に及ぼす影響については踏み込んだ考察が行われていないように思われる。そこでここでは、5点の水田作土層の試料のCa-K交換平衡の選択係数を現地水田にみられる比較的低い水準のK吸着量において、K飽和度の関数として測定した。そして測定した選択係数の値を使って、K選択性が施用したKの分配に及ぼす影響を評価するために数値シミュレーションを行った。

この研究でCa-K交換を問題にしたのには次のような理由がある。第一に、Ca-K交換反応におけるイオン選択性は土壤間差が非常に大きいこと、第二に、Kイオンはそれ自体が植物養分として重要であることによる。最近、岡本ら(1985)は米の食味と窒素およびK含有率の間には負の相関関係があることを報告しており、その相関関係の意義についてはまだ議論の余地があるが、米の品質は部分的には施肥を制御することによって改善されることを示唆している。そして水田土壤で作物に直接有効な窒素の主要形態は $\text{NH}_4\text{-N}$ であること、Kと NH_4 イオンが土壤の陽イオン交換反応においてほとんど同等のふるまいをすることから、土壤のCa-K交換平衡の研究が、施用したKや NH_4 イオンの土壤固相と土壤溶液への分配を制御したり、予測するのに有用と考えられたためである。

2.1.2 実験方法

北部九州の異なる5地域から水田作土を採取し、風乾後、2mmの篩に通した。川副および筑後土壤は河海成沖積物に由来する細粒灰色低地土、宇佐および豊前土壤は安山岩由来の河成沖積物上に発達した細粒灰色低地土、湯山土壤は阿蘇山からの火山灰の沖積物上に発達した典型的な黒ボク土である。表2.1-1に試料の化学的性質を示した。

川副および筑後土壤は主要粘土鉱物としてスメクタイトおよび雲母を、従属粘土鉱物としてカオリン、パーミキュライトを含んでいる。宇佐および豊前土壤は主要粘土鉱物としてハロイサイト(0.7nm)を、従属粘土鉱物として雲母、パーミキュライトおよびクロライトを含んでいる。一方、湯山土壤は非晶質アルミニウムケイ酸塩を含んでいる(Wada 1986)。土壤の粘土画分の電子顕微

表 2.1-1 供試土壌の化学的性質

土壌名	土 壌 型	pH (H ₂ O)	有機態炭素 (g kg ⁻¹)	交換性陽イオン (cmol (+) kg ⁻¹)					
				Ca	Mg	K	Na	合計	E _K ^o
川 副	灰色低地土	6.38	12	14.26	5.88	0.48	0.39	21.01	0.0228
筑 後	灰色低地土	6.21	17	23.17	2.87	0.57	0.35	26.96	0.0211
宇 佐	灰色低地土	5.78	9	8.49	2.85	0.80	0.14	12.28	0.0651
豊 前	灰色低地土	6.95	18	14.15	1.92	0.40	0.20	16.67	0.0239
湯 山	黒 ボ ク 土	5.73	41	10.84	2.98	0.53	0.34	14.69	0.0360

E_K^o : 交換性 K の当量分率

鏡観察によると川副, 筑後および湯山土壌はかなりの量のケイ藻を含んでいた。

Ca-K 交換平衡実験では, 50 mL 容の遠心分離管に土壌試料を 3.00 g 秤取し, 陽イオン交換部位を Ca で飽和するために 30 mL の 0.5 mol L⁻¹ CaCl₂ で 5 回洗浄したのち, 0.02 mol L⁻¹ の一定の Cl 濃度の KCl-CaCl₂ 混合液で平衡状態にした。遠心分離によって得られる上澄液の陽イオン組成が加えた溶液の陽イオン組成と同じ値になるまでこの操作を繰り返した。これは 5 回の繰り返しで充分であった。最後の平衡操作の上澄液を他の容器に移した後, 遠心分離管に残った KCl-CaCl₂ 混合液の量を調べるために遠心分離管の質量を秤った。そして pH7.0 の 1 mol L⁻¹ CH₃COONH₄ 溶液 40 mL を加えて 30 分間振とうし, 吸着されている K と Ca イオンを抽出した後, 遠心分離によって得られた上澄液を 200 mL 容メスフラスコに集めた。この抽出を 5 回繰り返した。そして平衡液と抽出液の K および Ca 濃度をそれぞれ炎光光度法および原子吸光光度法によって測定した。この分析の後, 平衡液の pH をガラス電極法で測定した。以上の平衡実験は 25℃ の恒温室中で行なった。

2.1.3 結果および考察

1) 選択係数

表 2.1-2 に平衡イオン組成の実験データを示した。平衡溶液の pH は川副土壌では一定であったが, 筑後, 宇佐, 豊前および湯山土壌では K 吸着量の増加にともなって 0.1 から 0.3 単位上昇した。全体に平衡溶液 pH は水の pH と大きな差はなく, それは交換性 Al イオンが土壌中に存在せず, しかも Ca 飽和と平衡過程で緩衝能のない塩溶液を使用したためと考えられる。

図 2.1-1 は土壌に吸着されている陽イオンの荷電量 (Q ; mol (+) kg⁻¹) を K の当量分率 (E_K ; 交換性 K イオンの量を交換性陽イオンの合計量で割った値) に対してプロットしたものである。ただし, これは Ca が 2 価の陽イオンとして吸着されているという仮定に基づいている。 Q の値の変化は小さく, しかも非晶質アルミニウムケイ酸塩が主要な鉱物である湯山土壌を含むすべての土壌で E_K 値に関わらず, 交換性陽イオンの合計量に近い値であった。土壌構成物の弱いイオン化反応基の解離またはプロトネーションは比較的強い塩基または酸が加えられたときだけにおこること (Wada 1988) と, そのような塩基または酸を平衡実験において加えていないことから, これらのことは合理的な実験結果であるといえる。吸着された陽イオンの荷電量が一定であるということは, Sposito et al. (1983) の報告による CaCl⁺ の選択的吸着は, この 5 つの供試土壌では無視し得ることを示している。さらに吸着された K イオンの固定や CH₃COONH₄ 溶液による抽出過程での吸着 Ca の補足 (Talibudeen 1981) も同様に無視し得る。

Ca-K 交換反応は次式で表わすことができる。



ここで X は交換体の単位荷電部分である。上の反応の Vanselow の選択係数は次式で定義される。

表 2.1-2 平衡イオン組成の数値

		溶液組成 (mmol L ⁻¹)			交換態 (cmol kg ⁻¹)	
		Ca	K	pH	Ca	K
川 副		9.800	0.400	6.39	10.85	0.65
		9.500	1.000	6.43	10.59	1.17
		9.250	1.500	6.43	10.52	1.41
		9.000	2.000	6.43	10.51	1.56
		8.000	4.000	6.37	9.72	2.80
		7.000	6.000	6.35	9.08	3.93
		5.000	10.000	6.37	8.03	6.34
筑 後		9.800	0.400	5.91	13.29	0.60
		9.500	1.000	6.07	12.88	1.15
		9.250	1.500	6.14	12.78	1.43
		9.000	2.000	6.13	12.53	1.71
		8.000	4.000	6.16	11.67	2.96
		7.000	6.000	6.07	11.29	4.17
		5.000	10.000	6.14	10.05	6.90
宇 佐		9.800	0.400	5.77	6.08	0.66
		9.500	1.000	5.87	5.78	1.03
		9.250	1.500	5.93	5.67	1.22
		9.000	2.000	5.95	5.61	1.40
		8.000	4.000	5.95	5.20	2.07
		7.000	6.000	5.98	4.78	2.64
		5.000	10.000	6.00	4.44	3.85
豊 前		9.200	0.390	6.32	7.89	0.60
		9.200	0.960	6.33	7.80	1.04
		8.750	1.460	6.35	7.73	1.46
		9.000	2.000	6.36	7.22	1.55
		8.000	4.000	6.43	7.18	2.34
		7.000	6.000	6.48	6.89	2.98
		6.000	8.000	6.57	6.62	3.50
		5.000	10.000	6.62	6.43	4.35
湯 山		9.800	0.400	5.58	7.63	0.57
		9.500	1.000	5.60	7.51	0.87
		9.250	1.500	5.62	7.46	1.07
		9.000	2.000	5.58	7.25	1.11
		8.000	4.000	5.64	7.12	1.49
		7.000	6.000	5.65	6.88	1.91
		5.000	10.000	5.69	6.59	2.81

$$K_v = \frac{N_K^2 \gamma_{Ca} C_{Ca}}{N_{Ca} \gamma_K^2 C_K^2} \quad (2.1-2)$$

ここで N は吸着されている陽イオンのモル分率、 C は溶液中の陽イオンのモル濃度、 γ は活量係数である。 i イオン ($i=Ca, K$) の活量係数の計算には Davies 式を用いた。それはこの式が混合溶液において信頼性のある活量係数値を与え、荷電種の化学的性質に依存しない補正パラメータを1つだけ含む点で利用上便利だからである (Sposito 1984)。 γ_i は温度が25℃のときには

$$\log \gamma_i = -0.5116 z_i^2 \left[\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right] \quad (2.1-3)$$

と表される。ここで Z_i は i イオンの価数、 I は平衡溶液のイオン強度を表す。またイオン強度は次式で与えられる。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{all ions} z_i^2 C_i \quad (2.1-4)$$

ここで z_i は i イオンの価数、 C_i は i イオンのモル濃度である。

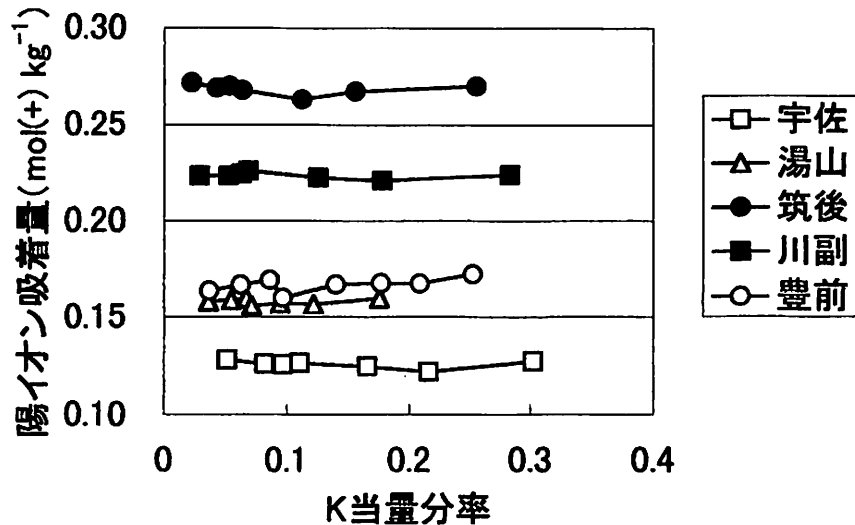


図 2.1-1 5 点の試料の陽イオンの合計吸着量と K 当量分率との関係

$N_K = 2 E_K / (2 E_K + E_{Ca})$, $N_{Ca} = 1 - N_K$, $2 C_{Ca} + C_K = C_{Cl}$ という関係を利用して (2.1-2) 式を整理すると次の式となる。

$$K_v = \frac{2 E_K^2 (C_{Cl} - C_K) \gamma_{Ca}}{(1 - E_K^2) C_K^2 \gamma_K^2} \quad (2.1-5)$$

(2.1-3) 式から (2.1-5) 式を用いて、表 2.1-2 の実験データから $\ln K_v$ の値を計算し、 E_K に対してプロットしたものが図 2.1-2 である。

この図から $\ln K_v$ はすべての土壌で E_K の増加とともに曲線的に減少しており、これは Ca-K 交換平衡における $\ln K_v - E_K$ 関係の一般的な特徴である (Jensen and Babcock 1973, Jensen 1973)。しかしある E_K 値での $\ln K_v$ 値は土壌によって異なった値をとり、 E_K 値が 0.07 より小さいところでは宇佐土壌が最も大きな値をとり筑後土壌が最も小さい値を示した。 E_K 値が 0.15 より小さいとこ

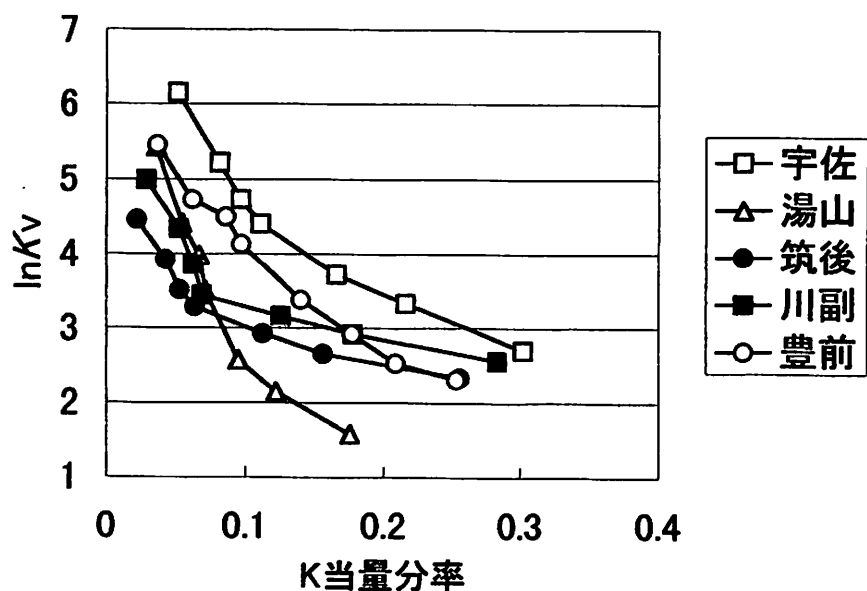


図 2.1-2 5 点の試料における Vanselow 選択係数と K 当量分率との関係

ろではスメクタイト質の筑後と川副土壌の $\ln K_v$ 値は、ハロイサイト質の宇佐と豊前土壌より常に低い値を示し、この傾向は Jensen (1973) の報告と一致した。

一方、湯山土壌は特徴的な $\ln K_v - E_K$ 関係を示した。 $\ln K_v$ 値は $E_K = 0.04$ ではハロイサイト質の豊前土壌と同じ値であったが、 E_K 値が 0.04 から 0.18 に増加するにともない $\ln K_v$ 値は急速に減少し、およそ 1 となった。このように K_v 値が小さい値をとることは多量の有機物や非晶質アルミニウムケイ酸塩を含む土壌での結果と一致する (Goulding 1983)。湯山土壌で E_K 値が小さいときに比較的大きな K_v 値を示しているのは、K 選択性を高める要因となる土壌有機物 (Poonia et al. 1986, Poonia and Niederbudde 1990) やケイ素含量の高い非晶質アルミニウムケイ酸塩 (Perrott 1981) を多く含んでいることに起因すると考えられる。

$\ln K_v$ 値は E_K が 0 から 0.1 という比較的小さい値の範囲で、ほぼ直線的に減少することから、本研究での数値計算では関数的な依存を表現するために次式を使った。

$$\ln K_v = aE_K + b \quad (2.1-6)$$

表 2.1-3 各土壌の (2.1-6) 式に対する回帰係数の値

土 壌 名	回 帰 係 数		R^2	直線部分の E_K 値の範囲
	a	b		
川 副	-37.254	6.143	0.966	0.03-0.07
筑 後	-28.752	5.098	0.991	0.02-0.07
宇 佐	-29.990	7.683	0.998	0.05-0.11
豊 前	-20.652	6.162	0.961	0.03-0.10
湯 山	-48.811	7.140	0.989	0.03-0.10

直線回帰分析で測定した係数 a , b の値を、直線の範囲の E_K 値とともに表 2.1-3 に示した。回帰係数はこの一次式が E_K 値の示された範囲で $\ln K_v$ が関数的に E_K に依存していることを十分に説明

している。この式の適応性は比較的狭い直線の範囲の E_K に制限されるものの、その範囲は供試土壌の E_K 値（表 2.1-1）を十分に包括しており、通常の農業を行う上で考えられる E_K 値の変化は後で述べるように比較的小さいことから、この式はこれらの土壌の Ca-K 交換平衡のシミュレーションに有効であると考えられる。

2) 土壌の K 選択性が土壌溶液 K 濃度に及ぼす影響

平衡状態にある土壌-土壌溶液系に一定量のカリウム塩が加えられたとき、(2.1-1) 式の反応は新しい平衡状態に達するまで右側に進行する。例えば K 施用量、土壌の K 選択性あるいは他の関連した土壌特性の関数として、施用された K が固相と液相にどのように分配されるかといった反応の進行程度を知ることが実用面で重要である。この問題は交換平衡とそれに加えて質量保存を記述した式を解くことによって処理することが可能である。

いま 1 kg の土壌が VL の KCl-CaCl₂ 混合溶液と平衡状態にあるとする。初期の E_K 、 C_{cl} および K_v の値が与えられれば、この系の初期のイオン組成は、(2.1-3) から (2.1-5) 式を同時に解くことによって計算できる。 q mol の KCl がこの系に加えられた場合には E_K と C_K はともに増加し、新しい平衡状態での E_K と C_K は K の質量保存を表わす次式によって初期の E_K (E_K^0) と C_K (C_K^0) と関係づけられる。

$$VC_K^0 + QE_K^0 + q = VC_K + QE_K \quad (2.1-7)$$

ここに Q は前に定義した吸着陽イオン荷電の合計量である。したがって、KCl を加えた後の C_K 値は (2.1-3) から (2.1-7) 式を同時に再計算することによって得られる。

上述のような手順によって KCl 施用後の平衡 K 濃度を異なる 2 通りの条件で計算し、結果を図 2.1-3 および図 2.1-4 にまとめた。

第 1 のシミュレーション（図 2.1-3）では E_K を交換性陽イオン組成（表 2.1-1）から計算した E_K^0 とし、 K_v 値は (2.1-6) 式と与えられた E_K^0 から計算した一定値を用いた。(2.1-7) 式における Q にはそれぞれの土壌の Q の値の平均値（図 2.1-1）を用いた。また初期 C_{cl} は 0.02 mol L^{-1} 、溶液と土壌の比を 1.0 L kg^{-1} と仮定した。図 2.1-3 から C_K 値はすべての土壌で KCl の添加にともない増加したが、増加率は K の吸着がない仮定とした場合に比べてかなり低い値であり、土壌による K の交換吸着が重要であることを示唆する。すべての KCl 添加量で C_K 値は、宇佐土壌で最も大きく、湯山 > 筑後 > 川副 > 豊前土壌の順であった。

第 2 のシミュレーション（図 2.1-4）では第 1 の場合と同様に (2.1-6) 式によって K_v 値を E_K の関数として与え、表 2.1-1 の原土の E_K 値を E_K^0 とした。図 2.1-4 では、 C_K^0 の値はすべての土壌で第 1 のシミュレーションで得られた値と同じであるが、 C_K 値は K 施用量の増加とともに、さらに急激に増加し、その結果として C_K 値はすべての土壌で第 1 のシミュレーションで得られる値より常に高い値を示した。2 mmol kg⁻¹ の K 施用量における C_K 値は、 K_v 値が変化するという仮定のもとでは、宇佐土壌で 0.94 mmol L^{-1} 、湯山土壌で 0.71 mmol L^{-1} となった。一方、 K_v 値が一定であると仮定した第 1 のシミュレーションでは宇佐土壌で 0.78 mmol L^{-1} 、湯山土壌で 0.56 mmol L^{-1} となった。第 2 のシミュレーションで得られた K 濃度は明らかに K_v が E_K 値に関数的に依存していることによるものである。すなわち、 $\ln K_v$ 値は E_K 値の増加とともに直線的に減少するが、このことは K 吸着量の増加とともに土壌の K の選択性が次第に低下することを意味する。以上のような 2 通りのシミュレーションの結果の相違は筑後、川副および豊前土壌においてもみられるが、その差は宇佐、湯山土壌よりも小さく、おそらくこれは、これらの 3 土壌の高い Q 値と低い E_K^0 値によるものと考えられる。

土壌の陽イオン交換を含む数値シミュレーションにおいては、選択係数はしばしば一定であると

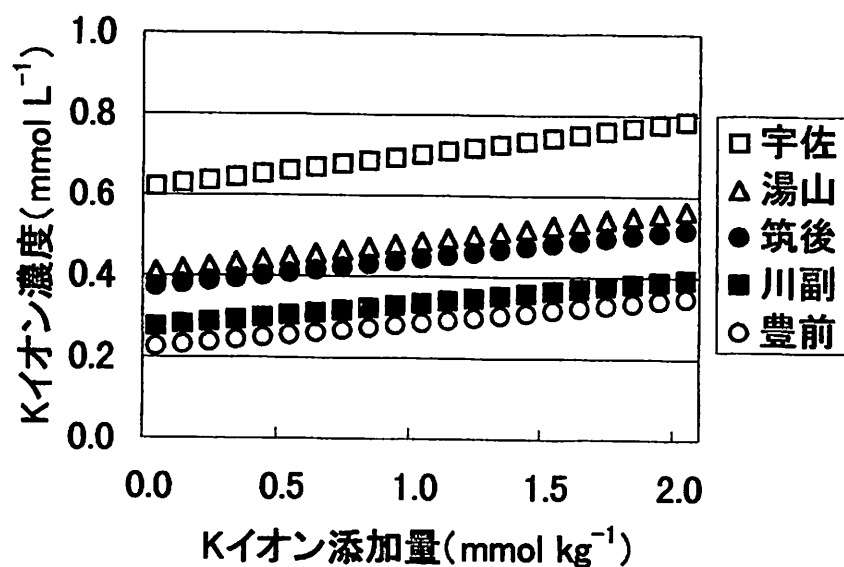


図 2.1-3 K 施用量にともなう土壌溶液 K 濃度の計算値

初期 E_k 値はそれぞれの土壌の交換性陽イオン組成から計算し、 K_v 値は初期値をはじめから終わりまで使用した。

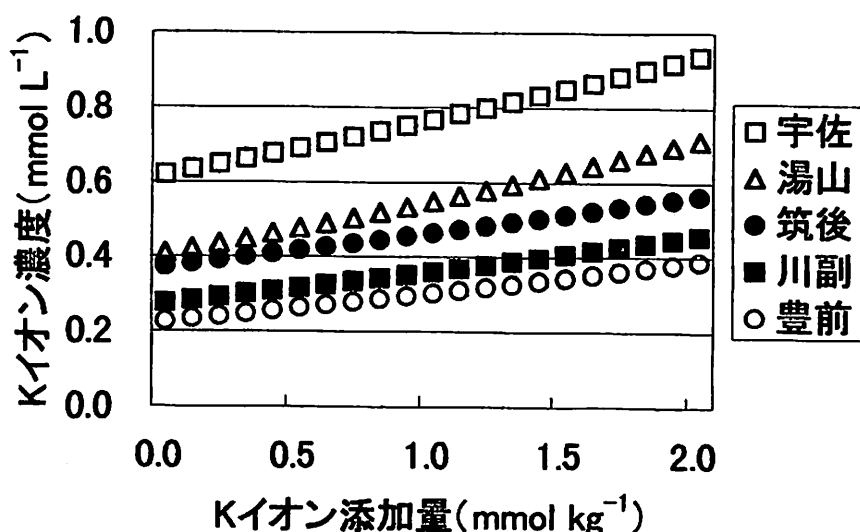


図 2.1-4 K 施用量にともなう土壌溶液 K 濃度の計算値

初期 E_k 値はそれぞれの土壌の交換性陽イオン組成から計算し、 K_v 値は E_k 値の関数として与えた。

仮定されてきた (Mangold and Tsang 1991)。しかし本報告の結果にみられるように、この仮定はカリウム塩の負荷が非常に小さく、交換性イオン組成の変化が無視できる場合にのみ正しい。この条件が満足されない場合には選択係数の値は交換性イオン組成の関数として正確に与えられなければならない。

日本の水稲作付圃場では毎年 50 から 100 kg ha⁻¹ のカリが施用されており、これは作土の厚さを 10 cm とした場合には K でおよそ 1 から 2 mmol kg⁻¹ に相当する。これらの値と、図 2.1-3, 2.1-4 は K_v を E_k の関数として与えた方が土壌溶液 K 濃度の推定のためには好ましいことを示している。陽イオン交換容量の低い土壌ではとくにそうであると考えられる。2通りの数値シミュレー

ションは、施用した K の大部分は土壌に保持されるが平衡溶液の K 濃度と施用した K を保持する割合は土壌によってかなり異なることを示している。図 2.1-4 に示したように、豊前土壌では 2 mmol kg^{-1} の K の施用による K 濃度増加は $0.15 \text{ mmol kg}^{-1}$ であったが、宇佐および湯山土壌ではその 2 倍に達した。

ほぼ等しい E_p 値を示す筑後、川副および豊前土壌間で、図 2.1-2 と図 2.1-4 を対比すると、平衡溶液の K 濃度は K 選択性が高い土壌ほど低いことを示している。このことは K 選択性は明らかに溶液中の K 濃度に影響を与える重要な要因のひとつであることを示唆する。これに反して、宇佐土壌は最も高い K_v 値を示す（図 2.1-2）にも関わらず、K 濃度は 5 つの土壌のうち最も高い（図 2.1-4）。このことは E_p 値がもうひとつの重要な要因であることを示している。しかしながらこれらの要因の影響は相互に関連しており、K 添加に対する土壌の反応を、測定した K_v と E_p の値から単純に予測することは難しい。陽イオン交換モデルを基礎にした数値計算は、施用した K の分配について定量的に調べるためには明らかにより良い方法である。さらに土壌溶液の K 濃度を望ましい水準にするために必要な K の施用量を提案することも可能である。

水稲作付期間中の土壌溶液には K および Ca に加えて Na, Mg, NH_4 および Fe(II) といった陽イオンが含まれているため、土壌の Ca-K 交換特性の評価は、厳密には土壌の全体的な陽イオン交換平衡のモデル化には不十分である。しかしながら、土壌と粘土鉱物の Ca-Mg 交換平衡に関するいくつかの実験で、Ca と Mg の選択性の間にはわずかな差しかないことが示されている (Bruggenwert and Kamphorst 1979, 小田原・和田 1992)。K- NH_4 交換平衡における実験でも、これらの二つの陽イオンとも選択性にはわずかな差がなく、ほとんど同等のふるまいを示している (Bruggenwert and Kamphorst 1979)。また、湛水条件下の土壌の交換性陽イオン組成と土壌溶液組成の分析結果 (土屋ら 1986) は Ca- Fe(II) 交換平衡の選択係数が 0.5 から 1.2 という比較的狭い範囲にあることを示している。これらの事実は、Ca, Mg, K, Na, Fe(II) および NH_4 を含む陽イオン交換系が、Na, (K+ NH_4) および (Ca+Mg+ Fe(II)) という 3 成分系として取り扱うことが可能であることを示唆する。交換性 Na の存在が無視できる場合には、この系は、(K+ NH_4) および (Ca+Mg+ Fe(II)) の類似の 2 構成要素系にさらに単純化でき、これは K と Ca だけからなる系に類似すると考えることができる。したがって比較的低い K 当量分率での交換体組成の Ca-K 交換反応の選択係数の関数依存性に関する実験と理論的研究によって、施肥などに対する土壌溶液組成の変化の予測を可能にすると考えられる。

2.1.4 摘 要

土壌の Ca-K 交換平衡に関する定量的な知見が、施用した K や NH_4 の土壌固相と土壌溶液への分配を予測するのに有用であることから、種類を異にするいくつかの土壌を用いて、K 選択性が施用した K の分配に及ぼす影響を評価するために数値シミュレーションを行った。そしてこの方法により土壌溶液組成の予測がどの程度可能であるかを検討した。

- 1) Ca-K 交換平衡の選択係数 K_v を K 当量分率の関数としてスメクタイト質土壌、ハロイサイト質土壌および非晶質アルミニウムケイ酸塩鉱物を主とする土壌で測定した。その結果、すべての土壌で K 当量分率の増加とともに選択係数の値は減少した。そして、ハロイサイト質土壌はスメクタイト質土壌より同じ K 当量分率では高い K_v 値を示した。一方、非晶質アルミニウムケイ酸塩鉱物を主とする土壌の K_v 値は、低い K 当量分率ではハロイサイト質土壌と同等の値であったが、高い K 当量分率ではスメクタイト質土壌より低い値を示した。
- 2) カリウム塩施用後の土壌溶液 K 濃度は、土壌によって大きく異なるものの、交換性 K 含量と土壌の K 選択性に依存しており、土壌溶液組成制御のための重要な要因であることが明らかになった。

2.2 陽イオン交換特性の異なる水田土壌の土壌溶液組成の施肥に対する反応

2.2.1 序 文

2.1において、Ca-K交換平衡実験から、Kイオン選択性の土壌間差はかなり大きいこと、Kイオン吸着量の増大とともに選択係数が低下することを示した。またK肥料施肥にともなう土壌溶液Kイオン濃度の予測についても論じた。そして、土壌溶液のイオン組成は、単純にイオン選択性によって決まるのではなく、初期交換性陽イオン組成に依存することを示した。これらの要因間の関係はいくつかの方程式で表現することができ、それを解くことにより、たとえば施肥による土壌溶液組成の変化を予測することが原理的には可能である。しかしこれを実際に応用するには、農耕地土壌にCaとKのほかにMg, Na, 水田土壌ではFe(II)などのイオンが共存することを考慮する必要がある。ところがこれらイオン間の交換選択性をすべて評価し、予測のための計算に厳密に反映させることは現在のところ非常に難しい。現実的な選択肢は、KイオンとNH₄イオン、そしてCaイオン、MgイオンおよびFe(II)イオンをそれぞれ同一視し、場合によってはNaイオンを無視することによって土壌を疑似2成分の陽イオン交換系とみなすことである。

そこで黒ボク土と灰色低地土の2つの土壌を用いたポット試験により水稻を栽培し、水稻生育中の土壌溶液陽イオン濃度と供試土壌の陽イオン交換選択性を調べ、陽イオン選択性と土壌溶液組成の関係を検討すると同時に、上記の近似により土壌溶液組成の予測がどの程度可能であるかを検討した。

2.2.2 実験方法

福岡県農業総合試験場豊前分場内の灰色低地土および福岡県豊前市吉木の黒ボク土の2水田土壌の作土を用いた。これらの試料を選択したのは、同地域のこれら2つの土壌において、同一品種を同一の施肥管理条件で栽培しても黒ボク土からの白米の食味が有意に低いことの原因が長年問題にされてきたからである。2試料のうち灰色低地土は2.1の実験で供試した「豊前」試料と同一土壌から採取したものであるが、採取地点、採取時期は異なる。供試土壌の化学性は表2.2-1に示した。

表 2.2-1 供試土壌の化学性

土 壌 の 種 類		交換性陽イオン (cmol (+) kg ⁻¹)				pH(H ₂ O)
		Ca	Mg	K	Na	
灰色低地土	原 土	11.42	1.62	0.52	0.15	6.06
	跡 地	11.04	1.64	0.38	0.29	6.28
黒 ボ ク 土	原 土	17.59	2.88	1.81	0.20	6.18
	跡 地	18.79	3.01	1.45	0.45	6.23

1/2000 a ワグネルポットに1ポット当たり乾土として灰色低地土を 8.68 kg, 黒ボク土を 7.68 kg 充填した。移植2日前に湛水して、基肥を深さ13 cmまで混和した。肥料は尿素入り硫加リン安48号を使用し、N, P₂O₅, K₂Oそれぞれポットあたり0.5 gを施用した。そして1991年6月25日にコシヒカリの稚苗3株を1株3本でポットに移植した。追肥は基肥と同じ肥料をN, P₂O₅, K₂Oの成分量で、8月1日に0.20 g, 8月8日に0.15 g表層に分施した。

水稻生育中の土壌溶液を採取するため、鳥山の方法(植物栄養実験法編集委員会 1990)によって、ポットに植えた水稻3株の中央に長さ10 cm, 直径0.2 cmの土壌溶液採取管(ポーラスカップ)を2~12 cmの深さに埋設した。移植1週間後の7月1日から1週間ごとに13回、真空採血管

で土壤溶液を採取した。1回当たりの溶液の採取量は約 10 mL であった。採取した土壤溶液中の陽イオン濃度の分析は、Ca, Mg を原子吸光光度法, K, Na を蛍光光度法, $\text{NH}_4\text{-N}$ をインドフェノール法 (Keeney and Nelson 1982) で行ない、3 連の平均で値を示した。

次に供試土壤による Ca-K 交換選択性の違いを調べるために、表 2.2-1 に示した性質の原土を用いて、Ca-K 交換反応の Vanselow の選択係数 (K_v) を土壤の K イオン吸着量の関数として測定した。実験は 2.1 と同様の方法で行った。

2.2.3 結果および考察

原土の交換性陽イオン量は表 2.2-1 に示したように、どの陽イオンについても黒ボク土の方が高く、Ca イオン, Mg イオン, Na イオンは灰色低地土の 1.6~1.8 倍であり、K イオンは 3.9 倍であった。陽イオンの合計当量数は 1.8 倍であった。交換性 K イオンの当量分率は、黒ボク土の 0.081 に対して灰色低地土では 0.038 と約 2 分の 1 であった。pH (H_2O) は両土壤ともほぼ同じ値であった。

水稻生育期間全体の土壤溶液 K イオンおよび NH_4 イオン濃度の推移を図 2.2-1 に示した。K イオン濃度は全期間を通じて黒ボク土のほうが灰色低地土より高く、これは黒ボク土で交換性 K イ

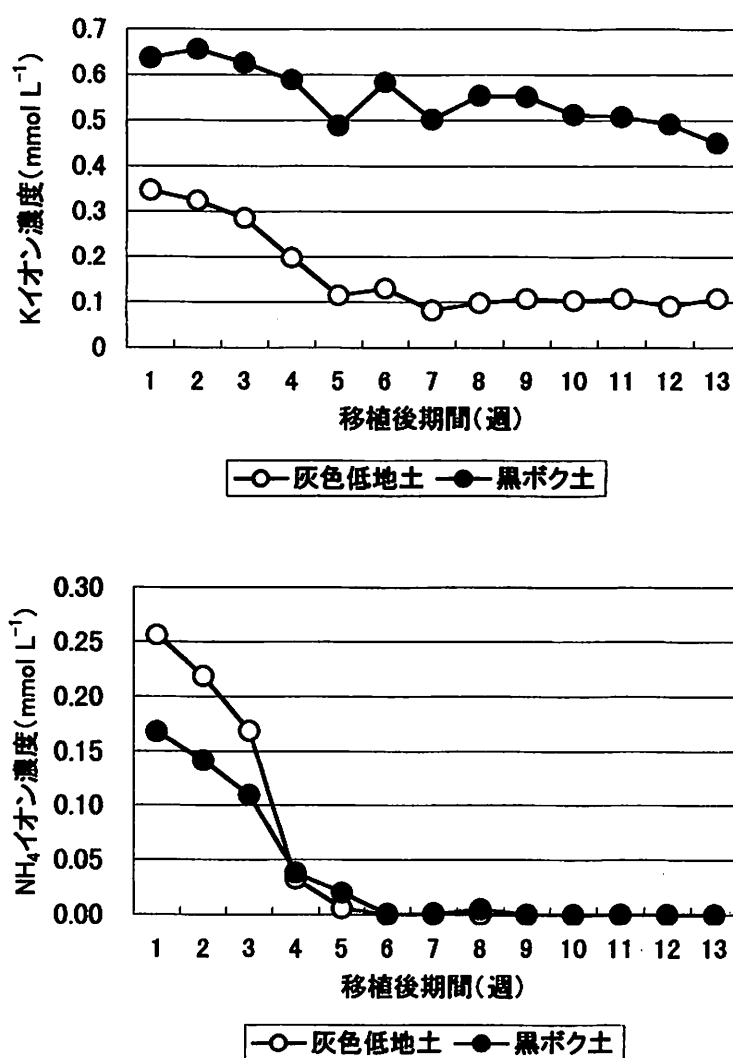


図 2.2-1 水稻生育中の土壤溶液 K, NH_4 イオン濃度の推移

オン含量と交換性 K イオンの当量分率が高かったことと現象的には対応する。土壤溶液 K イオンの初期濃度は黒ボク土で 0.64 mmol L^{-1} から漸減し、12 週間後には 0.49 mmol L^{-1} に減少した。灰色低地土では 0.35 mmol L^{-1} から 0.09 mmol L^{-1} に減少した。これは跡地土壤の交換性 K イオン含量の減少に対応しており、水稻による吸収の結果と考えられる。

土壤溶液 NH_4 イオンの初期濃度は黒ボク土および灰色低地土でそれぞれ 0.17 , 0.26 mmol L^{-1} で、単位乾土量あたりの N 施用量は黒ボク土の方が多いにも関わらず、黒ボク土で低い値を示した。そして 3 週間後までは土壤溶液 NH_4 イオン濃度は減少しながらも両土壤とも同じ濃度比で推移した。5 週間後以降は追肥施用にも関わらず、土壤溶液 NH_4 イオンはほとんど消失した。

土壤溶液 Ca イオン濃度は移植後 4 週間はほぼ一定で、その平均値は黒ボク土で 1.67 mmol L^{-1} 、灰色低地土で 1.81 mmol L^{-1} とほぼ同じ値であった。土壤溶液 Mg イオン濃度も Ca イオンと同様、移植後 4 週間はほぼ一定で、その平均値は黒ボク土で 0.51 mmol L^{-1} 、灰色低地土で 0.45 mmol L^{-1} とほぼ同じ値であった。交換性 Ca イオン、Mg イオン含量は黒ボク土の方が多いにも関わらず、土壤溶液濃度はそれに対応しなかった。

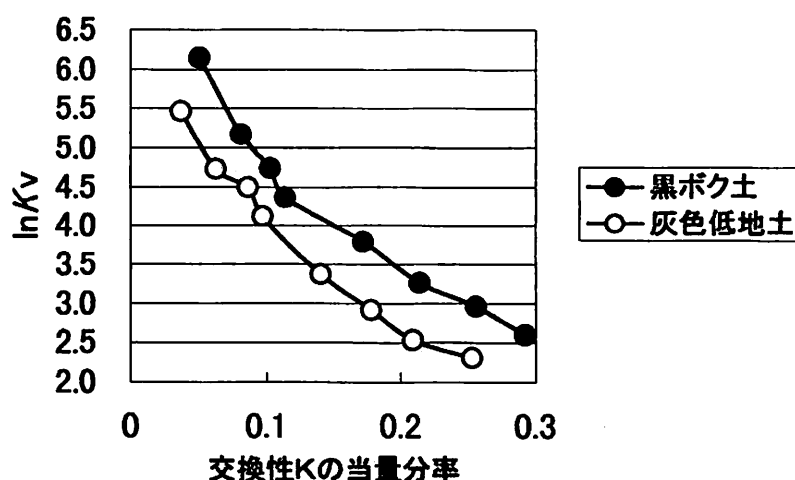


図 2.2-2 土壤の Ca-K 選択係数 K_v と交換性 K 当量分率との関係

図 2.2-2 に土壤の交換性 K イオンの当量分率と Ca-K 選択係数 K_v の自然対数との関係を示した。 $\ln K_v$ は同じ K 当量分率では常に黒ボク土の方が灰色低地土より 0.7~0.8 高い値を示した。また両土壤とも K 当量分率の増加とともに $\ln K_v$ 値は減少した。このように、土壤の K 当量分率によって $\ln K_v$ 値が変化することは他の多くの土壤でもみられる一般的な傾向であることは前節で示したとおりである。供試土壤の K 当量分率は黒ボク土では 0.08、灰色低地土では 0.04 で、その時の $\ln K_v$ 値は図 2.2-2 から黒ボク土で 5.2、灰色低地土で 5.5 となり、灰色低地土の方が僅かではあるが高くなった。

前節で Ca-K 交換反応系における、 K_v 値、初期の交換性 K イオンの当量分率、土壤溶液の合計イオン濃度および K 塩添加量から、土壤溶液中の K イオン濃度を計算する方法を示した。ここでは交換性陽イオンとして Ca イオン、K イオンの他に Mg イオン、Na イオン、 NH_4 イオンおよび Fe(II) イオンを考慮しなければならないので同じ方法を厳密に適用することはできない。しかし、これまでの研究結果から、よい近似で Mg イオンと Ca イオン、K イオンと NH_4 イオンの交換選択性がそれぞれ同じであると仮定することができ、水稻の移植直後には Fe(II) イオンの存在は無視できる。さらに、交換性陽イオンのうち最も量の少ない Na イオンの存在を無視すれば、前節と基本的に同じ方法を適用して土壤溶液の K イオンおよび NH_4 イオン濃度が計算できる。

まず, Ca イオンと Mg イオン, K イオンと NH_4 イオンを同一視することにより

$$K_V = \frac{(N_K + N_{\text{NH}_4})^2 \gamma_2 (C_{\text{Ca}} + C_{\text{Mg}})}{(C_{\text{Ca}} + C_{\text{Mg}}) \gamma_1^2 (C_K + C_{\text{NH}_4})^2} \quad (2.2-1)$$

が成立する。ここで γ_1 と γ_2 はそれぞれ 1 価および 2 価イオンの活量係数である。これらは Davies の式 (2.1-3) とイオン強度 (2.1-4) から計算される。また, K イオンと NH_4 イオンは同一視される, つまり両者の Ca イオン, Mg イオンに対する選択性は等しいと仮定されているので,

$$\frac{C_K}{N_K} = \frac{C_{\text{NH}_4}}{N_{\text{NH}_4}} \quad (2.2-2)$$

が成立する。また, (2.1-7) に相当する式が K と NH_4 イオンの両方について成立する。

これらの式を連立させて解くことにより K および NH_4 肥料の施肥量に基づいて水稻移植直後の土壌溶液の K イオンおよび NH_4 イオン濃度を予測し, 結果を表 2.2-2 にまとめて示した。表からわかるように予測値と実測値の一致は非常にいい。しかし, 様々なかなり粗い仮定をしたことを考慮するならば, この結果は誤差の相互の打ち消しあいによるかもしれない。また予測に際して土壌溶液の全イオン濃度の値を与えたこと, さらに予測が移植直後のものだけであるなどの点でこの予測の実用的な価値は高いとはいえない。しかし, 表 2.2-1 と表 2.2-2 の比較からわかるように, 黒ボク土において土壌溶液 K イオン濃度が高いこと, 乾土あたりの NH_4 塩添加量は黒ボク土で多いのに NH_4 イオン濃度は低いことなどの特徴はうまく再現されている。

次に水稻生育終期の土壌溶液組成 (表 2.2-3) と跡地土壌の分析結果 (表 2.2-1) から, Fe(II) イオンを Ca イオンと同等とみなして, 2.2-1 式により $\ln K_V$ 値を計算した。その結果, 灰色低地土の

表 2.2-2 水稻移植直後の土壌溶液 K, NH_4 濃度の予測値および実測値

	K 濃度 (mmol L^{-1})		NH_4 濃度 (mmol L^{-1})	
	予測	実測	予測	実測
灰色低地土	0.32	0.35	0.26	0.26
黒ボク土	0.62	0.64	0.14	0.17

表 2.2-3 生育終期の土壌溶液陽イオン組成

土壌の種類	陽イオン濃度 (mmol L^{-1})				
	Ca	Mg	K	Na	Fe(II)
灰色低地土	7.70	2.15	0.10	1.63	2.20
黒ボク土	5.20	1.75	0.49	1.42	1.37

$\ln K_V$ は 8.0, 黒ボク土では 6.0 であった。図 2.2-2 からそれぞれの土壌の E_K 値における $\ln K_V$ 値を求めると, その値は灰色低地土では 5.6, 黒ボク土では 5.8 であり, 黒ボク土ではその差は比較的小さいものの, 灰色低地土では大きな差が生じた。この原因として土壌の還元にとまなう Fe(II) イオンの増加により土壌の交換性陽イオン組成が変化したこと, 交換性 K イオンの減少と交換性 Na イオンの増加により相対的に Na イオンの存在が無視できなくなったことが考えられる。水稻生育中の土壌溶液 K イオンや NH_4 イオン濃度の予測には, 水稻による養分吸収や土壌の還元にとまなう陽イオン交換特性の変化などを考慮する必要がある一層複雑となる。

2.2.4 摘 要

水稻栽培中の土壌で土壌溶液 K イオンおよび NH_4 イオン濃度の実測値と Ca-K 交換平衡の選択係数 K_v を用いた数値シミュレーションによる値を比較した結果、土壌溶液のイオン濃度の土壌間差異は土壌のイオン交換特性によって規定されていることが強く示唆された。しかし、水稻生育中の土壌溶液組成の予測は水稻による養分吸収、土壌還元などの影響を考慮する必要がある、現時点では困難であると考えられた。

