

ケニア国の半乾燥地における菌根菌を活用した アグロフォレストリー

石井 孝 昭

The utilization of mycorrhizal fungi on agroforestry systems in the semi arid regions of Kenya

TAKA AKI ISHII

要旨：ケニア国の半乾燥地における菌根菌を活用したアグロフォレストリー体系を構築する上で必要な基礎資料を得るため、この地区における菌根菌の調査を行うとともに、樹木、草などの菌根形成を観察した。また、当地区における菌根菌の接種効果やその活用、特にVA菌根菌資材による苗木養成法についても検討を加えた。その結果は以下に示すとおりである。

- 1) 土壌から採集されたVA菌根菌胞子は、主として*Glomus*属のものであった。
- 2) 調査したいずれの植物においても、外生菌根はみられず、VA菌根であった。しかし、菌根感染率は植物の種類によって差異があった。特に、*Cynodon nlemfuensis*, *Cyperus rigidifolius*, *Cyperus teneristolon*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Digitaria abyssinica*, *Euphorbia hirta*, *Imperata cylindrica*, *Killinga bulbosa*, *Panicum maximum*, *Setaria pumilla* および *Solanum incanum* という草、キャッサバ、並びに *Carica papaya*, *Mangifera indica*, *Psidium guajava*, *Tamarindus indica* のような主要な熱帯果樹や上着の果樹2種類における菌根感染率は高かった。
- 3) VA菌根菌を接種したパイア実生苗をパイロット圃場に移植したところ、移植約8カ月後の生存率は90%であり、無接種個体(25%)と比べて、著しく高かった。
- 4) キビ栽植土壌を菌根菌接種源として、27種類の樹木に接種したところ、多くの樹種で菌根感染率が高まり、樹体生長が旺盛になる傾向がみられた。
- 5) 以上の結果から、菌根菌、特にVA菌根菌の利用は当地のアグロフォレストリー体系の構築に大いに貢献することが明らかとなった。

(2000年9月25日受理)

キーワード：アグロフォレストリー、菌根菌、ケニア、半乾燥地、果樹、草、植林

緒 言

菌根菌 (mycorrhizal fungi) は、植物から糖などの光合成産物を受け取る見返りとして、植物の養水分吸収を促進させ、樹体生長を旺盛にさせるだけでなく、病害抵抗性を賦与し、環境ストレスに対する抵抗性も増大させることから、これからの農業を展開する上において重要な共生微生物として、最近着目されてきている。

菌根菌は、菌糸が根を包んで菌糸鞘を形成する外生菌根菌、菌糸が根の内部で伸長する内生菌根菌、並びにこれらの中間的な性質を有す内外生菌根菌に大別される。外生菌根菌は、菌糸が根周辺に伸び、根を包むようになるので、肉眼で菌根 (mycorrhiza) 形成を容易に観察することができる。例えば、マツ類、クリ類、フタバガキ科の樹木などにおいて観察され、菌糸によってハルティヒネットと呼ばれる特殊な根が形成される。一方、代

表的な内生菌根菌はVA菌根菌 (vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi; 最近アーバスキュラー菌根菌とも呼ばれる) であり, この菌は根の内部にのう状体 (vesicle) や樹枝状体 (arbuscule) を形成する特徴がある。現在のところ, VA菌根を形成するものとして, アツギケカビ科の6属 (*Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Sclerocystis* および *Scutellospora*) が知られている。また, この菌は, 植物を選ぶ他の菌根菌と違い, 陸生植物のほとんど全てと共生関係を築くことが明らかになってきている。ただし, 感染の程度は植物の種類によって異なる。

最近の化石調査報告 (Remy et al., 1994) によると, VA菌根菌はすでに4億年前の *Aglaophyton major* というシダ植物と共生関係を築いていたという。この時期は植物が海中から陸地にさかんに侵入し始めたと考えられているデボン紀初期であり, VA菌根菌の助けをかりて, 植物が劣悪な環境下にある陸地に如何に侵入していったかを想像してみると興味・関心が駆り立てられる。ちなみに, 石井ら (1996a) はオヒルギ, ヤエヤマヒルギ, モンパノキ, ミズガンピ, クサトベラのような熱帯・亜熱帯の海岸や河口の一部海水あるいは淡海水の潮間帯泥地に生える常緑低木のマングローブにもVA菌根形成が観察されることを報告している。

本研究を行ったケニア国キツイ地区は当国中部の半乾燥地に位置し, 干害が深刻なところである。当地における1995年度の年間降水量はわずか421 mmであった。ちなみに, ケニアでは国土の約8割が乾燥および半乾燥地であると言われている。このように, ケニア国における緑化技術の推進は, 当国の農林業を安定化させるためではなく, 地球環境保全の面からも非常に重要なテーマの一つと考えられる。そのためには, 菌根菌の積極的な活用

を考えることが重要である。というのも, ケニア国における土壤生産力の低下が土壤中のVA菌根菌胞子数の少なさと密接に関与していると考えられるからである。筆者らが, ケニア国の4地域 [湿潤地域, 高地, 半乾燥・乾燥地域および海岸地域] における25カ所計103の果樹園 (アボカド: 6園, カンキツ: 25園, パッションフルーツ: 15園, パパイア: 21園, バナナ: 23園, マカダミア: 4園およびマンゴ: 9園) で調査した結果では, 土壤25g中のVA菌根菌胞子数は, いずれの果樹園においても200個以下であり, きわめて少なかった (Wamoch et al., 1997a)。わが国のカンキツなどの樹園地では, 大量の農薬や肥料の使用にもかかわらず, 少なくとも土壤25g中に1000個程度の胞子が観察される (石井ら, 1992; Ishii et al., 1999)。土壤中のVA菌根菌胞子数が少ない主因は雨期における土壤流亡によるものと考えられ, その防止方法の検討が必要である。最近, カンキツ園ではナギナタガヤ草生栽培技術が普及しつつある。この草は, VA菌根菌の増殖に有効であり, かつカンキツ樹との養水分の競合も小さい (石井, 2000)。またこの草は夏場に枯れ, 土壤表面を被覆する特性を有していることから, 雑草の防除, 土壤水分の保持, 土壤流亡の防止などにも効果がある (石井, 2000)。

近年, 多くの国, 特に熱帯地域の発展途上国において, アグロフォレストリー (agroforestry) の導入が検討されている (Nair, 1993)。この用語は, 農業と林業を結合した合成語であり, ただ単なる植林だけでなく, 換金作物などの栽培も考慮に入れて, 実践的, かつ総合的に植林を行う技術体系を意味している。この技術の導入に当たっては, まず樹木と換金作物との間における養水分などの競合の程度を調査するとともに, これらの菌根形成能を検討することが重要である。一般に, 養水分の競合



Fig. 1. Overview of JICA pilot forests in Kitui, Kenya.
Photographed at the rainy season.

が小さい植物間ではV A菌根菌の菌糸によるネットワークが容易に形成される傾向にある (Cruz et al., 2000)。

菌根菌の植物への接種は苗木養成において非常に効果的であることがよく知られている。わが国ではV A菌根菌資材が市販されているが、高価であるため、これらの資材を発展途上国において利用するのは難しい。前述したように、ケニア国における果樹園土壤中のV A菌根菌胞子はきわめて少ないけれども、いくらかは存在している。この土着の菌根菌を増殖させた土壌を接種源として苗木へ使用することは、現地即した接種技術として有効と考えられる。また、土着の菌根菌は現地の土壌環境に適応しているため、その接種効果が現れやすいという利点がある。

そこで本研究では、ケニア国キツイ地区国際協力事業団 (JICA) パイロット・フォレスト (第1図) 内やその周辺における土壌中の菌根菌胞子、並びにこの地区に生育している樹木、草などの菌根感染状態を調査するとともに、当地区でのV A菌根菌の接種効果やその活用、特にV A菌根菌資材による苗木養成法についても検討した。

材料および方法

実験1 土壌中のV A菌根菌胞子の採集、並びに観察

キツイ地区パイロット・フォレストにおけるさまざまな場所から土壌を採取し、Ishii et al. (1996c) の方法によってV A菌根菌胞子を採集し、観察を行った。

実験2 キツイ地区に生育する植物の菌根観察

1997年11月から12月の雨期において、パイロット・フォレスト内やその周辺に生育する15種類の草、9種類の果樹、キャッサバおよびバナナの根を採取し、これらの植物の菌根形感染率を調査した。外生菌根の観察は肉眼で、内生菌根、特にV A菌根の観察は、Phillips & Hayman (1970) の方法で染色した後、Ishii et al. (1996b) の方法を用いて観察した。

実験3 V A菌根菌の接種が圃場に移植したパパイア実生苗の生存に及ぼす影響

ケニア国ジョモ・ケニアッタ農工大学で育成中の1年生パパイア実生苗に、1996年8月、*Glomus caledonium* を接種した。その後、この苗を1996年11月中旬、パイロット・フォレスト内に移植し、パパイアの生存率を定期的に調査した。なお、対照区には菌根菌無接種個体を用いた。

実験4 V A菌根菌接種源としてのキビ栽植土壌が樹木の菌根形成および生長に及ぼす影響

実験には、キツイ地区パイロット・フォレスト苗木圃場において育成中の27種類の樹木 (果樹を含む) 1年生実生苗 (第3表を参照) を用いた。1997年9月中旬、これらの実生苗をビニルポットに移植した。このとき、V A菌根菌胞子を含む培土を1鉢 (直径10cm、深さ: 20cm) 当たり15g (V A菌根菌胞子数: 約700個) 施し、接種を行った。対照 (無接種) 区には、キビなどのよう

なV A菌根菌胞子の増殖に有効な植物をこれまで育てたことのない、無消毒の土壌 (V A菌根菌胞子数: 約50個/25g土壌) を用いた。なお、接種用培土は苗木圃場の空き地でキビを育て、土着のV A菌根菌を増やした後、キビが枯れる頃に採取した土壌である。接種後、約2カ月後に解体調査を行い、樹体生長を測定するとともに、根の先端から2cmまでのところのV A菌根感染状態をPhillips & Hayman (1970) の方法で染色した後、Ishii et al. (1996b) の方法を用いて光学顕微鏡下で観察した。

