愛媛農水研果樹セ研報
第２号　1-91（2010）

第１章　緒　言

カンキツ類は西南暖地を中心とする傾斜地で多く栽培されている．全国的なカンキツ園の傾斜度は，15度以上の急傾斜地の割合が40％以上を占め，リンゴなどの落葉果樹に比べて極めて高い．特に，愛媛県のカンキツ産地は急傾斜地の割合がウンシュウミカンで68%，中晩生カンキツ類においても64％と主産県の中では最も高率である（愛媛県農産園芸課編，2006）．急傾斜地園は排水性が良く高品質果実生産には適しているが，大部分の園地が手開墾で開園されたことから大型機械の導入が困難であり，多くの栽培管理は手作業に頼らざるを得ない状況が続いている．しかし，本県の果樹農家は後継者不足から，生産者の72％程度が60歳以上と高齢化が進んでおり（愛媛県農産園芸課編，2006），慢性的な労働力不足に陥っている．

このため，省力化が可能な管理作業はその方法に変化がみられ，雑草防除については，かつての中耕や刈払いから除草剤散布を中心とした作業に変遷している．この除草剤の利用によって雑草管理作業は大幅に省力化され，年間の10a当たりの作業時間は，草削りの約4日，動力刈払い機の約2日に対して僅か6時間で作業を終えることが可能とされる（鈴木，1994）．ただし，除草剤を連用した土壌管理には問題点もあり，園内に発生する草量の著しい減少から有機物の還元量が減り，土壌中の腐植含量や土壌バイオマスを低下させることが指摘されている(岩切ら，1977；鈴木，1989；高橋ら，1978)．また，地表面の裸地化は，傾斜地園では土壌侵食を助長し地表面の肥沃な土壌を流出させることが報告されている(花野ら，1996；坂本，1963；吉川・高橋，2005)．このような土壌の物理化学性の悪化は，栽培樹種の生産性を低下させる危険性を秘めている（峯・小田，1985；坂本ら，1961；高木ら，1963；丹原・栗原，1963）．それを回避するためには，園外から堆肥などの有機物を投入する必要があるが，労働性や経済性などの理由から本県の果樹園における堆肥類の投入率は19％未満と極めて低く，投入量も0.2ton/10a程度と少ないのが現状である（三木，2004）．

これに対して，草生栽培は草の発生と枯死により，園内で有機物を生成し還元することが可能である．このため，園外から有機物を投入しなくても地力を維持できることが知られている(笠原・渡辺，1982；坂本ら，1965；渡辺，1968)．しかし，草生栽培にも問題点があり，草の生育期には樹体との養水分の競合が発生する(江口ら，1959；森・定盛，1955；佐藤・佐々木，1982；山崎，1987)．草種についても，雑草草生は一般に還元される草量が少なく(鈴木，1989)，多種多様な草が混在し発生の時期と生育程度が揃わないため，画一的な管理を行い難いことが指摘されており（横田，2000），強害雑草の侵入も懸念される．草量の多い牧草類を導入した場合は，草生の維持に労力を要し，頻繁に刈払いを行うとともに，雑草による駆逐を防ぐため数年ごとに草種を更新する必要があるとされる(菊地,2000)．また，草生栽培を行うと草が足元を遮るため各種の管理作業の邪魔になり，樹体との養水分競合を回避するためにも、雑草草生であっても年間最低3～4回の刈払いが必要とされている（岩本，1982）．しかし，労働力不足が進

む中で，傾斜地カンキツ園における草刈り作業は生産者にとって容易なことではなく，周年の草生栽培はほとんど定着していない．

また，カンキツ園における施肥管理については，樹勢維持と安定生産のためウンシュウミカンでは年間窒素成分量で20～25kg/10aを2～3回に分けて施用しており，中晩柑は32～35 kg/10aを4回程度に分施している．施肥に必要な労働時間は，年間の全作業時間の4%程度と少ないものの（農水省大臣官房統計部編，2008），急傾斜地におけるこの作業は労働強度の面からみれば各種管理作業の中で心拍増加率の最も高い強労働であることが指摘されている（関野ら，1998）．このため，急傾斜地における施肥作業は，高齢化が進む生産者にとって大きな負担となっている．

このような状況に加えて，近年，環境への社会的な関心が非常に高まり，農業分野においても農薬問題とともに施肥窒素に起因する地下水汚染が問題となっている．全国レベルの調査では，果樹園・野菜畑地帯において硝酸態窒素汚染地が広く分布していることが指摘されている（熊澤，1999）．地下水の硝酸態窒素濃度が環境基準に適用されて以来，愛媛県でも毎年調査を実施しているが，概況調査では例年7～14%の地点から，定期モニタリング調査では17～30%の地点から基準値である10mg/L以上の硝酸態窒素が検出されている．また，超過地点の周辺調査では50～90%の割合で環境基準を上回る場合があることが報告されており，その汚染原因は多くが施肥と推定されている（愛媛県環境政策課編，2008）．

ウンシュウミカンの施肥窒素の利用率は，解体調査などによる推定値では約50%とされ（浅見，1951），^{15}Nトレーサー法を用いた報告では春肥25%，夏肥61%，秋肥41%とされる（赤尾ら，1978；久保田ら，1976b）．これらの数値は，逆に施肥窒素の約50%以上が樹体に利用されていないことを示しているため，窒素溶脱量を減少させて環境負荷の軽減を図るためには，この利用率を向上させることが重要なポイントになると考えられる．しかし，多くの労力を必要とする草生栽培が敬遠され，除草剤を連用した土壌管理が主流となっている現在，施肥窒素の利用率を向上させカンキツ園土壌から溶脱量を減少させることはかなり困難な状況になっていると推測される．

これらのことから，愛媛県果樹研究センターでは，カンキツ園における施肥窒素の利用率向上とそれに伴う環境負荷軽減，加えて強労働である施肥作業を省力化して生産者の労働負担の軽減を図るため，土壌管理および施肥管理法の改善について摸索し，手法として主に^{15}Nトレーサー法を活用した検討を重ねてきた．

本論文は，まず，カンキツ園においても省力的な草生管理が可能と期待されるナギナタガヤ（*Vulpia myuros*）を導入した草生園における施肥窒素や枯死したナギナタガヤに由来する窒素の吸収特性を解析し，環境負荷軽減効果を検討した．次いで，年間施肥の中で最も利用率の低い春肥について施肥時期を再検討し，吸収窒素の動態や利用率から最適な施用時期や削減可能な窒素量を明らかにした．併せて，春季の葉面散布尿素について，樹体内での移行特性や土壌施肥の代替効果を検討した．最後に，施肥作業の省力化と施肥量削減のために，肥効調節型肥料の利用を検討するとともに，スプリンクラーを活用した液肥の樹上散布における散布窒素の吸収特性および利用率を解明した．

第２章　ナギナタガヤ草生条件下における施肥窒素の動態

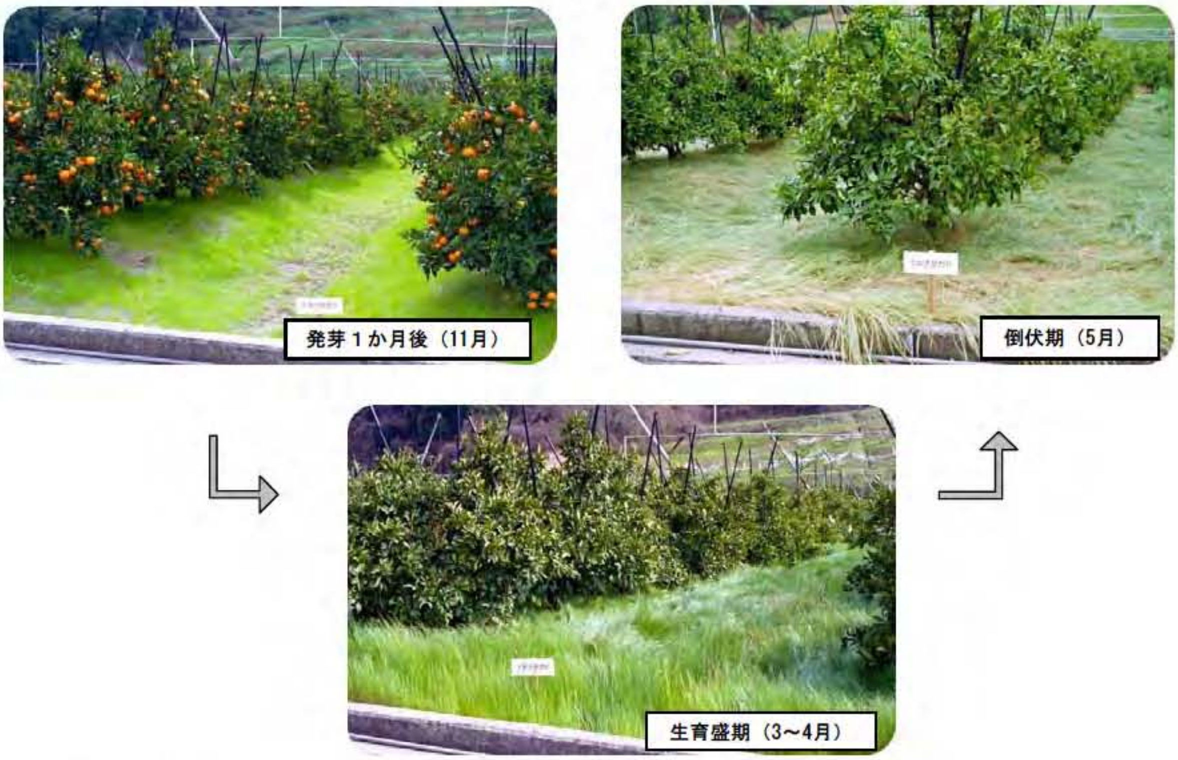
果樹園における草生栽培に関する研究については既に多くの報告があり，これらの中には草生による土壌環境の変化，草生が樹体や収量・果実品質に及ぼす影響を長期間にわたり詳細に検討した事例もみられる(笠原・渡辺，1982；坂本ら，1965；高辻ら，1987；渡辺・笠原，1982；渡辺，1968)．しかし，カンキツ園の草生条件下における施肥窒素の樹体や草種による吸収特性について，定量的な手法で検討した研究例は極めて少なく，不明な点が多く残されている．

近年，果樹園ではカバークロップの利用が再び注目されている(柴田，2005)．特に，ナギナタガヤは落葉果樹よりも矮性で亜主枝を低い位置に配置するカンキツ園でも容易に導入できるため，その普及が急速に進んでいる．ナギナタガヤは1年生の寒地型イネ科草種であり(長田，1989)，愛媛県においては概ね10月頃に発芽し，5～15㎝程度の草高で越冬する．その後，気温が上昇し始める翌春の3月上旬から伸長を再開し，4月には草高60㎝程に達して生育盛期を迎え，出穂後自重で倒伏して5月中下旬に枯死する（第1図）．このため，春季に刈り払う必要がなく，しかも枯死後は敷き草状態となって地表面を被覆するため，雑草の発生を長期間に渡って抑制することが可能である．カンキツ生産者は，このようなナギナタガヤの有用な特性に着目し，雑草管理の省力化や有機物補給による土壌改良効果を期待して導入している例が多い．

一方，このナギナタガヤ草生栽培は，雑草管理以外にも，社会的な問題となっている施肥窒素の溶脱に起因する環境負荷を軽減する一策として注目されている．これは，樹体の施肥窒素の吸収に加えてナギナタガヤによる窒素吸収を利用し，園全体としての窒素利用率の向上を図ることによって，溶脱窒素量の減少を期待したものである．しかし，実際に本種をミカン園に導入した際の施肥窒素の時期別吸収量やミカン樹との競合関係，あるいは環境負荷軽減効果などについては明らかにされていない．

また，ナギナタガヤは発芽から枯死までの間に生育に必要な窒素を土壌中から吸収するが，その吸収量は一般的な肥培管理を行っているミカン園においては約9.5kg/10aにも及ぶことが知られている（石川・木村，2006）．枯死後，植物遺体となったナギナタガヤは微生物による分解を受け，吸収窒素を徐々に放出してミカン園土壌に還元し，その一部はミカン樹に利用されるものと推測される．しかし，枯死したナギナタガヤに由来する窒素のミカン樹や再発生するナギナタガヤによる吸収時期や量についても解明されていない．

これらのことから，ウンシュウミカン栽培において，ナギナタガヤの生育期間中に施用される春肥および秋肥のミカン樹とナギナタガヤによる吸収特性や利用率を把握するため，^{15}N標識硫酸アンモニウムを施用し解体調査を行った．次いで，育成した^{15}N標識ナギナタガヤを枯死期にミカン樹の樹冠下に施用し，樹体や再発生したナギナタガヤによる吸収時期や吸収量を追跡調査した．併せて，圃場条件下の成木ウンシュウミカン園おける，連年のナギナタガヤ草生栽培が土壌や樹体，収量および果実品質に与える影響について検討を行った．



