

果樹における 1-methylcyclopropene 利用の現状と今後の展望

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構果樹研究所 檜村芳記

はじめに

リンゴ、ニホンナシ等の果実では、植物ホルモンの一つであるエチレンによって成熟が促進される。ニホンナシ、カキ、イチジク等において成熟促進剤として利用されるエテホンは、本剤の分解により生成されるエチレンの成熟促進作用を利用したものである。また、バナナ、キウイフルーツではエチレンによる追熟処理が広く行われている。

一方、エチレンは、果実の成熟のみならず老化も促進するため、果実が適熟状態となった後は品質低下を加速させることになる。特に、多くの果樹において果実の日持ち性を左右する果肉軟化はエチレンによって著しく促進される。このため、果実の貯蔵・流通中における品質保持を目指し、エチレンの生成阻害剤や作用阻害剤の開発が進められてきた。

エチレンの生成阻害剤としては、aminoethoxyvinylglycine (AVG) がよく知られている。AVGは、米国においてはリンゴの落果防止剤 (ReTain®) として利用されており、我が国においても落果防止、日持ち性改善、成熟遅延等を目的に植物成長調節剤としての実用性が検討されたが、実用化には至っていない。

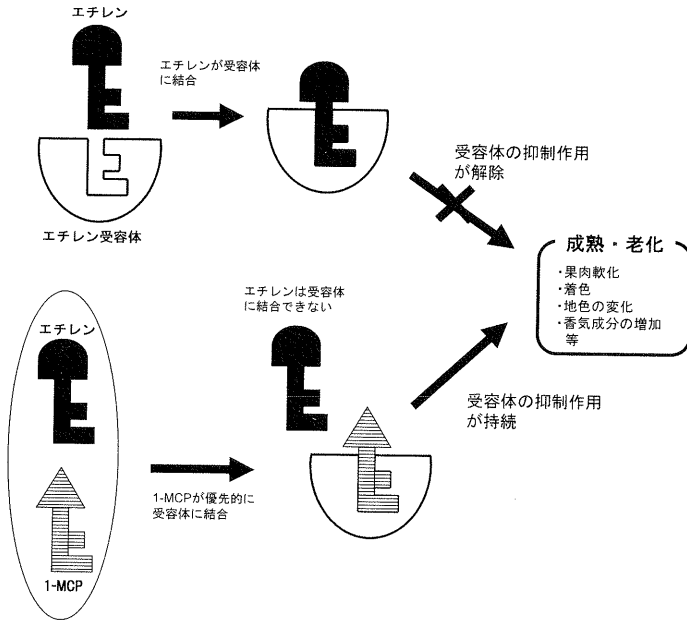
一方、エチレンの作用阻害剤としては、チオ硫酸銀 (STS) が花きの鮮度保持剤として広く普及しているが、安全性等の面から食用作物では利用できない。その他のエチレン作用阻害剤

についても、化学的安定性や安全性等の理由から果実の品質保持への応用は困難な状況にあったが、1996年、米国において、リンゴ等の果実に対して顕著な品質保持効果を示すエチレン作用阻害剤1-methylcyclopropene (1-MCP) が開発され¹⁾、我が国においても農薬登録の申請がなされているところである。ここでは、1-MCPの開発経緯及び果実の品質保持剤としての特性等について紹介したい。

1. 1-MCPの開発経緯

植物がエチレンに対して示す様々な生理的反応は、エチレンがエチレン受容体と呼ばれるタンパク質に結合することによって引き起こされる。エチレン受容体は、果肉軟化等の成熟に関わる遺伝子の発現を抑制する作用を持っているが、エチレンが結合すると受容体が不活化され、抑制作用が失われるため成熟等が急速に進むことになる (図-1)。

このようなエチレンの作用機構から、エチレンとエチレン受容体の結合に関する基礎的研究が進められ、エチレン以外にも本受容体に結合する物質の存在が明らかにされてきた。受容体に結合する物質は2つのタイプに分けられ、一つは、結合することによりエチレンと同様に受容体を不活化し成熟等に対する抑制作用を失わせるもの、もう一方は結合しても受容体を不活化しないものである。エチレン作用阻害剤とし



図－1 1-MCPによる成熟・老化の抑制

て利用されるものは後者の物質である。

1986年に後者のタイプの物質として2,5-norbornadiene (2,5-NBD) が開発された²⁾。本物質は高いエチレン作用阻害効果を示すが、受容体との結合が可逆的であり、短時間で受容体から離脱するため、1回の処理による効果は数時間に限られる。

