

第5章 水稻の生育抑制・窒素吸収阻害と芳香族カルボン酸の消長

これまで本論文で、未腐熟の麦わらの施用により、土壤中に水稻の根の伸長、窒素吸収を阻害する物質が生成すること、この生育阻害物質は有機物を施用した土壌において特徴的に集積する芳香族カルボン酸であり、その土壌中濃度と組成は土壌条件によってパターンが異なることを明らかにした。

本章では、諸条件下の土壌に栽培された水稻の生育抑制や窒素吸収阻害活性と芳香族カルボン酸の集積条件の関連を解析する。具体的には、5-1 土壌の来歴（有機物施用歴の有無）、5-2 土壌の透水性、5-3 攪拌（代かき）強度、5-4 耕起深度の違いが水稻生育、土壌溶液中の芳香族カルボン酸濃度に及ぼす影響を検討した。

5-1 土壌の麦わら施用歴の影響

5-1-1 材料と方法

(1) 水稻生育

1989年～1990年に九州農業試験場内の有機物連用試験の無機質肥料単用区(28年)、麦わら連用区(5年)に2種類の大きさの鉄枠を埋設し、水稻(品種：レイホウ)を栽培した。枠は80cm×80cm(15株)と15cm×30cmの栽植様式(1株)の2種類で、これに麦わら(約5cmの切片, 1kg/m³)と化成肥料(N, P₂O₅, K₂O各7g/m²相当量)を湛水状態で添加し作土層全体に混合した。翌日、大きさの揃った三本植えの水稻苗を移植した。また、それぞれの土壌に麦わら無施用の対照区を設けた。80cm×80cm枠では茎数及び収量調査を行った。栽植様式枠は1990年のみ設置し、経時的に枠を掘りあげ、乾物生産の推移を調査した。また、後者から採取した土壌を1000×gで遠心分離して上清の土壌溶液を採取し、メンブランフィルター(0.45μm)でろ過後、芳香族カルボン酸の分析に供した。実験は2反復とした。また、麦わら連用区はイタリアンライグラス(根)連用区から変更した圃場であった。

別途、麦わら連用区土壌と化学肥料単用区土壌各300g(乾土相当)の生土と麦わら粉末6gを混和し、N, P₂O₅, K₂O各60mg相当を添加した。これを500mLのガラス製試薬瓶中で湛水し、よく攪拌した。各土壌に麦わら無添加区を設け計4処理とし、各試薬瓶に8

本ずつの白金電極を挿入し、上部をポリエチレン製の袋で覆い、30℃で静置保温した。これらのEhを経時的に測定した(鬼鞍・後藤1970)。

(2) 窒素吸収活性

1994年に麦わら施用歴(0,1,3回)の異なる土壌を採取した。500mLのプラスチック製ポットを用い、それぞれの土壌(乾土相当500g)に当年の麦わら施用(5g)の有無を設け、 Na_2HPO_4 とKClで P_2O_5 、 K_2O 各50mg相当量を水溶液として添加し灌水し(6月22日)、水稻(品種レイホウ)を移植した(6月25日)。基肥窒素は与えなかった。7月4日、20日の朝にトレーサー ^{15}N 溶液(50.2atom%の $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、Nとして5mg)をシリンジで全層に注入し、その24時間後に水稻と土壌を採取した。 ^{15}N はYamamuro(1981)の方法により発光分析器(N-150,日本分光)で分析した。同様に準備した土壌(水稻の栽植:無)を7月5日に各ポットから土壌を採取し、遠心分離(1000×g,10分)により土壌溶液を集めた。この土壌溶液について、芳香族カルボン酸(安息香酸,フェニル酢酸,2-フェニルプロピオン酸,3-フェニルプロピオン酸,4-フェニル酪酸)の濃度を2-3に準じて測定し、GC/MS装置はHP5972(ヒューレットパッカード社)に変更した。

5-1-2 結果と考察

(1) 水稻生育

80cm 枠の1989年の生育調査および収量調査の結果を第5-1表に示した。水稻の茎数は麦わら施用歴の有無に関らず、当年の麦わら施用により減少した。しかし、麦わら連用土壌の方が施用歴のない土壌よりも茎数が多く推移した。また、もみ重,精玄米重,わら重ともに麦わら連用土壌・麦わら無施用>麦わら連用土壌・麦わら施用>非連用土壌・麦わら無施用>非連用土壌・麦わら施用の順で大きかった。このように、いずれの土壌でもわら施用区では初期生育の遅れが認められたが、収穫期までには回復した。

1990年の茎数(第5-2a表)を見ると、1989年(第5-1a表)と比べて麦わら施用による初期の低下が著しかった。当年麦わら無施用であれば連用・非連用に差は無く、1989年とは異なった。第5-2b表には掘り上げた稲株(栽植様式枠)の生育初期における乾物重の推移を示している。わら連用歴のない土壌の対照区の生育が良好であるが、わら施用による生育抑制は施用歴のある土壌より大きかった。80cm 枠の収量調査の結果

(第 5-2c 表)は、もみと精玄米重は両土壤ともわら施用区が良好であった。また、わら生産量は非連用土壤ではわら施用により抑制されたが、連用土壤ではわら施用により無施用を上回った。

栽植様式の粹の土壤から得た土壤溶液中の芳香族カルボン酸濃度の推移を第 5-1 図に示した。7 月 3 日（移植 11 日後）のサンプリングでは安息香酸と 2-フェニルプロピオン酸の濃度は麦わら連用歴のない土壤で高く、フェニル酢酸と 3-フェニルプロピオン酸濃度は逆に麦わら連用土壤が高かった。7 月 11 日（移植後 19 日）以降には分析した全ての酸において麦わら連用土壤は連用歴のない土壤を下回った。また、両土壤ともに麦わら無施用区では芳香族カルボン酸の集積は認められなかった。

以上の結果から、わら連用土壤と非連用土壤では当年麦わら施用による生育抑制の機作や養分供給のパターンが異なることが示唆された。わら連用により生育抑制は軽減され阻害機構の変化と養分供給力の好適化が考えられた。Yoo et al. (1992)によれば、この有機物連用試験における麦わら連用区は非連用に比べて窒素供給量や腐植含量に富む。麦わら連用区における芳香族カルボン酸濃度（第 5-1 図）が非連用区より低く経過したことは、麦わら連用区において乾物生産の抑制が緩和されていることと一致すると考えられる。一方で、当年の麦わら施用による乾物重の低下割合は 7 月 24 日に最も大きかったが、芳香族カルボン酸濃度はそれ以前の 7 月前半（移植後 11~20 日）に最高濃度となった。これは、阻害物質の作用が乾物重に現われるにはタイムラグが生じるためと推定した。

第 5-2 図に有機物連用圃場から採取した土壤に麦わら添加の有無を設けて培養した時の Eh の変化を示した。連用により土壤の Eh は培養時における麦わら添加の有無に関らず高くなった。しかし、湛水開始時におけるわら無添加処理の土壤の Eh からのわら施用による低下幅や低下速度は連用土壤の方が大きかった（第 5-2b 図）。これは麦わら連用土壤における微生物の活性が非連用土壤より高いことを示唆し、麦わら連用により芳香族カルボン酸濃度が低下したことも一致する。

（2）窒素吸収活性

芳香族カルボン酸と水稻の生育抑制の関係を解析する目的で、水稻の窒素吸収活性と土壤溶液中芳香族カルボン酸濃度の分析を同時に行った。

第5-3表に水稻苗の乾物および土壤中のアンモニア態窒素現存量 (^{15}N を除く), 第5-4表にトレーサー ^{15}N の施用24時間後の分配を示した. 移植11日後(7月6日)には乾物重は麦わら施用により30~7%, 窒素吸収量は48~24%低下した. また, 土壤中のアンモニア態 ^{14}N は両土壤ともにわら施用区の方が多かった. トレーサー ^{15}N の水稻吸収速度(第5-4表)は麦わら施用により減少し, わら連用土壤では低下が軽減された. 特に, わら施用土壤における茎葉への分配は連用歴に応じて増加した. また, 麦わら施用土壤における乾物あたりのトレーサー ^{15}N 吸収量は非連用土壤が最も低い1.68mg/gで, 連用歴が長いほど高かった. さらに, 吸収されたトレーサー ^{15}N の茎葉への分配率の低下から, わら施用による転流の阻害が認められたが, これも連用により改善された. 未利用のトレーサー ^{15}N の割合は施用歴一回を除きわら施用区の方が大きく, 窒素吸収量低下の要因はアンモニア態窒素の不足ではないことが明らかになった.

7月5日の芳香族カルボン酸濃度を第5-5表に示した. 安息香酸を除くと, わらの施用回数が増すと芳香族カルボン酸の濃度が低下した. 安息香酸のみは麦わら施用2回目の土壤溶液が最も高かった. また, 安息香酸, フェニル酢酸, 3-フェニルプロピオン酸では, 麦わら施用4回目の土壤で顕著に低下した. このような, わら連用に伴う芳香族カルボン酸濃度の低下は, 7月5日のトレーサー ^{15}N の挙動から見た窒素吸収活性の低下割合の大きさ(第5-4表)と一致している. また, 2-フェニルプロピオン酸は水耕実験における水稻の窒素吸収阻害濃度に達した. これらは, 麦わら施用による窒素吸収量の低下に対する芳香族カルボン酸の寄与を示すものと考えられる.

