

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果 (第1報) 水稻の生育収量, 養分吸収および 土壌の化学性の変化

柴原 藤善・武久 邦彦・小松 茂雄・波部 恒昭*

Effects of Long-Term Application of Organic Matter and Soil Improvement Fertilizer on Paddy Rice I. Changes of Growth and Yield of Rice, Nutrients Uptake by Rice, and Chemical Properties of Soils

Fujiyoshi SHIBAHARA, Kunihiro TAKEHISA,
Shigeo KOMATSU, and Tsuneaki HABE *

キーワード: 水稻, 長期連用, 土づくり肥料, 土壌化学性, 有機物

Key Words: paddy rice, long-term application, soil improvement fertilizer, soil chemical property, organic matter.

水稻に対する有機物(稲わら, 稲わら堆肥)および土づくり肥料の長期連用が水稻の収量, 養分吸収および土壌の化学性に及ぼす影響を1975年から1997年にわたって検討した。調査ほ場に, 安土(農試本場, グライ土), 安曇川(湖西分場, 褐色低地土)および木之本(湖北分場, グライ土)を, 品種に日本晴をそれぞれ供試した。

全期間の無窒素区(有機物無施用, PK施用)における精玄米重の平均値は, 安土375, 安曇川301, 木之本326 kg/10aであった。また, 化学肥料単用区(有機物無施用)に対し, 有機物および土づくり肥料の秋施用・耕起の継続によって, 安土では1981年以降5~7%, 安曇川では1983年以降5~14%, 木之本では1992年以降5~15%の増収効果(平均値)がそれぞれ認められた。中雪地の木之本では, 1991年まで春施用(作付2か月前)しており, 増収効果が4%以下と低かった。

土壌中の有機態炭素および全窒素の含量は, 化学肥料単用区で徐々に低下したが, 稲わら全量還元区および稲わら堆肥1t/10a施用区では, 試験開始当初の水準を維持できた。リン酸質および珪酸質の土づくり肥料の連用によって, 土壌中の可給態リン酸および可給態珪酸の含量が増加し, 適正水準またはそれ以上に達した。

水稻の窒素, カリウムおよび珪酸の吸収量は, いずれも精玄米収量と高い正の相関を示した。1988年から1997年における有機物および土づくり肥料由来養分の水稻利用率は, 窒素16~29%, リン0~8%, カリウム8~28%, 珪酸18~39%と推定された。土壌の可給態リン酸が適正水準に達したほ場では, 稲作時のリン酸施肥が省略可能であった。

以上の結果, 秋期の稲わら全量還元あるいは稲わら堆肥施用および土づくり肥料の併用を数年以上継続すると, 水稻の生産安定と稲作時の施肥節減が可能と考えられた。

* 現在 滋賀県彦根県事務所農産課。
本報告の一部は, 日本土壌肥科学会関西支部講演会(1999年, 彦根市)で発表した。

1. 緒 言

水田では、古くから積極的に堆肥が施用され、地力の維持・増強に寄与してきた^{11, 23)}。しかし、1960年代以降、堆肥の施用量が減少し、化学肥料への依存度が高まるとともに、自脱型コンバインの普及によって稲わらが有機物の主体となり、珪カルの施用量が増加するなど、農業情勢の変化や機械化の進展に伴って有機物施用法や施肥法が大きく変化した²⁷⁾。このため、稲わらの施用法に関する連絡試験が各地で行われ、それをもとに施用基準が策定された¹⁶⁾。また、近年では、環境への負荷軽減の観点から、稲わら施用の多面的効果が期待されており、筆者らは、稲わらの秋鋤込みが水稻非作付期の硝酸態窒素の流出負荷軽減に有効なことを認めている¹⁹⁾。

一方、長期にわたる有機物および肥料の連用が作物の収量・養分吸収および土壌の諸性質に及ぼす影響を把握することは、土地生産力を維持・増強しつつ、環境への負荷軽減に寄与する土壌管理対策をたてるために不可欠である。とくに、稲わらの長期連用の影響を明らかにすることは、今日的に重要な課題であると考えられる^{20, 21)}。

以上のような背景から、農林水産省の土壌保全対策事業の一環として「土壌環境基礎調査・基準点調査」が1975年から実施され³⁵⁾、本県では、代表的な土壌群であるグライ土および褐色低地土を対象に、水稻に対する有機物（稲わらあるいは稲わら堆肥）および土づくり肥料（珪カル、熔リン等）の連用効果を検討して

いる。本報では、1997年までの成績の一部をとりまとめ、水稻の生育・収量、養分吸収および土壌の化学性の変化について報告する。

2. 材料および方法

2. 1 調査ほ場の土壌・気象条件

滋賀県農業試験場の本場（蒲生郡安土町大中、以下、安土と記す）、湖西分場（高島郡安曇川町田中、以下、安曇川と記す）および湖北分場（伊香郡木之本町千田、以下、木之本と記す）の3か所で試験を実施した。試験の開始時期は、安土1975年、安曇川1976年、木之本1977年で、本報では1997年までを調査対象とした。

各調査地の土壌断面図を図1に示す。安土は、琵琶湖東岸の大中の湖干拓地にある沖積土壌（湖成堆積）で、中粗粒グライ土（八幡統）に分類される。安曇川は、琵琶湖西岸の扇状地にある沖積土壌で、中粗粒褐色低地土（三河内統）に分類される。木之本は、琵琶湖北東岸の扇状地にある沖積土壌で、細粒グライ土（幡野統）に分類される。

また、気象条件については、1975年から1983年までの観測結果を平均値で示すと、年平均気温が安土14.0℃、安曇川13.8℃、木之本13.5℃、年間降水量が安土1680mm、安曇川1950mm、木之本2067mmであり、安曇川および木之本は裏日本気候を呈し、中雪地に属する。

試験開始時における土壌（作土層）の化学性を表1に示す。全炭素（T-C）1.8～2.3%，全窒素（T-N）0.18～0.21%，陽イオン交換容量（CEC）8～

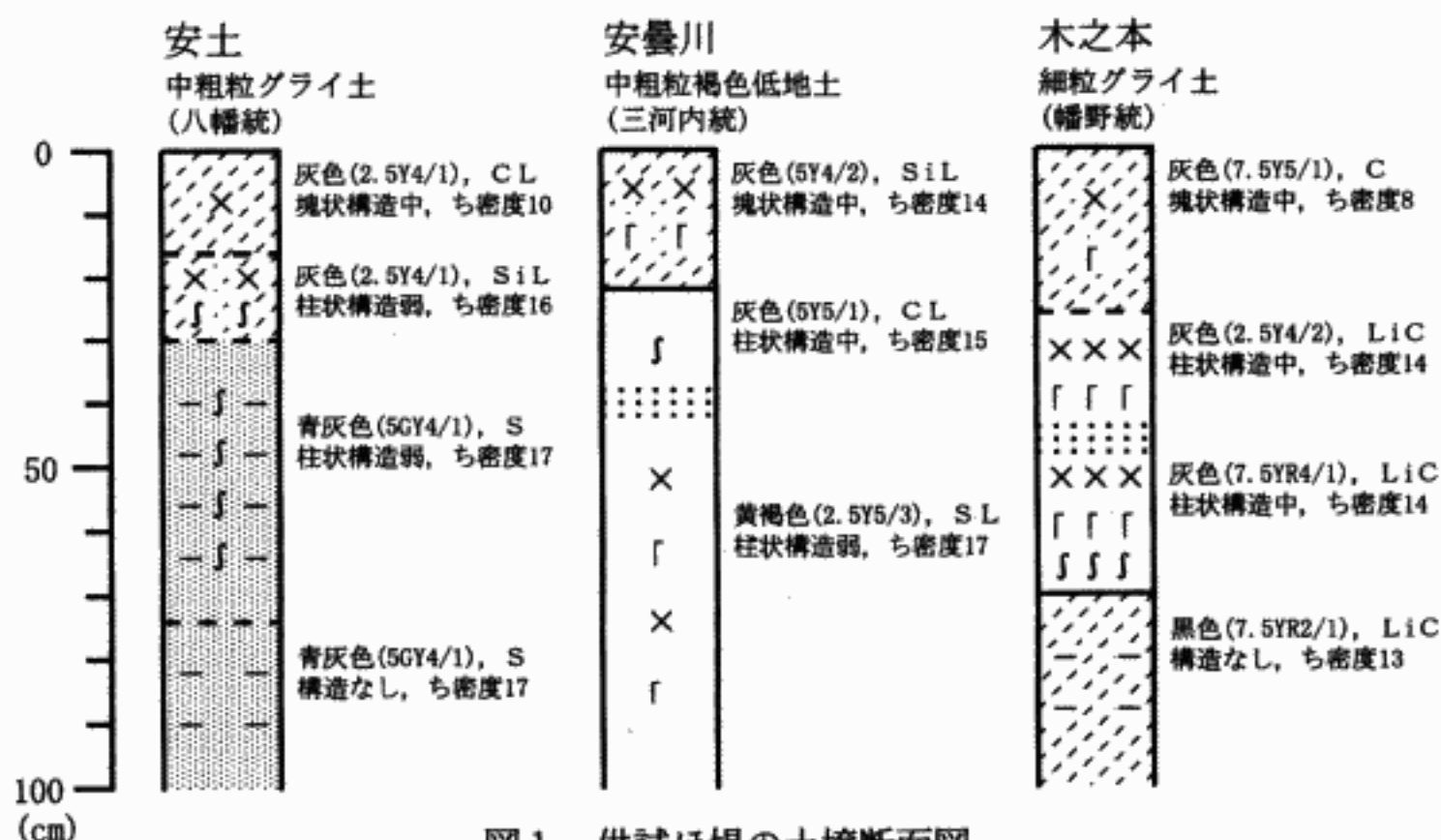


図1 供試ほ場の土壌断面図

16me/100g, 塩基飽和度49~74%の範囲にあり, 安土および木之本に比べて, 安曇川では土壌の有機物含量および保肥力が低く, 塩基の溶脱が進行していた。

また, 可給態珪酸含量も安曇川で低かった。可給態リン酸については, トルオーグ法の特徴として^{13, 29)}, グライ土の安土および木之本で低かった。

表1 試験開始時における作土層の土壌化学性(化学肥料単用区, 乾土100g当たり)

調査地	pH (H ₂ O)	T-C (%)	T-N (%)	可給態 P ₂ O ₅ (mg)	交換性塩基 (mg)			CEC (me)	塩基 飽和度 (%)	可給態 SiO ₂ (mg)	リン酸 吸収係数
					CaO	MgO	K ₂ O				
安土	6.0	2.11	0.185	7.8	270	42	20	16.4	74	22.5	776
安曇川	5.9	1.78	0.177	25.8	83	14	7	7.8	49	7.5	334
木之本	5.7	2.25	0.213	8.6	183	29	16	12.0	69	10.6	512

注) 可給態リン酸: トルオーグ法。可給態珪酸: pH4 酢酸緩衝液浸出法。

2. 2 試験区の概要

各調査地における試験区の概要を表2-1~3に, 供試稲わら堆肥の性質を表3にそれぞれ示す。まず, 各調査地の対照区として, 有機物および土づくり肥料を施用しない化学肥料単用区(肥料三要素, NPK)を設け, またその無窒素区(PK)も設けた。次に, 稲わら堆肥(以下, 堆肥と記す)の施用区あるいは稲わらの全量還元区(以下, わら還元と記す)を設け, 有機物の施用効果を検討した。さらに, 有機物施用と併せ, 珪カル, 熔リン, ミネカル, 肥鉄土などの土づくり肥料を施用する総合改善区を設け, 有機物と土づくり肥料の併用効果を検討した。なお, 有機物および土づくり肥料を施用して耕起する時期は, 安土および安曇川では11月とし, 木之本では1991年まで融雪後の3月としたもののそれ以降は11月とし, 秋鋤込みの効果も検討した。いずれの場合も, 稲わらはコンバイン収穫時に予め細断・散布し(わら還元区でのわらの収量および組成は表7に示す。わらを還元しない区では, 全量持ち出し), 堆肥および土づくり肥料は施用後直ちにロータリで耕耘し, 平畝とした。

安土では, 堆肥(約1年間堆積した中熟堆肥)の1t/10a施用と2t/10a施用とを比較し, いずれも

珪カルを150kg/10a施用した。また, 総合改善区では, わら還元珪カル(150kg/10a)および熔リン(40kg/10a)を併用した。

安曇川では, 冬キャベツおよび秋冬ダイコンの野菜指定産地でもあり, 1982年までの7年間は水稻・野菜(キャベツまたはダイコン)の二毛作としたが, それ以降は水稻単作とした。これに伴って処理内容も一部変更したが, 総合改善1区ではわら還元と堆肥1t/10a(約1年間堆積した中熟堆肥, 1985年から珪カル150kg/10a併用), 総合改善2区では堆肥1t/10aと珪カル150kg/10aの併用, 総合改善3区では堆肥1t/10aと珪カル(150kg/10a)・熔リン(40kg/10a)の併用, 総合改善4区ではわら還元と珪カル・熔リンの併用をそれぞれ検討した。

木之本では, 堆肥の1t/10a施用と2t/10a施用とを比較した。また, 総合改善1区ではわら還元と珪カルの併用, 総合改善2区ではわら還元と珪カル・熔リンなどの併用, 総合改善3区ではわら還元とミネカルの併用をそれぞれ行った。なお, 1991年までは有機物の分解促進を図るために炭カルを適宜併用した。そして, 1992年以降は中熟堆肥(約1年間堆積)あるいは稲わらを11月に施用・耕起した。

表2-1 安土における試験区の構成(1975~97年)

No	試験区	処理内容(施用量: kg/10a)
1.	無窒素	PK
2.	化学肥料単用	NPK
3.	堆肥1t	NPK, 稲わら堆肥1000, ケイカル150(1985~)
4.	堆肥2t	NPK, 稲わら堆肥2000, ケイカル150(1985~)
5.	稲わら全量還元	NPK, 稲わら全量還元
6.	総合改善	NPK, 稲わら全量還元, ケイカル150, 熔リン40

注: 1) 土壌条件: 中粗粒グライ土(八幡統)。調査規模: 1区0.5a, 2連制。ただし, 総合改善区は1a。供試品種: 日本晴。

2) NPK: 肥料三要素。有機物および土づくり肥料を前年秋(11月)に施用して耕起。

稲わら堆肥は, 1年間堆積したものを供試した。

3) 土づくり肥料の保証成分。ケイカル: SiO₂ 27%, アルカリ分45%。熔リン: SiO₂ 20%, P₂O₅ 20%, アルカリ分45%。

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表2-2a 安曇川における試験区の構成(二毛作期間:1976~82年)

No. 試験区	処 理 内 容 (施用量: kg/10a)	
	水 稻 作 付 前	野 菜 作 付 前
1. 無窒素	P K	P K
2. 化学肥料単用	N P K	N P K
3. 稲わら全量還元	N P K	N P K, 稲わら全量還元, 苦土石灰120
4. 総合改善(1)	N P K, 稲わら堆肥1000	N P K, 稲わら全量還元, 苦土石灰120
5. 総合改善(2)	N P K, 稲わら堆肥1000	N P K, 稲わら堆肥2000, 苦土石灰120
6. 総合改善(3)	N P K, 稲わら堆肥1000, 妙高肥鉄土225, ケイカル150, 熔リン40	N P K, 稲わら堆肥2000, 苦土石灰120
7. 総合改善(4)	N P K, 前作残さ(キャベツ, ダイコン), 妙高肥鉄土225, ケイカル150, 熔リン40	N P K, 稲わら全量還元, 苦土石灰120

注: 1) 土壌条件: 中粗粒褐色低地土(三河内統). 調査規模: 1区0.5a, 2連制. 供試作物(品種): 水稻(1976~82, びわひかり), キャベツ(1976~79), ダイコン(1980~82). N P K: 肥料三要素.
 2) 総合改善(1), (2), (3)区の1976年については, 水稻作付前の稲わら堆肥に替え, 稲わらを700kg/10a施用.
 3) 主な土づくり肥料の保証成分は, 表2-1に同じ. 妙高肥鉄土: SiO₂ 26%.