第１図　ナギナタガヤの生育ステージ　（愛媛県果樹研究センター圃場）

第１節 ナギナタガヤ草生ミカン園における春肥窒素の吸収特性

ナギナタガヤの生育盛期に施用される春肥窒素のウンシュウミカンおよびナギナタガヤによる吸収特性について，ポット栽培条件下において^{15}Nトレーサー法を用いて検討した．

１）乾物重・全窒素含有率

材料および方法

愛媛県果樹研究センター内において容積約60Lの黒色ポット（上面半径24cm，下面半径21cm，高さ40cmの逆円錐台形）に植栽されている3年生‘南柑20号’を1区3ポット供試し，ナギナタガヤ草生区（以下草生区）および清耕裸地区（以下裸地区）を設けた．草生区については，生育初期のナギナタガヤによる秋肥窒素の吸収に伴う樹体への影響を避けるため，別の圃場において2000年10月中旬に播種し（播種量：約8g/m^{2}換算量・雪印種苗社製の種子），育成していたナギナタガヤを2001年2月にポットに移植した．なお，ポットの土壌は，2000年3月の苗木植え付け時に花崗岩質土壌（中粗粒褐色森林土，約50L/pot）と牛糞オガクズ堆肥（約10L/pot）を混合したものを用いた．

供試肥料として^{15}N標識硫酸アンモニウム(10.3atom%)を用い，N:10kg/10a換算量(8.18g/pot)を2Lの水に溶かし，2001年3月14日に施用した．リン酸およびカリは，過燐酸石灰(7.93g/pot)と硫酸カリ(3.08g/pot)を施用した．供試ポットは，施肥前までは露地栽培を行い，施肥後は側面を解放したガラス室内に移し，解体時まで管理した．かん水は施肥後

から解体時まで4～5日間隔で実施し，1回当たり6～9㎜とした．

解体は，一般的なミカン栽培での夏肥施用時期に当たる2001年6月6日～11日にかけて，樹体を新葉，新梢，幼果，旧葉，1年枝，2年枝，主幹，細根，小中根，大根根幹に分けて実施した．また，施肥時から解体時まで旧葉や花器などの落下物を適宜採取した．ナギナタガヤは倒伏した穂部からの種子の脱落を防ぐため地上部を5月31日に刈り取り，地下部は樹体の解体時に採取した．

調査は，解体時に旧葉と新葉の着生数を測定するとともに，樹体およびナギナタガヤ各器官の乾物重，全窒素含有率について行った．全窒素分析はケルダール法により実施した．

結　果

樹体の乾物重は，総量では草生区の方が裸地区より11％程度少なかった．これを器官別にみると，特に新葉における差異が大きく，裸地区の50％以下であった（第1表）．また，草生区では新葉の着生数が減少し，1葉重も裸地区の66％程度であった（第2表）．ナギナタガヤの乾物重は樹体の24％程度と少なかった．ナギナタガヤは地上部の割合が高く，草体の85％程度であった．

樹体の全窒素含有率は，草生区では新葉，1年枝，2年枝，細根などにおいて裸地区より低い傾向にあったが，有意な差ではなかった．また，全窒素量についてみると，樹体では新葉および1年枝において，草生区の方が裸地区より有意に少なかった．総量でも草生区の方が18％程度少なかった．一方，ナギナタガヤの全窒素量は樹体の21％程度であった（第1表）．

第１表　春肥試験における‘南柑20号’およびナギナタガヤの乾物重，全窒素含有率，全窒素量

部　位	乾物重(g/pot [y])		全N含有率 (%)		全N量(g/pot [y])	
	草生区	裸地区	草生区	裸地区	草生区	裸地区
（樹　体）						
新　葉	21.1	45.0 *[z]	2.74	2.97	0.59	1.34 *
新　梢	4.3	6.1	2.40	2.19	0.11	0.13
幼　果	12.0	15.7	2.47	2.42	0.30	0.38
旧　葉	60.1	62.0	2.45	2.48	1.46	1.51
１ 年 枝	32.7	36.8 *	1.29	1.42	0.42	0.52 *
２ 年 枝	49.4	58.6	0.75	0.81	0.37	0.46
主　幹	37.4	37.6	0.60	0.64	0.23	0.24
細　根	87.6	91.8	1.95	2.08	1.67	1.88
小 中 根	35.6	41.8	1.31	1.18	0.46	0.48
大根根幹	59.2	50.7	0.87	0.76	0.51	0.39
落下旧葉	22.3	23.4	2.27	2.42	0.50	0.57
落 花(果)	31.5	40.2	3.48	3.65	1.09	1.47
樹全体	453.1	509.6	1.70	1.84 *	7.70	9.36 *
（ナギナタガヤ）						
茎葉･穂	91.9	－	1.58	－	1.45	－
根	16.4	－	1.19	－	0.20	－
ナギナタガヤ全体	108.3	－	1.52	－	1.65	－
合 計	561.4	509.6			9.35	9.36

[z] *:t検定において5%レベルで有意差があることを示す(n=3)
[y] 容積約60Lのpot

第２表 ナギナタガヤ草生栽培が‘南柑20号’の旧葉および新葉に及ぼす影響

試験区	旧葉		新葉	
	着葉数 [y]	1葉重(mg DW)	着葉数 [y]	1葉重(mg DW)
草生区	326.3	178.7	500.0	41.8
裸地区	320.0	184.1	743.7	62.9
有意性 [Z]	NS	NS	＊	NS

[Z] ＊:t検定において5%レベルで有意差があることを示す(n=3)
[y] 解体時の着生葉，1pot平均値

２）吸収量および利用率

材料および方法

前項の供試試料について^{15}N濃度の測定を行った．^{15}N分析は狩野ら(1974)の方法に準じて発光分析法（日本分光社製 N-151アナライザー）により実施した．施用後，樹体およびナギナタガヤに吸収された^{15}Nは，赤尾ら（1978)および犬塚・高辻（1992）の方法に則り，施肥窒素の吸収量（A），^{15}N寄与率（B），施肥窒素の利用率（C）を以下により算出した．

A＝試料中の全窒素量×D／E

D＝試料中の^{15}N excess ％

E＝施肥窒素中の^{15}N excess ％

^{15}N excess ％＝

^{15}N atom ％－^{15}N天然存在率(0.366％)

B＝A／試料中の全窒素量×100

C＝A／施肥窒素量×100

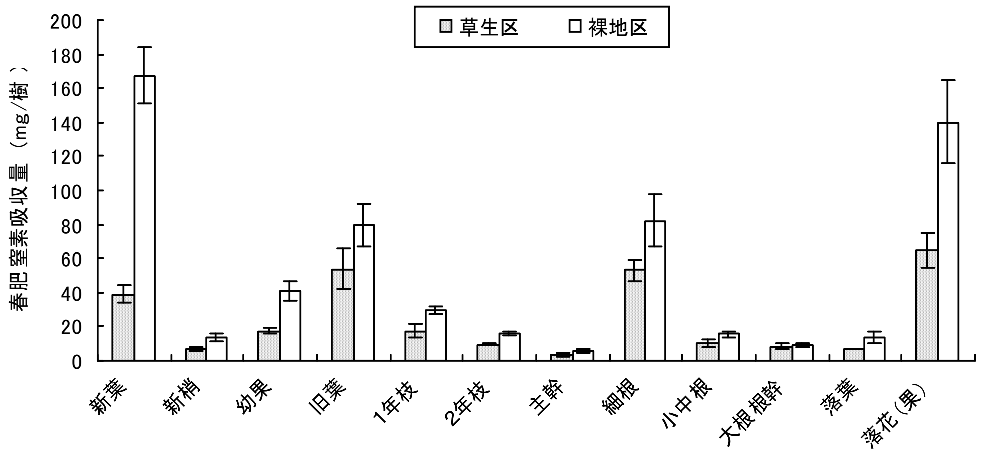
なお，本論文中における^{15}Nトレーサー法を用いた試験は，全て上記の方法で施用窒素の吸収量，動態，利用率などを評価した．

結果

ミカン樹による春肥窒素の吸収量を器官別に比較すると，いずれの器官においても草生区の方が裸地区より少なく，特に新葉における差異が最も大きく，次いで落花（果），幼果，新梢の順であった（第2図）．^{15}N寄与率は，両区に共通する傾向として，新葉，新梢，幼果，落花（果）などの新生器官が，他の器官に比べてかなり高率であった．また，^{15}N寄与率は春肥の窒素吸収量を反映し，いずれの器官においても裸地区の方が草生区より有意に高く，特に新生器官における差異が大きかった（第3図）．樹体内における吸収窒素の分布割合は，両区とも新葉，旧葉，細根，落花（果）などで高かった．これらの器官について比較すると，草生区は裸地区に比べ新葉において低く，旧葉・細根ではやや高い傾向がみられた（第4図）．

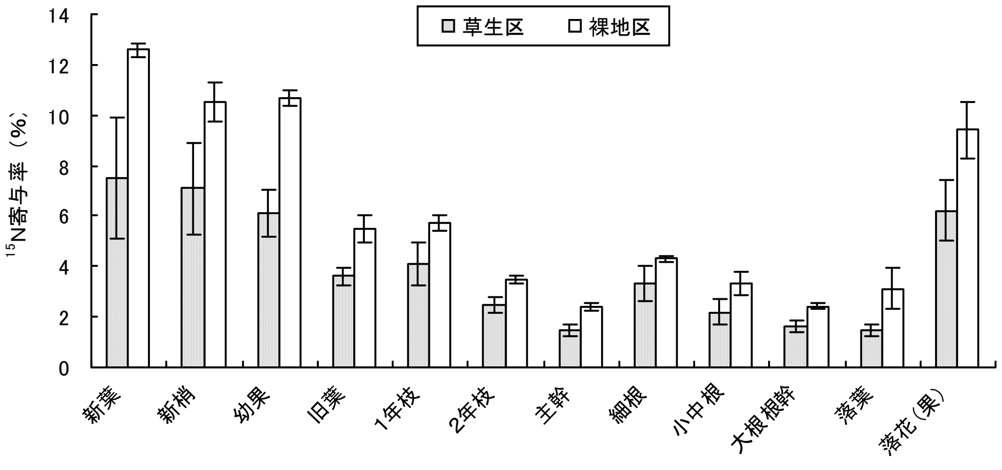
ナギナタガヤによる春肥窒素の吸収量は草生区の樹体による吸収量の約2倍であり，^{15}N寄与率は樹体に比べ著しく高かった（第5図）．また，ナギナタガヤによって吸収された春肥窒素は大部分が地上部に分布しており，^{15}N寄与率も地下部が19％であったのに対し地上部は40％と高かった（第6図）．

解体時までの樹体全体における春肥窒素の吸収量は，草生区が裸地区の47％と顕著に少なく，利用率は草生区16.7％，裸地区35.3％であった．しかし，ナギナタガヤによる吸収量を加えた草生区の利用率は51.6％となり，裸地区の約1.5倍であった（第5図）．



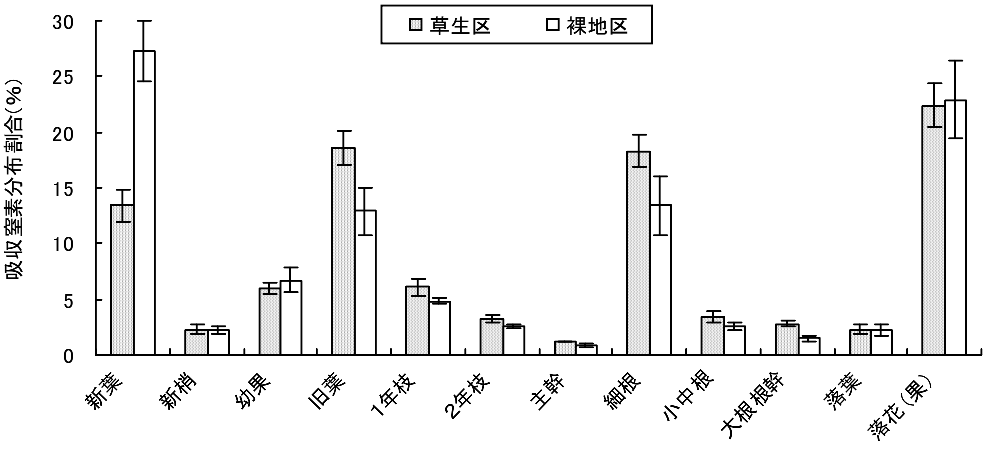
第２図　ナギナタガヤ草生区および裸地区における‘南柑20号’の器官別春肥窒素吸収量