結果および考察

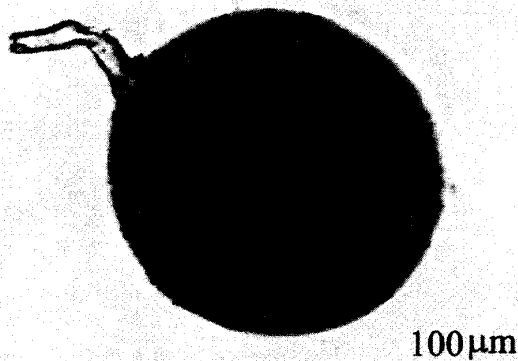
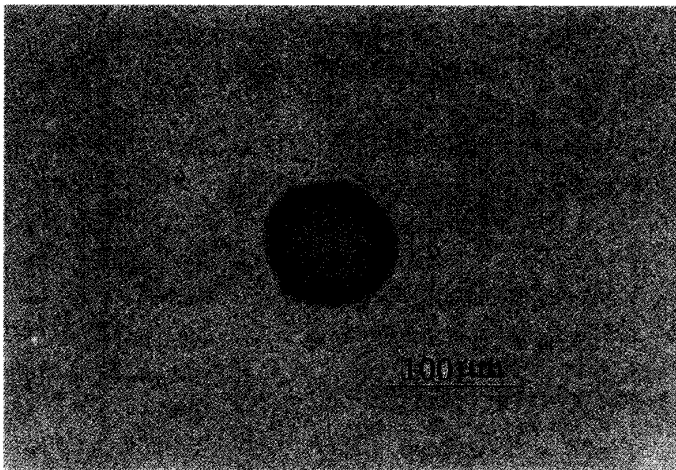
パイロット・フォレストから採集されたV A菌根菌胞子は、*Glomus caledonium* (第2図)、*Glomus etunicatum* (第2図)、*Glomus fasciculatum* (第2図) および未同定の*Glomus*属の胞子4種、*Gigaspora margarita*、並びに未同定の*Scutellospora*属の胞子1種であったが、*Glomus*属の胞子が多かった。

第1表および第3-1~3-3図に示すように、いずれの草においてもV A菌根が観察された。しかしながら、菌根感染率は草種によって差異がみられ、*Launea cornuta*では菌根感染率が8.2%であったが、*Cyperus rigidifolius*、*Cyperus teneristolon*、*Dactyloctenium aegyptium*、*Euphorbia hirta*および*Setaria pumilla*では70%以上の高感染率を示した。Newman et al. (1986) は、ケニア国サバンナ地域において、われわれが調査した以外の草種、5種類の草 (*Bothriochloa insculpta*、*Chloris roxburghia*、*Chrysopogon plumulosus*、*Digitaria macroblephara*および*Pennisetum mezianum*) の菌根形成を調査したとこ

Table 1. The percentage of VAM infection in the roots of several kinds of weeds in Kitui, Kenya.

The kind of weeds	% of VAM infection
<i>Cynodon nlemfuensis</i>	57.7 ± 7.9 ²
<i>Cyperus rigidifolius</i>	78.7 ± 9.4
<i>Cyperus teneristolon</i>	70.6 ± 13.5
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	78.0 ± 0.1
<i>Digitaria abyssinica</i>	48.0 ± 9.1
<i>Eragrostis temifolia</i>	32.5 ± 8.9
<i>Euphorbia hirta</i>	78.7 ± 8.4
<i>Imperata cylindrica</i>	59.1 ± 11.4
<i>Kyllinga bulbosa</i>	49.2 ± 7.1
<i>Launea cornuta</i>	8.2 ± 6.1
<i>Oxygonum sinuatum</i>	31.1 ± 7.3
<i>Panicum maximum</i>	44.5 ± 6.7
<i>Setaria pumilla</i>	72.9 ± 9.0
<i>Solanum incanum</i>	46.6 ± 11.1
<i>Trichodesma zeylonicum</i>	40.1 ± 4.9

² Mean ± standard error (SE) (n=3).

*Glomus caledonium**Glomus etunicatum**Glomus fasciculatum*

る、いずれの草においても内生菌根が観察されたと報告している。

草の選抜に当たっては、樹木と水分競合が少なく、菌根形成能が大である草を見つけ出すとともに、草丈が低いものを探索することが望ましい。これまでの筆者らの調査では、イネ科やマメ科の草は一般にVA菌根感染率が高いので、これらの中から有望な草を見つけ出す方が容易かもしれない。なお、南アフリカ共和国のカンキツ園やケニア国のICRAFではイネ科のメピアグラスという草が防風樹の代用や土壌流亡の防止のために用いられている。この草は、イネ科であるのでVA菌根形成能が大であり、樹木との養水分競合は比較的小さいものと考えられる。草丈は2~3mにもなるので、樹木への光競合などを考えると時々刈り取る必要があるが、刈り取った草は家畜の飼料として利用できる利点がある。

一方、わが国に生育する *Cyperus* 属 (カヤツリグサ科) の草には一般に菌根形成がみられない。ただし、この草が水ストレスや除草剤などを被ったときには菌根感染率が高まる傾向にある。当地は半乾燥地域にあり、水ストレスを受けやすい環境にあるので、*Cyperus* 属の菌根感染率が高まったのかもしれない。あるいは種間の違いによる影響も考えられ、菌根形成のメカニズムを解明する上で非常に興味深いものがある。

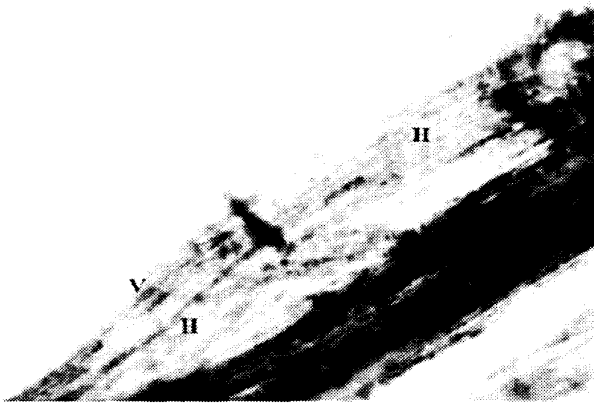
第2表、第4-1図および第4-2図に示すように、いずれの果樹、キャッサバおよびバナナにおいても、外生菌根は観察されず、VA菌根のみが観察された。特に、土着果樹である *Nodooto* (*Pachystigma schunannianum*) および *Maua* (*Sclerocarya birrea*)、主要果樹である *Carica papaya*, *Mangifera indica*, *Psidium guajava* および *Tamarindus indica*, 並びにキャッサバにおける菌根感染率は高かった。

Table 2. The percentage of VAM infection in the roots of cassava (*Manihot esculenta*), banana (*Musa* spp.) and several kinds of fruit trees grown in Kitui, Kenya.

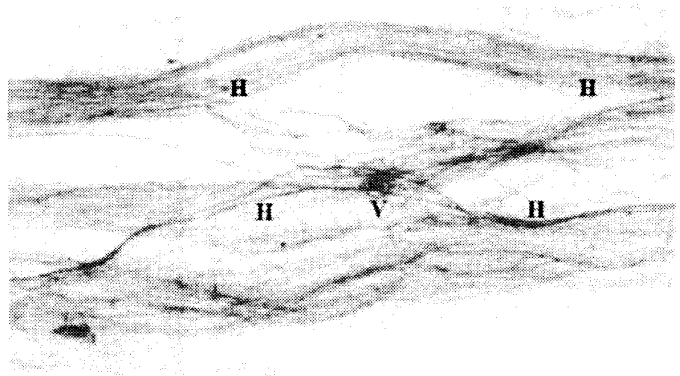
The kind of plants	% of VAM infection
<i>Manihot esculenta</i>	51.6
<i>Musa</i> spp.	11.7 ± 2.3 ²
<i>Azanza garckeana</i>	29.2 ± 6.3
<i>Carica papaya</i>	55.7 ± 6.2
<i>Mangifera indica</i>	61.7 ± 12.6
<i>Pachystigma schunannianum</i>	79.4 ± 3.9
<i>Psidium guajava</i>	46.4 ± 5.2
<i>Sclerocarya birrea</i>	50.7
<i>Tamarindus indica</i>	59.2 ± 10.5
<i>Vangueria madagascariensis</i>	32.0 ± 5.7
<i>Vitex doniana</i>	34.7 ± 3.3

² Mean ± SE (n=2 or 3).

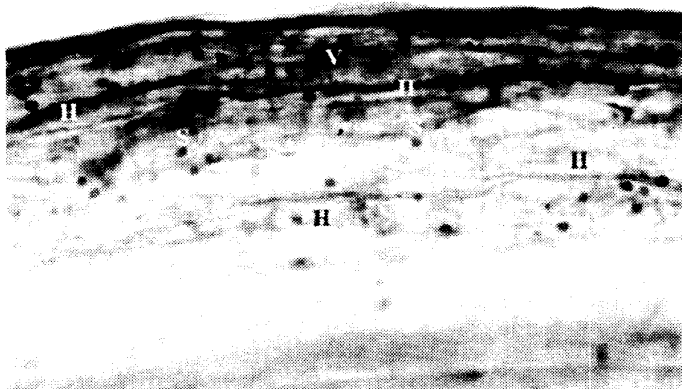
Fig. 2. Main VA mycorrhizal fungi collected in Kitui, Kenya.