7月21日の乾物重はわら施用歴0, 1回ではわら無施用の方が大きかったが, 3回土壤ではわら施用処理の方が大きく, 全処理の中で最大であった(第5-3表). 窒素吸収については各土壤とも無施用と同等まで回復を示した(第5-3表). また, 施用歴3回の土壤において茎葉, 根ともに吸収量が大きかった. トレーサー ^{15}N の挙動も(第5-4表)わら施用歴0の土壤の吸収量, 吸収活性ともに7月5日より改善した. また, 土壤溶液中の芳香族カルボン酸濃度はいずれも1 μM 以下であり(図表略), 窒素吸収活性の阻害が緩和されたこととも一致した.

以上の結果から, 麦わらの連用により麦わら施用に伴う生育抑制および窒素吸収量の低下は緩和された. また, 窒素吸収の低下要因は土壤に存在する芳香族カルボン酸など

による吸収阻害が重要な因子であることが確認された。

5-2 土壌の透水性の影響

5-2-1 材料と方法

ポット試験 (a/5000) により、透水量を変化させ土壌溶液の水稲根伸長率を比較した。水稲 (品種レイホウ) は 30 日苗を供試した。未風乾土壌 (有機質資材連用歴は無い) の 1.5kg (乾土相当) に、透水性を確保するため園芸用洗い砂 300g を添加した。これに麦わら 20g または 0g と化成肥料 (N, P₂O₅, K₂O 各 100mg 相当) を添加し、良く攪拌しながら灌水した。多孔質のカップをポット底面中央に設置し、土壌溶液を定量的に抜くことで透水性を制御した。透水量は減水深 0, 5, 10mm/日になるよう設定した。ただし、減水深 0 区でも分析用に 100mL (5mm) を 4 日毎に採水した。この土壌流出液を用いて芳香族カルボン酸濃度 EC, Eh, pH を測定した。蒸留水を灌水し常に表面水を保った。最終の土壌溶液の採水後に水稲を採取し、乾物重を測定した。

5-2-2 結果と考察

第5-6表に移植20日後に採取した水稲の乾物重を示した。麦わら無施用の場合は透水量が増すと茎葉、根ともに乾物重が低下したが、麦わらを施用すると逆に透水量が増すにつれて増加した。この結果、透水0と5mm/日では麦わら施用により茎葉の生育が無施用区より抑制されたが、10mm/日では促進された。このことから、透水量の増加はわら施用による根の伸長阻害や生育抑制を軽減する効果があると推定された。

第5-3図に透水性の異なる土壌の土壌溶液サンプルの芳香族カルボン酸濃度を示した。芳香族カルボン酸の集積のピークは灌水 16 日頃であり、20 日には低下した。2-フェニルプロピオン酸は 20 日に濃度が低下したものの透水量 5mm/day では阻害活性のある濃度域 (0.5 μM 以上) にあり、0mm/day 区でより高かった。安息香酸とフェニル酢酸は期間を通じて透水 5mm/day の区の濃度が高い傾向があった。2-フェニルプロピオン酸と 3-フェニルプロピオン酸の集積パターンは似ており透水性の差処理による差も小さかった。芳香族カルボン酸はその物質によって集積パターンが異なったが、透水量の影響は明解でなかった。なお、わら無施用では芳香族カルボン酸は検出限界以下であり、透水量の影響は検出できなかった。

第 5-4 図に土壤流出液の pH, EC(電気伝導度), Eh を示した。土壤溶液の pH は、灌水後短期間わら施用区が低い値を示したが、透水量による影響は大きくなかった。移植後 1 週間ほど経過すると全処理ともに 6.5 前後となった。EC はどの透水量処理においてもわら施用により高まった。これは、わら施用により土壤の還元が進行し、鉄やマンガンを始めとする金属が可溶化したことと有機酸イオンや発生した炭酸ガスの溶解による上昇と考えられる。土壤溶液の EC は 1mS を越えると根の伸長に影響があるといわれているが、わら施用区ではこの数値を上回った。1 日に 10mm 透水した土壤では EC が徐々に低下し、15 日で 1mS を下回った。また、1 日 5mm の透水処理でも 7 日から 11 日の間は高く推移したが、その後低下を示した。この低下には、可溶化した塩類の透水による溶脱、灌水による希釈の効果が大きいであろう。しかし、透水量 0 処理においては 7 日後に 1mS 以上の数値を示しており、他の処理と異なる様相を示した。わら無施用処理ではいずれもわら施用処理より低濃度で経過し、透水量が少ないほど EC は大きくなった。このことから、塩濃度はわら施用により阻害濃度まで高まり、透水に応じて軽減されることが知られた。

Eh については、土壤溶液の数値は土壤に直接電極を挿入した数値(第 5-2 図)に比べると約 300mV 高くなったが、還元状態の指標とすることは可能と考えた(佐藤・山根 1973, 山根 1982b)。わら施用によりいずれの透水処理区でも Eh は低かった。予め、透水量が低いほど Eh は低く、強い還元状態が持続するものと予測していたが、異なる結果となった。この理由は、最初土壤還元が進行するためには土壤微生物の増殖が必要であり、土壤表面からの酸素の供給がある方が増殖速度が大きくなるためと考えた。このことは、EC においても始め透水量の多い処理で高かったことや芳香族カルボン酸濃度が 5mm 区で高いことなどとも一致している。

第 5-5 図にはアンモニア態窒素の流出液中濃度を示した。移植 7 日後にはわら施用の有無に関らず透水の無い区で最も濃度が高く、最初の 7 日間におけるアンモニア態窒素の低下は溶脱の影響が強かったことを示している。11 日以降は、わら無施用では初期のアンモニア態窒素濃度に依存した形でアンモニア態窒素含量が直線的に低下し、水稻による窒素の吸収、土壤への有機化が窒素濃度にほぼ依存して進行したことを示すものと考えられる。一方、わら施用土壤におけるアンモニア態窒素は透水量が 0 および

5mm/day 以下の処理では追肥がないにも関わらずいったん増加し、同じ透水量の無施用区と比較して高濃度を維持した。このことは、わら施用区では水稲による吸収や土壤による有機化過程が阻害されたことを示唆するものである。

本実験では測定した土壤溶液の理化学性の中で水稲生育に影響を及ぼす濃度に達したのは芳香族カルボン酸と EC であった。しかし、わら施用区における乾物生産は透水量が大きいほど改善されたのに対し、EC は 5mm/day が最も高く、芳香族カルボン酸濃度には透水量による明確な傾向は認められなかった。生育抑制に対して EC、芳香族カルボン酸に加えて、他の要因が関与するものと考えられた。

5-3 土壤の代かき強度の影響

5-3-1 材料と方法

九州農試圃場から採取した細粒質灰色低地土 800g(乾土相当)に稲わら 0g または 8g, を混合し 1L のポット (プラスチック製ピーカー) に充填し $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$:47.1mg, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$:200 mg, KCl :40mg を施用して湛水した。土壤の攪拌強度を次の3段階(無, 中, 強)に設定した。「無攪拌」では土壤全量とわらをビニール袋内でよく振り混ぜてからポットに移し、水を上から注いだ。「中攪拌」では土壤に飽和容水量より多い 850mL の水を加えてから全体を攪拌した。「強攪拌」では土壤に少しずつ水を添加して練り合わせ、ほぼ飽和状態でよく攪拌してからさらに水を追加した。各処理とも湛水状態を保つよう、土壤粒子が沈降した後で表面水を適宜追加した。

1995年5月17日に水稲(品種レイホウ)を移植し、5月29日、6月6日にNとして10mgのトレーサー ^{15}N (30.0atom% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)をシリンジで無作為に土壤全層に注入した。5月30日、6月7日に水稲と土壤全量を回収し、直ちに水稲の根を切り離した。土壤については10MのKCl溶液で抽出してアンモニア態窒素とし、ケルダール分解で全窒素とした。乾物重、水稲窒素吸収量及び土壤の窒素有機化量、土壤残存アンモニア量、土壤三相分布(湛水11日後)を測定した。 ^{15}N の存在比の測定は発光法(Yamamuro 1981)により行った。

5-3-2 結果と考察

第 5-7 表に 5 月 30 日と 6 月 7 日の水稻の乾物重と窒素吸収量、土壤中アンモニア態窒素に対する各攪拌強度とわら施用の影響を示した。5 月 30 日（移植 13 日後）には、わら無施用では攪拌の強度にかかわらずほぼ同様の生育を示したが、わら施用の場合には攪拌が強いほど生育が劣った。その結果、麦わら施用区の水稲生育(乾物重)は強い攪拌で大きく抑制された。6 月 7 日（移植 21 日後）のわら無施用土壌における水稻生育は、無攪拌では攪拌処理をした 2 区と比較して顕著に劣った。攪拌処理区では初期(5 月 30 日)の土壌由来のアンモニア態窒素量が無攪拌土壌よりも大きく、土壌の機械的処理効果（原田ら 1964）により土壌窒素の無機化が多かったことが認められる。一方、わら施用区では攪拌するほど乾物生産量が低下した。わら施用処理の土壌中アンモニア態窒素量はわら無施用処理に比べて顕著に多かった。