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



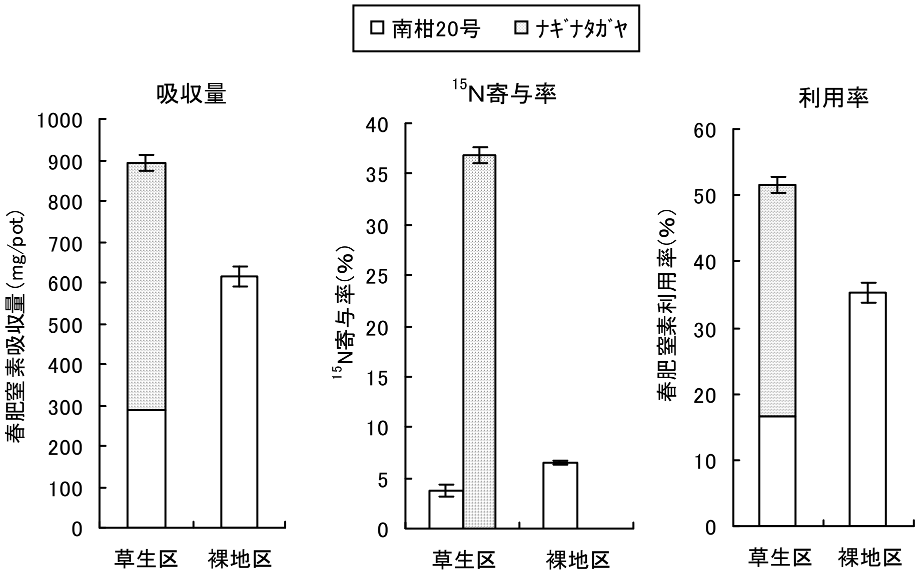
第３図　ナギナタガヤ草生区および裸地区における‘南柑20号’の器官別^{15}N寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



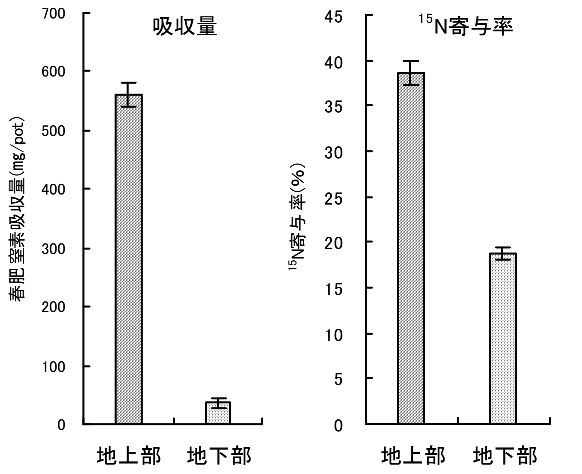
第４図　ナギナタガヤ草生区および裸地区における‘南柑20号’の器官別吸収窒素分布割合

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第５図　ナギナタガヤ草生区と裸地区の春肥窒素吸収量，利用率および^{15}Ｎ寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第６図　ナギナタガヤの春肥窒素吸収量および^{15}Ｎ寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）

３）考　察

ナギナタガヤによる春肥窒素吸収特性

ウンシュウミカンの春肥は一般に3月に施用されるため，寒地型草種であるナギナタガヤを導入した園地では，施用後の春肥はミカン樹と生育盛期に当たるナギナタガヤの双方に吸収されることが推測された．草生区のナギナタガヤによる春肥窒素の吸収についてみると，その利用率は34.9％と高く，裸地区の樹体による利用率に匹敵する程であった．同じイネ科で寒地型草種のオーチャードグラスをリンゴ園に供試した佐藤・佐々木(1982)は，4月上旬に施肥を行った場合，5月中旬に実施した1回目の刈り取りまでの間に，オーチャードグラスが年間に吸収した施肥由来窒素の74％もの量が吸収されたことを明らかにしている．本試験の春肥施用時におけるナギナタガヤの草丈は10～15㎝程度であったが，生育盛期の4月中下旬頃には45～55㎝にまで伸長していたことから，オーチャードグラスと同様に施肥後から約40日の間に旺盛な生長に伴う急激な窒素吸収が行われたものと考えられた．

ナギナタガヤにおける春肥吸収窒素の分布割合は，茎葉部と穂部を合わせた地上部が94％であり，地下部が6％と地上部に偏在していた．^{15}Ｎ寄与率についても地上部40％，地下部19％であったことから，この時期にナギナタガヤが吸収した春肥窒素の大部分は地上部の生育に利用されていることが示された．また，本試験の草生区におけるナギナタガヤの乾物重は，10a当たりに換算すると625㎏であ

り，発芽から枯死までに吸収した全窒素量は9.5kg/10aであった．このうち春肥窒素由来分は3.5kg/10aであったことから，残量の6.0kg/10aについては他時期の施肥窒素由来分，あるいは地力窒素に由来するものと考えられた．

ミカン樹とナギナタガヤによる春肥窒素の分配

草生区の樹体‘南柑20号’による春肥窒素の吸収についてみると，その利用率は16.7%であり，裸地区における樹体の吸収量に比べて47%と低率であった．これは，ナギナタガヤによる施肥窒素吸収（収奪）の影響によるものと容易に推測され，3～4年生のリンゴ樹を供試した佐藤・佐々木(1982)も，清耕区に比べオーチャードグラス草生区のリンゴ樹による利用率が著しく低いことを報告しており，本試験結果と一致する．ナギナタガヤの乾物重は樹体の24%であり，全窒素量も21%と少なかったにも関わらず，施肥窒素の吸収量は樹体の約2倍であった．早春期の草による窒素吸収については，寒地型のイネ科牧草による窒素の「先取り」が指摘されており(佐藤・佐々木，1982)，ナギナタガヤの場合もその生育パターンから，樹体よりも早期から旺盛な窒素吸収が行われているものと考えられる．また，草生園では早春期の地温が低く推移することが知られており(栗山ら，1966；中川・坪井，1962)，樹体による窒素吸収開始の遅れがナギナタガヤの吸収を助長した可能性も否定できない．

草生区と裸地区の樹体における春肥窒素吸収量および^{15}N寄与率を比較すると，その差は春期新生器官，特に新葉において大きかった．この結果は，新生器官への集積が多い春肥由来窒素の吸収・移行特性から容易に理解できる事象であり(久保田ら，1976a)，このことが草生区の樹体に及ぼす影響として，新葉の乾物重の減少および全窒素含有率の低下が認められた．これは，新葉着生数と1葉重の減少によるものであり，春肥窒素の吸収不足に伴う新葉への移行量の減少に起因するものと考えられた．

春肥窒素の利用率

春肥窒素の利用率を園全体として比較すると，草生区はナギナタガヤと樹体による吸収量の加算値となるため51.6%であり，裸地区の35.3%に比べ高率となった．これを10a当たりに換算すると，草生区の春肥窒素吸収量は5.2kg，裸地区は3.5kgとなり，草生区の方が1.7kg多くなることが確認され，両区ともに吸収されなかった残量は溶脱あるいは土壌残存するものと考えられた．

以上の結果から，ウンシュウミカン園へのナギナタガヤの導入は，園全体での春肥窒素の吸収量を増加させることが明らかになり，春肥窒素に由来する環境負荷を軽減できるものと推測される．しかし，ナギナタガヤによる春肥の吸収量は樹体に比べかなり多いため，特に貯蔵窒素の少ない幼木園などに導入した当初は，春季に樹体への窒素補給対策を講じることが望ましいと考えられる．

第２節 ナギナタガヤ草生ミカン園における秋肥窒素の吸収特性

ナギナタガヤの生育初期に施用される秋肥窒素のウンシュウミカン樹およびナギナタガヤによる吸収特性について，ポット栽培条件下で^{15}Nトレーサー法を用いて検討した．

１）乾物重・全窒素含有率

材料および方法

愛媛県果樹研究センターにおいて容積約60Lの黒色ポット（外径は前節と同様）に植栽されている3年生‘南柑20号’を1区3ポット供試し，ナギナタガヤ草生区（以下草生区）および清耕裸地区（以下裸地区）を設けた．2001年10月3日に草生区にナギナタガヤ（雪印種苗

社製）の種子をポット地表面全面に約8g/m²換算量で播種した．なお，ポットの土壌は2000年3月の2年生苗木植え付け時に花崗岩質土壌（中粗粒褐色森林土，約50L/pot）と牛糞オガクズ堆肥（約10L/pot）を混合したものを用いた．試験開始直前のポットの土壌は，土性：SL，全炭素：1.70％，全窒素：0.09％，pH(H_2O)：5.62であった．

供試肥料として^{15}Ｎ標識硫酸アンモニウム（10.3atom％）を用い，Ｎ：10kg/10a換算量（8.18g/pot）を2Lの水に溶かし，ミカン樹の秋肥施用時期に当たる2001年11月6日に施用した．リン酸およびカリは，過リン酸石灰を5.95 g/pot，硫酸カリを2.43g/pot施用した．供試ポットは，苗木定植後から試験開始直前までは露地栽培を行っていたが，^{15}Ｎ施用後は急激な降雨による施肥窒素などの流亡を防ぐため，側面を解放したガラス室内に移し，解体時まで管理した．灌水は施肥後から解体時まで4～6日間隔で行い，1回の灌水量は6～7㎜とした．

試料は，供試品種の収穫期である2001年12月4日に果実を採取した．樹体の解体は，一般的なミカン栽培での春肥施用時期に当たる2002年3月11日～14日にかけて実施し，樹体を新葉，新梢，旧葉，1年生枝，2年生枝，主幹，細根，小中根，大根根幹に分けて採取した．また，落下物（落下旧葉）は^{15}Ｎ施用後から解体時まで適宜採取した．草生区のナギナタガヤは，樹体の解体時に地上部（茎葉）と地下部（根）に分けて採取した．なお，ナギナタガヤの草高については，^{15}Ｎ施用時は4～5㎝程度であり，解体時には約20㎝に伸長していた．

調査は，採取した樹体とナギナタガヤ各器官の乾物重，全窒素含有率について行った．全窒素分析はケルダール法により実施した．

結　果

第3表に器官別の乾物重，全窒素量および全窒素含有率を示した．

第３表　秋肥試験における‘南柑20号’およびナギナタガヤの乾物重，全窒素含有率，全窒素量

部　位	乾物重(g/pot^y)		全Ｎ含有率 (%)		全Ｎ量(g/pot^y)	
	草生区	裸地区	草生区	裸地区	草生区	裸地区
（樹　体）						
新　葉	75.0	84.4	2.27	2.57 *^{z}	1.69	2.16 *
新　梢	11.9	12.1	1.39	1.66 *	0.16	0.20
旧　葉	16.8	17.8	2.03	2.19	0.34	0.39
１年生枝	18.9	17.7	1.04	1.12	0.19	0.20
２年生枝	89.1	86.4	0.62	0.64	0.56	0.55
主　幹	40.0	44.5	0.56	0.57	0.22	0.25
細　根	104.8	106.2	1.49	1.75 *	1.54	1.86 *
小 中 根	55.6	54.2	0.79	0.87	0.44	0.47
大根根幹	79.6	61.6	0.70	0.62	0.56	0.38
果　皮	70.7	72.1	0.76	0.72	0.54	0.52
果　肉	130.4	119.7	0.77	0.74	1.00	0.88
落下旧葉	5.1	5.3	2.35	2.39	0.12	0.13
樹全体	698.1	681.9	1.05	1.17 *	7.36	7.99 *
（ナギナタガヤ）						
茎葉	46.8	－	2.00	－	0.93	－
根	14.4	－	1.50	－	0.22	－
ナギナタガヤ全体	61.2	－	1.88	－	1.15	－
合 計	759.3	681.9 *	－	－	8.51	7.99 *

^{z}＊：t検定において5%レベルで有意差があることを示す（n=3），^{y}容積約60Lのポット

ミカン樹の乾物重は，草生区および裸地区ともに果肉，細根，2年生枝などが大きく，落下旧葉，新梢などが小さかった．各器官別に両区の乾物重を比較すると，いずれの器官においても草生区と裸地区の間に有意な差がみられず，総量でも両区の樹体はほぼ同程度の重量であった．また，草生区におけるナギナタガヤの総乾物重は61g/pot，同区の樹体は698g/potであった．

樹体の全窒素含有率は，両区ともに新葉や落下旧葉，旧葉（着生）などが他の器官よりも高い傾向がみられた．両区の窒素含有率を器官別に比較すると，新葉，新梢および細根において裸地区が草生区に比べ有意に高く，樹体全体の含有率も裸地区の方が高かった．樹体の全窒素量も同様に，総量では裸地区の方が9%程度多く，器官別にみると新葉と細根において有意な差が認められた．一方，ナギナタガヤの全窒素含有率は同区の樹体に比べると高かったが，乾物量が少ないため，その全窒素量（1.15g/pot）は樹体のそれ（7.36g/pot）の16%程度であった．