表2-2b 安曇川における試験区の構成(水稻単作期間:1983~97年)

No. 試験区	処理内容(施用量: kg/10a)
1. 無窒素	P K
2. 化学肥料単用	N P K
3. 稲わら全量還元	N P K, 稲わら全量還元
4. 総合改善(1)	N P K, 稲わら堆肥1000, 稲わら全量還元, ケイカル150(1985~)
5. 総合改善(2)	N P K, 稲わら堆肥1000, ケイカル150(1983~)
6. 総合改善(3)	N P K(1994~: N K), 稲わら堆肥1000(1994~97: 稲わら全量還元), ケイカル150(1994~97: ミネカル200), 熔リン40
7. 総合改善(4)	N P K, 稲わら全量還元, ケイカル150, 熔リン40

注: 1) 土壌条件および調査規模は表2-2aに同じ. 供試品種: 日本晴.
 2) N P K: 肥料三要素. 有機物および土づくり肥料を前年秋(11月)に施用して耕起. 稲わら堆肥は, 1年間堆積したものを供試した.
 3) 主な土づくり肥料の保証成分は, 表2-1に同じ. ミネカル: SiO₂ 13%, アルカリ分40%.

表2-3 木之本調査地における試験区の構成(1977~97年)

No. 試験区	処理内容(施用量: kg/10a)
1. 無窒素	P K, 炭カル100(1983~85)
2. 化学肥料単用	N P K, 炭カル100(1983~85)
3. 堆肥1t	N P K, 稲わら堆肥1000, 炭カル100(1983~91)
4. 堆肥2t	N P K, 稲わら堆肥2000, 炭カル100(1983~91)
5. 稲わら全量還元	N P K, 稲わら全量還元, 炭カル100(1983~91)
6. 総合改善(1)	N P K, 稲わら全量還元, ケイカル(150:1977~82, 100:1983~97) 炭カル134(1977~82)
7. 総合改善(2)	N P K(1994~: N K), 稲わら全量還元, ケイカル78・ミネカル100・炭カル128(1977~82) ケイカル100・熔リン40(1983~85) ケイカル100・熔リン40・肥鉄土300(1986~97)
8. 総合改善(3)	N P K, 稲わら全量還元, ミネカル(300:1977~82, 200:1983~87)

注: 1) 土壌条件: 細粒グライ土(幡野統). 調査規模: 1区0.5a, 2連制. 供試品種: 日本晴.
 2) N P K: 肥料三要素. 1991年度までは有機物および土づくり肥料を春(3月)に施用して耕起したが, 1992年度からは, 前年秋(11月)に変更した. これに伴い, 稲わら堆肥の堆積期間をそれまでの半年程度から1年間に延長した.
 3) 主な土づくり肥料の保証成分は, 表2-1, 2a, 2bに同じ.

表3 供試稲わら堆肥の組成(%)

調査地	水分	C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
安 土	78.2±5.4	28.4±5.6	1.41±0.20	20.1±3.7	0.21±0.03	1.56±0.31	0.56±0.05	0.15±0.07	31.6±2.8
安 曇 川	77.9±6.0	30.5±3.0	1.81±0.46	18.1±5.9	0.27±0.07	2.53±0.96	1.34±1.01	0.21±0.06	29.6±3.9
木之本①	81.3±3.6	38.0±4.9	0.98±0.28	41.6±14.4	0.13±0.02	1.13±0.32	0.44±0.06	0.12±0.02	—
木之本②	79.6±3.0	32.6±4.6	1.56±0.27	21.6±5.6	0.21±0.07	2.04±1.10	0.65±0.12	0.16±0.04	31.3±5.3

注: 1) 水分以外の数値は全て乾物当りの成分含有率. 1989~97年に供試した堆肥(n=8, SiO₂のみn=3)の平均値±標準偏差を示す.
 2) 木之本については, 1991年までは前年秋に収穫した稲わらを3月まで堆積した堆肥を供試したが, 1992年からは1年間堆積した堆肥を前年秋に施用したため, 1989~91年の施用分(n=3)を①に, 1992~97年の施用分(n=5)を②にそれぞれ示す.

2. 3 耕種概要

いずれの調査地も中生品種の日本晴を供試したが、安曇川の二毛作期間中は早生品種のびわひかりとした。安土では稚苗を5月上旬、安曇川では稚苗を5月上旬、木之本では中苗を5月中旬にそれぞれ機械移植した。

各調査地の水稻に対する施肥量を表4-1～3に示す。各試験区における三要素施肥量は、無窒素区を除いて同一とした。無窒素区では、リン酸、加里の施肥量を同一とした。

施肥体系および施肥量が年次によって異なるが、大まかに分類すると、1980年頃までは基肥重点施肥法で

実施したが、その後、基肥減量・追肥重点施肥法に移行し、1988年以降は施肥量を統一した。ただし、安土では、窒素肥沃度が比較的高く、生育が過繁茂になりやすいため、1994年以降は減肥した。また、後述するように、総合改善区において、熔リンを連用した試験区では可給態リン酸含量の明らかな増加が認められたため、1994年以降は稲作期間中のリン酸を無施肥とする試験区を併設（安土）あるいは施肥設計を変更（安曇川、木之本）し、土壌蓄積リン酸の有効利用法を検討した。

表4-1 安土における施肥量 (kg/10a)

年度	N					P ₂ O ₅ 計	K ₂ O 計
	基肥	追肥	穂肥	実肥	計		
1975	4.2	2.0	2.1	—	8.3	4.2	8.3
1976	4.0	2.0	2.0	—	8.0	7.0	8.0
1977～79	6.0	2.0	2.0	2.0	12.0	6.0	13.5
1980	6.0	2.0	—	2.5	10.5	6.0	10.9
1981～82	3.0	2.0	2.5	1.5	9.0	5.0	12.5
1983	3.0	2.0	2.0	2.5	9.5	6.0	10.5
1984	3.0	2.0	2.0	2.0	9.0	6.0	10.0
1985	3.0	—	4.5	3.0	10.5	6.0	10.0
1986	3.0	3.0	4.0	—	10.0	6.0	9.0
1987～93	3.0	3.0	4.0	—	10.0	6.0	11.0
1994～97	3.0	1.5	4.0	—	8.5	4.5	9.5

注) 無窒素区を除く各区の三要素施肥量は共通。ただし、総合改善区については、1994年以降、リン酸を施用しない区を併設した。

表4-2 安曇川における施肥量 (kg/10a)

年度	N					P ₂ O ₅ 計	K ₂ O 計
	基肥	追肥	穂肥	実肥	計		
1976～77	5.6	2.0	3.0	2.0	12.6	7.4	10.3
1978	5.6	2.0	3.0	—	10.6	7.4	10.3
1979～81	5.6	2.0	3.0	2.0	12.6	7.0	12.5
1982	5.6	2.0	2.0	2.0	11.6	7.0	12.5
1983	5.0	2.0	3.0	—	10.0	7.0	10.8
1984	4.0	3.0	—	3.0	10.0	7.0	10.0
1985	3.0	1.2	1.7	3.0	8.9	7.0	10.0
1986	4.0	3.0	0.8	3.0	10.8	7.0	10.9
1987	4.0	3.0	3.0	—	10.0	7.0	10.0
1988～97	4.0	3.0	3.0	—	10.0	4.0	11.5

注) 無窒素区を除く各区の三要素施肥量は共通。ただし、総合改善3区については、1994年以降はリン酸を無施用とした。

表4-3 木之本における施肥量 (kg/10a)

年度	N					P ₂ O ₅ 計	K ₂ O 計
	基肥	追肥	穂肥	実肥	計		
1977～79	6.0	2.0	2.0	2.0	12.0	6.0	13.5
1980～82	6.0	2.0	3.0	1.5	12.5	6.0	12.3
1983	3.0	2.0	3.0	4.0	12.0	5.0	12.5
1984	4.0	2.0	1.0	4.0	11.0	6.0	9.0
1985	4.0	2.0	3.0	2.0	11.0	6.0	9.0
1986	4.0	2.0	3.0	2.0	11.0	10.8	15.9
1987	4.0	2.0	3.0	—	9.0	9.2	12.7
1988～97	4.0	2.0	3.0	—	9.0	6.0	9.8

注) 無窒素区を除く各区の三要素施肥量は共通。ただし、総合改善2区については、1994年以降はリン酸を無施用とした。

2. 4 調査方法および分析法

水稻の成熟期の生育・収量調査および稲体の成分分析を2連で行い、平均値で示した。また土壌は、水稻の収穫後に作土層を数か所採取し、風乾・砕土・篩別(2mm)し、分析に供した。土壌、作物体および有機物の分析は、「土壌環境基礎調査における土壌、水質及び作物体分析法」¹⁸⁾に従い、可給態リン酸はトルオーグ法、可給態珪酸はpH 4酢酸緩衝液浸出法によった。なお、可給態窒素については、施肥・代かき直前に作土層を採取し、密栓・湛水培養法(湿潤土を30℃で4週間)によってアンモニア化成量を分析した。

有機物および土づくり肥料の連用が水稻の生育・収量、養分吸収および土壌の化学性に及ぼす影響を統計解析するために、一対の標本による平均値の差を検定(t検定)した。すなわち、同一年次のデータを一対のものとして取り扱い、複数年次の平均値について、化学肥料単用区、あるいはわら還元区に対する有意差を検定した。なお、化学肥料単用区あるいはわら還元区との差の平均値がマイナスの場合には、負の効果として取り扱い、それぞれ図表に示した。

3. 結果および考察

3. 1 水稻の生育・収量の変化

各調査地における水稻の成熟期の生育・収量の平均値を表5-1~3に示す。なお、安土では施肥法の影響、安曇川では二毛作の影響、木之本では有機物施用時期の影響を考慮する必要があるため、それぞれ試験期間を区分し、有機物および土づくり肥料の連用効果を解析した。

また、精玄米収量の経年変化については、無窒素区の推移を図2-1に、代表的な試験区として化学肥料単用区、堆肥2t区(安曇川では総合改善1区)、わら還元区、総合改善区(安曇川では総合改善4区、木之本では総合改善2区)の推移を図2-2にそれぞれ示す。

そこで、まず、無窒素区における収量の推移をみると、いずれの調査地も年次変動が大きく、経年変化に一定の傾向は認められなかった。また、全期間の無窒素における平均収量は、安土375、安曇川301、木之本326kg/10aとなり、試験後期における3か年移動平均値と近似した。したがって、無窒素区で栽培を続けても一定の収量水準が20年以上にわたって維持されており、旧・滋賀農試(灰色低地土)における長期連用

試験¹⁹⁾と同様の傾向が認められた。

次に、有機物および土づくり肥料の連用による水稻収量の経年変化を化学肥料単用区と比較した。安土では、1980年まで年次変動が大きく、有機物および土づくり肥料の施用による増収効果は認められなかった。しかし、1981年以降は、施肥効率の高い追肥重点施肥法に移行したこともあり、生育・収量の年次変動が少なく、化学肥料単用区(平均578kg/10a)と比較して、有機物および土づくり肥料の連用によって5~7%増収した(1%水準で有意)。堆肥2t区の平均収量が最も高く、増収要因としては穂数の増加が認められたが、1穂粒数および登熟歩合を調査しておらず、千粒重がやや低下した。また、わら還元区では、千粒重が最も低くなったが、稲わらに珪カル・熔リンを併用した総合改善区では千粒重の低下を抑制する効果が認められた(いずれも1%水準で有意)。なお、総合改善区と堆肥1t区との間には、収量に有意な差はなかった。

安曇川では、1982年までの二毛作期間中、化学肥料単用区の収量の年次変動が大きく、有機物および土づくり肥料の連用による増収効果は、総合改善3区で9%認められたものの(5%水準で有意)、その他の区では判然としなかった。総合改善3区では、堆肥に珪カル、熔リン、肥鉄土を併用し、また野菜作にも堆肥を施用しており、より総合的な改善策が増収に結びついたと考えられる。

そして、1983年以降の水稻単作期間中は、化学肥料単用区(平均505kg/10a)と比較して、わら還元区および総合改善区の全区で5~14%の増収効果が認められた(1%水準で有意)。増収要因として、千粒重がやや低下しているが、穂数の増加が認められた。また、総合改善4区では、わら還元区に比べて7%増収しており、稲わらと土づくり肥料の併用効果も認められた(1%水準で有意)。

木之本では、3月に有機物施用・耕起した期間中(1977~1991年)、有機物および土づくり肥料の連用による増収効果は判然とせず、総合改善3区で4%増収した程度であった(5%水準で有意)。そこで、1992年以降、有機物の施用・耕起時期を11月に早め、また堆肥の堆積期間を1年に延長した結果、化学肥料単用区(平均517kg/10a)と比較して、堆肥施用区で5~9%の増収効果(5%水準で有意)、わら還元区および総合改善区(1, 2, 3)で14~15%の増収効果

(1%水準で有意)がそれぞれ認められた。なお、増収要因としては、穂数の明らかな増加は認められず、

籾/わら比が向上したことから、籾の生産効率が向上していると推察される。

表5-1a 安土における水稻の生育・収量(追肥重点施肥法に変更前、1975~80年の平均値)

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比
1. 無窒素	70.2	17.7	393	662	500	367±63	66
2. 化学肥料単用	81.2	19.1	488	865	689	555±78	(100)
3. 堆肥1t	82.0	18.9	482	875	691	557±80	100
4. 堆肥2t	84.7 ^a	19.5	516	905 ^a	701	559±96	101
5. 稲わら全量還元	82.5	18.9	491	871	692	549±94	99
6. 総合改善	83.2	19.0	474	870	683	546±85	98

注) 精玄米重: 平均値±標準偏差。ただし、無窒素区は、1975年の欠測値を除く。凡例は表5-1bに示す。

表5-1b 安土における水稻の生育・収量(追肥重点施肥法に変更後、1981~97年の平均値)

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比	千粒重 g
1. 無窒素	67.1	17.6	323	602	462	377±36	65	21.8
2. 化学肥料単用	79.7	19.4	426	802	704	578±51	(100)	21.9
3. 堆肥1t	83.3 ^{aa}	19.5	439 ^a	845 ^{aa}	746 ^{aa}	610±46 ^{aa}	105	21.9
4. 堆肥2t	85.7 ^{aa}	19.6	453 ^{aa}	890 ^{aa}	755 ^{aa}	616±39 ^{aa}	107	21.5 ^{-aa}
5. 稲わら全量還元	86.6 ^{aa}	19.8 ^a	464 ^{aa}	861 ^{aa}	746 ^{aa}	605±43 ^{aa}	105	21.3 ^{-aa}
6. 総合改善	85.5 ^{aa, b}	19.9 ^a	448 ^a	860 ^{aa}	746 ^{aa}	605±47 ^{aa}	105	21.6 ^{-a, bb}

注: 1) 精玄米重: 平均値±標準偏差。

2) a, aaは、5%水準、1%水準でそれぞれ化学肥料単用区に対して有意差があることを示す。マイナス記号は負の効果を示す。無窒素区を除く試験区について、化学肥料単用区との平均値の差を検定した。

3) b, bbは、5%水準、1%水準でそれぞれ稲わら全量還元区に対して有意差があることを示す。総合改善区について、稲わら全量還元区との平均値の差を検定した。ただし、安曇川の総合改善2区については、堆肥を併用しており、対象から除外した。

表5-2a 安曇川における水稻の生育・収量(水稻と野菜の二毛作期間、1976~82年の平均値)