2.3 水分含量変化による土壌溶液組成の変化とその予測手法

2.3.1 序 文

前節で述べた実験結果は、陽イオン交換反応を定量的に考慮することにより、施肥による土壌溶液組成の変化を予測できることを示している。ただ、この予測を行うには土壌の陽イオン交換特性が既知である必要があるが、2.1 で述べたようにこれを求めるための実験は Ca-K の 2 成分に限定してもなお必ずしも簡単ではない。実用的な見地からは土壌の陽イオン選択係数の測定なしに土壌溶液組成の予測が可能であることが望ましい。

このような観点からは、いわゆる AR^K の不変性に関する経験則を利用することが一つの有望な方向と考えられる。 AR^K とは土壌溶液の K イオンの活量 (a_K) の Ca イオンと Mg イオンの活量の和 ($a_{Ca} + a_{Mg}$) の平方根に対する比のことで、次式で定義される。

$$AR^K = \frac{a_K}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}} \quad (2.3-1)$$

この経験則は、K, Ca および Mg イオン濃度の水分含量変化にともなう変化について認められているもので、理論、実験両面からいくつかの研究がなされている (Taylor 1958, Moss 1963, Beckett 1964)。もしこの経験則が十分の精度で常に成立するのであれば、陽イオン交換選択性の測定なしに土壌溶液組成の、水分含量変化にともなう変化の予測が可能であるだけでなく、比較的小量のカリウムやアンモニウムを施肥したときの土壌溶液組成変化についての予測にも応用できる可能性がある。しかしこれまでのところ、どのような条件下、あるいはどのような性質の土壌に対してどの程度の精度で成立するのかについて一般的な判断基準を示した例はみあたらない。そこで本節では、交換体イオン組成が変化しないように土壌溶液を希釈、濃縮するとき AR^K が厳密に一定であるための条件を理論的に求め、次に既往のイオン交換平衡の実験データを利用して実際の土壌や粘土鉱物でこの条件がどの程度に満たされているのかを調べた。ついで陰イオン吸着能のない土壌が K イオンと Ca イオンのみを含む場合、土壌に純水を添加して土壌溶液が希釈されるとき AR^K の変化を数値計算し、土壌の陽イオン交換容量の大きさなどがその変化にどのように影響するかを調べた。

2.3.2 AR^K が厳密に不変であるための一般条件

AR^K の不変性に関する経験則の原形は Schofield (1947) の ratio law である。Schofield は ratio law を基礎づけるためにドンナン平衡の概念を用いた。しかしそれらを適用するにはイオン交換体表面でのイオンの分布に関して実験的に適否を確かめることの出来ない仮定が必要である。そこで

ここではもっと巨視的な立場から検討を始める。いま 1 当量の負電荷を持つ交換体を X^{-1} と書くことにすれば化学量論的な Ca-K および Mg-K 交換反応は次のように書ける。



これらのイオン交換平衡に対する選択係数はそれぞれ次式で定義される (Sposito 1981)。

$$K_{V(Ca-K)} = \frac{N_{Ca} a_K^2}{N_K^2 a_{Ca}} \quad (2.3-4)$$

$$K_{V(Mg-K)} = \frac{N_{Mg} a_K^2}{N_K^2 a_{Mg}} \quad (2.3-5)$$

ここで N_i は交換体上における i イオンのモル分率である。もし系が Ca-K の 2 成分系であるならば、この場合の AR^K は $a_K / \sqrt{a_{Ca}}$ であるので結局 (2.3-4) 式は

$$K_{V(Ca-K)} = \frac{N_{Ca}}{N_K^2} (AR^K)^2 \quad (2.3-6)$$

となる。(2.3-5) 式についても類似の式が成立する。選択係数は一般には交換反応の熱力学的平衡定数とは異なり、その値は温度と圧力だけではなく交換体の交換性イオン組成にも依存する。以下の議論では温度と圧力を一定として考える。もし、交換体のイオン組成が定まればそれに対応して選択係数の値が一義的に定まるのであれば、(2.3-6) 式からわかるように、 AR^K の値も一義的に定まる。Mg-K 系に対しても同じことがいえる。つまり Ca-K または Mg-K の 2 成分イオン交換反応系において、交換体のイオン組成を変化させないようにして平衡溶液を希釈したり濃縮するとき AR^K が不変であるための条件は、イオン交換反応の選択係数がそのイオン組成のもとで常に一定値をとることである。

ところで一般には AR^K は 2 成分系に対してではなく 3 成分系に対して (2.3-1) 式によって定義されている。(2.3-4), (2.3-5) 式をそれぞれ a_{Ca} / a_K^2 および a_{Mg} / a_K^2 について解き辺々加えると

$$\frac{a_{Ca} + a_{Mg}}{a_K^2} = \frac{1}{K_{V(Ca-K)} N_K^2} \left\{ (1 - N_K) \frac{K_{V(Ca-K)}}{K_{V(Mg-K)}} + \left[1 - \frac{K_{V(Ca-K)}}{K_{V(Mg-K)}} \right] N_{Ca} \right\} \quad (2.3-7)$$

となる。(2.3-7) 式の導出には $N_{Mg} = 1 - N_K - N_{Ca}$ という関係を利用した。またこの式における選択係数は、Ca-Mg-K 3 成分系の該当する 2 成分に関して計算されたものである。(2.3-7) 式の左辺は $1 / (AR^K)^2$ になっている。 AR^K の定義式で Ca イオンと Mg イオンの活量を合計してあるのは、合計だけを問題にしその内訳は問わないという意味である。従ってこのことは交換性イオンに関しても当てはまると考えなければならない。つまり、(2.3-1) 式で定義される AR^K の不変性を問題にするときに「交換平衡を乱さないように」というのは結局交換性 K イオンの量を一定に保って、という意味にはかならない。このことを念頭において (2.3-7) 式を見ると、平衡を乱さないように土壌溶液を濃縮、希釈するとき AR^K が不変であるためには N_{Ca} の係数の値が 0、つまり 3 成分系における Ca-K, Mg-K 間の選択係数の間に

$$K_{V(Ca-K)} = K_{V(Mg-K)} \quad (2.3-8)$$

という関係が成立することが必要である。

(2.3-8) 式に (2.3-4), (2.3-5) 式を代入して整理すると

$$\frac{N_{\text{Mg}} a_{\text{Ca}}}{N_{\text{Ca}} a_{\text{Mg}}} = 1 \quad (2.3-9)$$

という式が得られるが、この左辺は Ca-Mg 交換平衡の選択係数 $K_{V(\text{Ca-Mg})}$ に他ならない。逆に (2.3-9) 式が成立するときに (2.3-8) 式が成立することも容易に証明できる。

以上のことから、Ca-Mg-K の 3 成分系で交換性 K イオンの量が変化しない様にして土壌溶液を希釈および濃縮するとき、 AR^K が不変であるためには、i) この系における Ca-K および Mg-K 交換平衡に関する選択係数の値が（温度と圧力以外には）交換性 K イオンの量のみに依存し、平衡にある土壌溶液のイオン強度等には依存しないこと、および ii) 同じ系での Ca-Mg 交換平衡に関する選択係数の値が常に 1 に等しいことが必要である。

2.3.3 一般条件はどの程度みたされているか

1) 選択係数のイオン強度依存性

Ca-Mg-K の 3 成分系における Ca-K、および Mg-K 交換反応の選択係数が温度と圧力の他には交換体のイオン組成のみに依存するのかを確かめるにはこの反応系に関して膨大なデータが必要である。しかし、3 成分系のイオン交換平衡のデータはほとんどない。そこでここでは 2 成分交換反応に関するデータを用いて選択係数のイオン強度に対する依存性を調べた。

表 2.3-1 異なるイオン強度における Ca-K、Mg-K 交換平衡の選択係数

X_K	モンモリロナイト質土壌		モンモリロナイト		カオリナイト	
	$K_{V(\text{Mg-K})}$		$K_{V(\text{Ca-K})}$		$K_{V(\text{Ca-K})}$	
	$I=0.01$	$I=0.001$	$I=0.050$	$I=0.005$	$I=0.050$	$I=0.005$
0.00	142.0	149.0	66.20	76.70	212.75	239.80
0.10	107.6	113.2	41.26	46.51	145.45	164.00
0.20	51.8	54.6	23.57	22.64	95.57	99.47
0.30	28.3	31.2	12.93	12.18	58.55	61.54
0.40	20.4	20.8	9.77	9.77	37.71	39.25

X_K : 交換体上カリウム当量分率

I : イオン強度

表 2.3-1 はモンモリロナイト質土壌、モンモリロナイトおよびカオリナイトにおける Mg-K または Ca-K 交換平衡の選択係数を交換体上の K イオンの当量分率の関数として、2 つの異なるイオン強度のもとで測定したものである (Jensen and Babcock 1973, Jensen 1973)。土壌では交換性 K の割合が陽イオン交換容量の 40% を越えることはないので表 2.3-1 ではそれ以上の K 当量分率のデータは省略した。この表から、ここに示した 3 種のイオン交換体に共通して、交換体のイオン組成が同じ場合にはイオン強度の低い方が選択係数の値がやや大きいことがわかる。

いま 2 つのイオン強度を下付きの添字 1, 2 で示すことにすると、交換体のイオン組成が同じときのこれら 2 つのイオン強度のもとでの選択係数の対数値の差は次式によって平衡溶液組成の差に関係づけられる。

$$\log K_{V(\text{Ca-K})1} - \log K_{V(\text{Ca-K})2} = \log \left[\frac{a_K^2}{a_{\text{Ca}}} \right]_1 - \log \left[\frac{a_K^2}{a_{\text{Ca}}} \right]_2 \quad (2.3-10)$$

この式で右辺の各項は Ca-K 系における AR^K の 2 乗の対数になっている。したがって、(2.3-10)

式は交換平衡を乱さないようにして平衡溶液のイオン強度を変化させたときの pAR^K 変化の 2 倍の値を与える式である。この式に表 2.3-1 のデータを代入すると、2 成分系においては、交換平衡を乱さないようにして平衡溶液のイオン強度を 1 桁変化させたときの pAR^K の変化はたかだか 0.03 程度であった。以上の議論は厳密には 2 成分系にのみ適用されるものである。しかし、土壌溶液中の主要な陽イオンである Ca, Mg, K, Na イオン、およびその他のアルカリ金属およびアルカリ土類金属イオンのうちのいずれか 2 つの関与する交換反応においては選択係数のイオン強度依存性は実験精度と比較して大きくないと考えられている (Sposito 1981)。そこで、3 成分系についても同じようなことが考えられる。

2) 3 成分系での Ca-Mg 交換反応の選択係数

AR^K が土壌溶液の濃縮や希釈に関わらず一定であるための第二の条件は、Ca-Mg-K の 3 成分系における Ca-Mg 交換反応の選択係数が常に 1 に等しいことであった。このことを確かめるために図 2.3-1 に、いくつかの灰色低地土および黒ボク土における土壌溶液中の $a_{Mg}/(a_{Ca}+a_{Mg})$ と $N_{Mg}/(N_{Ca}+N_{Mg})$ の関係 (和田・石本 1987) を示した。もし Ca-Mg 交換平衡の選択係数が 1 に等しければ両者の関係はこの図の対角線に一致する。しかし実際には大部分のデータは対角線の下側に位置し、このことはこの選択係数の値は 1 よりもやや小さいことを意味している。図中に点線で示したのは $K_{V(Ca-Mg)}$ の値が 0.3 のときに予想される関係である。この曲線と実験データから、これらの土壌の場合には $K_{V(Ca-Mg)}$ の値は 1~0.3 の範囲にあると考えられる。これらにモンモリロナイト質土壌やモンモリロナイト、バーミキュライトのような粘土鉱物における 2 成分 Ca-Mg 交換反応のデータ (Levy et al. 1972, Levy and Shainberg 1972) を含めて考えると、 $K_{V(Ca-Mg)}$ の値は交換性 Mg が Ca と Mg の含量の半分以上を越えない範囲では 0.5~2.5 の範囲にあることが多い。

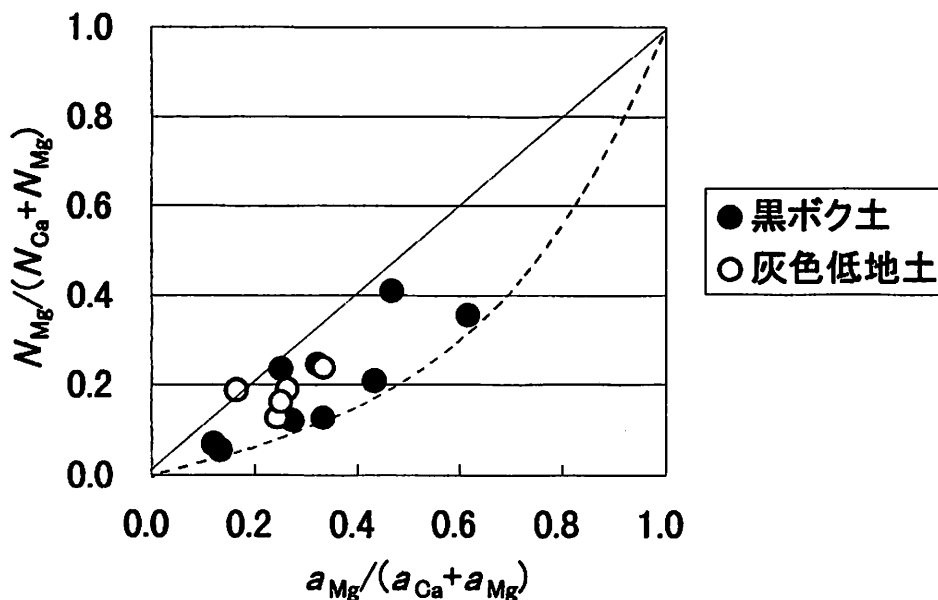


図 2.3-1 黒ボク土および灰色低地土における土壌溶液中の $a_{Mg}/(a_{Ca}+a_{Mg})$ と交換体上の $N_{Mg}/(N_{Ca}+N_{Mg})$ の関係

点線は $K_{V(Ca-Mg)} = 0.3$ のとき予想される関係

交換性 K の割合が一定で Ca と Mg の内訳が変化したときの値がどの程度の影響を受けるかを検討した。(2.3-7) 式で $N_{Ca}=0$ とすると、(2.3-7) 式左辺は $(1/AR^K)^2$ であるので、

$$(AR^K)^2_{N_{Ca}=0} = \frac{N_K^2 K_{V(Mg-K)}}{1 - N_K} \quad (2.3-11)$$

が得られる。一方、 $N_{Mg}=0$ のときには $N_{Ca}=1-N_K$ であるので (2.3-7) 式は

$$(AR^K)^2_{N_{Mg}=0} = \frac{N_K^2 K_{V(Ca-K)}}{1 - N_K} \quad (2.3-12)$$

となる。(2.3-11)、(2.3-12) 式を組み合わせ、 $K_{V(Mg-K)}/K_{V(Ca-K)} = K_{V(Ca-Mg)}$ であることから、

$$\log(AR^K)_{N_{Ca}=0} - \log(AR^K)_{N_{Mg}=0} = \frac{1}{2} \log K_{V(Ca-Mg)} \quad (2.3-13)$$

が得られる。 $K_{V(Ca-Mg)}$ の値が前に述べたように 0.5~2.5 の範囲であるとする、結局、Ca イオンと Mg イオンの内訳の変化による pAR^K の変化は 0.2 程度ということになる。しかしこれは K イオンの割合を一定に保ったまま、残り全部が Mg イオンである場合と Ca イオンである場合との差に相当する。土壤溶液を実際に水で希釈したり濃縮する場合にはこのような極端なことは起こり得ず、交換性 Ca イオンと Mg イオンの割合も大きく変化しないことから、これら両イオンの内訳の変化による pAR^K の変化もまた上にあげた推定値よりもはるかに小さいと考えられる。

2.3.4 土壤溶液の希釈過程における AR^K 変化の計算

前節までの議論から、交換性イオン組成、特に交換性 K イオンの量を変化させないようにして土壤溶液を希釈あるいは濃縮するときの pAR^K の変化はおそらく 0.1 以下であろうと考えられる。しかし、実際に土壤溶液を希釈するとき、例えば土壤に水を加えて 1:5 水抽出液を採るときには、交換体イオン組成が変化しないように特別な配慮はせず、単に水を加えるだけである。 AR^K が一定であるためには、土壤溶液が水で希釈され、K イオンの濃度が 1/10 になったときには Ca および Mg イオン濃度は 1/100 にならなければならない。このように土壤溶液中のイオンの濃度が非常に異なった割合で希釈されるということはとりもなおさず、土壤溶液と交換体の間でイオンのやりとりがあること、言い換えれば交換体イオン組成が変化したことを意味する。つまり、土壤に水を加えたとき AR^K が一定であるということは交換体イオン組成が変化するということである。 AR^K の不変性は交換体イオン組成が変化しない場合にのみ成立することを考えるとこれは矛盾である。しかし一般には交換性イオンの量は土壤溶液中のイオンの量と比較してけた違いに多いので、溶液中のイオンが異なった割合で希釈される程度のことでは交換性イオン組成は実質的には変化せず、結局交換平衡が乱されないという条件は近似的に満足されることが考えられる。

しかし、土壤溶液希釈時の交換平衡の乱れの相対的な大きさは、土壤の陽イオン交換容量や交換性 K イオン含量、それに希釈率等で異なるはずである。このことは既に岡島・松中 (1972) によって指摘されているが、その程度については具体的に示されていない。そこでここではいくつかの仮定のもとに、土壤溶液の希釈にともなう AR^K の変化を数値計算し、土壤の陽イオン交換容量の大きさ等の影響を調べた。

まず、土壤の陽イオン交換容量 (Q ; mol(+) kg⁻¹) は一定で、土壤は陰イオンを吸着しないものとする。また、土壤中の陽イオンは K と Ca イオンだけであること、しかもこれらと難溶性沈澱を作らず錯形成もしない 1 価陰イオンのみとする。Ca-K 交換平衡の選択係数 ((2.3-4) 式) は一般には交換体のイオン組成とともに変化するが、ここでは選択係数の自然対数が交換体上の K イオ

ンの当量分率 (E_K) の一次式で表されるものとする。

$$\ln K_{V(Ca-K)} = aE_K + b \quad (2.3-14)$$

ここで交換体上のイオンのモル分率と K の当量分率とは次式で関係づけられる。

$$N_K = \frac{2E_K}{1+E_K}, \quad N_{Ca} = \frac{1-E_K}{1+E_K} \quad (2.3-15)$$

希釈前の土壌 1 kg が 0.5 L の土壌溶液を含んでいたとし、交換体上の K イオンの当量分率を E_{K0} とし、その土壌溶液中の陽イオンの合計当量濃度を T_0 ($\text{mol}(+)\text{L}^{-1}$) とする。 T_0 はこのときの K および Ca イオン濃度 C_{K0} および C_{Ca0} ($\text{mol}(+)\text{L}^{-1}$) によって

$$T_0 = C_{K0} + 2C_{Ca0} \quad (2.3-16)$$

と表される。

この土壌溶液に $V(\text{L})$ の純水を添加したとすると、希釈後の土壌溶液の陽イオンの合計当量濃度 $T(\text{mol}(+)\text{L}^{-1})$ は

$$T = \frac{0.5T_0}{0.5+V} \quad (2.3-17)$$

となるが、 T はまた希釈後の K および Ca イオン濃度 C_K および C_{Ca} によって

$$T = C_K + 2C_{Ca} \quad (2.3-18)$$

と表される。また純水添加によっては系の全 K イオンの量は変化しないので、純水添加後の交換体上の K イオンの当量分率を E_K とすると、次式が成立する。

$$QE_K + 0.5 C_K = QE_{K0} + (0.5+V)C_K \quad (2.3-19)$$

(2.3-14) 式を利用するためには溶液中のイオンの活量が必要であるが、 i イオンの活量 a_i は活量係数 γ_i とその濃度 C_i により、

$$a_i = \gamma_i C_i \quad (2.3-20)$$

と表され、 γ_i は温度が 25°C のときには

$$\log \gamma_i = -0.5116 z_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.3I \right) \quad (2.3-21)$$

という式で表される。 Z_i は i イオンの価数、 I は溶液のイオン強度であり、次式で表される。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{all\ ions} z_i^2 C_i \quad (2.3-22)$$

そこで、陽イオン交換容量、希釈前の土壌の交換性 K イオンの当量分率、土壌溶液の陽イオンの合計当量濃度及び選択係数の組成依存性を示すパラメータ a , b に値を与えて (2.3-14) – (2.3-16), (2.3-20) – (2.3-22) 式を解けば、希釈前の土壌溶液中の Ca イオンおよび K イオン濃度が得られる。もちろんこのときイオン濃度と当量分率の関係や、 $N_K + N_{Ca} = 1$, $E_K + E_{Ca} = 1$ のような自明な関係を利用する。次に添加する水の体積を与えて (2.3-14), (2.3-15), (2.3-17) – (2.3-22) 式を解けば、希釈後の土壌の交換性 K イオンの当量分率および土壌溶液の Ca および K イオン濃度が得られ、これらから AR^* が計算できる。

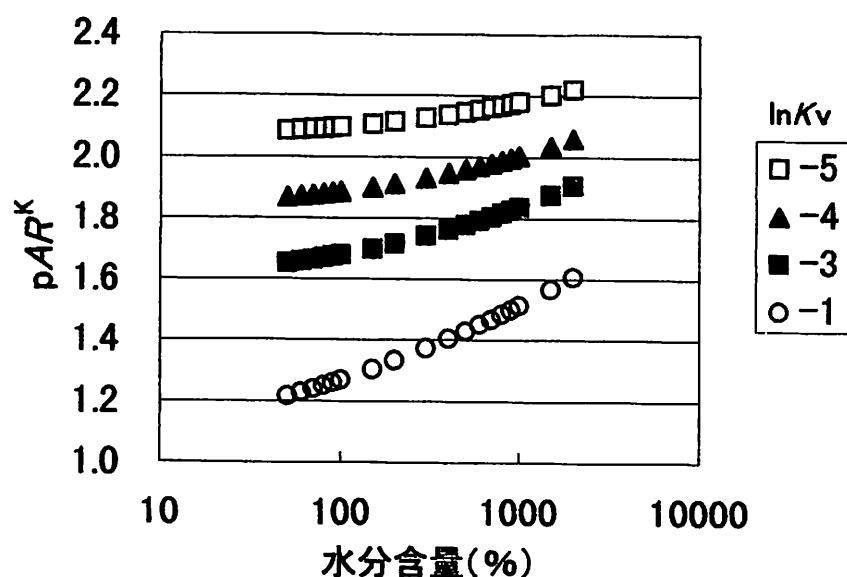


図 2.3-2 水分含量と pAR^K の関係におよぼす $\ln K_v$ の影響

他の条件 : $Q=0.01 \text{ mol}(+) \text{ kg}^{-1}$, $E_{K0}=0.05$, $T_0=0.02 \text{ mol}(+) \text{ L}^{-1}$

図 2.3-2 は、土壌溶液の希釈による AR^K の変化に対する K_v の値の影響を示す。この計算では $Q=0.01 \text{ mol}(+) \text{ kg}^{-1}$, $T_0=0.02 \text{ mol}(+) \text{ L}^{-1}$, $E_{K0}=0.05$ とし、土壌に 50% から 2000% の範囲で水を添加し土壌溶液を希釈したときの pAR^K を計算し水分含量に対してプロットしている。 $\ln K_v$ は交換体組成に関わらず一定として -5 から -1 までの値を用いた。土壌や粘土鉱物の Ca-K 交換反応の研究によれば、 $\ln K_v$ の値は交換体の K 飽和度 (E_K) が 0.03~0.1 程度のときには -4 ~ -5 であることが多い (Jensen and Babcock 1973, Jensen 1973, Wada and Weerasoriya 1990)。土壌の陽イオン交換容量 (Q)、初期交換性 K 飽和度 (E_{K0})、希釈前の土壌溶液の陽イオンの総当量濃度 (T_0) などの値も実際の土壌でよくみられる値ないしはやや低めの値を設定した。

この図からわかるように、他の条件が同じときには $\ln K_v$ の値が小さい土壌ほど希釈にともなう AR^K の変化は小さかった。 $\ln K_v$ が -5 のときには水分含量が 50% のときに pAR^K が 2.09 で水を添加して水分含量が 2000% になったときに 2.22 へ上昇し、 E_K は 0.05 から 0.037 へ減少した。一方 $\ln K_v$ が -1 のときには pAR^K が 1.22 から 1.61 へ変化し E_K は 0.05 から 0.02 になった。 $\ln K_v$ の値が交換体組成とともに変化するものの効果を見るため、(2.3-14) 式の a に 0 以外のいくつかの値を与えて同様の計算を行ったが、 AR^K の変化はほとんど b の値で決まり、交換体組成依存性の影響は少なかった。

図 2.3-3 は交換体の初期 K 飽和度の影響をみるため、 $Q=0.01 \text{ mol}(+) \text{ kg}^{-1}$, $T_0=0.02 \text{ mol}(+) \text{ L}^{-1}$, $\ln K_v = -4$ とし、 E_{K0} を 0.20 から 0.01 まで変化させて同様の計算を行った結果を示す。結果は、 E_{K0} が大きい方が希釈にともなう AR^K の変化が小さいことを示している。これは当然の結果であるが、 E_{K0} が 0.05~0.01 の範囲内でもその影響は比較的小さい。

図 2.3-4 は陽イオン交換容量の影響をみたもので、このときには $T_0=0.02 \text{ mol}(+) \text{ L}^{-1}$, $E_{K0}=0.05$, $\ln K_v = -4$ とし、 Q を 0.050 から 0.001 $\text{mol}(+) \text{ kg}^{-1}$ まで変化させた。この図からわかるように、陽イオン交換容量の影響は大きく、その値が大きいほど希釈にともなう AR^K の変動は小さい。 $Q=0.050$ のときには pAR^K は 1.87 から 1.92 まで 0.05 しか変化せず E_K も 0.05 から 0.045 までしか変化しなかったのに対し、 $Q=0.001$ のときには pAR^K が 1.87 から 2.49 まで 0.62 変化し E_K は 0.05 から 0.012 へ変化した。陽イオン交換容量が大きければ大きいほど、多少の陽イオンの出入りがあっ

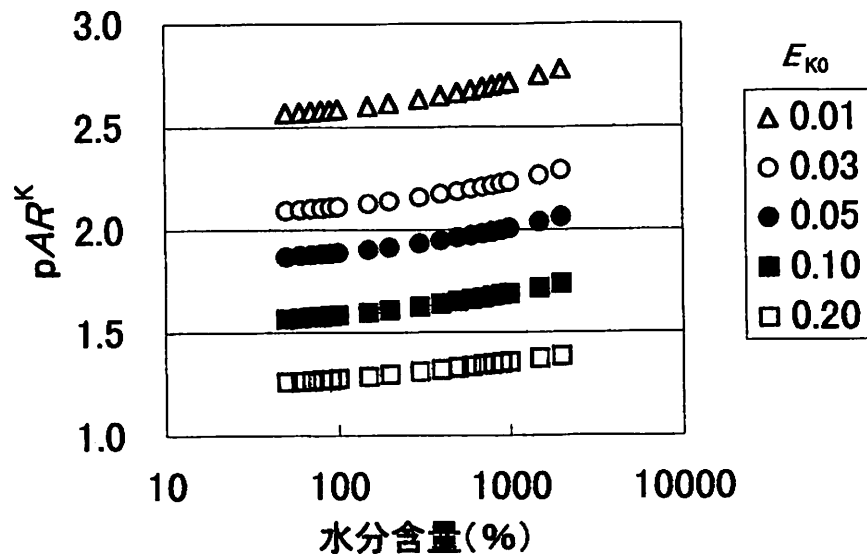


図 2.3-3 水分含量と pAR^k の関係におよぼす E_{K0} の影響

他の条件： $Q=0.01\text{mol}(+)\text{kg}^{-1}$, $\ln K_v=-4$, $T_0=0.02\text{mol}(+)\text{L}^{-1}$

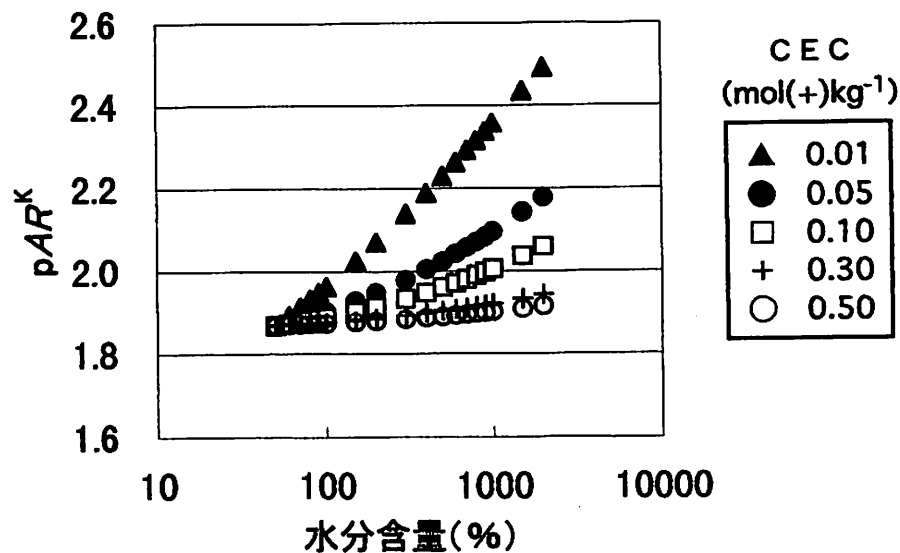


図 2.3-4 水分含量と pAR^k の関係におよぼす CEC の影響

他の条件： $\ln K_v=-4$, $E_{K0}=0.05$, $T_0=0.02\text{mol}(+)\text{L}^{-1}$

ても交換体のイオン組成の相対的変化は小さいので、この結果は当然の結果といえる。このことは定性的には何度も指摘されてきたことである（岡島・松中 1972, Schofield 1947）。

このほか希釈前の土壌溶液の陽イオンの合計当量濃度 (T_0) の影響も 0.050 から $0.001\text{mol}(+)\text{L}^{-1}$ の範囲で調べた。この場合には T_0 が小さくなるほど希釈にともなう AR^k の変化は小さかったが、陽イオン交換容量などと比較するとその影響は小さかった。

2.3.5 考 察

以上検討してきたことから、交換体イオン組成を変化させないようにして土壌溶液を希釈あるいは濃縮するときの AR^k の変化は比較的小さいと推定される。しかし例えば土壌の 1:5 水抽出液を採るときには所定量の水を添加するだけで、交換体イオン組成を変化させないような配慮はしない。このときには数値計算結果からわかるように、陽イオン交換容量の小さな土壌では、希釈過程でかなり大きな交換体イオン組成の変動が起こり、結果として AR^k が相当変化する。

いま、土壌：水比が 1:5 になるように水を添加して土壌溶液を採り、その AR^k を測定して、その値がそのまま希釈前の土壌溶液の AR^k に等しいと考えたとする。しかし実際には図 2.3-2 ～ 図 2.3-4 に示したように希釈過程で AR^k は一定ではない。ほとんどの場合には希釈後の土壌溶液の pAR^k は希釈前のものよりもやや高くなっている。したがって、この分だけ希釈前の pAR^k を高く評価することになる。

pAR^k の推定誤差が 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 の場合には AR^k 推定の相対誤差はそれぞれ約 5, 10, 25, 60% になる。場合によってはこれは問題かも知れない。しかし、水の添加量から T_0 を推定し、濃度と活量の差を無視して希釈前の土壌溶液組成を概算しようとする場合には、この単純化による誤差を考えると、60% という相対誤差も十分許容できるであろう。つまりこのような場合でも陽イオン交換容量が $5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 以上の土壌であれば、1:5 水抽出液を採る過程での AR^k の変化は無視してよいであろう。

しかしもっと高い精度で土壌溶液組成あるいは組成の変動の推定を行いたい場合には、もはや「 AR^k の不変性」は利用できない。少なくともその有用性は土壌の陽イオン交換容量に大きく依存すると考えなければならない。Moss (1963) は陽イオン交換容量が $44 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 、 E_{K} が 0.01 の土壌に、水分含量が 40% から 10000% になるように水を添加した場合でも pAR^k の変化は 0.02 以下であることを報告した。これはここで行った計算結果よりもはるかに小さいが、この食い違いの原因は研究する価値があると思われる。

いずれにせよ、水分含量変化の過程で AR^k が常に一定に保たれることはなく、一般には水分含量の低下とともに若干低下する。またその程度は、土壌の K 吸着量や陽イオン交換容量に依存する。ただ、図 2.3-4 に示すように、陽イオン交換容量の値が極端に小さいような場合を除けばその程度は比較的小さく、水分含量との関係は直線的である。したがって、 AR^k の変動を経験的に補正することが出来れば、陽イオン交換選択係数の測定なしに土壌溶液組成の変動を予測するための手法として用いることが出来ると考えられる。

2.3.6 摘 要

実用的な見地から土壌の陽イオン選択性の測定なしに土壌溶液組成の予測を可能にするために AR^k の不変性に関する経験則を利用し、 AR^k の値が土壌の陽イオン交換容量、交換性 K 含量、土壌の陽イオン選択性の変化によってどのような影響を受けるかを調べた。

- 1) イオン交換平衡が乱されないように土壌溶液を希釈、濃縮するとき AR^k が厳密に一定であるための条件を理論的に求めると、i) Ca-K, Mg-K の選択係数が交換体のイオン組成のみに依存する、ii) Ca, Mg が選択性の面で全く同等にふるまう、という 2 点に帰着した。
- 2) 陽イオン交換容量 (CEC) が一定で土壌溶液中の陽イオンが K イオンと Ca イオンのみであり、陰イオンはすべて 1 価イオンであるという仮定のもとに、土壌に水を添加していった場合の AR^k の変化を数値計算した。土壌の K 含量、K イオン選択性、土壌溶液イオン濃度および CEC のなかでは、CEC の影響が最も大きかった。

2.4 水分含量変化にともなう土壤溶液組成の変化とその機構

2.4.1 序 文

前節において土壤溶液組成の変化を引き起こす基本的な過程のひとつとして水分含量変化をとりあげ、 AR^k の不変性に関する経験則をその変化の予測手法として理論的に検討した。ここでは、いくつかの土壤について水分含量変化にともなう土壤溶液組成変化を実測し、それを土壤の性質と関連させて解釈し、水分含量変化にともなう土壤溶液組成変化とその機構について議論した。

2.4.2 試料と実験方法

供試試料の化学的性質を表 2.4-1 に示した。これらはいずれもビニールハウス内の作土層から採取したもので、朝倉 1 と朝倉 2 が灰色低地土、それ以外は黒ボク土である。

表 2.4-1 供試土壤の化学的性質

試 料	有機態炭素 (g kg ⁻¹)	pH(H ₂ O)	EC(1:5) (dS m ⁻¹)	交換性陽イオン (cmol (+) kg ⁻¹)			
				Ca	Mg	K	Na
熊農研 1	80.8	6.2	0.33	19.5	5.7	1.8	0.9
熊農研 2	76.3	5.9	1.61	22.2	6.1	3.5	1.5
益 城 1	73.6	6.6	0.80	26.1	11.1	2.6	0.6
益 城 2	70.1	6.3	0.49	20.2	9.3	1.6	0.6
吉 田 1	57.5	6.3	0.39	22.4	5.1	0.5	0.4
朝 倉 1	35.7	5.9	0.63	25.3	2.5	5.6	0.5
朝 倉 2	39.0	5.6	1.21	16.4	3.8	3.8	0.4

実験には風乾し、2 mm のふるいを通した試料を用いた。土壤の水分含量は、風乾土：水比を 1:0.5, 1:1, 1:2.5, および 1:5 の 4 段階とした。比が 1:0.5 のものはポリエチレン袋に入れ、手でよくこねた。それ以外のものはビーカーに入れガラス棒でよく攪拌し放置した。この操作は 2 連で行い、平衡操作は 25℃の恒温室で行った。

土壤溶液は、遠心分離法によって分離した。風乾土：水比 1:0.5, 1:1 のものは土壤溶液採取用の遠心分離管に入れ、 -0.31 MPa までの土壤溶液を採取した。その他のものは通常の遠心分離管に入れ、遠心分離後の上澄液を採取した。土壤溶液の Ca, Mg, K および Na イオンは原子吸光光度法、NO₃, Cl および SO₄ イオンはイオンクロマトグラフィーで、NH₄ および PO₄ イオンは吸光光度法で測定した。

2.4.3 結果および考察

水分含量変化にともなうイオン濃度の変化を図 2.4-1 に示した。図から明らかなように土壤溶液の陽イオンと陰イオンの合計当量濃度はほとんど同じであった。そして水分含量の増加とともにそれぞれの土壤において、各イオンともその濃度は低下した。土壤：水の比が 1:0.5 のときの土壤溶液イオン濃度が水分含量の増加とともに単純に希釈されるのであれば土壤：水比 1:5 の土壤溶液の合計イオン濃度は、最初の 10 分の 1 になるはずである。しかし、合計イオン濃度の実測値を陽イオンについてみると、濃度の低下程度は濃度変化の最も小さい熊農研 1 土壤で約 5 分の 1、変化の最も大きい朝倉 2 土壤で約 7 分の 1 と、いずれも 10 分の 1 より変化は小さかった。このことは、土壤に水が添加され、土壤溶液が希釈されると固相からイオンが溶出してくることを示唆する。

次に水分含量変化にともなう 2 価陽イオンの Ca イオンと Mg イオンの比を図 2.4-2 に示した。

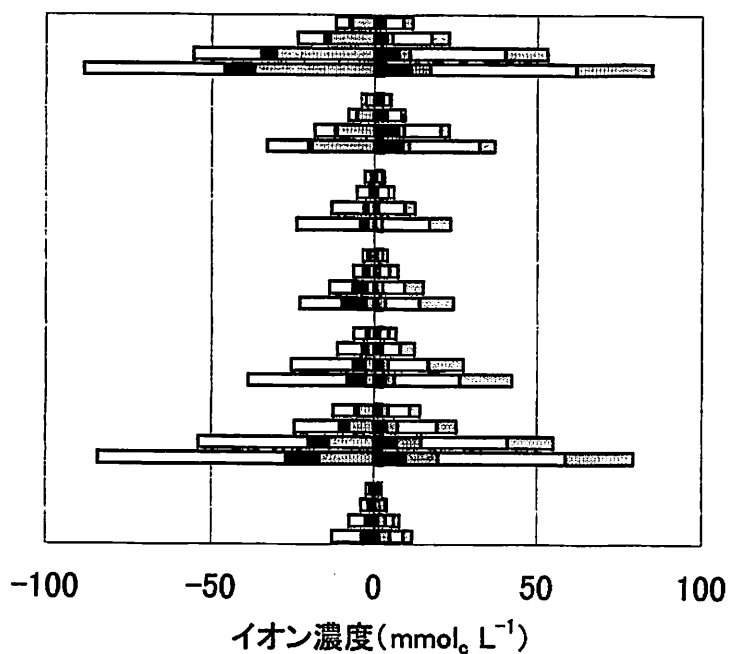


図 2.4-1 土壌溶液のイオン濃度

土壌試料は上から順に、熊農研 1、熊農研 2、益城 1、益城 2、吉田 1、朝倉 1、朝倉 2

各試料の風乾土：水比は下から順に 1:0.5, 1:1, 1:2.5, 1:5

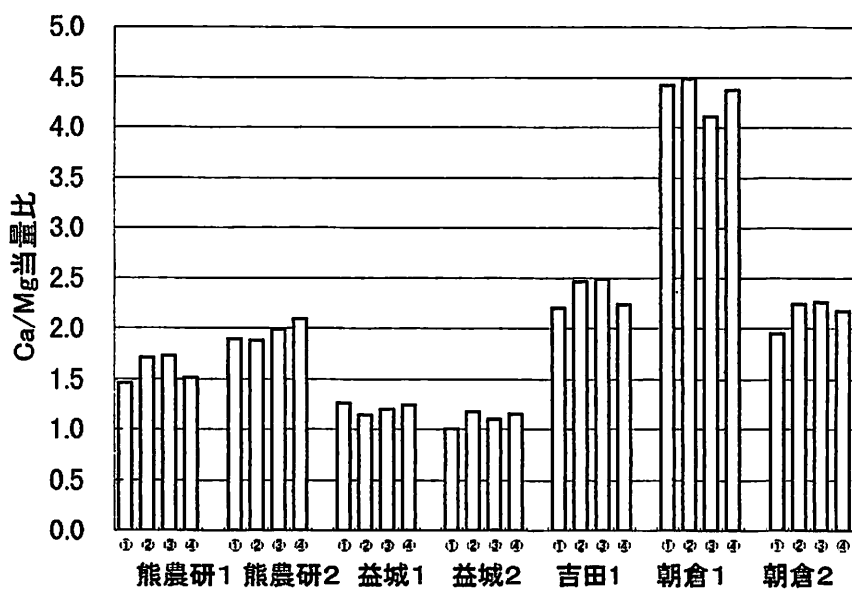


図 2.4-2 土壌溶液の Ca/Mg 当量比

風乾土：水比は ① 1:0.5, ② 1:1, ③ 1:2.5, ④ 1:5

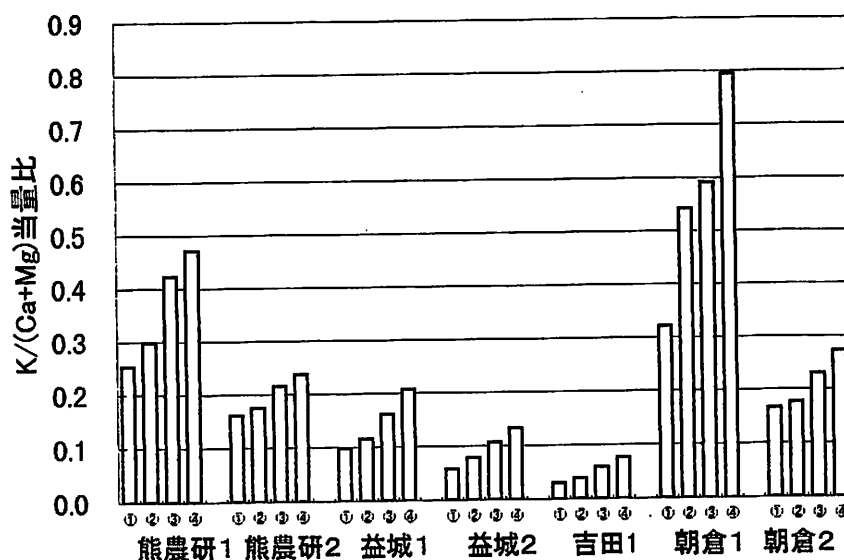


図 2.4-3 土壤溶液の K/(Ca+Mg) 当量比

風乾土：水比は① 1:0.5, ② 1:1, ③ 1:2.5, ④ 1:5

土壌によってその比の大小に差はあるものの、それぞれの土壌において Ca/Mg 比は水分含量が変化してもほとんど一定の値を示した。これは図 2.3-1 に示されるように Ca と Mg が陽イオン交換特性においてほとんど同等のふるまいをすることによるものと考えられる。1価の K イオン濃度と 2価の Ca と Mg イオンの合計濃度の比を図 2.4-3 に示した。すべての土壌について水分含量の増加とともに K イオンの割合が増加し、1価および 2価イオンの間でイオン交換が起こっていることを示唆する。土壌溶液中の陰イオン濃度とその時の水分含量（図 2.4-1）から算出した単位乾土当たりの水溶性イオン量の水含量変化にともなう変化は、1価の Cl イオンおよび NO₃ イオンでは非常に小さく、水添加量に関わらずほぼ一定量に保たれているとみなされたが、SO₄ イオン量は水分含量の増加とともに増加する傾向がみられた。土壌が塩類の沈殿を含む場合には、水添加量の増加つまり土壌溶液の希釈度の増大とともに乾土当たりのイオン量が増加しうることから、SO₄ イオン量の増加は硫酸カルシウムの溶解を示唆する。

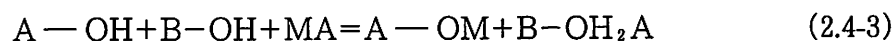
土壌溶液中のイオン量の正味の増減を生じさせる機構としてほかに考えられるのは「みかけの塩吸収」である（Wada 1984, 1988）。この現象は土壌が変異荷電物質を含む場合に起こる（岡島 1981, Wada 1984, 1988）。土壌が弱酸的な解離基 A-OH と、プロトン付加して正荷電を発現しうる B-OH 基をとにもっており、土壌溶液中に陽イオン M⁺ と陰イオン A⁻ が溶存しているとする。この土壌溶液を濃縮すると、