第 5-7 表に示した窒素吸収量は土壌および基肥由来窒素の吸収量と考えることができる。わら無施用土壌では、攪拌強度が高いほど窒素吸収量が大きく、わら施用では逆に攪拌強度が高い方が窒素吸収は劣った。一方、根においてはわら施用処理では攪拌強度が増すと窒素含有率が低下したが、わら無施用処理の土壌における窒素含有率と土壌攪拌の関係は判然としなかった。

第 5-8 表にトレーサー¹⁵N 吸収量を示した。第一回目のトレーサーは移植 12 日後の 5 月 29 日に与え、その 24 時間後に回収した。わら施用区では無施用に比べて ¹⁵N 吸収割合が劣り、その抑制程度は攪拌が強い程大きかった。6 月 7 日も 1 回目と同様の傾向であった。吸収された窒素の転流を全トレーサー¹⁵N 吸収量に対する茎葉に移動したトレーサーの比率で示した。稲わらを施用すると、攪拌程度に関らず窒素の地上部への転流は低下した。しかし、攪拌強度とトレーサー¹⁵N の茎葉への移動阻害の強さとの関係は判然としなかった。一方、5 月 30 日の土壌中のアンモニア態でのトレーサー¹⁵N の残存割合は稲わら施用により中と強攪でそれぞれ 5、10%低下した。無攪拌では低下は認められなかった。トレーサー¹⁵N の有機化割合は土壌攪拌の強い区はわら施用区の方が大きい。攪拌処理を行わないとわら施用区の方が小さくなった。5 月 30 日には、稲わら施用により水稻によるトレーサー¹⁵N 吸収割合は攪拌無区でわら無施用の 67%、強攪拌区で 35%程度まで低下した。稲わら施用区では施肥窒素の有機化の促進と水稻の

窒素吸収阻害の両者が起り、さらに、攪拌の強度により両者の寄与率のバランスが異なると考えられる。

第 5-9 表に土壤溶液中の芳香族カルボン酸の濃度を示した。5 月 30 日には 2-フェニルプロピオン酸の濃度が窒素吸収阻害濃度域に達していた。また、強攪拌で最も高濃度であった。しかし、安息香酸、フェニル酢酸、3-フェニルプロピオン酸では無攪拌で濃度が最高であった。6 月 7 日には安息香酸の濃度が上昇した。また 5 月 30 日には検出されなかった 4-フェニル酪酸が 2.1 から 4.6 μM の濃度で検出された。安息香酸と 4-フェニル酪酸は攪拌強度が増すほど高濃度であった。しかし、2-フェニルプロピオン酸と 3-フェニルプロピオン酸では攪拌強度の小さい時に高濃度であった。また、2-フェニルプロピオン酸は 5 月 30 日の測定に比べて濃度は同レベルであったが 3-フェニルプロピオン酸の場合は中、強攪拌と比べ大幅に低下していた。このように、芳香族カルボン酸濃度の攪拌強度による変化は各カルボン酸によりパターンが異なり、一定の傾向を見出すのは困難であった。このことは、攪拌レベルの相違による生育抑制の差には芳香族カルボン酸とは別の要因の寄与があることを示唆している。各処理における三相分布を第 5-6 図に示した。攪拌が強いほど固相率が増し気相率が減少する傾向が認められた。また、稲わら施用処理では無施用よりも気相率が高くなった。わら施用区では強攪拌により気相は低下したが、これは団粒構造の分散が生じ、土壤が密充填になったためと推定した。経験的に、わら施用区では土壤の透水性が湛水後の時間経過とともに低下することを観察しており、土壤間の毛管連絡が切断され易いものと推察している。このようなことから、強攪拌土壤では気相が減少しており、透水による酸素の供給も減少すると考えられる。攪拌強度の差は、結果的には湛水時の酸素量と透水による酸素供給を制限することになり、水稻の生育抑制の程度に影響するものと考えられる。

5-4 耕起深度の影響

5-4-1 材料と方法

九州農業試験場の化学肥料単用圃場に 80cm \times 80cm の鉄枠を設置した(1988 年)。耕起深度を 3 段階 (6, 12, 18cm) に設定し、それぞれに麦わら 640g 施用区(1t/10a 相当)と麦わら無施用区を設けた。各区に化成肥料の N, P₂O₅, K₂O 各 5g/m²相当量を湛水状

態の土壤に添加し、麦わらとともに作土層全体に混合した。わら施用の1日後にあたる6月23日に、三本植えの揃った水稻（品種レイホウ）を15株（栽植密度23.4株/m²）移植した。追肥は7月8日に4 g/m²、8月19日に6 g/m²相当量をN、K₂Oを当量含む化成肥料（くみあいNK化成）で与えた。

生育は7月8日、18日、28日、8月11日と10月19日に枠内の全株（n=15）について茎数を調査した。また、土壤中の揮発性脂肪酸と芳香族カルボン酸濃度測定のため枠内の作土にポーラスカップを挿入し減圧により土壤溶液を採取した。土壤溶液の採取は6月25日、30日、7月5日、14日に行った。揮発性脂肪酸はHPLC法（2-2（3））により、芳香族カルボン酸はGC/MS法（2-3）により定量した。

5-4-2 結果および考察

水稻の茎数の変化を第5-7図に示した。移植25日後の茎数はわら施用の有無に関らず、耕起深度が6cmと浅くても良好な生育を示し、12cm区が最も劣った。その後、わら無施用区では収穫期までに耕起深度による差は小さくなった。わら施用区では耕起深度6cm処理区において茎数が最も多く経過したが、87日後には12cm区が上回った。わら無施用処理において生育初期には耕起深度が浅い方が生育が良好であったのは、根系が未発達段階では施肥窒素の土壤中濃度が高いことが、水稻の吸収にとって有利であったためと考えられる。

第5-10表に収量を示した。わら無施用区では耕起深度が深いほどもみ収量および全乾物収量が増加した。これは、深耕による土壤由来の窒素の供給量が多く収量が増加したものと考えられる。一方、麦わら施用区では逆に耕起深度が浅いときに最も乾物生産量が高かった。浅耕（6cm）区ではわら施用区のもみ/わら比が高く、もみ収量が高くなった。これは同化した炭水化物、窒素化合物の子実への転流が効率的であったことを示している。12cm、18cmの区では6cm処理区に比べて全乾物重、もみ/わら比ともに小さく、乾物生産が小さかった上に土壤や麦わら由来の窒素供給が生育後期に大きくなるなど水稻の窒素吸収パターンとうまく一致しなかったものと推定した。

土壤溶液中の揮発性脂肪酸と芳香族カルボン酸の濃度を測定した（第5-8図）。いずれの揮発性脂肪酸（酢酸、酸酸、プロピオン酸、イソ-吉草酸）も、移植5~10日後には耕起深度6cmの区の濃度がもっとも高く経過した。また、6cm区では耕起深度

が深い処理に比べて速やかに消失した。耕起深度 18cm 処理区では 6cm, 12cm 区より遅れて集積のピークが発現した。これらの酸の濃度は滝嶋による根の伸長阻害濃度(滝嶋ら 1960)と比較すると低く経過した。芳香族カルボン酸は揮発性脂肪酸と同様に、初め耕起深度 6cm の処理区でもっとも高かった。しかし、時間が経過すると深耕(18cm)区の安息香酸と 2-フェニルプロピオン酸濃度が高まった。2-フェニルプロピオン酸は水稻根の伸長と窒素吸収を阻害する濃度であった。揮発性脂肪酸や芳香族カルボン酸の生成量は耕起深度が浅いときに高く推移すると予測されたが、イソ-吉草酸、安息香酸、2-フェニルプロピオン酸では異なる結果となった。この原因は、耕起深度が深くなると作土層下部では地温が低いため有機酸の集積が遅れ、低濃度で長期間持続することが推測される。また、微生物活性が低い下層土が混入することなども生成が遅れる一因ではないかと考えている。

水稻の生育経過とわら施用土壤中の芳香族カルボン酸の消長を比較すると、茎数調査を始める前の移植後 15 日の濃度は耕起深度 6cm の処理で高く、深耕(18cm)区が徐々に濃度を高めた。特に阻害活性の高い 2-フェニルプロピオン酸でこの傾向がはっきりしていた。また、揮発性脂肪酸も初期の浅耕区の濃度が高く経過した。24 日目の 2-フェニルプロピオン酸は阻害濃度以上のレベルだった。また、その濃度は耕起深度 18cm 処理で最も高く経過し、この区における水稻茎数が低く経過したことと一致した。芳香族カルボン酸の集積は生育前期(移植後 1~4 週)にピークがあると考えられる。茎数で見た生育抑制減少は移植から 20~40 日頃に最も厳しく、芳香族カルボン酸のピークからはやや遅れていたが、障害が認められるにはタイムラグがあるためと考えられる。

5-5 まとめ

圃場の水稻に麦わらなどの新鮮有機質資材を施用する際、土壌管理により水稻の生長および窒素吸収の障害が大きく変化することが観察されている。第 5 章では、土壌のわら施用歴の有無、土壌の透水量の大小、代かきの強弱、耕起深度とわら施用との組み合わせと阻害活性の特徴、芳香族カルボン酸の濃度変化、土壌の理化学性の関係について検討した。ここで明らかにされた有機質資材施用による生育抑制が大きくなる条件は、1)過去に新鮮有機物の施用歴が無い、2)透水性の低い土壌での施用、3)強い代かきが挙