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比
1. 無窒素	58.6	16.4	314	422	401	323±52	65
2. 化学肥料単用	70.3	18.1	446	556	623	495±96	(100)
3. 稲わら全量還元	73.7	18.3	450	598 ^a	652	519±57	105
4. 総合改善(1)	75.0 ^a	18.4	451	588	638	511±74	103
5. 総合改善(2)	74.4	18.5	472	601	649	517±61	105
6. 総合改善(3)	76.0 ^{aa}	18.5	465	611 ^a	677 ^a	538±66 ^a	109
7. 総合改善(4)	76.7	18.3	510 ^a	637 ^a	665	528±60	107

注) 精玄米重: 平均値±標準偏差。凡例は表5-1bに示す。

表5-2b 安曇川における水稻の生育・収量(水稻単作期間、1983~97年の平均値)

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比	千粒重 g
1. 無窒素	60.2	17.1	290	451	359	290±35	57	21.9
2. 化学肥料単用	71.2	18.8	408	657	618	505±55	(100)	22.3
3. 稲わら全量還元	73.9 ^{aa}	18.8	430 ^a	704 ^{aa}	645 ^{aa}	528±56 ^{aa}	105	22.0 ^{-aa}
4. 総合改善(1)	78.2 ^{aa, bb}	19.0	450 ^{aa, b}	758 ^{aa, bb}	680 ^{aa, bb}	552±56 ^{aa, bb}	109	21.9 ^{-aa}
5. 総合改善(2)	77.9 ^{aa}	19.1	432 ^a	762 ^{aa}	697 ^{aa}	566±59 ^{aa}	112	21.9 ^{-aa}
6. 総合改善(3)	78.0 ^{aa, bb}	19.3 ^{aa, b}	434 ^{aa}	745 ^{aa, b}	708 ^{aa, bb}	574±55 ^{aa, bb}	114	22.0 ^{-aa}
7. 総合改善(4)	77.8 ^{aa, bb}	19.1	424	748 ^{aa, bb}	694 ^{aa, bb}	564±57 ^{aa, bb}	112	21.9 ^{-aa}

注) 精玄米重: 平均値±標準偏差。凡例は表5-1bに示す。

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表5-3a 木之本における水稻の生育・収量（3月に有機物施用・耕起、1977～91年の平均値）

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比	千粒重 g
1. 無窒素	61.0	16.6	322	505	394	317±39	59	21.7
2. 化学肥料単用	74.7	18.6	444	725	654	534±61	(100)	21.9
3. 堆肥1t	75.7	18.6	442	733	653	534±59	100	22.0
4. 堆肥2t	75.1	18.5	433	723	660	530±63	99	21.9
5. 稲わら全量還元	75.1	18.8	435	744	670	544±69	102	22.0
6. 総合改善(1)	76.2 ^b	18.7	427	759 ^a	675 ^a	549±49	103	22.0
7. 総合改善(2)	77.5 ^{a,bb}	18.6	435	754	674	547±62	103	21.9
8. 総合改善(3)	77.9 ^{a,bb}	18.7	441	765 ^a	686 ^{a*}	556±59 ^{a*}	104	21.8

注) 精玄米重：平均値±標準偏差。ただし、無窒素区は、1987年の欠測値を除く。粒重は1980～91年の平均値。凡例は表5-1bに示す。

表5-3b 木之本における水稻の生育・収量（11月に有機物施用・耕起、1992～97年の平均値）

No 試験区	稈 長 cm	穂 長 cm	m ² 当り 穂 数 本	わら重 kg/10a	籾 重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	収量比	千粒重 g
1. 無窒素	60.3	17.2	288	448	387	314±30	61	22.3
2. 化学肥料単用	69.7	18.5	407	671	626	517±30	(100)	22.6
3. 堆肥1t	73.1 ^{**}	18.7	430	714	658 [*]	542±31 [*]	105	22.4
4. 堆肥2t	76.1 ^{**}	18.9	452	737 [*]	685 [*]	564±43 [*]	109	22.3
5. 稲わら全量還元	75.8 ^{**}	18.9	413	727 ^{**}	715 ^{**}	588±49 ^{**}	114	22.3 ^{-*}
6. 総合改善(1)	76.5 ^{**}	19.2 [*]	432	745 ^{**}	716 ^{**}	588±50 ^{**}	114	22.5 ^b
7. 総合改善(2)	77.8 ^{**}	19.0	437	753 ^{**}	729 ^{**}	596±42 ^{**}	115	22.3 ^{-*}
8. 総合改善(3)	78.7 ^{**a,b}	19.3 ^{a,b}	432	743 ^{**}	724 ^{**}	594±44 ^{**}	115	22.1 ^{-**}

注) 精玄米重：平均値±標準偏差。凡例は表5-1bに示す。

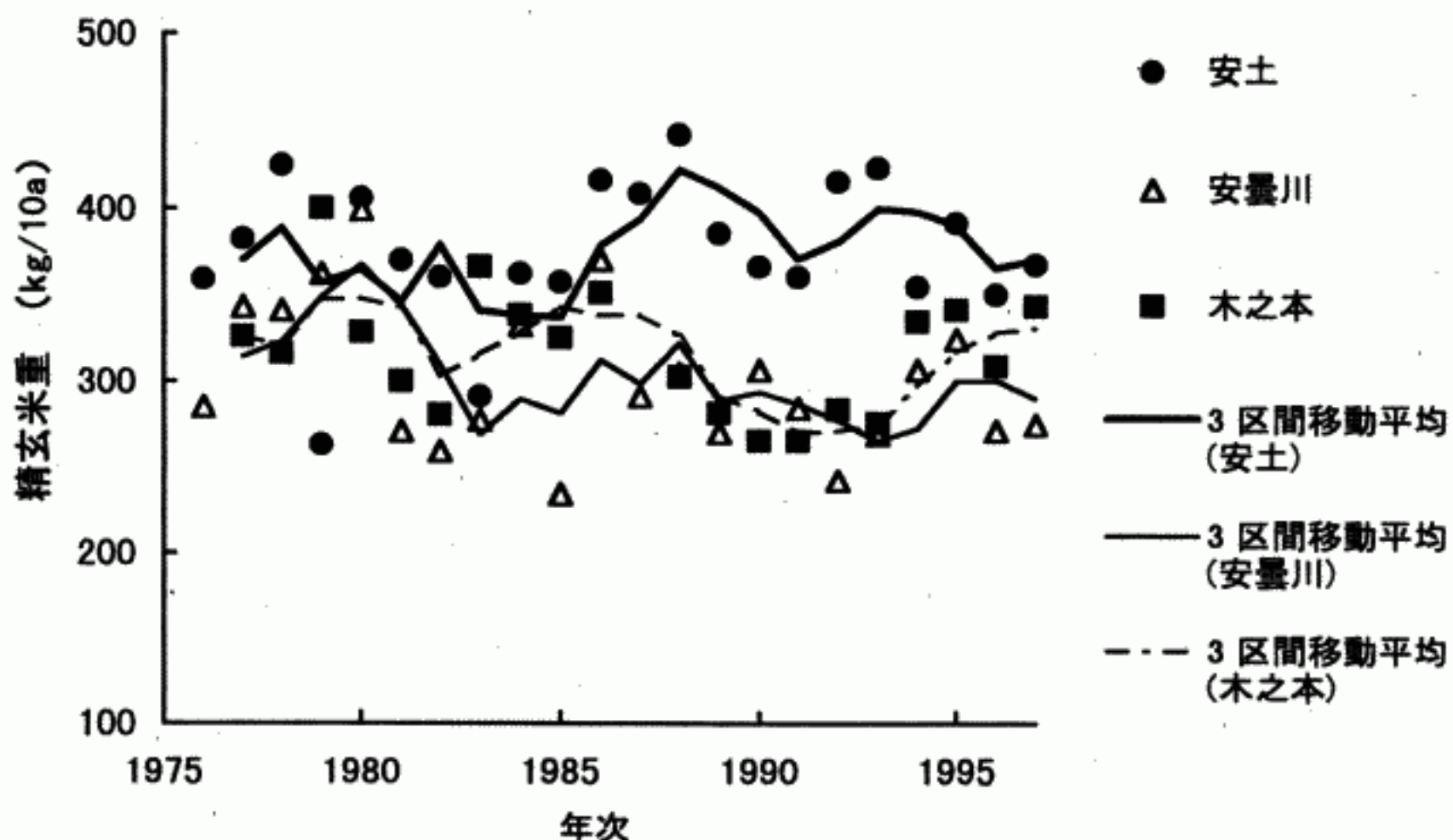


図2-1 各調査地の無窒素区における水稻収量の推移（1975～97年）

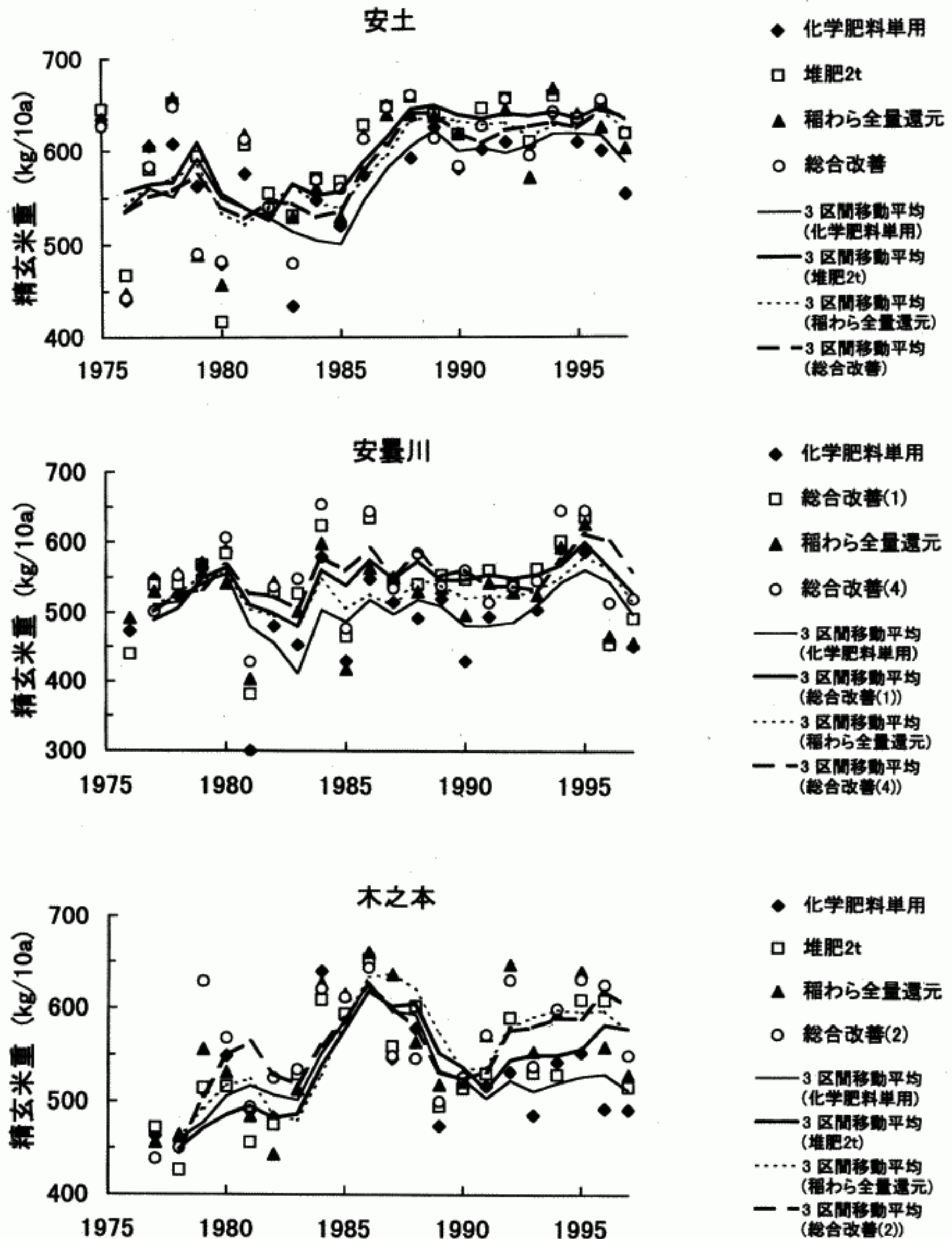


図2-2 各調査地における水稻収量の推移(1975~97年)

注) 化学肥料単用区、堆肥施用区、稲わら全量還元区および総合改善区(一部)を図示。

ところで、試験期間中の気象条件と水稻作柄の特徴をみると、本県の水稲作況指数が97以下になったのは、1976年の96(登熟期の低温寡照、台風の影響)、1980年の95(出穂期から登熟期の低温寡照多雨、いも

ち病多発)、1982年の97(1980年と同様)、1993年の89(梅雨時期から登熟期の低温寡照多雨、いもち病多発)、1997年の95(早生品種の出穂期に台風の影響)である。一方、作況指数が103以上になったのは、1977年の104、

1978年の104, 1984年の104, 1986年の103, 1994年の106で, いずれも登熟期の高温・多照によって作柄が良くなった。

そこで, 作柄の良好年(作況指数103以上)および不良年(作況指数97以下)における精玄米収量を表6にとりまとめた。いずれも, 試験を開始して数年以内の年次が多いため, 必ずしも連用効果を反映したものではないが, 処理内容に変更のなかった安土では, わら還元による増収効果が作柄良好年に認められた。一方, 安曇川および木之本では, 稲わらと土づくり肥料の併用効果が作柄不良年に高かった(いずれも5%水準で有意)。堆肥の連用効果については, 1 t/10 a施用によって作柄不良年でも収量が安定し, 旧・滋賀農試における長期連用試験¹⁾と同様の傾向が認められたが, 未熟堆肥を春に1 t/10 a施用した年次の多かった木之本では作柄良好年に有意に減収した。

例えば, 1993年の凶作年は, いもち病抵抗性の弱いコシヒカリなどを中心に作柄が著しく低下した年であ

るが, 日本晴についても安曇川, 木之本では登熟の遅延が目立った¹⁰⁾。安土では, 堆肥2 t区, わら還元区および総合改善区で稈長が90 cmを上回り, 倒伏程度が大きくなったため, 化学肥料単用区と同程度の収量か, または減収した。これは, 無窒素区の収量が423 kg/10 aと高く, また窒素施肥量(10 kg N/10 a)が当調査地では上限値に近く, 低温・寡照年の水稻乾物生産量に対して過剰であったためと考えられ, 翌年から施肥量を1.5 kg N/10 a減量する契機ともなった。一方, 安曇川, 木之本では, 有機物および土づくり肥料の連用によって4~12%, 8~14%それぞれ増収し, 安定した連用効果が認められた。安曇川では, 珪カルの併用によって, 穂いもち病の発病程度が低くなる傾向も認められた(データ略)。1994年の豊作年には, 化学肥料単用区の収量水準が高く, 有機物および土づくり肥料の連用による増収効果は, 安土0~4%, 安曇川2~9%, 木之本-3~17%の範囲にあり, 木之本では堆肥の施用効果が認められなかった。