引き続いて、1993年にはdiazocyclopentadiene (DACP) が開発された³⁾。本物質は、2,5-NBDとは異なりエチレン受容体と不可逆的に結合するものの、化学的に不安定だけでなく爆発性を有するため、生産現場等での利用は困難である。DACPは処理に先立ち光照射することによりエチレンの作用を阻害することから⁴⁾、DACPの光分解物の解析が進められ、cyclopropene及びその誘導体である1-MCPの開発へと発展した。

2. 1-MCPの諸特性

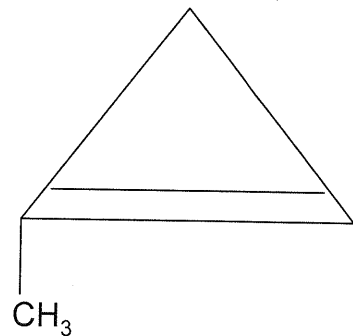
1-MCP (図－2) は、1996年に米国ノースカロライナ州立大学のSisler及びBlankenshipに

よって開発された¹⁾。本物質は、常温・常圧では無臭の気体であり、毒性も認められていない (表－1)。また、光照射により分解するが、化学的には比較的安定している。エチレン受容体との親和性は、エチレンの10倍程度と高く、数ppb～数ppmという極めて低い濃度でエチレンの作用を強力に阻害する⁵⁾ (図－1)。1-MCPの存在下でエチレンが受容体に結合するためには100ppm以上の濃度が必要と推定されている⁵⁾。熟度の進んだ果実では1-MCPの効果が認められな

表－1 1-MCPの毒性

急性吸入 LC ₅₀	1126ppm (2.5mg/L) 以上	
変異原性	Ames試験 突然変異試験 マウス小核試験 細胞毒性試験	陰性 陰性 陰性 陰性
催奇形性	なし	

い場合も多いが、このような果実では組織内部のエチレン濃度が極めて高いため、1-MCP処理果においても、エチレンが受容体に容易に結合する可能性が高い。なお、1.25%以上の高濃度では爆発する危険性を有するが、通常は数ppm以下の低濃度で使用されるため実用上は問題ないと考えられる。



図－2 1-MCPの構造式

ここで、1-MCPをエチレン作用阻害剤として実用化する場合の利点を整理すると、

- ①エチレン受容体と不可逆的に結合するため処理効果の持続期間が長い。
- ②エチレン受容体との親和性が高いため、極めて低濃度で処理効果が得られる。
- ③化学的に安定しており、爆発等の危険性も低いいため、取り扱いが容易である。
- ④毒性が極めて低く、安全性が高い。

となる。なお、①の持続期間及び②の処理濃度については樹種や果実の生理的状态によってかなり異なる。また、モモ等エチレン感受性であるにもかかわらず明確な処理効果の認められない果樹もある⁶⁾。このような相違には、1-MCPの果実組織内への浸透性、エチレン受容体との親和性、エチレン受容体の代謝（新たな受容体の生成速度）等が関係しているものと思われるが、詳細は明らかとなっていない。

ところで、エチレン作用の阻害効果は1-MCPのみならず、cyclopropene及びその誘導体において広く認められている。このような物質について比較検討した結果、cyclopropeneにおける炭素1番の水素がアルキル基で置換された場合に高いエチレン作用阻害効果を示すことが明らかにされてきた^{7,8)}。現在のところ、化学的安定性、同等な効果を得るのに必要な処理濃度等から1-MCPが最も実用性の高いエチレン作用阻害剤と考えられているが、最新の研究でアルキル基の炭素数が4以上の場合、炭素数が増加するほど処理効果が高まり、1-MCPの処理効果を上回る可能性が示された。本研究によれば、同一濃度で処理したバナナの日持ち性は、アルキル基がメチル基 (CH_3 -) (1-MCP) の場合、12日間であったのに対し、ペンチル基 (C_5H_{11} -) では14日間、ヘキシル基 (C_6H_{13} -) では20日間、

デシル基 ($\text{C}_{10}\text{H}_{21}$ -) に至っては36日間であった⁹⁾。今後の研究によっては、1-MCP以上のエチレン作用阻害効果を持つ薬剤の開発も期待される。