げられる。また、第 4 章の芳香族カルボン酸生成条件を総合すると 4) 施用する有機質資材の易分解性有機成分が多い、5) 低温での有機物施用が想定される。このほか、耕起深度を変化させると生育阻害は初期には浅耕区で大きかったが、後期には深耕区で大きくなった。また、わら施用による水稲の窒素吸収量の低下は、土壌窒素の有機化とこれに起因するアンモニア態窒素の不足は主要因ではないことを確認した。水稲の窒素吸収活性や根量の低下に関与する阻害要因の寄与が大きいものと考えられた。

上述の土壌・栽培条件におけるわら施用による水稲生育抑制や窒素吸収活性阻害の大きさと、土壌溶液の芳香族カルボン酸濃度の関係は、対応関係がある場合と、対応が認められない場合があった。芳香族カルボン酸濃度と水稲生育抑制が対応したのは 1) 土壌の麦わら施用歴、2) 土壌の耕起深度、3) 施用有機質資材の種類であった。

土壌の攪拌（代かき）の強さは乾物重や窒素吸収活性に大きく影響したが、土壌溶液中の芳香族カルボン酸濃度への影響は小さかった。さらに、土壌の透水性を増加すると乾物生産の改善に効果があり、芳香族カルボン酸濃度は鉢試験(第 2 章)では低下したがポット試験では判然としなかった。この二つの土壌条件はいずれも土壌の物理性、特に気相率や酸素供給量に関与する項目である。これらの結果から、水稲の窒素吸収阻害要因について次のように推定した。

1. 芳香族カルボン酸（特に 2-フェニルプロピオン酸）はわら施用土壌の土壌溶液中で窒素吸収や水稲根の伸長阻害濃度に高頻度で達した。その濃度は各種土壌条件下の水稲の窒素吸収活性の低下とも連動していることから、芳香族カルボン酸は水稲の生育抑制に関与している。
2. 土壌の物理性は土層内への酸素の供給に関与し、わら類施用条件下における水稲の窒素吸収活性に影響する。
3. 麦わら施用による EC の高まりが観察され、根の伸長や植物生理に影響を及ぼす可能性を認めた。
4. 有機物施用による水稲の生育抑制にはこれらの要因が複合的に関与している。

第5-1表 麦わら連用歴の有無と茎数および収量の変化(1989年 80×80cm枠実験)

(a) 茎数 (茎数 本/m²)

土壤		7月11日	7月19日	8月1日	10月17日
麦わら連用歴	試験時の 麦わら施用				
-	-	317	566	586	371
-	+	304 (0.96)	500 (0.88)	544 (0.93)	353 (0.95)
+	-	309	630	735	473
+	+	322 (1.04)	537 (0.85)	670 (0.91)	424 (0.90)

(b) 収量調査

土壤		乾物重 (kg/10 a)			精玄米重 (kg/10 a)	もみわら比
麦わら連用歴	試験時の 麦わら施用	もみ	わら	(合計)		
-	-	618	500	1118	556	1.23
-	+	552 (0.89)	393 (0.79)	946 (0.85)	501 (0.90)	1.41 (1.15)
+	-	831	528	1360	759	1.57
+	+	718 (0.86)	501 (0.95)	1220 (0.90)	659 (0.87)	1.43 (0.91)

カッコ内の数字は わら施用/わら無施用の比率

第5-2表 麦わら施用歴の有無と茎数、乾物重、収量(1990年)

(a) 茎数 (茎数 本/m²)

土壤						
麦わら連用歴	試験時の 麦わら施	7月11日	7月20日	7月30日	8月9日	10月3日
-	-	335	633	592	513	339
	+	149 (0.45)	312 (0.49)	517 (0.87)	524 (1.02)	314 (0.93)
+	-	326	588	602	526	402
	+	172 (0.53)	351 (0.60)	540 (0.90)	566 (1.08)	354 (0.88)

(80cm枠×1, n=15)

(b) 乾物重 (乾物 g/株)

土壤		7月3日		7月11日		7月24日	
麦わら連用歴	試験時の 麦わら施	茎葉	根	茎葉	根	茎葉	根
-	-	0.36	0.12	1.95	0.5	11.4	2.39
	+	0.26 (0.71)	0.09 (0.78)	1.23 (0.63)	0.4 (0.79)	5.87 (0.51)	1.43 (0.60)
+	-	0.33	0.11	1.43	0.43	10.7	2.53
	+	0.28 (0.85)	0.08 (0.75)	0.83 (0.58)	0.31 (0.71)	5.91 (0.55)	1.58 (0.62)

(栽植様式枠×2, n=2)

(c) 収量

土壤		乾物重 (kg/10 a)			精玄米重	もみわら比
麦わら連用歴	試験時の 麦わら施	もみ	わら	(合計)	(kg/10 a)	
-	-	794	1000	1794	650	0.794
	+	833 (1.05)	859 (0.86)	1692 (0.94)	676 (1.04)	0.97 (1.22)
+	-	710	882	1592	665	0.806
	+	942 (1.33)	984 (1.12)	1926 (1.21)	728 (1.09)	0.957 (1.19)

(80cm枠×1, n=15)

カッコ内の数字は わら施用/わら無施用の比率

第5-3表 水稻乾物重・窒素吸収量および土壤中アンモニア態窒素量

採取時期	土壌	麦わら (麦わら 施用回数)	乾物重(g)				窒素吸収量 (mg) ¹⁾				アンモニア態 窒素 ¹⁾					
			麦わら 施用	茎葉	比率 ²⁾	根	比率 ²⁾	計	比率 ²⁾	茎葉	比率 ²⁾	根	比率 ²⁾	計	比率 ²⁾	(mg/pot)
7月5日	0	-	0.321		0.087		0.408		6.27		0.851		7.12		3.43	
		+	0.213	0.66	0.075	0.86	0.288	0.706	2.95	0.47	0.837	0.98	3.79	0.53	6.88	2.01
		-	0.291		0.100		0.391		5.74		0.623		6.36		4.54	
		+	0.249	0.86	0.085	0.85	0.334	0.854	3.57	0.62	0.780	1.25	4.35	0.68	6.35	1.40
		-	0.302		0.077		0.379		5.71		0.870		6.58		5.89	
		+	0.254	0.84	0.098	1.27	0.352	0.929	4.28	0.75	0.846	0.97	5.13	0.78	7.81	1.32
7月21日	0	-	1.04		0.778		1.82		10.9		4.65		15.6		24.6	
		+	0.92	0.88	0.560	0.72	1.48	0.813	12.3	1.13	4.54	0.98	16.9	1.08	28.8	1.17
		-	1.12		0.804		1.92		12.4		5.58		18.0		25.7	
		+	0.98	0.88	0.585	0.73	1.56	0.815	12.1	0.98	4.85	0.87	17.0	0.94	30.1	1.17
		-	1.03		0.756		1.79		12.2		5.08		17.3		30.6	
		+	1.21	1.17	0.695	0.92	1.90	1.065	18.9	1.55	5.80	1.14	24.7	1.43	31.3	1.02

¹⁾アンモニア態窒素はトレ-サ分を除く

²⁾わら施用/わら無施用の比率

第5-4表 トレーサー窒素の分配

採取時期	土壌 (麦わら 施用回数)	麦わら 施用	水稻吸収 (mg)								茎葉転流		土壌アンモニア態窒素	
			茎葉	比率 ¹⁾	根	比率 ¹⁾	計	比率 ¹⁾	乾物比 ²⁾	比率 ¹⁾	比率 ³⁾	比率 ¹⁾	(mg/pot)	比率 ¹⁾
7月5日	0	-	1.039		0.059		1.098		2.69		0.947		1.73	
	0	+	0.419	0.40	0.068	1.15	0.487	0.44	1.68	0.62	0.861	0.91	2.21	1.28
	1	-	0.824		0.049		0.874		2.24		0.943		2.44	
	1	+	0.515	0.62	0.060	1.21	0.575	0.66	1.74	0.77	0.896	0.95	1.78	0.73
	3	-	0.930		0.059		0.989		2.63		0.940		1.14	
	3	+	0.574	0.62	0.076	1.29	0.651	0.66	1.85	0.71	0.883	0.94	2.11	1.85
7月21日	0	-	1.436		0.179		1.616		0.89		0.889		0.50	
	0	+	1.436	1.00	0.287	1.60	1.724	1.07	1.16	1.31	0.833	0.94	1.10	2.21
	1	-	1.848		0.301		2.149		1.12		0.860		0.73	
	1	+	1.429	0.77	0.322	1.07	1.751	0.82	1.12	1.00	0.816	0.95	1.00	1.37
	3	-	2.063		0.258		2.321		1.30		0.889		0.81	
	3	+	1.840	0.89	0.312	1.21	2.152	0.93	1.13	0.86	0.855	0.96	0.66	0.81

- 1) わら施用/わら無施用の比率
 2) 全トレーサー窒素吸収量/乾物重 : 窒素吸収活性
 3) トレーサー窒素含量(茎葉)/全トレーサー窒素含有量

第5-5表 土壤溶液中芳香族カルボン酸濃度(μM) (7月5日)