２）吸収量および利用率

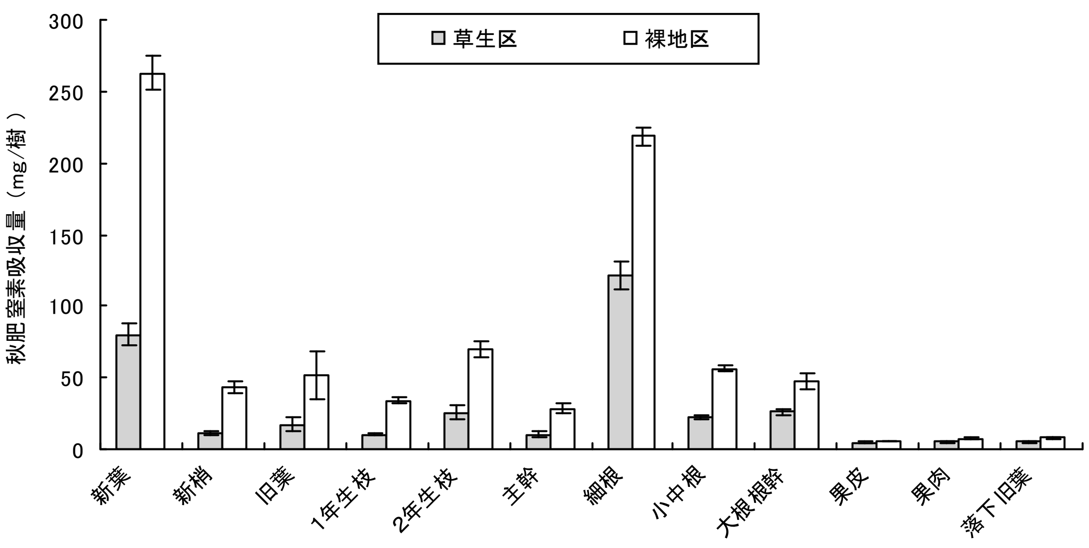
材料および方法

前項の供試試料について^{15}N濃度の測定を行った．^{15}N分析は発光分析法（日本分光社製N-151アナライザー）により実施した．

結　果

樹体に吸収された秋肥窒素の各器官への移行量を比較すると，いずれの器官においても裸地区の方が草生区より有意に多く，特に両区の差は新葉および細根において大きかった．逆に収穫果の果皮や果肉，落下旧葉における移行量の差は小さかった（第7図）．草生区のナギナタガヤに吸収された秋肥窒素は茎葉部に599mg/pot，根部に120mg/pot移行しており，その分配率は茎葉部が83%，根部17%であった（第8図）．ナギナタガヤ各部の^{15}N寄与率は，茎葉部64%，根部56%であり茎葉部の方がやや高かった．

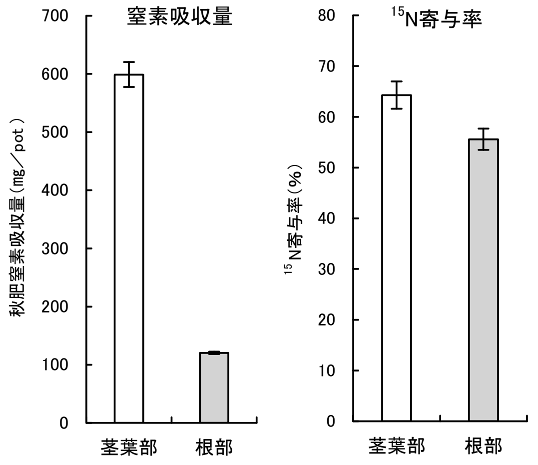
樹体による秋肥窒素の総吸収量は，草生区が338mg/pot，裸地区が833mg/potであり，草生区は裸地区の41%と大幅に少なかった（第9図）．



第７図　ナギナタガヤ草生区および裸地区における‘南柑20号’の器官別秋肥窒素吸収量

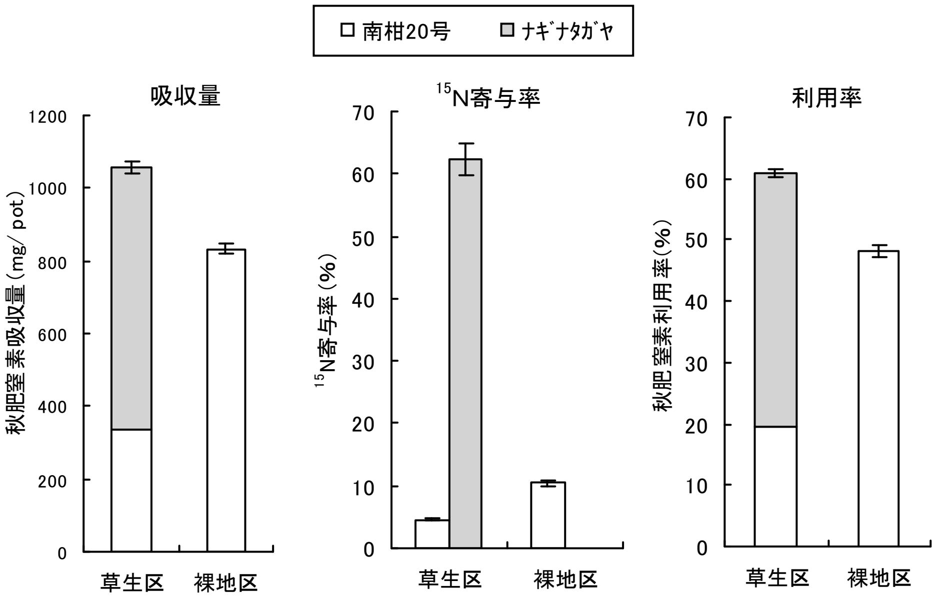
誤差線は標準誤差を示す（n=3）

一方，草生区におけるナギナタガヤの秋肥窒素吸収量は719mg/potであり，同区の樹体の約2倍であった．また，樹体全体での ^{15}N寄与率は，草生区が4.6%，裸地区は10.4%であった．これに対してナギナタガヤの ^{15}N寄与率は62%と著しく高かった．秋肥窒素の解体時までの利用率は,樹体で比較すると草生区19.5%，裸地区48.1%であり，裸地区の方が顕著に高かった．しかし，ナギナタガヤによる吸収量を加えた草生区の利用率は60.9%となり，裸地区の約1.3倍であった．



第８図　ナギナタガヤの秋肥窒素吸収量および ^{15}N寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第９図　ナギナタガヤ草生区と裸地区の秋肥窒素吸収量，利用率および ^{15}N寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）

３）考　察

ナギナタガヤの秋肥窒素吸収特性

本試験は11月上旬から3月中旬まで，秋肥窒素の吸収について検討したものであるが，試験期間中のナギナタガヤは生育ステージの中では初期段階であり，試験終了時の草高は20cm程度であった．また，解体時の草生区におけるナギナタガヤの乾物重も同区のミカン樹の僅か9%程度であったことから，ナギナタガヤによる秋肥窒素の吸収は少ないものと予想された．

しかし，草生区のナギナタガヤによる秋肥窒素の吸収量は同区の樹体の約2倍と多く，その利用率は41.4%に達した．ナギナタガヤと同じイネ科で寒地型草種であるイタリアンライグラスの施肥窒素利用率は，11月下旬から3

月上旬までで50～70％（久保田ら，1964），12月中旬から3月下旬の間は40～80％とした報告が残されている（木島・室賀，1965）．また，^{15}Nを利用して寒地型イネ科草種のオーチャードグラスについて窒素吸収の季節変化を検討した木村・倉島（1985）は，平均気温が1～9℃の低温下においても，生育初期のオーチャードグラスによる窒素吸収は乾物生産が少ないにも関わらず活発であることを明らかにしている．これらの事例から，寒地型のイネ科草種は低温条件下においても施肥窒素の旺盛な吸収能を有している可能性がある．ナギナタガヤの場合も同様に，解体を行った3月中旬までは生育初期段階であったために乾物生産量は少なかったものの，秋肥窒素の吸収は活発に行われたものと推測される．

ナギナタガヤによって吸収された秋肥窒素の分配率は，茎葉部が83％，根部が17％であり地上部に多く分配されていた．しかし，^{15}N寄与率についてみると茎葉部64％，根部56％と分配率ほどの差異はみられなかった．このことから，本種の生育初期段階における茎葉部と根部の形成には，施肥由来窒素がほぼ同程度に利用されていると推測され，分配率の差は各部の乾物量と全窒素量の差によるものと考えられる．

ミカン樹とナギナタガヤによる秋肥窒素の分配

ミカン樹による秋肥窒素の利用率は，裸地区において48％であった．^{15}Nトレーサー法によってミカン樹の秋肥窒素吸収を検討した事例によると，樹体による窒素利用率は41～43％と報告されている（赤尾ら，1978；市来ら，1981；井田ら，1981）．本試験で得られた裸地区の利用率は，これらの研究例と比較的類似しており，本試験の方が若干高率となったことについては，日中の最高気温が露地よりも1～2℃高くなるガラス室内で供試ポットを管理したことから，吸肥能がやや向上した可能性があると考えられた．

一方，草生区におけるミカン樹の秋肥窒素吸収量は裸地区に比べて41％と低率であった．これは，ナギナタガヤとの窒素競合によるものと推測される．また，ミカン樹による吸肥あるいは吸水能は，中原ら（1985）や間苧谷・町田（1976）の報告から，地温が10～12℃以下になると低下するものと考えられる．前述のように寒地型イネ科草種は10℃以下の条件下においても窒素吸収が可能であろうと推測されることから，本試験の草生区は，ミカン樹が吸肥可能な期間内においてはナギナタガヤとの窒素吸収の競合が生じ，ミカン樹の吸肥能が衰える時期になってもナギナタガヤによる窒素吸収が継続された結果，樹体による秋肥窒素の吸収量が著しく低下したものと推察された．

ナギナタガヤ導入によるミカン樹への影響

ミカン樹の全窒素含有率や全窒素量については，両区の樹体の乾物重にほとんど差が認められなかったにも関わらず，草生区の方が裸地区より少なかった．特に新葉や細根などの秋肥窒素の集積が多い器官において有意差がみられたことから，その差は両区の秋肥吸収量の多少に起因すると思われた．ミカン樹に吸収された秋肥窒素は貯蔵窒素の一部として樹体内に蓄えられ，翌春の春季新生器官形成に寄与することが知られている（赤尾ら，1978）．このため，草生区のミカン樹は翌春の4月以降に発生する春季新生器官の生育に悪影響を及ぼす可能性があり，特に貯蔵養分の蓄積が少ない幼木期のミカン園にナギナタガヤを導入した場合は窒素補給対策を検討する必要があると考えられる．

秋肥窒素の利用率と環境負荷軽減効果

両区の窒素利用率から試験区全体としての秋肥窒素吸収量を10a当たりに換算すると，草生区はミカン樹とナギナタガヤによる吸収量の加算値となるため6.1kgとなり，この内4.1

kgはナギナタガヤによって有機物として保持されることが明らかになった．一方，裸地区はミカン樹による吸収に限定されるため4.8kgであった．このため，草生区の方が1.3kg程秋肥窒素の吸収量が多くなることが確認され，両区ともに吸収されなかった残量は溶脱あるいは土壌残存するものと考えられた．

以上の結果から，ウンシュウミカン園へのナギナタガヤの導入は，園全体での秋肥窒素の吸収量を増加させ，未吸収量を減少させることが明らかとなり，環境負荷軽減に寄与できるものと推察された．

第３節 枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収特性と利用率

^{15}N標識ナギナタガヤを用いて，枯死ナギナタガヤ由来窒素のミカン樹や再発生ナギナタガヤによる吸収特性を圃場条件下で，吸収量や利用率などをポット条件下で枯死後１年間追跡調査した．

１）枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収特性

材料および方法

果樹研究センターの平坦地園（花崗岩母材，中粗粒褐色森林土）に植栽されている9年生‘愛媛中生’（カラタチ台）1樹を供試した．2001年5月25日に場内で育成した^{15}N標識ナギナタガヤを，外周に薄いプラスチック製のシートを約20cmの深さに埋設して根域を制限した処理区1m×2mの樹冠下2m^{2}に風乾物で4240g（乾物換算量：2438g）施用した．施用は枯死した状態のナギナタガヤを再現するため，表層土壌をミカン樹の細根が僅かに裸出する程度に除去して^{15}N標識ナギナタガヤの根部を一旦除去した土壌と混和しながら埋設し，茎葉部と穂部は地表面に敷設した（第10図）．^{15}N標識ナギナタガヤは，2000年10月に雪印種苗社製の種子を無植栽圃場の地表面に約8g/m^{2}換算量で播種し，草高が10cm程度になった2001年3月上旬から4月上旬の間に^{15}N標識硫酸アンモニウムを分施して育成し，倒伏後の5月上中旬に掘取り，丁寧に洗浄して風乾したものを用いた(全窒素：1.13%DW，^{15}N濃度：5.20atom%，C/N比：38.3)．なお，処理区の土壌は，全炭素：1.25%，全窒素：0.08%，pH（H_2O）： 5.59であった．施肥は，慣行の春肥（3月上旬）および秋肥（11月上旬）を^{14}Nの有機配合肥料を用いて各N:10kg/10a換算量で施用した．