3. 1-MCPの植物成長調整剤としての実用化

前述したように1-MCPは常温・常圧では気体のため、このままでは流通現場等で利用することは難しい。このため、米国Floralife社により1-MCPを α -cyclodextrinに包摂させ粉末状に加工する技術が開発され、1999年にEthylBloc[®] (1-MCP含有量：0.14%) という商品名で花きの品質保持剤として実用化された。その後、米国ローム&ハース社が1-MCP製剤の開発・販売に関する権利を獲得し、同社傘下のAgroFresh社により食用作物の品質保持剤としてSmartFresh[®] (1-MCP含有量：3.3%) が開発された。これらの1-MCP製剤については、ニュージーランド、チリ、アルゼンチンにおいて農産物への使用が認められており、2002年には米国においてもリンゴ、メロン、トマト、ナシ、アボカド、マンゴー、パパイヤ、キウイフルーツ、スモモ、アンズ及びカキへの使用が認可された。我が国においては、現在、リンゴ、ニホンナシ及びカキを対象に農薬登録申請がなされている。

4. 1-MCPの処理方法

1-MCPは、製剤(EthylBloc[®], SmartFresh[®]) を水に溶解させることにより発生する。果実へ処理する場合は、果実を気密性の高い貯蔵庫や容器に密封し、庫内(容器内)で製剤から1-MCPを発生させることにより暴露処理する。

常温・常圧下では、20~30分程度で1-MCPは製剤から完全に放出されるが、低温下では放出に要する時間が長くなる。処理に際して最も注意すべき点は処理容器の気密性である。段ボー

表-2 ポリエチレンフィルムを1-MCP処理容器に使用する場合に必要な膜厚

内容積(m ³)	膜厚(mm)
0.1	0.1020
1	0.0762
5	0.0508
>10	0.0254

(ローム&ハース社技術資料)

ル箱等通
気性の容
器が使用
できない
ことは言
うまでも
ないが、

薄手のポリエチレンフィルム等も1-MCPをかなり透過するため、処理に利用する場合は十分な膜厚を有する資材を選択することが必要となる(表-2)。

5. 1-MCPの処理条件が果実の品質保持効果に及ぼす影響

1-MCPは果肉軟化、地色の変化(クロロフィルの分解)のみならず酸の減少も抑制する。また、リンゴの油あがりややけ症¹⁰⁾、ニホンナシの果肉変色¹¹⁾等の発生も軽減するなど広範な処理効果が認められるが、効果の程度は樹種、品種だけでなく処理条件や果実の生理的状态によってもかなり異なる。

1) 処理濃度

処理濃度が高くなるにつれて処理効果も大きくなるが、ある濃度以上では効果がほとんど変わらなくなる(図-3)。最大の処理効果を得るために必要な最低濃度は樹種によって大きく異なり、アボカドでは30ppb以上¹²⁾、バナナでは500ppb¹³⁾、リンゴでは1ppm¹⁴⁾程度、カキでは100ppb以上^{15, 16)}、西洋ナシでは10ppm以上¹⁶⁾と考えられている。

2) 処理の温度及び時間

処理時の温度が低くなると処理効果が低下する傾向にあり、概ね20~25℃が適当な処理温度とされている。リンゴ‘Cortland’を用いた試験によれば、23℃で処理した場合、3時間処理

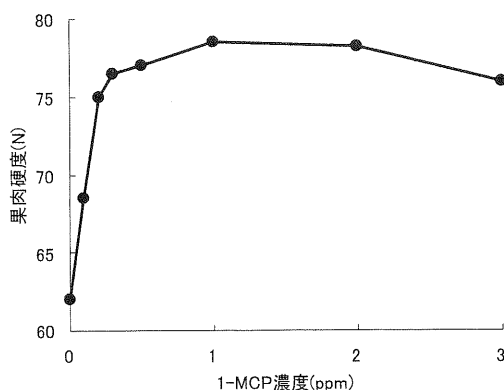


図-3 1-MCPの処理濃度がリンゴの果肉軟化に及ぼす影響
(1-MCP処理した‘デリシャス’を20~24℃で貯蔵)
(X.Fan et al., 1999)¹⁴⁾

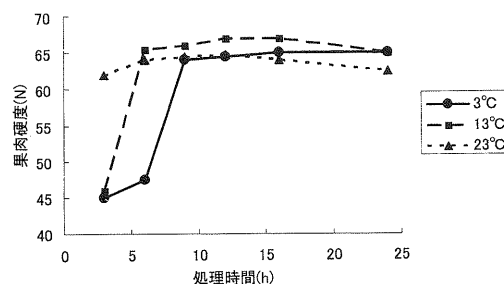


図-4 1-MCPの処理温度および処理時間がリンゴの果肉軟化に及ぼす影響(60ppbの1-MCPで処理した‘コートランド’を0~1℃で120日間処理)
(J.R.DeEll et al., 2002)¹⁷⁾