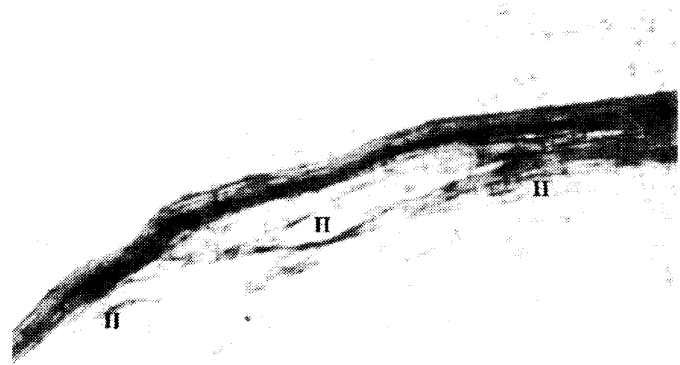
Cynodon nlemfuensis (x150)



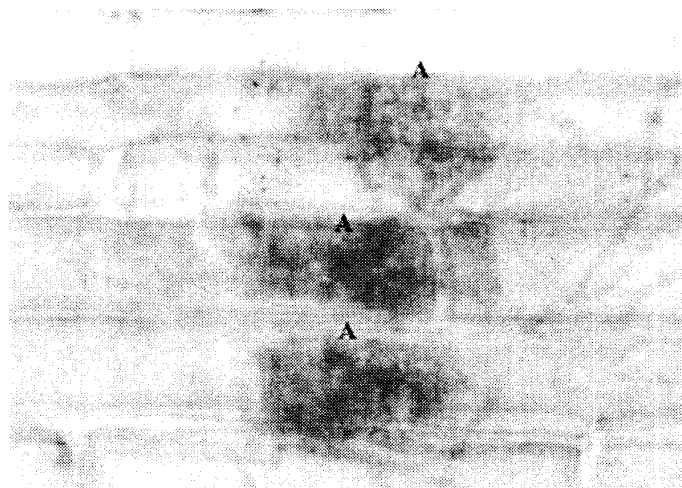
Cyperus rigidifolius (x150)



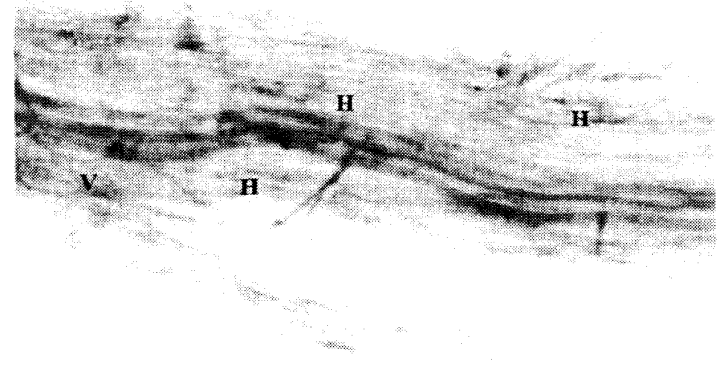
Cyperus teneristolon (x150)



Dactyloctenium aegyptium (x150)



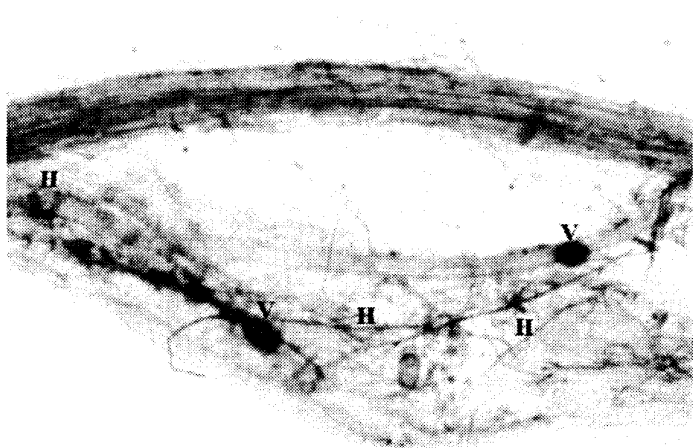
Digitaria abyssinica (x600)



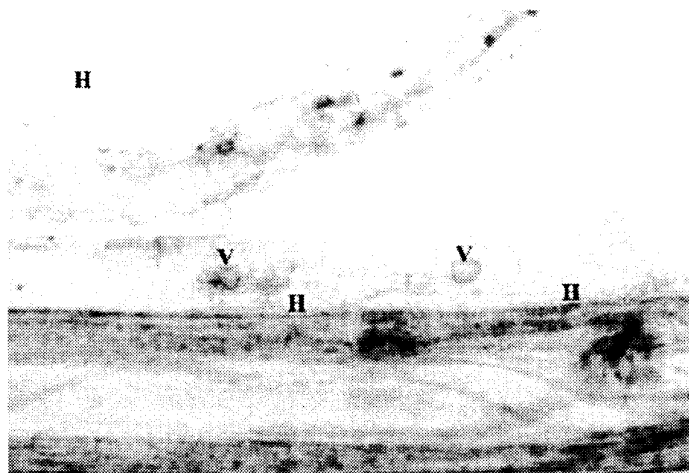
Eragrostis temifolia (x150)

Fig. 3-1. VA mycorrhizae in several kinds of weeds grown in Kitui, Kenya.

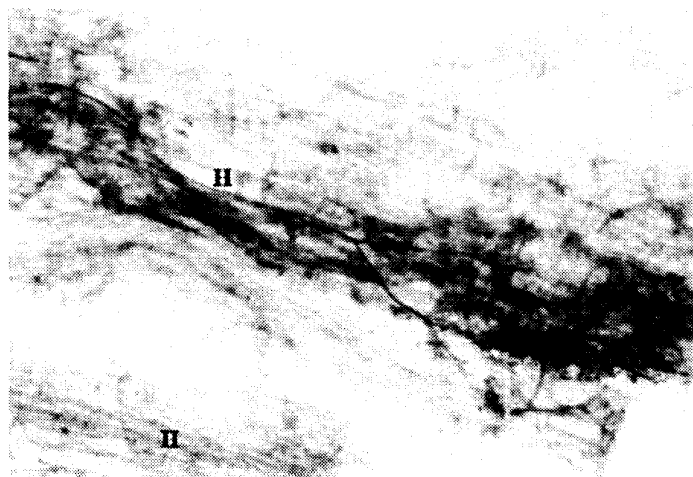
A: arbuscule, H: hypha, S: spore, V: vesicle.



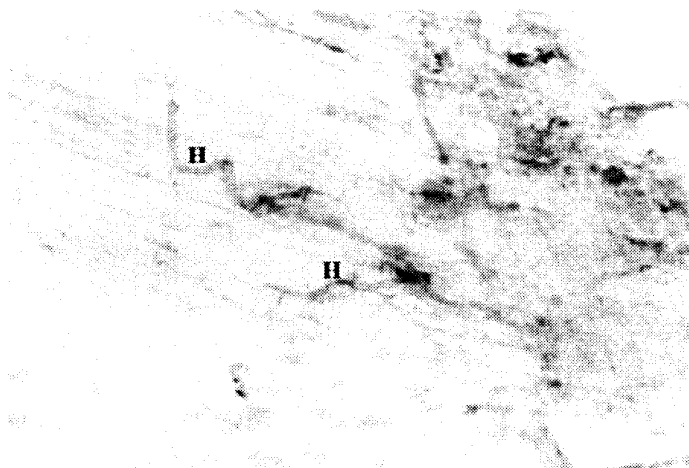
Euphorbia hirta (x150)



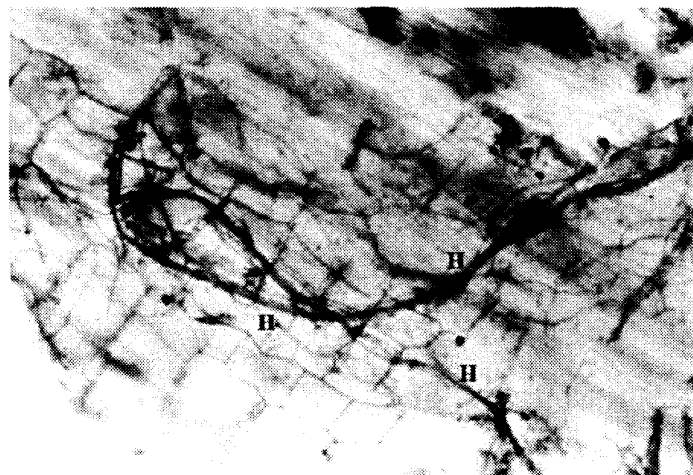
Imperata cylindrica (x150)



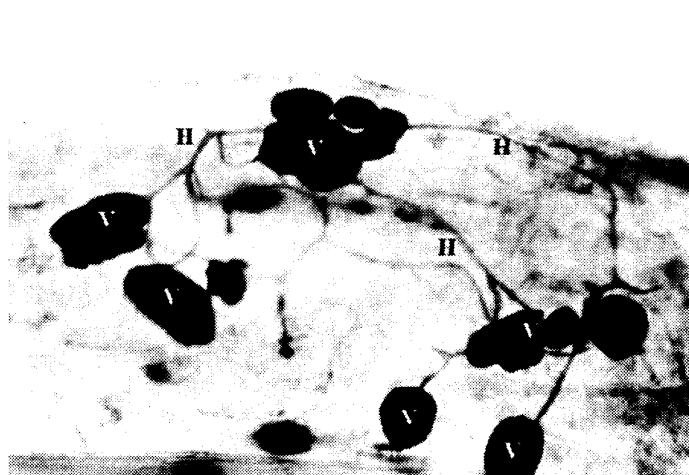
Kyllinga bulbosa (x150)



Launea cornuta (x150)



Oxygonum sinuatum (x150)



Panicum maximum (x600)

Fig. 3-2. VA mycorrhizae in several kinds of weeds grown in Kitui, Kenya.
H: hypha, V: vesicle.