第10図　^{15}N標識ナギナタガヤ施用直後の状態（2001年5月25日）

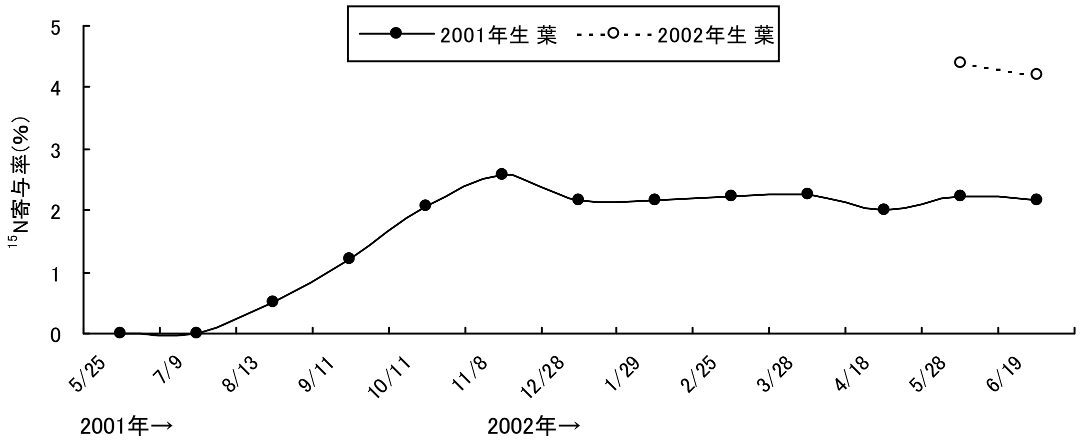
分析試料として，ミカン樹の2001年に発生した新葉（以下2001年生葉）を2001年5月25日～2002年6月19日まで経時的に採取した．また，2002年に発生した新葉（以下2002年生葉）は2002年5月28日および6月19日に採取した．葉の採取は1回当たり30葉とした．他の器官は果実を本品種の慣行収穫期である2001年12月3日に10果採取するとともに，花器を2002年5月17日に50花，新梢を5月28日に30本採取した．これらの器官の採取は樹冠外周部の赤道面の各方位から均等に行った．また，再発生したナギナタガヤについては，2002年4月18日に樹冠下の東西2方向の地表面を縦30cm×横30cmの範囲で深さ30cmまで掘り取り，穂，茎葉，根に分けて採取し，同時に樹体の細根も採取した．

試料の全窒素分析はケルダール法，^{15}N分析は発光分析法（日本分光社製 N-151アナライザー）により実施した．

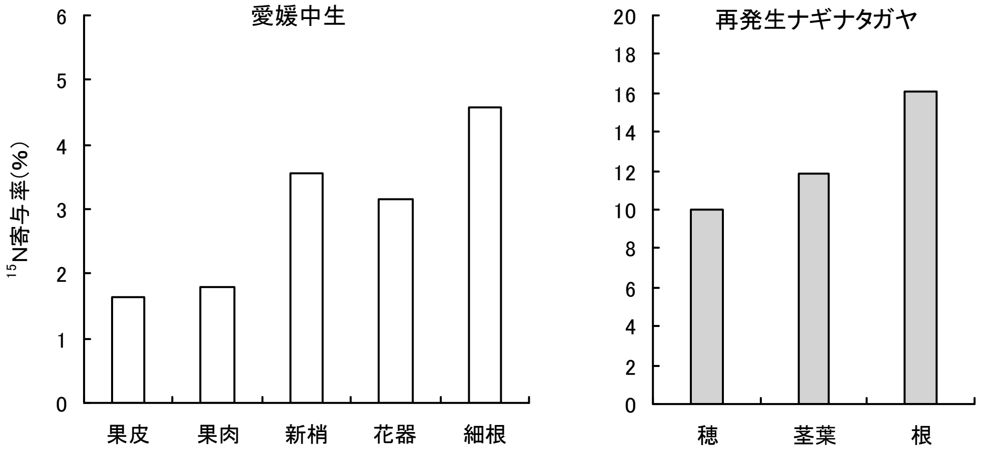
結　果

枯死ナギナタガヤ由来窒素のミカン樹による吸収を示す2001年生葉の^{15}N寄与率は，枯死ナギナタガヤ施用45日後の7月上旬の段階では0%であり，その吸収は全く認められなかった（第11図）．しかし，施用80日後の8月中旬には0.5%となり，11月上旬まで直線的に上昇して2.6%に達した．その後，^{15}N寄与率は12月下旬にかけて若干低下したものの，2002年6月までは2.1～2.3%で推移し大きな変動はみられなかった．2002年生葉は当初から高い^{15}N寄与率を示し4.2～4.4%であった．一方，他の器官の^{15}N寄与率については，2001年の収穫果実では果皮が1.7%，果肉は1.8%であった（第12図）．また，2002年に発生した新梢や花器における^{15}N寄与率は3.2～3.6%であったのに対し，細根は4.6%とやや高かった．

再発生したナギナタガヤの^{15}N寄与率は，穂部10%，茎葉部12%，根部16%であり，地下部の方が地上部よりも高かった（第12図）．また，これらの値はいずれもミカン樹の各器官より高率であった．



第11図　‘愛媛中生’の葉部における枯死ナギタガヤ由来窒素の^{15}N寄与率の推移



第12図　‘愛媛中生’および再発生ナギナタガヤ各器官における枯死ナギタガヤ由来窒素の^{15}N寄与率

２）枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収量・利用率

材料および方法

果樹研究センター内において容積約60Lの黒色ポット（外径は前節と同様）に植栽されている3年生‘南柑20号’（カラタチ台）を3ポット供試した．2001年5月18日に前項と同様な方法で育成した^{15}Ｎ標識ナギナタガヤ（全窒素：1.15% DW，^{15}Ｎ濃度：4.92 atom%，C/N比：38.1）を各ポットに風乾物で1978g/m^{2}換算量（乾物換算量：1304g/m^{2}換算量）を施用した．施用方法および慣行の施肥は前項と同様に行い，ポットは施用から解体時まで屋外で管理した．ポットの土壌は2000年3月の2年生苗木植え付け時に花崗岩質土壌（中粗粒褐色森林土，約50L/pot）と牛糞オガクズ堆肥（約10L/pot）を混合したものを用いた．試験開始直前のポット土壌は，全炭素：1.72%，全窒素：0.07%，pH（H_2O）：5.73であった．

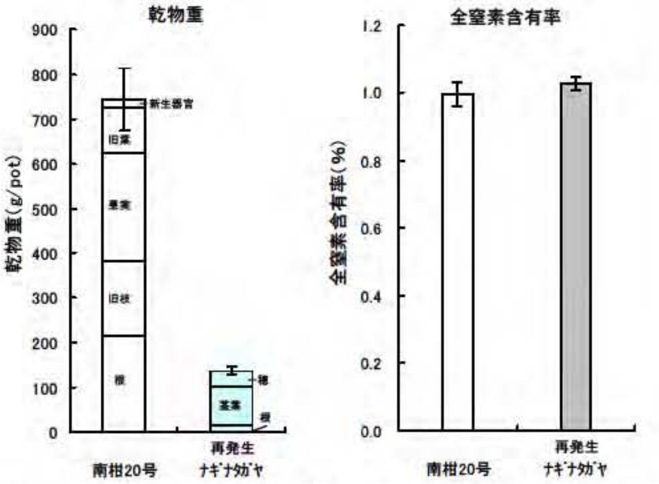
分析試料は，落下旧葉をポット解体時まで適宜採取し,果実を2001年12月3日に採取した．再発生したナギナタガヤは倒伏後の種子の脱落を避けるため2002年4月30日に穂部のみを先に採取した．ポットの解体は再発生ナギナタガヤが完全に枯死した2002年5月22～27日にかけて実施し，樹体および再発生ナギナタガヤを第14図に示した各器官に分けて採取した．調査は，採取した各器官の乾物重を計測するとともに，質量分析法（Europa Scientific社製ANCA-SL）により全窒素含有率および^{15}Ｎ濃度を測定し，評価した．なお，試験期間中の気温および降水量はほぼ平年並であった．

結　果

第13図に試験期間中の収穫物および落下物を含めたミカン樹と再発生したナギナタガヤの乾物重および全窒素含有率を示した．1ポット当たりの樹体の乾物重は745ｇ，再発生ナギナタガヤが138ｇであり，樹体の方が著しく大きかった．器官別には，樹体では施用年に収穫した果実（果皮＋果肉）が243g（33%）と最も大きく，次いで根部213g（29%），旧枝168g（23%）の順となり，新葉や新梢などの春季新生器官は小さかった．再発生ナギナタガヤでは茎葉部が86g（62%）で，穂部が36g（26%），根部は16g（12%）であった．また，樹体全体および再発生ナギナタガヤ全体の全窒素含有率は，両者ともに1%程度で差がみられなかった．

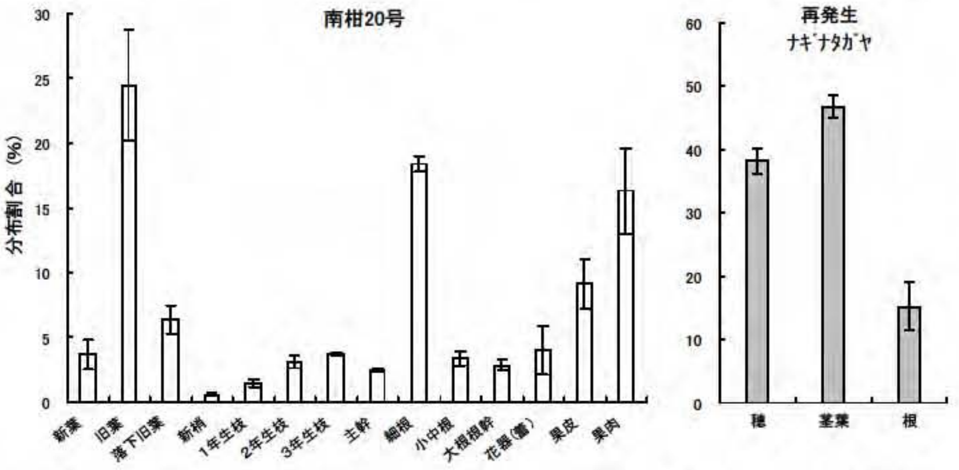
ミカン樹に吸収された枯死ナギナタガヤ由来窒素の樹体内における分布割合は，収穫果実（果皮＋果肉）と旧葉（2001年生葉）が共に24～26%で最も多く，次いで細根18%の順となり，その他の器官はいずれも6%以下であった（第14図）．再発生ナギナタガヤでは茎葉部が47%，穂部38%，根部は15%であった．一方，器官別の^{15}Ｎ寄与率は，新葉（2002年生葉），花器，新梢の春季新生器官および旧葉，細根が2.2～2.6%と他器官に比べてやや高く，収穫果実は1.9%前後であり，3年生枝や主幹および大根根幹などの旧器官の中でも古い部位が1.1～1.3%程度と低かった（第15図）．再発生したナギナタガヤの部位別^{15}Ｎ寄与率は，穂部8.4%，茎葉部10.0%，根部16.7%であり，前項の圃場試験と同様に地下部の方が地上部よりも高かった．

枯死ナギナタガヤ由来窒素の施用時から解体時までのミカン樹による総吸収量は142mg/pot，再発生ナギナタガヤは140mg/potであり，ほぼ同量であった（第16図）．このため，利用率は樹体5.5%，再発生ナギナタガヤ5.4%となった．また，^{15}Ｎ寄与率は樹体全体で約2%，再発生ナギナタガヤ全体では約10%であった．



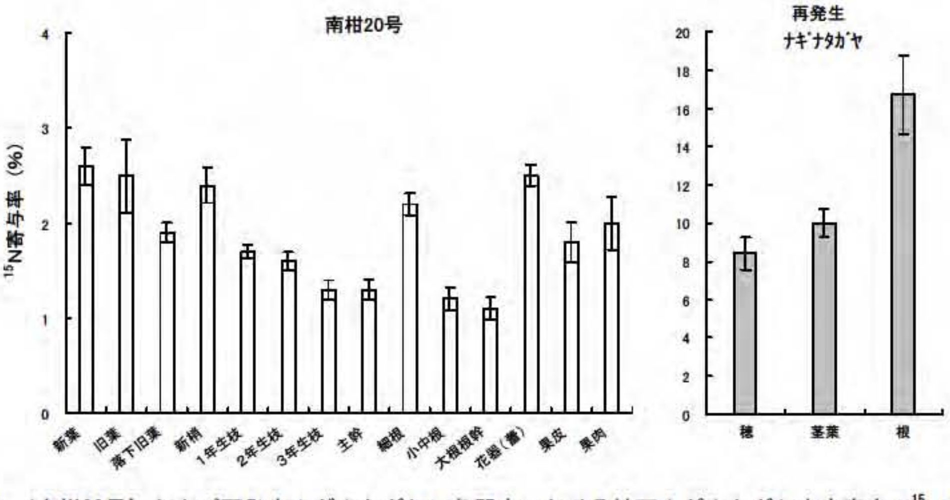
第13図　‘南柑20号’および再発生ナギナタガヤの乾物重，全窒素含有率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