のように A-OH 基において H⁺-M⁺ 交換反応がおこり水素イオンが放出される。この水素イオンは B-OH 基に付加し、それにより生成した BOH₂⁺ 基に陰イオン A⁻ が吸着する。つまり



となる。これら二つの反応を組み合わせると



という反応式が得られる。このような性質の官能基が存在すれば、土壌溶液の濃縮により陽・陰イオンの正味吸着が起こり、乾土当たりの溶存イオンは減少しうる。また逆に土壌溶液が希釈されれば(2.4-3)式の反応が左に進み吸着イオンが放出され、乾土当たりの溶存イオンの量は増加する。

図2.4-1からわかるように、水分含量変化にともなう土壌溶液濃度は陽イオンでは、1価のKイオンついでNaイオン量の変化が大きく、2価のCaおよびMgイオン量の変化は比較的小さかった。結果として、水添加量の増加とともに1価イオンの割合が増加した。この現象は(2.4-2)、(2.4-3)式の反応に1価イオンののみが関与したと考えれば説明できるが、これは土壌のイオン選択性と矛盾する。おそらくこのような変化は、「みかけの塩吸収」による陽イオン量の全体としての変化と、陽イオン交換平衡を同時に考えることによって説明できる。土壌溶液の希釈によって1価イオンの割合が増加することは経験的にはよく知られた事実であり、これはイオン交換反応が固-液2相間で起こる反応であることによって生ずる。

イオン交換反応が起こっていることを確認するために、各試料の各風乾土：溶液比における pAR^K を前節に示した方法で計算し、図2.4-4にプロットした。各イオンの活量の計算にはWada and Seki (1994) のプログラムを利用した。図2.4-4からわかるように、どの試料でも pAR^K は水添加量とともにやや増加するものの、変化の程度は小さい。これは図2.4-3にみられるKイオンの割合の変化が、Ca、MgとKの間の交換平衡によることを示していると考えられる。

以上検討してきたように、水抽出液組成から任意の水分含量の土壌溶液組成を予測することは、陽イオン交換平衡によって陽イオンが固相と液相にどのように分配されるかのほかに、陰イオンのうち SO_4 イオンおよび陽イオンの同時吸・脱着、硫酸カルシウムの溶解・沈殿の三つの過程を同時に予測することと等価である。ただ、図2.4-1から算出されるように乾土当たりの NO_3 およびClイオン量が水分含量にかかわりなくほぼ一定とみなせることから、肥料成分として重要な土壌溶液の NO_3 イオン濃度は原土の水分含量がわかれば、水抽出液の濃度から土壌溶液のイオン濃度が計算によって求められる。最近、湿潤土の水分含量を、その場で迅速に測定できる方法が開発されている(Wada and Kakuto 1995)。しかし、土壌の水分含量が変化したときの土壌溶液のイオン組成変化を予測するためには、それに影響を及ぼす塩の溶解平衡、陽イオン交換平衡、変異荷電部位への SO_4 イオンおよび陽イオンの吸着といった相互に影響しながら同時に起こる過程をすべて考

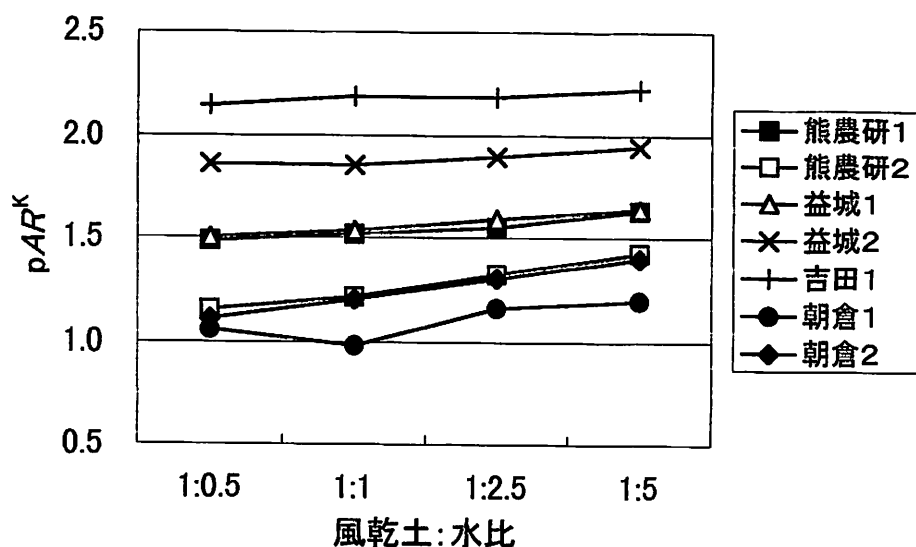


図 2.4-4 異なる風乾土：水比における pAR^K

慮し、定量的に理解する必要がある。そのことによって土壌の水抽出液組成から植物の根が実際に接している土壌溶液組成を推定することが可能となる。

2.4.4 摘 要

7 点の施設土壌に風乾土：水比＝1：0.5, 1：1, 1：2.5, 1：5 の割合で水を添加して土壌溶液を採取し、水分含量変化によるイオン組成の変化を調べた。水分含量変化による土壌溶液組成の変化機構、水抽出液から土壌溶液組成を予測するためには、塩の溶解平衡、陽イオン交換平衡、変異荷電部位への硫酸イオンおよび陽イオン吸着といった相互に影響しながら同時に起こる過程をすべて考慮し、定量的に理解する必要がある。

第3章 土壤溶液組成制御による米の食味改善

3.1 米の食味に影響する要因

3.1.1 序 文

国内における米の生産が過剰基調にあることは1960年代から変わりが無い。そればかりでなく、1993年のガット・ウルグアイラウンド農業合意により、1995年から外国産ジャポニカ米の輸入が始まっている。このため国内の米市場において米の食味が重要視され産地間競争が激しくなっており、良食味米の安定生産技術の確立が重要な課題となっている。

米の食味を判定するには食味関連成分の物理化学的特性で推定する方法もあるが、最も確実な方法は人間の感覚をもとに判定し、その統計処理をする食味官能試験によること（吉川ら 1969）とされている。その標準的な方法は、米の食味試験実施要領（食糧庁 1968）による方式である。これは年齢構成や性別に関する条件を満たした24名以上のパネル員によって、外観、味、香り、粘り、硬さおよびそれらを総合した総合評価の6項目を基準品種との比較で判定する方法である。

米の食味に関係する要因のなかで重要なものは、品種と産地である（農林省食糧研究所 1963, 執行・小野 1991）。産地という要因には気象や土壤が含まれるが、なかでも土壤条件が米の食味に与える影響は大きいと考えられる。茶村ら（1972）は火山灰土壤で生産された米は沖積土壤、洪積土壤に比べて味が劣ることを、岡本ら（1989）は黒ボク土で生産された米の食味が劣ることを報告している。福岡県においても黒ボク土産米は灰色低地土産米に比べて食味が劣る（井出ら 1971）ことが明らかにされている。

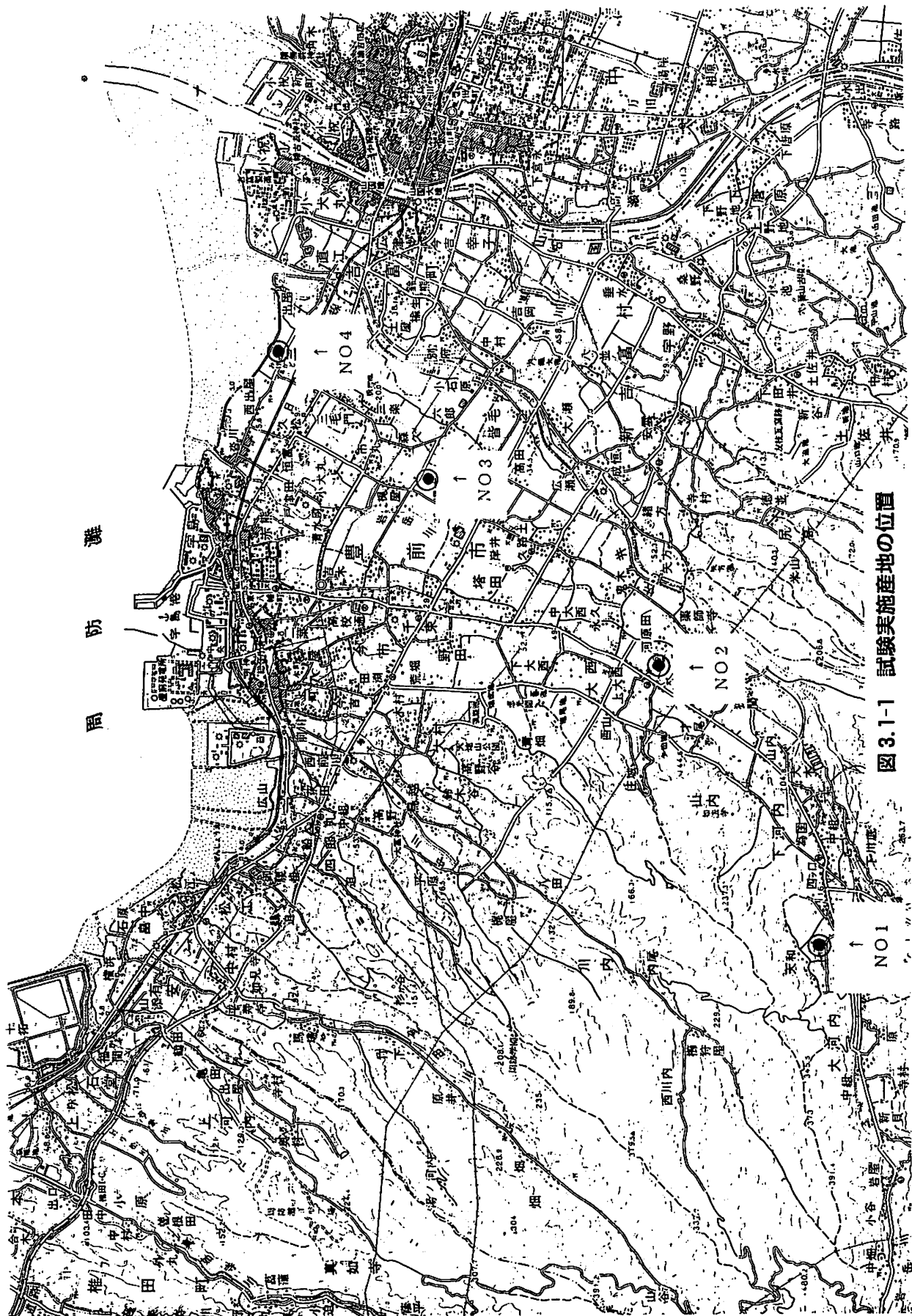
米の食味の土壤間差異が何によってもたらされるのかを明らかにすることは、良食味米生産のための栽培法を確立してゆくうえで極めて重要な知見となる。前述のように単に土壤の種類によって産米の食味が異なることは報告されているが、産地別に年次を含めて同一水稻品種を用い、同一栽培法で米の食味と理化学的特性について定量的に解析し、食味の産地間差とその要因を解明した報告は極めて少ない。そこで、比較的狭い地域内で標高が異なり、いくつかの土壤型から成る地域において同一栽培条件で生産した米の食味と理化学的特性を調査し、土壤間差、標高差および年次間差の影響を明らかにした。

3.1.2 試験方法

試験は1990年と1991年の両年に、気象の影響を少なくするために比較的狭い地域内に山間地、平坦地、海岸平野と標高差があり、しかも土壤型が異なる地勢をもつ福岡県豊前市において実施した。産地の概要は表3.1-1、それぞれの地点は図3.1-1に示したとおりで、中山間地の産地1は4カ所、平坦地の産地2は5カ所、産地3は4カ所、海岸平野の産地4は4カ所で試験を行った。供試品種にはコシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴を用いた。栽培方法は稚苗を用いて、1株4本の手植で、栽植密度は条間30 cm、株間15 cmとした（22.2株 m⁻²）。移植時期は6月23～24日とした。施肥

表 3.1-1 試験実施産地の産地別標高および土壤型

産地No	地 区	地 帯	標 高(m)	土 壤 型
1	下河内	中山間地	135	細粒黄色土
2	河原田	平 坦 地	50	細粒褐色低地土
3	吉 木	平 坦 地	20	淡色黒ボク土
4	三毛門	海岸平野	5	礫質灰色低地土



量（基肥＋第1回穂肥＋第2回穂肥）は現地の慣行施肥基準に準じて10a当たりN成分で5.0+2.0+1.6kgとした。P₂O₅、K₂Oはそれぞれ10a当たり6.0、8.6kgとした。試験規模は各産地とも1カ所につき1品種当たり20m²の1区制とした。

食味官能検査による食味評価は1990年、1991年の両年とも品種別に平坦地の産地2の産米（5カ所のうちの1カ所）を基準にしてパネル15～17名で行った。日本晴を基準品種として、外観、味、総合評価を－3（かなり不良）から＋3（かなり良）、粘りを－3（かなり弱い）から＋3（かなり強い）、硬さを－3（かなり柔らかい）から＋3（かなり硬い）の7段階で評価した。食味官能検査および試料分析は各試験年の12月～翌年3月に実施した。分析項目は食味に深く関与する成分として知られているタンパク質、アミロース、デンプンのアミログラム特性について調べた。なお、精米の理化学的特性分析と食味官能検査は各カ所別の試料について行い、それらの値は産地別に各カ所測定数の平均値で示した。登熟期間中の平均気温は、1990年が1991年に比べて約1℃高く推移した。精米の理化学的特性値は、各産地とも1990年は1991年に比べて、タンパク質含有率は低く、アミロース含有率は概ね高く、アミログラム特性値は高かった。食味総合評価値と理化学的特性値の分散分析は三留の方法（三留 1960）によった。

その他、食味評価のための試料の調製および理化学的特性の測定方法は松江ら（1991）に準じて行った。

3.1.3 結果および考察

1) 産地・品種別、米の食味総合評価

産地・品種別、米の食味総合評価（以後は食味と称す）の分散分析の結果、食味は、産地間で有意差がコシヒカリ間で1%水準、ミネアサヒ間で5%水準、日本晴間において10%水準で認められた（表3.1-2）。年次間ではコシヒカリで1%水準、日本晴で10%水準で有意差が認められたが、ミネアサヒでは認められなかった。産地と年次の交互作用の存在はいずれの品種においても認めら

表 3.1-2 産地・品種別、食味総合評価の分散分析

要 因	コシヒカリ				ミネアサヒ				日 本 晴			
	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F
産地(L)	3	1.16	0.39	6.37**	3	0.56	0.19	3.60*	3	0.53	0.18	2.74+
年次(Y)	1	0.57	0.57	9.41**	1	0.18	0.18	0.34ns	1	0.20	0.20	3.06+
(L*Y)	3	0.38	0.13	2.10ns	3	0.21	0.07	1.38ns	3	0.17	0.06	0.85ns
誤 差	24	1.45	0.06		24	1.25	0.05		19	1.24	0.07	

**, *, + はそれぞれ1%, 5%, 10%水準で有意であること, ns は有意でないことを示す。
分散分析に供した試料数は、コシヒカリ、ミネアサヒは1990年、1991年の2ヶ年とも16、日本晴は1990年11、1991年16である。

表 3.1-3 産地・品種別、食味総合評価

産地 No	コシヒカリ	ミネアサヒ	日 本 晴	3品種こみの総平均値
1	－0.01a	－0.28a	－0.30a	－0.20a
2	－0.06a	－0.22a	－0.22a	－0.16a
3	－0.48b	－0.56b	－0.87b	－0.63c
4	－0.31b	－0.28a	－0.32a	－0.30ab
LSD (0.05)	0.25	0.23	0.29	0.20

数値は1990年、1991年の平均値。

Duncanの多重検定により異文字間に5%水準で有意差あり。

れなかった。なお、日本晴における食味の産地間および年次間の有意差は 10%水準で認められたが、これらの差は産地間競争が激化するなかで本研究のような要因が多く含まれた実際の現地試験においては意味が大きいと考えられる。したがって米の食味は産地間で差があり、産地による年次間差も概ね一定の傾向があることを示している。

産地・品種別の食味についてみると、産地 3 で生産された米はコシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の 3 品種とも、他の産地に比べて外観、味が劣り、粘りが弱く（データ略）、食味は有意な差で劣った（表 3.1-3）。また、3 品種こみの総平均値でみると、産地 1 は -0.20、産地 2 は -0.16、産地 3 は -0.63、産地 4 は -0.30 と平坦地の産地 2 が最も優れ逆に平坦地の産地 3 は最も劣った。この結果は、黒色土、黒ボク土で食味および粘りが劣る傾向にあることを示した伊藤・川口（1980）、岡本ら（1989）および黒色火山灰土で食味が劣ったという茶村ら（1972）の報告と、さらには、従来、豊前市において良質米生産地帯といわれた地域と品質評価が高くない地帯といわれた地域（名取ら 1973）と一致するものであった。

このように米の食味には産地間差が認められ、淡色黒ボク土である産地 3 の産米の食味が劣ったことから、土壌型の違いが食味に大きく影響していると考えられる。また、淡色黒ボク土を除き、他の土壌型間では食味にほとんど差がなく、一般的にいられているような山間地の米の食味は優れているという標高の差による食味への影響は本試験では認められなかった。

2) 産地・品種別、精米中のタンパク質含有率

産地・品種別における精米中のタンパク質含有率の分散分析の結果は、コシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の 3 品種とも産地間と年次間において 1%水準で有意差が認められ、産地と年次の交互作用の有意差は認められなかった（表 3.1-4）。これらのことは精米中のタンパク質含有率は産地によって差があり、産地による年次間差も一定の傾向があることを示している。

次に産地・品種別、精米中のタンパク質含有率についてみると、産地 3 の産米のコシヒカリ、ミ

表 3.1-4 産地・品種別、精米中のタンパク質含有率の分散分析

要 因	コシヒカリ				ミネアサヒ				日 本 晴			
	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F
産地(L)	3	9.84	3.28	19.60**	3	2.85	0.95	4.46**	3	8.04	2.68	21.40**
年次(Y)	1	12.20	12.20	73.00**	1	13.90	13.90	65.30**	1	21.70	21.70	173.00**
(L*Y)	3	0.84	0.28	1.68ns	3	1.16	0.39	1.82ns	3	0.77	0.26	2.04ns
誤 差	24	3.98	0.17		24	5.06	0.21		19	2.37	0.12	

**, *, + はそれぞれ 1%, 5%, 10%水準で有意であること、ns は有意でないことを示す。

分散分析に供した試料数は、コシヒカリ、ミネアサヒは 1990 年、1991 年の 2 ケ年とも 16、日本晴は 1990 年 11、1991 年 16 である。

表 3.1-5 産地・品種別、精米中のタンパク質含有率 (%)

産地 No	コシヒカリ	ミネアサヒ	日 本 晴	3 品種こみの総平均値
1	6.5a	7.2bc	7.6ab	7.1ab
2	6.4a	6.7a	7.3a	6.8a
3	7.8c	7.5c	8.8c	8.0c
4	7.2b	7.1b	7.7b	7.3b
LSD (0.05)	0.4	0.4	0.4	0.5

数値は 1990 年、1991 年の平均値。

Duncan の多重検定により異文字間に 5%水準で有意差あり。

ネアサヒ、日本晴の3品種および3品種こみの総平均値のタンパク質含有率は、それぞれ7.8%、7.5%、8.8%、8.0%と他の産地に比べて最も高く、逆に産地2の産米はそれぞれ6.4%、6.7%、7.3%、6.8%と最も低かった（表3.1-5）。品種間では日本晴が産地1、2、3、4それぞれ7.6%、7.3%、8.8%、7.7%と最も高かった。

このように精米中のタンパク質含有率には産地間差が認められ、食味が劣った平坦地、淡色黒ボク土からなる産地3の産米のタンパク質含有率は高かった。この要因としては、本試験の結果と淡色黒ボク土産米のタンパク質含有率は無窒素の条件においても高いこと（小田原ら 1992）と合わせて、土壌型の違いによる影響が考えられる。また、タンパク質含有率は登熟温度に影響を受ける（本庄 1971, 松江ら 1991）ものの、本試験においては標高の違いによる精米中のタンパク質含有率の差は明らかでなかったことから、タンパク質含有率は登熟温度よりも土壌型の影響を強く受けるものと考えられる。淡色黒ボク土で精米中のタンパク質含有率が高まるのは、黒ボク土では可給態窒素が多いこと（岡本ら 1989）と土壌窒素無機化量が生育後期に増加してくる（青森県農業試験場 1973, 上野ら 1990, 山本ら 1993）ためと考えられる。

3) 産地・品種別、精米中のアミロース含有率

産地・品種別における精米中のアミロース含有率の分散分析の結果は、コシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の3品種とも産地間と年次間において1%水準で有意差が認められ、産地と年次の交互作用の有意差も認められた（表3.1-6）。ただし、コシヒカリとミネアサヒにおける交互作用の分散は、主効果の1つである年次の分散に比べてはるかに小さいため、年次に関してのみ比較してもさしつかえはない（奥野・芳賀 1969）と判断される。したがってコシヒカリとミネアサヒにおけるアミロース含有率は産地間で差があり、産地による年次間も一定の傾向があることを示している。しかし、日本晴ではアミロース含有率には産地間差が認められるものの、産地間差は年次によって異なることを示している。

表 3.1-6 産地・品種別、精米中のアミロース含有率の分散分析

要 因	コシヒカリ				ミネアサヒ				日 本 晴			
	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F
産地(L)	3	7.59	2.53	11.10**	3	4.11	1.37	9.06**	3	14.58	4.86	40.40**
年次(Y)	1	17.40	17.40	76.30**	1	14.00	14.00	92.90**	1	1.00	1.00	8.32**
(L*Y)	3	6.66	2.22	9.71**	3	3.72	1.24	8.22**	3	1.92	0.64	5.32**
誤 差	24	5.47	0.23		22	3.32	0.15		19	2.26	0.12	

**, *, + はそれぞれ1%, 5%, 10%水準で有意であることを示す。

分散分析に供した試料数は、コシヒカリは2ヶ年とも16、ミネアサヒは1990年14、1991年16、日本晴は1990年11、1991年16である。

表 3.1-7 産地・品種別、精米中のアミロース含有率 (%)

産地 No	コシヒカリ	ミネアサヒ	日 本 晴	3品種こみの総評均值
1	17.8a	18.7a	20.7a	19.1c
2	17.9a	18.1b	20.2b	18.7bc
3	16.7c	17.8b	19.4c	18.0ab
4	17.3b	17.8b	18.7d	17.9a
LSD (0.05)	0.4	0.4	0.3	0.7

数値は1990年、1991年の平均値。

Duncanの多重検定により異文字間に5%水準で有意差あり。

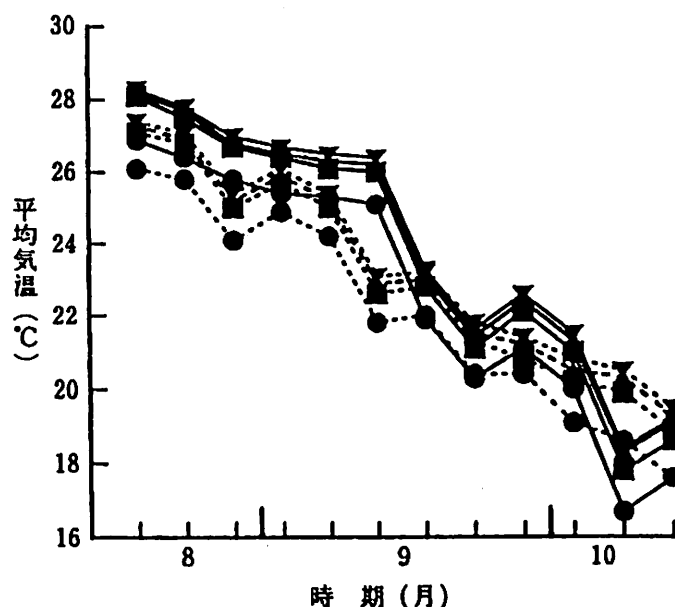


図 3.1-2 登熟期間中の半旬別平均気温

—— : 1990 年, : 1991 年.

● : 産地 1, ■ : 産地 2, ▲ : 産地 3, ▼ : 産地 4.

平均気温は周辺 3~5カ所からのアメダス観測データから推定した。

産地・品種別における精米中のアミロース含有率は、産地間では産地 1 の産米が 3 品種こみの総平均で 19.1% と最も高く、品種間では環境変化に対して安定した良食味をもつ品種であるコシヒカリ（松江ら 1992）が産地 1, 2, 3, 4 それぞれ 17.8%, 17.9%, 16.7%, 17.3% と最も低く、次にミネアサヒ、日本晴の順であった（表 3.1-7）。

このように、アミロース含有率には産地間差が認められ、概して食味が良好であった中山間地の産地 1 の産米のアミロース含有率が高かった。豊前市内での中山間地の登熟期間中の気温は平坦地に比べて低く（名取ら 1973）、さらには、周辺 3~5カ所からのアメダス観測データから推定した（田中 1995）1990 年、1991 年の両年の登熟温度も産地 1 は他の産地に比べて低かった（図 3.1-2）。アミロース含有率は登熟温度に左右されることから（Asaoka et al. 1985, 松江ら 1991）、産地 1 の産米でアミロース含有率が高かったのは、標高の違いによる登熟温度の影響と推察される。

4) 産地・品種別、デンプンのアミログラム特性

産地・品種別におけるデンプンの最高粘度の分散分析結果は、コシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の 3 品種とも産地間と年次間において 1% 水準で有意差が認められ、産地と年次の交互作用の有意差も認められた（表 3.1-8）。ただし、この場合の交互作用は有意ではあるが、交互作用の分散は主効果の 1 つである年次の分散に比べてはるかに小さいため、年次に関してのみ比較してもさしつかえはない（奥野・芳賀 1969）と判断される。これらの結果は、最高粘度には産地間差が認められ、産地による年次間差も一定の傾向があることを示している。

産地・品種別の最高粘度は、産地 1 がコシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴それぞれ 375 B.U., 312 B.U., 315 B.U. と 3 品種とも最も低く、逆に産地 4 は 422 B.U., 385 B.U., 382 B.U. と最も高かった（表 3.1-9）。また、3 品種こみにした総平均値においても産地 1 が 334 B.U. と最も低く、産地 4

表 3.1-8 産地・品種別、デンプンの最高粘度の分散分析

要 因	コシヒカリ				ミネアサヒ				日 本 晴			
	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F
産地(L)	3	9789.30	3263.10	10.50**	3	23649.00	7883.20	12.84**	3	18387.00	6129.10	19.98**
年次(Y)	1	140052.00	140052.00	451.00**	1	116644.00	116644.00	190.00**	1	117976.00	117976.00	384.60**
(L*Y)	3	3484.80	1161.60	3.74**	3	16941.00	5647.20	9.20**	3	6881.50	2293.80	7.48**
誤 差	24	7451.70	310.48		24	14728.00	613.66		24	7361.70	306.73	

**はそれぞれ1%水準で有意であることを示す。

分散分析に供した試料数は、コシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の3品種とも1990年、1991年それぞれ16である。

表 3.1-9 産地・品種別、デンプンの最高粘度 (B.U.)

産地 No	コシヒカリ	ミネアサヒ	日 本 晴	3 品種こみの総評均值
1	375a	312a	315a	334a
2	402b	363b	355b	373b
3	410bc	365b	354b	376b
4	422c	385b	382c	396c
LSD (0.05)	18	26	18	13

数値は1990年、1991年の平均値。

Duncanの多重検定により異文字間に5%水準で有意差あり。

表 3.1-10 産地・品種別、デンプンのブレイクダウンの分散分析

要 因	コシヒカリ				ミネアサヒ				日 本 晴			
	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F	D.F.	S.S.	M.S.	F
産地(L)	3	2788.50	929.50	1.65ns	3	3940.20	1313.40	4.25**	3	974.09	324.69	3.36**
年次(Y)	1	2964.50	2964.50	5.28**	1	12012.00	12012.00	38.83**	1	2869.00	2869.00	29.65**
(L*Y)	3	208.50	69.50	0.12ns	3	1818.20	606.08	1.96ns	3	1962.00	654.03	6.76**
誤 差	24	13486.00	561.91		24	7424.50	309.35		24	2321.70	96.74	

**はそれぞれ1%水準で有意であることを示す、nsは有意でないことを示す。

分散分析に供した試料数は、コシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴の3品種とも1990年、1991年それぞれ16である。

が396 B.U.と最も高かった。品種別ではコシヒカリが産地1, 2, 3, 4それぞれ375 B.U., 402 B.U., 410 B.U., 422 B.U.といずれの産地においても最も高かった。

次にブレイクダウンの分散分析の結果をみると、産地間ではミネアサヒと日本晴で1%水準で有意差が認められたが、コシヒカリでは有意差は認められなかった(表3.1-10)。年次間においては3品種とも1%水準で有意差が認められた。産地と年次の交互作用の有意差は日本晴で認められたが、コシヒカリとミネアサヒでは認められなかった。ただし、日本晴における交互作用は有意ではあるが、交互作用の分散は年次の分散に比べて小さいため、年次に関してのみ比較してもさしつかえはない(奥野・芳賀1969)と判断される。これらの結果は、ブレイクダウンにはコシヒカリを除いて産地間差が認められ、産地による年次間差も一定の傾向があることを示している。

産地別のブレイクダウンは、産地1がコシヒカリ、ミネアサヒ、日本晴それぞれ100 B.U., 86 B.U., 76 B.U.と3品種とも最も小さく、逆に産地4は119 B.U., 116 B.U., 91 B.U.と大きく、3品種こみにした総平均値においても産地1が87 B.U.と最も小さく、産地4が109 B.U.と最も大きかった(図3.1-3)。品種別ではコシヒカリがいずれの産地においても最も大きかった。

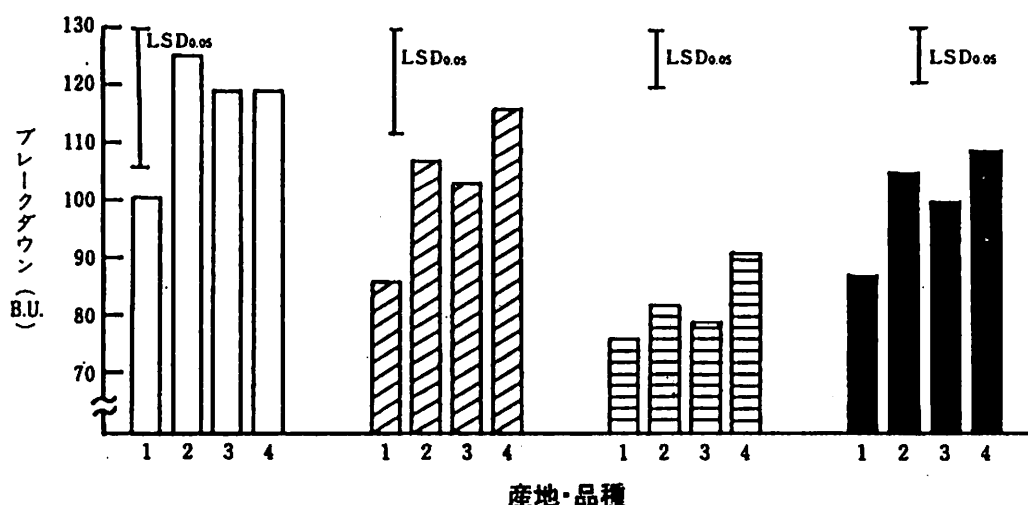


図 3.1-3 産地・品種別、デンプンのブレイクダウン

□：コシヒカリ，▨：ミネアサヒ，▤：日本晴，■：3品種こみの総平均値。
産地の番号は表 3.1-1 参照
値は 1990 年，1991 年 2 ヶ年の平均値

このようにアミログラム特性値には産地間差が認められ，産地 1 で小さく，逆に産地 4 で大きかった。アミログラム特性値は登熟期間中の気温が低いと低下する（松江ら 1991）ことから，産地 1 の産米のアミログラム特性値が低かったのは，産地 1 における登熟期間中の気温が他の産地に比べて低かったことと関連していると推察される。

以上の結果をもとに，産地をこみにした食味と理化学的特性との関係を統計的にみると，タンパク質含有率は 1990 年，1991 年の両年において 3 品種とも食味と有意な負の相関関係が認められたが，アミロース含有率，最高粘度，ブレイクダウンは認められなかった（表 3.1-11）。

表 3.1-11 品種別，食味総合評価と理化学的特性との相関関係

試験年	コシヒカリ			ミネアサヒ				日本晴				
	タンパク質含有率	アミロース含有率	最高粘度	ブレイクダウン	タンパク質含有率	アミロース含有率	最高粘度	ブレイクダウン	タンパク質含有率	アミロース含有率	最高粘度	ブレイクダウン
1990 年	-0.766** (n=16)	0.574* (n=16)	-0.035ns (n=16)	-0.130ns (n=16)	-0.634** (n=16)	0.558* (n=14)	0.212ns (n=16)	0.170ns (n=16)	-0.788** (n=11)	0.319ns (n=11)	-0.101ns (n=11)	-0.158ns (n=11)
1991 年	-0.571* (n=16)	0.194ns (n=16)	-0.167ns (n=16)	-0.144ns (n=16)	-0.688** (n=16)	0.581* (n=16)	-0.230ns (n=16)	-0.138ns (n=16)	-0.858** (n=16)	0.389ns (n=16)	-0.040ns (n=16)	0.154ns (n=16)

**, *, + はそれぞれ 1%，5%，10%水準で有意であること，ns は有意でないことを示す。

岡本ら（1989）は同一品種の土壌条件による粘りの変動は米の窒素含量の増減による影響が大きいこと，稲津（1990）は限られた地域で品種が同一で土壌型が異なる場合には，米飯の粘りに対してアミロースよりもタンパク質の含量が支配的になることを報告している。

これらの結果から，品種が同一で土壌型の違いによる食味低下，なかでも淡色黒ボク土産米の食味が劣った主因は，タンパク質含有率の増加とみられ，食味低下とアミロース含有率およびアミログラム特性とは関係が小さいと考えられる。

3.1.4 摘 要

今後の地域別の良食味米生産技術の改善のための基礎的知見とするために、比較的狭い地域内で標高と土壌型が異なる産地間における米の食味と理化学的特性の実態を明らかにし、その要因を検討した。

- 1) 米の食味には産地間差があり、土壌型の違いによる影響が大きく認められ、標高の差による影響は明らかでなかった。淡色黒ボク土からなる産地の食味は細粒黄色土、細粒褐色低地土および礫質灰色低地土からなる産地に比べて劣った。また、淡色黒ボク土からなる産地の米のタンパク質含有率は細粒黄色土、細粒褐色低地土および礫質灰色低地土からなる産地の米に比べて高かった。
- 2) 産地をこみにした食味と理化学的特性との関係は、食味とタンパク質含有率との間に有意な負の相関関係が認められた。一方、食味とアミロース含有率、アミログラム特性との間には品種・年次をとおして有意な相関関係は認められなかった。
- 3) これらのことから、土壌型の違いによる食味低下、なかでも淡色黒ボク土産米で食味が劣った主因は、タンパク質含有率が高いことによるもので、食味低下とアミロース含有率およびアミログラム特性との関係は小さいと考えられた。
- 4) 淡色黒ボク土産米のタンパク質含有率が高かったのは、黒ボク土で特有にみられる土壌窒素無機化量が生育後期に増加してくるためと推察された。今後、産米の食味改善の観点から土壌型が淡色黒ボク土からなる産地においては、施肥技術および土壌改良等による窒素吸収の制御が欠かせないと考ええる。

3.2 土壌の理化学性および土壌溶液組成の差異が稲体および産米の成分組成に及ぼす影響

3.2.1 序 文

前節の現地試験において黒ボク土産米は灰色低地土産米に比べて食味が劣ることが明らかにされた。ただこれまでの研究では異なる土壌で生育した米の食味あるいは食味関連成分含有率の比較のみが行われ、土壌間差がどのような機作で食味関連成分に影響を及ぼすのかについては検討されていない。

一般に、食味に深く関与する理化学的成分として窒素（石間ら 1974, 茶村ら 1972）、アミロース（稲津ら 1976）が知られているが、最近、無機成分と食味との関係が明らかにされ、K は食味のマイナス要因、Mg はプラス要因として確認（堀野ら 1981, 堀野・岡本 1992, 稲津 1988-a, 松崎ら 1992, 岡本ら 1992, 吉永・小林 1992）されている。植物による無機成分の吸収量が土壌溶液中におけるその活量と高い正の相関があり（Sposito 1989）、2.1 において示したように土壌溶液中におけるイオン濃度やイオン濃度の比は土壌のイオン交換特性に依存することから、水稻の成分組成もその生育培地である土壌と土壌溶液に影響されると考えられる。そこで黒ボク土と灰色低地土の2つの土壌を用いて水稻を栽培し、生育期間中の土壌溶液陽イオン濃度の推移と稲体、玄米および精米の窒素および無機成分含有率を調べ、土壌の理化学性が稲体および産米の成分組成に及ぼす影響について検討した。

3.2.2 試験方法

福岡県農業総合試験場豊前分場内の灰色低地土および福岡県豊前市吉木の黒ボク土の2水田土壌の作土を1/2000 a ワゲネルポットにつめて、図3.2-1に示したように水稻を栽培した。これは2.2の供試土壌と同一であり、その一般理化学性は表2.2-1に示した。ポットあたり乾土充填量，水稻の供試品種，栽培法，水稻生育中の土壌溶液採取法（図3.2-2）および土壌溶液陽イオンの分析法は，2.2に示したとおりである。試験は1区3連制で行った。

水稻生育期間中の水の補給は水道水を用いて上部から灌水し，田面水の深さは1～5 cmに保った。水道水の水質は表3.2-1に示した。また，水稻による移植から成熟期までの蒸発散量はポットあたり灰色低地土で約65 L，黒ボク土で約70 Lであった。

水稻は9月17日に収穫し，わら重，籾重，玄米重を調べ，稲わらおよび玄米は粉碎してそれぞれCa，Mg，K，全窒素を分析した。さらに玄米はとう精歩留まり90%に精米し，上記と同じ項目とアミロース含有率を分析した。アミロース含有率は精米を粉碎した試料をテクニコン社製オート



図 3.2-1 ポット試験の状況（上段；穂揃期，下段；成熟期）



図 3.2-2 ポーラスカップと真空採血管による土壌溶液の採取

アナライザーⅡ型を用いて Juliano (1971) の自動分析システムを応用した稲津の方法 (稲津 1982) により比色定量した。値はすべて 3 連の平均値で示した。

収穫後の土壌をポーラスカップを中心に半径 5 cm, 深さ 13 cm まで採取し, 風乾後, 交換性陽イオンを pH7.0 の 1 mol L^{-1} $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 溶液で浸出し定量した。

表 3.2-1 かんがい水の水質

陽イオン濃度 (mmol L^{-1})			
Ca	Mg	K	Na
0.29	0.07	0.04	0.47

3.2.3 結果および考察

1) 土壌の化学性

原土の交換性陽イオン量は表 2.2-1 に示したように, どの陽イオンについても黒ボク土の方が高く, Ca, Mg, Na は灰色低地土の 1.6~1.8 倍であり, K は 3.9 倍であった。陽イオンの合計当量数は 1.8 倍であった。交換性 K の当量分率は両土壌で大きく異なり, 黒ボク土の 0.081 に対して灰色低地土では 0.038 と約 2 分の 1 であった。pH (H_2O) は両土壌ともほぼ同じ値であった。

跡地土壌の交換性 Ca, Mg 含量は灰色低地土では原土とほとんど差はなかった。これは水稻による吸収量とかんがい水による供給量がつりあっていることによると考えられる。黒ボク土では交換性 Ca 含量は増加したが, 岡島・今井 (1973) の試験でも 2 つの土壌で同じ結果がみられる。交換性 K 含量は原土に比べて灰色低地土で 30%, 黒ボク土で 20% 減少したのに対して, 交換性 Na 含量は両土壌とも約 2 倍に増加した。K の減少は施肥, かんがい水による供給を水稻の吸収が上回ったため, Na の水稻による吸収は K などに比べて少ない (吉田 1986) ので, かんがい水からの供給により増加したものと考えられる。

2) 土壌溶液陽イオン濃度の変化

図 3.2-3 に水稻生育期間中の土壌溶液陽イオン濃度の経時変化を示した。交換性 Ca 含量は黒ボク土が灰色低地土の 1.5 倍以上もあったが, 土壌溶液 Ca 濃度は移植後 4 週間の平均値が黒ボク土で 1.67 mmol L^{-1} , 灰色低地土で 1.81 mmol L^{-1} とほぼ同じ値で, しかもほぼ一定の値で推移した。その後漸増したが, 増加の程度は灰色低地土の方が大きく, 12 週間後には黒ボク土での 5.16

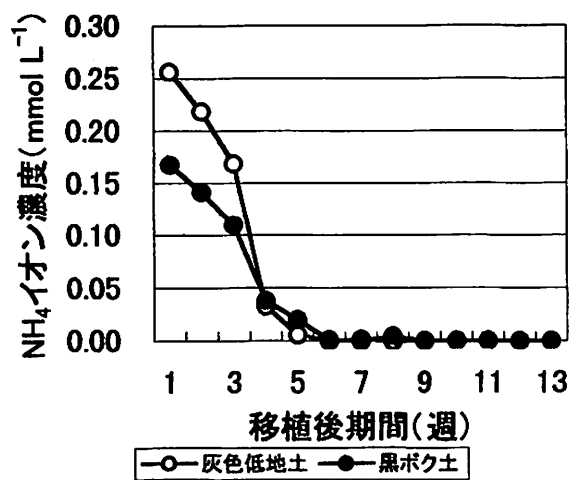
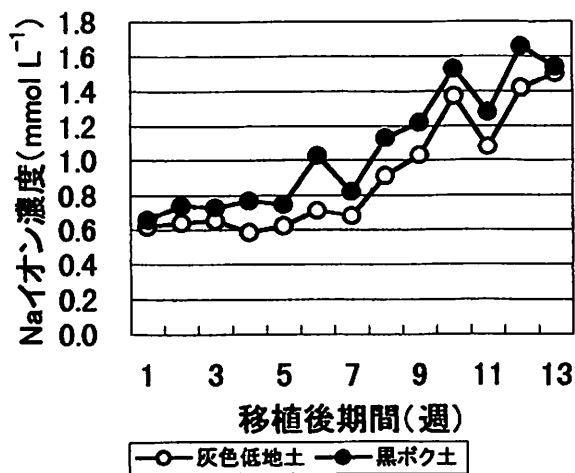
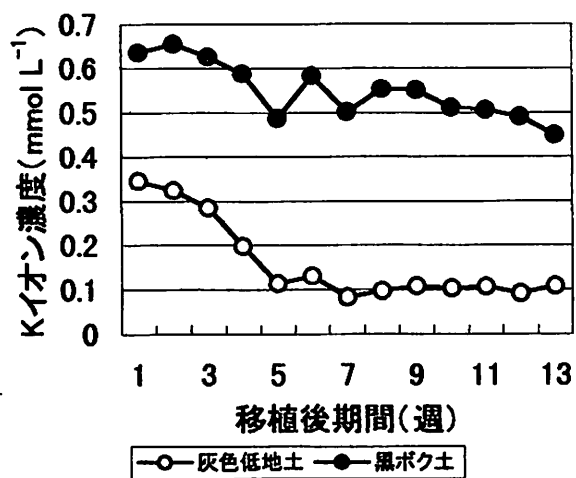
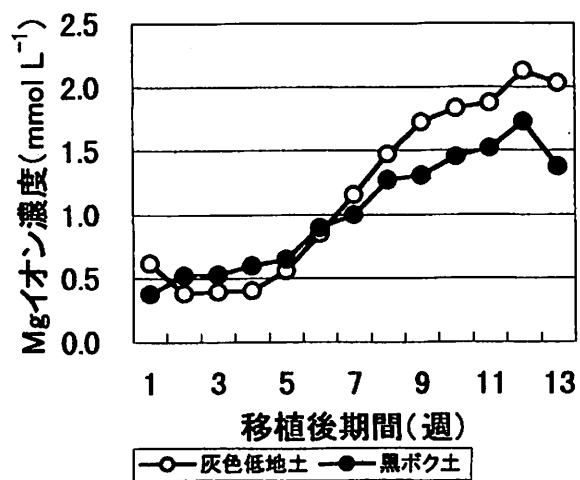
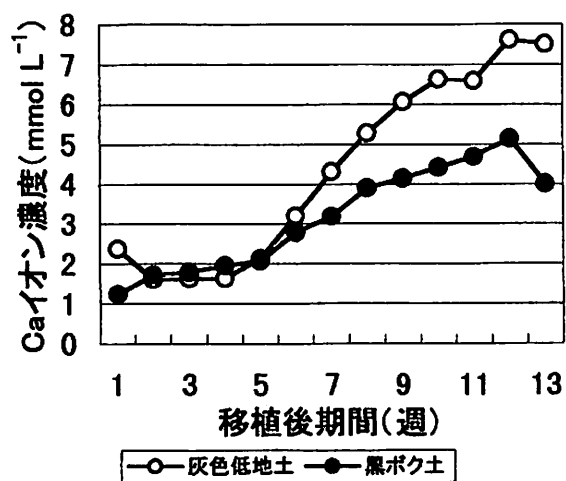