でも24時間処理に近い品質保持効果が得られたのに対し、3℃で同等の効果を得るためには9時間の処理を必要とした(図-4)¹⁷⁾。十分な効果を得るために必要な処理時間は、温度以外の要因によっても変化するため、一般的には12~24時間程度必要とされている。ただし、いたずらに処理時間を長くすると、処理容器内が低酸素、高炭酸ガス状態となり果実にガス障害が発生するおそれが生じる。なお、処理濃度を高めることにより同等の処理効果を得るために必要な処理時間を短縮できる場合もある。

3) 処理果の生理的状态

成熟が進んだ果実では処理効果が劣る傾向にある^{18, 19)}。また、処理は収穫後速やかに行う必

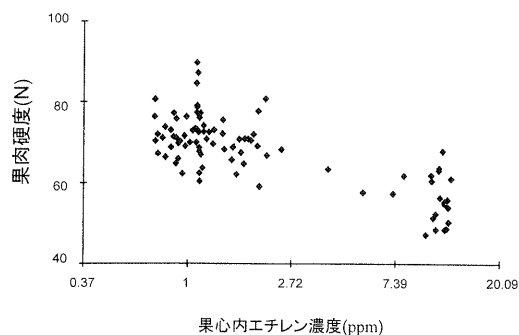


図-5 1-MCP処理したリンゴ果実における果肉硬度と果芯内エチレン濃度との関係(0.5, 1又は2 ppmの1-MCPで処理した‘旭’を20℃に7日間貯蔵) (C.B.Watkins et al., 2000)²¹⁾

要がある²⁰⁾。樹種や品種、収穫果の熟度によっても異なるが、遅くとも収穫翌日までに処理することが望ましい。

リンゴ等の果実では、成熟に伴いエチレン生成が高まるため、果肉組織内のエチレン濃度も上昇する。また、このようなエチレン生成の上昇は収穫後急速に進む。熟度や収穫後日数による処理効果の違いは、このような果実のエチレン生成の相違に関係するものと考えられる。1-MCPを処理後7日間貯蔵したリンゴ‘旭’においては、果肉硬度と果芯内エチレン濃度(対数値)との間に負の相関が認められている(図-5)²¹⁾。

4) 特殊な処理方法

①反復処理

通常、1-MCP処理は収穫直後に1回のみ行われるが、反復処理することでより高い効果が得られる場合がある^{19), 23)}。リンゴ‘レッドチーフ デリシャス’において700ppbの1-MCPを収穫直後に1回のみ処理した場合と、月1回、2週間に1回及び週1回で反復処理した場合を比較すると、処理頻度が高いほど貯蔵後期における果肉硬度が高く維持された。ただし、このような傾向は20℃で貯蔵した場合に認められ、0℃で貯蔵した場合には認めら

れなかった¹⁹⁾。

②減圧処理

処理に先立ち処理容器内を1/4～1/8気圧まで減圧することにより同等の処理効果を得るために必要な処理時間を著しく短縮することができる^{11), 23)}。特に、リンゴでは短縮効果が大きく、品種や果実の熟度にもよるが1分間程度の処理で実用的な品質保持効果が得られる。一方、ニホンナシの場合は、減圧処理でも1時間程度の処理時間を必要とする。

6. 1-MCPを利用した高品質果実の供給

以上述べてきたように、1-MCPは適切な条件の下で果実に処理すれば様々な樹種で顕著な品質保持効果が得られる。

1-MCP処理を果実品質制御手段の一つとして見た場合、特筆すべき点は、常温においても一定の品質保持効果が得られることである。無論、1-MCP処理果であっても冷蔵あるいはCA貯蔵することでより長期の品質保持が可能となる。しかしながら、温度管理が困難な流通・販売過程における品質低下を顕著に抑制可能な実用手段が存在しない現状を鑑みた場合、本点の持つ価値は大きい。早生品種等日持ち性の悪い品種の場合、棚持ちを考慮し、品質を犠牲にしても、やや未熟な状態で収穫・出荷する傾向にあるが、1-MCP処理を行うことで、より完熟に近い果実を出荷することが可能となる。日持ち性の悪さから普及が困難であった品種について再評価することも必要となろう。また、リンゴでは、1-MCP処理果を冷蔵後常温に移した場合でも品質保持効果が持続するとの報告があり、冷蔵等を併用し長期貯蔵する場合であっても、出庫後の流通・販売過程における品質低下を抑制できる可能性が高い。