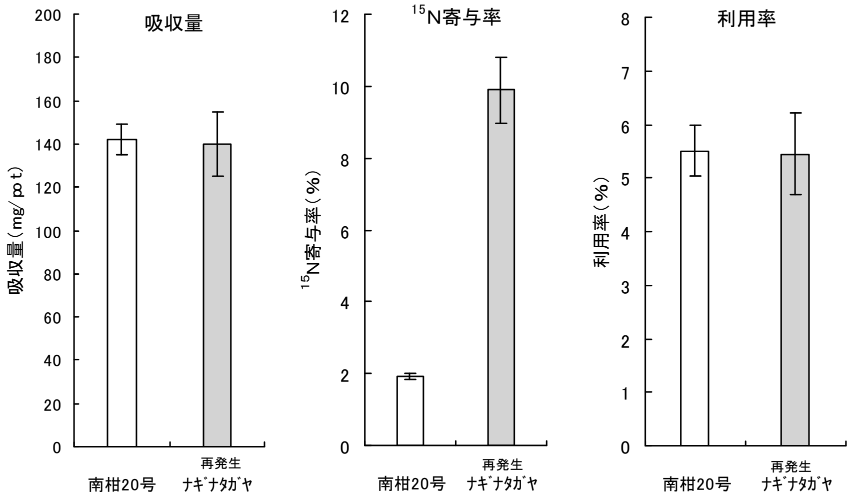
第14図　‘南柑20号’および再発生ナギナタガヤにおける枯死ナギナタガヤ由来窒素の器官別分布割合

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第15図　‘南柑20号’および再発生ナギナタガヤの各器官における枯死ナギナタガヤ由来窒素の^{15}N寄与率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第16図　‘南柑20号’と再発生ナギナタガヤにおける枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収量，^{15}N寄与率および利用率

誤差線は標準誤差を示す（n=3）

３）考　察

枯死ナギナタガヤの分解時期とミカン樹の吸収特性

^{15}N標識ナギナタガヤを枯死時期の5月下旬に施用し，ミカン樹による吸収時期を検証したところ，施用から80日後の8月中旬には葉部において少量ではあるが枯死ナギナタガヤ由来窒素の存在が確認された．ミカン樹にとって夏季は極めて吸肥能の高い時期であり，6月に^{15}Nの無機態窒素を施用した場合，翌日には葉部において施用した^{15}Nが検出されたことが報告されている（久保田ら，1976b）．このような窒素吸収速度の速い夏季においても，本試験のミカン樹は，施用45日後の7月上旬の段階では葉部から^{15}Nが全く検出されなかった．このため，枯死ナギナタガヤの分解に伴う無機態窒素の放出は7月中旬以降に開始されたものと推測された．有機物の土壌中での分解速度はC/N比の影響を強く受け，C/N比が高いもの程分解が遅れることが知られている（広瀬，1973a；志賀，1988）．本試験に供試した^{15}N標識ナギナタガヤのC/N比は約38であった．このC/N比に極めて近い^{15}N標識オガクズ牛糞堆肥（C/N比37）を施用した水稲作においては，37日後に堆肥由来窒素の水稲による吸収が認められている（上之薗ら，2004）．また，^{15}N標識稲ワラ（C/N比80）の施用例でも，約50日前後には水稲による稲ワラ由来窒素の吸収が確認されている（安藤ら，1986）．これらの事例から，C/N比がある程度高い有機物であっても数十日と比較的早期から無機化が行われるものと推測され，ナギナタガヤの場合は夏季の気象条件下では，枯死後45日～80日の間に無機化された窒素の放出が開始されると判断された．

ミカン樹によって吸収が開始された枯死ナギナタガヤ由来窒素は，2001年生葉の^{15}N寄与率の推移から，施用約170日後の11月上旬までは吸収が継続されることが明らかになった．その後，11月上旬から12月下旬にかけては^{15}N寄与率が低下し，それ以降はほぼ一定のレベルで推移した．^{15}N寄与率の低下については，11月上旬に施用した秋肥由来の^{14}Nが葉部へ流入したことに伴い^{15}N濃度が希釈されたためと考えられる．有機物を分解・無機化する糸状菌や細菌類の生育最適温度は25～40℃で

あり（新田，1994），硝化作用は5℃以下になると極めて低くなるとされていることから（木村，2003），気温が低下する晩秋季からは枯死ナギナタガヤ由来窒素の無機化はかなり停滞するものと推測される．また，ミカン樹による吸肥あるいは吸水能は，地温が10～ 12℃以下になると低下することが知られており（間苧谷・町田，1976；中原ら，1985），冬季間は土壌中に枯死ナギナタガヤ由来の無機態窒素が存在していたとしても樹体は容易に吸収できない状態にあったと考えられる．これらのことから，12月以降の2001年生葉の ^{15}N寄与率は変動しなかったものと推測される．

果実への移行量とその影響

ミカン樹に吸収された枯死ナギナタガヤ由来窒素は，両試験から2001年生葉以外の諸器官にも利用されることが示された．樹体内における枯死ナギナタガヤ由来窒素の分布割合をみると，旧葉（2001年生葉），果実および細根に多く分配されていた．枯死ナギナタガヤ由来窒素は8月頃から徐々にミカン樹に吸収されるため，窒素の遅効きによる果実品質の低下が懸念される（岩切，1992；坂本・奥地，1968）．しかし，枯死ナギナタガヤ由来窒素のミカン樹による1年間の利用率は5.5％と低率であり，その絶対的な吸収量が少なかったため，試験実施年の収穫果実における ^{15}N寄与率は圃場植栽樹で1.8％，ポット樹でも1.9％前後と果実中の全窒素量に占める枯死ナギナタガヤ由来窒素の割合は著しく低かった．このことから，ナギナタガヤの導入によるミカン樹の果実品質低下の可能性は極めて低いと考えられ，枯死ナギナタガヤ由来窒素は速効的な施肥窒素よりは緩効的な地力窒素に類する肥効を有しているものと推察される．

再発生ナギナタガヤによる吸収特性

枯死ナギナタガヤ由来窒素は再発生したナギナタガヤにも吸収されており，年間の吸収量はミカン樹と同程度であった．ナギナタガヤによる春肥窒素（3月施用）の吸収量はミカン樹よりも著しく多く，その ^{15}N寄与率は穂・茎葉部が根部の約2倍に達することが明らかにされている（石川・木村，2006）．しかし，再発生ナギナタガヤの ^{15}N寄与率は圃場での試験およびポットによる試験ともに根部が最も高く，両試験における各器官の数値も酷似していた．このため，枯死ナギナタガヤ由来窒素の再発生ナギナタガヤによる吸収は春季以前に活発に行われて根部の形成に利用されたと推測され，ナギナタガヤの導入は秋季から早春季間の窒素溶脱を減少させる可能性があると考えられる．また，吸収量がミカン樹と同程度であったことについては，ミカン樹がナギナタガヤの再発生以前から枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収を開始していたことが一因と考えられる．ただし，再発生ナギナタガヤは乾物重がミカン樹の19％であったにも関わらず，^{15}N寄与率はミカン樹より著しく高かったことから，本種の吸肥能の高さが裏付けられた．

枯死ナギナタガヤの窒素利用率と残存量

本試験により枯死ナギナタガヤ由来窒素は，1年間に全施用窒素量の5.5％がミカン樹に，5.4％が再発生ナギナタガヤによって吸収され，89％は未吸収であることが明らかになった．未吸収分は土壌残存あるいは溶脱（一部脱窒）するものと考えられる．畑状態土壌で ^{15}N標識コムギ（C/N比45）を施用し，4年間に5作物を栽培した後のコムギ由来窒素の土壌残存率は58％であったことが報告されている（新良・西宗，2000）．また，水稲作において ^{15}N標識オガクズ牛糞堆肥（C/N比37）を施用した事例では，水稲成熟期の堆肥由来窒素の土壌残存率は91％とされていることから（上之薗ら，2004），ナギナタガヤのようにC/N比が比較的高い有機物の溶脱量および脱窒量は少ないものと考えられる．^{15}N標識稲ワラ（C/N比36）を用い，水稲作を5年間実施した

松山ら（2003）は，3作目以降は利用率が低下したものの稲ワラ由来窒素の吸収が5作目まで継続したことを報告している．これらの事例は，いずれも^{15}N標識有機物を施用時に土壌と混合させた状態での報告であり，本試験ではナギナタガヤの枯死状態を再現させるため，根部のみを土壌と混和し穂・茎葉部は地表面に敷設しただけの状態で実施した．このため，枯死ナギナタガヤの分解は既知の報告よりも遅れる可能性があり，未吸収分の土壌（地表）残存率は高く，窒素放出も長期間に渡って継続されるものと推測される．

第４節 ナギナタガヤ草生栽培が土壌・樹体に及ぼす影響

圃場条件下の成木ウンシュウミカン園おける，連年のナギナタガヤ草生栽培が土壌や樹体，収量および果実品質に与える影響を把握するため，試験開始当時19年生の‘宮川早生’を用いて7年間検討を行った．

１）土壌中の無機態窒素の消長および葉中窒素

材料および方法

果樹研究センターの平坦地園（花崗岩母材，中粗粒褐色森林土）に3.5×3.0m間隔で植栽されている‘宮川早生’（カラタチ台）1列（6樹）の樹冠下全面に，ナギナタガヤの種子（雪印種苗社製）を 1999年9月に約8g/m^{2}換算量で播種した．試験は供試樹が19年生となった2000年から開始し，試験区としてナギナタガヤ草生区（以下，草生区）と対照の清耕裸地区（裸地区）を設けた．両区の雑草管理については，草生区は雑草が部分的に発生した場合のみ，刈り取りや除草剤のスポット散布を実施し，スポット散布によってナギナタガヤが衰退した場所には適宜追播を行った．裸地区は年間4回の除草剤の全面散布によって抑草した．施肥は愛媛県施肥基準に準じて年間2回とし，春肥は有機配合肥料（N:P_2O_5:K_2O=9:7:7%・有機率52%）を用いて3月上旬にN:9kg/10a換算量で，秋肥は化成肥料（N:P_2O_5:K_2O=16:10:14%）を10月下旬にN:11kg/10a換算量で施用した．栽培管理は両区とも慣行に従って実施した．

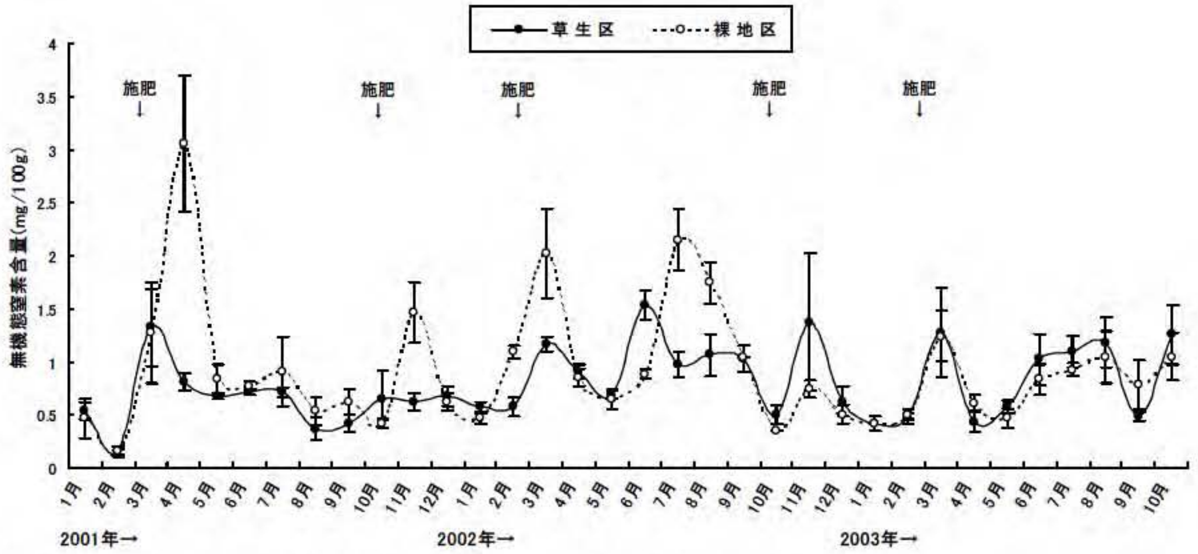
調査は，土壌を2001年1月から2003年10月まで1か月間隔で採取し，無機態窒素含量を測定した．土壌は試験区内の3か所から毎月下旬に採取を行い，採土位置は樹冠外周部の直下とし，ミカン樹の細根が多い地表下10～15cm層とした．また，試験区内の3か所に土壌溶液採取器（大起理化社製 DIK-8390）を2001年2月に地表下50cmの深さに埋設し，2001年6月から2003年10月まで約1か月間隔で土壌水を採取して硝酸態窒素濃度を測定した．なお，土壌水は降水量の少ない時期には採取出来ないこともあった．試験開始2年目の2001年および4年目の2003年には土壌を採取している3樹から，樹冠赤道部の不着果新梢に着生している新葉を1回当たり30葉採取して葉中窒素含有率を調査した．採葉は5月下旬から10月下旬にかけて約1か月間隔で行った．土壌および土壌水中の無機態窒素の分析は微量拡散法で行い，葉中窒素はケルダール法で定量した．