図 3.2-3 水稻生育中の土壤溶液陽イオン濃度の推移

mmol L⁻¹ に対して灰色低地土では 7.63 mmol L⁻¹ となり、初期に比べてそれぞれ 3.1 倍、4.2 倍の濃度となった。

Mg も Ca と同様の傾向を示し、移植後 4 週間は平均値で黒ボク土 0.51 mmol L⁻¹、灰色低地土 0.45 mmol L⁻¹ とほぼ一定の値で推移したが、12 週間後には黒ボク土で 1.73 mmol L⁻¹、灰色低地土で 2.14 mmol L⁻¹ と初期の濃度に比べてそれぞれ 3.4、4.7 倍に濃度が増加した。土壌を非溶脱条件下でたん水したとき土壌溶液の合計イオン濃度、とくに Ca、Mg 濃度がしだいに上昇することは土屋ら (1986) によっても報告されている。その機構や増加した Ca、Mg の起源は明らかにされていないものの、陽イオン濃度の増加が HCO₃⁻ イオン濃度の増加に対応する (土屋ら 1986) ことから、根や微生物の呼吸によって発生した CO₂ により遊離炭酸カルシウムが溶解する、炭酸の解離によって生じた水素イオンと交換性 Ca、Mg が交換する等の機構が考えられる。

K 濃度は全期間を通じて黒ボク土の方が灰色低地土より高かった。これは黒ボク土で交換性 K 含量が高かった (表 2.2-1) ことと現象的には対応する。K 濃度は黒ボク土で 0.64 mmol L⁻¹ から漸減し、12 週間後には 0.49 mmol L⁻¹ と 0.15 mmol L⁻¹ 減少した。灰色低地土では 0.35 mmol L⁻¹ から 0.09 mmol L⁻¹ に 0.26 mmol L⁻¹ 減少した。これは跡地土壌の交換性 K の減少に対応しており、水稻による吸収の結果と考えられる。

Na 濃度は黒ボク土で 0.66 mmol L⁻¹ から 1.66 mmol L⁻¹ に、灰色低地土で 0.62 mmol L⁻¹ から 1.42 mmol L⁻¹ に増加した。両土壌とも Na 濃度は 7 週間目まではほぼ一定であったがそれ以降急増した。これは Ca、Mg 濃度の増加と同様の機構の他、Na は作物による吸収が少なく、表 3.2-1 のようにかんがい水から供給され濃縮されたことによると考えられる。Na 濃度は黒ボク土が灰色低地土に比べて常に 0.1~0.2 mmol L⁻¹ 高く推移した。

NH₄⁺-N の初期濃度は黒ボク土および灰色低地土でそれぞれ 0.17、0.26 mmol L⁻¹ で、乾土単位量あたりの N 施用量は黒ボク土の方が多いにも関わらず、黒ボク土で低い値を示した。3 週間後までは両土壌の NH₄⁺ 濃度はほぼ一定の比で推移した。5 週間後以降は穂肥の施用にも関わらず NH₄⁺ イオンはほとんど消失し、鳥山の試験 (植物栄養実験法編集委員会 1990) と同様の消長を示した。NH₄⁺-N は施肥による窒素だけでなく土壌からの無機化によっても供給される (山本 1990) が、水稻による吸収がその供給を上回り、土壌溶液中の濃度が低くなったものと考えられる。

これらの結果、土壌溶液中の陽イオンの合計当量濃度は黒ボク土で 4.7 mmol(+) L⁻¹ から 15.9 mmol(+) L⁻¹ へ、灰色低地土で 7.2 mmol(+) L⁻¹ から 21.0 mmol(+) L⁻¹ へそれぞれ約 3 倍に増加

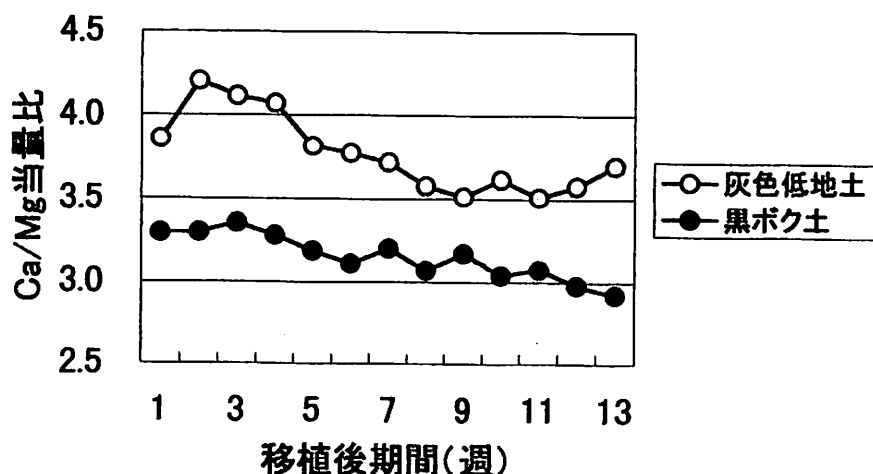


図 3.2-4 土壌溶液のCa/Mg当量比の推移

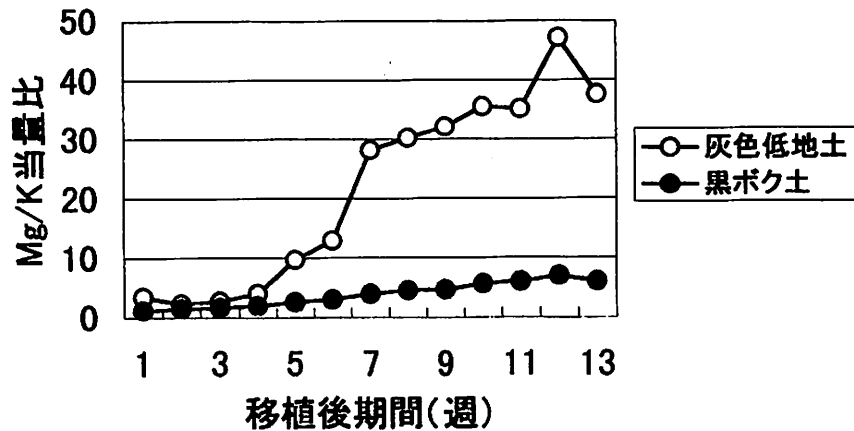


図 3.2-5 土壌溶液の Mg/K 当量比の推移

した。一方、土壌溶液中の K の当量分率は黒ボク土で初期の 0.123 から 12 週間後の 0.031 へ、灰色低地土では 0.048 から 0.004 にそれぞれ減少した。Ca, Mg の増加率がほぼ同じであったため、土壌溶液の Ca/Mg 当量比は図 3.2-4 のように両土壌ともほぼ一定の値で推移した。このことは、これらの土壌のいずれにおいても Ca, Mg のイオン交換選択性に差がないことを示す。土壌溶液の Mg/K 当量比は図 3.2-5 に示したように、Mg 濃度の増加程度が灰色低地土に比べて黒ボク土の方が小さく、K 濃度の減少程度が灰色低地土に比べて黒ボク土の方が小さかったことにより、黒ボク土に比べて灰色低地土で著しく増加した。交換性の Mg/K 当量比は表 2.2-1 から計算すると灰色低地土で 3.1~4.3, 黒ボク土で 1.6~2.1 の間にあった。土壌溶液の Mg/K 当量比とは一致しないが、土壌間で大きな差がみられた。

3) 稲体の無機成分および窒素含有率と精米のアミロース含有率

水稻の穂を除いた稲わら、玄米および精米の Ca, Mg, K, N 含有率と精米のアミロース含有率を表 3.2-2 に示した。

稲わらの Ca, Mg 含有率は、黒ボク土の方が土壌の交換性 Ca, Mg 含量 (表 2.2-1) が多かったにも関わらず、灰色低地土より低かった。また、K 含有率は黒ボク土の方が灰色低地土より高く、N 含有率は黒ボク土の方が低い値を示した。各成分含有率と稲わらの乾物重から算出したポットあたりの各成分吸収量の高低はそれぞれ対応した。Ca/Mg 当量比を表 3.2-2 から計算すると灰色低地土で 1.95, 黒ボク土で 1.65, Mg/K 当量比は灰色低地土で 0.22, 黒ボク土で 0.17 となった。

玄米の各成分含有率のうち、K は土壌間で差が認められなかったが、Ca は黒ボク土の方が灰色低地土より低く、逆に Mg と N は黒ボク土の方が高い値を示した。玄米によるポットあたり吸収量は K が灰色低地土より黒ボク土で高くなったほかは、成分含有率の高低と同様の傾向を示した。Ca/Mg 当量比は灰色低地土で 0.048, 黒ボク土で 0.040, Mg/K 当量比は灰色低地土で 1.41, 黒ボク土で 1.44 となった。

精米のアミロース含有率は黒ボク土の方が低かったが、他の成分含有率はすべて黒ボク土の方が高い値を示した。

これらの結果、稲わらの成分含有率とポットあたり吸収量、および Ca/Mg, Mg/K 当量比の土壌間差は生育期間中の土壌溶液濃度と Ca/Mg, Mg/K 当量比の高低にそのまま対応したが、玄米の Mg, N 含有率、ポットあたり吸収量および Mg/K 当量比の土壌間差は、稲わらと土壌溶液の濃度および Mg/K 当量比の高低とは対応しなかった。これらの成分含有率の土壌間差は窒素

表 3.2-2 稲体中の各成分含有率および精米のアミロース含有率

(g kg⁻¹)

					(g kg ⁻¹)
土壌の種類	稲 わ ら				
	C a **	M g **	K *	N *	
灰色低地土	2.8	0.87	12.7	5.1	
黒 ボ ク 土	2.1	0.77	14.8	4.3	
土壌の種類	玄		米		
	C a *	M g **	K	N **	
灰色低地土	0.104	1.31	3.0	10.9	
黒 ボ ク 土	0.088	1.34	3.0	11.4	
土壌の種類	精 米				
	C a	M g **	K **	N **	アミロース**
灰色低地土	0.052	0.20	1.0	10.1	165
黒 ボ ク 土	0.057	0.32	1.3	10.5	155

Ca, Mg, K, Nは乾物あたり、アミロースは試料の水分含量14.5%あたり。

*, **はそれぞれ5%, 1%水準で土壌間に有意差あり。

無施用で同様に栽培した場合でも同じ傾向にあった(小田原ら 1992)。稲わらと玄米によるポットあたり総吸収量はMgとNで土壌溶液濃度の高低とは対応しなかった。

本試験における玄米の成分含有率において、食味が劣るとされている黒ボク土産米の方がN含有率が高いことは堀野・岡本(1992)の報告と一致したが、無機成分については傾向を異にした。玄米のMg含有率は窒素施肥量の増加により減少する(小田原ら 1992, 平ら 1974)ことが報告されている。本試験ではポットあたりのN施用量は同じであるが、土壌溶液中のNH₄濃度および稲わらのN含有率が灰色低地土の方が高かったため、玄米のMg含有率は灰色低地土の方が低くなったものと考えられる。玄米ではその差はわずかであったが、精米では黒ボク土が灰色低地土の1.5倍のMg含有率を示した。玄米のK含有率は土壌間で差がなく、土壌溶液K濃度、稲わらのK含有率の影響はみられなかったが、精米では黒ボク土の方が高い値を示した。精米は玄米に比べて無機成分含有率の減少(科学技術庁資源調査会 1992, 農林省食糧研究所 1963)がみられるが、玄米と精米のK, Mg含有率の土壌間差から黒ボク土産米の方が胚乳部に分布するK, Mgが多い傾向がうかがえた。堀野・岡本(1992)は同一試料における玄米と白米間の成分含有率の単相関係数はN含有率は非常に高いが、K, Mg含有率では著しく低下することを報告している。本試験の結果からは、栽培した土壌によって玄米中のK, Mgの分布状態が異なる場合のあることが示唆され、このことも玄米と白米間の成分含有率の相関関係を乱す要因の一つと考える必要性が示唆された。

3.1の現地試験の結果から、土壌の違いによる食味とアミロース含有率とは関係が薄いと考察した。食味の良い産米はアミロース含有率が低い傾向がある(稲津ら 1976)ものの、同一品種においてはアミロース含有率と食味とは関係が必ずしも大きいとは限らない(稲津ら 1976, Mastue et al. 1994, 西村 1993)というひとつの例と考えられる。本試験では食味が良いとされる灰色低地土産米の方がアミロース含有率が高い値を示した。玄米千粒重は灰色低地土で22.5, 黒ボク土で22.1と、前者の方が充実が良いことを示していた。1穂内においてアミロース含有率は充実の良い粒ほど高い(堀内 1991, 鎌田・松島 1991, 松江ら 1992)ことから、玄米千粒重の高かった灰色低地土産米の方がアミロース含有率が高くなったと考えられる。

4) 考 察

この研究は、2つの異なる土壌型に属する土壌において、土壌－水稻系を、土壌の固相、土壌溶液、稲わら、玄米、精米の5要素に分けそれぞれの要素における主要無機成分および窒素含有率を測定・比較したものである。その結果、まず第一に稲わらのこれらの成分含有率の土壌間差異は例外なく、その成分の土壌溶液濃度の土壌間差異に対応していた。これは、植物による養分の吸収量が、土壌溶液濃度の増加関数になるという原則に支配されていることのあらわれとみることができる。また、各成分の土壌溶液中濃度は、土壌の交換性成分の含量とは単純な対応は示さなかった。しかし、これは2.2で検討したように土壌の陽イオン交換特性に基づいて予測した土壌溶液陽イオン濃度の値と実測値とのよい一致から、土壌溶液成分濃度は交換性成分とイオン選択性に対応して決まることによると考えられる。次に、玄米と精米の成分含有率と稲わらの成分含有率間には単純な対応関係はなかった。また、玄米および精米の成分含有率と土壌溶液や土壌固相の成分含量に関しても同様であった。このことは、子実体の組成は茎葉の組成と転流に関する生理に依存し、特に後者の影響が大きいことを示している。これらの結果は、土壌の性質とそこで生産された米の食味関連成分含量間の明瞭な関係を示すものではない。しかし、米の食味の土壌依存性に関する研究の方向性に重要な知見を提供しているとみることができる。それは、土壌の直接の影響が強く及ぶのは茎葉部の組成までであることを明示したことである。このことは、土壌の性質と玄米の成分含量あるいは精米の食味を直接対比するやり方は、食味の土壌間差異の存在や、その発生機構の解明のためには最良の方法でないことを意味する。それにかわって、異なった土壌で生育した稲について、土壌の性質と稲わらの組成の関係、稲わらの組成と玄米あるいは精米の組成の2段階をとともに調べることを有用であることを示唆する。

3.2.4 摘 要

灰色低地土および黒ボク土という2つの異なる土壌型に属する土壌において、土壌－水稻系を、土壌の固相、土壌溶液、稲わら、玄米、精米の5要素に分けそれぞれの要素における主要無機成分および窒素含有率を測定・比較した。その結果、稲わらのこれらの成分含有率の土壌間差異は例外なく、その成分の土壌溶液濃度の土壌間差異に対応していた。

3.3 ゼオライト施用による土壌溶液組成の制御

3.3.1 序 文

3.1では、黒ボク土では灰色低地土など他の土壌型における産米に比べて食味が劣り、これは主として精米中の窒素含有率に起因することが明らかにされた。そこで黒ボク土において土壌溶液中の無機態窒素濃度を制御することによって窒素吸収の制御が可能ではないかと考えられる。そこで土壌溶液中の窒素濃度を制御するためにゼオライトの施用効果について検討した。

ゼオライトは高い陽イオン交換容量を持ち、作物の養分として重要で米の食味と関係の深い NH_4 や K イオンに対して高い選択性を示すため、土壌溶液における、これらのイオンの濃度を減少させ、水稻の生育を抑制する効果がある(安藤ら 1988) ほか増収効果も認められている(沼倉ら 1966, 坪田ら 1960, 坪田ら 1963)。そこで、黒ボク土に施用したゼオライトが水稻生育期間中の土壌溶液中 NH_4 および K 濃度などの土壌溶液陽イオン組成にどのような影響を与えるのかについて調査した。

3.3.2 試験方法

福岡県豊前市吉木の黒ボク土水田で 1991 年に試験を行った。供試水田の説明および位置をそれぞれ表 3.1-1 (No3) および図 3.1-1 (No3) に示した。試験区は黒ボク土でゼオライトを 0, 1, 2 kg m⁻² の 3 水準施用し、それぞれゼオライト無施用区、ゼオライト 1 kg 区、ゼオライト 2 kg 区（以下それぞれ無施用区、1 kg 区、2 kg 区）とした。ゼオライトは表 3.3-1 に示した化学性を有する島根県産のモルデナイトを供試した。施肥は窒素施用量で基肥＋第 1 回穂肥＋第 2 回穂肥を 5.0+2.5+1.6 g m⁻² とした。リン酸は基肥に 6.0 g m⁻² を全量施用し、カリは窒素と同量を同じ施肥割合で施用した。

表 3.3-1 ゼオライトの理化学性

pH (H ₂ O)	交換性陽イオン (cmol (+) kg ⁻¹)				CEC (cmol (+) kg ⁻¹)
	Ca	Mg	K	Na	
7.5	35.1	8.5	8.1	59.5	111

コシヒカリの稚苗を 6 月 24 日に栽植密度 22.2 株 m⁻²、1 株 4 本で手植えた。試験規模は 1 区 20 m² で行った。

土壌は 1991 年および 1993 年の水稻収穫期の作土を採取した。比較のため表 3.1-1 に示した産地 No2 の褐色低地土を供試した。風乾後、2 mm で篩別したのち、分析に供試した。分析は pH をガラス電極法、Ca, Mg を原子吸光光度法、K, Na を炎光光度法、CEC をショウレンベルガー法、有機体炭素をチューリン法、全窒素をケルダール法で行った。

水稻生育期間中の土壌溶液の組成を調べるため、鳥山の方法（植物栄養実験法編集委員会 1990）によって、移植した水稻 4 株の中央に長さ 10 cm の土壌溶液採取管（ポラスカップ）を 2~12 cm の深さに埋設し、6 月 24 日から 9 月 16 日まで 1 週おきに 13 回、真空採血管で土壌溶液を採取した。分析は Ca, Mg, K, Na を土壌と同様の方法で、NH₄-N をインドフェノール法（Keeney and Nelson 1982）で行ない 3 連の平均で値を示した。現地圃場における中干しや灌漑が土壌溶液組成に及ぼす影響を調べるため、現地と同じ黒ボク土を用いてゼオライトを 0, 1, 2 kg m⁻² 施用し、3.2 と同様の方法で水稻栽培試験を行った。

また黒ボク土および施用したゼオライトの Ca-K 交換選択性の違いを調べるために、2.1 と同様の実験を行い、Ca-K 交換反応の Vanselow (Sposito 1989) の選択係数 (K_v) を交換性 K 当量分率の関数として測定した。

3.3.3 結果および考察

1) ゼオライト施用にともなう黒ボク土の化学性の変化

表 3.3-2 に 1991 年および 1993 年の黒ボク土と褐色低地土の化学性を示した。黒ボク土のゼオライト無施用区と褐色低地土を比べると、土壌 pH は、ほぼ同じ値であったが、他の項目はすべて黒ボク土の方が褐色低地土より高い値を示した。褐色低地土に対する黒ボク土の各項目分析値は、CEC、交換性 Ca、交換性 Mg および可給態ケイ酸では 1.6~1.7 倍、交換性 K では 2.3 倍、交換性 Na では 1.5 倍、有機体炭素では 1.3~1.5 倍、全窒素では 1.3 倍であった。

ゼオライトの施用にともなう黒ボク土の化学性の変化をみると、1991 年の交換性 K および Na 含量はゼオライトの施用量が多くなるにつれて有意に増加したが、交換性 Ca および Mg 含量はほとんど変化しなかった。ゼオライトの施用にともなう土壌の交換性 Na の増加は、ゼオライトに 59.5 cmol (+) kg⁻¹ にも及ぶ多量の交換性 Na が含まれているためと考えられる。土壌の交換性 K

表 3.3-2 供試土壌の化学性

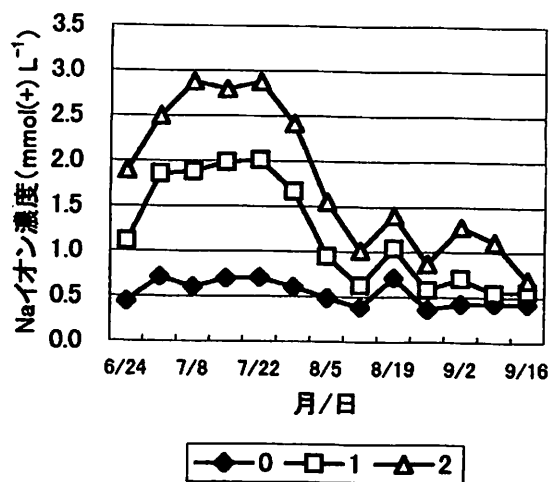
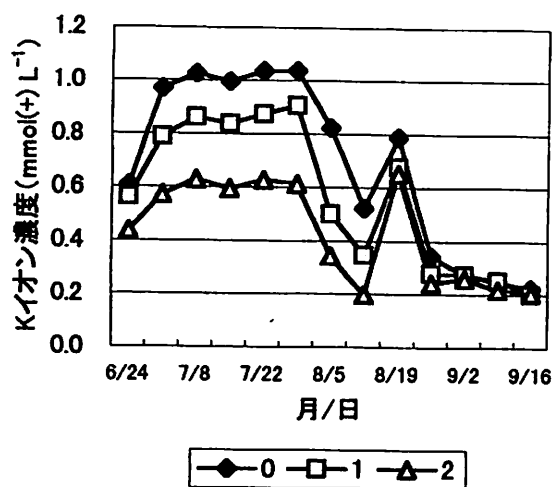
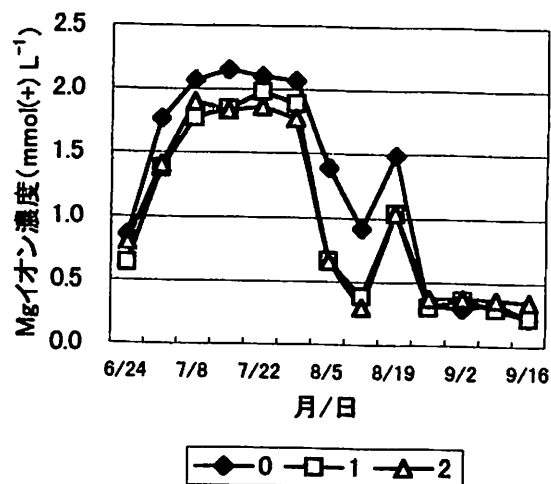
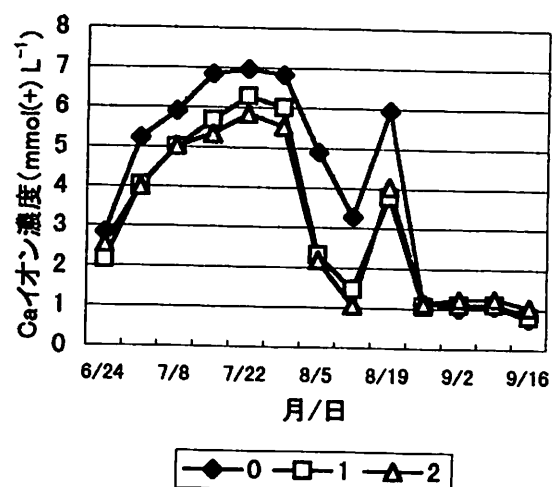
試験年	供試土壌	ゼオライト 施用量	pH(H ₂ O)	T-C	T-N	交換性陽イオン				CEC	可給態 SiO ₂
						Ca	Mg	K	Na		
		kg m ⁻²	g kg ⁻¹			cmol(+) kg ⁻¹				cmol(+) kg ⁻¹	g kg ⁻¹
1991年	黒ボク土	0	5.98a	31.1a	2.81a	16.9a	2.8a	1.6a	0.3a	28.8a	0.58a
		1	6.00a	29.3a	2.76a	16.7a	2.9a	1.8ab	0.5b	29.2a	0.60a
		2	6.05a	28.7a	2.76a	16.7a	2.8a	1.9b	0.7c	28.2a	0.60a
	褐色低地土	0	5.95	20.4	2.24	9.6	1.6	0.7	0.2	17.5	0.39
1993年	黒ボク土	0	6.09a	25.4b	2.76a	16.4a	2.5a	1.7a	0.3a	28.7a	0.58a
		1	6.07a	27.5ab	2.82a	16.8a	2.5a	1.9a	0.3a	29.3a	0.60a
		2	6.10a	24.5a	2.78a	16.8a	2.6a	1.8a	0.3a	29.1a	0.61a
	褐色低地土	0	5.87	20.3	2.22	9.7	1.6	0.7	0.2	17.5	0.35

Fisher's PLSD の検定により異なるアルファベット間に 5%水準で有意差あり。

が増加したことも、ゼオライトに含まれる交換性 K 含量がゼオライト施用前の土壌の交換性 K 含量に比べて高いことによるものと考えられる。有機態炭素、全窒素、CEC および可給態ケイ酸についてはほとんど変化がみられなかった。ゼオライトの CEC は 111 cmol(+) kg⁻¹ と普通の土壌に比べると著しく高いが、有機物を全く含まないため、多量に施用した場合には施用した土壌の有機態炭素および全窒素は減少し、CEC は増加すると考えられる。しかし、本試験のような 1~2 kg m⁻² 程度の施用量では、圃場内のばらつきや分析精度を下回っているものと考えられる。可給態ケイ酸についても同様のことが考えられる。1993 年の黒ボク土の交換性 K および Na 含量は、ゼオライト施用にともなう差がみられなくなった。他の化学性については 1991 年とほとんど同等であった。

2) 土壌溶液陽イオン濃度の変化

図 3.3-1 に水稻生育期間中の土壌溶液陽イオン濃度の経時変化を示した。各処理区とも Ca, Mg, K および Na イオン濃度は移植後 2 週間は経時的に増加し、それ以後 5 週間後 (7 月 29 日) までは一定の濃度で推移した。その後 8 週間後 (8 月 19 日) に NH₄ イオンを除いて一時的に急増したものの、表 3.3-3 に示したかんがい水に近い濃度まで低下した。ゼオライト無施用区における水稻移植日 (6 月 24 日) から 4 週間後 (7 月 22 日) までの土壌溶液陽イオン濃度の増加量は Ca, Mg, K, Na, NH₄ の合計で 6.46 mmol(+) L⁻¹ で、この増加量は土壌と土壌溶液の比を 1:1 とすると、土壌の交換性陽イオン量の 3% 程度に相当する。これは湛水による土壌の還元にともない、遊離鉄、二酸化マンガンとして存在していた Fe(Ⅲ), Mn(Ⅳ) が Fe(Ⅱ), Mn(Ⅱ) に変化し、Ca, Mg などの交換性陽イオンとの交換反応により、土壌溶液中の Ca, Mg, K, Na が増加したためと考えられる。さらに、これら土壌溶液中に増加した陽イオンは水稻根の呼吸や土壌還元によって発生した CO₂ や H₂S の溶解によって生じた水素イオンと交換性陽イオンとの交換反応によっても増加しているものと考えられる。本試験と同じ黒ボク土を用いてポットで 3.2 と同様に水稻を栽培した試験では、土壌溶液中の陽イオン濃度は K イオンを除いて経時的に増加した (図 3.3-2) が、本試験では移植 5 週間後から減少した点で異なる結果となった。これはポット試験は閉鎖系であるのに対して、本試験では 5 週間後以降の中干しやその後の間断かん水の影響で、酸化による土壌溶液中の水溶性および交換性 Fe(Ⅱ) の減少や HCO₃⁻, CO₃²⁻, HS⁻ が減少し、Ca と Mg などの陽イオンが再び土壌に吸着され、土壌溶液中の濃度が減少したためと考えられる。



0: 無施用区, 1: 1kg区, 2: 2kg区

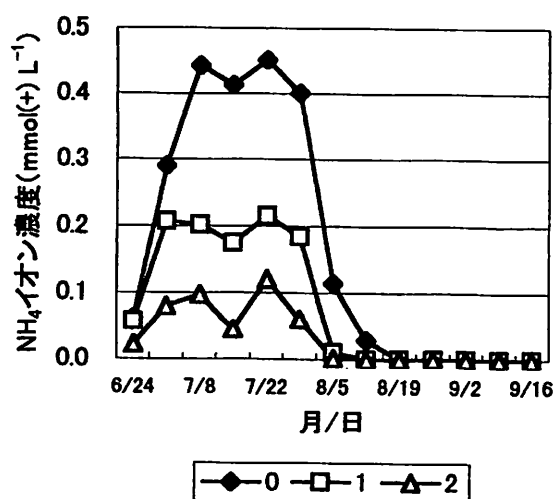
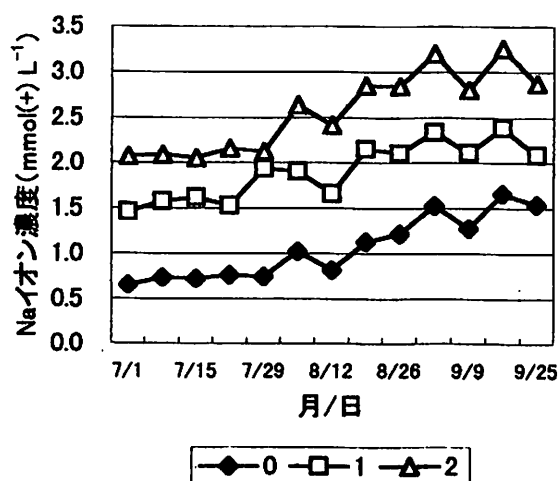
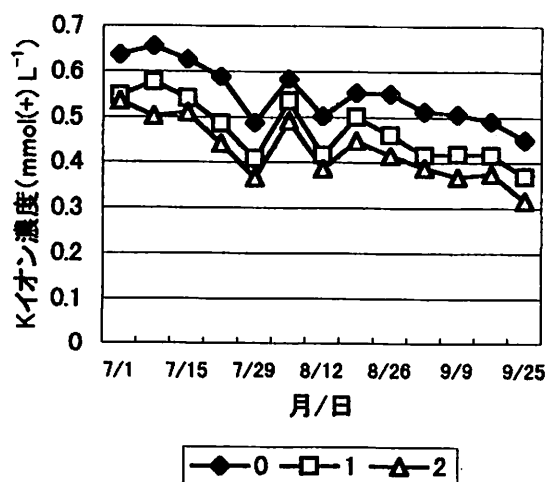
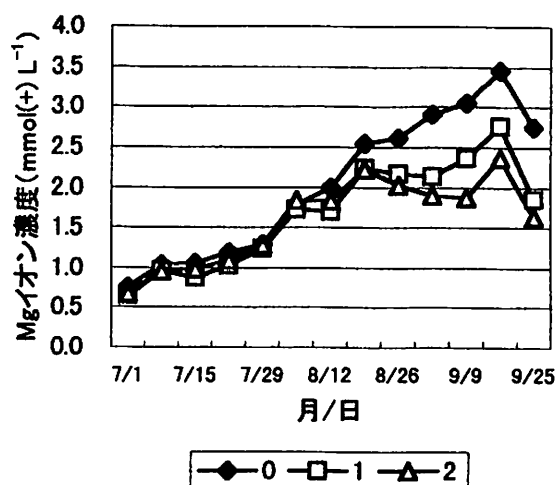
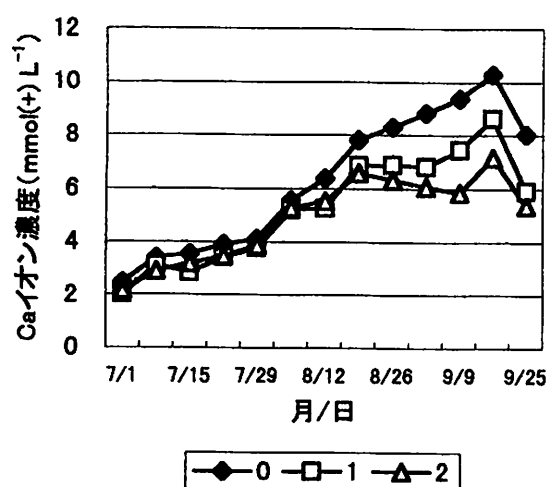


図 3.3-1 現地黒ボク土水田における
水稻生育中の土壌溶液陽イオン濃度の
推移



0:無施用区, 1:1kg区, 2:2kg区

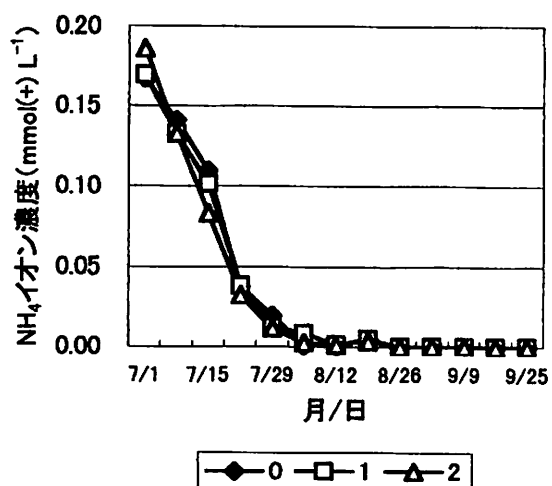


図 3.3-2 ポット試験における水稻生育中の土壌溶液陽イオン濃度の推移

表 3.3-3 黒ボク土水田におけるかんがい水の陽イオン濃度

陽イオン濃度 (mmol L ⁻¹)			
Ca	Mg	K	Na
0.54	0.18	0.07	0.38

数値は1991年7月27日, 8月12日, 9月10日のかんがい水の平均値

表 3.3-4 ゼオライト施用時の黒ボク土の交換性 K および Na と水溶性の割合の計算値

ゼオライト 施用量	交換性 K	K の水溶 性の割合	交換性 Na	Na の水溶 性の割合
kg m ⁻²	cmol(+)kg ⁻¹	%	cmol(+)kg ⁻¹	%
0	1.60	6.4	0.30	22.3
1	1.65	5.2	0.79	23.8
2	1.71	3.6	1.29	20.9

ゼオライトの施用による土壤溶液陽イオン濃度の変化をみると, Ca, Mg, K, NH₄ は施用量が多いほど濃度が減少する傾向を示した。Ca, Mg はほとんど同様の変化を示し, ゼオライトを 1 kg m⁻² 施用することにより 1 から 4 週間後の平均で 16% 程度減少した。K, NH₄ は, それぞれ 16%, 50% 減少した。Na はゼオライト施用量の増加にともない逆に濃度が増加した。これはゼオライトに吸着されていた Na が土壤溶液中に交換放出されたためと考えられる。表 3.3-1 および表 3.3-2 に示したゼオライトと 1991 年の無施用区の黒ボク土に含まれる交換性 K および Na 含量から, 作土量を 120 kg m⁻² として計算すると各区の土壤の交換性 K および Na 含量は表 3.3-4 に示した値になる。また, 1 週間から 5 週間後の間の平均 K 濃度は無施用区では 1.02 mmol(+) L⁻¹, 1kg 区では 0.85 mmol(+) L⁻¹, 2kg 区では 0.61 mmol(+) L⁻¹, Na 濃度はそれぞれ 0.67 mmol(+) L⁻¹, 1.88 mmol(+) L⁻¹, 2.69 mmol(+) L⁻¹ であるため, 土壤と水の比を 1:1 とすると, 交換性 Na の 21~24% が土壤溶液中に溶出し, その割合はほぼ一定であったのに対して, K イオンではゼオライトの施用量が多くなるにつれて水溶性の割合は低下していった (表 3.3-4)。

そこで水稻生育期間中の K, Na および NH₄ イオンの土壤からの供給に関する強度因子 (岡島・松中 1972) を調べるため, K イオンについて (2.3-1) 式で定義したのと同様に土壤溶液中の Na および NH₄ イオンについても, それらの活量と Ca と Mg の活量の和の平方根の比の負対数 pAR^K, pAR^{Na}, pAR^{NH₄} を計算し, その推移を図 3.3-3 に示した。pAR^K は水稻の生育期間中 2kg 区, 1kg 区, 無施用区の順に大きい値を示し, ゼオライト施用によって K イオンの供給力が低下することを示している。また各試験区とも収穫期まで pAR^K はやや増加し, K イオンの供給力が低下する傾向にあることを示した。

pAR^{NH₄} は pAR^K と同様に 2kg 区, 1kg 区, 無施用区の順に大きく, 1 週目から 5 週目まではほぼ一定の値で推移した。6 週目には各区とも大幅に増加し, その後 NH₄ イオンが消失したため, pAR^{NH₄} の値は算出できなかった。このように K イオンと同様にゼオライト施用によって NH₄ イオンの供給力が低下する傾向にあることを示した。

pAR^{Na} の値は全期間を通じて無施用区, 1kg 区, 2kg 区の順に大きくなった。このようにゼオライト施用によって Na イオンの供給力が増加していることを示し, これはゼオライトに含まれる Na イオンによるものと考えられる。

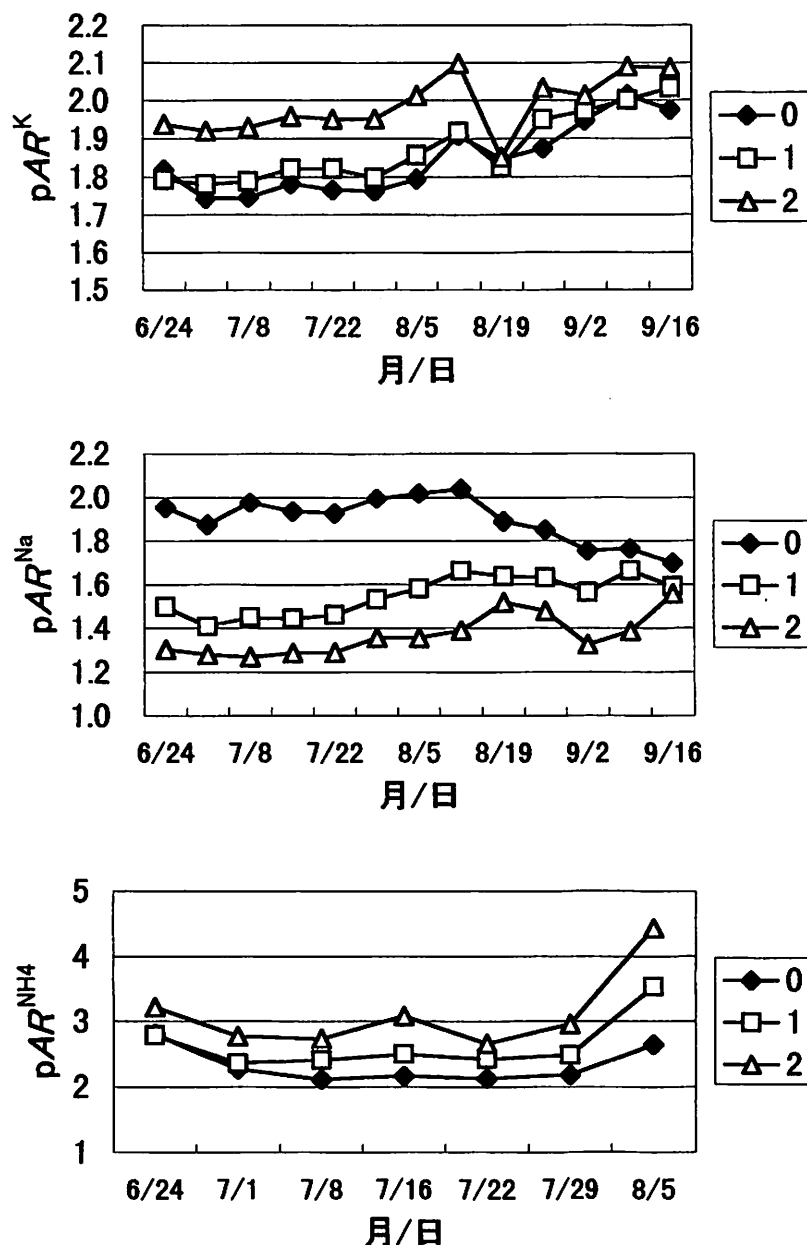


図 3.3-3 現地黒ボク土水田におけるゼオライト施用にともなう pAR^K , pAR^{Na} , pAR^{NH4} の推移

0: 無施用区, 1: 1 kg 区, 2: 2 kg 区

3) 黒ボク土とゼオライトの Ca-K 交換選択性と土壤溶液陽イオン濃度の関係

図 3.3-4 に黒ボク土とゼオライトの交換性 K の当量分率と Ca-K 選択係数 K_v の自然対数との関係を示した。黒ボク土の $\ln K_v$ の値は交換性 K の当量分率 0.05 のとき 6.2 で、交換性 K の当量分率の増加とともに減少し、0.29 のとき 2.6 となった。これに対して、ゼオライトの $\ln K_v$ の値は交換性 K の当量分率 0.20 のとき 15.4 で、交換性 K の当量分率の増加とともに減少し、0.50 のとき 4.6 であった。ゼオライトでは交換性 K の当量分率が 0.2 より小さいときの $\ln K_v$ 値は、この実験では

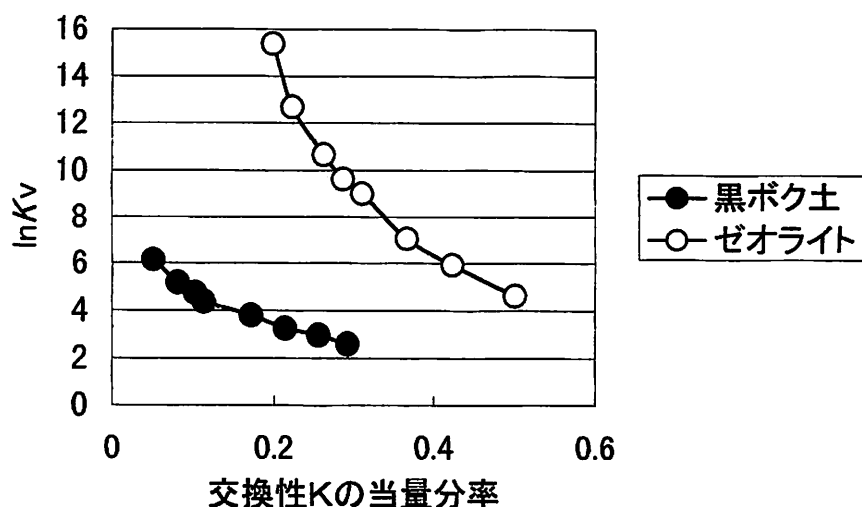


図 3.3-4 黒ボク土とゼオライトの Ca-K 交換選択性と
交換性 K の当量分率との関係

測定できなかった。交換性 K の当量分率が 0.2 のときの $\ln K_v$ 値は、ゼオライトのほうが黒ボク土に比べて約 12 大きかった。実際の圃場条件でみられる交換性 K の当量分率 0.05~0.1 のときの $\ln K_v$ 値の差はさらに大きいものと推察される。

3.3.4 摘 要

ゼオライトの施用により水稻生育期間中の土壌溶液組成は変化し、 NH_4 および K イオンの供給力は低下した。黒ボク土に比べてゼオライトの極めて高い K 選択性に起因するものであることが確認された。

3.4 ゼオライト施用による米の食味改善の実証

3.4.1 序 文

米の食味は精米の窒素含有率すなわちタンパク質含有率が高いと劣る（石間ら 1974, 北田ら 1995, 茶村ら 1972）ことが知られており、本研究においても前述のように黒ボク土産米で米粒中のタンパク質含有率が他の土壌産米より高いことが食味の劣る主因であると考察した。したがって黒ボク土産米の食味改善対策としては、玄米中の窒素吸収を低く制御することが重要である。ゼオライトは $\text{NH}_4\text{-N}$ に対して高い選択吸着性を有するため、その施用により土壌溶液中の濃度を低く制御する効果が認められており（安藤ら 1988）、3.3 においても同様の効果を確認した。したがってゼオライト施用により精米の窒素含有率を低く制御することが可能であると考えられる。そこで福岡県北部に分布する黒ボク土水田にゼオライトを施用し、米の食味がどのように改善されるのかについて現地水田において実証試験を行った。