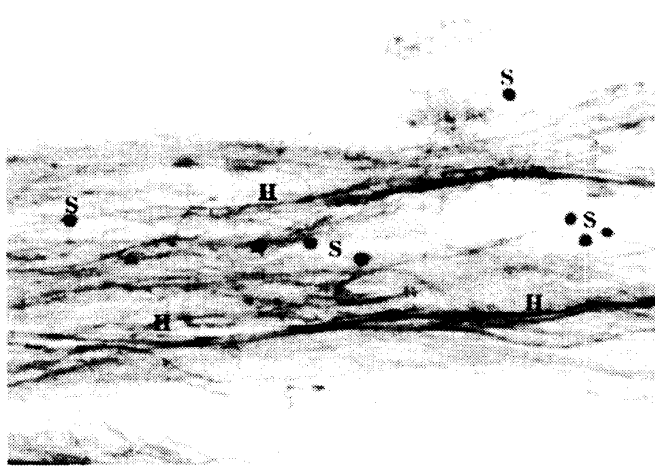
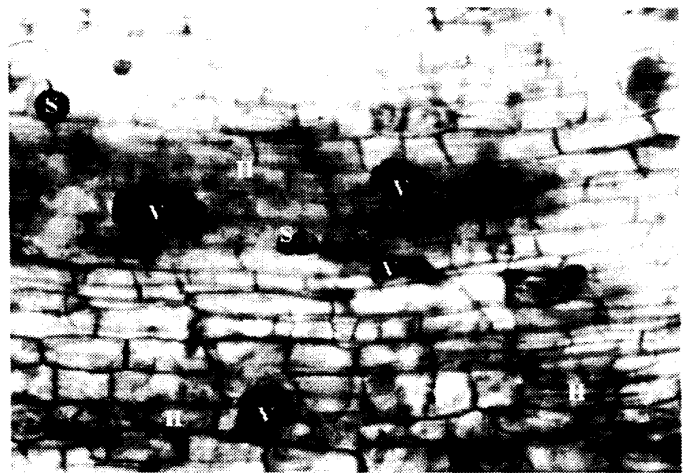
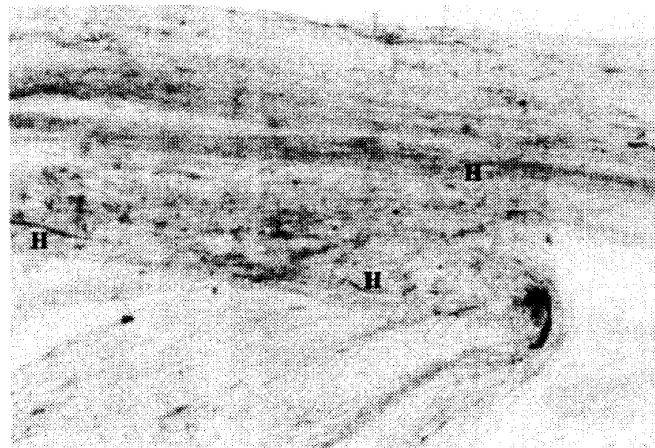
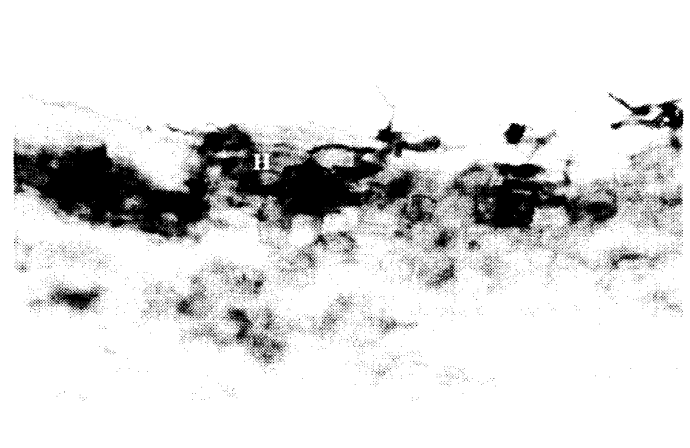
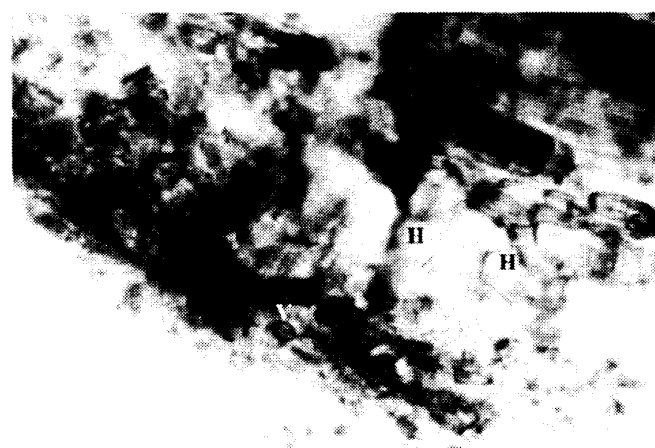
*Setaria pumilla* (x150)*Manihot esculenta* (x150)*Solanum incanum* (x150)*Musa* spp. (x150)*Trichodesma zeylonicum* (x150)

Fig. 3-3. VA mycorrhizae in several kinds of weeds grown in Kitui, Kenya.

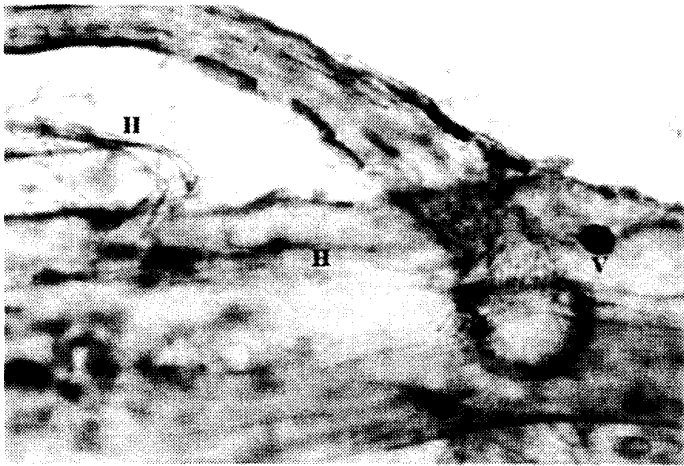
H: hypha, S: spore, V: vesicle.

Fig. 4-1. VA mycorrhizae in cassava (*Manihot esculenta*) and banana (*Musa* spp.) grown in Kitui, Kenya.

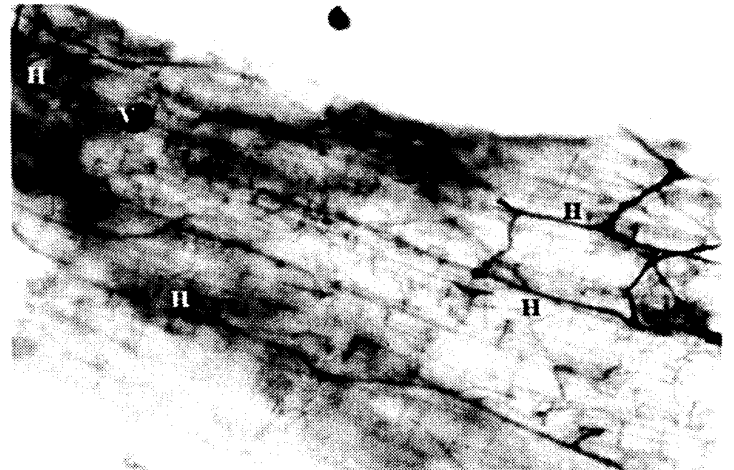
H: hypha, V: vesicle.

果樹栽培を導入したアグロフォレストリーの構築において、前述したVA菌根形成能が高い果樹の利用は菌根菌菌糸による樹木と果樹間のネットワーク形成に有効と考えられる。また、これらの果樹は耐干性を得るためにVA菌根菌への依存度を高めているのかもしれない。実験4の結果(第3表)でもみられるように、*Carica papaya*, *Mangifera indica*, *Psidium guajava*および*Tamarindus indica*ではVA菌根菌接種の効果がきわめて顕著に現れる傾向にあった。

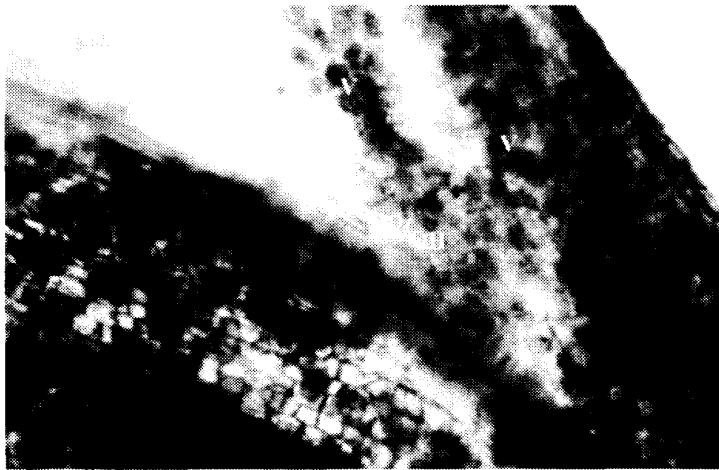
アグロフォレストリーにおける草や果樹の導入に当たって、草と樹木との間や樹木間の養水分競合の問題が生じることがある。しかし、このような問題は全ての植物間で起こるわけではなく、むしろ相性のよい植物同士を植えた場合には、単作よりも混作の方が養水分競合の問題がほとんど観察されず、収量なども増大することが経験的に認識される。これに関与している土壌微生物として、菌根菌の働きは大であることが少しずつ解明されてきて