麦わら 施用回数*	安息香酸	フェニル 酢酸	2-フェニル プロピオン酸	3-フェニル プロピオン酸	4-フェニル 酪酸
0	20.10	7.68	6.11	54.32	2.00
1	29.74	1.78	5.43	35.77	1.79
3	15.12	1.98	3.56	2.93	0.19

* 供試土壤を圃場から採取した時の回数, 本実験での施用により+1になる

第5-6表 透水性の相違と水稻乾物重

透水性 (mm/day)	わら 施用	乾物重 (g/pol)					
		茎葉	比率*	根	比率†	計	比率†
0	—	1.24		0.370		1.610	
0	+	0.93	0.75	0.272	0.74	1.197	0.74
5	—	1.28		0.345		1.625	
5	+	1.07	0.84	0.315	0.91	1.385	0.85
10	—	1.17		0.328		1.498	
10	+	1.21	1.03	0.320	0.98	1.530	1.02

*わら施用/わら無施用の比率

第5-7表 水稻乾物重・窒素吸収量および土壤中アンモニア態窒素量

時期	攪拌 強度	稲わら 施用	乾物重 (mg/pot)					窒素吸収量 ¹⁾ (mg/pot)					アンモニア態窒素 ¹⁾ (mg/pot)		
			茎葉	比率 ²⁾	根	比率 ²⁾	計	比率 ²⁾	茎葉	比率 ²⁾	根	比率 ²⁾		計	比率 ²⁾
5月30日	無	—	181		73.5		255		5.48		0.99		6.47		3.90
	無	+	158	0.87	76.5	1.04	234	0.92	2.63	0.48	1.01	1.02	3.64	0.56	8.07
	中	—	201		44.6		245		6.70		0.59		7.29		6.41
	中	+	131	0.65	55.6	1.25	187	0.76	2.23	0.33	0.67	1.14	2.90	0.40	9.06
	強	—	195		51.2		247		6.84		0.61		7.45		7.97
	強	+	118	0.61	46.5	0.91	165	0.67	1.61	0.24	0.60	0.99	2.21	0.30	9.14
6月7日	無	—	445		307.7		752		8.15		3.37		11.52		3.07
	無	+	235	0.53	134.4	0.44	369	0.49	3.29	0.40	1.51	0.45	4.80	0.42	8.88
	中	—	612		399.7		1012		12.22		4.37		16.59		3.05
	中	+	222	0.36	120.0	0.30	342	0.34	3.85	0.32	1.42	0.33	5.27	0.32	8.04
	強	—	614		295.9		910		11.97		2.99		14.96		3.63
	強	+	206	0.34	133.7	0.45	340	0.37	2.62	0.22	1.25	0.42	3.87	0.26	7.77

¹⁾ トレーサー窒素分を除く

²⁾ わら施用/わら無施用の比率

第5-8表 トレーサー¹⁵Nの土壌と水稻における分配

時期	攪拌 強度	稲わら 施用	水稻吸収 (mg/pot)				茎葉への転流 ²⁾		土壌 (mg/pot)					
			茎葉	比率 ²⁾	根	比率 ²⁾	計	比率 ²⁾	アンモニア 態	比率 ²⁾	有機化	比率 ²⁾		
5月30日	無	—	0.31		0.059		0.37		0.842		5.52		2.17	
	無	+	0.18	0.58	0.068	1.16	0.25	0.67	0.725	0.86	6.94	1.26	2.10	0.97
	中	—	0.31		0.038		0.35		0.893		6.72		2.18	
	中	+	0.12	0.37	0.027	0.72	0.14	0.41	0.813	0.91	6.43	0.96	1.55	0.71
	強	—	0.24		0.023		0.27		0.913		7.75		1.84	
	強	+	0.08	0.33	0.014	0.59	0.09	0.35	0.853	0.93	6.99	0.90	2.55	1.39
6月7日	無	—	1.04		0.307		1.35		0.772		5.32		1.82	
	無	+	0.38	0.36	0.113	0.37	0.49	0.36	0.768	0.99	6.78	1.27	1.36	0.75
	中	—	1.18		0.402		1.58		0.745		5.30		1.33	
	中	+	0.29	0.25	0.066	0.16	0.36	0.23	0.816	1.09	4.53	0.85	3.26	2.46
	強	—	1.01		0.267		1.28		0.791		5.09		2.26	
	強	+	0.22	0.22	0.088	0.33	0.31	0.24	0.718	0.91	4.57	0.90	3.15	1.39

1) トレーサー窒素含量(茎葉)/全トレーサー窒素含有量

2) わら施用/わら無施用の比率

第5-9表

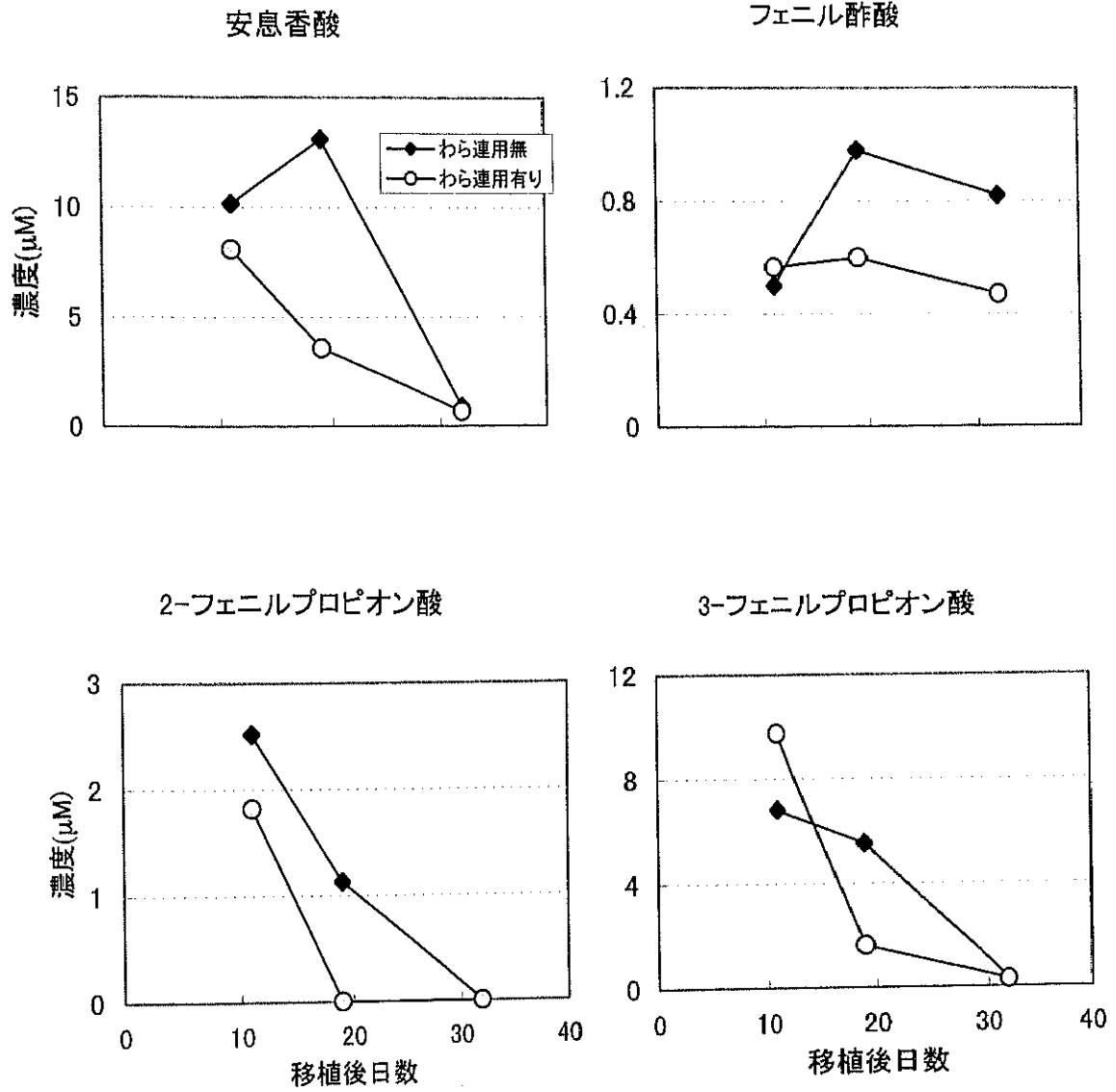
攪拌強度と土壤溶液芳香族カルボン酸濃度

採取日	攪拌強度	芳香族カルボン酸濃度(μM)				
		安息香酸	フェニル酢酸	2-フェニルプロピオン酸	3-フェニルプロピオン酸	4-フェニル酪酸
5月30日	無	5.02	3.18	3.88	30.46	-
	中	3.58	1.87	3.81	19.69	-
	強	4.61	1.71	4.44	21.63	-
6月7日	無	31.72	1.71	5.19	25.71	2.17
	中	36.17	1.36	4.12	6.84	2.14
	強	43.41	1.08	2.80	1.60	4.61