3.4.2 試験方法

福岡県豊前市吉木の黒ボク土および同市河原田の褐色低地土上の水田において1991～1993年の3年間試験を行った。供試水田の説明および位置をそれぞれ表3.1-1および図3.1-1に示したが、3.3に供試した水田と同一のものである。そして、試験区の構成および水稻栽培法は3.3.2に示したとおりである。褐色低地土（表3.1-1のNo2）では黒ボク土産米との食味を比較するため、ゼオライト無施用区のみ設置し、窒素施用量は黒ボク土と同様とした。

供試品種として、1991年には日本晴とコシヒカリを、1992年および1993年には日本晴とヒノヒカリを用いた。試験規模は1区20㎡で、稚苗を用いて、6月23～24日に栽植密度22.2株/m²、1株4本植の手植を行った。

土壌は1991年および1993年の9月下旬に水稻収穫後の作土を採取し分析に供試したが、結果は表3.3-2に示したとおりである。

1991年および1992年に収穫した稲体および精米（とう精歩留まり90%）の無機成分およびN含有率を分析した。収穫期には収量、穂数、1穂粒数、登熟歩合、精玄米千粒重、品質（検査等級）の調査を行った。

1991年～1993年の3ヶ年にわたって品種別に褐色低地土産米を基準にして、食糧庁米の食味試験実施要領（食糧庁1968）に基づいてパネル16～19名で食味官能検査を行った。

3.4.3 結果および考察

1) ゼオライト施用にともなう稲体および精米の無機成分含有率の変化

ア. 稲 体

稲体の各成分含有率を表3.4-1に示した。黒ボク土のゼオライト無施用区における稲体のMg、K

表3.4-1 ゼオライト施用にともなう稲体および精米の各成分含有率の変化

試験年	品 種	供試土壌	ゼオライト 施用量 kg m ⁻¹	稲 体				精 米								
				Ca	Mg	K	N	Si	Ca	Mg	K	N	Mg/K			
				g kg ⁻¹				g kg ⁻¹								
1991年	日 本 晴	黒ボク土	0	1.80a	0.48a	16.8a	10.3a	77a	0.042a	0.35a	0.93a	16.5a	1.21a			
			1	1.65a	0.50a	20.6b	10.0a	74a	0.038a	0.31a	0.84a	16.4ab	1.19a			
			2	1.63a	0.42a	18.7ab	10.2a	79a	0.040a	0.29a	0.82a	16.1b	1.14a			
		褐色低地土	0	1.61	0.60	19.4	11.8	72	0.0044	0.29	0.83	12.8	1.12			
			コシヒカリ	黒ボク土	0	1.48a	0.55a	15.7a	11.5a	77a	0.037a	0.44a	1.09a	15.4a	1.30a	
					1	1.81b	0.80a	18.9b	11.9a	76a	0.033a	0.46a	1.03a	15.3a	1.44a	
	2	1.60ab			0.68a	15.4a	10.1b	80a	0.032a	0.42a	1.01a	14.7b	1.34a			
	褐色低地土	0		1.69	0.64	23.0	12.4	79	0.039	0.37	0.88	13.7	1.35			
		1992年		日 本 晴	黒ボク土	0	1.61a	0.96a	21.4a	12.5a	61a	0.047a	0.36a	0.93a	14.9a	1.25a
						1	1.51ab	1.01a	19.3b	11.2b	62a	0.043a	0.34a	0.92a	13.8a	1.19a
	2		1.43b			1.00a	18.4b	11.6b	66b	0.048a	0.37a	0.94a	13.8a	1.27a		
	褐色低地土		0		2.07	1.06	21.1	14.2	58	0.046	0.33	1.05	14.9	1.01		
ヒノヒカリ			黒ボク土		0	1.40a	0.96a	19.8a	11.9a	57a	0.042a	0.49a	1.14a	13.8a	1.38a	
					1	1.36a	0.92a	18.2a	11.3a	61a	0.040a	0.44a	1.08a	12.8a	1.31a	
	2	1.41a		1.00a	19.0a	11.9a	63b	0.045a	0.47a	1.11a	13.2a	1.36a				
	褐色低地土	0	2.01	1.11	21.8	13.3	54	0.045	0.45	1.10	13.2	1.32				

稲体は1991年には成熟期に、1992年には穂揃期に採取した。

Mg/Kは当量比。

Fisher's PLSDの検定により異なるアルファベット間に5%水準で有意差あり。

およびN含有率は褐色低地土に比べて低い値を示し、土壤の交換性Mg、K含量および全窒素の大小関係とは傾向を異にした。3.2のポット試験では、黒ボク土と灰色低地土の稲体無機成分含有率の高低は土壤の交換性陽イオン含量の高低とは一致せず、生育期間中の土壤溶液濃度の差異が反映されていた。このことから本試験におけるこのような差は生育期間中の土壤溶液濃度や窒素無機化速度の違いによるものと考えられる。1991年の成熟期の稲体では黒ボク土と褐色低地土間でCa含有率の大小関係は、一定の傾向を示さなかったが、1992年の穂揃期では黒ボク土で低い値を示した。Si含有率では1992年の稲体で黒ボク土の方がわずかに高い値を示し、土壤の可給態ケイ酸含量のちがいによるものと考えられる。

3.3の試験において、黒ボク土の土壤溶液組成はNaイオンを除くすべての陽イオンでゼオライト施用にともない、濃度が低く制御される傾向を示した。一方、ゼオライトの施用にともなう本試験の稲体のCa、Mg、K含有率の変化は、年次や品種によって一定の傾向を示さなかった。N含有率は1991年産コシヒカリのゼオライト2kg区、1992年産日本晴のゼオライト1および2kg区でゼオライト無施用区に比べて低くなったものの、その他の区では差が認められなかった。Si含有率は1991年の成熟期の稲体では差が認められなかったが、1992年の穂揃期の稲体ではゼオライト2kg区で増加し、ゼオライト1kg区でもやや増加する傾向を示した。年次は異なるが、このようなSi含有率の生育時期による違いは、ケイ酸が水稻の生育後期まで吸収されるため成熟期に差がみられなくなったものと推察される。このように、ゼオライトの施用による土壤中の可給態ケイ酸含量に差は認められなかった（表3.3-2）ものの、ゼオライトの可給態ケイ酸の給源としての効果（沼倉ら 1966, 坪田ら 1960）が示唆された。

イ. 精 米

黒ボク土のゼオライト無施用区における精米のCa含有率は褐色低地土と差が認められなかった。Mg含有率は黒ボク土の方が両品種ともやや高い値を示した。KおよびN含有率は褐色低地土より黒ボク土の方が高い場合が多く、稲体の含有率と傾向を異にした。このように稲体と精米の成分含有率の大小関係に差が生じたのは、水稻の栄養生理に依存しているものと推察される。

黒ボク土において、ゼオライトの施用にともなうCa、MgおよびK含有率の変化は一定の傾向を示さなかった。N含有率は1991年の2kg区で2品種とも減少したが、その差はわずかであった。1992年には有意な差ではないが、ゼオライトの施用によってやや減少する傾向を示した。

精米の食味評価と正の相関があると報告されているMg/K当量比（堀野・岡本 1992）は、品種に大きく依存し、土壤型およびゼオライト施用による差はみられなかった。

2) ゼオライトの施用が収量および検査等級に及ぼす影響

表3.4-2に1991～1993年の収量構成要素、収量および検査等級を示した。ゼオライトの施用により、 m^2 当たり粒数および精玄米千粒重はほとんど変化しなかったが、登熟歩合は向上する傾向にあった。精玄米重は1991年の日本晴を除いてやや増加する傾向にあった。なお、ゼオライト施用量の違いが収量に及ぼす影響については明らかでなかった。検査等級については各区ともほぼ同等で、ゼオライト施用の影響は認められなかった。

既報（沼倉ら 1966, 坪田ら 1960）ではゼオライトの施用による増収効果が認められている。本試験においてもほぼ同様の傾向にあったが、籾あるいは穂の窒素含有率については異なる結果が得られた。すなわち、本試験では前述のように精米の窒素含有率がゼオライトの施用によってやや減少する傾向を示したのに対して、沼倉らの報告（沼倉ら 1966）では、籾のN含有率が高まった。日減水深が本試験では中干し前で20～30mm程度に対して、沼倉らの試験（沼倉ら 1966）では火山灰土壌性漏水田であったため約200mmに及んだ。そのため、ゼオライト施用区では無施用区と比べて、 NH_4-N の溶脱量が少なくなって窒素吸収が多くなった。一方、本試験では沼倉らの試験

表 3.4-2 ゼオライト施用にともなう水稻の収量構成要素、収量および検査等級の変化

試験年	品 種	ゼオライト 施用量	m ² 当たり 粉 数	登熟歩合	精玄米 千粒重	精玄米重	同左比	検査等級
		kg m ⁻²	(×10 ³)	%	g	kg m ⁻²		
1991年	日 本 晴	0	296	74.5	21.2	0.487	100	2等ノ下
		1	298	75.7	20.8	0.486	100	2等ノ下
		2	292	75.3	20.9	0.484	99	2等ノ中
	コシヒカリ	0	253	71.4	22.1	0.413	100	2等ノ上
		1	262	73.2	21.8	0.429	104	2等ノ上
		2	259	73.3	21.9	0.435	105	2等ノ上
	日 本 晴	0	264	85.8	21.8	0.496	100	2等ノ上
		1	275	88.0	21.6	0.522	105	2等ノ上
		2	265	90.7	21.6	0.518	104	2等ノ上
1992年	ヒノヒカリ	0	304	80.3	20.9	0.489	100	1等下~2等上
		1	310	82.2	20.3	0.510	104	2等ノ上
		2	311	78.6	20.5	0.495	101	2等ノ上
	日 本 晴	0	217	89.7	20.9	0.411	100	2等ノ上
		1	227	91.5	21.0	0.421	102	1等ノ下
	ヒノヒカリ	0	286	74.7	21.5	0.465	100	2等ノ中
		1	287	79.1	21.5	0.476	102	2等ノ上

検査等級は1等ノ上~3等ノ下の9段階で示した。

ほどゼオライトの施用が窒素の溶脱に影響しないので窒素の利用率を向上させなかったと考えられる。このことは、本試験において稲体のN含有率にほとんど差がなかったことから推察される。また、本試験でゼオライトの施用により精米のN含有率が減少する傾向を示した原因は、登熟歩合向上にともなう精玄米重の増加によるものと考えられる。その他の要因として、黒ボク土では灰色低地土などに比べて水稻の生育後期の窒素発現量の比率が高い（九州農業試験研究推進会議 1988, 山本ら 1993）ものの、ゼオライトの施用によって窒素無機化が促進され（坪田ら 1963）、玄米窒素濃度の高まる登熟期の窒素発現量の割合が減少したことや、図 3.3-1 に示されるように土壤溶液中の NH_4 濃度が低く保たれていたことが考えられる。

3) ゼオライトの施用が食味総合評価に及ぼす影響

食味官能試験の結果を図 3.4-1 に示した。日本晴では3カ年を通じて、ゼオライト無施用区における黒ボク土産米の食味総合評価値（以後、食味値と称す）は褐色低地土産米に比べて-0.60~-0.44と有意に低かった。これに対してゼオライト1kg区では-0.26~0.13、ゼオライト2kg区では0.00~0.26と食味値が高くなり、褐色低地土産米との間に有意差が認められなくなった。試験年次と年数は異なるが、コシヒカリとヒノヒカリにおいても日本晴と同様の傾向を示し、ゼオライトの施用によって食味値が高くなった。

これらの結果から、品種に関わらず黒ボク土産米の食味値は褐色低地土産米に比べて有意に劣ったが、ゼオライトの施用によって改善されたといえる。この原因を土壤溶液組成との関係でみるとゼオライト施用によって土壤溶液の NH_4 濃度は低く制御され、精米中のN含有率が低下傾向を示したのと同時に、土壤の NH_4 -N 保持量がむしろ高くなり収量は増加したためと考えられる。ただし、他の無機成分含有率との関係は明らかではなかった。

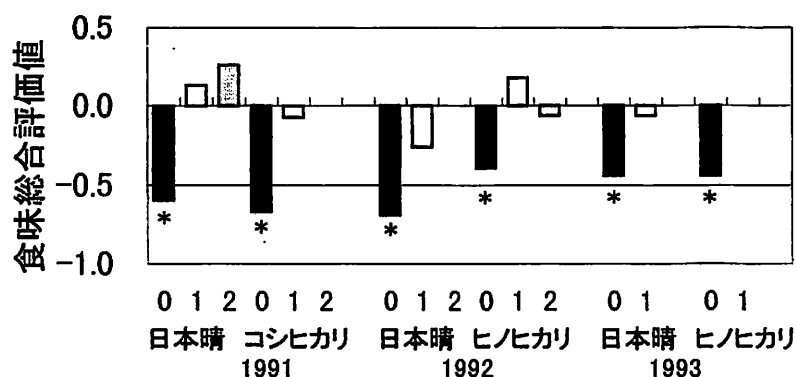


図 3.4-1 ゼオライト施用にともなう食味総合評価値の変化

表中横軸の数値 0, 1, 2 はそれぞれゼオライト施用量 (kg m^{-2}) を表す。

食味総合評価値は、褐色低地土産米を基準 (0.00) にした食味評点である。(*印は基準に対して 5%水準で有意差がある。)

水稻による N 利用率と収量に対するゼオライトの施用効果は、水田土壌の透水性の大小と関係が深く (沼倉ら 1966, 坪田ら 1960), 本試験より日減水深の大きい水田では N 利用率が高まることが考えられる。この場合、水稻の m^2 当たり籾数の増加により登熟歩合が低下し、米の N 含有率が高まる (北田ら 1995) ことが考えられるが、一方ではゼオライトの施用によって稲体のケイ酸含有率が高まり登熟歩合が向上する (奥田・高橋 1961) ことも考えられる。このため、これらの要因が米の食味にどのような影響を及ぼすのかについては、異なる土壌条件でさらに検討を要すると思われる。

3.4.4 摘 要

最近、米の食味に対する関心が高まっており、米の産地や栽培方法と食味との関係が問題とされるようになった。そこで、食味評価値が低い福岡県北部に分布する黒ボク土水田へのゼオライトの施用が、土壌の理化学性、稲体および産米の収量、品質に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) ゼオライトの施用によって、黒ボク土の可給態ケイ酸含量に変化は認められなかったが、稲体の Si 含有率はやや増加する傾向を示した。稲体の Ca, Mg, K および N 含有率には変化が認められなかった。
- 2) 精米の N 含有率はゼオライトの施用により減少する傾向を示したが、褐色低地土との差に比べるとその差は小さいものであった。
- 3) 水稻の収量構成要素である籾数および精玄米千粒重はゼオライトの施用によって変わらなかったが、登熟歩合と精玄米重は向上する傾向にあった。
- 4) ゼオライトの施用により、黒ボク土産米の食味評価が向上し、褐色低地土産米と同程度となった。
- 5) 以上のことから、ゼオライトの施用による黒ボク土産米の食味向上は、主として、精米中の窒素含有率が減少する傾向を示したことに起因すると推察される。

第4章 土壤溶液組成制御による野菜のカルシウム含量向上

4.1 各種カルシウム塩添加による、土壤溶液カルシウム濃度上昇効果の比較

4.1.1 序 文

キャベツ、ハクサイなどの好石灰植物のCa吸収に及ぼす土壤中Caをはじめ、養分バランスおよび水分環境の影響について、これまで多くの研究がなされている(岩田 1962, 川口 1964, 嶋田 1967, Takano and Sisa 1964, 橋 1982)。これらの研究はCa欠乏症の原因究明やその対策のために行われたものである。最近、このような視点からだけでなく、食物としての栄養面から野菜のCaが重要視され、Ca含量の高い野菜品種の選定(林田ら 1995)などの試験が行われている。そして同一品種においては、Ca吸収向上のための栽培技術の開発が求められるようになってきた。このほか、Ca吸収向上による土壤病害抵抗性を高める効果(山崎・保科 1993)も報告されている。

作物による利用面からみた土壤中のCaは、主として土壤コロイドに吸着されたCaイオン、土壤溶液中に溶存する化学種、および炭酸塩、リン酸塩などの難溶性塩類の3つの形態に分けられ、それぞれ交換性Ca、土壤溶液Ca、難溶性Caとされる(和田 1992)。これら3形態の土壤Caのうち、存在量は交換性Caや難溶性Caが大部分を占めるが、作物へのCa供給という面から最も重要なのは土壤溶液Caである。そのため場合によっては土壤溶液に対する溶解度の違いから形態別に分別定量する必要のあることが指摘されている(和田・兼子 1996, 和田ら 1997)。しかしこのような視点から、土壤溶液組成がカルシウム塩の種類と添加量によってどのように制御されているのかを系統的に調べた報告はきわめて少ない。そればかりか、長年行なわれてきた土壤への炭酸カルシウム、水酸化カルシウム施用が土壤溶液組成にどのように影響するかを調べた研究すらみあたらない。そこで、Caの作物への供給状態を土壤溶液組成の面から調べた。

4.1.2 実験方法

福岡県農業総合試験場豊前分場および豊前市吉木の2つの水田土壤を2.0 mmの篩に通した風乾細土を供試した。これらの土壤はそれぞれ細粒灰色低地土および淡色黒ボク土に属する。炭酸カルシウム CaCO_3 、水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、硫酸カルシウム CaSO_4 、硝酸カルシウム $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、塩化カルシウム CaCl_2 の5種類のカルシウム塩を乾土1.0 kg当たり0, 2.0, 4.0, 6.0 cmol(+)混合した。カルシウム塩の添加量2.0 cmol(+) kg^{-1} は、作土量を120 kg m^{-2} とするとCaOで67 kg m^{-2} であり、1回当たりの酸度矯正に使用される量として平均的な量に相当する。含水比0.35となるように蒸留水を加えた。25℃の開放状態で、含水比を0.35に調整しながら2週間静置した後、土壤溶液採取用遠心分離器(国産社製 H1400pF)を用いて15.5 MPa (13500 rpm)で15分間遠心分離し、土壤溶液を採取した。採取した土壤溶液のCaおよびMgイオンを原子吸光光度法、KおよびNaイオンを炎光光度法、 NO_3 、 SO_4 およびClイオンをイオンクロマトグラフィーで分析した。試験は2連で行い、結果は2連の平均で示した。

また、土壤溶液採取に供試した残りの土壤を風乾後、pH(H_2O)とEC(1:5)を測定し、pH7.0, 1 mol L^{-1} $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 溶液で交換性陽イオンを抽出し、原子吸光光度法および炎光光度法によって分析した。

4.1.3 結果および考察

1) 土壤の交換性陽イオン組成の変化

表4.1-1に灰色低地土と黒ボク土における5種類のカルシウム塩添加区の土壤分析結果を示した。交換性Ca含量はどのカルシウム塩についても添加量の増加にともなって増加し、添加量にみあ

表 4.1-1 カルシウム塩添加にともなう土壌の化学性の変化

土壌の 種 類	処理区	処理量 cmol(+) kg ⁻¹	pH(H ₂ O)	EC dS m ⁻¹	交換性陽イオン (cmol(+) kg ⁻¹)				当 量 比	
					Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K
灰色低地土	原 土		6.27	0.09	10.87	1.65	0.46	0.17	6.59	3.59
	無処理	0	5.81	0.38	10.87	1.72	0.49	0.16	6.32	3.51
	CaCO ₃	2	6.15	0.38	12.15	1.63	0.46	0.15	7.45	3.54
		4	6.59	0.41	14.28	1.63	0.46	0.15	8.76	3.54
		6	6.85	0.43	16.41	1.71	0.48	0.17	9.60	3.56
	Ca(OH) ₂	2	6.39	0.37	11.98	1.66	0.46	0.15	7.22	3.61
		4	6.54	0.40	13.85	1.71	0.48	0.16	8.10	3.56
		6	6.85	0.43	15.68	1.72	0.45	0.17	9.12	3.82
	CaSO ₄	2	5.63	0.87	11.85	1.66	0.48	0.16	7.14	3.46
		4	5.53	1.25	13.85	1.65	0.45	0.16	8.39	3.67
		6	5.48	1.75	16.07	1.63	0.42	0.15	9.86	3.88
	Ca(NO ₃) ₂	2	5.48	1.17	12.97	1.77	0.47	0.16	7.33	3.77
		4	5.52	1.93	14.06	1.77	0.46	0.16	7.94	3.85
		6	5.52	2.60	15.19	1.71	0.46	0.16	8.88	3.72
	CaCl ₂	2	5.51	1.24	12.96	1.77	0.49	0.19	7.32	3.61
		4	5.46	2.06	14.49	1.76	0.47	0.16	8.23	3.74
		6	5.53	2.82	15.98	1.71	0.55	0.16	9.35	3.11
黒ボク土	原 土		5.90	0.22	15.64	2.67	1.84	0.41	5.86	1.45
	無処理	0	5.57	0.61	15.57	2.80	1.90	0.38	5.56	1.47
	CaCO ₃	2	5.91	0.60	17.54	2.74	1.93	0.39	6.40	1.42
		4	6.21	0.67	19.25	2.58	1.98	0.41	7.46	1.30
		6	6.50	0.71	21.01	2.71	1.92	0.38	7.75	1.41
	Ca(OH) ₂	2	5.99	0.64	17.98	2.78	1.98	0.39	6.47	1.40
		4	6.25	0.67	19.45	2.80	1.96	0.38	6.95	1.43
		6	6.49	0.71	20.68	2.74	1.98	0.37	7.55	1.38
	CaSO ₄	2	5.53	1.04	17.98	2.66	1.86	0.40	6.76	1.43
		4	5.45	1.54	19.47	2.73	1.95	0.39	7.13	1.40
		6	5.39	2.02	21.82	2.76	1.96	0.42	7.91	1.41
	Ca(NO ₃) ₂	2	5.44	1.41	17.22	2.63	1.93	0.38	6.55	1.36
		4	5.41	2.09	19.30	2.85	1.97	0.41	6.77	1.45
		6	5.39	2.87	21.27	2.80	1.92	0.42	7.60	1.46
	CaCl ₂	2	5.46	1.51	18.03	2.75	2.00	0.41	6.56	1.38
		4	5.40	2.25	19.34	2.74	2.04	0.40	7.06	1.34
		6	5.39	2.98	21.16	2.81	1.93	0.39	7.53	1.46

灰色低地土および黒ボク土の陽イオン交換容量はそれぞれ 16.9 および 28.8 cmol(+) kg⁻¹ である。

た量がほぼ抽出されているとみることができる。交換性 Mg, K および Na イオンはカルシウム塩添加量にかかわらずほぼ一定の値を示した。土壌の pH は CaCO₃ および Ca(OH)₂ 添加区で無処理土壌に比べて添加量の増加とともに上昇した。上昇の程度はどちらも同程度であった。これに対して CaSO₄, Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加区では、無処理土壌に比べてやや低下する傾向を示した。

電気伝導度 EC(1:5) の値は、灰色低地土の CaCO₃ および Ca(OH)₂ 添加区では、6 cmol(+) kg⁻¹ 添加で 0.05 dS m⁻¹, 黒ボク土の同じ処理区では 0.10 dS m⁻¹ 上昇したのに対して、両土壌ともカルシウム塩の添加量が 1 cmol(+) kg⁻¹ 増加するのにともない CaSO₄ 添加区では約 0.25 dS m⁻¹, Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加区では約 0.4 dS m⁻¹ 上昇した。このような差はそれぞれの塩の水に対する溶解度の差に起因するものと考えられる。

交換性陽イオンの Mg/K 比はそれぞれの土壌でカルシウム塩添加処理に関わらずほぼ一定であったが、Ca/Mg 比はカルシウム塩添加量の増加にともない増加した。カルシウム塩の種類によって増加程度に差はみられなかった。これは添加した塩がカルシウムのみであった点で当然の結果といえる。

以上のように、 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ CH}_3\text{COONH}_4$ 溶液によって抽出された陽イオン量にカルシウム塩の種類による差は認められず、カルシウム塩の形態のちがいを示唆する数値は得られなかった。EC の値は塩の種類によって明かな差がみられ、その数値は添加したカルシウム塩の水溶性の程度を反映していた。

2) カルシウム塩添加にともなう土壌溶液イオン組成の変化

図 4.1-1a, b にカルシウム塩の種類とその添加量にともない土壌溶液組成がどのように変化するかを示した。この図からわかるように陽イオンと陰イオンの合計量はほぼつり合っているとみる

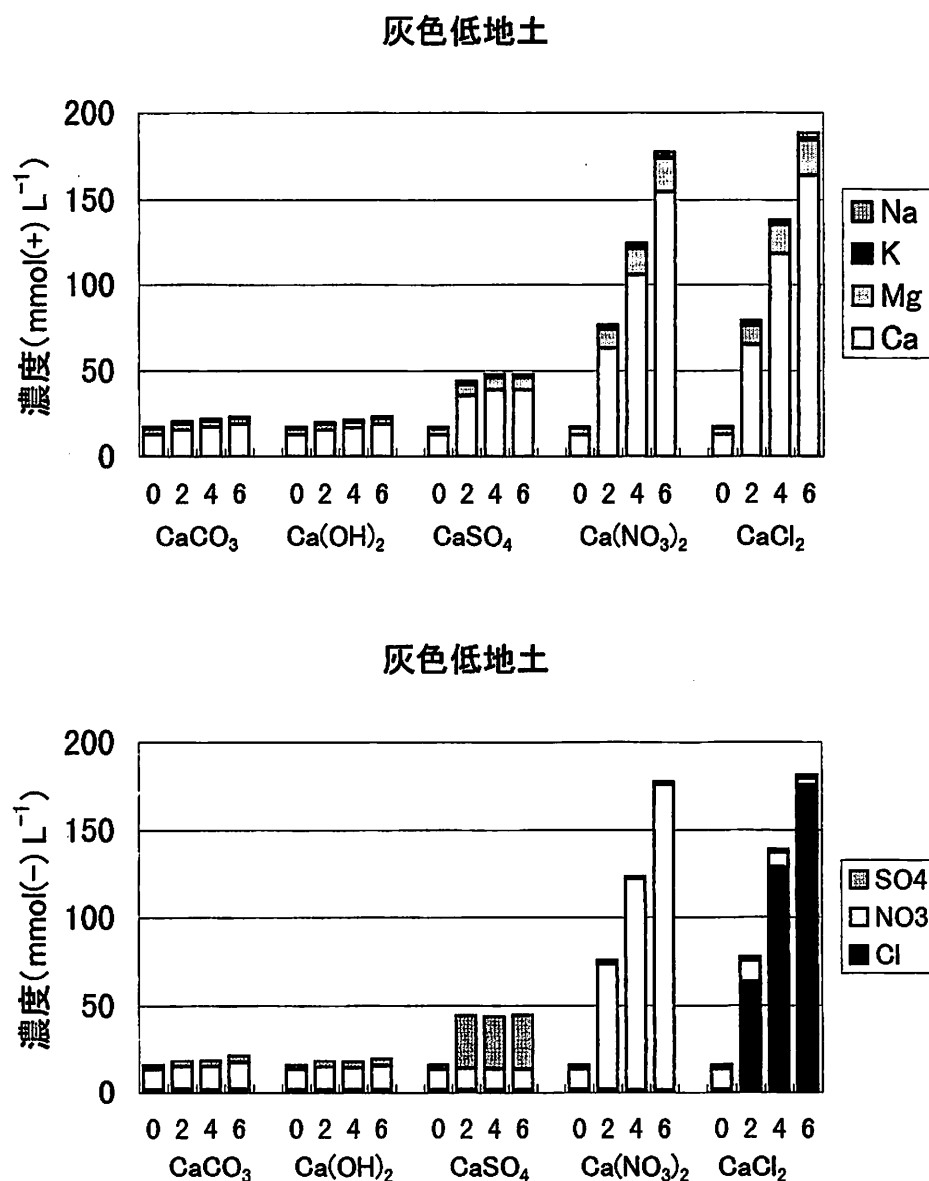
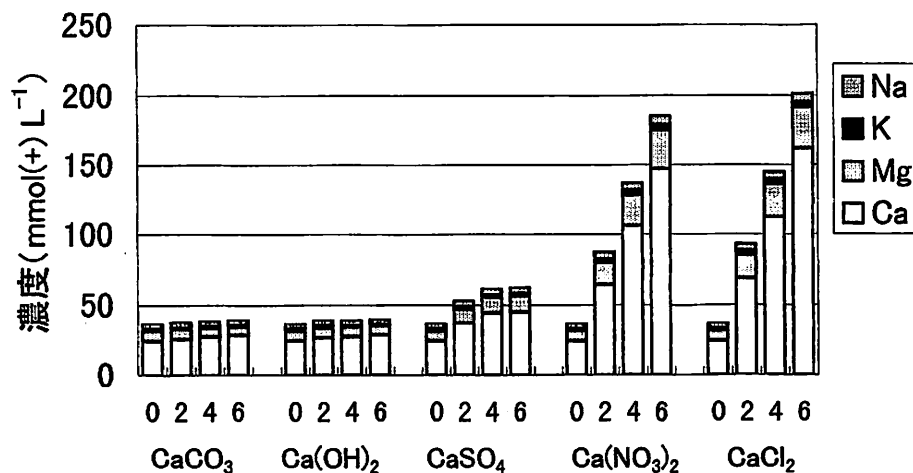


図 4.1-1a カルシウム塩添加にともなう土壌溶液組成の変化

ことができる。土壌溶液中のCaイオン濃度は、 CaCO_3 および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加量とともにやや増加する傾向を示したが、増加量はカルシウム塩の添加量が $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 増加するのに対して、灰色低地土で $1.0 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ 、黒ボク土で $0.7 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ 程度であった。 CaSO_4 の添加量とともにCaイオン濃度は増加したが、添加量 $2 \sim 4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ではほぼ頭打ちとなった。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ および CaCl_2 の添加では、Caイオン濃度の増加程度は CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CaSO_4 に比べると大きく、頭打ち状態になることもなかった。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ および CaCl_2 を添加したことにもなう土壌溶液Caイオン濃度の増加程度はカルシウム塩を $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 添加したことに対して、灰色低地土でそれぞれ平均 $24, 26 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ 、黒ボク土でそれぞれ平均 $21, 23 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ の増加であった。土壌の含水比が0.35であるため、添加した $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ の塩が土壌溶液にすべて溶解したとすると $28.6 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ の増加となるが、測定した濃度はこの値に近いがやや低い値となっている。これは、陰・陽イオンの同時吸着 (Wada 1984, 和田ら 1994) や、他の陽イオン濃度が増加していることから添加したCaイオンと土壌に吸着されていた他の陽イオンとの間でイオ

黒ボク土



黒ボク土

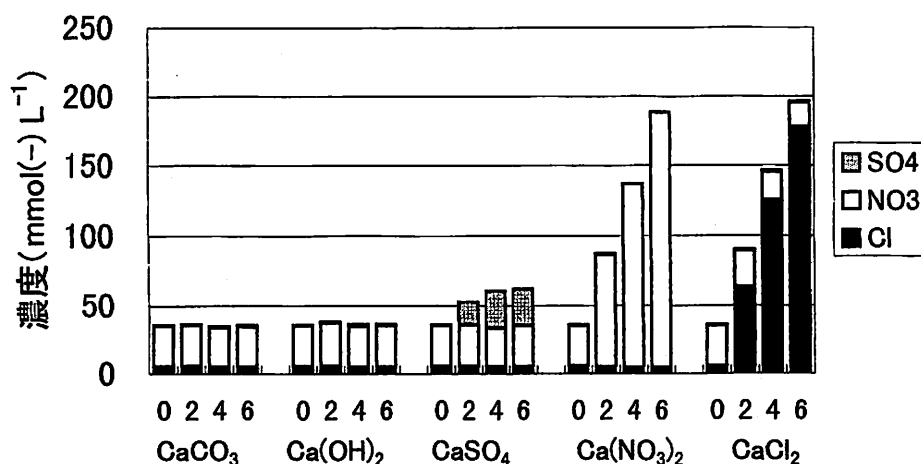


図 4.1-1 b カルシウム塩添加にともなう土壌溶液組成の変化

ン交換がおこったことによるものと考えられる。

土壤溶液中の陰イオン濃度についてみると、 CaCO_3 および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加区では Cl イオンは、一定の増減を示さなかったが、 NO_3 イオンは灰色低地土でやや増加する傾向を示し、 SO_4 イオンは両土壤でわずかに増加した。 CaSO_4 添加区では Cl および NO_3 イオン濃度は変化しなかったが、 SO_4 イオン濃度は灰色低地土では $2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 添加で $30 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ とほぼ頭打ちとなり、黒ボク土では $4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 添加で $27 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ とほぼ頭打ちとなった。 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 添加区では、塩の添加量が $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 増加したのに対して、土壤溶液 NO_3 イオン濃度は灰色低地土で平均 $27 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ 、黒ボク土で平均 $26 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ 増加した。前述の Ca イオンの場合と同様に、土壤の含水比が 0.35 であるため、添加した $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ の塩が土壤溶液にすべて溶解したとすると $28.6 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ の増加となるが、測定した濃度はこの値に近いがやや低い値となっている。このことは、 Ca イオンの結果とあわせて陰・陽イオンの同時吸着 (Wada 1984, 和田ら 1994) がおこっていることを示唆する。このほか、土壤のインキュベート中の有機化 (山室 1985) や揮散 (井田・荒木 1971) などとも考えられる。 CaCl_2 添加区では、 NO_3 イオン濃度は添加量の増加とともに減少する傾向であったのに対して、 Cl イオン濃度は CaCl_2 の $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ の添加に対して、両土壤とも平均 $29 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ の増加であった。カルシウム塩添加量が $2 \sim 4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ では、 Cl イオン濃度は $29 \sim 32 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ の増加であったが、 $4 \sim 6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ では、灰色低地土で 24、黒ボク土で $26 \text{ mmol}(-) \text{ L}^{-1}$ の増加となり、添加した $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ の塩が土壤溶液にすべて溶解したと仮定した場合の計算上の上昇濃度 $28.6 \text{ mmol}(+) \text{ L}^{-1}$ よりやや低い値となった。このように $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 添加の場合と同様に土壤溶液濃度の高い状態では陰・陽イオンの同時吸着がおこっていることが示唆された。

合計イオン濃度は CaCO_3 および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加区では両土壤とも 40 mmol L^{-1} をこえることがなく、比較的低かった。 CaSO_4 添加区では 40 mmol L^{-1} をこえ、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ および CaCl_2 添加区では 2

表 4.1-2 土壤溶液陽イオン濃度および 1:5 水抽出液から換算した EC 値の比較

処 理 区	処 理 量 $\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$	灰色低地土		黒ボク土	
		土壤溶液 dS m^{-1}	1:5 水抽出液 dS m^{-1}	土壤溶液 dS m^{-1}	1:5 水抽出液 dS m^{-1}
無 処 理	0	1.7	5.4	3.7	8.7
CaCO_3	2	2.0	5.4	3.7	8.6
	4	2.2	5.9	3.8	9.6
	6	2.3	6.1	3.9	10.1
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2	2.0	5.3	3.9	9.1
	4	2.1	5.7	3.9	9.6
	6	2.3	6.1	4.0	10.1
CaSO_4	2	4.4	12.4	5.3	14.9
	4	4.8	17.9	6.1	22.0
	6	4.8	25.0	6.2	28.9
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	2	7.7	16.7	8.7	20.1
	4	12.5	27.6	13.7	29.9
	6	17.8	37.1	18.5	41.0
CaCl_2	2	7.9	17.7	9.3	21.6
	4	13.8	29.4	14.5	32.1
	6	18.8	40.3	20.2	42.6

cmol(+) kg⁻¹ の添加によっても 70 mmol L⁻¹ をこえるほど高い値となった。合計陽イオン濃度の約 10 分の 1 が EC の値となる関係（土壤養分測定法委員会 1970）から計算した値と表 4.1-1 の EC(1:5) の値をもとに土壤の含水比 0.35 のときの EC の値を計算した結果を表 4.1-2 に示した。この結果、土壤溶液の EC は CaCO₃, Ca(OH)₂ および CaSO₄ 添加区では濃度障害発生の目安となる 10 dS m⁻¹（土壤養分測定法委員会 1970）をこえることはなかったものの、Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加区では 4 cmol(+) kg⁻¹ の添加では EC は約 10 dS m⁻¹ 上昇した。また、EC(1:5) の値からの換算値と比較すると、後者の方がすべて高い値であった。これは土壤溶液の希釈によって固相からイオンが脱着したため（和田ら 1994）と考えられる。

次に、添加するカルシウム塩の量や種類によっては、土壤溶液濃度と活量の差やイオン対生成が無視できないと考えられるため、Wada and Seki (1994) のプログラムを用いてイオン平衡計算を行った。実験は大気下で行ったので二酸化炭素分圧は 35 Pa とした。その結果を用いて硫酸カルシウムに対する飽和度指数 (SI) を次式によって計算した。

$$SI_{\text{CaSO}_4} = \log \frac{(\text{Ca}^{2+})(\text{SO}_4^{2-})}{K_{\text{spCaSO}_4}} \quad (4.1-1)$$

ここで丸括弧はイオンの活量を、 K_{spCaSO_4} (2.45×10^{-5}) は硫酸カルシウムの溶解度積を示す。計算結果は図 4.1-2 に示した。この値は 0 に近いほど CaSO₄ に関して飽和状態に近いことを示している。

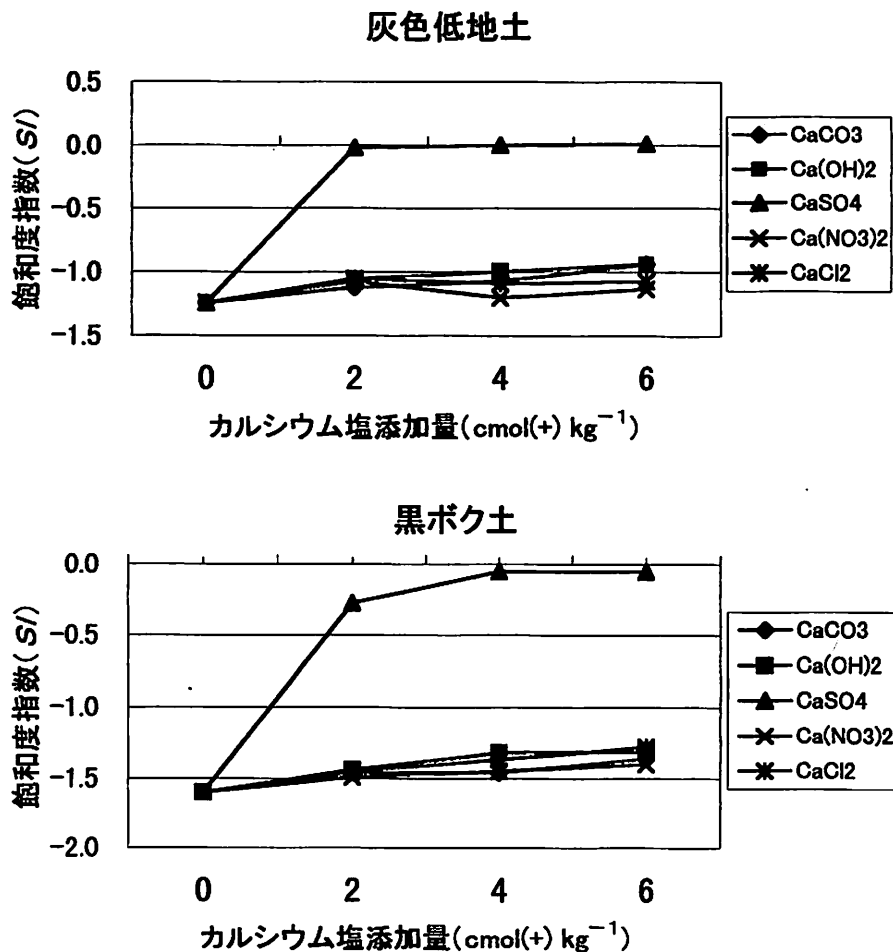


図 4.1-2 各種カルシウム塩添加にともなう CaSO₄ に対する飽和度指数の変化

表 4.1-3 カルシウム塩添加にともなう土壌溶液の 1 価および 2 価イオンの活量係数の変化

処 理 区	処 理 量 cmol(+)kg ⁻¹	灰色低地土		黒ボク土	
		1 価イオン	2 価イオン	1 価イオン	2 価イオン
無 処 理	0	0.86	0.55	0.82	0.45
CaCO ₃	2	0.85	0.53	0.82	0.45
	4	0.85	0.52	0.82	0.45
	6	0.85	0.51	0.82	0.44
Ca(OH) ₂	2	0.85	0.53	0.82	0.44
	4	0.85	0.53	0.82	0.44
	6	0.85	0.51	0.82	0.44
CaSO ₄	2	0.81	0.44	0.80	0.41
	4	0.81	0.43	0.79	0.40
	6	0.81	0.43	0.79	0.39
Ca(NO ₃) ₂	2	0.77	0.36	0.77	0.35
	4	0.75	0.32	0.75	0.31
	6	0.74	0.29	0.73	0.29
CaCl ₂	2	0.77	0.36	0.76	0.34
	4	0.74	0.31	0.74	0.31
	6	0.73	0.29	0.73	0.29

CaSO₄ 添加区を除くほとんどの試料で -1 以下の値で、CaSO₄ に関して未飽和とみなされた。しかし、飽和度指数は Ca 塩添加にともないやや増加する傾向を示した。これは土壌溶液中の SO₄ 濃度がほぼ一定であるものの、Ca 濃度が増加し飽和度指数が増加したことによると考えられる。CaSO₄ 添加区では灰色低地土では 2 cmol(+) kg⁻¹ の添加ですでにほとんど 0 に近い値となり硫酸カルシウムに関して飽和とみなされる。黒ボク土では 2 cmol(+) kg⁻¹ 区で -0.27, 4 および 6 cmol(+) kg⁻¹ 区で -0.05 となり、ほぼ飽和とみなされる値を示した。

次に上述のイオン平衡計算で算出した 1 価および 2 価イオンの活量係数を表 4.1-3 に示した。活量係数は、CaCO₃ および Ca(OH)₂ 添加区では両土壌とも無処理区に比べてほとんど変化しなかった。CaSO₄ 添加区では無処理区に比べて、活量係数は灰色低地土および黒ボク土の 1 価イオンではそれぞれ 0.05, 0.02~0.03 程度低下したのに対して、2 価イオンではそれぞれ 0.11~0.12, 0.04 程度低下した。また添加量による差はほとんどなかった。これは 2 cmol(+) kg⁻¹ の添加でほぼ飽和状態にあり、溶液組成が変化していないことによると考えられる。Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加の 2 cmol(+) kg⁻¹ 区では無処理区に比べて、活量係数は灰色低地土および黒ボク土の 1 価イオンではそれぞれ 0.09 および 0.06 低下し、カルシウム塩の添加量の増加とともに 2 cmol(+) kg⁻¹ 当たりさらに 0.02 ずつ低下した。活量係数は、2 価イオンではそれぞれ 0.19 および 0.09 低下し、添加量とともに 2 cmol(+) kg⁻¹ 当たりさらに 0.03 ずつ低下した。このように水に対する溶解度の高いカルシウム塩ほど活量係数が低下し、しかも 1 価より 2 価イオンの活量係数の低下が大きかった。

2.3 では土壌の交換体のイオン組成を変化させないようにして土壌溶液を希釈・濃縮した場合に AR^K の不変性がどのような条件下で成立するのかについて考察した。このことは土壌溶液の 1 価イオン K と 2 価イオン Ca の比 K/Ca など表わされる陽イオンバランスを土壌診断技術として利用するのに有効である。そこで本実験のようにカルシウム塩添加にともない交換体のイオン組成が大幅に変化する場合に、pAR^K がどのように変化するかを実験結果をもとに、(2.3-1), (2.3-20)