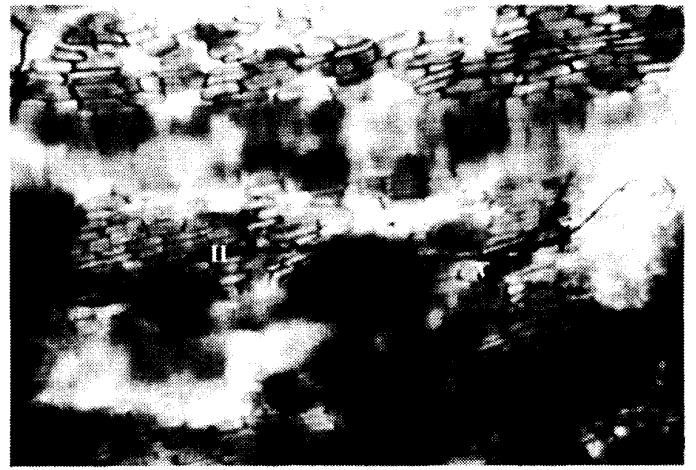
Azanza garckeana (x150)



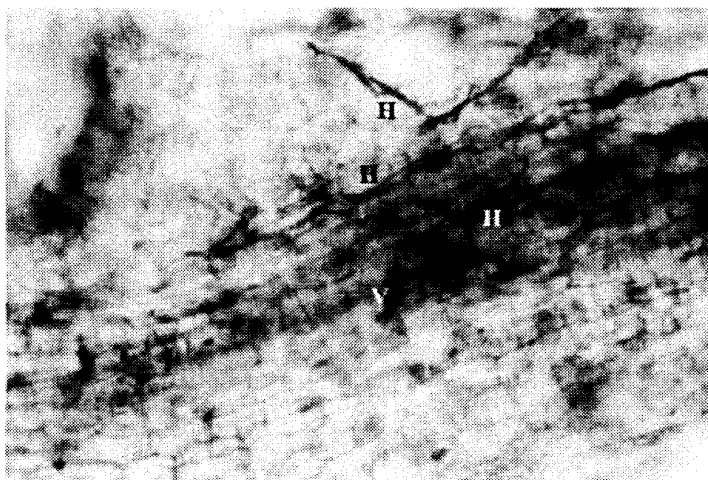
Sclerocarya birrea (x150)



Pachystigma schunannianum (x150)



Vangueria madagascariensis (x150)



Vitex doniana (x150)

Fig. 4-2. VA mycorrhizae in several kinds of fruit trees grown in Kitui, Kenya.

H: hypha, V: vesicle.

Table 3. Effect of millet-cultivated soil media as VAM inocula on the formation of VA mycorrhizae and the growth of trees ¹.

The kind of trees	% of VAM infection ¹			Total fresh weight (g)		
	Cont	Inoculated	Significance ²	Cont	Inoculated	Significance
<i>Acacia aulococarpa</i>	0.9	66.6	**	12.7	18.5	**
<i>Acacia melifera</i>	9.5	63.7	**	10.3	12.3	*
<i>Azadirachta indica</i>	48.1	100.0	**	8.0	10.7	ns
<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.7	15.6	**	14.0	14.7	ns
<i>Carica papaya</i>	4.7	15.8	*	8.5	24.0	**
<i>Cassia (Sena) siamea</i>	44.2	68.4	ns	13.3	16.7	ns
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0.0	63.3	**	5.0	6.3	*
<i>Cordia ovalis</i>	28.6	100.0	**	13.3	26.3	**
<i>Croton megalocarpus</i>	25.1	73.3	*	8.3	9.7	*
<i>Dalbergia melanoxylon</i>	54.4	97.5	*	11.3	12.7	ns
<i>Delonix regia</i>	41.1	100.0	*	5.3	8.3	*
<i>Dovyalis caffra</i>	39.4	63.0	*	13.0	15.7	ns
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	21.5	68.1	**	7.6	8.3	ns
<i>Grevillea robusta</i>	13.8	41.0	**	15.0	16.3	ns
<i>Grewia ectasicarpa</i>	27.8	61.8	**	5.0	5.0	ns
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	66.9	92.6	*	6.3	9.0	*
<i>Mangifera indica</i>	5.9	78.8	**	7.3	32.0	**
<i>Moringa oleifera</i>	12.6	86.3	**	28.5	29.3	ns
<i>Melia volkensii</i>	92.1	100.0	ns	12.6	13.0	ns
<i>Persea americana</i>	2.5	57.4	**	5.0	35.3	**
<i>Prosopis juliflora</i>	80.2	98.7	*	11.3	15.3	*
<i>Psidium guajava</i>	18.4	94.2	**	2.3	71.0	**
<i>Schimus molle</i>	4.9	35.2	**	7.3	12.3	**
<i>Tamarindus indica</i>	36.4	100.0	**	11.3	13.3	*
<i>Terminalia prunoides</i>	48.6	70.1	ns	14.6	18.3	ns
<i>Vitex doniana</i>	82.3	88.0	ns	9.3	8.7	ns
<i>Zizyphus mauritiana</i>	81.9	92.6	ns	11.5	12.7	ns

² **= 1% level, *= 5% level and ns=non-significant (n=3).

¹ % of VAM infection=(Root length infected / root length observed) x 100.

³ All of the inoculated plots were applied with 15 g of the soil media in which millet plants were cultivated in order to propagate VAM spores. In the control plots, non-cultivated (virgin) soil media were used.

いる (Ishii et al., 1996c; Cruz et al., 2000)。おそらく、菌根菌の菌糸によって、根圏に養水分吸収のための巨大なネットワークができていると想像され、一方の樹勢が弱れば、他方の樹から養水分が供給されているものと考えられる。また、草によって土壌を覆う方法は土壌表面からの水分の蒸発を抑制することから、特にキツイ地区のような乾燥地での草の導入は有効であると思われる。

第5図に示すように、*Glomus caledonium*というVA菌根菌を接種したパイア実生苗をパイロット圃場に移植したところ、移植約8カ月後の生存率は90%であり、無接種個体と比べて、著しく高かった。この主因は、菌根菌の接種によって、水ストレスに対する抵抗性が増大したものと考えられる。カンキツ樹の場合では、調査開始10日目の対照樹（非感染樹）では著しい水ストレス障

害が発生し、中には枯死するものがあったのに対し、菌根菌接種樹では水ストレス症状がほとんど観察されなかった (Shrestha et al., 1996)。今後、植林地への移植に当たっては苗木圃場で前もって菌根菌を接種する方法を導入するとともに、植林地での菌根感染樹の耐干性に対する効用についても詳細に調査する必要がある。

第6-1~6-5図に示すように、いずれの樹木においても外生菌根は観察されず、VA菌根のみが観察された。ユーカリなどは原生地では一般に外生菌根菌による菌根が形成される。それゆえ、導入樹種では外生菌根菌（キノコ類など）の活用も今後検討する必要がある。しかし、第3表に示すように、一般に外生菌根を形成する樹種でも、VA菌根菌接種によって、菌根形成が良好となる傾向が見られた。一方、*Cassia (Sena) siamea*,

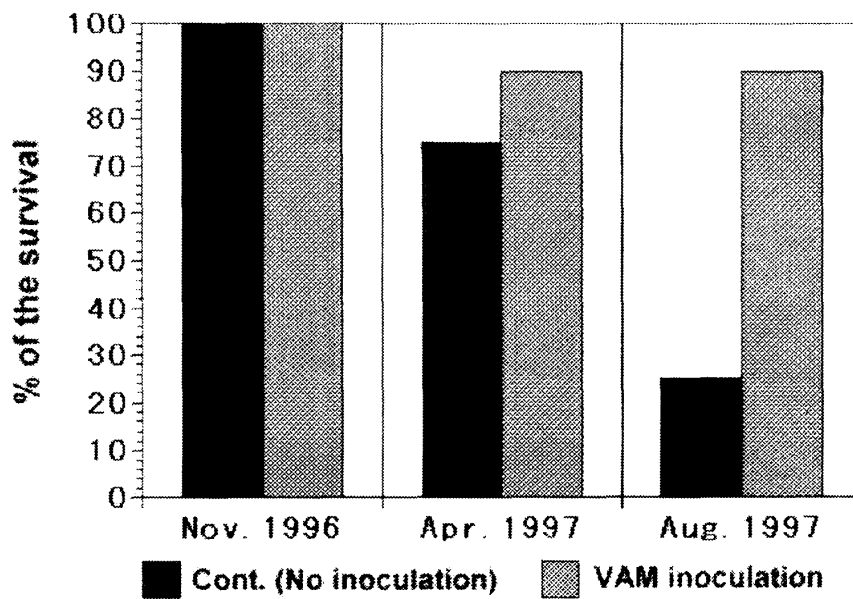


Fig. 5. Effect of VAM fungi-inoculation on the survival of *Carica papaya* seedlings at a pilot in Kitui, Kenya
Planting date: Middle November, 1996.

Melia volkensii, *Terminalia prunoides*, *Vitex doniana*および*Zizyphus mauritiana*では接種を行わなくても菌根感染率が高く、接種区と対照区に有意差が見られなかった(第3表)。このように、対照(無接種)区でも菌根感染率が高い樹種は、根中に菌根菌の生長を促す物質を多く含み、V A菌根菌の増殖に効果的であるように考えられる。

また、樹体生長は多くの樹種において菌根菌接種で良好となる傾向が見られた。特に、*Acacia aulococarpa*, *Carica papaya*, *Cordia ovalis*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Psidium guajava*, *Schimus molle*などでは菌根感染率の増大が樹の全生体重の増加に著しく反映していた(第3表)。