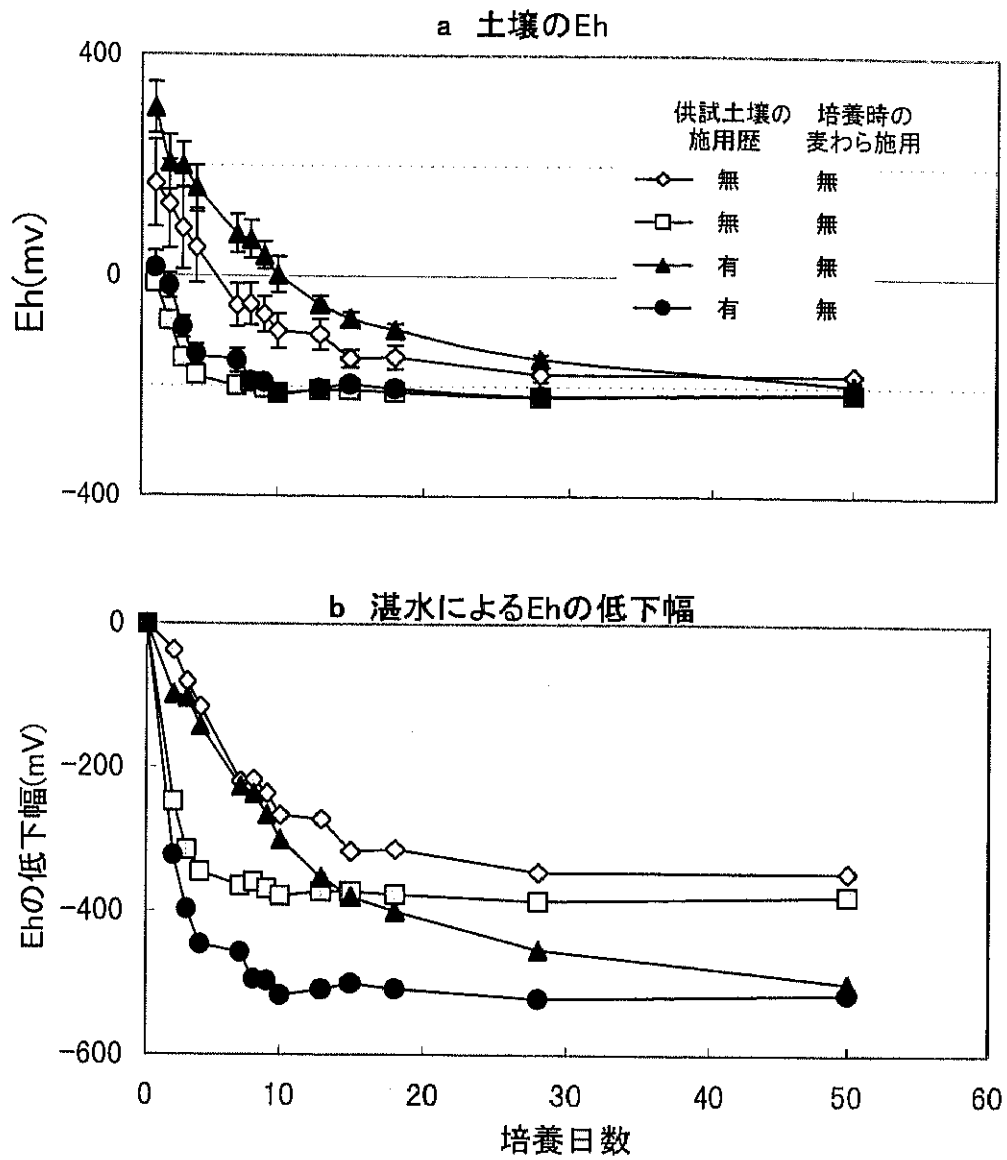
第5-10表 耕起深度と水稻収量

処理 耕起深度	わら	乾物収量(kg/10a)			もみ/ わら比
		もみ重	茎葉	全乾物	
6cm	-	408	425	833	0.96
	+	380 (0.93)	329 (0.77)	709 (0.85)	1.16
12cm	-	420	413	833	1.02
	+	338 (0.80)	316 (0.77)	654 (0.79)	1.07
18cm	-	455	427	882	1.07
	+	356 (0.78)	334 (0.78)	690 (0.78)	1.07

カッコ内は わら施用/わら無施用の比率

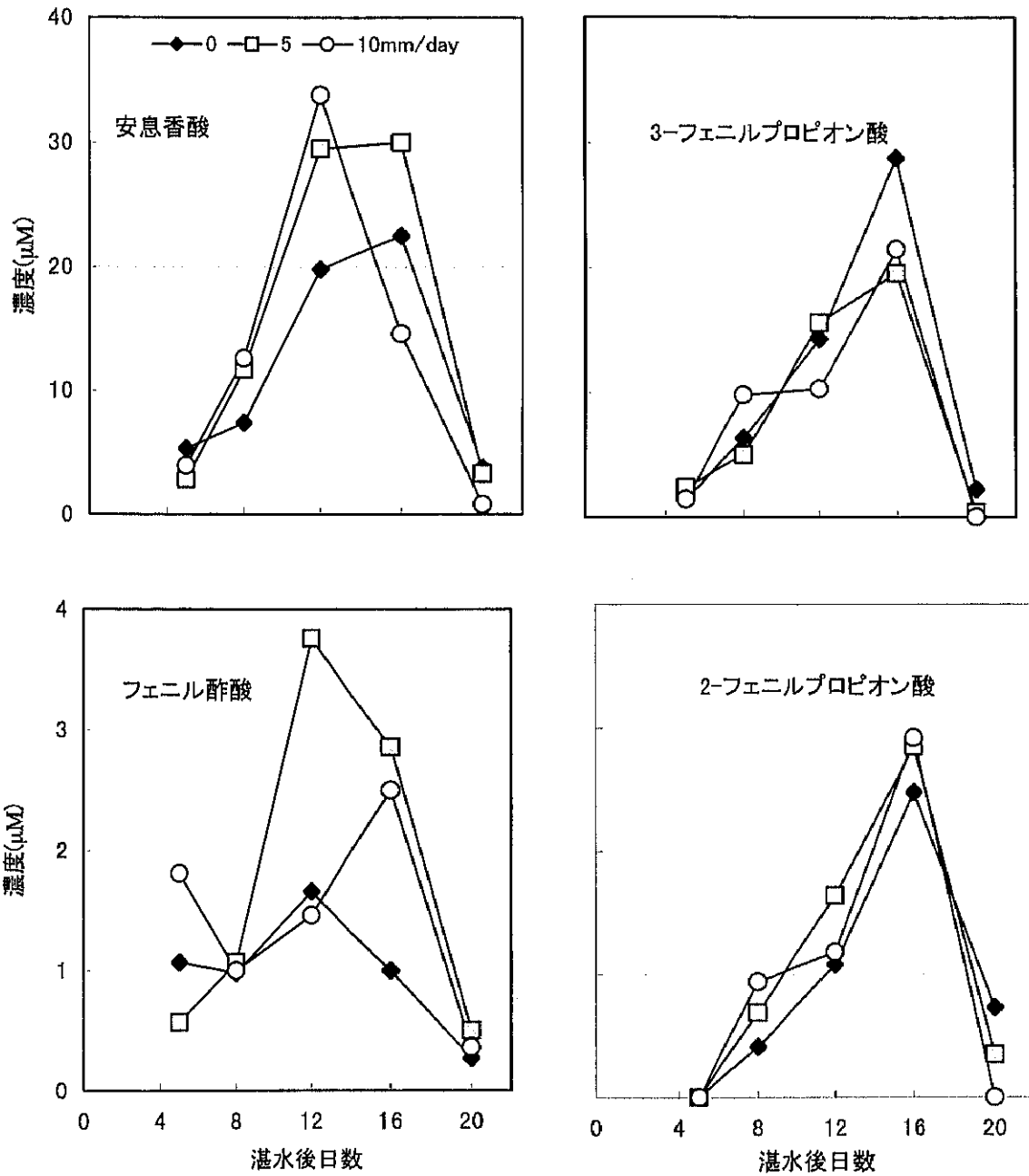


第5-1図 土壤の麦わら施用歴と土壤溶液の芳香族カルボン酸濃度 (1990)