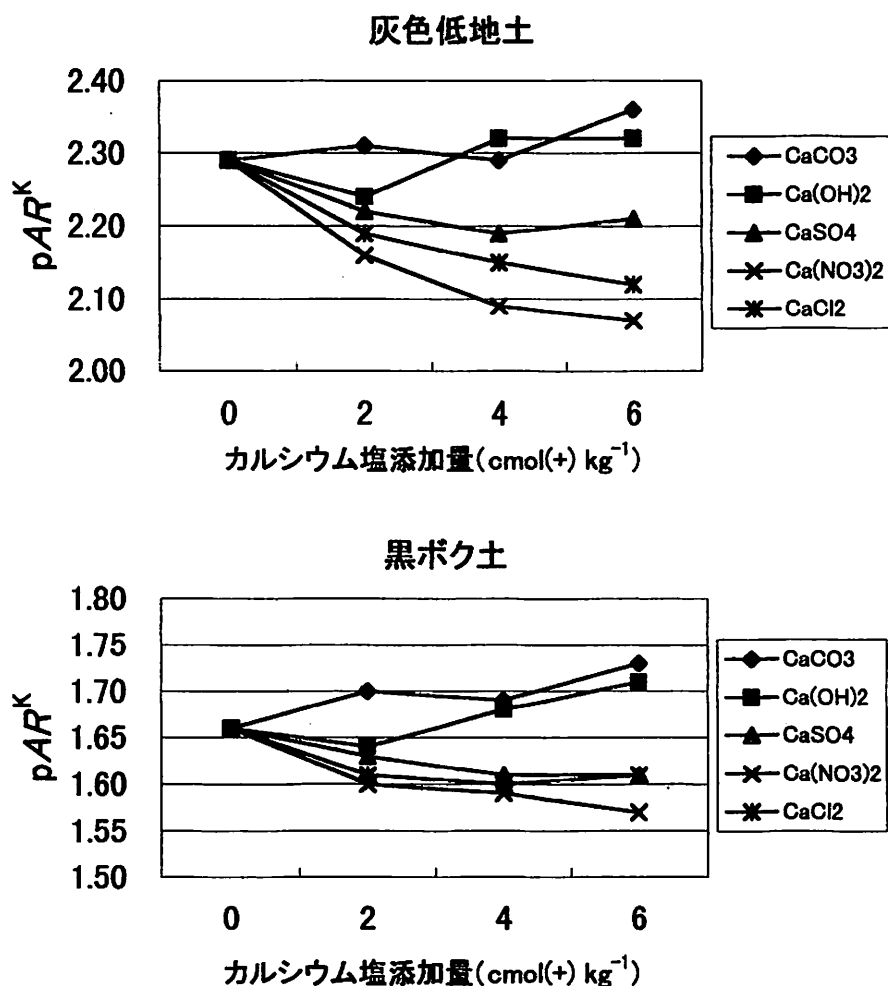


図 4.1-3 各種カルシウム塩添加に伴う pAR^k の変化

から(2.3-21)式から計算し、図 4.1-3 に示した。両土壌とも CaCO_3 および Ca(OH)_2 添加では無処理に比べて 0.03~0.07 の増加を示した。これは土壌の交換性 K 当量分率の減少程度が他のカルシウム塩に比べて大きいことから、交換性 K 当量分率の減少とともに pAR^k が大きくなるという図 2.3-3 に示した数値計算の結果と一致した。 CaSO_4 、 $\text{Ca(NO}_3)_2$ および CaCl_2 添加ではいずれも pAR^k は減少したが、その程度は灰色低地土の方が大きかった。これは図 2.3-4 の数値計算に示したように、土壌の陽イオン交換容量に灰色低地土 $16.9 \text{ cmol(+) kg}^{-1}$ に対して黒ボク土 $28.8 \text{ cmol(+) kg}^{-1}$ とかなり差があることの影響と考えられる。またカルシウム塩添加量の増加とともに pAR^k が小さくなったのは、土壌含水比 0.35 で一定であっても土壌溶液中のイオン濃度は増加し、実質的には土壌溶液の濃縮に相当し、図 2.3-2 で示した水分含量の減少とともに pAR^k が小さくなることと一致した。このように pAR^k は CaCO_3 および Ca(OH)_2 添加では比較的一定に保たれるものの、他の塩では大幅に減少した。このことから土壌溶液の陽イオンバランスの予測のために pAR^k の一定性を利用することができるのは、交換性陽イオンのほかに土壌中に存在するカルシウム塩が CaCO_3 のような難溶性塩のときに限られ、 CaSO_4 、 $\text{Ca(NO}_3)_2$ および CaCl_2 といった溶解度の高い塩では難しいと考えられた。

以上の結果からわかるように、 CaCO_3 および Ca(OH)_2 添加は土壌溶液 Ca イオン濃度の上昇につながらなかった。このように土壌溶液の Ca 濃度が上昇しなかったのはカルシウムを易溶性の塩としてでなく、アルカリ性の炭酸塩あるいは水酸化物として添加したことによると考えられる。

CaSO₄ 添加では土壌溶液濃度は直線的には上昇せず、その溶解度積に Ca 濃度は規定されていることが示された。Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加では Ca イオン濃度はほぼ添加量にみあった量増加した。Ca イオン濃度の増加によって、イオンの活量係数が低下するとともに、電気伝導度すなわち浸透圧の上昇によって、作物によるイオン吸収ひいては生育が抑制されることが予測される。したがって Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ を肥料とくに基肥として利用するには、被覆加工して肥効を調節し緩効性にする必要がある。さらに、添加したカルシウム塩によって土壌溶液組成に及ぼす影響が大きく異なることから、土壌溶液をどのように制御するのかといった目的に応じた使用が必要である。そして土壌溶液組成の制御をより精度の高い技術とするためには、土壌中のカルシウム塩を形態別に分別定量する土壌診断が必要であると考えられた。

4.1.4 摘 要

各種カルシウム塩を土壌に添加し、土壌溶液 Ca 濃度の上昇効果を比較した。

- 1) CaCO₃ および Ca(OH)₂ 添加は土壌 pH は上昇するものの、土壌溶液の Ca イオン濃度の上昇にはつながらなかった。
- 2) CaSO₄ 添加では土壌溶液濃度は無制限には上昇せず、その溶解度積に Ca 濃度は規定されていることが示された。
- 3) Ca(NO₃)₂ および CaCl₂ 添加では Ca イオン濃度はほぼ添加量にみあった量増加したが、高い添加量では陰・陽イオンの同時吸着がおこることが示唆された。また、カルシウム塩添加量の増加にともない、イオンの活量係数の低下と電気伝導度の上昇によって作物に対する吸収が抑制されることが示唆された。
- 4) 土壌溶液の陽イオンバランスの予測のために pAR^K の一定性を利用することができるのは、交換性陽イオンのほかに土壌中に存在するカルシウム塩が CaCO₃ のような難溶性塩のときに限られ、CaSO₄、Ca(NO₃)₂、CaCl₂ といった溶解度の高い塩では難しいと考えられた。

4.2 硝酸カルシウム施用によるツケナのカルシウム含量向上

4.2.1 序 文

アブラナ科野菜のツケナは好石灰植物の一つで、その Ca 含有率が高いことが食品の栄養面から評価されている。福岡県では数年前から *Brassica napus* L. に属するツケナを産地化し葉菜として生産、出荷している。また、ジュース等加工原料としての栽培も広がりつつある。特にジュース用としては Ca 含有率が高いことが望まれ、収穫物の高 Ca 含有率を達成するような栽培条件をさがすことが重要な課題となっている。このほか硝酸含量は高くないことも食品としての安全性の面から品質評価基準のひとつとなりつつある（建部ら 1995-a）。

4.1 では土壌に添加したカルシウム塩の種類によって土壌溶液 Ca 濃度が異なり、作物に対するカルシウム吸収に影響を及ぼすことが示唆された。このうち一般的にカルシウム資材として使用されている消石灰と易溶性の硝酸カルシウムを被覆して緩効性とした2種類の石灰質肥料を用いて、ツケナの生育期間中の土壌溶液イオン組成の差異とそのことがツケナの Ca 含有率に及ぼす影響を明らかにし、カルシウム吸収向上のための施肥法について考察した。

4.2.2 試験方法

試験は福岡県農業総合試験場豊前分場において、図 4.2-1 に示すような土壌断面の水田（細粒灰色低地土灰褐色系）で行った。試験区の構成は消石灰および被覆硝酸石灰を CaO として 0, 0.040, 0.080 kg m^{-2} の 3 水準施用し、それぞれ石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区、被覆硝酸石灰標準区（以下硝カル標準区）、被覆硝酸石灰倍量区（以下硝カル倍量区）とした。消石灰は 1992 年 9 月 30 日に施用し約 12 cm の深さまで混合した。基肥は 10 月 14 日に硝カル倍量区の N 施用量を 0.042 kg m^{-2} としたほかはすべて N, P_2O_5 , K_2O それぞれ 0.021 kg m^{-2} を全層に施用した。石灰無施用区、石灰標準区および石灰倍量区では尿素入り硫加磷安 48 号、硝カル標準区および硝カル倍量区では被覆硝酸石灰および PK 化成を使用した。被覆硝酸石灰は硝酸石灰をポリオレフィン系樹脂でコーティングした窒素肥料で、25℃、畑状態において窒素成分の 80% が溶出する日数が 40 日タイプのものである。試験はすべて 1 区 6 m^2 の 2 区制で行い、結果は 2 区の平均値で示した。

ツケナは *Brassica napus* L. に属する福岡県京築地域在来種（図 4.2-2）で、9 月 14 日に播種し、10 月 21 日にうね幅 1.5 m、株間 0.35 m、条間 0.60 m に定植した（図 4.2-3）。1993 年 2 月 10 日に地上部を 1 区から 6 株収穫し生重を計った。頂部から葉長 15 cm 未満の未展開葉を上位葉、それより下の展開葉で上から 1~4 葉を中位葉、5~8 葉を下位葉および本葉の葉腋から発生する腋芽を側枝として 6 株から採取し、乾燥粉碎後灰化し Ca, Mg, K, N の含有率を分析した。結果は 2 区の平均値で示した。

土壌はツケナの生育初期（11 月 4 日）と栽培後（2 月 15 日）に深さ 0~15 cm から採取し、風乾後、交換性陽イオン量を分析した。

生育期間中の土壌溶液は、図 4.2-4 に示したようにうねの中央部の 2~12 cm の深さに埋設した長さ 10 cm のアルミナ質ポーラスカップ（渡辺ら 1988）から真空採血管を用いて採取し、Ca, Mg, K, Na, NH_4 , NO_3 イオン濃度を分析した。Ca, Mg は原子吸光度法、K, Na は炎光光度法、 NH_4 はインドフェノール法（Keeney and Nelson 1982）、 NO_3 は水溶性有機物の影響が認められなかったため紫外吸



図 4.2-1 供試圃場の土壌断面
（細粒灰色低地土灰褐色系）

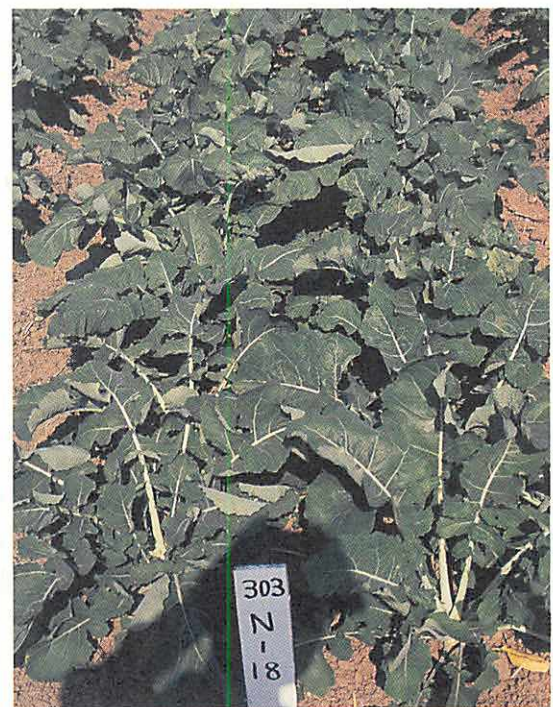


図 4.2-2 *Brassica napus* L.
（京築在来種）の草姿



図 4.2-3 ツケナの栽植様式



図 4.2-4 ツケナ栽培圃場からの土壌溶液の採取

光度法（安藤・尾形 1985）で行った。土壌溶液の採取は各区ともそれぞれ1区2ヶ所から行い、イオン濃度はこれらの平均値で示した。

4.2.3 結果および考察

1) 土壌の交換性陽イオン

表 4.2-1 に各試験区の生育初期および跡地土壌の分析結果を示した。生育初期の土壌の交換性 Ca 含量は石灰施用量の多いものほど多かった。石灰無施用区を基準としたときの増加量は 1 m^2 あたりの作土量を 120 kg とした場合、計算上、石灰標準区で $1.19 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 、石灰倍量区で $2.38 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ となり、実測値の方がそれぞれ 0.43 , $1.87 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 大きい値となった。これは耕深や土壌への混合の不均一さによるところが大きいと考えられる。被覆硝酸石灰を施用した区では消石灰を施用した場合に比べて低い値を示したが、これは硝酸石灰が完全に溶出していないことによると考えられる。交換性 Mg, K, Na 含量は各区ともおおむね同じ値となった。このため土壌の交換性 Ca/Mg 当量比は石灰施用量の増加にともない増加した。

表 4.2-1 供試土壌の化学性

試 験 区	pH (H ₂ O)	EC dS m ⁻¹	交換性陽イオン(cmol (+) kg ⁻¹)				当 量 比	
			Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K
石灰無施用区								
初 期	6.47	0.68	13.57	2.02	1.67	0.34	6.72	1.21
跡 地	6.53	0.09	12.05	1.52	0.90	0.22	7.93	1.69
石灰標準区								
初 期	6.57	0.66	15.19	2.02	1.43	0.31	7.52	1.41
跡 地	6.84	0.08	13.35	1.54	0.95	0.17	8.67	1.62
石灰倍量区								
初 期	6.99	0.79	17.82	2.03	1.57	0.29	8.78	1.39
跡 地	7.37	0.10	15.67	1.56	0.88	0.18	10.04	1.77
硝カル標準区								
初 期	6.41	0.54	14.39	2.21	1.28	0.31	6.51	1.73
跡 地	6.86	0.15	14.36	1.87	0.95	0.21	7.68	1.97
硝カル倍量区								
初 期	6.28	0.87	15.73	2.23	1.30	0.32	7.05	1.72
跡 地	6.80	0.26	15.69	1.62	0.55	0.18	9.69	2.95

跡地土壌の交換性陽イオン量を生育初期の土壌と比べると、変化の大きかったのは K イオンで初期の 54~74% に減少した。Mg, Na イオンもそれぞれ初期の 73~85%, 55~68% に減少した。K イオンの 0.5 cmol(+) kg⁻¹ の減少量は作土量を 120 kg m⁻² とすると K で 0.023 kg m⁻² に換算される。一方、ツケナの地上部による K 吸収量は収穫物の部位別重量とそれぞれの K 含有率 (表 4.2-2) および収穫物の乾物率を 0.12 kg kg⁻¹ として計算すると約 0.012 kg m⁻² となる。このため作土からの減少量の 52% はツケナの収穫物へ移行したことになり、他の減少分はツケナの根部に含まれている分や降雨による作土からの流亡によると考えられる。跡地土壌の交換性 Ca 含量は硝カル標準区、硝カル倍量区ではほとんど変化しなかったが、石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区では 12% 程度減少した。その結果、交換性陽イオンの合計当量数は石灰無施用区、石灰倍量区、石灰倍量区で 15~17% 減少したが、他区は 4~6% の減少であった。

pH(H₂O) はすべての区において生育初期に比べて跡地土壌では上昇しており、これは EC の値の変化から NO₃-N の減少によるものと考えられた。

2) 土壌溶液イオン濃度の変化

図 4.2-5 に土壌溶液イオン濃度の推移を示した。石灰無施用区、石灰標準区および石灰倍量区における Ca, Mg イオン濃度は区間にほとんど差がなく、11 月 6 日に比べて 11 月 16 日にやや増加したものの、その後経時的に減少した。K, Na, NH₄ イオン濃度は 11 月 6 日から経時的に減少した。NO₃ イオン濃度は 11 月 6 日には石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区の間大きな差はなかったが、11 月 16 日には石灰の施用量が多くなるにつれて濃度が高くなった。また、12 月 7 日までは NH₄ イオン濃度は石灰無施用区の方が石灰標準区、石灰倍量区より高い値を示した。これらは土壌 pH が高いほど硝酸化成作用が高まることに起因すると考えられた。そして 12 月 21 日には逆に石灰施用量の増加とともに NO₃ イオン濃度は減少した。

硝カル標準区の Ca, Mg イオン濃度は 11 月 16 日までは石灰無施用区とほとんど同じ値を示したが、その後 1 月 6 日まで石灰無施用区より低い濃度となった。そして 11 月 26 日と 1 月 6 日の硝

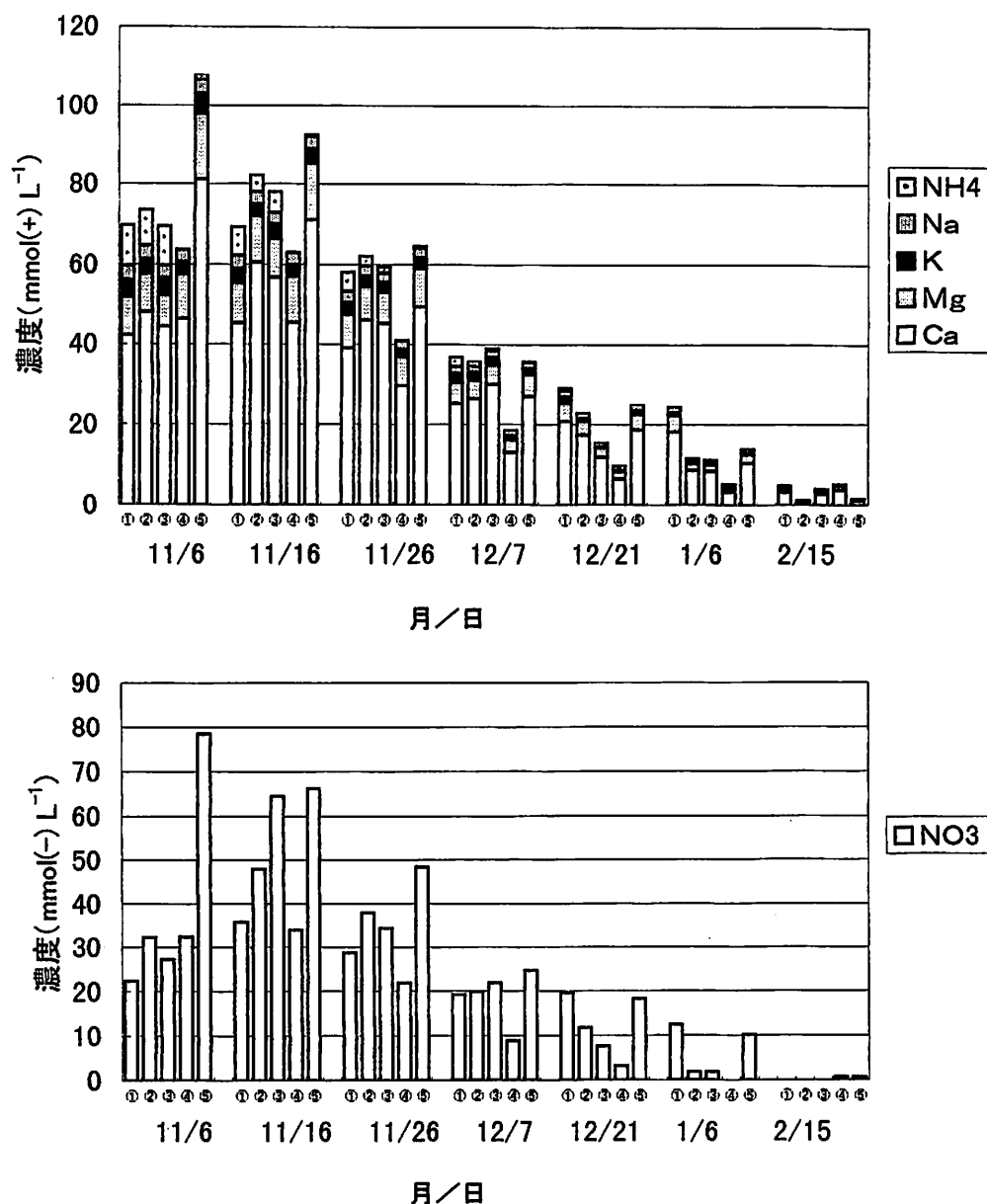


図 4.2-5 ツケナ生育中の土壌溶液イオン濃度の推移

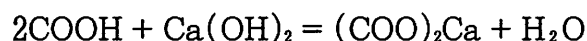
①石灰無施用区, ②石灰標準区, ③石灰倍量区, ④硝カル標準区, ⑤硝カル倍量区

カル標準区の Ca イオン濃度は、それぞれ、石灰無施用区の 76% および 18%, Mg イオン濃度は 87% および 23% となり経時的に低下していった。NO₃ イオン濃度は窒素施用量は同量であるが石灰標準区に比べて常に低い濃度で推移し、1 月 6 日にはほとんど消失した。硝カル倍量区の Ca イオン濃度は硝カル標準区より全期間高い濃度で推移したが、石灰無施用区に比べると 11 月 26 日までは 1.6~1.8 倍の高い値で推移したものの、12 月 7 日~1 月 6 日の間はほぼ同じ濃度で推移した。Mg イオン濃度も Ca イオンと同様の傾向で推移した。NO₃ イオン濃度は Ca イオン濃度と同様の消長を示した。

土壌溶液採取時の水分含量は含水比で平均 0.30 (最大 0.36, 最小 0.27) で、水分含量変化のイオン濃度への影響 (岡島 1981) は小さいものと考えられた。

全体的にみて土壤溶液の陽イオン合計濃度と NO_3 イオン濃度は後者が低いものの、その高低はおおむね対応しているとみられた。

消石灰施用は土壤溶液の Ca イオン濃度の上昇につながらなかった。これはひとつには施用された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の相当部分は、たとえば土壤有機物のカルボキシル基などの弱酸性解離基と



のように反応し、 Ca イオンが土壤有機物に吸着保持されることによると考えられる。また、残りの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の一部は土壤空気の CO_2 を吸収して難溶性の CaCO_3 となることによると考えられる。要するに、土壤溶液の Ca 濃度が上昇しなかったのはカルシウムを易溶性の塩としてではなく、アルカリ性の水酸化物として添加したことによると考えることができる。

Ca/Mg 当量比は比較的変動が少なく、図 4.2-6 のように各区ともほぼ一定の比率で推移した。そして各区間の大小関係も全期間一定で、石灰倍量区、石灰標準区、硝カル倍量区、石灰無施用区、硝カル標準区の順に高くなった。各区とも交換性 Ca/Mg 当量比の高低と土壤溶液の Ca/Mg 当量比の高低の間に対応関係がみられた。

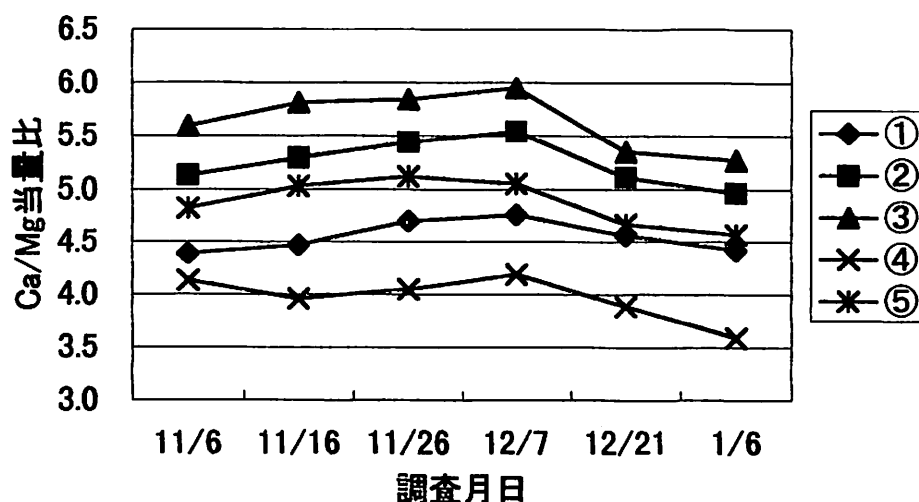


図 4.2-6 ツケナ生育中の土壤溶液 Ca/Mg 当量比

①石灰無施用区、②石灰標準区、③石灰倍量区、④硝カル標準区、⑤硝カル倍量区

Ca と Mg が陽イオン交換反応においてほとんど同等のふるまいをすることは 2.3 で示したが、作物植栽下の畑土壤においても土壤の交換性 Ca と Mg イオンが土壤溶液の Ca と Mg イオンと一定の関係を保ちながら推移した。

K , Na イオン濃度はすべての試験区で日数の経過とともに減少していった (図 4.2-5)。 K イオンは土壤の交換性 K イオンの減少により土壤溶液の K イオン濃度が減少したものと考えられる。また生育の後半に向かうほど石灰標準区、石灰倍量区が石灰無施用区より溶液中の K , Na イオン濃度は減少する傾向にあり、岡島 (1981) が土壤に CaCO_3 を添加し、いくつかの方法で採取して土壤溶液を分析した結果と同様の結果となった。これは石灰施用にともなう土壤の交換体上の Ca イオンの割合の増加すなわち K , Na イオンの割合の低下と交換放出された K , Na の溶脱およびツケナによる吸収によって溶液中の濃度が減少したためと考えられ、土壤溶液の陽イオン組成が土壤の交換性陽イオン組成に規定されていることをうかがわせるものである。

表 4.2-2 ツケナの無機成分含有率および収量

試 験 区	本 葉			側 枝	地上部 株重* (g/株)	
	上位葉	中位葉	下位葉			
	(g kg ⁻¹)					
石灰無施用区						
	Ca	9.4	11.2	19.5	6.9	858±97a
	Mg	2.5	1.7	1.5	1.9	
	K	37.3	38.8	48.8	27.3	
	N	59.6	35.8	24.6	—	
石 灰 標 準 区						
	Ca	9.7	12.5	21.5	7.3	873±84a
	Mg	2.6	1.8	1.4	1.8	
	K	37.0	40.1	46.5	26.8	
	N	62.8	37.6	25.6	—	
石 灰 倍 量 区						
	Ca	9.6	11.9	20.7	7.4	877±101a
	Mg	2.4	1.7	1.3	1.8	
	K	37.2	38.9	46.3	26.2	
	N	58.9	35.0	25.7	—	
硝カル標準区						
	Ca	10.2	13.9	23.6	8.7	847±53a
	Mg	2.5	1.9	1.7	1.9	
	K	36.7	38.9	47.1	27.4	
	N	62.0	38.9	28.9	—	
硝カル倍量区						
	Ca	12.3	17.1	27.8	9.6	1085±105b
	Mg	2.7	2.0	1.7	2.0	
	K	36.9	41.2	52.3	27.9	
	N	68.9	45.1	33.7	—	

*平均値±S D, Duncan多重検定により異文字間に1%水準で有意差あり。

3) ツケナの Ca 含有率

収穫期のツケナの地上部生重および部位別の Ca とその他の成分の含有率を表 4.2-2 に示した。2 区の平均値に対する測定値と平均値の差は Ca で 6.3% 以下, Mg で 4.1% 以下, K で 4.3% 以下であった。地上部株重は硝カル倍量区が高い値を示したが、他の試験区間に差は認められなかった。ツケナの Ca 含有率に及ぼす消石灰施用量の影響は認められなかった。一方、被覆硝酸石灰を施用した区では消石灰を施用した区に比べて Ca 含有率は各部位とも高い値を示した。硝カル倍量区においては Mg, K 含有率も高い値を示した。

これらのことからツケナの地上部による Ca 吸収量は石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区の間に差は認められなかったものの、これらの3区に比べて硝カル標準区および硝カル倍量区で増加した。

硝カル倍量区では生育期間を通じて Ca, NO₃ イオン濃度が高く維持されていたため、地上部株重, Ca, N 含有率ともに高まったと考えられる。硝カル標準区では生育前期の 11 月 16 日からすでに同じ CaO 施用量の石灰標準区より土壌溶液中の Ca イオン濃度は低下したにも関わらず、ツケ

ナのCa含有率は高くなった。表4.2-2にみられるように、石灰標準区に比べて硝カル標準区の方がN含有率が高くN吸収が旺盛であるために、土壤溶液 NO_3 濃度は硝カル標準区の方が低くなっていると考えられる。

キャベツが正常な生育を示す土壤の土壤溶液Caイオン濃度は 6 mmol L^{-1} 程度であることやトマトの地上部Ca含有率は培地Ca濃度が 6.0 mmol L^{-1} で最大となる(嶋田 1967)ことから、本試験の石灰標準区および硝カル標準区のそれぞれの平均Caイオン濃度 $14.8, 10.6\text{ mmol L}^{-1}$ は比較的高い水準にあると考えられる。また $\text{NO}_3\text{-N}$ で生育した植物は NO_3 イオンの吸収にともないCa, Mg, Kイオンなどがよく吸収されるが、 NH_4 がCa, Mg, Kイオンとイオン吸収の場で互いに拮抗するため、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で生育した植物は $\text{NO}_3\text{-N}$ で生育した植物より低いCa, Mg, K含有率となる(池田 1986)。このため、石灰標準区と硝カル標準区のCa含有率の差は、ツケナの生育前期にあたる11月6日と11月16日の土壤溶液中 NH_4 イオン濃度の平均値が石灰標準区の 6.6 mmol L^{-1} に対して硝カル標準区で 0.1 mmol L^{-1} であることと、ツケナのアンモニア耐性に起因すると考えられる。しかし、岩田(1962)がキャベツで行った試験では $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ の比率が9:1に比べて1:1の培養液でCa含有率が低下している。本試験の石灰標準区の土壤溶液の $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ の比率は11月6日と11月16日の平均値で6:1であり、どの程度で影響を受けるのかについてはさらに検討を要するところである。

土壤溶液Caイオン濃度を高めるためにはそれにとまう陰イオンの存在が不可欠となり、必然的に土壤溶液濃度が高まる結果、ハクサイでは縁腐れ症が発生(岩田 1962, 川口 1964, Takano and Sisa 1964)したり、トマトではCa吸収量がむしろ減少する(嶋田 1967)ことが報告されている。しかし、被覆硝酸石灰を施用することにより、土壤溶液濃度や土壤のpHを必要以上に高めることなしにツケナのCa含有率を高め品質向上をはかることが可能であると考えられる。またツケナ生育中の NO_3 イオン濃度も低く制御されることから、作物体の NO_3 濃度が抑制され品質向上につながることを期待される。

4.2.4 摘 要

被覆硝酸カルシウムと消石灰施用がツケナの生育期間中の土壤溶液組成と作物体のカルシウム含有率に及ぼす影響について調べた。

- 1) 土壤溶液Caイオン濃度は石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区でほとんど差がなく、消石灰施用によって濃度は高まらなかった。Caイオン濃度は被覆硝酸石灰標準区では石灰標準区とほとんど同じであったが、被覆硝酸石灰倍量区では常時高濃度で推移した。
- 2) 土壤溶液 NO_3 イオン濃度は陽イオン合計濃度と同等の傾向で推移した。 NH_4 イオンは石灰無施用区、石灰標準区、石灰倍量区で検出されたのに対して、被覆硝酸石灰標準区および被覆硝酸石灰倍量区では検出されなかった。
- 3) ツケナのCa含有率に及ぼす消石灰施用の効果は認められなかったが、被覆硝酸石灰施用によってCa含有率は向上した。
- 4) ツケナのCa含有率は生育期間中の土壤溶液Ca濃度の影響を受けるほか無機態窒素の NO_3 と NH_4 の比によって影響を受けることが示唆された。

4.3 硫酸アンモニウム追肥と土壌水分管理によるツケナのカルシウム含量向上

4.3.1 序 文

ツケナは主に葉腋から発生する側枝を摘み取る栽培型（側枝収穫方式）とハウレンソウと同様に株ごと収穫する栽培型（一斉収穫方式）があり、これらを組み合わせることにより周年出荷が可能となっている。ツケナのCa含有率は品種や栽培方式によって異なる（林田ら 1995）が、同じ品種、栽培方式では目的とする品質成分含量が多い方が好まれ、今後は外観品質だけでなく内容品質の評価体制の充実とともに、市場における評価も高まると考えられる。

施肥や土壌水分管理は、土壌溶液組成を変化させる。適切な栽培条件を確立するためには、これらの要因がツケナの収量とCa含有率に与える影響を明らかにする必要がある。硫酸アンモニウムはツケナへの追肥として一般的に使用されているが、 NH_4 イオンが硝酸化成作用により陰イオンである NO_3 イオンに変化するため、 SO_4 イオンとともに土壌溶液Ca濃度を高めることを目的とした陰イオンの給源としての効果が高いと考えられる。そこで硫酸アンモニウムの追肥施用量と土壌水分管理がツケナの収量とCa含有率に及ぼす影響について検討した。

4.3.2 試験方法

1) 試験1 硫酸アンモニウム追肥による土壌溶液組成制御

試験は福岡県農業総合試験場豊前分場の水田（細粒灰色低地土灰褐系）で行った。水田の土壌断面を図4.2-1に示した。試験区の構成は硫酸アンモニウムによる追肥窒素施用量を1990年度には、0, 0.005, 0.010, 0.015 kg m^{-2} の4水準、1991年度には0, 0.005, 0.010 kg m^{-2} の3水準とした。

両年度とも基肥は9月12日にN, P_2O_5 , K_2O としてそれぞれ0.015 kg m^{-2} になるように、尿素入り硫加リン安48号(16-16-16)を全層に施用した。追肥は1990年度には10月31日、12月10日の2回は、硫酸アンモニウムを各区とも0.005 kg m^{-2} 施用し、1991年1月7日には硫酸アンモニウムを試験区に応じて施用した。1991年度には10月31日、12月16日、および1992年3月2日の3回とも試験区に応じて施用した。追肥はすべてうねの表面に施用した。試験はすべて1区3 m^2 の規模で行った。

ツケナは4.2と同様に *Brassica napus* L. に属する福岡県京築地域在来種で、8月25日に播種し、9月17日にうね幅1.5m、株間0.35m、条間0.60mで定植した。11月上旬に頂芽を摘心した後、本葉の葉腋から発生する腋芽を各試験区6株から採取し収量を調べた。そして、乾燥粉碎後灰化しCa, Mg, KおよびN含有率を分析した。1991年度のツケナ生育中の土壌溶液は、4.2と同様の方法で採取し、Ca, Mg, KおよびNaイオン濃度を分析した。そしてツケナの栽培跡地の深さ0~15cmから土壌を採取し、風乾後、pH, ECおよび交換性陽イオン含量を分析した。

このほか硫酸アンモニウム施用後の土壌溶液組成の変化を調べるため、ポット試験を行った。1/5000 a ワグネルポットに試験圃場の土壌を乾土として2.4kg詰め、含水比0.35程度の湿潤状態で3週間静置したのち硫酸アンモニウムで窒素成分0.0125 kg m^{-2} を水に溶かして表面に均一に施用した。土壌溶液を圃場試験と同様の方法で施肥直前、施肥直後、施肥1週間後および2週間後に採取し、無機成分を分析した。

2) 試験2 土壌水分管理による土壌溶液組成制御

試験はたて1.5m、横1.0m、深さ0.9mのコンクリート枠に試験1と同じ性質の水田土壌を詰め、水稻を均一栽培したものを用いた。降雨の影響を避けるためパイプハウスを設置し雨よけした。

一斉収穫方式による栽培では1990年4月1日および8月1日に条間15cmで播種し、本葉1葉期に株間10cmに間引き、それぞれ5月8日および8月28日に収穫した。施肥量はN, P_2O_5 , K_2O

としてそれぞれ 0.012 kg m^{-2} になるように、尿素入り硫加リン安 48 号を全層に施用した。本葉が 2 葉展開するまで -25 から -10 kPa で管理した後、 -100 から -40 kPa (少かん水区)、 -50 から -15 kPa (中かん水区)、 -10 から -5 kPa (多かん水区) の 3 水準で管理した。

側枝収穫方式による栽培では 1991 年 10 月 1 日に株間 0.3 m 、条間 0.6 m でツケナの苗を定植した。施肥量は試験 1 と同量とした。かん水処理は 1 月下旬まで -12 から -3 kPa で管理した後、 -50 から -20 kPa (少かん水区)、 -12 から -5 kPa (中かん水区)、 -5 kPa (多かん水区) の 3 水準で管理した。側枝収穫方式ではツケナの生育中の土壤溶液を採取し、Ca, Mg, K および Na イオン濃度を調べた。

収穫物は乾燥後、無機成分および窒素含量を分析した。土壌水分管理はテンシオメーター (大起理化工業社製 DIK-3150) のポーラスカップの中心が表面から 10 cm の深さになるように設置して行った。

4.3.3 結果および考察

1) 試験 1 硫酸アンモニウム追肥による土壤溶液組成制御

1990 年度の試験結果を表 4.3-1 に示した。硫酸アンモニウムによる窒素施肥量の 0.010 kg m^{-2} までは収量は増加したが、 0.015 kg m^{-2} では頭打ちとなりやや減少した。Ca 含有率は 0.005 から 0.010 kg m^{-2} で最も高くなり、 0.015 kg m^{-2} ではやや減少した。N 含有率は窒素施肥量の増加とともに増加したものの、収量から計算した吸収量は 0.010 kg m^{-2} でほぼ頭打ちとなった。

表 4.3-1 ツケナへの追肥窒素施肥量が無機成分および窒素含有率に及ぼす影響 (1990 年度)

追肥窒素 施肥量	1本当たり 乾物重	C a	M g	K	N
g m^{-2}	g	g kg^{-1}			
0	2.37	13.9	2.4	34.9	37.5
5	3.06	17.3	2.6	47.6	46.4
10	3.74	17.4	2.4	42.3	46.8
15	3.23	15.0	2.3	39.9	50.1

1991 年 2 月 19 日収穫

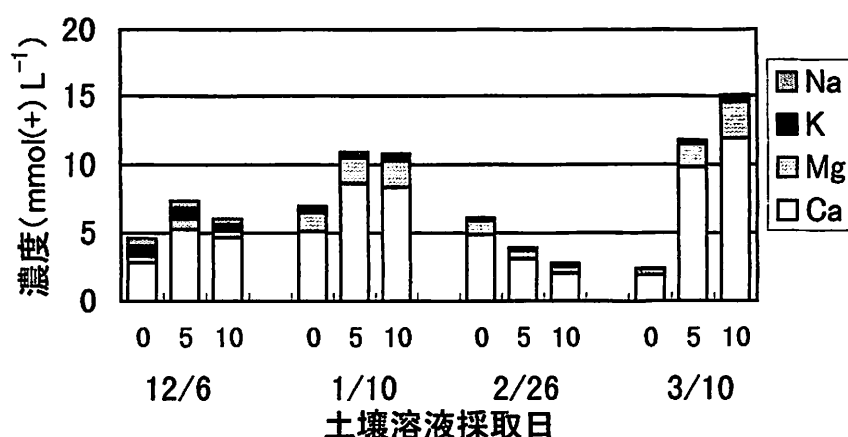


図 4.3-1 硫酸アンモニウム施用にともなうツケナ生育中の土壤溶液陽イオン濃度の推移

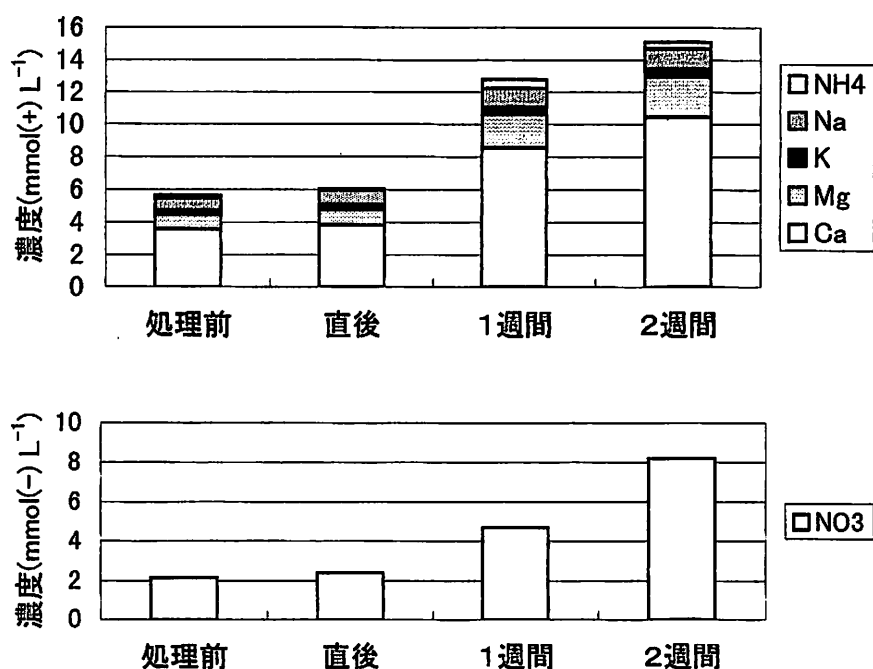


図 4.3-2 硫酸アンモニウム施用にともなう土壌溶液組成の経時変化

圃場における 1991 年 12 月 6 日から 1992 年 3 月 10 日までの土壌溶液組成の推移を図 4.3-1 に、ポットでの硫酸アンモニウム施用後の土壌溶液組成の推移を図 4.3-2 に示した。12 月 6 日、1 月 10 日は窒素無施用に比べて追肥を施用した区で Ca をはじめとした陽イオン濃度はやや高い傾向を示したものの、2 月 26 日は逆の傾向となった。3 月 10 日には硫酸アンモニウムを施用した区で再び高い陽イオン濃度を示した。これは追肥施用からの日数による差が反映されているものとみられ、その日数の最も短い 3 月 10 日で差が大きかった。ポット試験では日数の経過とともに土壌溶液 NO_3^- イオン濃度が増加し、Ca イオン濃度も同様に増加した。 NH_4^+ イオン濃度は施用後 2 週間まで検出されたが NO_3^- イオン濃度と比べるとわずかな量で、追肥施用後すみやかに硝酸化成が進んだものと考えられる。また 4.2 の試験結果で示唆された NH_4^+ イオンのマイナスの影響は表層施用であることから小さいと考えられる。

1991 年度の栽培試験跡地土壌の化学性を表 4.3-2 に示した。交換性陽イオン量は各試験区ともほぼ同程度であった。生育中の土壌の EC は追肥施用量の増加とともに高くなり、pH もそれとともに低下する傾向を示した。

表 4.3-2 試験 1 におけるツケナ栽培跡地土壌の化学性 (1991 年度)

試験区	pH(H ₂ O)	EC	交換性陽イオン				合計
			Ca	Mg	K	Na	
g m ⁻²		dS m ⁻¹	cmol (+) kg ⁻¹				
0	6.82	0.06	13.17	1.53	1.21	0.10	16.01
5	6.91	0.06	13.13	1.50	1.24	0.09	15.96
10	6.81	0.10	13.32	1.49	1.19	0.10	16.10

1992 年 3 月 15 日採取

表 4.3-3 窒素施用量とツケナの時期別Ca, N含有率および収量の関係 (1991年度)

試験区			11月25日	11月29日	12月7日	1月8日	2月12日	2月26日	3月4日	3月12日	合 計
0	Ca	(g kg ⁻¹)	6.4	7.5	7.2	7.9	9.2	9.6	10.6	9.2	
	N	(g kg ⁻¹)	50.5	53.3	57.7	48.5	35.9	35.0	38.8	35.9	
	収量	(g/株)	8.0	53.4	22.2	111.3	8.8	81.5	42.4	11.8	339.4
5	Ca	(g kg ⁻¹)	6.4	7.7	7.2	8.8	9.1	9.6	12.6	9.6	
	N	(g kg ⁻¹)	49.2	53.1	56.5	49.4	37.4	34.0	39.5	42.9	
	収量	(g/株)	11.0	56.9	33.5	102.0	12.5	130.9	56.6	12.4	415.8
10	Ca	(g kg ⁻¹)	6.6	7.0	7.5	8.1	8.4	9.5	11.7	9.2	
	N	(g kg ⁻¹)	47.6	54.6	60.2	51.8	39.0	33.6	38.7	46.3	
	収量	(g/株)	14.0	55.7	33.4	112.6	14.5	142.9	64.0	13.3	450.4