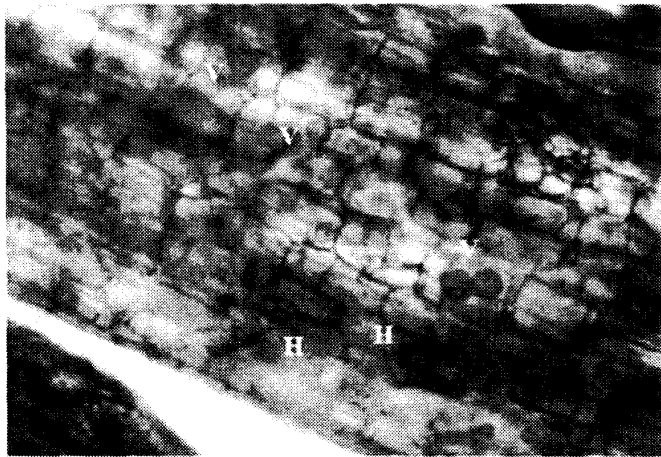
このように、キビ栽植土壌を菌根菌接種源として用いてもきわめて効果的な結果が得られた。なお、接種源は冷暗所に保存した方がよい。保存状態がよいものでは約1年間接種源として用いることができた。しかし、*Balanites aegyptiaca*のように、接種によって菌根感染率は若干高まるが、樹体生長に明らかな差異が見られない樹種では、菌根感染状態をさらに良好にするため、V A菌根菌生長促進物質を活用する方法を検討する必要がある。Ishii et al. (2000)は、カンキツジュースかすに含まれるナリルチンやヘスペリジンのようなフラボノイド・グルコシドを混入した液肥の利用は、カンキツ樹のV A菌根形成を著しく高めることを明らかにしている。同様に、桑田ら(1999)はフラッシュクロマトグラフィーを用いて得られたコンブやワカメの25%メタノール溶出物を土壌に施用したところ、カラタチ樹の菌根感染率が有意に高まることを報告している。

さらには、このようなV A菌根菌増殖技術を用いて、

土着のV A菌根菌胞子を増殖させ、樹木の水ストレス抵抗性に有効な菌を選抜することも重要である。

一方、圃場では、キビのようなV A菌根菌胞子をよく増殖させる植物を用い、苗木栽植予定地の土壌中の胞子数をあらかじめ増加させておいて、その後苗木を植え付けていく方法も有効と考えられる。また、V A菌根菌の生態を維持・管理する上において、キビなどを樹林地の間作作物として利用することもきわめて興味深い課題である。

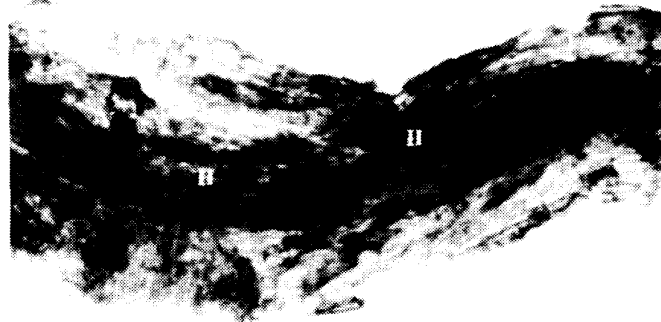
今回の調査では腐熟有機物や炭のような土壌改良資材を用いなかったが、これらの資材はV A菌根菌の増殖を助ける働きがあり(Ishii & Kadoya, 1994; 1996)、今後検討する必要がある。ただし、未熟成の有機物を用いた場合にはむしろ阻害されるので、注意が必要である(Ishii & Kadoya, 1996)。この原因として、未熟成の有機物から多量に発生するエチレンのような物質がV A菌根菌の生長を阻害するからである。エチレンのV A菌根菌に対する効果は、濃度によって相反し、高濃度では菌糸生長を阻害、低濃度(0.05ppm前後)では生長を促進する効果がある(Ishii et al., 1996b)。腐熟有機物施用土壌では0.05ppm前後の低濃度のエチレンがしばしば検出される。一方、炭の施用は共生菌の維持や活動に極めて有効である(小川, 1987)。Wamocho et al. (1997b)がケニア国のパッションフルーツ園で調査した結果では、V A菌根菌接種+炭施用区におけるつるの生育、並びに果実の収量や品質はV A菌根菌接種のみの区の場合よりも極めて良好になることを報告している。この原因として、この資材がこれらの菌の生育を阻害する物質をよく吸着することや、酸性土壌の場合にはpHを矯正してくれることと関係があると考えられる。



Acacia anlococarpa (x150)



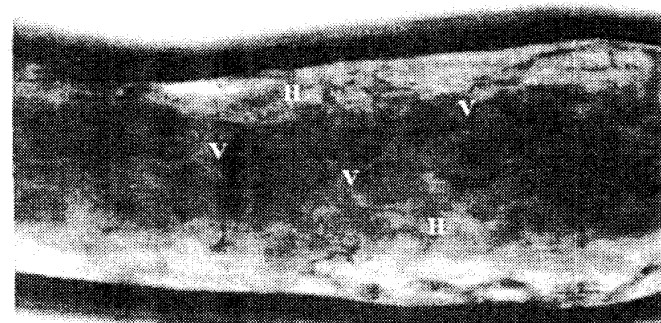
Acacia melifera (x150)



Azadirachta indica (x150)



Balanites aegyptiaca (x150)



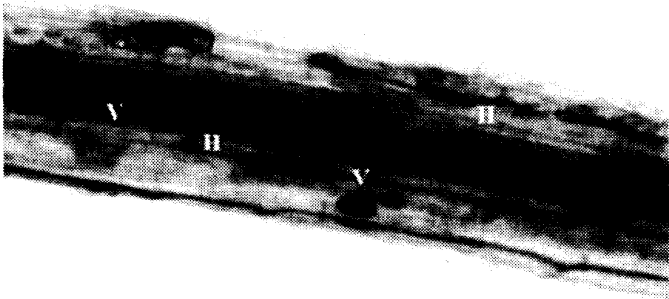
Carica papaya (x150)



Cassia (Sena) siamea (x150)

Fig. 6-1. VA mycorrhizae in several kinds of trees used in the Experiment 4.

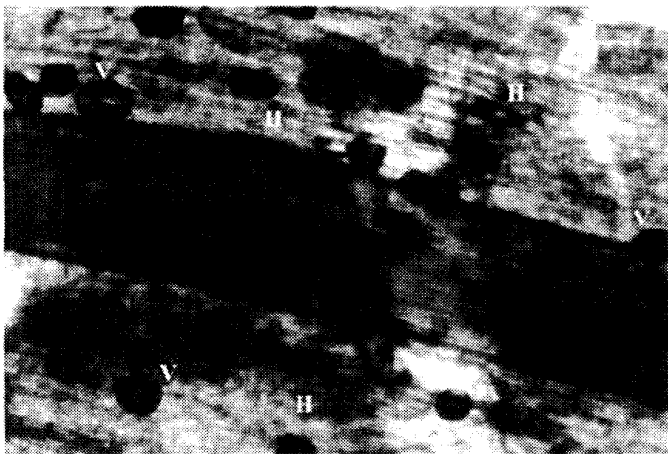
H: hypha, V: vesicle.



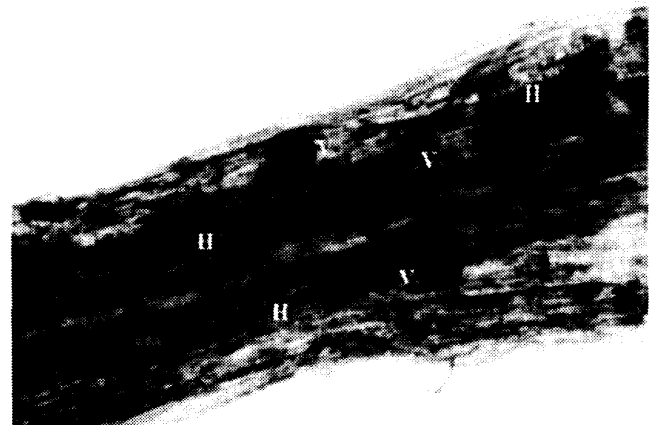
Casuarina equisetifolia (x150)



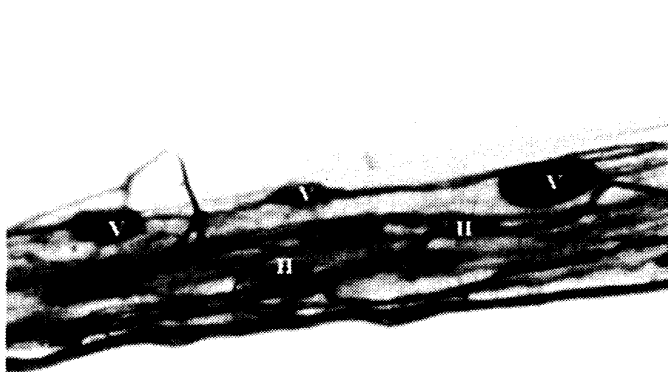
Cordia ovalis (x150)



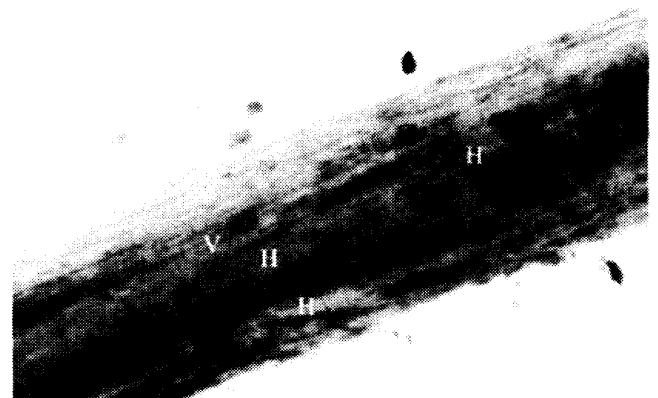
Croton megalocarpus (x150)



Dalbergia melanoxylon (x150)

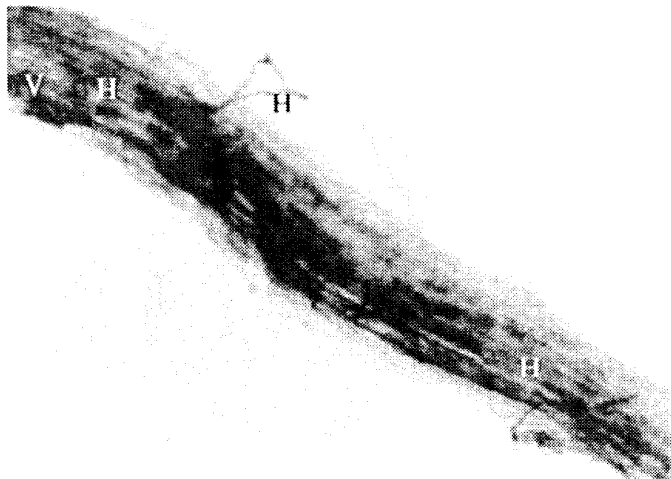


Delonix regia (x150)

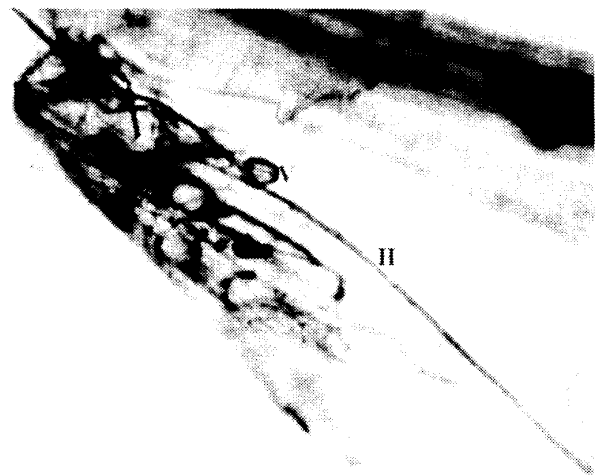


Dovyalis caffra (x150)

Fig. 6-2. VA mycorrhizae in several kinds of trees used in the Experiment 4.
H: hypha, V: vesicle.