結　果

供試園における土壌中の無機態窒素含量の推移を第17図に示した．裸地区では，各年の春肥や秋肥の施用月あるいは1か月後に無機態窒素が急速に増加してピークを迎え，その後1～2か月経つと減少した．夏秋季と冬季の無機態窒素については，2001年と2003年は大きな変動がみられなかったが，2002年は7～8月に急増した．草生区も春肥施用後は無機態窒素が増加したが，2001年と2003年は裸地区ほどの急増はみられず，2001年の秋肥施用後は増

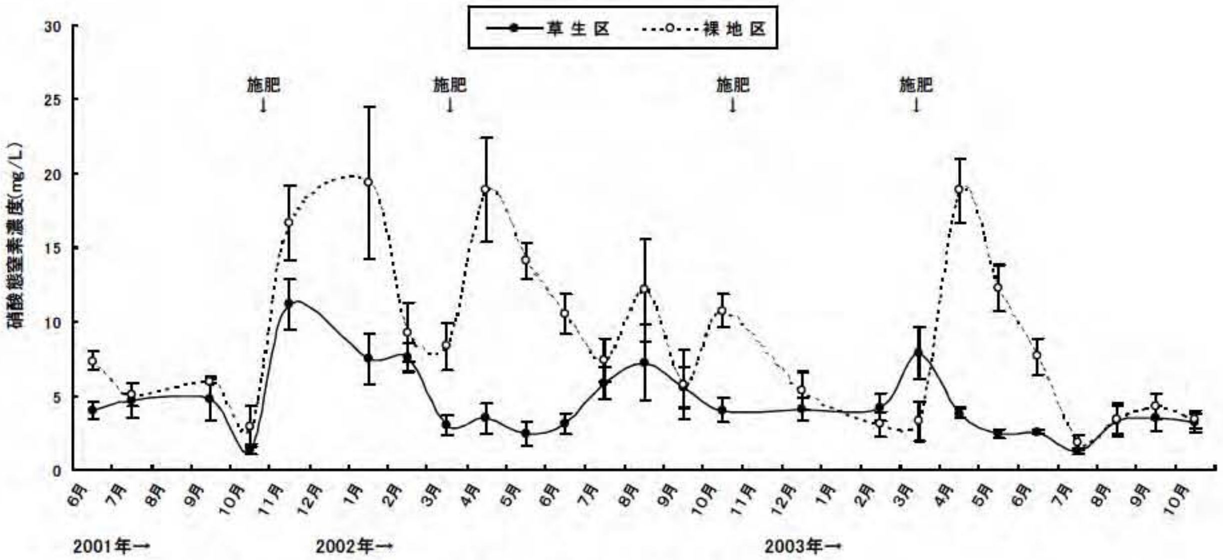
加が認められなかった．草生区の夏秋季における無機態窒素の推移は，試験開始2年目の2001年では裸地区よりやや低く推移したが，4年目の2003年になると裸地区よりやや高く推移する傾向がみられた．

地表下50cmの深さの土層から採取した土壌水中の硝酸態窒素濃度については，裸地区は2001年の秋肥施用後，2002年および2003年の春肥施用後に急激に上昇して20mg/L前後となった．また，同区は2002年の8月と10月にやや上昇した．一方，草生区は裸地区と同様に2001年の秋肥施用後に上昇したが，その濃度は11 mg/Lと裸地区よりかなり低かった．草生区はその後，大きなピークがみられなかったが，2002年の8月と2003年の3月に若干上昇した．調査期間中の両区の平均窒素濃度は，裸地区の8.7mg/Lに対して草生区は4.5mg/Lと低かった（第18図）．



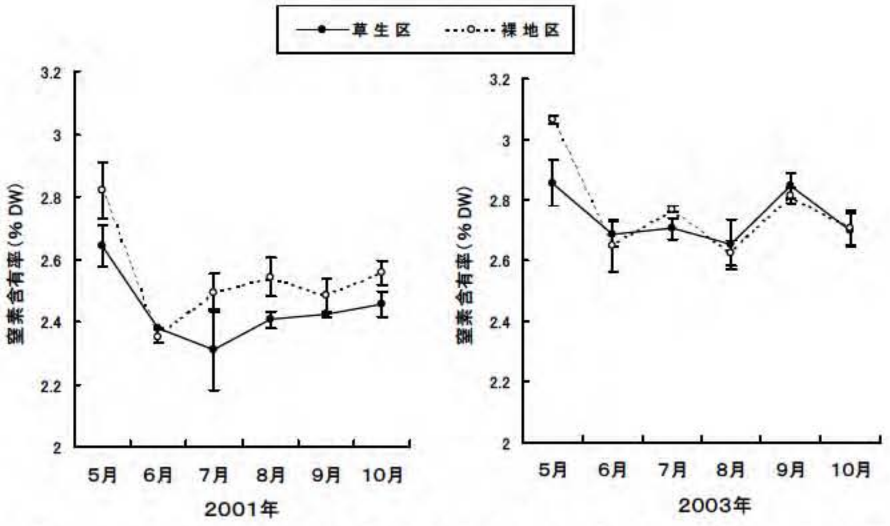
第17図　ナギナタガヤ草生ミカン園における土壌中の無機態窒素含量の推移

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第18図　ナギナタガヤ草生ミカン園における土壌水中の硝酸態窒素濃度の推移

誤差線は標準誤差を示す（n=3）



第19図　ナギナタガヤ草生ミカン園における‘宮川早生’の葉中窒素含有率の推移
誤差線は標準誤差を示す（n=3）

2001年の葉中窒素含有率は，両区ともに5月が最も高く，6月にかけて減少した．その後，裸地区は漸増したが，草生区は7月まで減少し，それ以降は漸増傾向を示した．両区の窒素含有率を比較すると，6月以外はいずれの時期においても裸地区の方が草生区より高い傾向にあった．2003年も5月は裸地区の方が高かったが,6月以降は両区に差が認められなかった(第19図).

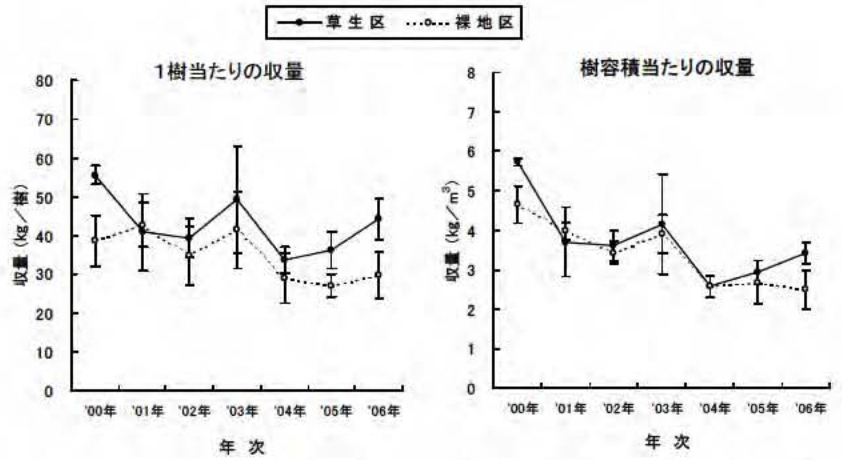
2）収量および果実品質

材料および方法

前項1）の供試圃場において，各区から樹勢の揃った4樹を選び，2000年から2006年にかけて例年10月下旬に果皮の着色程度や粗滑を調査し，11月上旬に果汁のBrix，クエン酸含量および果皮色を測定した．品質調査は定法に従って実施し(農水省果樹試興津支場編,1987)，果皮色は測色色差計（Minolta 社製 CR-300）を用いて測定した．また，この4樹については毎年11月上中旬の収穫時に収量調査を行った．

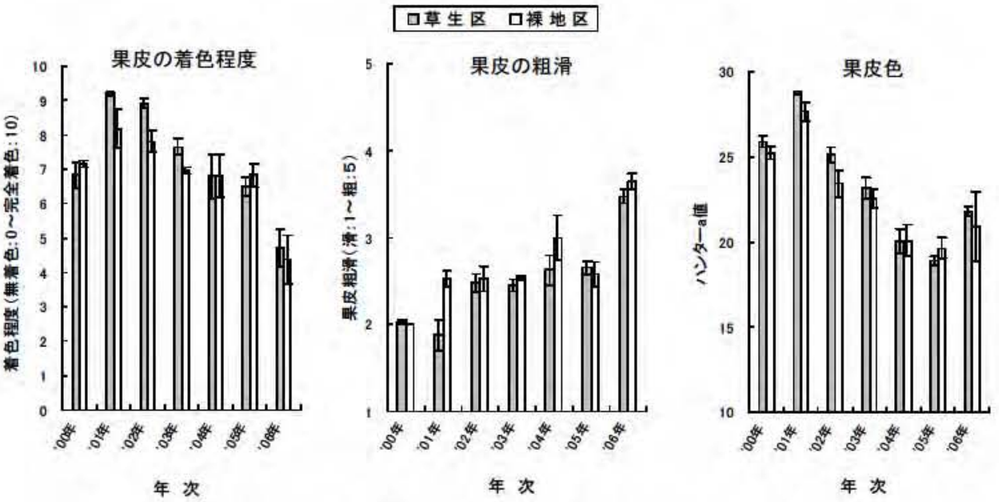
結　果

7年間の1樹当たりの平均収量は，草生区が42.8kg，裸地区は34.8kgとなり草生区の方が23％多かった．年次別に比較すると，2000年および2005年，2006年において両区の差が大きかった．単位容積当たりの収量も同様に，草生区の方が裸地区より10％多く，裸地区が2000年から2006年にかけて概ね漸減傾向を示したのに対し草生区は2005年以降やや増加した（第20図）．果実の外観は，両区ともに年次によって変動したが，草生区は裸地区に比べ2001～2003年にかけて果皮の着色がやや早い傾向がみられた．また，草生区は2001年に滑らかな果実がやや多く，2002年は果皮色の赤味が若干強かった．その他の年は区間にほとんど差がみられなかった（第21図）．果汁のBrixについては，2002年に草生区がやや高い傾向を示したが，他の6年間は区間に差がみられなかった．クエン酸含量は2001年および2004～2006年に草生区の方が低い傾向を示した(第22図).



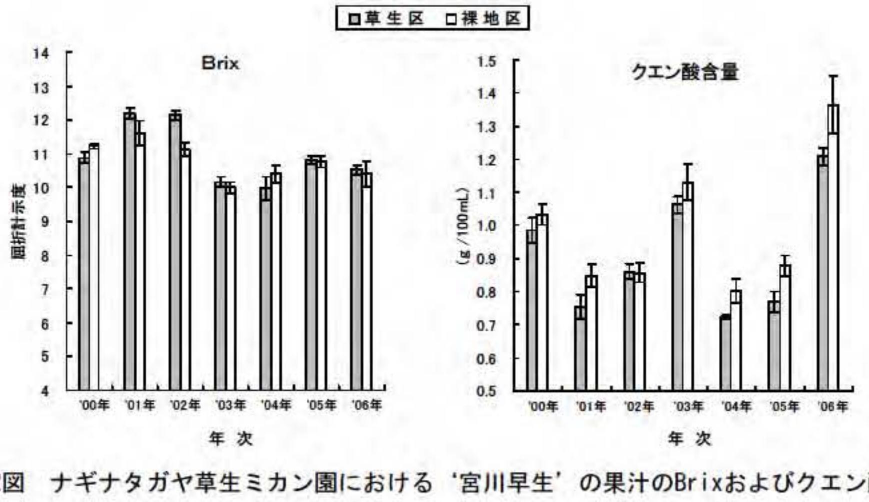
第20図　ナギナタガヤ草生ミカン園における‘宮川早生’の収量の推移

誤差線は標準誤差を示す（n=4）



第21図　ナギナタガヤ草生ミカン園における‘宮川早生’の果実の外観

誤差線は標準誤差を示す（n=4）



第22図　ナギナタガヤ草生ミカン園における‘宮川早生’の果汁のBrixおよびクエン酸含量

誤差線は標準誤差を示す（n=4）

３）考　察

環境負荷軽減効果

成木のミカン園におけるナギナタガヤ草生栽培の影響を検証したところ，土壌中の無機態窒素含量について草生区は裸地区より施肥後の増加が大幅に少ないことが明らかになった．これは，^{15}Ｎトレーサー法によって解明されたナギナタガヤによる施肥窒素の吸収の影響が反映されたためと考えられる（石川・木村，2006・2008）．ミカン園におけるウマゴヤシ草生栽培やナシ園でのイタリアンライグラス草生栽培の場合も，導入草種の生育期には施肥後の土壌窒素の増加が抑制されており（北口・吉岡，1989；坂本，1963），本試験結果と一致する．ナギナタガヤによる施肥窒素の吸収は，さらに下層から採取した土壌水中の硝酸態窒素濃度にも影響を及ぼし，草生区は裸地区でみられた施肥後の急激な濃度上昇を明らかに低下させた．ミカン樹の細根の垂直分布は意外に浅く，22年生の成木でも地表下20cm以内に大部分が分布していることが知られており（奥地ら，1962），地表下50cm層の土壌水中の硝酸態窒素は樹体やナギナタガヤに吸収されずに溶脱するものと考えられる．土壌水中の硝酸態窒素濃度のピークは,10～15cm層の土壌中の無機態窒素含量のピークに比べて約1か月遅れて現れており，無機態窒素含量が急速に減少する時期と一致した．これは主根域の土層で硝化された未吸収分の硝酸態窒素が重力水とともに約40cm降下するために要する時間と考えられる．ライシメーターを用いてミカン園における草生栽培と裸地栽培の溶脱窒素量を検討した事例では，クローバー草生（坂本，1963），雑草草生（山崎，1981）およびバミューダグラス草生（花野ら，1996）のいずれにおいても，草生によって溶脱量は明らかに減少したとされている．また，ナギナタガヤについてもライシメーターを用いた播種後2か年間の試験では，本種の導入によって溶脱した硝酸態窒素量が裸地の約40％に減少したことが報告されている（吉川・高橋，2005）．本試験は播種後3年目から5年目にかけての調査であったが，この期間の草生区における土壌水中の硝酸態窒素濃度の平均値は裸地区の約50％であった．これらのことから，ナギナタガヤの導入はミカン樹の成木が植栽されている圃場条件においても，播種後少なくとも5か年間は環境負荷軽減に寄与できることが示された．