Ca および N 含有率は乾物あたり、収量は生重

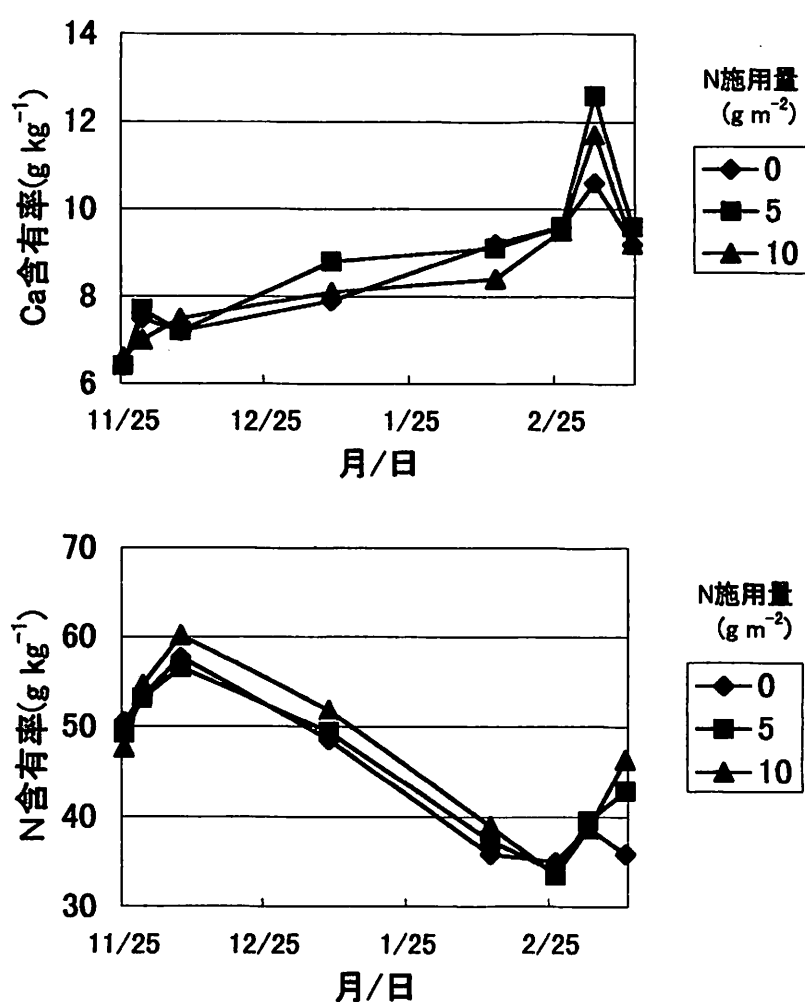


図 4.3-3 硫酸アンモニウム施用量とツケナの Ca および N 含有率の経時変化

表 4.3-3 および図 4.3-3 に追肥窒素施用量と時期別 Ca, N 含有率および収量の関係を示した。Ca 含有率は、表 4.3-1 に示した 1990 年度の Ca 含有率に比べて低い値を示しているが、これは 1990 年度には側枝全体を収穫したのに対して、1991 年度には現地での収穫法と同様に側枝の下位葉を 2 葉残して収穫したためと考えられる。すなわち表 4.2-2 にも示したように Ca 含有率は下位葉ほど

高いため、下位葉を残して収穫した1991年度の側枝の方がCa含有率が低くなったものと考えられる。Ca含有率は全体に収穫日が遅くなるほど高くなった。窒素施用量との関係では、Ca含有率は、11月25日、12月7日、2月26日、3月12日には各試験区の間でほとんど差がみられなかったものの、他の収穫日には 0.005 kg m^{-2} でやや高くなる傾向を示した。窒素含有率は全体に12月上旬から低下しはじめ、3月に再び上昇する傾向を示した。そして窒素施用量の増加とともにN含有率もやや増加する傾向を示した。収量は窒素施用量の増加とともに増加し、 0.005 kg m^{-2} の総収量を100とした指数で、 0.010 kg m^{-2} では108、 0 kg m^{-2} では82であった。

以上のように、硫酸アンモニウム施用によってCaイオン濃度は制御できることが示されたが、窒素の多施用によってツケナの収量はやや高まるものの、N含有率は増加し、Ca含有率は減少する傾向を示した。これはハクサイ（岩田 1962, 川口 1964, Takano and Sisa 1964）やトマト（嶋田 1967）でみられる現象と同様の傾向を示している。このため、ツケナの栽培において収量とCa含有率を高め、N含有率を低く抑制するための1回当たりの追肥施用量は 0.005 kg m^{-2} 程度が最適であると考えられた。

2) 試験2 土壌水分管理による土壌溶液組成制御

一斉収穫方式および側枝収穫方式によるツケナ生育中の土壌の水分ポテンシャルの経時変化を図4.3-4および図4.3-5に、土壌水分管理がツケナの収量とCa含有率に及ぼす影響についての試験結果を、表4.3-4および表4.3-5に示した。

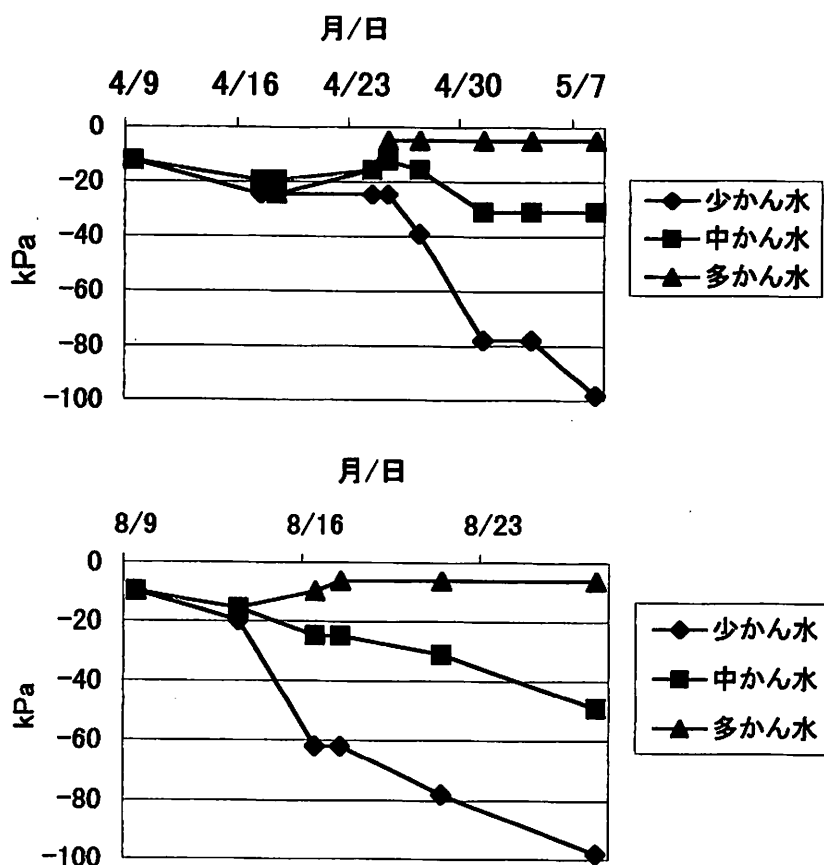


図 4.3-4 一斉収穫方式におけるかん水量が異なる土壌の水分ポテンシャルの経時変化

一斉収穫方式（表 4.3-4）では栽培時期に関わらず収量はかん水量の多い区ほど高くなった。Ca 含有率は多かん水でやや低くなる傾向を示し、収量と逆の傾向となった。そのほか品質を左右する葉色（葉緑素計ミノルタ社製 SPAD-502 で測定）はかん水量が少ないほど高い値を示し、多かん水区では栽培時期に関わらず 35 未満の値となり、商品性において劣った。

側枝収穫方式（表 4.3-5）では多かん水で収量は増加するものの Ca 含有率は減少する傾向にあっ

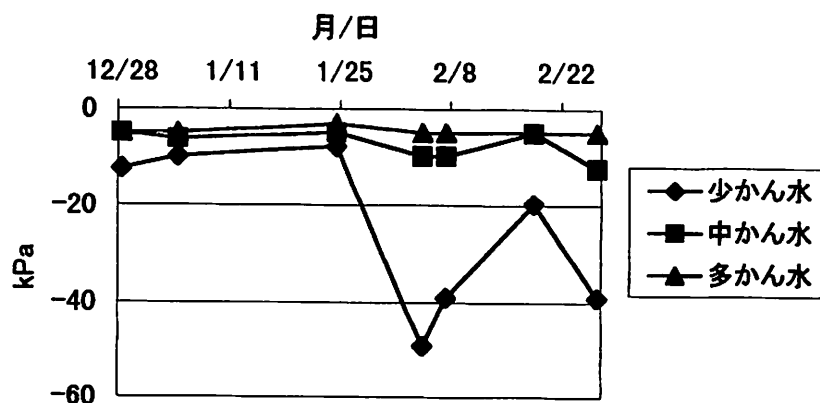


図 4.3-5 側枝収穫方式におけるかん水量が異なる土壌の水分ポテンシャルの経時変化

表 4.3-4 かん水処理にともなう一斉収穫方式におけるツケナの生育・収量と無機成分および窒素含有率

播種日	試験区	草 丈 cm	葉 色	乾物重 g/本	Ca	Mg g kg ⁻¹	K	N
4 月 1 日	少かん水	22.6	38.6	1.48	21.5	3.8	43.8	42.4
	中かん水	24.6	34.0	1.60	20.9	3.5	42.8	42.2
	多かん水	24.3	33.7	1.85	18.6	3.7	47.4	41.4
8 月 1 日	少かん水	17.6	47.0	0.90	14.4	5.5	31.6	45.5
	中かん水	23.5	40.9	0.93	14.1	4.8	34.0	48.8
	多かん水	27.1	34.2	1.06	13.3	4.4	30.9	49.5

収穫日は 4 月 1 日播種で 5 月 8 日、8 月 1 日播種で 8 月 28 日

葉色はミノルタ社製葉緑素計 (SPAD502) による測定値

無機成分および窒素含有率は乾物あたり

表 4.3-5 ツケナのかん水処理にともなう側枝収穫方式における収量と無機成分および窒素含有率

試験区	乾物重 g/株	Ca	Mg g kg ⁻¹	K	N
少かん水	20.6	9.1	2.1	39.6	48.9
中かん水	23.4	9.5	2.1	40.6	45.7
多かん水	23.7	8.4	1.5	34.2	24.3

1992年2月12日と3月11日の収穫物の合計収量および平均値

無機成分および窒素含有率は乾物あたり

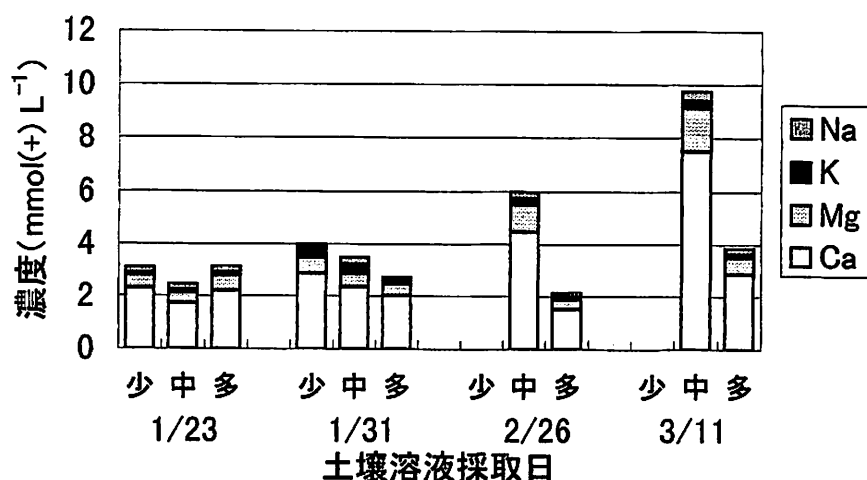


図 4.3-6 土壌水分管理にともなうツケナ生育中の土壌溶液陽イオン濃度の推移

注) 2/26, 3/11の少かん水区では土壌溶液は採取できなかった。

表 4.3-6 試験 2 におけるツケナ栽培跡地土壌の化学性

試験区	pH(H ₂ O)	EC	交換性陽イオン				合計
			Ca	Mg	K	Na	
		dS m ⁻¹			cmol (+) kg ⁻¹		
少かん水	5.36	0.27	10.93	1.36	1.22	0.13	13.64
中かん水	5.34	0.29	11.00	1.34	1.34	0.13	13.81
多かん水	5.39	0.22	10.49	1.30	1.32	0.13	13.24

1992年 3月20日採取

た。N, Mg および K 含有率も Ca 含有率と同様の傾向を示した。土壌溶液組成は土壌水分の状態が同じ 1 月 23 日には試験区間に差がみられなかったが、2 月 26 日と 3 月 11 日には中かん水区の方が多かん水区より高い陽イオン濃度を示した (図 4.3-6)。少かん水区では土壌溶液は採取できなかったが、圃場においても 2.4 と同様に水分含量変化にともなう陽イオン濃度の変化を推測できる。栽培跡地土壌の化学性を表 4.3-6 に示した。多かん水区の EC, 交換性 Ca および Mg 含量がやや低くなったが、少かん水区と中かん水区では差がみられなかった。これは図 4.3-5 にみられるように、水分ポテンシャルが少かん水区と中かん水区では差が小さいのに比べて、多かん水区では低い水分ポテンシャルで管理したことによるものと考えられる。

一部の塩類集積土壌を除いて土壌溶液中に溶出している溶質量はほぼ一定である (2.4) ことから、少かん水ほど土壌溶液濃度は高く、栽培時期や無機成分によっては、このことがツケナの成分含有率に反映していることが示唆された。しかし、その差は小さく、むしろ収量性にみられるように作物の水分生理の影響が強く認められ、収量性および品質の両面から判断して中かん水で管理することが最適であることが明らかにされた。

4.3.4 摘 要

硫酸アンモニウム追肥および土壌水分管理によるツケナの収量、Ca 含有率に及ぼす影響について検討し、最適栽培条件を明らかにした。

- 1) 硫酸アンモニウム追肥によって Ca をはじめとする土壌溶液の陽イオン濃度は増加する傾向を示した。これは硫酸アンモニウム由来の SO_4 および NO_3 イオン濃度の増加によるものと考えられた。また、硫酸アンモニウムの表層追肥では速やかな硝酸化成によりツケナの根群域の土壌溶液 NH_4 イオン濃度は低い濃度であった。
- 2) ツケナの栽培において収量と Ca 含有率を高め、窒素含有率を低く抑制するための 1 回当たりの追肥窒素施用量は 0.005 kg m^{-2} 程度が最適であることが明らかにされた。
- 3) 土壌水分管理によって土壌溶液組成は変化し、多かん水ほど陽イオン濃度は低くなった。
- 4) 土壌水分管理による土壌溶液濃度制御によるツケナの Ca 含有率向上効果は判然としなかった。Ca 含有率のほか収量および外観品質から、土壌水分を -50 から -12 kPa 程度に維持する管理が最適であることが明らかにされた。

4.4 硫酸カルシウム施用によるツケナのカルシウム含量向上

4.4.1 序 文

土壌溶液 Ca 濃度を高めることだけが目的であれば、溶解度の高い硝酸カルシウム $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、塩化カルシウム CaCl_2 が最も効果が高いことは 4.1 の実験結果で明らかである。しかし野菜のカルシウム欠乏症の発生要因として、土壌溶液濃度の上昇が報告されている (岩田 1962, 川口 1964, Takano and Sisa 1964) ことから、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ を被覆することによる土壌溶液濃度の制御が必要である。4.2 では溶解度の高い $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ を被覆し、緩効性に加工した肥料の施用により、ツケナの Ca 吸収向上を認めた。

硫酸カルシウム CaSO_4 は水に対する溶解度が炭酸カルシウム CaCO_3 、消石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と硝酸カルシウム $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、塩化カルシウム CaCl_2 との中間的な性質をもち、土壌溶液 Ca 濃度は CaSO_4 の溶解度によって規定される上限がある。そのため、4.2 の圃場試験で使用した $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ のように被覆し緩効性にする必要がないと考えられる。そこで CaSO_4 の施用がツケナによる Ca 吸収に及ぼす影響について検討した。また野菜の内的品質を高めるために水分管理によって品質を向上させる栽培法が検討されている (橘 1982, 渡邊ら 1987, 馬西ら 1996) ように、 CaSO_4 の溶解には土壌水分含量の影響を無視することはできない。また、施設土壌にみられるように硫酸イオンが集積し、通常的水分含量で飽和状態となっている土壌も認められ (岡島 1981, 和田ら 1994), 土壌水分管理との関係についても明らかにすることが必要と考えられる。そこで本試験では土壌水分管理がカルシウム吸収に及ぼす影響についても同時に検討した。

4.4.2 試験方法

福岡県農業総合試験場の施設土壌を用いて 1995 年に試験を行った。硫酸カルシウムを乾土 2.77 kg に $0, 2, 4 \text{ g}$ の 3 水準添加し全体に混合し、 $1/5000 \text{ a}$ のワグネルポットに充填した。これは乾土 1.0 kg 当たり $0, 1.06$ および $2.12 \text{ cmol}(+)$ の添加量に相当し、それぞれ硫酸カルシウム無添加区、硫酸カルシウム $1 \text{ cmol}(+)$ 区および硫酸カルシウム $2 \text{ cmol}(+)$ 区 (以下それぞれ硫カル無添

加区、硫カル 1 cmol(+) 区、硫カル 2 cmol(+) 区) とした。さらに以上のそれぞれの試験区について土壌水分を 1995 年 11 月 10 日から 11 月 27 日までは $-49 \sim -16$ kPa (pF2.2~2.7) で管理した後、11 月 28 日から収穫日の 12 月 14 日までは $-142 \sim -62$ kPa (pF2.8~3.2), $-56 \sim -21$ kPa (pF2.3~2.8), $-17 \sim -7$ kPa (pF1.8~2.2) となるように脱イオン水でかん水し、それぞれ少かん水区、中かん水区、多かん水区とした。水分ポテンシャルはあらかじめ供試土壌を用いて加圧板法および遠心法によって作成した pF-水分曲線を用いて、含水比から測定した。

施肥はポットあたり燐硝安加里 2.66 g をポットの表層約 10 cm の土壌に混合した。これは N, P_2O_5 および K_2O としてそれぞれ 20 g m^{-2} に相当する。*Brassica campestris* L. に属するツケナを 10 月 25 日にプラグトレイ 1 穴に 3 粒播種し、育苗したものを 11 月 10 日に 2 本に間引いて 1 ポットに 3 株移植した。図 4.4-1 のようにガラス温室内でツケナを栽培した。生育期間中の平均気温は $10 \sim 25^\circ\text{C}$ であった。

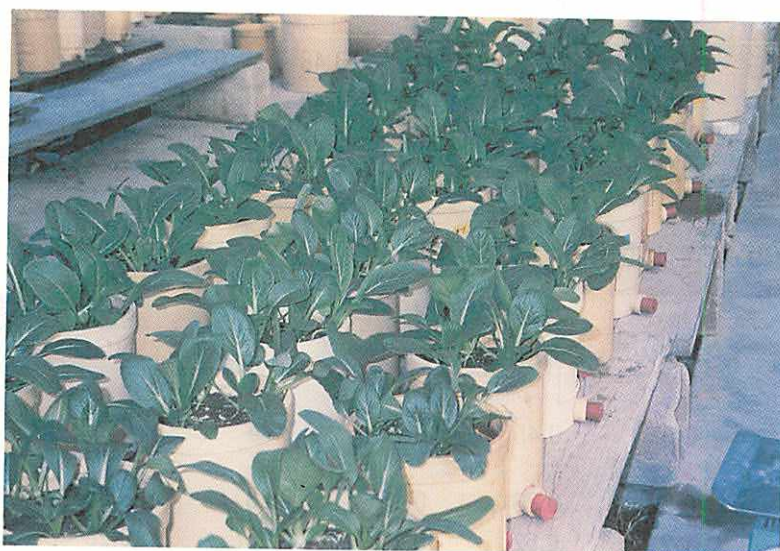


図 4.4-1 生育中のツケナ (*Brassica campestris* L.)

1995 年 12 月 14 日に地上部を収穫し、風乾重を測った後、粉碎し、Ca, Mg, K, P および N 含有率を分析した。また栽培前後の土壌を採取し、風乾砕土して 2 mm で篩別後、pH および EC を測定し、 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ CH}_3\text{COONH}_4$ (pH7.0) 抽出による交換性陽イオンと 1:5 水抽出による水溶性イオンを分析した。陽イオンは Ca, Mg, K および Na イオン、陰イオンは NO_3^- , SO_4^{2-} および Cl^- イオンである。また 12 月 7 日および 12 日に 4.2 と同様の方法で土壌溶液を採取し水溶性イオンを分析した。

4.4.3 結果および考察

1) 土壌化学性の変化

供試土壌および各試験区におけるツケナ栽培跡地土壌の化学性を表 4.4-1 に示した。交換性 Ca は原土に比べて各かん水处理区の硫カル無添加区では平均 $0.89 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 減少したのに対して、硫カル 1 cmol(+) 区と硫カル 2 cmol(+) 区でそれぞれ 1.06 , $2.12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 加えられていることを考慮すると、硫カル 1 cmol(+) 区では平均 $1.18 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 減少し、硫カル 2 cmol(+) 区では平均 $1.47 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 減少したことになる。このように CaSO_4 の添加量の増加とともにツケナの栽培期間中の交換性 Ca の減少量は大きくなった。交換性 Mg は原土に比べて栽培後では、かん水量や CaSO_4 添加の有無に関係なく $0.51 \sim 0.21 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 減少した。交換性 K は施肥によって補

表 4.4-1 供試土壌の化学性

試 験 区		pH(H ₂ O)	EC	交換性陽イオン				CEC	塩基飽和度
かん水量	CaSO ₄			Ca	Mg	K	Na		
	cmol(+) kg ⁻¹		dS m ⁻¹		cmol(+) kg ⁻¹			cmol(+) kg ⁻¹	%
(原 土)		6.14	0.305	11.32	3.73	0.92	0.68	17.00	97.9
少	0	6.22	0.231	10.30	3.52	0.73	0.41	17.53	85.4
	1	6.13	0.346	11.51	3.44	0.72	0.35	17.79	90.0
	2	6.09	0.474	12.03	3.44	0.77	0.39	17.79	93.5
中	0	6.25	0.210	10.53	3.50	0.71	0.30	16.96	88.7
	1	6.23	0.292	11.01	3.34	0.70	0.27	16.78	91.3
	2	6.15	0.347	12.02	3.22	0.70	0.30	16.88	96.2
多	0	6.30	0.213	10.47	3.48	0.84	0.41	17.12	88.8
	1	6.12	0.334	11.08	3.45	0.74	0.42	16.99	92.4
	2	6.13	0.384	11.86	3.36	0.69	0.36	16.96	95.9

表 4.4-2 供試土壌の 1:5 水抽出液のイオン組成

試 験 区		水溶性陽イオン				水溶性陰イオン		
かん水量	CaSO ₄	Ca	Mg	K	Na	NO ₃	SO ₄	Cl
	cmol(+) kg ⁻¹		cmol(+) kg ⁻¹				cmol(-) kg ⁻¹	
(原 土)		0.67	0.45	0.14	0.24	0.55	0.63	0.27
少	0	0.69	0.33	0.13	0.28	0.36	0.53	0.24
	1	1.21	0.52	0.15	0.26	0.28	1.32	0.15
	2	1.84	0.73	0.17	0.28	0.33	1.96	0.17
中	0	0.61	0.33	0.11	0.23	0.28	0.52	0.29
	1	0.96	0.42	0.14	0.25	0.26	0.89	0.25
	2	1.28	0.51	0.14	0.22	0.18	1.26	0.16
多	0	0.61	0.30	0.13	0.23	0.30	0.65	0.33
	1	1.20	0.55	0.14	0.27	0.41	1.01	0.29
	2	1.46	0.58	0.14	0.24	0.19	1.68	0.25

給されているが、処理区に関係なく 0.2 cmol(+) kg⁻¹ 程度減少した。交換性 Na は 0.26~0.41 cmol(+) kg⁻¹ 減少し、減少の割合は陽イオンのなかで最も大きかった。

供試土壌の 1:5 水抽出液中の水溶性イオン組成を表 4.4-2 に示した。水溶性陽イオンのうち Ca イオンは CaSO₄ 添加量を考慮して原土と栽培跡地とを比べると、各かん水処理区の硫カル無添加区ではほとんど変化しなかったのに対して、硫カル 1 cmol(+) 区および硫カル 2 cmol(+) 区では、それぞれ平均 0.97, 1.26 cmol(+) kg⁻¹ 減少し、CaSO₄ 添加量の増加とともに減少量は大きくなった。水溶性 Mg および K イオンは各かん水処理区の硫カル無添加区では原土に比べてそれぞれ平均 0.13 cmol(+), 0.02 cmol(+) kg⁻¹ 減少し、CaSO₄ 添加跡地土壌ではともに CaSO₄ 添加量の増加とともに増加する傾向を示した。これは添加した CaSO₄ による水溶性 Ca の一部が土壌の交換性

Mg および K を交換浸出し、水溶性 Mg および K が増加したためと考えられる。このことは CaSO_4 の添加量の増加にともない交換性 Ca の当量分率が増加し、交換性 Mg および K の当量分率は逆に減少していることからうかがえる。水溶性 Na イオンについても交換性 Mg および K と同様のことがおこっていると推察されるが、水溶性の割合が高いため、 CaSO_4 の添加による明らかな差がみられなかった。

水溶性陰イオンのうち SO_4 イオンは CaSO_4 添加量を考慮して原土と栽培跡地とを比べると、各かん水处理区の硫カル無添加区では平均 $0.06 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ の減少であったのに対して、硫カル $1 \text{ cmol}(+)$ 区と硫カル $2 \text{ cmol}(+)$ 区ではそれぞれ平均 $0.62, 1.04 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 減少し、 CaSO_4 添加量の増加とともに減少量は大きくなった。これは水溶性 Ca イオンの減少量より少ないものの、同様の傾向を示した。 NO_3 イオンは施肥による補給があるものの、硫カル無添加区の栽培跡地では平均 $0.24 \text{ cmol}(+)$ 減少した。また CaSO_4 の添加による増減は一定の傾向を示さなかった。 Cl イオンはほとんど変化しなかったが、 CaSO_4 添加量の増加とともに減少する傾向を示した。

添加した CaSO_4 の 1:5 水抽出液による抽出状況を調べるため、Ca および SO_4 イオン濃度から Wada and Seki (1994) のプログラムを用いて計算した CaSO_4 の飽和度指数 (4.1-1 式) は硫カル $2 \text{ cmol}(+)$ 区で $-1.61 \sim -1.34$ で、添加した CaSO_4 はほとんど水に溶解していると考えられる。

水溶性陽イオンを酢酸アンモニウム抽出による交換性陽イオンから差し引いて修正した陽イオンはイオン交換によってイオン組成に変化がみられるものの、修正塩基飽和度 (和田・兼子 1996) は、少かん水区で $77 \sim 78\%$ 、中かん水区で $81 \sim 84\%$ 、多かん水区で $80 \sim 82\%$ とほぼ同等であった。以上のような原土とツケナ栽培跡地土壌の化学性の差は、水管理の影響より CaSO_4 添加の影響の方が強く、水溶性イオン組成に明らかな差がみられた。

2) 土壌の水分ポテンシャルおよび土壌溶液組成の変化

ア) 水管理と水分ポテンシャルおよび含水比の推移

かん水处理開始直前からツケナの収穫までの水分ポテンシャルの経時変化を図 4.4-2 に示した。11 月 29 日から 12 月 13 日までのかん水前後の水分ポテンシャルの最少値と最大値のそれぞれの平均値で範囲を示すと、少かん水区で $-142 \sim -62 \text{ kPa}$ 、中かん水区で $-56 \sim -21 \text{ kPa}$ 、多かん水区で $-17 \sim -7 \text{ kPa}$ であった。この間の土壌含水比はかん水前後の最少値と最大値のそれぞれの平均値で示すと、少かん水区で $0.17 \sim 0.20$ 、中かん水区で $0.20 \sim 0.25$ 、多かん水区で $0.26 \sim 0.31$ であっ

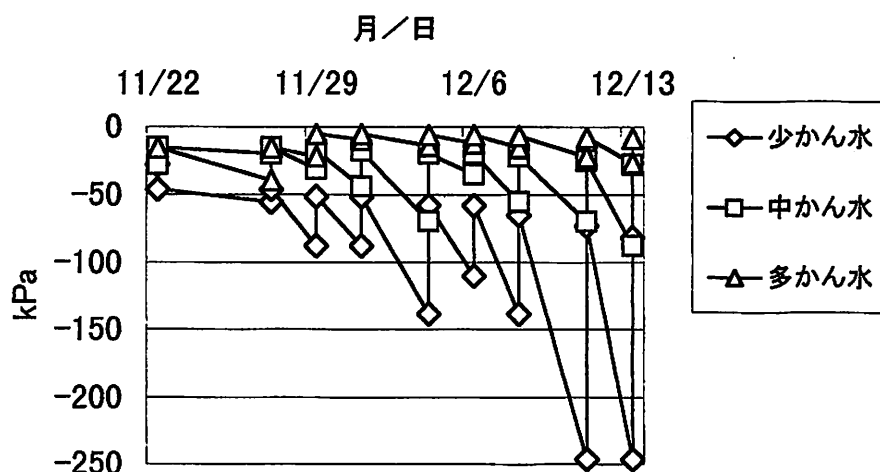


図 4.4-2 ツケナ生育中の土壌水分ポテンシャルの経時変化

た。かん水処理開始直前の CaSO_4 添加量のちがいによるツケナの草丈には影響は認められなかった。少かん水区では11月29日、12月4日および12月11日のかん水前にややしおれる症状がみられた。初期しおれ点の水分ポテンシャルは -619 kPa ($\text{pF}3.8$) 付近(土壌養分測定法委員会 1970)とされており、少かん水区の水分ポテンシャルはそれに比べて高い値であった。これは、根の分布の多い土壌の表層の方が下層より含水比が低いことや、水分ポテンシャルの測定が加圧板および遠心法によるもので、土壌溶液中の肥料成分の影響を考慮していないため、水分ポテンシャルが図に示した値より実際には低かったことによると考えられる。

イ) 土壌溶液組成の変化

12月7日と12日の中かん水区および多かん水区の土壌溶液組成の平均値を図4.4-3に示した。少かん水区では真空採血管による吸引法では土壌溶液は採取できなかった。多かん水区では CaSO_4 添加量の増加とともに Ca 、 Mg 、 SO_4 イオンは増加し、硫カル $1 \text{ cmol}(+)$ 区ではほぼ頭打ちとなった。中かん水区では CaSO_4 の添加にともなう各イオン濃度の増加量は多かん水区より小さく、硫カル $1 \text{ cmol}(+)$ 区ではほぼ頭打ちとなった。 CaSO_4 の添加量が同じ場合には、多かん水区のイオン濃度は中かん水区に比べて低く、 CaSO_4 無添加区で差が大きかった。

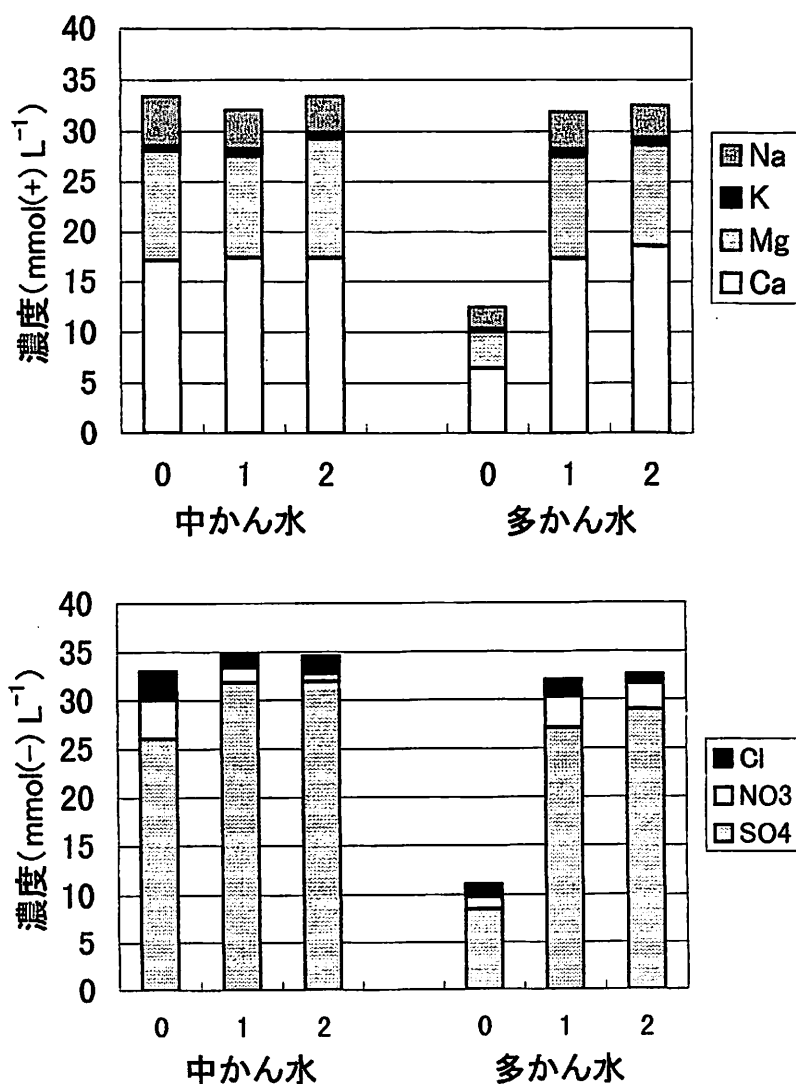


図 4.4-3 ツケナ生育後期の土壌溶液組成

表 4.4-3 土壌溶液の CaSO_4 の飽和度指数

試 験 区		12月 7 日	12月12日
かん水量	CaSO_4		
	cmol (+) kg^{-1}		
中	0	-0.22	-0.57
	1	-0.13	-0.63
	2	-0.12	-0.37
多	0	-0.95	-0.88
	1	-0.30	-0.27
	2	-0.26	-0.22

CaSO_4 の飽和状態を知るために、(4.1-1) 式により Wada and Seki (1994) のプログラムを用いて計算した飽和度指数は表 4.4-3 に示す値になった。12 月 7 日採取の中かん水区の硫カル 1 および 2 cmol(+) 区のように飽和度指数が -0.2 より大きい土壌では土壌溶液中で CaSO_4 がほぼ飽和状態にある (和田ら 1994) と考えられる。多かん水区においても硫カル 1 および 2 cmol(+) 区では、 CaSO_4 は飽和に近い状態にあると考えられる。これに対して硫カル無添加区では -0.95 と他に比べて小さい値となった。

一方、12 月 12 日はどの区も飽和度指数が小さくなり、しかも、硫カル 1 および 2 cmol(+) 区では中かん水の方が小さい指数となった。これは土壌溶液をかん水直後に採取したためと考えられる。すなわち土壌の亀裂が多かん水区ではみられなかったが、中かん水区ではかん水前には観察され、その部分にかん水が集中し溶質の拡散が不均一であったものと推察される。

3) ツケナの収量、養分吸収量および各成分含有率

ツケナの乾物収量および各成分含有率を表 4.4-4 に、ポット当り養分吸収量を表 4.4-5 に示した。また、多かん水処理において CaSO_4 の添加量を変えて栽培したときのツケナの生育の様子を図 4.4-4 に、硫カル 1 cmol(+) 区において、かん水量を変えて栽培したときの生育の様子を図 4.4-5 に示した。

分散分析の結果、収量、P、K および N 含有率に CaSO_4 の添加の影響は認められなかったが、かん水処理の効果が認められ、かん水量の増加とともに収量と P 含有率は増加し、K および N 含有率は減少した。Mg 含有率はいずれの処理においても差が認められなかった。Ca 含有率は、かん水処理と CaSO_4 添加の効果およびそれらの交互作用が認められ、Ca 含有率はかん水量の増加とともに増加し、 CaSO_4 施用量の増加とともに減少した。Ca 含有率が、かん水量とともに増加する傾向は、トマトにおける試験結果 (吉田ら 1997) と一致した。葉緑素計 (ミノルタ社製 SPAD-502) で測定した葉色は少かん水区で高い値を示し、緑色が濃くなった。

ポット当たり養分吸収量をみると、Ca および Mg 吸収量は、かん水量の増加とともに増加する傾向を示した。K および N 吸収量もかん水量の増加とともに増加する傾向を示し、植物体の含有率とは逆の傾向を示した。P 吸収量はかん水量の増加とともに増加した。このように作物への水の供給が増加すると、養分吸収量が増加する傾向は作物は異なっても既報 (尾形ら 1985) の結果と一致した。

かん水量による収量の変化から、かん水量の減少とともに生育が抑制されていることが示唆され、マスフローによる植物体内への養分吸収の抑制が起こっているものと考えられた。そして本試験の植物体含有率は、Ca 吸収がマスフローの貢献度が拡散に比べて大きいものに対して、K 吸収はその

表 4.4-4 ツケナの収量および各成分含有率

試 験 区		乾物重	Ca	Mg	K	N	P
かん水量	CaSO ₄						
	cmol (+) kg ⁻¹	g/ポット			g kg ⁻¹		
少	0	4.70ab	22.9abcde	5.7efg	68.8cdef	57.9gh	4.7ab
	1	5.25b	23.3de	5.7g	71.1efgh	57.6efgh	5.0b
	2	5.13ab	22.8abcde	5.7fg	70.8defgh	56.2cd-gh	4.8ab
中	0	6.71fgh	23.5e	5.5ab-fg	72.8h	56.5defgh	5.8efgh
	1	6.50cd-gh	23.2cde	5.5ab-fg	72.0gh	57.8fgh	5.6cdefg
	2	6.63efgh	22.9bcde	5.6cdefg	71.9fgh	58.5h	5.8defgh
多	0	6.52defgh	30.7gh	5.8gh	61.9a	55.7bc-gh	6.3h
	1	7.11gh	26.5g	5.5bc-fg	63.2b	54.5ab-fg	6.2h
	2	7.46h	26.1fg	5.7defg	62.0ab	54.1ab-fg	6.0gh

Duncan の多重検定により異文字間に 5 %水準で有意差あり

表 4.4-5 ツケナによる養分吸収量

試 験 区		Ca	Mg	K	N	P
かん水量	CaSO ₄					
	cmol (+) kg ⁻¹			mg/ポット		
少	0	108	26.7	322	271	22.0
	1	122	30.0	374	302	25.9
	2	117	29.4	361	287	24.8
中	0	158	36.9	488	380	39.0
	1	152	35.7	467	376	36.7
	2	152	37.3	477	387	38.4
多	0	200	37.8	404	363	40.0
	1	187	39.1	450	388	41.7
	2	193	42.3	464	404	44.6

逆の関係にある (Barber 1974) ことを反映していた。また Ca 含有率は培養液の Ca 濃度が一定の水準をこえるとむしろ減少する (嶋田 1967) ことから、CaSO₄ の施用が本試験のツケナのカルシウム吸収に及ぼす効果が明らかではなかったのは、作物生育中の土壌溶液 Ca 濃度が 7 mmol L⁻¹ と比較的高いレベルでの試験であったためと考えられる。したがって土壌溶液中の Ca 濃度レベルがより低い場合にはその施用効果が期待できる。

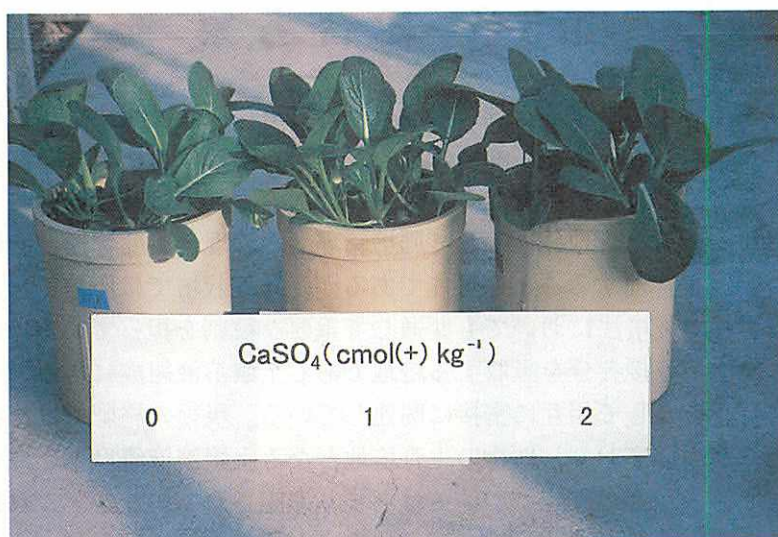


図 4.4-4 CaSO_4 添加量を変えて、多かん水で栽培したツケナの生育の様子



図 4.4-5 かん水量を変えて、硫カル 1 cmol(+) 区で栽培したツケナの生育の様子

4.4.4 摘 要

土壌の水分管理と CaSO_4 施用が土壌溶液組成とツケナの養分吸収に及ぼす影響について明らかにした。

- 1) ツケナ生育中の土壌溶液 Ca 濃度は CaSO_4 で飽和に近い状態であったため、 CaSO_4 の添加にともなう土壌溶液 Ca 濃度の増加がツケナの Ca 吸収量に及ぼす影響は明らかではなかった。
- 2) かん水量を少なくし、ツケナに水分ストレスを与えると収量および養分吸収量は低下し、Ca および P 含有率は低下したが、K および N 含有率は増加する傾向を示した。
- 3) 以上のように土壌溶液 Ca 濃度を CaSO_4 施用によって制御することは可能であったが、作物にとっての適正な範囲の Ca 濃度の制御と土壌水分管理を考慮することが必要であることが指摘された。

第5章 総合考察

最近、消費者の食品に対する科学的な理解の深まりとともに、生産現場では農産物の収量向上に加えて内的品質向上が求められるようになってきた。そのためには目的とする品質に関して優良品種の育成が重要であるが、優良品種が育成、導入された次の段階では栽培管理による収量の安定化と品質向上が必要となる。主な管理技術として肥培管理、水管理、温度管理があげられ、施設栽培ではこれらすべての要因を管理することが可能であるが、露地栽培では肥培管理と水管理が主体となる。このようにいずれの栽培法においても共通して重要な役割を担っているのが肥培管理と水管理である。これらは作物が直接養分を吸収する培地である土壤溶液組成にもっとも直接的に影響しており、しかも土壤溶液を介して相互に密接に関連している。現行の施肥では作物による必要量を施肥するという考えに基づいており、作物の生育培地となる土壤溶液濃度と組成が作物の生育に適切な状態に維持されているかという点についてはあまり考慮されていない。これに対して、水耕栽培における施肥の考え方は水耕培養液の濃度管理に重点が置かれ、施肥量についてはあまり考慮されていない。土耕栽培において肥培管理によって作物の生育と品質を制御する方法を技術として確立するには、これら両方の考え方を一体化することが必要である。つまり土壤溶液濃度という作物の養分吸収にとっての強度因子と土壤中の可給態成分を含めた施肥量という容量因子の双方を考慮する必要があると考えられる。カリウムについては Beckett (1964) が Q/I 関係によって、このような考え方を提言しているが、このような視点を実際の栽培現場に応用しようとする研究は多くの労力を必要とするため極めて少ない。本研究では、これまでに土壤化学で得られた基礎的な知見を作物の品質制御のための農業技術として応用するため、作物の養分吸収と最も関係が深い土壤溶液組成制御という視点から一連の試験を行った。そのために土壤溶液組成が土壤の陽イオン交換特性と土壤の水分含量変化によってどのように制御されるのかについて検討し（第2章）、土壤溶液組成を制御することによって作物の生育と品質がどのように制御できるのか栽培試験を試みた（第3、4章）。本章では土壤溶液組成制御による作物の品質改善のための技術についての現状と問題点および今後の展望について総合的に考察する。

土壤溶液の研究は、世界的には1800年代後半からはじまっているが、土壤溶液の採取法の検討に主題がおかれ、土壤溶液組成と植物の養分吸収との対比に関する研究は1960年以降に始まっている。日本における土壤溶液の系統的な研究は岡島らのグループに始まる。岡島らは農耕地の利用形態別に土壤溶液組成がどのように変化するかを明らかにし、その変化機構を陰イオンがイオン組成の調節者として機能しているという視点から明らかにした。北海道は火山灰土壤が主体であるため陰イオン吸着能を有する土壤が多く、この視点は重要であると思われる。一方、福岡県ではこれとは対照的に火山灰土壤の分布は少なく、土壤溶液組成は主として陽イオン交換特性に規定されていると考えられる。