表6 水稻作柄の良好・不良年における有機物および土づくり肥料の連用効果

調査地	試験区	精 玄 米 重 (kg/10 a)				
		作 柄 良 好 年			作 柄 不 良 年	
		平 均	1994年	平 均	1993年	
安土	化学肥料単用	594±35 (100)	638(100)	522±64 (100)	604(100)	
	堆肥1 t	607±39 (102)	654(102)	541±86 (104)	648(107)	
	堆肥2 t	617±40 (104)	657(103)	532±88 (102)	608(101)	
	稲わら全量還元	621±43 ^a (104)	665(104)	523±68 (100)	569(94)	
	総合改善	610±35 (103)	640(100)	535±73 (103)	593(98)	
安曇川	化学肥料単用	558±27 (100)	591(100)	499±53 (100)	504(100)	
	稲わら全量還元	568±28 (102)	592(100)	511±37 (102)	525(104)	
	総合改善(1)	587±45 (105)	601(102)	521±58 (104)	562(112)	
	総合改善(2)	605±51 (108)	620(105)	521±47 (104)	537(107)	
	総合改善(3)	615±51 ^{a, b} (110)	638(108)	539±50 ^a (108)	543(108)	
	総合改善(4)	599±68 (107)	644(109)	552±38 ^a (111)	545(108)	
木之本	化学肥料単用	552±94 (100)	543(100)	503±31 (100)	486(100)	
	堆肥1 t	532±88 ^a (96)	531(98)	516±15 (103)	533(110)	
	堆肥2 t	538±94 (97)	529(97)	510±24 (101)	531(109)	
	稲わら全量還元	561±95 (102)	595(109)	514±49 (102)	554(114)	
	総合改善(1)	570±82 (103)	637(117)	532±25 ^a (106)	524(108)	
	総合改善(2)	551±99 (100)	600(110)	545±18 ^a (109)	538(111)	
	総合改善(3)	566±84 (103)	592(109)	539±21 ^a (107)	537(111)	

注: 1) 作柄良好年: 作況指数103以上(1977年104, 1978年104, 1984年104, 1986年103, 1994年106)。

作柄不良年: 作況指数97以下(1976年96, 1980年95, 1982年97, 1993年89, 1997年95)。

2) 精玄米重平均は5か年の平均値±標準偏差を, かっこ内は化学肥料単用区に対する収量指数をそれぞれ示す。ただし, 木之本については1976年(試験前)を除く。

3) aは, 5%水準で化学肥料単用区に対して有意差があることを示す。マイナス記号は, 負の効果を示す。化学肥料単用区との平均値の差を検定した。

4) bは, 5%水準で稲わら全量還元区に対して有意差があることを示す。総合改善区について, 稲わら全量還元区との平均値の差を検定した。ただし, 安曇川の総合改善2区については, 堆肥を併用しており, 対象から除外した。

このように、各調査地における水稻の生育・収量は、施肥法、作付体系、有機物施用時期および気象条件の影響を受けるものの、有機物および土づくり肥料を数年以上連用すると有意に増収した。とくに、褐色低地土（安曇川）では、有機物と土づくり肥料の併用効果が高かった。また、中雪地の細粒グライ土（木之本）において、稲わらの秋鋤込みが有効であることも確認された。

3. 2 水稻の養分吸収量の変化

3. 2. 1 水稻の部位別成分含有率と養分吸収量

水稻作物体の成分含有率を表7-1~3に示す。試験後半（1988~97年）の10年間の分析値を平均し、有機物および土づくり肥料の連用による平均値の差を検定した。また、水稻の養分吸収量の平均値を図3に示し、平均値の差を検定するとともに、それぞれの養分施用量（有機物、土づくり肥料および肥料の施用量）も図示した。

無窒素区を除く試験区の稲体窒素（N）含有率の平均値は、わら部0.46~0.61%、籾部0.88~1.06%の範囲にあり、籾のN含有率と精玄米重との間には高い正の相関関係（ $r=0.929^{**}$, $n=19$ ）が認められた。そして、収量水準の高い安土では、籾のN含有率がわら還元区で最も高く、化学肥料単用区に比べて明らかに増加したが、総合改善区では珪カルおよび熔リンの併用によって、N含有率の増加が抑制された（有意水準5%）。同様の効果は、安曇川の総合改善4区でも認められたが、木之本では判然としなかった。

リン（P）については、わら部0.06~0.12%、籾部0.23~0.25%の範囲にあり、わらのP含有率が有機物および土づくり肥料の連用によって低下した（5%または1%水準で有意）。籾のP含有率については、安土では変化がなかったが、安曇川および木之本では、わら還元区で低下し、熔リンを併用した総合改善区でも増加しなかった。

カリウム（K）については、わら部1.0~1.2%、籾部0.23~0.28%の範囲にあり、安土において堆肥区、わら還元区でわら部の含有率が増加したが、安曇川および木之本では試験区の間には有意な差が認められなかった。

カルシウム（Ca）については、わら部0.19~0.29%、籾部0.017~0.024%の範囲にあり、Pと同様に、有機物施用および土づくり肥料の連用によってわら部

の含有率が有意に低下し、安曇川および木之本では籾部の含有率も低下した。

マグネシウム（Mg）については、わら部0.070~0.090%、籾部0.087~0.092%の比較的狭い範囲にあり、わら部の含有率がやや低下した試験区でも、籾部には変化が認められなかった。

珪酸（ SiO_2 ）については、わら部5.9~12.5%、籾部2.3~3.7%の範囲にあり、いずれの調査地でも有機物および土づくり肥料の連用によって、わら部、籾部ともに含有率が増加し、総合改善区では稲わらと珪酸質肥料の併用効果が認められた（1%水準で有意）。そして、無窒素区を除く全試験区について、わらの SiO_2 含有率と精玄米重との間には高い正の相関関係が認められた（ $r=0.960^{**}$, $n=19$ ）。

水稻の養分吸収量の平均値は、無窒素区を除き、N 8.6~13.3, P 2.1~2.7, SiO_2 52~136, K 8.5~12.5, Ca 1.8~2.2, Mg 1.1~1.4kg/10aの範囲にあった。有機物の連用によって、N, SiO_2 およびKの吸収量が増加し、珪カルなど土づくり肥料との併用によって SiO_2 吸収量がさらに増加した（5%または1%水準で有意）。これら3成分の吸収量は、いずれもわら重、精玄米重と高い正の相関を示し（図表略、1%水準で有意）、有機物および土づくり肥料による施用量の増加とよく対応した。一方、PおよびCaについては、珪カル、ミネカルおよび熔リンの連用によって吸収量が有意に低下する場合も認められ、施用量の増加と対応しなかった。また、Mgについては、有機物連用による吸収増加が一部で認められたが、土づくり肥料との併用効果は明らかでなかった。

このように、水稻の養分吸収量に及ぼす有機物および土づくり肥料の連用効果は、成分によって異なり、N, SiO_2 およびKについては吸収量を増加させたが、PおよびCaについては吸収量をほとんど増加させず、わら部の含有率を低下させた。また、籾のN含有率およびわらの SiO_2 含有率は、いずれも精玄米重と高い正の相関を示したが、収量水準の最も高かった安土では、稲わらに珪カル、熔リンを併用することによって籾のN含有率の増加を抑制する効果も認められた。

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表7-1 安土における水稻作物体の成分含有率(1988~97年の平均値)

部位	No	試験区	部位別収量 (kg/10a)	わらおよび籾の成分含有率(%)					
				N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
わら	1.	無 窒 素	588	0.437	0.100	0.88	0.244	0.059	10.7
	2.	化学肥料単用	808	0.582	0.115	1.07	0.248	0.079	9.5
	3.	堆 肥 1 t	852 ^{aa}	0.536 ^{-aa}	0.091 ^{-aa}	1.09	0.216 ^{-aa}	0.070 ^{-aa}	11.6 ^{aa}
	4.	堆 肥 2 t	874 ^{aa}	0.562	0.089 ^{-aa}	1.19 ^a	0.198 ^{-aa}	0.071 ^{-a}	12.4 ^{aa}
	5.	稲わら全量還元	859 ^{aa}	0.609	0.098 ^{-aa}	1.21 ^a	0.198 ^{-aa}	0.080	11.7 ^{aa}
	6.	総 合 改 善	858 ^{aa}	0.534 ^{-a, -bb}	0.079 ^{-aa, -bb}	1.16	0.188 ^{-aa, -b}	0.075	12.5 ^{aa, bb}
籾	1.	無 窒 素	469 (385)	0.890	0.244	0.23	0.021	0.095	3.8
	2.	化学肥料単用	727 (600)	0.991	0.244	0.25	0.021	0.090	3.0
	3.	堆 肥 1 t	772 ^{aa} (634 ^{aa})	1.006	0.247	0.27	0.019 ^{-a}	0.092	3.4 ^{aa}
	4.	堆 肥 2 t	778 ^{aa} (637 ^{aa})	1.028 ^{aa}	0.247	0.26	0.018 ^{-a}	0.092	3.7 ^{aa}
	5.	稲わら全量還元	768 ^{aa} (626 ^a)	1.059 ^{aa}	0.247	0.28	0.019	0.089	3.4 ^{aa}
	6.	総 合 改 善	772 ^{aa} (627 ^{aa})	1.020 ^{-b}	0.244	0.26 ^{-b}	0.018 ^{-aa}	0.091	3.7 ^{aa, bb}

注: 1) a, aaは、5%水準、1%水準でそれぞれ化学肥料単用区に対して有意差があることを示す。マイナス記号は、負の効果を示す。無窒素区を除く試験区について、化学肥料単用区との平均値の差を検定した。
 2) b, bbは、5%水準、1%水準でそれぞれ稲わら全量還元区に対して有意差があることを示す。マイナス記号は、負の効果を示す。総合改善区について、稲わら全量還元区との平均値の差を検定した。ただし、安曇川の総合改善2区については、堆肥を併用しており、対象から除外した。
 3) かっこ内は精玄米重を示す。

表7-2 安曇川における水稻作物体の成分含有率(1988~97年の平均値)

部位	No	試験区	部位別収量 (kg/10 a)	わらおよび籾の成分含有率(%)					
				N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
わら	1.	無 窒 素	425	0.384	0.112	0.92	0.279	0.074	8.1
	2.	化学肥料単用	650	0.462	0.107	1.08	0.276	0.082	5.9
	3.	稲わら全量還元	702 ^{aa}	0.489 ^a	0.100 ^{-a}	1.10	0.260 ^{-aa}	0.085	6.7 ^{aa}
	4.	総合改善(1)	749 ^{aa, bb}	0.489	0.090 ^{-aa, -bb}	1.14	0.230 ^{-aa, -bb}	0.077 ^{-b}	8.7 ^{aa, bb}
	5.	総合改善(2)	741 ^{aa}	0.468	0.091 ^{-aa}	1.12	0.247 ^{-aa}	0.076	8.7 ^{aa}
	6.	総合改善(3)	726 ^{aa}	0.446 ^{-bb}	0.085 ^{-aa, -bb}	1.11	0.235 ^{-aa, -bb}	0.073 ^{-bb}	9.6 ^{aa, bb}
	7.	総合改善(4)	725 ^{aa}	0.463	0.085 ^{-aa, -bb}	1.12	0.225 ^{-aa, -bb}	0.071 ^{-a, -bb}	9.7 ^{aa, bb}
籾	1.	無 窒 素	352 (285)	0.812	0.246	0.27	0.025	0.093	3.5
	2.	化学肥料単用	613 (506)	0.909	0.245	0.25	0.024	0.090	2.3
	3.	稲わら全量還元	645 ^{aa} (530 ^{**})	0.906	0.239 ^{-a}	0.25	0.022	0.087 ^{-aa}	2.5 ^a
	4.	総合改善(1)	674 ^{aa, bb} (548 ^{aa, bb})	0.912	0.241	0.26	0.020 ^{-aa, -b}	0.088	3.1 ^{aa, bb}
	5.	総合改善(2)	682 ^{aa} (556 ^{**})	0.893	0.243	0.25	0.020 ^{-aa}	0.089	3.2 ^{aa}
	6.	総合改善(3)	693 ^{aa, bb} (563 ^{aa, bb})	0.884	0.239 ^{-a}	0.26	0.019 ^{-aa, -b}	0.089 ^{bb}	3.2 ^{aa, bb}
	7.	総合改善(4)	689 ^{aa, bb} (560 ^{aa, b})	0.876 ^{-b}	0.244	0.26	0.019 ^{-aa, -bb}	0.089	3.3 ^{aa, bb}

注) かっこ内は精玄米重を示す。凡例は表7-1に示す。

表7-3 木之本における水稻作物体の成分含有率(1988~97年の平均値)

部位	No	試験区	部位別収量 (kg/10 a)	わらおよび籾の成分含有率(%)					
				N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
わら	1.	無 窒 素	451	0.390	0.083	0.95	0.260	0.068	9.9
	2.	化学肥料単用	688	0.471	0.099	1.01	0.285	0.088	6.8
	3.	堆 肥 1 t	721	0.503 ^{aa}	0.090 ^{-a}	1.03	0.283	0.090	8.1 ^{aa}
	4.	堆 肥 2 t	744 ^{aa}	0.501 ^a	0.084 ^{-aa}	1.08	0.254 ^{-aa}	0.090	8.9 ^{aa}
	5.	稲わら全量還元	733 ^a	0.486	0.078 ^{-aa}	1.03	0.258 ^{-aa}	0.080 ^{-aa}	9.4 ^{aa}
	6.	総合改善(1)	742 ^{aa}	0.467	0.073 ^{-aa, -b}	1.02	0.242 ^{-aa, -bb}	0.076 ^{-aa}	10.0 ^{aa, bb}
	7.	総合改善(2)	748 ^{aa}	0.465	0.067 ^{-aa, -b}	1.07	0.223 ^{-aa, -bb}	0.076 ^{-aa}	11.2 ^{aa, bb}
	8.	総合改善(3)	755 ^{aa}	0.477	0.058 ^{-aa, -bb}	1.09	0.219 ^{-aa, -bb}	0.079 ^{-aa}	10.9 ^{aa, bb}
籾	1.	無 窒 素	371 (300)	0.840	0.249	0.24	0.021	0.097	3.8
	2.	化学肥料単用	629 (519)	0.884	0.243	0.25	0.023	0.090	2.7
	3.	堆 肥 1 t	659 ^{aa} (543 ^{**})	0.909	0.242	0.23	0.021 ^{-a}	0.091	2.7
	4.	堆 肥 2 t	671 ^a (553 [*])	0.926 ^a	0.240 ^{-a}	0.23	0.019 ^{-aa}	0.091	2.9 ^{aa}
	5.	稲わら全量還元	694 ^{aa} (570 ^{**})	0.903	0.236 ^{-aa}	0.23	0.021 ^{-aa}	0.090	3.1 ^{aa}
	6.	総合改善(1)	688 ^{aa} (564 ^{**})	0.914 ^a	0.237 ^{-a}	0.24	0.020 ^{-aa, -bb}	0.090	3.2 ^{aa}
	7.	総合改善(2)	698 ^{aa} (572 ^{**})	0.910 ^a	0.235 ^{-a}	0.24	0.019 ^{-aa, -bb}	0.091	3.3 ^{aa, bb}
	8.	総合改善(3)	702 ^{aa} (576 ^{**})	0.932 ^{a, b}	0.230 ^{-aa, -b}	0.23	0.017 ^{-aa, -bb}	0.090	3.2 ^{aa}