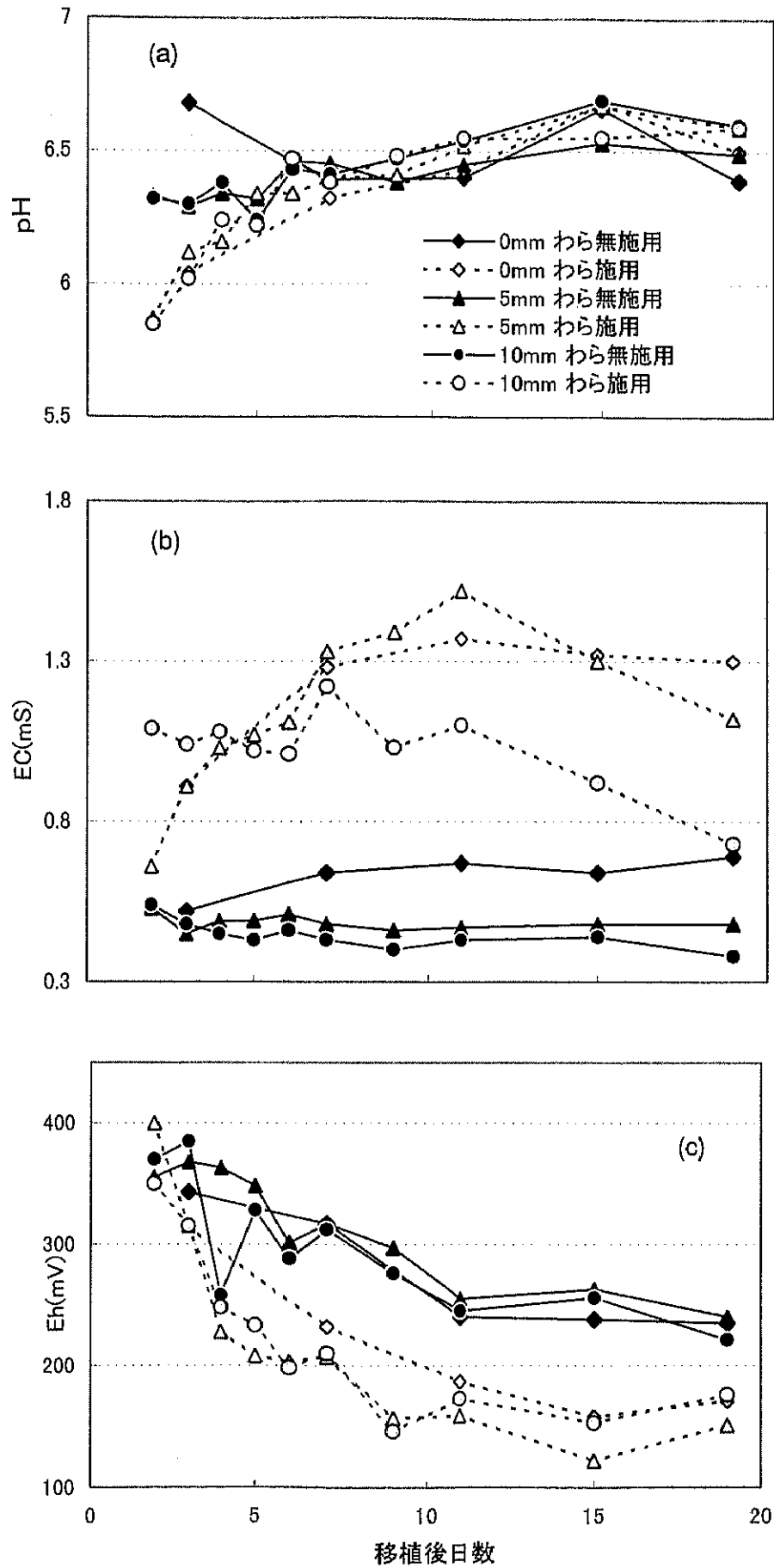


第5-2図 麦わら施用歴の有無と土壤のEhの変化

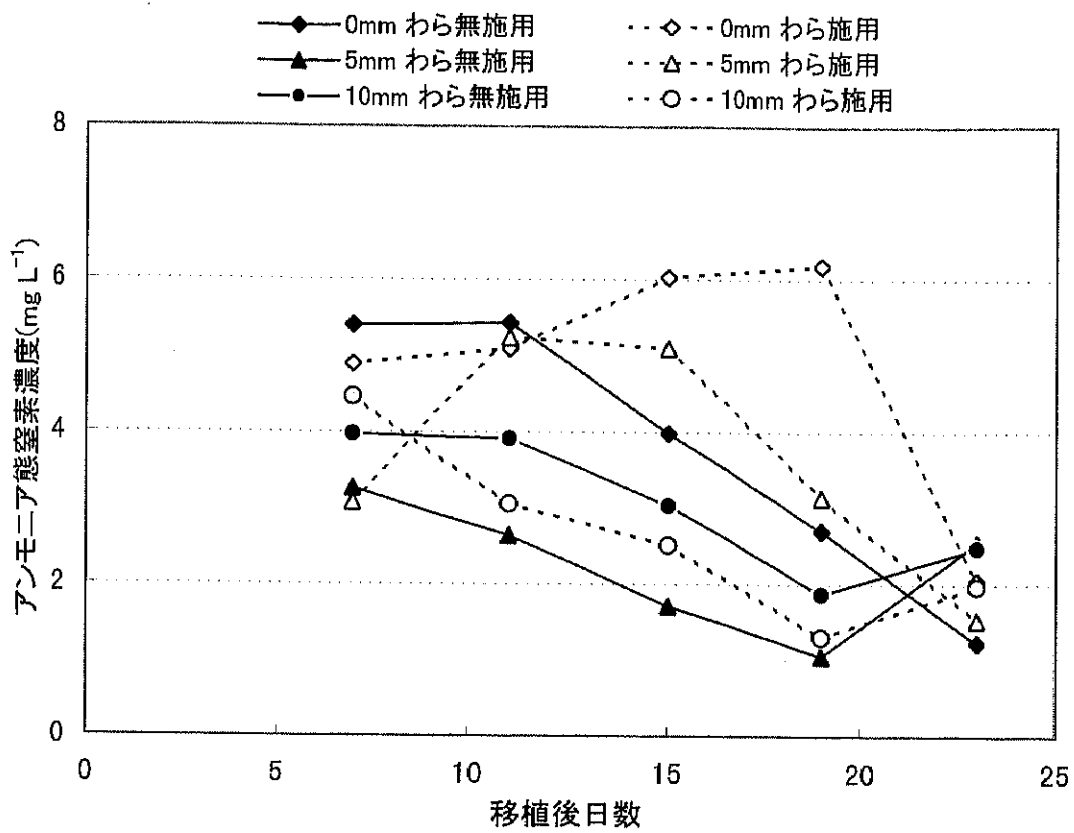
bは湛水直後の値を基準とした低下幅を示した



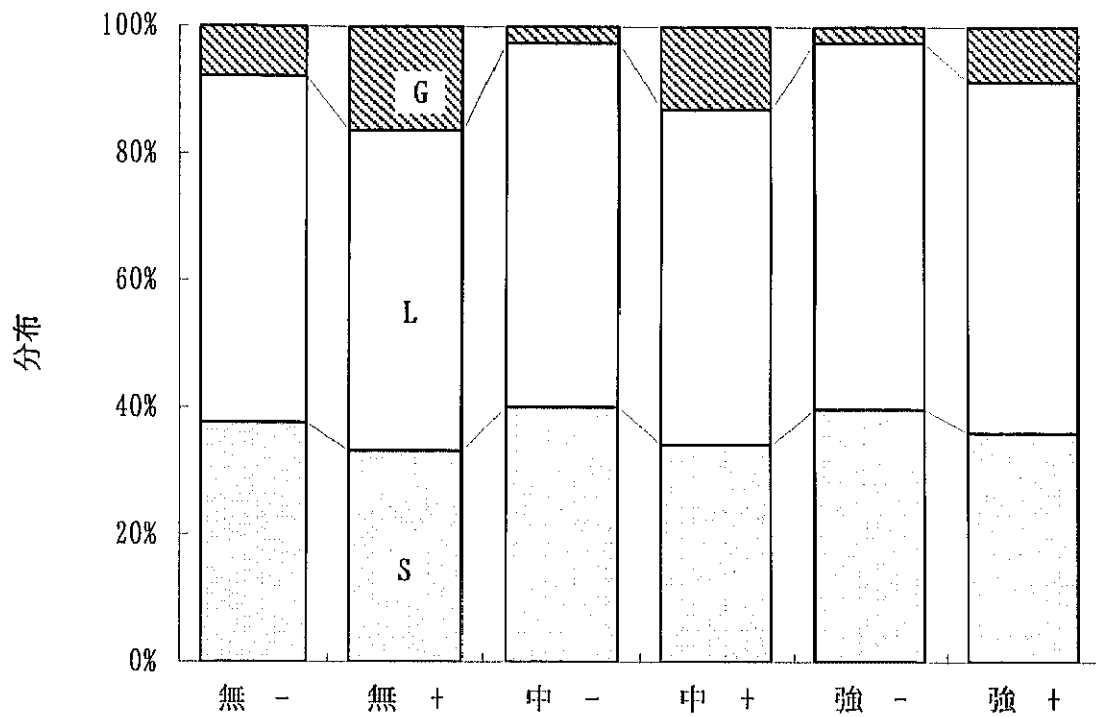
第5-3図 透水量による土壌流出液の芳香族カルボン酸濃度の変化



第5-4図 透水量の異なる土壤の流出液のpH(a), EC(b), Eh(c)の変化

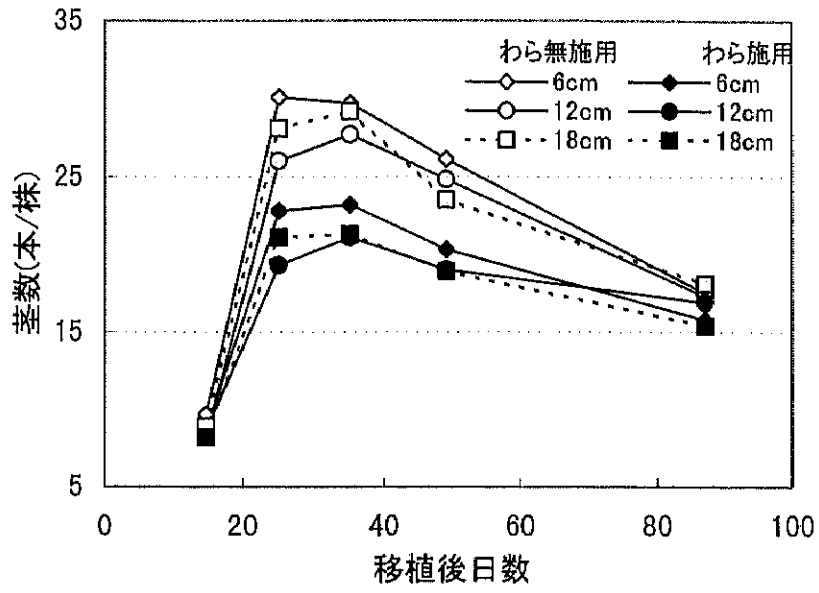


第5-5図 土壤流出液のアンモニア態窒素濃度 (mg L⁻¹)