1-MCP処理における第二の特徴は、リンゴ等において酸の減少が抑制されることである。リンゴ‘ふじ’は極めて高い貯蔵性を有し、普通冷蔵であっても果肉硬度は、かなり長期にわたって維持される。しかしながら、普通冷蔵では酸の低下は十分に抑制できない。CA貯蔵におけるメリットの一つは、このような酸の低下を軽減できることにあるが、1-MCP処理果では酸の低下が抑制されるため普通冷蔵であってもCA貯蔵と同等な品質保持効果が得られる。

一方、リンゴ等極めて高い処理効果が得られる樹種においては未熟な果実に処理した場合、収穫後相当の日数が経過しても「果肉が硬すぎる」、「青臭さが抜けない」等の問題を生じることがある。しかしながら、熟度が進み過ぎると1-MCPの処理効果が低下する。本剤の利用に当たっては収穫期の見極めが重要である。また、1-MCP処理は香気成分の生成を抑制するため、やや香りに乏しい果実となりやすい²⁴⁾。なお、1-MCPに蒸散を抑制する効果はない。蒸散量の多い樹種や品種、長期貯蔵等蒸散による水分損失で品質が損なわれるおそれのある場合は、フィルム包装等により蒸散を抑制することが必要となる。

7. おわりに

現在の流通・販売システムの下では、農家が如何に高品質な果実を生産・出荷したとしても、そのような品質を保持したまま消費者に届けることは極めて難しいと言わざるを得ない状況にある。しかしながら、収穫適期を的確に見極め、1-MCPを適切に処理することができれば、高品質な果実を消費者のもとに確実に届けることが可能となる。

ただし、1-MCPの実用化に当たって本物質が

農薬であることを忘れてはならない。特に、本剤は我が国初のポストハーベスト農薬となることから、安全性に関する正確な情報を消費者に提供し、理解を得ることが必須である。現場への導入に当たっては、消費者から無用な反発を受けることがないよう慎重な対応が必要である。

1-MCPは、果実の貯蔵・流通を革新するのみならず、育種方向にも影響を与えるほどの能力を有すると言っても過言ではない。適切な処理態勢の確立、消費者への啓蒙活動等により1-MCPが国産果実の消費拡大につながることを期待したい。

参考文献

- 1) Sisler, E.C. and S.M. Blankenship(1996) Methods of counteracting an ethylene response in plants. U.S. Patent No.5,518, 988.
- 2) Sisler, E.C., M.S. Reid and S.F. Yang (1986) Effect of antagonists of ethylene action on binding of ethylene in cut carnations. Plant Growth Regulation, 4: 213-218.
- 3) Sisler, E.C. and S.M. Blankenship(1993) Diazocyclopentadiene, a light sensitive reagent for the ethylene receptor. Plant Growth Regulation, 12:125-132.
- 4) Serek, M., M.S. Reid and E.C. Sisler (1994) A volatile ethylene inhibitor improves the postharvest life of potted roses. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 119:572-577.
- 5) S.M. Blankenship and J.M. Dole (2003) 1-Methylcyclopropene: a review. Postharvest Biology and Technology 28:

- 1-25.
- 6) 羽山裕子・伊東明子・樫村芳記 (2003) 1-methylcyclopropene (1-MCP) の処理条件がモモの日持ち性に及ぼす影響. 園学雑. 72 (別1):141.
- 7) Sisler, E.C. and M. Serek (1997) Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: recent developments. *Physiologia Plantarum* 100: 577-582.
- 8) Sisler, E.C. and M. Serek (2001) New developments in ethylene control-compounds interacting with the ethylene receptor. *Acta Hort.* 543:33-40.
- 9) Sisler, E.C., T. Alwan, R. Goren, M. Serek and A. Apelbaum (2003) 1-substituted cyclopropenes: effective blocking agents for ethylene action in plants. *Plant Growth Regulation*, 40:223-228.
- 10) 野呂昭司・長内敬明・町田郁夫・齊藤貞昭・工藤亜義 (2001) リンゴの普通貯蔵およびCA貯蔵の果実品質に及ぼす1-Methylcyclopropeneの効果. 園学雑. 70 (別2):470.
- 11) 樫村芳記・羽山裕子・伊東明子・三井萬丈 (2003) 減圧下における1-methylcyclopropene (1-MCP) 処理が果実の貯蔵性に及ぼす影響. 園学雑. 72 (別1):327.
- 12) Feng, X., A. Apelbaum, E.C. Sisler and R. Goren (2000) Control of ethylene response in avocado fruit with 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biology and Technology* 20:143-150.
- 13) Harris, D.R., J.A. Seberry, R.B.H. Wills and L.J. Spohr (2000) Effect of fruit maturity on efficiency of 1-methylcyclopropene to delay the ripening of banana. *Postharvest Biology and Technology* 20:303-308.
- 14) Fan, X., S.M. Blankenship and J.P. Mattheis (1999) 1-Methylcyclopropene inhibits apple ripening. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124:690-695.
- 15) 播磨真志・中野龍平・山内 勸・久保康隆・稲葉昭次・北野欣信 (2001) 1-メチルシクロプロペンによるカキ '刀根早生' ハウス栽培果実の早期軟化抑制. 園学雑. 70 (別2):469.
- 16) 日和佐京子・松崎幹雄・弓削英記・中野龍平・山本喜啓・稲葉昭次・久保康隆 (2002) MCP処理によるセイヨウナシ 'ラ・フランス' と渋ガキ '西条' 果実の棚持ち期間の延長. 園学雑. 71 (別1):389.
- 17) DeEll, J.R., D.P. Murr, M.D. Porteous and H.P. Vasantha Rupasinghe (2002) Influence of temperature and duration of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on apple quality. *Postharvest Biology and Technology* 24:349-353.
- 18) H. Chahine, B. Gouble, J.M. Audergon, M. Souty, G. Albagnac, G. Jacquemin, M. Reich and M. Hugues (1999) Effect of ethylene on certain quality parameters of apricot fruit (*Prunus armeniaca*, L.) during maturation and postharvest evolution. *Acta Hort.* 488:577-584.
- 19) Mir, N.A., E. Curell, N. Khan, M. Whitaker and R.M. Beaudry (2001) Harvest maturity, storage temperature, and 1-MCP application frequency alter firmness retention and chlorophyll fluorescence of 'Redchief Delicious' apples. *J.*

Amer. Soc. Hort. Sci. 126:618-624.

- 20) 文乃吐拉・木合塔爾・壽松木章・小森貞男・三井萬丈 (2003) リンゴ果実のエチレン生成および貯蔵品質に及ぼす1-MCP処理の影響. 園学雑. 72 (別1):140.

- 21) Watkins, C.B., J.F. Nock and B.D. Whitaker (2000) Response of early, mid and late season apple cultivars to postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) under air and controlled atmosphere storage conditions. Postharvest Biology and Technology 19:

17-32.

- 22) 塩見慎次郎・山田論・中村怜之輔 (2002) ウメ果実の追熟に及ぼす1-メチルシクロプロペンの影響. 71 (別1):390.

- 23) 樫村芳記・羽山裕子・伊東明子 (2003) 1-置換-シクロプロペンの効率的处理技術. 特願2003-94402.

- 24) Fan, X. and J.P. Mattheis (1999) Impact of 1-methylcyclopropene and methyl jasmonate on apple volatile production. J. Agric. Food Chem. 47:2847-2853.

**省力タイプの
高性能一発処理除草剤
シリーズ**

問題雑草を一掃!!

投げ込み用 水稲用一発処理除草剤

マサカリ
ジャンボ

投げ込むだけ!!

水稲用初・中間一発除草剤

ダイナマン

フロアブル 1キロ粒剤75

ダイナマンにお任せ!!

少量撒散型 水稲用一発処理除草剤

ダシングパワー
500グラム粒剤

雑草を振っずに歩くだけ!!

●使用前にはラベルをよく読んでください。
●ラベルの記載以外には使用しないでください。
●本剤は小児の手が届くところには置かないでください。
●空容器は密閉に放置せず、環境に影響のないように適切に処理してください。

日本農薬株式会社
東京都中央区日本橋1丁目2番5号
ホームページアドレス <http://www.nichino.co.jp/>

新 刊

拮抗微生物による作物病害の生物防除

—我が国における研究事例・実用化事例—

百町 満朗／監修 B5判 243ページ 定価 5,000円＋税

全国農村教育協会

〒110-0016 東京都台東区台東1-26-6
TEL.03-3833-1821 FAX.03-3833-1665