注) かっこ内は精玄米重を示す。凡例は表7-1に示す。

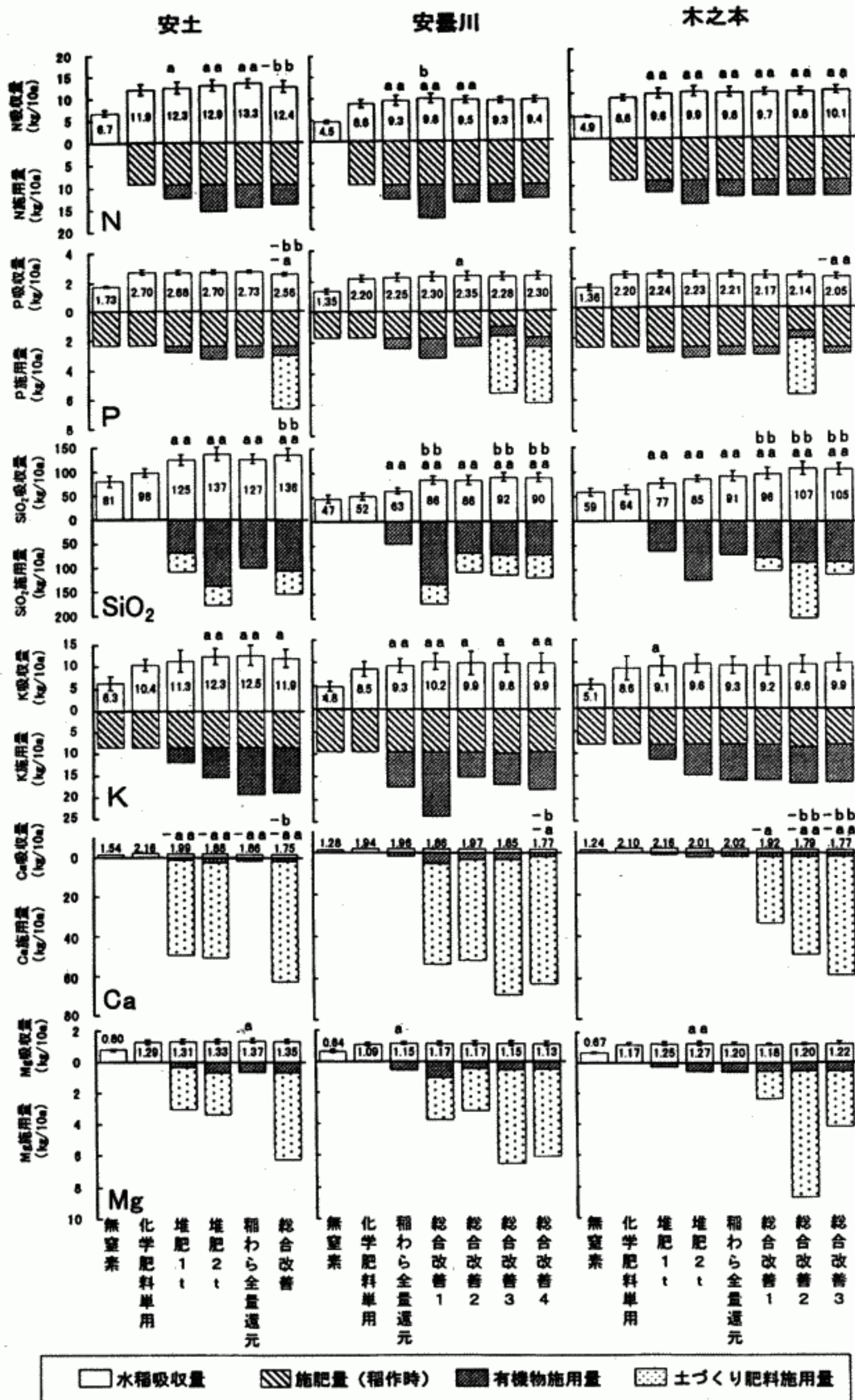


図3 水稻の養分吸収量と養分施用量(1988~97年の平均値)

注) 吸収量の縦線は標準偏差を示す。a, aa, b, bbの凡例は表7-1に示す。

3. 2. 2 玄米の食味関連成分含有率

代表的な試験区について、1991年に精玄米の食味関連成分含有率を分析した結果を表8に示す。ここでは、堀野³⁾が提案する玄米のN, Mg/K比および食味指数(Mg/K/N)に着目した。

玄米のN含有率(乾物当たり)は1.11~1.40%の範囲にあり、玄米N含有率と精玄米重との間に高い正の相関関係が認められた($r=0.916^{***}$, $n=12$)。各調査地とも、堆肥2t区(安曇川では、稲わらと堆肥1tを併用した総合改善1区)、わら還元区では、化学肥料単用区に比べて増収し、玄米N含有率も増加した。一方、稲わらと土づくり肥料を併用した総合改善区(安曇川:総合改善4区)では、わら還元区に比べて、玄米N含有率が低くなった。Mg/K比は1.37~1.54の範囲にあり、木之本では有機物および土づくり肥料の連用によって高くなったが、安土および安曇川

ではほとんど変化なかった。その結果、食味指数(Mg/K/N)は、安土109~115、安曇川113~131、木之本112~124の範囲にあり、試験区の間には大差は認められなかった。また、安土および安曇川について、炊飯米による官能検査を行ったところ、いずれも試験区の間にも明らかな食味評価の差は認められなかった(データ略)。

堀野は、良食味米の適値として、N含有率は1.3%以下、Mg/K比は1.50以上、Mg/K/Nは100以上を指標として挙げており、N含有率には施肥、Mg/K比には品種の影響がそれぞれ大きいと指摘している³⁾。今回得られた食味指数は適値の範囲にあり、試験区の間にも明らかな差を認めなかったが、年次によって成分含有率が変動するので、今後さらに継続して解析する必要があると考えられる。

表8 有機物および土づくり肥料の連用が水稻収量および食味関連成分に及ぼす影響(1991年)

調査地	試験区	施肥 N量 kg N/10 a	精玄 米重 kg/10 a	玄 米 成 分		
				N %	Mg/K me/me	Mg/K/N (食味指数)
安 土	化 学 肥 料 単 用	10	600	1.30	1.50	115
	堆 肥 2 t	10	644	1.38	1.52	110
	稲 わ ら 全 量 還 元	10	628	1.40	1.53	109
	総 合 改 善	10	625	1.36	1.52	112
安曇川	化 学 肥 料 単 用	10	492	1.14	1.41	123
	総 合 改 善 (1)	10	554	1.23	1.40	113
	稲 わ ら 全 量 還 元	10	539	1.19	1.37	115
	総 合 改 善 (4)	10	511	1.11	1.45	131
木之本	化 学 肥 料 単 用	9	517	1.20	1.35	112
	堆 肥 2 t	9	530	1.24	1.54	124
	稲 わ ら 全 量 還 元	9	572	1.23	1.43	116
	総 合 改 善 (2)	9	572	1.18	1.47	124

注) 玄米の食味関連成分含有率は乾物当たりの値。

3. 3 土壌の化学性の変化

3. 3. 1 土壌化学性の経年変化

各調査地の代表的な試験区における作土中の全炭素、全窒素、可給態リン酸、可給態珪酸および可給態窒素の含量の経年変化を図4-1~5に示す。なお、採取土壌の分析値には年次間のばらつきが認められ、3年間の移動平均をとって経年変化の傾向を示す。また、試験期間の最終5か年(1993~1997年)における土壌養分含量の平均値を表9-1~3に示す。

全炭素(T-C)および全窒素(T-N)については、いずれの調査地でも、化学肥料単用区の含量が試験開始時に比べて漸減したが、わら還元区および総合

改善区ではほぼ同じ水準を維持し、堆肥2t区(安曇川ではわらと堆肥を併用した総合改善1区)でやや増加する傾向が認められた。また、堆肥1t区でも試験開始時とほぼ同水準を維持した。なお、いずれの試験区も、土壌改良目標値(腐植2~10%^{2,20)}・T-Cに換算して1.16~5.81%)の範囲にあった。

可給態リン酸(Av-P₂O₅)については、化学肥料単用区の含量が安土では漸減傾向にあり、改良目標値(10~20mg/100g^{2,20)}を大きく下回ったが、安曇川および木之本では、試験期間中の変化に一定の傾向を認めなかった。一方、溶リンを連用した総合改善区では、可給態リン酸含量が明らかに増加し、グライ

土の安土および木之本では改良目標値に達し、また褐色低地土の安曇川では改良目標の上限値を上回った。なお、木之本では、熔リンの連用による可給態リン酸の増加量が他の調査地に比べて少なかった。堆肥2t区およびわら還元区でも、化学肥料単用区に比べ、僅かながら可給態リン酸が増加した。

可給態珪酸 ($Av - SiO_2$) については、いずれの調査地でも、化学肥料単用区の含量が試験開始時に比べて漸減し、改良目標値 ($15 \sim 30 \text{ mg}/100 \text{ g}^{2), 20)}$ を下回った。一方、総合改善区では、珪カル、ミネカル、熔リンなどの連用によって可給態珪酸含量が増加し、安曇川では改良目標値に達し、また安土および木之本では改良目標の上限値を上回った。わら還元区、堆肥2t区の可給態珪酸含量は、化学肥料単用区に比べて僅かに増加したが、安曇川では有意でなく、いずれの調査地でも改良目標値に達しなかった。なお、稲わらおよび堆肥と比較して、土づくり肥料の施用によって可給態珪酸含量が顕著に増加したのは、pH4酢酸緩衝液浸出法が土壤中の有効な天然珪酸を評価しているものの、水稻には無効となった珪酸資材の残さまで溶出するためと考えられる²⁰⁾。

可給態窒素 ($Av - N$) の含量は、耕耘の時期や土壌の乾燥程度によって変動しやすく、各調査地とも年次変動が大きかったが、有機物の連用によって増加す

る傾向が認められた。一方、珪カルなどを併用した総合改善区では、わら還元区に比べて可給態窒素が低下する傾向も窺われ、石灰のアルカリ効果によって土壌有機物の分解が促進されていると推察された。なお、安曇川の化学肥料単用区では、改良目標値 ($2 \sim 4 \text{ mg}/100 \text{ g}^{20)}$ を下回った。

塩基置換容量 (CEC) が有機物の連用によって僅かながら増加し、また塩基飽和度は土づくり肥料の連用によって増加し、改良目標値 ($51 \sim 71\%^{2)}$ 、本県 $70 \sim 90\%^{20)}$ に概ね達した。pHについては、殆どの試験区で改良目標値 ($5.5 \sim 6.0^{2)}$ 、本県 $5.5 \sim 6.5^{20)}$ の範囲にあった。遊離酸化鉄は、1991年に調査した結果、安土 $1.9 \sim 2.3\%$ 、安曇川 $0.5 \sim 1.0\%$ 、木之本 $0.9 \sim 1.4\%$ の範囲にあった (データ略)。安曇川では改良目標値 ($0.8 \sim 2.0\%^{20)}$ を下回ったため、1994年から総合改善3区にミネカルを施用するように設計を変更した。

このように、各調査地とも、わら還元あるいは堆肥1t/10a施用によって土壌有機物含量を維持できると考えられた。また土づくり肥料の併用によって塩基の補給ができ、可給態リン酸および珪酸の含量が改良目標値に達したが、連用に伴って過剰に蓄積する場合もあり、土壌蓄積養分を有効に利用する必要性も認められた。

表9-1 安土における試験後期の土壌化学性 (1993~97年における作土層の平均値、乾土100g当たり)

No	試験区	pH (H_2O)	T-C (%)	T-N (%)	可給態 P_2O_5 (mg)	交換性塩基 (mg)			CEC (me)	塩基 飽和度 (%)	可給態 SiO_2 (mg)	可給態 N (mg)
						CaO	MgO	K_2O				
1.	無 窒 素	5.4	1.80	0.167	4.3	199	27	14	15.7	56	9.5	2.95
2.	化学肥料単用	5.2	1.87	0.173	4.0	182	24	10	15.8	50	9.9	3.17
3.	堆 肥 1 t	5.8 ^{aa}	2.16 ^{aa}	0.191 ^{aa}	6.0 ^{aa}	269 ^{aa}	31 ^{aa}	13 ^a	17.1 ^{aa}	67 ^{aa}	59.5 ^{aa}	4.20 ^a
4.	堆 肥 2 t	5.8 ^{aa}	2.35 ^{aa}	0.205 ^{aa}	6.5 ^a	278 ^{aa}	33 ^{aa}	17 ^{aa}	17.4 ^{aa}	69 ^{aa}	50.5 ^{aa}	4.55 ^a
5.	稲わら全量還元	5.2	2.11 ^{aa}	0.191 ^{aa}	5.9 ^a	200 ^{aa}	28 ^{aa}	16 ^{aa}	16.6 ^{aa}	53 ^{aa}	10.7 ^a	4.39 ^{aa}
6.	総 合 改 善	6.1 ^{aa bb}	2.09 ^a	0.182 ^a	13.2 ^{aa bb}	303 ^{aa bb}	39 ^{aa bb}	17 ^{aa}	17.2 ^{aa}	76 ^{aa bb}	66.8 ^{aa bb}	4.24

注: 1) a, aaは、5%水準、1%水準でそれぞれ化学肥料単用区に対して有意差があることを示す。無窒素区を除く試験区について、化学肥料単用区との平均値の差を検定した。

2) b, bbは、5%水準、1%水準でそれぞれ稲わら全量還元区に対して有意差があることを示す。マイナス記号は負の効果を示す。総合改善区について、稲わら全量還元区との平均値の差を検定した。ただし、安曇川の総合改善2区については、堆肥を併用しており、対象から除外した。

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表9-2 安曇川における試験後期の土壌化学性 (1993~97年における作土層の平均値, 乾土100g当たり)

No	試験区	pH (H ₂ O)	T-C (%)	T-N (%)	可給態 P ₂ O ₅ (mg)	交換性塩基 (mg)			CEC (me)	塩基 飽和度 (%)	可給態 SiO ₂ (mg)	可給態 N (mg)
						CaO	MgO	K ₂ O				
1.	無窒素	5.6	1.41	0.147	18.3	96	13	10	8.4	51	4.4	1.71
2.	化学肥料単用	5.1	1.55	0.163	17.9	58	9	9	7.9	34	2.8	1.75
3.	稲わら全量還元	5.0	1.80 ^{aa}	0.185 ^{aa}	20.1	60	9	14	8.2	35	3.3	2.35 ^a
4.	総合改善(1)	5.6 ^{aa} ^{bb}	2.03 ^{aa} ^{bb}	0.203 ^{aa} ^b	23.6 ^a	111 ^{aa} ^{bb}	11 ^{aa} ^{bb}	13 ^a	8.7 ^a	55 ^{aa} ^{bb}	19.6 ^a ^b	2.60 ^a
5.	総合改善(2)	5.7 ^{aa}	1.99 ^{aa}	0.195 ^{aa}	25.1 ^a	118 ^{aa}	12	11	8.7 ^{aa}	58 ^{aa}	20.8 ^a	2.15
6.	総合改善(3)	6.0 ^{aa} ^{bb}	1.97 ^{aa} ^b	0.195 ^{aa}	33.8 ^{aa} ^{bb}	141 ^{aa} ^{bb}	16 ^{aa} ^{bb}	13 ^{aa}	8.8 ^{aa} ^b	69 ^{aa} ^{bb}	28.6 ^{aa} ^{bb}	2.53
7.	総合改善(4)	6.0 ^{aa} ^{bb}	1.86 ^{aa}	0.188 ^{aa}	31.9 ^{aa} ^{bb}	128 ^{aa} ^{bb}	14 ^{aa} ^{bb}	13 ^{aa}	8.3 ^a	67 ^{aa} ^{bb}	23.1 ^a ^b	2.41

注) 凡例は表9-1に示す。

表9-3 木之本における試験後期の土壌化学性 (1993~97年における作土層の平均値, 乾土100g当たり)

No	試験区	pH (H ₂ O)	T-C (%)	T-N (%)	可給態 P ₂ O ₅ (mg)	交換性塩基 (mg)			CEC (me)	塩基 飽和度 (%)	可給態 SiO ₂ (mg)	可給態 N (mg)
						CaO	MgO	K ₂ O				
1.	無窒素	5.6	2.00	0.202	7.8	170	27	11	11.8	65	7.5	3.22
2.	化学肥料単用	5.5	2.03	0.202	9.4	163	25	11	11.8	62	5.4	3.46
3.	堆肥1t	5.8 ^a	2.12 ^a	0.209 ^a	10.0	182	27	14	11.9	68	7.3	3.41
4.	堆肥2t	5.7 ^a	2.34 ^{aa}	0.227 ^{aa}	10.8	193 ^a	30 ^a	16 ^a	12.9 ^{aa}	68	9.2 ^a	4.20
5.	稲わら全量還元	5.6	2.32 ^{aa}	0.224 ^{aa}	9.4	192 ^a	27	16 ^a	12.6 ^{aa}	66	11.1 ^a	4.83 ^{aa}
6.	総合改善(1)	6.0 ^{aa} ^{bb}	2.28 ^{aa}	0.218 ^{aa} ^b	11.7 ^a ^b	229 ^{aa} ^{bb}	30 ^{aa} ^{bb}	16 ^a	13.3 ^{aa}	75 ^{aa} ^b	58.0 ^{aa} ^{bb}	5.05
7.	総合改善(2)	6.2 ^{aa} ^{bb}	2.23 ^a ^b	0.217 ^a ^{bb}	13.1 ^{aa} ^{bb}	233 ^{aa} ^{bb}	34 ^{aa} ^{bb}	16 ^{aa}	13.1 ^a	79 ^{aa} ^{bb}	64.1 ^{aa} ^{bb}	4.75
8.	総合改善(3)	6.7 ^{aa} ^{bb}	2.11 ^a ^{bb}	0.208 ^{-bb}	14.7 ^{aa} ^{bb}	279 ^{aa} ^b	39 ^{aa} ^{bb}	16 ^a	13.7 ^{aa} ^{bb}	89 ^{aa} ^{bb}	38.9 ^{aa} ^b	3.81 ^{-b}