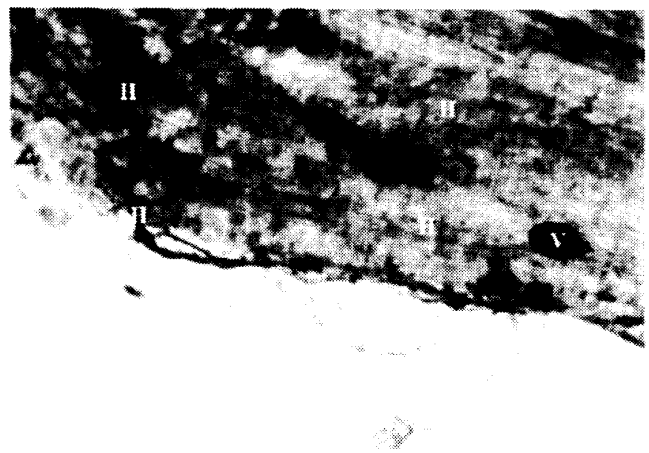
Eucalyptus camaldulensis (x150)



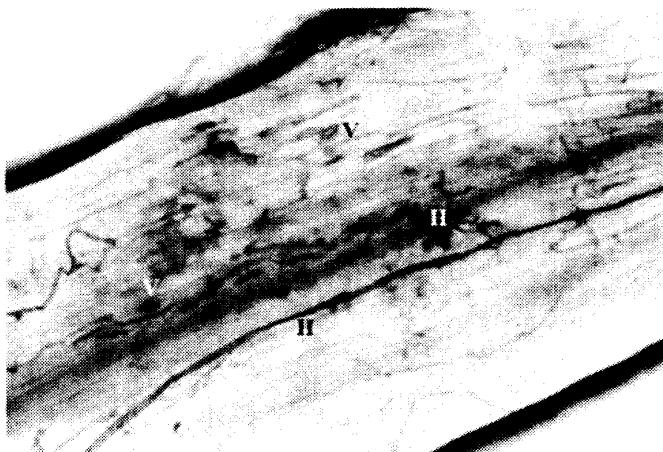
Grevillea robusta (x150)



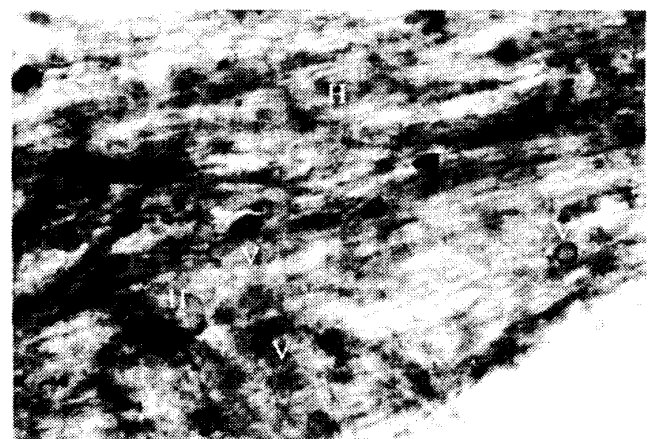
Grewia ectasicarpa (x150)



Jacaranda mimosifolia (x150)



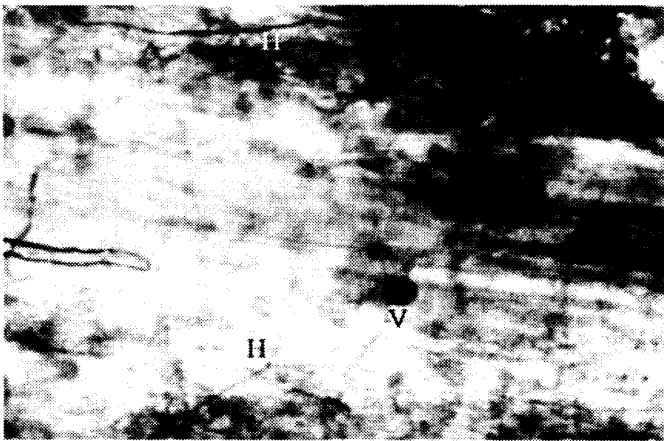
Mangifera indica (x150)



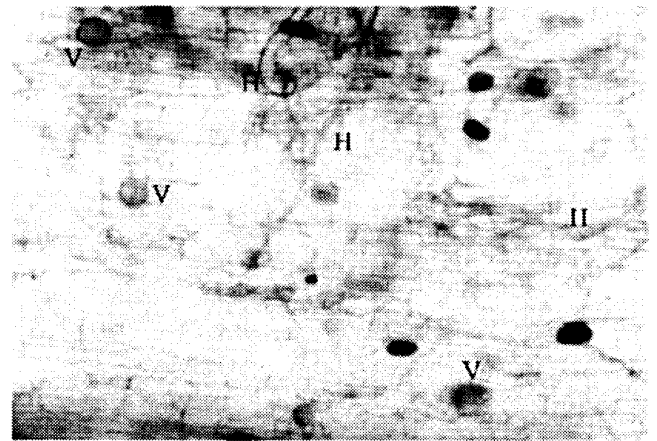
Maringo oleifera (x150)

Fig. 6-3. VA mycorrhizae in several kinds of trees used in the Experiment 4.

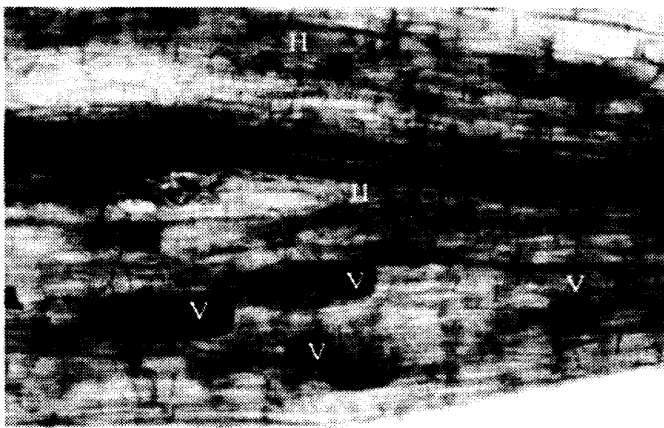
H: hypha, V: vesicle.



Melia volkensii (x150)



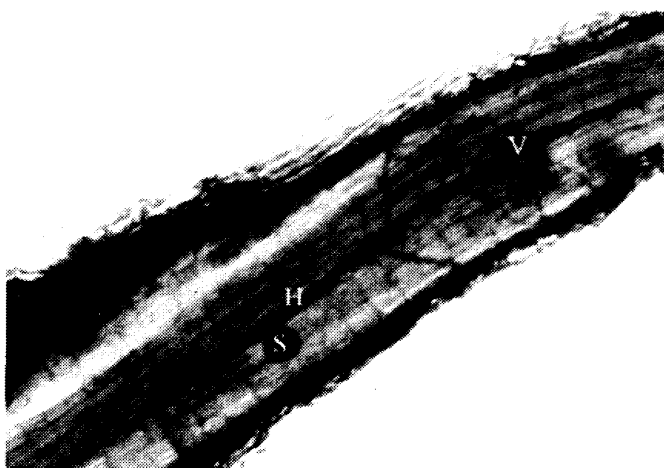
Persea americana (x150)



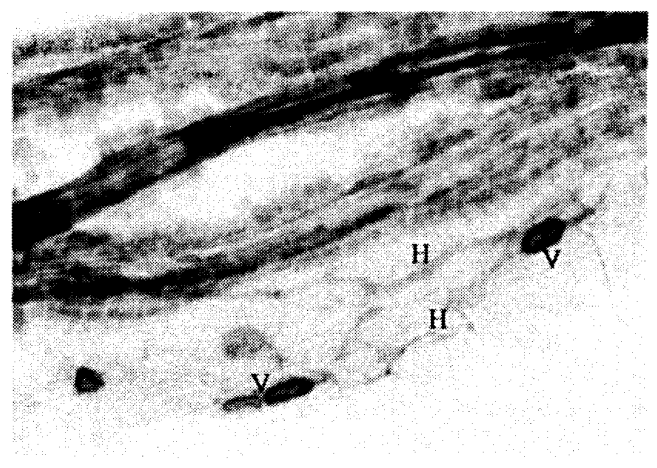
Prosopis juliflora (x150)



Psidium guajava (x150)



Schimus molle (x150)