本研究では陽イオン選択性が土壤溶液組成に及ぼす影響を調べた実験と土壤水分の変化による土壤溶液組成変化の予測の可能性に関する検討を行った。まず、土壤の種類によってK施肥に対する土壤溶液組成の反応が異なることを明らかにした（第2章1）。すなわち、土壤溶液組成が土壤のCa-K交換特性と交換性Kの占める割合によって規定されていることを明らかにした。このことは、土壤溶液組成をある状態に制御するための土壤の交換性K含量は土壤によって異なり、施用量も土壤によって変える必要があることを示唆する。次に、 NH_4^+ イオンはKイオンとほとんど同等のふるまいをすることから、この知見は $\text{NH}_4\text{-N}$ の施肥についても適応できると考え、圃場実験において、この知見が適用可能であることを明らかにした（第2章2）。しかしこれは現段階では作物の生育の影響が無視できる生育初期に限られる。作物による養分吸収、根の呼吸による土壤溶液組成変化の影響が無視できなくなる生育ステージにおける土壤溶液組成の制御および予測は今後の課題である。

上述のような陽イオン交換特性を利用して土壌溶液組成の予測を行うためには各イオンの組み合わせの数に応じて土壌の陽イオン平衡実験が必要となるため実用的には問題がある。そこで本研究では土壌の水分含量変化過程で経験的に認められている AR^K の不変性に関する法則がどの程度の精度で適応できるのかについて調べた。その一定性が認められれば陽イオン交換平衡実験を行わずに、農耕地における主要な交換性陽イオンである Ca, Mg および K の組成の変化が予測できると考えられるからである。その結果、 AR^K は水分含量変化の過程で常に一定に保たれることはなく、土壌の K 吸着量や陽イオン交換容量に依存し、水分含量の低下とともに若干低下することを実測値からだけでなく理論的にも明らかにした (第2章3)。しかしその変化は陽イオン交換容量が $5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ 以下と極端に小さい場合を除けば比較的小さく、実際の圃場レベルの水分含量変化では AR^K の変化は小さいことから、水分含量と AR^K の関係を用いて補正すれば陽イオン交換選択係数の測定なしに土壌溶液組成の変動を予測する手段として活用できることを明らかにした。また、 AR^K と AR^{NH_4} の値は土壌溶液の K, NH_4 イオンの供給力を表す指標となる (岡島 1981) が、土壌溶液の AR^K と AR^{NH_4} の値に基づいてゼオライト施用にともなう両イオンの供給力の低下を示した (第3章3)。さらに土壌に施用したあるいは存在する Ca 塩の増加にともなう AR^K の変化は、塩の種類により異なることが明らかになり (第4章1), AR^K は土壌改良や土壌の化学性の変化にともなう養分供給力の変化を診断する指標として活用できると考えられる。

米の食味は同一品種に同じ肥培管理を行っても、土壌の違いによって差が生じることがある。これは単一の土壌型が広く分布する地域においては問題にならないが、比較的狭い地域内で土壌型が異なる場合には、その地域の産米は地域で最も評価の低い米と同じ評価を受けるおそれがある。その対策を考えるためには食味評価の低い原因が何によるものかを明らかにすることが第一に重要である。本研究では、細粒黄色土、細粒褐色低地土、礫質灰色低地土および淡色黒ボク土の4種の土壌型が分布する地域において、同一品種および栽培条件で栽培した米の食味は、淡色黒ボク土産米が他の土壌型の産米に比べて劣ることを明らかにした。そして食味低下の主要因は米の高いタンパク質含有率によるもので、アミロース含有率やアミログラム特性といった米の食味と関連が深いといわれてきた特性と土壌間差異との関係は認められなかった (第3章1)。このことから黒ボク土産米の品質改善対策として窒素の肥効制御が有効であると推察した。

本研究では米の食味に及ぼす窒素以外の影響も調べるため、ポット実験によって、異なる食味の米を産する2つの土壌を使って水稻生育中の土壌溶液組成の推移と水稻による養分吸収を調べた (第3章2)。一つは前述の黒ボク土、他の一つは灰色低地土で現地の褐色低地土および灰色低地土と同等の食味総合評価を示した土壌である。米の食味と関係すると考えられる窒素、カリウム、マグネシウムおよびカルシウム (岡本ら 1985, 堀野・岡本 1992) について、水稻による吸収を明らかにするため、土壌-水稻系を土壌、土壌溶液、稲わら、玄米および精米の5要素に分けて調べた。その結果、土壌溶液組成の影響が及ぶのは稲わらまでで、玄米、精米の成分含量は作物の転流に関する生理に依存することを示した。また土壌溶液中の各成分濃度は土壌の交換性成分含量とは単純な対応は示さなかったが、土壌の陽イオン交換特性によって規定されていることが強く示唆された。このことから米の食味の土壌間差異をより明瞭にするためには、土壌ごとに水稻の登熟に関する生理の研究を深める必要があると思われる。そして人間が米の食味の何を認識して評価しているのかがさらに明確になれば、米の養分吸収をどのように制御すると食味評価を高めることができるのか、より合理的で具体的な対策をたてることが可能となる。現在のところ米の食味に最も影響を及ぼしている窒素のタンパク質やアミノ酸組成の差異についてさらに研究を進めることが米の食味解明に大きな役割を果たすと思われる。

前述のように米の食味の土壌間差異がどのような機構で生じているのかについて明確な知見は得られなかったが、同一土壌における土壌改良効果の比較は可能であると推察される。そこで本研究

では窒素のほか食味に強く関与しているとみられるカリウムの吸収を制御することを目的に、 NH_4 とKイオンに対する選択性の強いゼオライトを黒ボク土水田に施用し、水稻生育中の土壤溶液組成と産米の食味への影響を調べた。土壤溶液中の NH_4 およびKイオン濃度はゼオライトの高い陽イオン選択特性に制御され、ゼオライト施用により低く抑えられる傾向にあることを示した(第3章3)。そしてゼオライト施用により水稻の収量は増加し、食味も改善される傾向にあることを示し、この主な要因が登熟向上にともなう窒素含有率の低下によることを推察した(第3章4)。従来、米の窒素含有率を低下させるために穂肥の省略が提唱されているが、収量の減少をともなう(松江ら1997)ため、生産者の農業経営を安定・向上するための施肥技術として現実的ではなかった。このような点から、ゼオライトは窒素施用量は慣行施肥と同量で、収量増と食味向上を図る土壤改良資材として期待される。そして、単位収量当たりの窒素施用量が減少することになり、省資源、環境保全につながる。ただし、ゼオライト施用技術の導入にあたってはコスト面から、本研究で現地試験を実施した地域のように黒ボク土のような食味の劣る土壤が部分的に分布する地域での導入が効果的と思われる。しかし、水稻栽培の継続とともに、Kおよび NH_4 イオンの集積にともなう選択性の低下によるゼオライト施用効果の低下が予測され、効果の持続期間の問題とともに石灰質資材による効果回復の可能性も検討する必要がある。またゼオライトの登熟向上に寄与するメカニズムの解明も今後必要な課題である。

次に国民の健康に対する意識の高まりとともに、野菜についてもビタミン類や無機栄養分など健康維持に有用な成分に関心が高まっている。日本人のCa摂取不足が厚生省の国民栄養調査で報告されているが、アブラナ科野菜は好石灰植物で、他の野菜に比べてCa含量が多いことが食品の栄養面から高く評価されている。アブラナ科野菜はCa要求量が高く、欠乏症の発生事例も多い。その原因究明のための研究は数多く行われてきたが、Ca吸収向上を目的とした研究はみあたらない。圃場試験に先立ち、土壤に添加するカルシウム塩の種類による土壤溶液Ca濃度の上昇効果のちがいを調べた。その結果、土壤溶液Ca濃度は難溶性の CaCO_3 および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の施用では高まらず、易溶性の CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ の施用ではほぼ添加量に見合った濃度上昇が認められた。そして CaSO_4 の施用では土壤溶液Ca濃度は、その溶解度積によって規定されていることを確認した(第4章1, 4)。これらのことは水に対する溶解度が、 CaCO_3 で0.0014(25℃)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で0.18(0℃)、 CaCl_2 で536(20℃)、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ で266(0℃)、 CaSO_4 で0.3(20℃)であることから明らかである。土壤溶液に直接的に作用してCa濃度を制御するためには易溶性の CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ の施用が最も効果的と考えられる。しかし、ハクサイ、キャベツ、トマトで土壤の電気伝導度の上昇による生育抑制が認められている(嶋田1967)ように、電気伝導度も上昇するため施用量に限界があり、栽培作物の種類によって施用量や土壤中の含量を考慮する必要がある。さらに CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ および CaSO_4 の施用により土壤pHが低下することが作物の生育にどのように影響するのかという点も考慮する必要がある。

和田・兼子(1996)が指摘するように、土壤中のCaが交換性Ca、易溶性の CaCl_2 および $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、難溶性 CaCO_3 、およびそれらの中間的な性質の CaSO_4 のどのような割合で構成されているのかを分析によって明らかにしておくことは、土壤溶液組成の変化を予測し制御するための情報として極めて重要である。1 mol L⁻¹ $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ によって抽出される陽イオン量、土壤pHおよび土壤ECから土壤中の陽イオンと塩類の状態はおおまかに推測できるものの、定量的に土壤の陽イオンと塩類組成を把握しておかなければ、具体的な対策としての土壤溶液組成の制御にはつながらず、生育障害対策の診断のためにも役立たないことになる。

嶋田(1967)は、トマトのCa吸収は土壤溶液あるいは培養液のCa濃度が一定濃度の増加までは、濃度は吸収量に反映するが、さらに濃度が増加すると吸収量は減少することを示している。こ

これらの知見を考慮して、本研究ではツケナ (*Brassica napus* L.) に対する石灰施用を一般的に使用されている消石灰と硝酸カルシウムを被覆した緩効性肥料を用いて比較検討した。その結果、土壤溶液 Ca 濃度は消石灰施用では上昇せず、室内実験と同様の傾向を示した。そして被覆硝酸カルシウム倍量施用にみられるように、土壤溶液 Ca 濃度を高く維持することによってツケナの Ca 含有率を高めることが可能であった。被覆硝酸カルシウムの標準的な施用量では Ca 施用量が同量の消石灰施用と比べて Ca 濃度と陽イオン合計濃度ともやや低い濃度であった。しかし、ツケナによる Ca 吸収は消石灰施用より大きかった。このような差が生じた原因として、消石灰施用区で施用した肥料に含まれる NH_4 イオンによることが考えられた。このことはこれまでの研究 (嶋田 1967, 池田 1986, 岩田 1962) で指摘されてきており、単に Ca イオン濃度の問題だけではなく、土壤溶液 NH_4 イオンが植物の栄養生理に影響を及ぼしていることを示唆した。

カルシウム塩を添加する以外に土壤溶液 Ca 濃度を制御するためには、施肥により陰イオンを添加する方法が考えられる。なかでも硫酸アンモニウムは陰イオンである SO_4 イオンに加えて、土壤中で硝酸化成により NH_4 が NO_3 に変化するため陰イオン添加量がさらに増大することになり、土壤溶液 Ca 濃度を上昇させる肥料として最も効果的と考えられる。本研究ではツケナに硫酸アンモニウムを表層に追肥した時の土壤溶液組成の変化とツケナの収量と Ca などの無機成分含有率への影響を調べた (第 4 章 3)。圃場試験で硫酸アンモニウムを追肥した結果、土壤溶液 Ca 濃度は上昇する傾向を示し、ツケナの Ca 含有率はやや増加する傾向にあるものの、ツケナの生育時期別の変化には及ばなかった。このことも植物の栄養生理に起因するところが大きいと考えられた。ただし、実際の栽培場面においては目的とする品質成分はもとより収量性、窒素など他の養分吸収量を考慮して総合的に優れた栽培法を採用することが現場技術として一般的である。この観点から、1 回当たり硫酸アンモニウムによる追肥窒素施用量の適正值がツケナの Ca 含有率を考慮して得られたことの意義は大きいと考えられる。

土壤溶液濃度を制御する別の方法として、土壤水分管理による制御が考えられる。ツケナ生育中の土壤水分を変えることによって土壤溶液濃度は変化し、土壤溶液の希釈・濃縮にともない陽イオン交換もおこる (第 2 章 3) ことが期待される。しかし、この場合も土壤溶液濃度が作物の Ca 含有率にそのまま反映されず、その原因として土壤水分ポテンシャルの直接の影響により生育量に差が生じたためと考えられた (第 4 章 2)。これらの結果は土壤溶液濃度を制御することが他の要因を変化させることにつながり、目的とする成分濃度だけを変化させることが困難であることを示唆する。ただ、現場栽培技術としての観点から、ツケナの Ca 含有率という品質の目的成分に対して土壤水分管理の適性値が得られた意義は大きいと考えられる。今後、ヒトによる野菜の Ca の吸収は Ca 含有率だけでなく水溶性、酸可溶性などの形態別割合によって影響を受けることが考えられるため、品種や栽培条件と Ca の形態別割合との関係についての検討が必要と考えられる。

硫酸カルシウムは Ca 供給のための土壤改良資材のひとつであり、過りん酸石灰など肥料の副成分として施設土壌において集積することが多い。本研究では硫酸カルシウムがツケナ (*Brassica campestris* L.) の Ca 吸収に及ぼす影響について、土壤水分ポテンシャルとの関係で調べた。これは施設土壌では硫酸カルシウムの集積がおこりやすく、その水に対する溶解度がカルシウム塩の中では中間的な性質を持っているため、土壤水分ポテンシャルの影響を受けやすいと考えられたためである。実験の結果、硫酸カルシウムの施用と土壤水分管理によって土壤溶液 Ca 濃度の制御は可能であったが、ツケナによる Ca をはじめとする養分吸収量は土壤溶液組成を単純には反映しなかった。この原因として低かん水処理にともなう作物体の生育抑制と土壤溶液 Ca 濃度がツケナに適した濃度を超過飽和状態にあったことを推察した。このように土壤溶液組成はいくつかの要因によって複雑に変化するため、たとえば実際に作物の根が接している土壤溶液の EC を EC(1:5) から推定する方法の確立が必要と思われる。これは施設土壌のような塩類集積土壌における診断でとく

に重要である。しかし、土壤溶液そのものの電気伝導度 (EC) と EC (1:5) との関係は土壤に集積した塩によって異なること (第 4 章 1) が土壤溶液診断上の問題として残されている。

本研究の栽培試験の結果から、土壤溶液組成と作物による吸収との関係において、そのまま反映する作物と他の養分や要因との関係で単純に反映されない場合がある。このため作物の養分吸収を制御するための土壤溶液組成制御技術を確立するためには、既知の培養液での栽培試験と作物の栄養生理の研究が並行して必要である。作物に養分を供給する土壤—土壤溶液系を作物に適した環境に制御する技術を確立するためには、どのような肥料をどのくらい施用すると土壤溶液組成がどのようになるかといったデータの蓄積が今後とも重要である。そしてこれと同時に、これまでの土壤の可給態成分の診断法だけでなく、土壤溶液組成を制御するための新しい土壤診断法の確立が必要と考えられる。とくにこのような技術開発は、最近提唱されている溶液土耕栽培技術を確立するために極めて重要となる。

以上のように、土壤溶液組成制御による作物の品質改善技術をより実用的な技術として高めるためには、作物の種類や品質改善目標に応じて様々な課題が多く残されている。しかし、本研究で試みた事例をもとに、これまで培われてきた基礎的な土壤学の知見と実際の生産現場での現象との間の接点を見いだすことにより、合理的で高い農業生産技術を組み立てる手法を示すことができると考えられ、今後の土壤化学を基にした栽培技術の発展が期待できる。

引用文献

- Adams, F. and Pearson, R.W. 1970. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. *Agron. J.* 62, 9-12.
- 青森県農業試験場 1973. 米の品質・食味の向上に関する研究 (東北6県農試共同研究). p.192-194.
- 安藤 豊・足立 研・南 忠・西田直樹 1988. 水稻生育初期の茎数と土壤アンモニア態窒素の関係. *日作紀* 57:678-684.
- 安藤忠男・尾形昭逸 1985. 紫外吸光度法による水耕培養液硝酸イオン濃度の測定. *土肥誌* 56:56-58.
- Asaoka, M., Okuno, K. and Fuwa, H. 1985. Effects of environmental temperature at the milky stage on amylose content and fine structure of amylopectin of waxy and nonwaxy endosperm starches of rice. *Agric. Biol. Chem.* 49:373-379.
- Barber, S. A. 1974. Influence of the plant root on ion movement in soil. In *The Plant Root and its Environment*. p.525-563. University Press, Virginia.
- Bardsley, C. D. and Kilmer, V. J. 1963. Sulfur supply of soils and crop yields in the southeastern United States. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27:197-199.
- Beckett, P. H. T. 1964. Studies on soil potassium. I. Confirmation of the ratio law: measurement of potassium potential. *J. Soil Sci.* 15:1-8.
- Bruggenwert, M. G. M. and Kamphorst, A. 1979. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In *Soil Chemistry B. Physico-Chemical Models*. Ed. G. H. Bolt. p.141-203. Elsevier, Amsterdam
- Burgess, P. S. 1922. The soil solution extracted by Lipman's direct-pressure method, compared with 1:5 water extracts. *Soil Sci.* 14: 191-216.
- Copper, M. 1968. Comparison of five methods for determining the sulphur status of New Zealand soils. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci. Vol.2.* p.263-271.
- Datta, S. C. and Sastry, T. G. 1991. K-threshold levels in relation to K reserve, release and specificity. *Potash Rev.*, 1991(1):1-9.
- Dhillon, S. K. and Dhillon, K. S. 1991-a. Exchange equilibria of potassium in some red, black and alluvial soils of India. II. Effect of displacing cations. *Aust. J. Soil Res.* 29:75-86.
- Dhillon, S. K. and Dhillon, K. S. 1991-b. Exchange equilibria of potassium in some red, black and alluvial soils of India. II. Effect of temperature on K-Ca exchange. *Aust. J. Soil Res.* 29:87-94.
- 土壤養分測定法委員会 1970. 土壤養分分析法. p.45-52. 養賢堂. 東京.
- 土壤標準分析・測定法編集委員会. 1985. 土壤標準分析・測定法. p.70-161. 博友社. 東京.
- Doll, W. C. and Lucas, R. E. 1973. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. In *Soil Testing and Plant Analysis*. Ed. Walsh, M. L. and Beaton, J. D. p.133-151. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, WI.
- Goulding, K. W. T. 1983. Thermodynamics and potassium exchange in soil and clay minerals. *Adv. Agron.* 36:215-264.
- 林田達也・比良松道一・柴戸靖志・小田原孝治・松江勇次 1995. ナバナの収穫方式, 時期の違いによるカルシウム, 鉄含有率の品種間差. *福岡農総試研報* 14:72-75.
- Hoeft, R. G., Walsh, M. L. and Keeney, D. R. 1973. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 37:401-404.

- 本庄一雄 1971. 米のタンパク含量に関する研究. 第1報 タンパク質含有率の品種間差異ならびにタンパク質含有率に及ぼす気象環境の影響. 日作紀 40:183-189.
- 堀野俊郎・原城隆・阿江教治・長峰司・鈴木守・播磨邦夫・富久保夫 1981. 玄米のリン, カリウム, マグネシウム含有率とそのバランスについて. 日作紀 50 (別2):69-70.
- 堀野俊郎・岡本正弘 1992. 玄米の窒素ならびにミネラル含量と米飯の食味との統計的関連. 中国農試研報 10:1-15.
- 堀内久満 1991. 福井県における良食味品種育成の現状と問題点. 育雑 41(別2):544-547.
- Howard, D. D. and Adams, F. 1965. Calcium requirement for penetration of subsoils by primary cotton roots. Soil Sci. Soc. Am. J. 29:558-562.
- 井田 明・荒木浩一 1971. 硝酸塩を施用した畑土壌から揮散する窒素の様相と跡地土壌中無機態窒素の存在形態. 土肥誌 42:379-383.
- 井手宏之・真鍋尚義・森山義一・武谷正明 1971. 水稻奨励品種決定調査にみられる福岡県産米の品質の地域間差について (予報). 九州農業研究 33:71-72.
- 池田元輝 1986. 無機窒素の吸収・同化と植物生育. 植物生産性の生理生化学. 日本土壤肥料学会編. p.73-106. 博友社. 東京.
- 稲津 脩 1982. 米の食味の理化学性. 道立中央農試資料 15:49-64.
- 稲津 脩 1988-a. 北海道産米の食味向上による品質改善に関する研究. 道立農試報 66:1-89.
- 稲津 脩 1988-b. 優良米の早期開発試験プロジェクトチーム第1期 (昭和55-61年度) の試験研究成果. 北海道立農試資料 19.
- 稲津 脩 1990. 良食味米の理化学的特性と栽培 (日本作物学会シンポジウム記事). 日作紀 59:611-615.
- 稲津 脩・渡辺公吉・前田巖 1976. 北海道産米の品質改善に関する研究 (第2報) 米澱粉アミロース含有率の差異. 澱粉科学 23:175-178.
- 石間紀男・平 宏和・平 春枝・御子柴 穆・吉川誠次 1974. 米の食味に及ぼす窒素施肥および精米中のタンパク質含有率の影響. 食総研報 29:9-15.
- 伊藤純雄 1984-a. 施設栽培における新実用化技術 [2] 土壌溶液に基づく施設内土壌診断と管理. 農業及園芸 59:965-968.
- 伊藤純雄 1984-b. 施設栽培における新実用化技術 [3] 土壌溶液に基づく施設内土壌診断と管理. 農業及園芸 59:1081-1088.
- 伊藤敏一・川口 蓮 1980. 水稻の品質, 食味の向上に関する研究. 第2報 好評米地帯の米の品質, 食味について. 三重県農技センター研報 8:1-6.
- 岩田正利 1962. 窒素形態の差異と蔬菜の生育 (第3報) 培養液の各種陽イオン濃度ならびに pH との関係. 園学雑 31:39-52.
- Japan Almanac 1996. Import of agricultural products. p.128. 朝日新聞社. 東京.
- Jensen, H. E. 1973. Potassium-calcium exchange equilibria on a montmorillonitic and a kaolinitic clay. Agrochimica 17:181-190.
- Jensen, H. E. and Babcock, K. L. 1973. Cation exchange equilibria on a Yolo loam. Hilgardia 41:475-487.
- Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today 16:334-360.
- 科学技術庁資源調査会 1992. 四訂日本食品成分表. p.38-39. 医歯薬出版. 東京.
- 鎌田裕子・松島知昭 1991. 米の品質成分に関する研究 (第1報) 精米の粒厚別によるアミロース含量, タンパク質含量について. 北陸作物学会報 26:50-51.

- 加藤忠司・青木和彦・山西弘恭 1995. 冬期ハウス栽培ホウレンソウのビタミン C, β -カロテン, トコフェロールおよびシュウ酸含有量に対する外気低温の影響. 土肥誌 66:563-565.
- 川口菊雄 1964. そ菜の栄養障害に関する研究. 土壤溶液濃度の変化と養分吸収について. 静岡農試研報 9:85-92.
- Keeney, D. R. and Nelson, D. W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. In Method of Soil Analysis. pt. 2. Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. p.643-698. ASA-SSSA Inc. Publisher, Madison, WI.
- 北田敬宇・塩口直樹・森正克英 1995. システム施肥法による良食味米・高位安定生産. 土肥誌 66:107-115.
- 九州農業試験研究推進会議 1988. 暖地水田における土壤窒素発現特性と施肥技術.九州地域重要新技術研究成果 No9. p.13-16. 福岡.
- Levy, R., Shainberg, I., Shalhevet, J. and Alperovitch, N. 1972. Selectivity coefficients of Ca-Mg exchange for three montmorillonitic soils. Geoderma. 8:133-138.
- Levy, R. and Shainberg, I. 1972. Calcium-magnesium exchange in montmorillonite and vermiculite. Clays Clay Miner. 20:37-46.
- Levy, G. J., van der Watt, H. V. H., Shainberg, I., and du Plessis, H. M. 1988. Potassium-calcium and sodium-calcium exchange on kaolinitic soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1259-1264.
- Mangold, D. C. and Tsang, C.-F. 1991. A summary of subsurface hydrological and hydrochemical models. Rev. Geophys. 29:51-79.
- Martens, D. C. 1968. Plant availability of extractable boron, copper, zinc, as related to selected soil properties. Soil Sci. 106:23-28.
- 馬西清徳・福元康文・吉田徹志 1996. 根域制限による水ストレス条件下でのトマトの生育と果実の品質に対する堆肥施用の影響. 土肥誌 67:257-264.
- 松江勇次・水田一枝・古野久美・吉田智彦 1991. 北部九州産米の食味に関する研究. 第1報 移植時期, 倒伏の時期が米の食味および理化学的特性に及ぼす影響. 日作紀 60:490-496.
- 松江勇次・小田原孝治・比良松道一・古野久美 1992. 1穂内における枝こう着生位置別の米粒のタンパク質, アミロース含有率. 日作九支報 59:43-44.
- Mastue, Y., Odahara, K. and Hiramastu, M. 1994. Differences in protein content, amylose content and palatability in relation to location of grains within rice panicle. Jpn. J. Crop Sci. 63:271-277.
- 松江勇次・小田原孝治・比良松道一 1996. 北部九州産米の食味に関する研究. 第7報 食味の産地間差とその要因. 日作紀 65:245-252.
- 松江勇次・小田原孝治・比良松道一 1997. 北部九州産米の食味に関する研究. 第8報 黒ボク土産米の食味向上のための窒素施肥法およびゼオライトの施用. 日作紀 66:189-194.
- 松崎昭夫・高野哲夫・坂本晴一・久保山勉 1992. 食味と穀粒成分および炊飯米のアミノ酸との関係. 日作紀 61:561-567.
- 三留三千男 1960. 農業実験計画法. p.311-330. 朝倉書店. 東京.
- Moss, P. 1963. Some aspects of the cation status of soil moisture. Pt. I : The ratio law and soil moisture content. Plant Soil 18:99-113.
- 名取利磨・中村盛三・井手宏之・長尾学禧 1973. 福岡県の豊前・京築地方における良質米地帯の策定について. 福岡農試研報 11:9-13.
- 西村 実 1993. 北海道水稻品種における障害型冷害による食味特性低下. 日作紀 62:242-247.

- 農林省食糧研究所 1963. 米の品質と貯蔵・利用. 食糧技術普及シリーズ, 7. p.7-41. 東京.
- 沼倉正二・浅野岩夫・若正松兵衛 1966. 水田に対するゼオライトの施用効果に関する研究. 第1報 火山性漏水田に対する試験. 宮城県農試報 37:45-58.
- 尾形昭逸・実岡寛文・松本勝士 1985. 暖地型飼料作物の水ストレス耐性機構の解析. II 異なった土壤水分条件下で栽培した暖地型飼料作物の生育と養水分吸収の草種間差. 日草試 31:43-51.
- 小田原孝治・和田信一郎 1992. 土壤溶液希釈過程における AR^k の不変性の理論的解析. 土肥誌 63:64-71.
- 小田原孝治・松江勇次・和田信一郎・比良松道一 1992. 福岡県北部に分布する灰色低地土と黒ボク土産稲体の無機成分及びアミロース含有率の差異. 日作紀 61(別2): 47-48.
- 小田原孝治・松江勇次・和田信一郎・比良松道一 1994-a. 福岡県北部の黒ボク土と灰色低地土の理化学性の差異が稲体および産米の食味関連成分に及ぼす影響. 土肥誌 65:7-13.
- 小田原孝治・和田信一郎・比良松道一・松江勇次 1994-b. 石灰質肥料の施用が土壤溶液イオン濃度とナバナのカルシウム含有率に及ぼす影響. 土肥誌 65:441-445.
- 小田原孝治・比良松道一・松江勇次 1995. ナバナの安定栽培技術. 第4報 土壤の理化学性とナバナの収量及び無機成分との関係. 福岡農総試研報 14:68-71.
- 小田原孝治・松江勇次・比良松道一・和田信一郎 1997. ゼオライトの施用が黒ボク土の理化学性および産米の収量, 品質に及ぼす影響. 土肥誌 68:381-386.
- 岡島秀夫 1981. 土地利用と土壤溶液のイオン組成. 土壤の吸着現象. 日本土壤肥料学会編. p.85-123. 博友社. 東京.
- 岡島秀夫・松中照夫 1972. 土壤のカリウム供給力測定法としての AR^k , PBC^k の評価(その1). 土肥誌 43:409-416.
- 岡島秀夫・今井弘樹 1973. 土壤の養分供給能に関する研究(第1報) 稲の養水分吸収と土壤養分の放出. 土肥誌 44:23-31.
- 岡本正弘・堀野俊郎・福岡忠彦・篠田 治 1985. 玄米の窒素及び主要ミネラル含量と食味との関連について. 育雑 35:250-251.
- 岡本正弘・堀野俊郎・脇本賢三・新井利直・坂井 真 1989. 土壤型による食味の変動と米の成分との関係. 日作紀 58(別1):68-69.
- 岡本正弘・堀野俊郎・坂井 真 1992. 玄米の窒素含量および Mg/K 比と炊飯米の粘り値との関係. 育雑 42:595-603.
- 奥田 東・高橋英一 1961. 作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について(第3報) ケイ酸の供給量が水稻の生育ならびに養分吸収におよぼす影響. 土肥誌 32:533-537.
- 奥野忠一・芳賀敏郎 1969. 新統計学シリーズ2 実験計画法. p.116. 培風館. 東京.
- Pavan, M. A. and Bingham, F. T. 1982-a. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:993-997.
- Pavan, M. A., Bingham, F. T. and Pratt, P. F. 1982-b. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$ and $CaSO_4$. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1201-1207.
- Perrott, K. W. 1981. Effect of pH and aluminosilicate composition on K-Mg exchange selectivity of amorphous aluminosilicates. Geoderma. 26:311-322.
- Poonia, S. R., Mehta, S. C. and Pal, R. 1986. Exchange equilibria of potassium in soils: I. Effect of farmyard manure on potassium-calcium exchange. Soil Sci. 141:77-83.
- Poonia, S. R. and Niederbudde, E. A. 1990. Exchange equilibria of potassium in soils: V. Effect of natural organic matter on K-Ca exchange. Geoderma 47:233-242.

- Russel, E. W. 1973. Soil Conditions and Plant Growth. 10th ed., 849pp. Longman, London.
- 執行盛之・小野信一 1991. 温暖地における米食味変動要因の定量的評価法. 九州農業研究 53:13.
- 嶋田永生 1967. 集約多肥栽培土壌の酸性に関する土壌溶液論的研究. 愛知園試研報 6:67-114.
- Schofield, R. K. 1947. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. Proc. Intern. Congr. Pure Appl. Chem. 3:257-261.
- Scwab, A. P. and Lindsay, W. L. 1983. The effect of redox on solubility and availability of manganese in a calcareous soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 47:217-220.
- Sposito, G. 1981. The Thermodynamics of Soil Solutions. p.126-154. Oxford Univ. Press. New York.
- Sposito, G. 1984. The future of an illusion: Ion activity in soil solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:521-536.
- Sposito, G. 1989. The Chemistry of Soils. 277pp. Oxford Univ. Press. New York.
- Sposito, G., Holtsclaw, K. M., Charlet, M., Journey, C. and Page, A. L. 1983. Sodium-calcium and sodium-magnesium exchange on Wyoming bentonite in perchlorate and chloride background ionic media. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:52-57.
- 植物栄養実験法編集委員会 1990. 植物栄養実験法. p.390-397. 博友社. 東京.
- 食糧庁 1968. 米の食味試験実施要領. 24. 東京.
- 平 和宏・平 春枝・松崎昭夫・松島省三 1974. 水稻玄米の化学成分組成におよぼす窒素施肥の影響. 日作紀 43:144-150.
- Takano, T. and Sisa, M. 1964. The effects of salt concentration of culture solution and calcium supplied to the soil on the occurrence of the marginal rot in Chinese cabbage. J. Jap. Hort. Sci. 33:35-45.
- 建部雅子・石原俊幸・松野宏治・藤本順子・米山忠克 1995-a. 窒素施用がハウレンソウとコマツナ生育と糖, アスコルビン酸, 硝酸, シュウ酸含有率に与える影響. 土肥誌 66:238-246.
- 建部雅子・石原俊幸・石井かおる・米山忠克 1995-b. 培地の窒素形態および Ca:K 比がハウレンソウとコマツナの硝酸, アスコルビン酸, シュウ酸含有率に与える影響. 土肥誌 66:535-543.
- 橋 泰善 1982. 各種植物のカルシウム吸収・移行特性. 植物と金属元素. 日本土壤肥料学会編. p.6-36. 博友社. 東京.
- Talibudeen, O. 1981. Cation exchange in soils. In The Chemistry of Soil Processes. Ed. D. J. Greenland and M. H. B. Hayes. p.115-177. John Wiley & Sons. New York.
- 田中浩平 1995. 福岡県における農業気象情報の利活用. 第1報 アメダスデータのメッシュ化による気象値の推定. 福岡農総試研報 14:54-56.
- Taylor, A. W. 1958. Some equilibrium solution studies on Rothamsted soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 22:511-513.
- 坪田五郎・宮脇謙三・三宅 信・小川昭夫 1960. 大谷石々粉の農業利用に関する研究. 第1報 栃木農試研報 4:35-55.
- 坪田五郎・崔見晏伺・小川昭夫 1963. 大谷石々粉の農業利用に関する研究. 第2報 栃木農試研報 7:79-88.
- 土屋一成・和田秀徳・高井康雄 1986. 湛水土壌中における主要無機成分の水溶化機構. 土肥誌 57:593-597.
- 茶村修吾・川瀬金次郎・横山栄造・本田康邦 1972. 米の食味と土壌型との関係 (第1報) 土壌型とその化学的性質が水稻の生育・食味に及ぼす影響. 日作紀 41:27-31

- 上野正夫・佐藤之信・熊谷勝巳・大竹俊博 1990.速度論的解析法による土壤窒素発現予測システム. 土肥誌 61:273-281.
- Wada, K. (ed.) 1986. Ando Soils in Japan. p.180-185. Kyushu University Press. Fukuoka.
- 和田信一郎・石本泰彦 1987. いくつかの黒ボク土および灰色低地土における交換性陽イオン保持に対する変異負荷電の寄与. 土肥誌 58:303-308.
- Wada S.-I. 1984.Mechanism of apparent salt absorption in ando soils. Soil Sci. Plant Nutr. 30:77-83.
- Wada S.-I. 1988. Practical significance of the variability of charge. In Proc. Ninth Intern. Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987, Eds. D.I.Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth, and H.Eswaran, p.558-566, Japanese Committee for the 9-th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington, D. C.
- Wada, S.-I. and Weerasoriya, J. D. 1990.Sodium-calcium, calcium-potassium, and potassium-calcium exchange equilibria on a montmorillonitic soil. Soil Sci. Plant Nutr. 36:451-459.
- 和田信一郎 1992. コロイド特性からみた土壤 Ca の動態. 土肥要旨集. 38:189-190.
- Wada, S.-I.and Odahara, K. 1993. Potassium-calcium exchange in five Ap soils from paddy fields and its effect on potassium concentration in soil solution. Soil Sci. Plant Nutr. 39:129-138.
- 和田信一郎・角籐やす子・小田原孝治・古村秀磨 1994. 7 点の施設土壌における水分含量変化にともなう土壌溶液イオン組成の変化. 土肥誌 65:530-537.
- Wada, S.-I. and Seki, H. 1994. A Compact computer code for ion speciation in aqueous solutions based on a robust algorithm. Soil Sci. Plant Nutr. 40:165-172.
- Wada, S.-I. and Kakuto, Y. 1995. Glycerol-extraction refractometry for determination of gravimetric water content of soil samples. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26:1315-1322.
- 和田信一郎・兼子 明 1996. 塩基飽和度が100%を越える土壌における塩基の存在形態をめぐる問題. 農業及園芸 71:447-452.
- 和田信一郎・郡司掛則昭・小田原孝治・久保研一 1997. 福岡および熊本県下のいくつかの施設土壌の炭酸塩含量. 土肥誌 68:315-317.
- 渡辺久男・結田康一・木方展治 1988. アルミナ製ポラスカップを用いた土壌水採取装置の適用性. 農環技研報告 4:199-219.
- 渡邊幸雄・米山昌美・嶋田典司 1987. ホウレンソウの糖, ビタミン C およびシュウ酸含量に及ぼす水ストレスの影響. 土肥誌 58:427-432.
- 山本富三 1990. 土壤窒素の無機化と施肥. 水田土壌の窒素無機化と施肥. 日本土壤肥料学会編. p.110-123. 博友社. 東京.
- 山本富三・田中浩平・角重和浩 1993. 暖地水田における地力窒素発現パターンと施肥の診断 (第2報) 水田土壌の窒素無機化特性と水稻生育期間中の窒素吸収パターン. 日作紀 62:363-371.
- 山室成一 1985. 強粘質半湿田と乾田化水田における施肥および土壌無機化窒素の有機化, 脱窒および水稻による吸収. 土肥誌 56:10-14.
- 山崎慎一・木下 彰 1969. 100ml 容採土管を用いての遠心法による土壌溶液の採取.土肥誌 40:301.
- 山崎浩道・保科次雄 1993. カルシウム栄養条件がトマト青枯病抵抗性品種の発病に及ぼす影響.土肥誌 64:325-328.
- 吉田昌一 1986. 稲作科学の基礎. p.172-174. 博友社. 東京.

- 吉田徹志・上田英臣・馬西清徳・福元康文 1997. 灌水条件と窒素施用量がトマト果実のカルシウム, 窒素集積に及ぼす影響と尻腐れ果発生との関係. 土肥誌 68:178-180.
- 吉川誠次・竹生新治・安松克治 1969. 米の食味. 全国米穀配給協会. p.1-9.
- 吉永悟志・小林広実 1992. 西南暖地水稻における作期による玄米成分の変化と食味の関係. 日作紀 61(別 2):41-42.

A Fundamental Study on Quality Agricultural Production by Control of Soil Solution Composition

by

ODAHARA Koji

Recently, crops and vegetables are required to be more tasty and have functions to promote human health as well as to be source of nutrients. In addition to plant breeding, the control of nutrient uptake from agricultural soils is important for quality crop production. The control of soil solution composition through water management and fertilizer application would be a key technology for that end because the nutrient uptake by plants depend primarily on the soil solution composition. I designed and conducted a series of basic study to establish the technology to control the major nutrient ion composition of some upland and paddy soils in Fukuoka prefecture. The results of the study are summarized below.

1. Effect of the selectivity coefficient of cation exchange reaction on the soil solution composition

I measured the selectivity coefficient (K_v) for K-Ca exchange equilibrium as a function of K-saturation on two smectitic soils, two halloysitic soils and a soil dominated by noncrystalline aluminum silicate. The selectivity coefficients for all the soils decreased as K-saturation increased. Among the five soils, the halloysitic soils exhibited higher K_v values than the smectitic soils, while the K_v values for the soils dominated by noncrystalline aluminum silicates were comparable with those of the halloysitic soils at low K-saturation but the K_v values were even lower than for the smectitic soils at higher K-saturation. Numerical simulations showed that the K concentration in the soil solution after addition of a K-salt differed significantly among the soils, depending on the exchangeable K status and K-selectivity of the soils.

Next, I derived a general conditions under which the activity ratio of potassium ion of those of calcium plus magnesium ions (AR^k) are kept constant during diluting soil solutions without disturbing cation exchange equilibrium. The necessary conditions are 1) that the selectivity coefficients of K-Ca and K-Mg exchange reactions depend only on the exchangeable cation composition and 2) that Ca and Mg ions behave identically in the cation exchange reactions. Experimental data from the literature showed that neither of those conditions is met strictly in actual soil systems but the deviation is not large.

Practically, however, the dilution of soil solutions disturbs the cation exchange equilibria. Numerical simulations on the variance of the AR^k during dilution showed that the cation exchange capacity had the largest effect among the factors such as the exchangeable potassium content, selectivity for potassium, and initial ionic concentration in the soil solution.

Soil solutions were collected from seven greenhouse soils at soil : water ratios (w:w) of 1:0.5, 1:1, 1:2.5 and 1:5 and analyzed for Ca, Mg, K, Na, NO_3 , Cl, and SO_4 ions. The ionic concentrations decreased as water content increased. The total amount of dissolved ions per

unit weight of soil was not constant but increased as water content increased, indicating that ions were desorbed during dilution of K, Na, and SO_4 were conspicuous, while the amounts of dissolved Ca, Mg, NO_3 , and Cl ions were near constant. These experimental results were interpreted in terms of dissolution of gypsum, simultaneous desorption of SO_4 and cations, and cation exchange equilibria between monovalent and divalent cations.

2. Improvement of palatability of rice by control of soil solution composition.

The factors affecting the palatability of rice such as color, stickiness, fragrance, etc., and physiochemical properties of milled rice produced on different types of soils were studied in order to improve the culture technique to produce the palatability. There was a significant difference in the palatability among the rices from different soils. No clear relationship between the altitude and palatability was found. The quality of rice produced on Light-colored Andosols (AN) was inferior to that of rice produced on other soil types: Fine-textured Yellow soils, Fine-textured Brown Lowland soils, Gravelly Gray Lowland soils. The protein content of rice produced on AN was significantly higher than that of rice produced on other soil types. Protein content was significantly correlated with the palatability, whereas amylose content and amylographic characteristics were not. These results led to the hypothesis that the palatability of rice grown on AN can be improved by suppressing nitrogen uptake during the late growth stage because the low nitrogen uptake would induce the low activity in protein synthesis. Therefore, I grew rice plant on a Gray Lowland soil (GL) and an Andosol (AN), which have been reported to produce rice of different quality, and monitored the soil solution composition during the growing period. I also analyzed the harvest rice straw, brown rice and milled rice for N, Ca, Mg, K.

The Ca^{2+} , Mg^{2+} and NH_4^+ concentrations in the soil solution were significantly higher in GL than those in AN, whereas the K^+ concentration was higher in AN throughout the growing period. There was no simple correlation between the soil solution cation composition and exchangeable cation composition, but the former could be predicted from the latter based on the separately-determined cation exchange selectivity of the soil. Reflecting the soil solution composition, the N, Ca and Mg contents of the rice straw from GL were significantly higher than those of the rice from AN, whereas the K content was lower. The differences in N and mineral contents of the brown rice and milled rice from GL and AN, on the other hand, could not be explained by the soil solution composition, indicating that they were under larger influence of translocation physiology in the rice plant.

To test the validity of the hypothesis, the effect of zeolite application on the soil solution composition and the nitrogen and mineral contents and palatability of rice were studied. NH_4 and K concentration in the soil solution were decreased as zeolite application increased, probably due to the high K-selectivity of zeolite. The content of silicic acid in rice straw produced on Andosol was slightly increased with zeolite application. On the other hand, the contents of Ca, Mg, K and N in the rice straw were not much different. With zeolite application to Andosol, the N content of milled rice decreased and the palatability increased to a similar level of the rice grown on Brown Lowland soil. The percentage of ripened grains increased in spite of an increase in the number of unhulled rice per square meter.

From these results I concluded that the improvement of palatability of rice produced on

Andosol with zeolite application could be attributed to the decrease in N content of milled rice due to the increase of the percentage of ripened grains.

3. Production of vegetables with high calcium content by control of soil solution composition.

Firstly, I investigated the effect of addition of various calcium salts on the soil solution composition. The addition of calcium carbonate and calcium hydroxide in soil did not increase the Ca concentration in the soil solution. In a case of calcium sulfate, Ca concentration was regulated according to its solubility. In cases of calcium chloride and calcium nitrate, the Ca concentration and electric conductivity increased, and the ionic activity of calcium decreased as the added amount of calcium salt increased.

Secondly, I grew *Brassica napus* L. to investigate the effects of liming material application on the soil solution composition during the growing period and also analyzed the harvested plant for Ca, Mg, K. The application of calcium oxide did not increase the Ca concentration in the soil solution and Ca content of plant. On the other hand, the addition of coated calcium nitrate increased the Ca concentration in the soil solution and Ca content of plant according to the application rate.

The effects of ammonium sulfate application on the Ca concentration in the soil solution, Ca content and the yield of *Brassica napus* L. were investigated. The Ca concentration in the soil solution increased as ammonium sulfate application increased due to the increase in the concentration of the accompanying SO_4^{2-} and NO_3^- ions. In these experiments the optimum nitrogen application to achieve highest yield and highest Ca content of *Brassica napus* L. was 0.005 kg m^{-2} .

The Ca concentration in the soil solution decreased as the soil moisture increased. The optimum level of soil moisture for the highest yield of *Brassica napus* L. was from -50 to -12 kPa, although the effect of soil moisture on the Ca content was not clear.

福岡県農業総合試験場特別報告
第15号

土壌溶液組成の制御による農産物の品質改善に
関する基礎的研究

発行 平成12年3月
福岡県農業総合試験場
(福岡県筑紫野市吉木)

著者 小田原 孝 治

印刷所 株式会社九州カスタム印刷