注) 凡例は表9-1に示す。

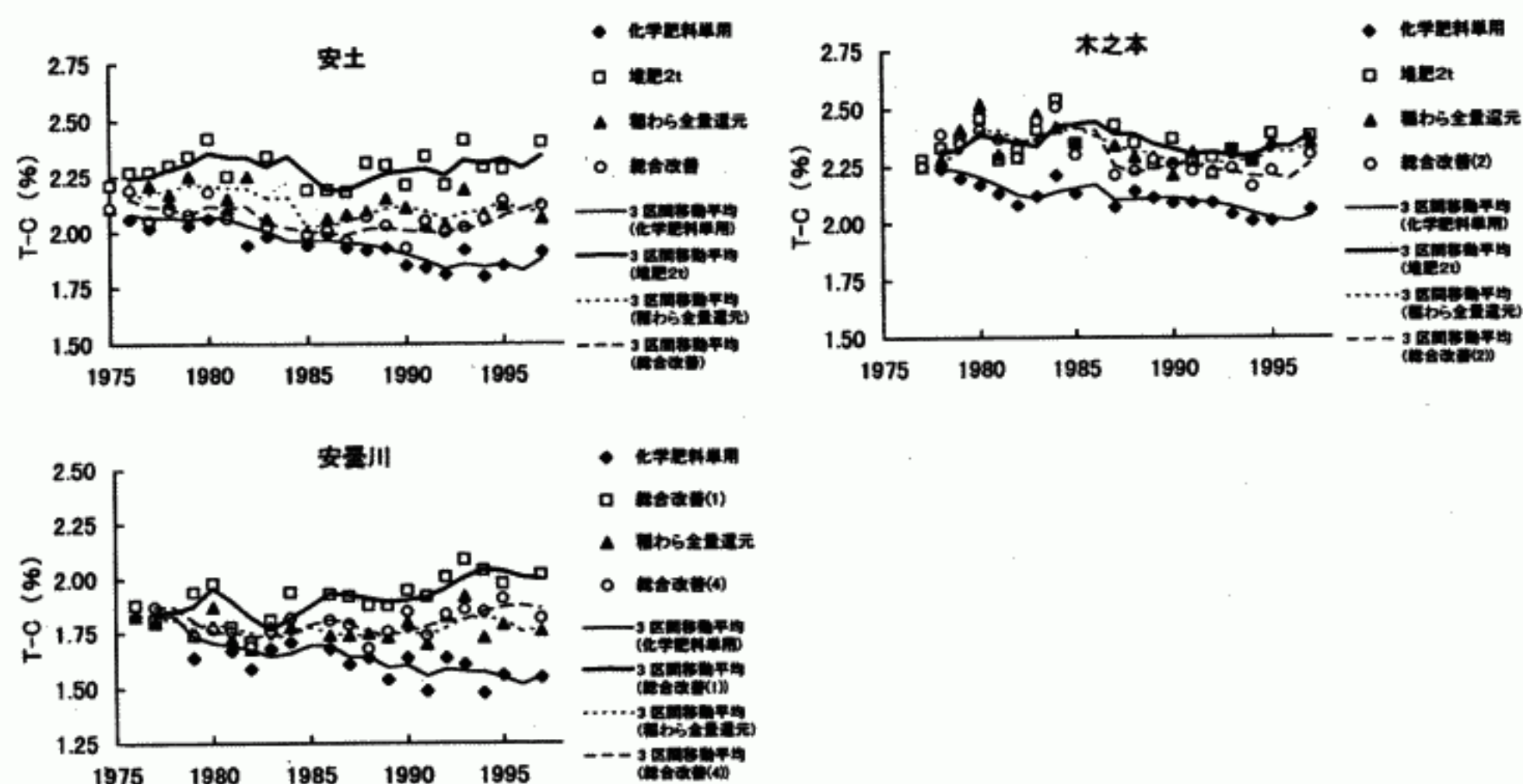


図4-1 土壌中の有機態炭素含量(T-C)の経年変化

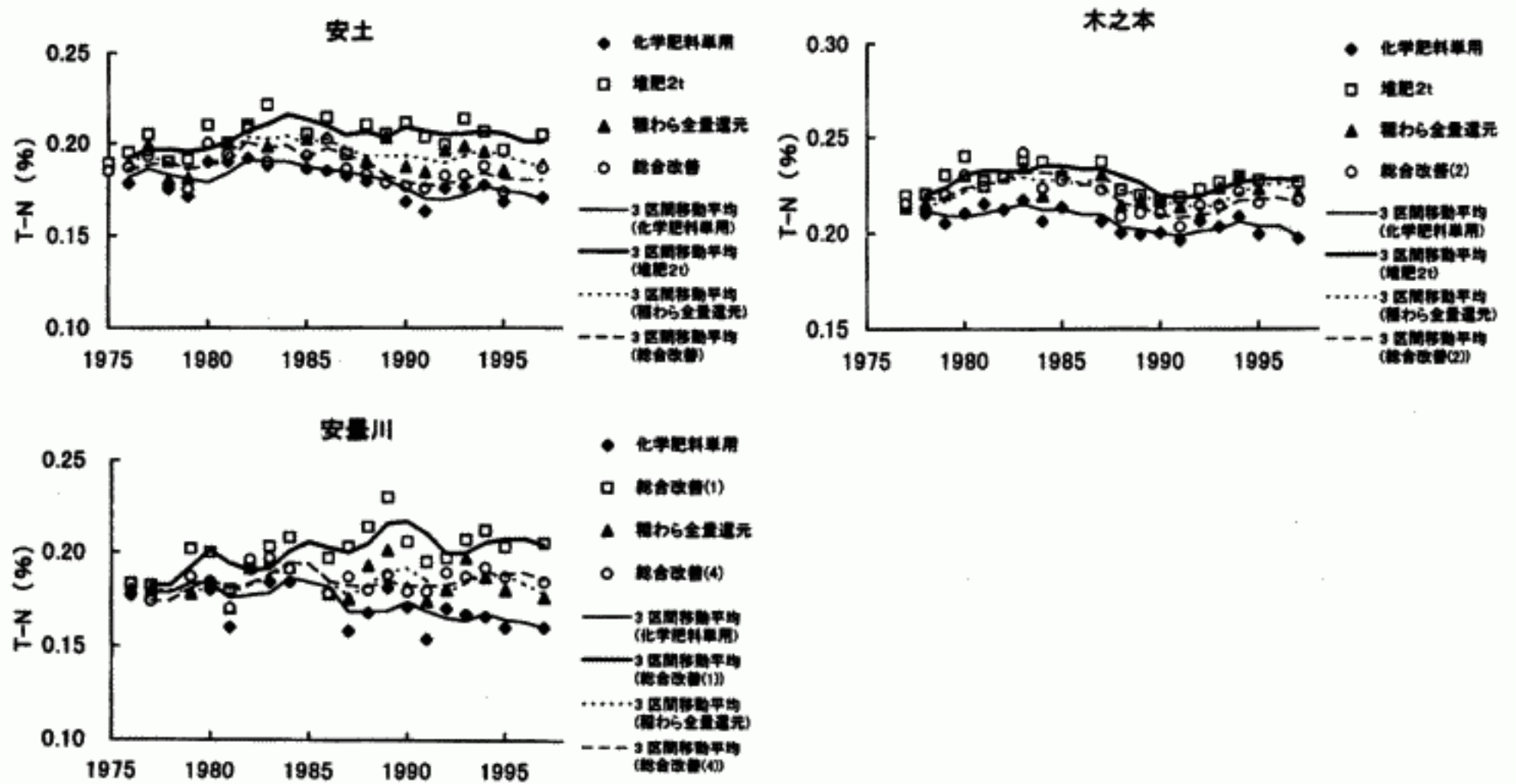


図4-2 土壤中の全窒素含量(T-N)の経年変化

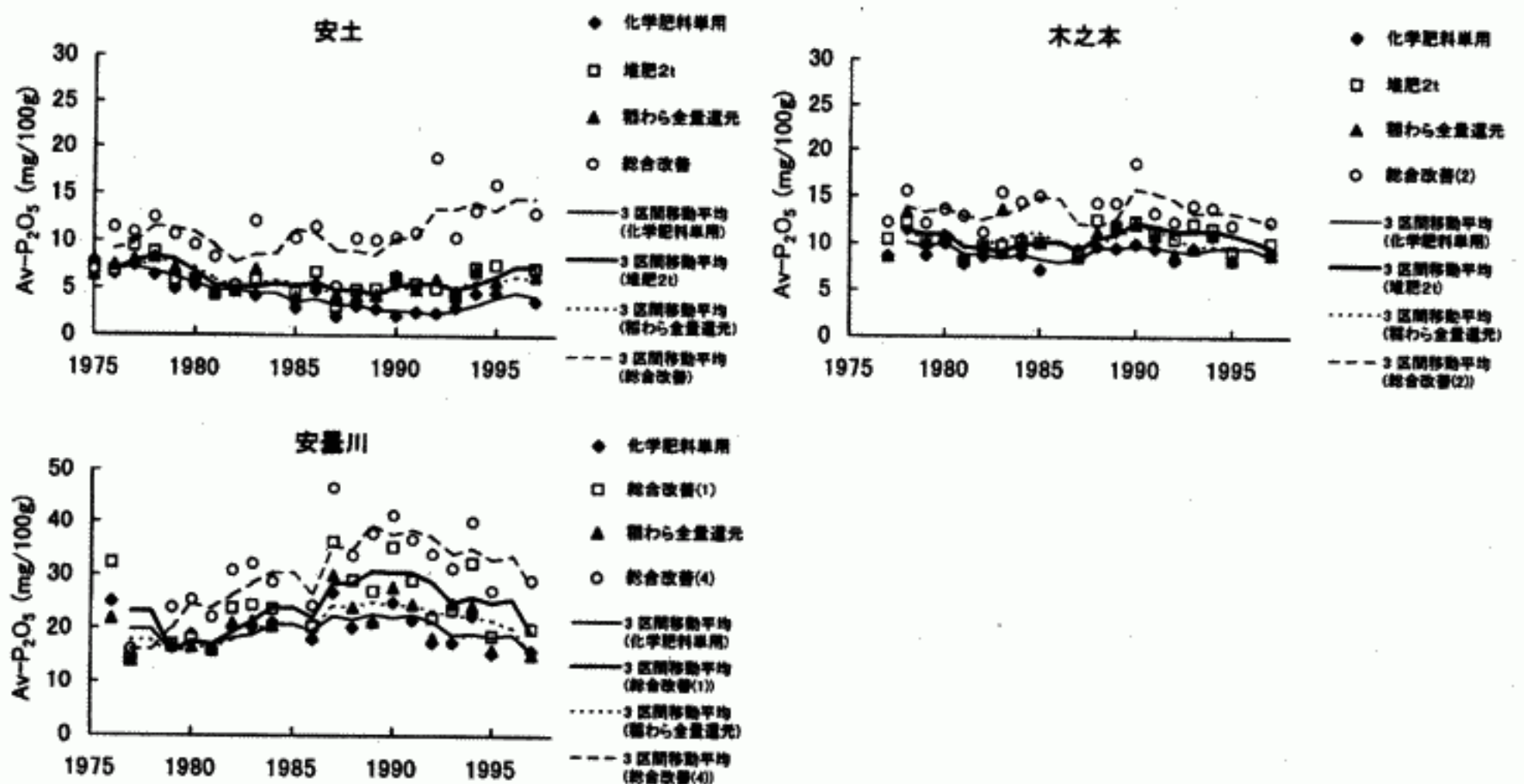


図4-3 土壤中の可給態リン酸含量(Av-P₂O₅)の経年変化

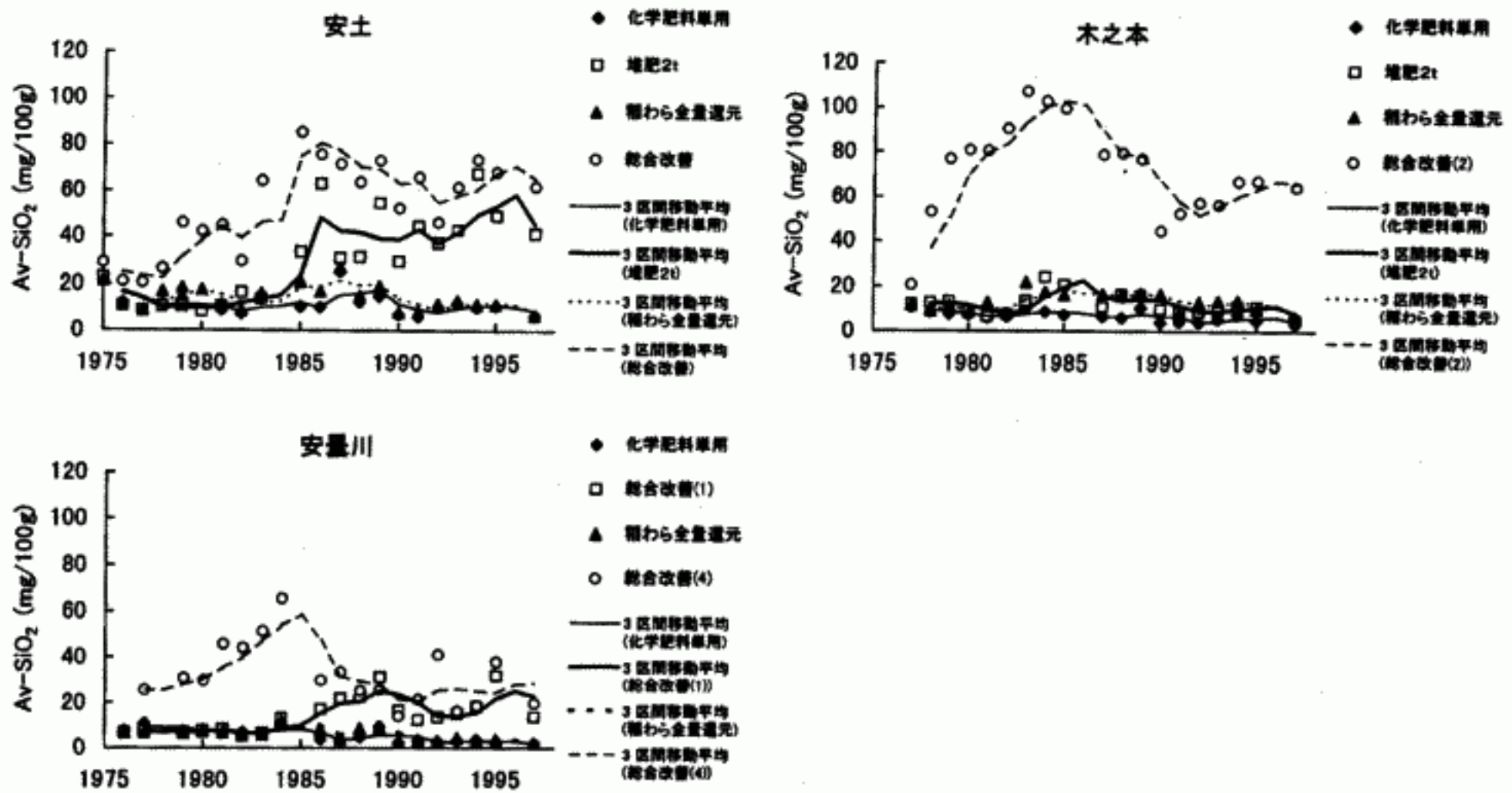


図4-4 土壤中の可給態珪酸含量($Av-SiO_2$)の経年変化

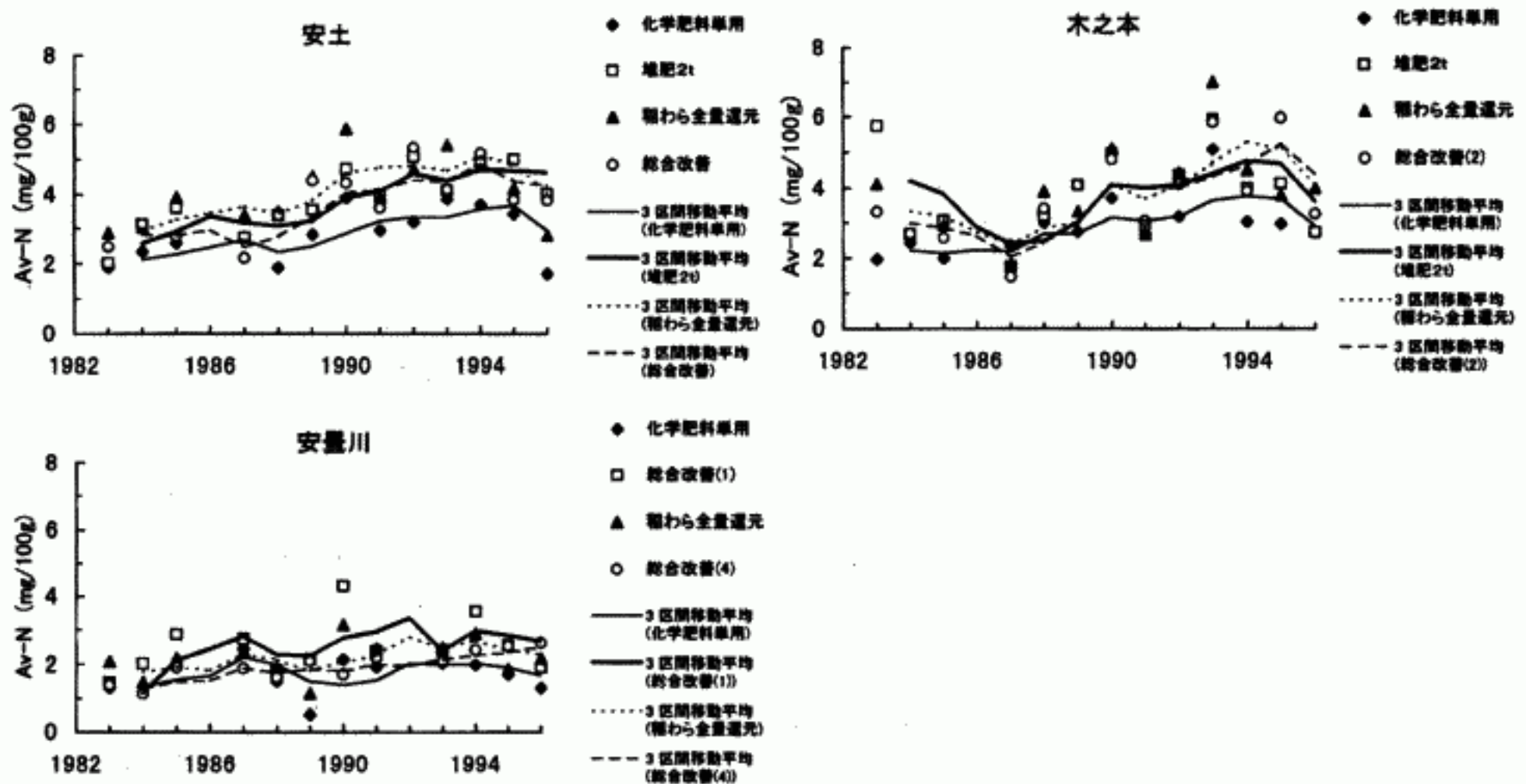


図4-5 土壤中の可給態窒素含量($Av-N$)の経年変化

3. 3. 2 土壌蓄積リン酸の有効利用法

可給態リン酸はいずれの調査地も総合改善区で改良目標値に達しており、土壌蓄積リン酸の有効利用を図るために、稲作時のリン酸施肥を省略する試験区を安土で併設し（総合改善区を分割）、安曇川および木之本では総合改善区の一部で施肥設計を変更した（表2、表4）。1994～1997年に稲作時のリン酸施肥の有無を検討した結果を表10に示す。なお、安曇川および木之本では、可給態リン酸含量が近似し、有機物および土づくり肥料の処理に共通点の多い総合改善区の結果を参考までに比較した。

安土では、秋に熔リンを連用すれば、稲作時のリン

酸施肥を省略しても有意に減収することはなかった。木之本でも同様の結果が得られたが、安曇川ではやや減収し、P吸収量が低下する傾向にあった。この原因は今のところ不明であるが、1994年から施用し始めたミネカルによってリン酸の吸着が促進された可能性も考えられる。したがって、今後とも継続して検討する必要があるものの、安土での結果から、熔リンなどの土づくり肥料を連用する場合、毎年の施用量と吸収量との収支からみても（図3）、土壌蓄積リン酸を有効に利用し、稲作時のリン酸施肥量を低減することが可能と考えられる。

表10 稲作時のリン酸施肥の有無が水稻の収量および養分吸収量に及ぼす影響（1994～97年の平均値）

調査地	試験区	P施肥量(kg P/10a)		わら重 kg/10a	精玄米重 kg/10a	養分吸収量(kg/10a)					
		土づくり肥料	稲作時施肥			N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
安土	総合改善	3.6	0	852	630±9	11.5	2.46	12.5	1.70	0.67	136
	総合改善	3.6	2.0	858	635±9	11.4	2.52	12.0	1.60	0.70	139
安曇川	総合改善(3)	3.6	0	753	562±84	9.0	2.25	10.1	1.73	1.14	95
	総合改善(4)	3.6	1.7	759	580±74	9.3	2.40	11.2	1.82	1.17	88
木之本	総合改善(2)	3.6	0	776	602±37	9.6	2.23	10.2	1.83	1.17	117
	総合改善(3)	0	2.6	785	601±44	10.1	2.15	10.6	1.77	1.23	111

注：1）精玄米重：平均値±標準偏差。品種：日本晴。安土では、総合改善区を分割して実施。

2）安土について、稲作時のリン酸施肥の有無による平均値の差を検定した結果、有意差は認められなかった。安曇川および木之本については、土壌可給態リン酸含量が近似し、有機物および土づくり肥料の処理に共通点の多い総合改善区を参考までに比較した。

4. 総合考察

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果は、有機物等資材の性質、土壌条件、気象条件などの影響を受け、有機物の分解、集積および養分放出の速度が異なる。志賀ら²⁰⁾は、ガラス繊維ろ紙法を用いて、堆肥を数十年間連用したほ場における有機物の分解過程を調査し、中熟の稲わら堆肥を連用した場合、1年間に放出される窒素量は、5年目で、年間施用窒素の約35%、10年目で約50%、20年目で約70%と予測している。そして、堆肥施用によって増加する土壌からの年間の窒素放出量のうち、水稻に吸収される割合は3分の1程度であるが、寒地で高く、暖地で低い傾向を認め、暖地では非作付期の無機化による損失があるためと推察している。また、稲わらの方が堆肥よりも年間窒素放出量に対する水稻利用率が高くなると推定している。

本試験では、連用10～20年目における各調査地の代

表的な4試験区の施用量と水稻吸収量（平均値、図3）をもとに、化学肥料単用区との差し引き法によって有機物および土づくり肥料由来養分の水稻利用率を求め、表11にとりまとめた。有機物由来窒素の水稻利用率は、稲わら21～29%、稲わら堆肥16～23%、総合改善区12～31%の範囲にあり、稲わら>稲わら堆肥となった。稲わら窒素の利用率が高いのは、C/N比が高く、分解時に微生物による土壌窒素の取り込みがあるためで^{22, 23)}、堆肥についても同様に、木之本（未熟）>安土（中熟）となっている。また、化学肥料単用区との差し引き法によって有機物由来窒素の土壌集積率（化学肥料単用区の値を採用し、作土層を15cm、仮比重を安土1.09、安曇川1.15、木之本0.98としてそれぞれ試算）を求めると、安土では稲わら26%、堆肥36%、安曇川では稲わら49%、木之本では稲わら42%、堆肥39%となる。したがって、有機物由来窒素の年間放出量（有機物施用量－土壌集積量）に対する水稻利用率は、安土では稲わら42%、堆肥25%、安曇川では稲わら39

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表11 有機物および土づくり肥料由来養分の水稲利用率 (1988~97年の平均値)

調査地	試 験 区	有機物・土づくり肥料由来養分の水稲利用率 (%)					
		N	P	K	Ca	Mg	SiO ₂
安 土	堆 肥 2 t	16	0	28	-1	1	22