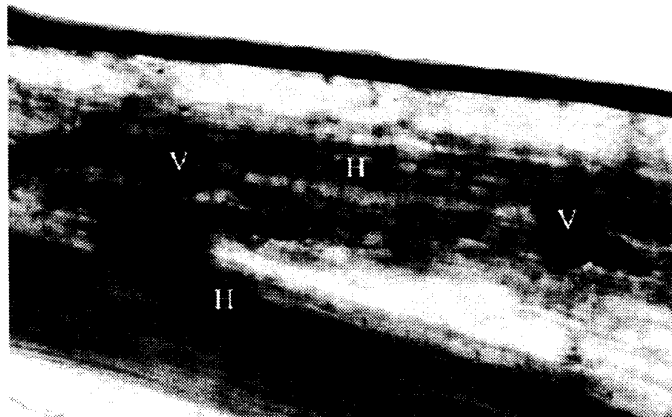


Tamarindus indica (x150)

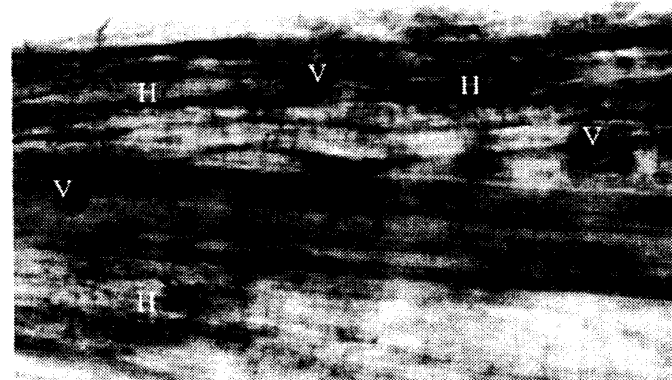
Fig. 6-4. VA mycorrhizae in several kinds of trees used in the Experiment 4.
H: hypha, S: spore, V: vesicle.



Terminalia prunoides (x150)



Vitex doniana (x150)



Zizyphus mauritiana (x150)

Fig. 6-5. VA mycorrhizae in several kinds of trees used in the Experiment 4.

H: hypha, V: vesicle.

以上、キツイ・パイロット・フォレストにおける菌根菌の利用はまさに始まったばかりであるが、これまでの筆者らの調査結果や、本実験におけるVA菌根菌接種のパパイア苗木の生存率がきわめて良好であったことから、半乾燥地での植林などにおいて菌根菌、特にVA菌根菌の利用は非常に有望であると考えられた。今まさに、われわれは4億年前、植物がこの菌の助けをかりて劣悪な陸地に如何に侵入していったかを学ぶときと言えるだろう。今後も菌根菌の活用についての調査・研究が継続されることを願っている。

謝 辞

本研究をとりまとめるに当たって、ケニア社会林業訓練技術協力プロジェクト三島征一チーフアドバイザー(元)、南達彦専門家(元)、Benard Oula Mouk氏、林視専門家(元)、宮城勲専門家(元)、Ezekie Musava Kyalo氏、ジョモ・ケニアツタ農工大学高級講師Leonard Samita Wamocho博士をはじめ、JICAケニア事務所の職員の皆様には、公私にわたり、いろいろとお世話していただいた。ここに感謝の意を表する。

引用文献

- Cruz, A. F., T. Ishii and K. Kadoya. 2000. Distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal hyphae in the rhizospheres of trifoliolate orange and Bahia grass seedlings under an intercropping system. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 69(3): 237-242.
- 石井孝昭・Y.H. シュレスト・門屋一臣. 1992. カンキツ園土壤中のVA菌根菌とその孢子数に關する土壤要因について. *園芸学会雑誌*61(別2): 166-167.
- Ishii, T. and K. Kadoya. 1994. Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular-arbuscular mycorrhizal development. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 63(3): 529-535.
- Ishii, T. and K. Kadoya. 1996. Utilisation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in citrus orchards. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 2: 777-780.
- 石井孝昭・重野隆志・辻田昭夫・荻野和彦. 1996a. 西表島におけるマングローブ植物のVA菌根. 第5回菌根研究会大会講演要旨集. 4-5.
- Ishii, T., Y.H. Shrestha, I. Matsumoto and K. Kadoya. 1996b. Effect of ethylene on the growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and on the mycorrhizal formation of trifoliolate orange roots. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 65(3): 525-529.
- Ishii, T., Y.H. Shrestha and K. Kadoya. 1996c. Effect of a sod culture system of Bahia grass (*Paspalum notatum* Flügg.) on vesicular-arbuscular

- mycorrhizal formation of satsuma mandarin trees. Proc. Int. Soc. Citriculture 2: 822-824.
- Ishii, T., I. Matsumoto, Y.H. Shrestha and K. Kadoya. 1999. Ecological aspects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in satsuma mandarin grown in plastic green houses and fields. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 68(2): 219-227.
- Ishii, T., J. Aikawa, N. Nakamura, K. Sano, I. Matsumoto and K. Kadoya. 2000. Effect of citrus juice pomace on in vitro hyphal growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and their in vivo infections of citrus roots. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 69(1): 9-14.
- 石井孝昭. 2000. 草生栽培と土壤微生物相. 農業技術大系果樹編追録15: 3-6.
- 桑田光作・石井孝昭・松下 至・松本 勲・門屋一臣. 1999. 海藻抽出物がVA菌根菌の菌糸生長ならびにカラタチ樹の菌根形成に及ぼす影響. 園芸学会雑誌 68(2): 321-326.
- Nair, P. K. R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London.
- Newman, E. I., R. D. Child and C. M. Patrick. 1986. Mycorrhizal infection in grasses of Kenyan savanna. J. Ecol. 74: 1179-1183.
- 小川 眞. 1987. 作物と土をつなぐ共生微生物. 農文協.
- Phillips, J.M. and D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Trans. Br. Mycol. Soc. 55(1): 158-161.
- Remy, W., T.N. Taylor, H. Hass and H. Kerp. 1994. Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 91: 1841-11843.
- Shrestha, Y.H., T. Ishii, I. Matsumoto and K. Kadoya. 1996. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on satsuma mandarin tree growth and water stress tolerance and on fruit development and quality. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 64(4): 801-807.
- Wamocho, L.S., K. Yamashita and T. Ishii. 1997a. The distribution and ecological aspects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in Kenyan orchards. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 66(Suppl.2): 22-23.
- Wamocho, L.S., K. Yamashita and T. Ishii. 1997b. Effect of charcoal application and vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation on vine growth, fruit development and quality of passionfruits grown in the field. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 66(Suppl.2): 20-21.

Summary

About 80% of Kenyan land is arid and semi-arid, and the introduction of tree-planting techniques is needed for improving the land. We indicated that low soil productivity in Kenya would be caused by a small number of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) spores and low contents of minerals, especially N and P in the soils, due to soil erosion (Wamocho et al., 1997a). When soil samples were collected from 103 orchards in 25 locations representing 13 soil types and 4 regions (high rainfall lowlands, highlands, arid and semi-arid lands, and coastal lowlands) in Kenya, the number of VAM spores in the 25g soil was 200 and below in every orchard. Particularly, in more than 60% of these orchards the number of spores was less than 50 in 25g of soil. In Japan, the number of VAM spores is about 1,000 and more in spite of use of large amounts of chemical fertilizers and agrochemicals (Ishii et al., 1992; 1999).

Therefore, we investigated the utilization of mycorrhizal fungi on agroforestry systems at Kitui pilot forest supported by Kenya/Japan Soc. Forest. Train. Project, JICA in the semi-arid regions of Kenya. The results obtained are as follows:

1. The kinds of VAM spores collected were *Glomus caledonium*, *Glomus etunicatum*, *Glomus fasciculatum*, 4 unidentified *Glomus* genera (2 black spores and 2 brown spores), *Gigaspora margarita* and one unidentified *Scutellospora* genus. The spores of *Glomus* genus were the most common among them.
2. Although VA mycorrhizae were observed in every plant, the intensity of VAM infection varied among the kind of plants. In particular, high percentage of VAM infection was observed in several weeds (*Cynodon nlemfuensis*, *Cyperus rigidifolius*, *Cyperus teneristolon*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Digitaria abyssinica*, *Euphorbia hirta*, *Imperata cylindrica*,

Killinga bulbosa, *Panicum maximum*, *Setaria pumilla* and *Solanum incanum*), cassava (*Manihot esculenta*), and some tropical fruit trees [*Carica papaya*, *Mangifera indica*, *Psidium guajava*, *Tamarindus indica* and 2 kinds of indigenous fruit trees (*Pachystigma schunannianum* and *Sclerocarya birrea*)]. Also, all the trees shown in Table 3 formed VA mycorrhizae.

3. When papaya seedlings inoculated with *Glomus caledonium* were transplanted to a pilot field, inoculated papaya trees showed both improved resistance to water stress and higher survival percentages as compared to non-inoculated ones.
4. A millet-cultivated soil medium was very effective as a VAM inoculum. In particular, the number of VAM spores in 25g soil samples increased from 51 to 705 after millet cultivation. When 27 kinds of nursery trees were inoculated with the millet-cultivated soil medium, VAM development was stimulated on even tree species colonized commonly with ectomycorrhizal fungi. However, the stimulation of VAM formation in the roots of *Cassia (Sena) siamea*, *Melia volkensii*, *Terminalia prunoides*, *Vitex doniana* and *Zizyphus mauritiana* was observed without VAM inoculation. These trees may contain great amounts of VAM stimulatory substances in the roots. Furthermore, the growth of nursery trees used was strengthened by the soil medium. In particular, increase in VAM colonization in the roots of *Acacia aulocarpa*, *Carica papaya*, *Cordia ovalis*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Psidium guajava* and *Schinus molle* reflected vigorous growth of these trees. The inoculation of VAM fungi and the application of charcoal will be also very useful for the production of nursery trees.
5. These results suggest that the use of VAM fungi can make a useful contribution to agroforestry systems in the semi arid regions of Kenya.

Key words: Agroforestry, Mycorrhizal fungi, Kenya, Semi arid region, Fruit tree, Weed, Afforestation