夏秋季の土壌環境に及ぼす影響

本試験の夏秋季における草生区の土壌中の無機態窒素含量は2001年と2003年で異なった傾向がみられ，2001年は裸地区よりやや低く，逆に2003年はやや高く推移した．草生栽培の継続は，有機物の還元により土壌中の腐植含量や全窒素含量を増加させることが知られており（笠原・渡辺，1982；坂本ら，1965；渡辺，1968），ナギナタガヤ草生の場合も播種1～3年後には表層土壌の腐植含量が増加することが報告されている（愛媛県農業経営課編，2004）．ナギナタガヤのC/N比は38程度と比較的高く，枯死後1年間のミカン樹と再発生ナギナタガヤによる利用率は10％程度であることが明らかにされていることから（石川・木村，2003），ミカン園における枯死ナギナタガヤは分解量よりも蓄積量の方が多いと推測される．しかし，連年のナギナタガヤ草生栽培は枯死ナギナタガヤの蓄積量を増加させ，それに伴って分解・放出される無機態窒素量も増加して行くものと考えられる．また，ミカン園における有機物連用土壌からの無機態窒素の放出は，6月頃から急激に多くなり，夏秋季にピークを迎えることが報告されている（岩切，1992；岩本，1987）．枯死ナギナタガヤからの無機態窒素の放出は，枯死した当年は7月中旬以降に開始されることが報告されているが（石川・木村，2003），前年あるいは前々年に枯死し，既に土壌有機物として蓄積されているも

のについては，もう少し早期から放出されるものと推察される．これらのことから，ナギナタガヤ草生栽培を連年継続した場合，播種後5年ほど経過すると有機物の分解が旺盛な夏秋季については，蓄積した枯死ナギナタガヤの無機化が進み，裸地条件下よりも樹体に窒素が供給されやすい土壌環境になるものと考えられる．このことは，2001年と2003年の草生区と裸地区における樹体の葉中窒素含有率の推移にも反映されている．

2002年における夏秋季の無機態窒素含量は，夏季に施肥を行っていないにも関わらず，裸地区において著しく増加した．この点については，当年の降水量が平年の65％と少なく，特に7月～11月の著しい少雨の影響が一因と考えられる．夏季の高温・乾燥条件下では，しばしば乾土効果によって土壌中の有機態窒素が急激に無機化することがあり，ミカン園でも夏季に強度の乾燥処理を行うと土壌中の硝酸態窒素含量が著しく増加することが報告されている（鈴木ら，1967；富田・東，1969）．また，土壌水分の著しい減少は樹体による窒素吸収を妨げることも知られている（富田・東，1969）．このため，裸地区では増加した土壌中の無機態窒素をミカン樹が十分に吸収できず，加えて少雨のため下層への溶脱量も少なかった可能性がある．一方，ナギナタガヤ草生園では，枯死後の6月から本種の発芽期である10月頃までは，地表面が枯死ナギナタガヤによって被覆され敷き草マルチの状態となる．敷き草マルチは裸地に比べて夏季の地温上昇を緩和し（千葉，1982；中川・坪井，1962），土壌水分を保持する効果が高いことが知られている（千葉，1982；栗山ら，1966；坂本，1963）．ナギナタガヤの場合も夏季の地温や土壌水分に関して同様の効果をもたらすことが報告されている（辻，2002）．このため，2002年の草生区は裸地区ほど高温乾燥の影響を受けなかったものと考えられる．

収量および果実品質に及ぼす影響

一般にウンシュウミカンでは9月以降に多量の窒素が樹体に流入した場合，窒素の遅効きによって果皮の着色や果汁の減酸の遅延，浮き皮果の発生など果実の品質低下を招くことがある（岩切，1992；坂本・奥地，1968；鈴木ら，1975）．ウンシュウミカンに対するウマゴヤシ草生栽培では，草生管理の継続によって樹体に供給される窒素が増加し，収穫果の着色遅延や減酸遅れを招いたことが報告されている（坂本，1963）．ナギナタガヤ草生の場合も，連年の草生栽培によって果実品質の低下が懸念されたが，本試験では7年間着色遅延や浮き皮果の発生などは認められず，クエン酸含量は逆に裸地区よりやや減少する傾向がみられた．ナギナタガヤ草生園では前述のように，夏秋季に枯死ナギナタガヤからの窒素放出が行われ，経年とともに無機化量は増加すると考えられるが，同時に再有機化も進行するため（広瀬，1973b），C/N比が低く分解の早いマメ科草種（広瀬，1973a）とは異なり，ミカン樹の根域に供給される無機態窒素は緩やかに増加するものと推測される．このため，樹体による特定の期間の過剰な窒素吸収は行われず，加えて10月以降は新たに発芽・伸長を開始するナギナタガヤによって窒素吸収が再開されることから，樹体には窒素の遅効きが生じなかったものと考えられる．また，果汁のクエン酸含量は夏秋季の土壌水分の影響を大きく受け，この時期の乾燥処理は減酸を遅延させることが知られている（栗山，1988；坂本・奥地，1970；鈴木ら，1967；富田・東，1969）．ナギナタガヤ草生園では，夏秋季に地表面が敷き草マルチ状態となっているため，高温乾燥期における土壌水分の保持力の差によって，裸地区より減酸が促進された可能性がある．

草生栽培が樹体の生育や収量に及ぼす影響については，ウンシュウミカン（渡辺，1968；

山崎，1987)やリンゴ(佐藤・佐々木，1982)の事例から，特に幼木期や草種導入当初などに草との強い養水分競合が生じ，樹体の窒素レベルや樹勢の低下，収量の減少が認められることがある．19年生の成木から開始した本試験では，ナギナタガヤ草生による収量の減少は認められなかった．これは，貯蔵窒素を豊富に有する成木の場合は，ナギナタガヤの導入によって発生する窒素競合の影響で施肥窒素の吸収が減少しても，急激に樹体生育が悪化しないことを示唆していると考えられる．赤松ら（1970）は30年生のウンシュウミカン樹に対する窒素施用量試験を実施し，貯蔵窒素が豊富な成木でも処理4年目以降には収量差が現れ，施肥窒素量が少ない場合は収量が減少し隔年結果性が大きくなったことを報告している．本試験における草生区の収量は，4年目以降になるとむしろ増加傾向を示した．草生栽培は，その継続によって土壌改良効果が得られ，樹体生育が良好になるに従って収量が増加したとする報告も残されている(坂本ら，1965；渡辺・笠原，1982)．これらのことから，ナギナタガヤ草生を継続したミカン園では枯死ナギナタガヤの蓄積とともに土壌改良効果が得られ，また，夏秋季は敷き草マルチの効果によって根圏環境が改善されるため，ナギナタガヤの生育期に発生する窒素競合の悪影響が緩和あるいは相殺され，7年間に渡り裸地区以上の収量を確保できたものと推察される．

以上の結果から，成木の早生ウンシュウミカン園へのナギナタガヤの導入は，7年間に渡って収量や果実品質を低下させずに，環境負荷軽減に貢献できることが示された．

第５節 摘　要

ナギナタガヤ草生ミカン園において，3月に施用した春肥窒素のウンシュウミカン樹とナギナタガヤによる吸収特性を把握するため，^{15}Nトレーサー法を用いて検討した．ナギナタガヤ枯死後の6月に解体した草生区の樹体は，裸地区に比べて新葉の着生数が減少し，乾物重および全窒素量も少なかった．ナギナタガヤの乾物重は樹体の24％程度であった．樹体の春肥窒素吸収量は，草生区が裸地区の47％と著しく少なく，特に新葉における差異が大きかった．草生区におけるナギナタガヤの吸収量は，樹体の約2倍であった．また，ナギナタガヤは吸収窒素の大部分が地上部に分配されていた．樹体の^{15}N寄与率は，いずれの器官においても裸地区の方が高く，特に新生器官における差異が大きかった．一方，ナギナタガヤにおける^{15}N寄与率は，樹体に比べ著しく高かった．春肥窒素の利用率は，樹体を比較すると草生区16.7％，裸地区35.3％であり，裸地区の方が顕著に高かった．しかし，ナギナタガヤによる吸収量を加えた草生区の利用率は51.6％となり，裸地区の約1.5倍であった．

同様に，秋肥窒素のウンシュウミカン樹とナギナタガヤによる吸収特性を検討するため，11月に^{15}N標識硫酸アンモニウムを施用し3月に解体調査を行った．ミカン樹による秋肥窒素吸収量は，草生区が裸地区の41％と著しく少なく，特に吸収窒素の集積が大きい新葉と細根における差異が大きかった．草生区におけるナギナタガヤの秋肥窒素吸収量は，同区の樹体の約2倍であった．また，ナギナタガヤは吸収窒素の多くが地上部に分配されていた．樹体の^{15}N寄与率は，草生区に比べて裸地区の方が明らかに高かった．一方，ナギナタガヤにおける^{15}N寄与率は，樹体に比べて著しく高かった．秋肥窒素の利用率は，樹体を比較すると草生区19.5％，裸地区48.1％であり，裸地区の方が顕著に高かった．しかし，ナギナタガヤによる吸収量を加えた草生区の利用率は60.9％となり，裸地区の約1.3倍になるこ

とが示された．

次に，枯死ナギナタガヤ由来窒素のウンシュウミカン樹および再発生ナギナタガヤによる吸収特性を明らかにするため，^{15}N標識ナギナタガヤを施用し，1年間の追跡調査を行った．5月下旬に枯死したナギナタガヤに由来する窒素は,8月頃からミカン樹に吸収され始め，当年のミカン樹各器官や翌年の春季新生器官に移行した．同様に，再発生したナギナタガヤにも吸収され，1年後のミカン樹と再発生ナギナタガヤによる枯死ナギナタガヤ由来窒素の吸収量はほぼ同量であった．また，ミカン樹各器官の^{15}N寄与率は春季新生器官や旧葉，細根で高く，収穫果では低かった．再発生したナギナタガヤの^{15}N寄与率は樹体に比べて著しく高く，かつ地下部の方が地上部より高率であった．枯死ナギナタガヤ由来窒素の利用率は，樹体5.5%，ナギナタガヤ5.4%であった．

さらに，圃場条件下の成木ウンシュウミカン園おける，連年のナギナタガヤ草生栽培が土壌や樹体，収量および果実品質に与える影響を検討するため，19年生の‘宮川早生’を用いて7年間調査を行った．根域の土壌中の無機態窒素含量は，裸地区では春肥や秋肥の施用後に急速に増加したが，草生区は裸地区ほどの増加がみられなかった．地表下50cmの土層から採取した土壌水中の硝酸態窒素濃度も同様に，裸地区は施肥後に急激に上昇したが，草生区は裸地区より低く推移した．また，夏秋季における草生区の土壌中の無機態窒素含量は，試験開始2年目では裸地区よりやや低く推移し，この期間の葉中窒素含有率も裸地区より低かった．しかし，4年目になると草生区の無機態窒素含量は裸地区よりやや高く推移する傾向がみられ，葉中窒素含有率も裸地区と同程度に推移した．5月採取葉の葉中窒素含有率については，2か年とも裸地区の方が高かった．7年間の収量は草生区の方がやや多く，同区は果実品質の低下も全く認められなかった．

以上の結果から，ウンシュウミカン園へのナギナタガヤの導入は，園全体での春肥および秋肥窒素の吸収量を増加させ，未吸収量を減少させることが明らかとなり，環境負荷軽減に寄与できることが示された．また，枯死したナギナタガヤ由来窒素は，枯死後1年の間に11%がミカン樹と再発生ナギナタガヤに利用されることが明らかになった．ただし，ナギナタガヤによる施肥窒素の吸収量はかなり多いため，成木のミカン園に本種を導入した場合は，収量や果実品質などに悪影響が認められなかったが，貯蔵窒素の蓄積が少ない幼木期のミカン園では窒素補給対策を検討する必要があると考えられた．