	稲わら全量還元	28	4	20	-17	11	28
	総合改善	12	-3	15	-1	1	24
安 曇 川	稲わら全量還元	21	8	10	1	12	24
	総合改善 (1)	16	8	11	0	2	20
	総合改善 (4)	24	2	16	0	1	33
木 之 本	堆 肥 2 t	23	4	14	-4	17	18
	稲わら全量還元	29	1	8	-4	5	39
	総合改善 (2)	31	-2	11	-1	0	22

注) 水稲利用率は有機物および土づくり肥料の施用量に対する水稲吸収増加量の割合を示す。化学肥料単用区 (有機物無施用) との差し引き法による。

%, 木之本では稲わら50%, 堆肥38%と推定された。このうち堆肥の利用率は、志賀ら²³⁾の予測値にほぼ一致しており、また稲わらも含めて木之本>安土となり、1991年まで有機物を春に施用した中雪地の木之本では、非作付期の窒素の損失が少なかったと推察される。

一方、化学肥料単用区では、試験期間中に作土層の土壤有機物含量が漸減しており、試験後期までの全窒素の減少量を上述と同様に試算すると、安土19.6, 安曇川24.2, 木之本16.2kg N/10aとなり、乾田タイプで中粗粒質土壌の安曇川において土壤有機物の消耗が多かった。また、いずれの調査地でも、わら還元または堆肥1 t/10aの連年施用によって、土壤有機物含量の維持が可能であり、堆肥2 t/10a施用によって増加した。したがって、有機物由来窒素の土壤集積率、水稲利用率など土壤窒素肥沃度の面からみて、本調査地での稲わら秋鋤込みは、稲わら堆肥1 t/10a施用の代替の役割を果たし得ると評価された。また、安土および木之本の総合改善区では、わら還元区に比べて、土壌pHの上昇と土壌全窒素含量の低下が明らかで、珪カル、溶リン等によって塩基を補給する場合には、有機物を併用する必要性があるといえよう。本報では作土層での集積量と水稲の吸収量をもとに有機物由来窒素の収支を試算したが、次層も含めてさらに詳細に養分収支を解析する必要がある、現在調査中である。

ところで、水稲の収量は、有機物および土づくり肥料の連用によって増加し、とくに、褐色低地土での増収効果が高く、細粒グライ土では稲わら秋鋤込みが有効であった。これまでに報告された各地の試験結果でも、乾田において有機物の施用効果が高いことが認められており^{5, 6, 10, 15, 16, 25, 31, 34)}、稲わらを全量鋤込むことが土壌窒素肥沃度の維持に必要と考えられる。また、

積雪地では、融雪後に耕起するが多いが、高柳ら²⁸⁾、中村ら¹²⁾が報告するように、半湿田 (グライ土) でも稲わらを秋期に鋤込めば、生育初期の還元障害を回避でき、安定した生育収量が得られると考えられる。なお、有機物の連用年数と増収効果との関係については、試験中に有機物施用時期、施肥法、作付体系などが変更され、定量モデルを用いた経年変化の解析はできないが、安土および安曇川の結果から、堆肥、稲わらとともに数年以上連用すれば安定した増収効果が期待できると考えられる。

次に、水稲の養分吸収量および稲体の成分含有率について考察する。有機物および土づくり肥料の連用によって、N, SiO₂およびKの吸収量が増加したが、PおよびCaの吸収量はほとんど増加しないか、または低下した。この中で、わら部の珪酸含有率が増加してカルシウム含有率が低下するという相反する現象については、吉田³⁰⁾が水耕栽培において、無珪酸区水稲のカルシウム含有率が珪酸加用区に比べてかなり高い値を示すことを報告し、カルシウムが細胞膜成分としての珪酸の役割を部分的に代替したものと考察している。また、これまで報告された有機物および土づくり肥料の連用試験において、窒素、珪酸およびカリウムの吸収量の増加は認められているが、リン吸収量の低下についてはほとんど考察されていない。MA and TAKAHASHI⁸⁾は、水耕栽培において、培養液中のリン酸濃度が高くなるにつれ、珪酸の添加によって水稲の生育が増加したにもかかわらず、リン酸の吸収量が減少するのに対し、リン酸濃度が低い場合には若干増加することを認めている。そして、土壌の可給態リン酸の少ないときの珪酸施用の効果は、主として吸収したリンの初部への転流促進にあると推察している。本

試験では、いずれの調査地でも、わら還元区に比べて、総合改善区のわらのリン含有率が有意に低下したのに対し、粃のリン含有率はほとんど低下（木之本の総合改善3区を除いて）しなかった。また、総合改善区で稲作時のリン酸施肥を省略しても減収せず、リンの吸収量も低下しなかったことから、可給態リン酸が改良目標値に達した土壤では、珪酸の施用によってリン酸吸収が抑制されるものの、粃部への転流が促進される可能性も考えられ、今後の重要な研究課題といえよう。

中田¹⁰⁾は、わら堆肥を40年連用した旧・滋賀農試ほ場（灰色低地土）の跡地土壤でも、リン吸収量の低下を認めている。同じく、旧・滋賀農試ほ場の水稻・小麦の二毛作体系でも、リン酸（ P_2O_5 ）として7.5kg/10a程度を裏作麦に施用すれば、水稻・小麦の収量は20年間低下せず、地力維持の観点からも合理的と判断されている¹⁷⁾。筆者らは、最近の本県農耕地土壤の実態調査でも、水田土壤の可給態リン酸含量が増加傾向にあり、改良目標値を上回る地点が多いことを認めている³⁰⁾。したがって、土壤蓄積リン酸を水稻作付期に有効化させ、リン酸施肥量を低減することは、リン資源の有効利用と環境への流出負荷軽減の観点からも重要であり、可給態リン酸の診断法の検討も含め²⁹⁾、継続して調査中である。

土づくり肥料の併用による粃のN含有率低下については、これまで多くの報告^{1, 9, 27)}があるように、石灰による土壤有機物の分解促進効果に加え、珪酸の供給によって光合成が促進され、乾物重が増加して希釈効果をうけたためと推察される。わら還元区および総合改善区における成熟期のわらの珪酸含有率（平均値、表7）は、安土12~13%、安曇川7~10%、木之本9~11%の範囲にあり、今泉・吉田⁴⁾が示した珪酸質肥料の要否判定基準（11%以下では肥効が顕著に期待され、11~13%では期待される）を考慮すると、良食味米生産の観点からも珪酸を含む土づくり肥料を併用する意義があると考えられる。