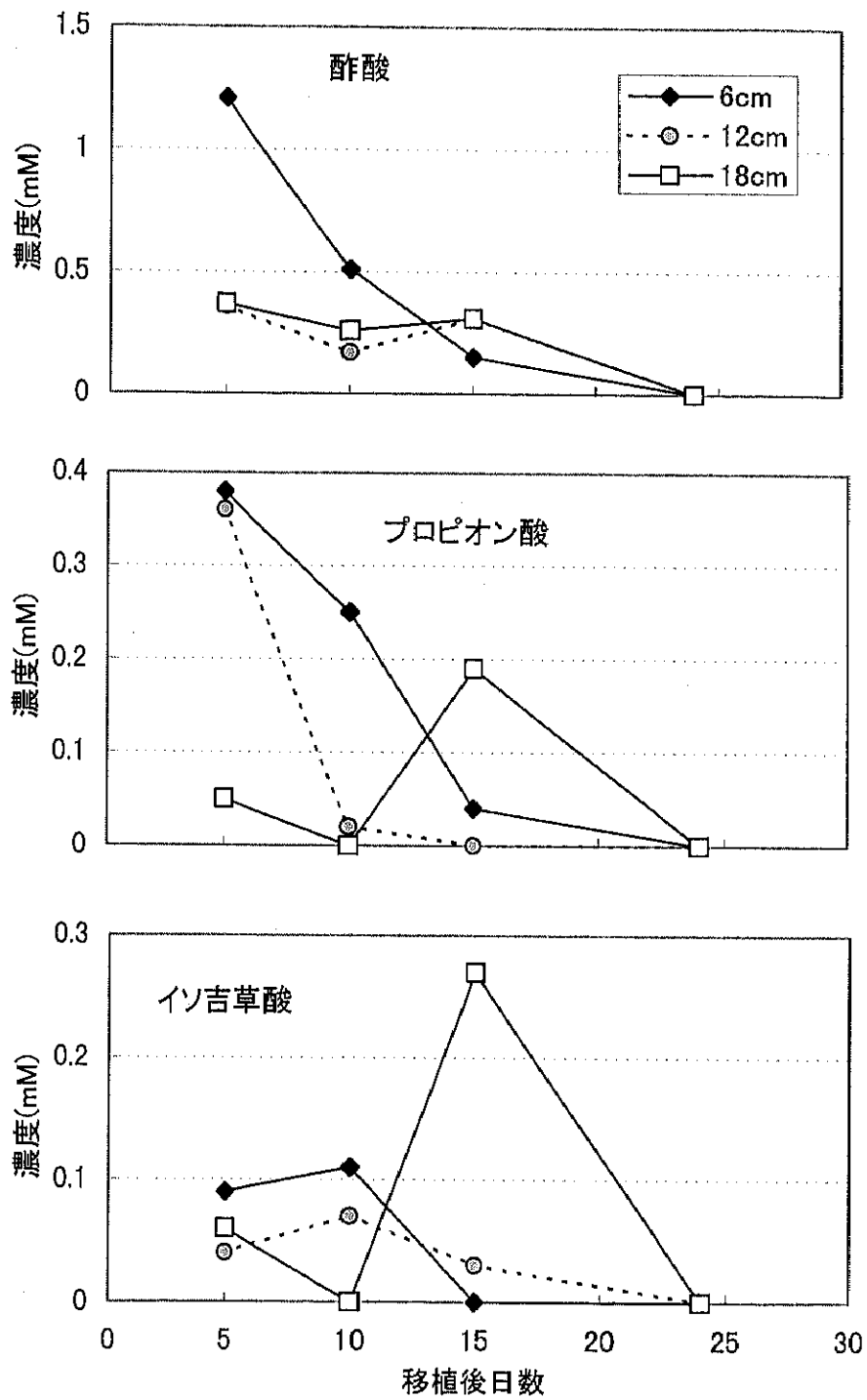


第5-6図 攪拌強度(無, 中, 強)と稲わら施用(+), 無施用(-)の三相分布への影響

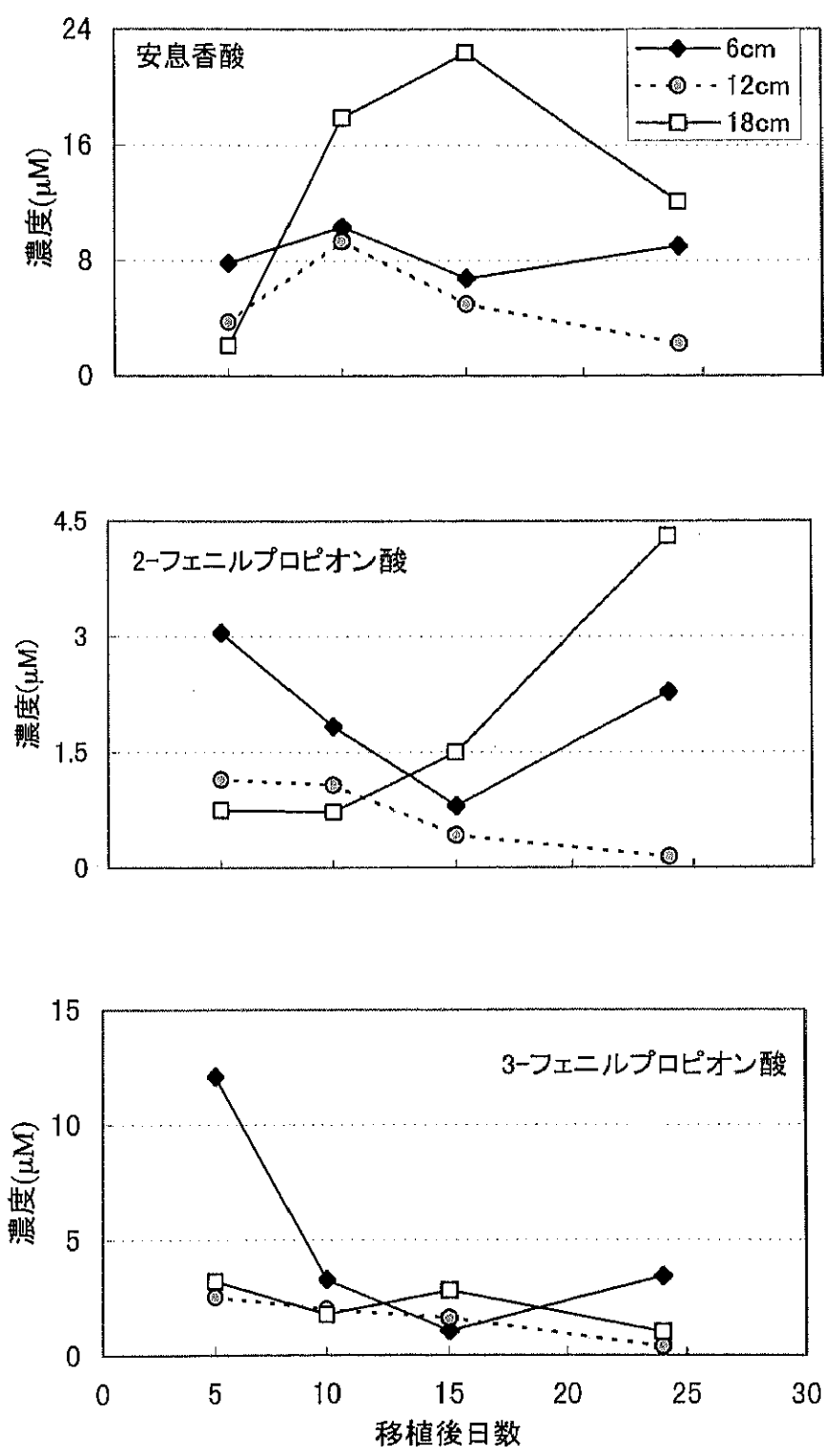
G: 気相 L: 液相 S: 固相



第5-7図 耕起深度と水稻茎数の推移



第5-8(a)図 耕起深度の異なる圃場における揮発性脂肪酸の推移



第5-8(b)図 耕起深度の異なる圃場における芳香族カルボン酸の推移