最後に、有機物および土づくり肥料の連用によるN施肥節減効果について考察する。筆者らは、安土の総合改善区において、施肥Nの水稻利用率が約50%であることを認めており²¹⁾、これをもとに化学肥料単用区に対する有機物施用区のN吸収増加量（図3）を施肥量に換算すると、安土0.8~2.9、安曇川1.3~2.5、木之本1.7~2.8kgN/10aの範囲にあった。したがって、化学肥料単用区と同等の水稻N吸収量を得るには、有

機物連用によって1~3kgN/10aの施肥節減が可能であるが、施肥Nの利用率は、施肥体系、土壤タイプ、気象条件などの相異によって変動すると考えられる。鳥山³³⁾は、窒素肥料の低投入を可能にする土壤管理法の検討に利用可能な新しい水田生産力指標を提案している。本指標は、同一収量を得るために必要とするN施肥量を表すもので、収量とN施肥量の比例関係が保たれる範囲で目標収量（例えば、500kg/10a）を設定すれば、無窒素区の収量、三要素区（化学肥料単用区）の収量およびN施肥量のデータをもとに計算でき、有機物施用区のそれと比較することによって、同一収量を得る場合に削減可能な施肥量を推定できる（表12の注）。そこで、まず、各調査地の代表的な試験区および無窒素区について、1988~97年における全ての窒素吸収量と精玄米重との比例関係について検討した結果、精玄米重600kg/10a以下では、水稻のN吸収量と精玄米重とがほぼ同一直線上にプロットできた（図5）。つまり、本試験では収量と窒素施肥量の比例関係が保たれ、しかも施肥体系（基肥、追肥、穂肥の施肥配分）をほとんど変更しなかった（安土では、1994年以降、追肥を減肥）、目標収量を550kg/10aに設定して本指標の利用が可能である。表12に示したとおり、有機物および土づくり肥料の連用によるN施肥節減効果は、安土0.8~1.1、安曇川1.2~2.4、木之本1.4~2.0kgN/10aとなり、概ね1~2kgN/10aの範囲にあった。本試験は、1998年以降、品種をコシヒカリに変更し、有機物施用区では施肥量を化学肥料単

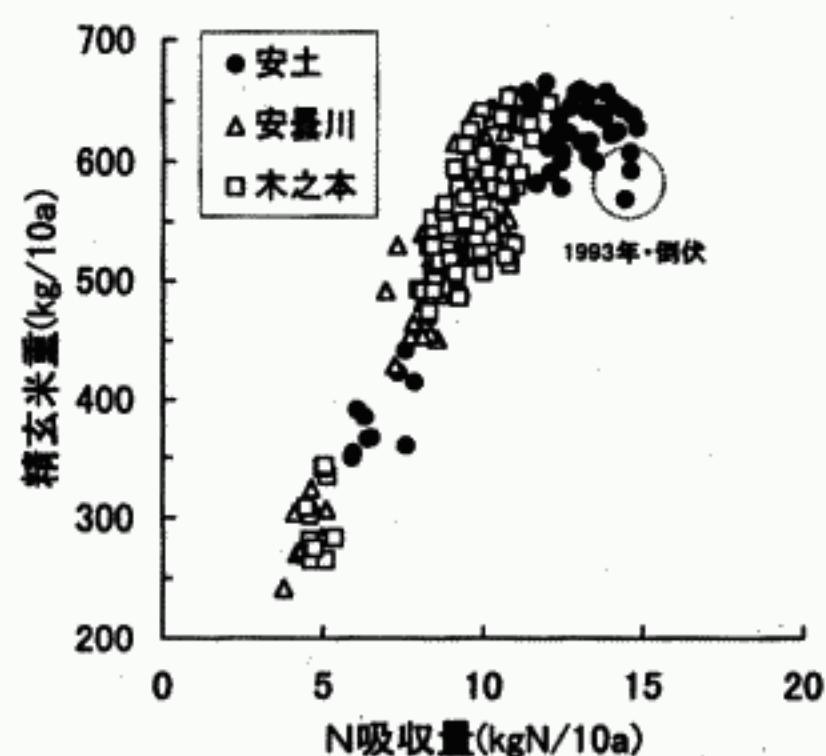


図5 水稻の窒素吸収量と精玄米収量との関係

注) 表12に示した化学肥料単用区、堆肥施用区、稲わら全量還元区および総合改善区ならびに無窒素区について、1988年~97年のデータをプロット。

水稻に対する有機物および土づくり肥料の連用効果

表12 有機物および土づくり肥料の連用による水田生産力指標の改善効果 (1988～97年の平均値)

調査地	試験区	精玄米重 (kg/10a)	水田生産力指標 (kgN/10a)	改善効果 (kgN/10a)
安 土	化学肥料単用	600	7.21	—
	堆肥 2 t	637	6.15	1.06
	稲わら全量還元	626	6.44	0.78
	総合改善	627	6.41	0.80
安 曇 川	化学肥料単用	506	11.99	—
	稲わら全量還元	530	10.82	1.17
	総合改善 (1)	548	10.08	1.91
	総合改善 (4)	560	9.64	2.35
木 之 本	化学肥料単用	519	10.27	—
	堆肥 2 t	553	8.89	1.38
	稲わら全量還元	570	8.33	1.94
	総合改善 (2)	572	8.27	2.00

注：1) 目標収量を550kg/10aと設定した場合の水田生産力指標 (N_f) の計算式

$$N_f = N_{sp} \times (550 - Y_o) / (Y - Y_o)$$

N_{sp} : 化学肥料単用区の窒素施肥量 Y : 各試験区の精玄米重 Y_o : 無窒素区の精玄米重

2) 無窒素区の精玄米重: 安土385, 安曇川285, 木之本300kg/10a.

3) 施肥量: 安土9.4, 安曇川10.0, 木之本9.0kgN/10a.

4) 改善効果は, 化学肥料単用区に対する施肥節減量を示す.

用区に比べて1kgN/10a減肥して実施しているが、本指標値を裏付ける収量結果が得られている²²⁾。したがって、今後は、生産安定と併せて、施肥節減や食味向上の観点からも継続して調査する必要があると考える。

本報では、1997年までの試験結果について、水稻の生育収量、養分吸収および土壌の化学性の変化をとりまとめたが、養分の収支や動態を明らかにして、総合的に土壌管理法を評価する必要がある。現在、土壌の可給態養分の分析法や動態解析法の改良・開発が進み^{13, 26, 32)}、有機物の分解や養分循環の担い手である土壌微生物の定量的把握も可能となったことから^{20, 21)}、水田の持つ物質循環機能や環境保全機能を向上させる土壌施肥管理技術を確立することが今後益々重要になると考える。

謝 辞

本長期連用試験を実施するに当たり、滋賀県農業試験場環境部土壌肥料係、旧・総合技術部土壌調査係、湖北分場および湖西分場の歴代の関係職員から多大な御協力を頂いた。また、とりまとめに際して、当場の長谷川清善博士、大橋恭一博士から有益な御助言を頂いた。京都大学名誉教授の高橋英一博士、農林水産省

北陸農業試験場の鳥山和伸博士には本稿の御校閲を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 安藤 豊・藤井弘志・横山克至・森 静香・柴田 康志・小南 力: ケイ酸施用と精米中のタンパク質含有率について. 土肥要旨集43, 153, 1997.
- 2) 土壌保全調査事業全国協議会編: 日本の耕地土壌の実態と対策. 271-273, 博友社, 東京, 1991.
- 3) 堀野俊郎: 米のミネラル成分と食味. 稲と米—品質を活かす—, 67-86, 農研センター・生研機構, 1989.
- 4) 今泉吉郎・吉田昌一: 水田土壌のケイ酸供給力に関する研究. 農技研報, B 8, 261-304, 1958.
- 5) 神谷径明・大石達明・嶋田昭史・水本順敏・堀 兼明: 中粗粒灰色低地土水田における有機物および珪カルの連用が土壌および水稻に与える影響. 静岡農試研報38, 1-10, 1994.
- 6) 加藤弘道・茂垣慶一・本田宏一・石川 実: 火山灰水田における有機物の連用効果に関する研究 (第1報) 有機物の連用が水稻の生育・収量および養分吸収に及ぼす影響について. 茨城県農業試験場研究報告25, 37-54, 1985.

- 7) 近畿農政局滋賀統計情報事務所編：滋賀の水稲（昭和50～平成9年），滋賀農林統計協会。
- 8) MA J. F. and TAKAHASHI E. : Effect of silicon on the growth and phosphorous uptake of rice. *Plant and Soil* 126, 115-119, 1990.
- 9) 間藤 徹・村田伸治・高橋英一：イネへのケイ酸施用が有用である理由。土肥誌62, 248-251, 1991.
- 10) 宮川 修・塩口直樹・島田義明：石川県下の異なる土壌タイプの水田への有機物連用が土壌理化学性と水稲収量に及ぼす影響。石川県農業総合試験場研究報告18, 21-31, 1994.
- 11) 中田 均：肥料三要素および堆肥の長期連用が土地生産力に及ぼす影響の数値統計的解析。滋賀農試特別研報13, 1-108, 1980.
- 12) 中村 稔・辻 藤吾・大西功男・永井嘉和・鉾山和幸：積雪地における稲わらの秋鋤込み方法について。滋賀農試研報31, 14-21, 1990.
- 13) 南條正巳：多様な水稲栽培様式における水田土壌肥料研究の現状と方向。1. 水田土壌における養分動態研究の進歩。その2-リン酸-。土肥誌67, 317-321, 1996.
- 14) 西 忠泰：滋賀県における1993年の水稲作柄の実態とその解析。1993年の近畿地方におけるイネの冷害に関する報告会。近畿作育研究39, 73-76, 1994.
- 15) 野地良久・藤谷信二・上野通宏・沢本敬男：有機物の長期連用が土壌の理化学性と水稲の生育に及ぼす影響。大分県農業技術センター研究報告23, 1-12, 1993.
- 16) 農林省中国農業試験場・中国地域技術連絡会議事務局：水田における稲、麦わらの施用法に関する研究。中国地域共同研究成果収録5, 1970.
- 17) 農林水産技術会議事務局・滋賀県農業試験場：水稲に対する磷酸肥料の効果に関する試験。指定試験（土壌肥料）第3号, 1-142, 1963.
- 18) 農林水産省農蚕園芸局農産課編：土壌環境基礎調査における土壌、水質及び作物体分析法。1-202, 1979.
- 19) 柴原藤善・河村政彦・小林正幸：水田におけるわら施用が排水水質および土壌微生物に及ぼす影響-とくに稲わら施用による水稲非作付期の硝酸塩流出軽減について。滋賀農試研報35, 1-18, 1994.
- 20) SHIBAHARA F. and INUBUSHI K. : Effects of organic matter application on microbial biomass and available nutrients in various types of paddy soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43, 19-203, 1997.
- 21) SHIBAHARA F., YAMAMURO S. and INUBUSHI K. : Dynamics of microbial biomass nitrogen as influenced by organic matter application in paddy fields. I. Fate of fertilizer and soil organic N determined by ¹⁵N tracer technique. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44, 167-178, 1998.
- 22) 柴原藤善：稲わら秋鋤込みによる窒素流出負荷の軽減効果と微生物バイオマス窒素の評価。近畿中国地域における新技術33, 78-80, 1998.
- 23) 志賀一一：水田の有機物施用基準について。土肥誌55, 374-380, 1984.
- 24) 滋賀県農林水産部農産普及課：土づくり技術対策指針。68-69, 1997.
- 25) 篠田正彦・安西徹郎：グライ土水田の水稲に対する有機物の連用効果（第4報）有機物の連用が13年間にわたるコシヒカリの生育収量に及ぼす影響。千葉農試研報39, 59-69, 1998.
- 26) 住田弘一：多様な水稲栽培様式における水田土壌肥料研究の現状と方向。1. 水田土壌における養分動態研究の進歩。その3-ケイ酸-。土肥誌67, 435-439, 1996.
- 27) 高橋英一：ケイ酸植物と石灰植物。作物の個性をさぐる。自然と科学技術シリーズ, 54-138, 農文協, 東京, 1987.
- 28) 高柳英夫・久保田勝・岩本信義・長井 隆：粘土質水田における稲わらの連用が水稲の生育収量および土壌の理化学性に及ぼす影響。新潟農試研報33, 95-105, 1983.
- 29) 武久邦彦・長谷川清善・上沢正志：アスコルビン酸で還元処理した土壌による水田土壌の可給態リン酸の診断法。滋賀農試研報39, 43-46, 1998.
- 30) 武久邦彦・柴原藤善・小松茂雄：滋賀県における農耕地土壌の実態と変化（第1報）最近5年間の土壌理化学性の実態。滋賀農試研報40, 39-53, 1999.
- 31) 辰巳 真・中尾知二・吉村修一・須見司郎・西垣誠二：水田における稲わらの連用効果。大阪農技

- セ研報22, 25-30, 1985.
- 32) 鳥山和伸：多様な水稻栽培様式における水田土壌肥料研究の現状と方向. 1. 水田土壌における養分動態研究の進歩. その1-窒素-. 土肥誌67, 198-205, 1996.
- 33) 鳥山和伸：施肥窒素の玄米生産効率に基づく水田生産力の指標化. 平成9年度総合農業の新技术11, 180-184, 1998.
- 34) 津田和久・片山 理・小林秀臣・文屋千代・城山 豊：灰色低地土水田における有機物とけいカルの連用効果（第1報）土壌の理化学性に及ぼす影響. 京都農研報17, 51-59, 1995.
- 35) 上沢正志：化学肥料・有機物の連用が土壌・作物収量に与える影響の全国的解析. 農業技術46, 393-397, 1991.
- 36) 吉田昌一：水稻体内におけるケイ素の存在様式と生理的意義に関する研究. 農技研報B15, 1-58, 1965.

Summary

Effects of long-term application of organic matter (harvested rice straw or rice straw compost) and/or soil improvement fertilizer (calcium silicate and/or fused magnesium phosphate, etc) on the crop yield and nutrients uptake of rice (*Oryza sativa*, var. Nipponbare) and the chemical properties of soil were examined. The experiments were carried out from 1975 to 1997 in three different paddy fields: Azuchi Gley soils of the Central Station, Adogawa Brown Lowland soils of Western Branch Station, and Kinomoto Gley soils of Northern Branch Station.

The average potential for brown rice production in plots without application of organic matter (OM) and soil improvement fertilizer (SIF) and nitrogen fertilizer in the cropping season was 3.8 in Azuchi, 3.0 in Adogawa, and 3.3 Mg/ha/y in Kinomoto field, respectively. Continuous incorporation of OM and/or SIF in autumn increased brown rice yield on an average by 5-7% in Azuchi after 1981, 5-14% in Adogawa after 1983, and 5-15% in Kinomoto after 1992, respectively, as compared to plots without OM and SIF application. In Kinomoto located in a snowy area, spring incorporation of OM two months before cultivation decreased that effect below 4% until 1991.

The contents of soil organic carbon and nitrogen in the plots without OM application declined gradually during the experiment years, whereas continuous application of harvested rice straw (7-8 Mg/ha/y) or rice straw compost at the rate of 10 Mg/ha/y enabled maintainance of original levels. Continuous application of SIF containing phosphate and silicate increased their available contents in soils to suitable levels or above.

The brown rice yield was closely related to the uptake amounts of nitrogen, potassium and silica, respectively. The average rates of uptake derived from annually applied OM and/or SIF during 1988-1997 was estimated to the range of 16-29% for nitrogen, 0-8% for phosphorus, 8-28% for potassium, and 18-39% for silica, respectively. The application of phosphate fertilizer in the cropping season could be omitted in the plot with OM and SIF application. In these plots, the available phosphate content of soil had reached a suitable level.

These results indicate that continuous application of organic matter (rice straw or straw compost) and soil improvement fertilizer in autumn over several years contribute to sustainable rice production and to reducing the amount of fertilizer application required during the cropping season.