

原著論文

高温・高濃度炭酸ガスくん蒸の殺虫効果と リンゴ・ナシ果実品質への影響^{†1}

土田 聡, 中村ゆり^{†2}, 羽山裕子^{†2}, 村井 保^{†3}, 中田 健^{†4}, 望月雅俊^{†5}

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
果樹研究所ブドウ・カキ研究拠点 果樹害虫研究チーム
739 - 2494 広島県東広島市安芸津町

High-Temperature and High-Concentration CO₂ Fumigation: Insecticidal Effects and Influence on the Quality of Apple and Japanese Pear Fruits

Satoshi TODA, Yuri NAKAMURA, Hiroko HAYAMA, Tamotsu MURAI, Ken NAKADA and Masatoshi MOCHIZUKI

Entomology Research Team, National Institute of Fruit Tree Science, National Agriculture and Food Research Organization, Grape and Persimmon Research Station
Akitsu, Higashihiroshima, Hiroshima 739-2494, Japan

Summary

The insecticidal effects on three pest insects and the influence of high-concentration CO₂ fumigation under high temperature conditions on the quality of apples and Japanese pears were investigated.

1. Larvae of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta*, were completely killed by 60% CO₂ - 16 hours, and diapausing females of the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae*, were 100% eliminated by 40% CO₂ - 24 hours at 35 °C. However, larvae of the peach fruit moth, *Carposina sasakii*, were not all killed by CO₂ fumigation.

2. Different apple varieties showed different degrees of carbon dioxide injury. None was seen in 'Tsugaru', 'Jonagold' or 'Orin', whereas 'Fuji' was clearly susceptible. In the Japanese pear varieties 'Kosui' and 'Hosui,' CO₂ fumigation worsened water soaking injury resulting from fruit senescence, and carbon dioxide injury also occurred with high frequency in both varieties.

3. In 'Hosui,' 1-methylcyclopropene treatment tended to reduce carbon dioxide injury, but aggravated it in 'Kosui' and 'Fuji'.

These results indicate that it is not feasible to apply high concentrations of CO₂ fumigation as a quarantine measure for Japanese pears under high temperature conditions; however, it may be applicable to

^{†1} 果樹研究所業績番号：1587（2010年8月20日受付・2010年12月16日受理）

^{†2} 果樹研究所果実鮮度保持研究チーム

^{†3} 宇都宮大学農学部

^{†4} 鳥取県農林総合研究所園芸試験場

^{†5} 現 果樹研究所カンキツ研究興津拠点果樹害虫研究チーム

certain varieties of apple and for certain pest species.

Key words: CO₂ fumigation, oriental fruit moth, peach fruit moth, two-spotted spider mite, Japanese pear, apple, 1-MCP

緒 言

農産物の輸入を行うにあたり、国により病虫害の侵入防止という植物防疫上の理由からその輸入の禁止または制限が行われている。検疫対象病虫害は品目ごとに定められているが、害虫においては、ガ類、ハダニ類およびカイガラムシ類が品目を超えて共通の対象となっている場合が多い(吉澤, 1990)。特にわが国で発生の認められるモモシクイガ *Carposina sasakii* Matsumura は、アメリカ、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび台湾において、リンゴ、ナシ(ニホンナシを含む)、モモで規制対象に挙げられるなど、諸外国が特に侵入を警戒している害虫の一つである(吉澤, 1990)。政府の農業政策により農産物輸出の振興が求められており、近年わが国の国内産果実の輸出が増大している。中でもリンゴ、ナシは樹種別輸出金額で1, 2位を占めているが(日本園芸農業協同組合連合会, 2009)、両樹種におけるモモシクイガ等を対象とした植物検疫は輸出時の障壁となっており、有効な害虫混入阻止技術の開発が求められている。

植物検疫に用いるくん蒸剤の一つである臭化メチルは、ハダニ類、ガ類など生果実に寄生する害虫に対して強い殺虫効果があり、低温処理と組み合わせることによりモモシクイガなどを対象とした輸出リンゴの植物検疫処理に利用されている(川上ら; 1994)。しかし、臭化メチルはモントリオール議定書締約国会合においてオゾン層破壊物質に指定されて以来、その使用に対する規制が強化され、現在は特例として検疫や不可欠用途のみの使用が認められている。近い将来にはさらに使用規制が強化される可能性が高いことから、代替くん蒸資材の開発が急務となっている。

植物検疫手法の一つとして、主として貯穀害虫に対して用いられてきた資材に二酸化炭素ガス(炭酸ガス)がある(中北, 1995)。炭酸ガスは空気中にも存在し、人体に対する毒性が低い、発火性、引火性がない、浸透性が強い、さらには残留毒性がないという長所があり(日本くん蒸技術協会, 2002)、青果物を対象とした臭化メチルの代替くん蒸資材として期待が大きい。Carpenter et al. (1996) は40%濃度以上の炭酸ガスの常

温24時間処理により、タマネギにおけるアザミウマの1種 *Thrips obscuratus* Crawford 成虫の完全殺虫が可能であることを明らかにしている。しかしながら、果実に食入している害虫類は炭酸ガスくん蒸の影響を受けにくいと考えられ、炭酸ガス濃度、処理温度あるいは処理時間を上昇あるいは延長することにより、殺虫効果を高める必要がある。

そこで、本研究ではナシおよびリンゴを対象果実とし、多くの国で輸入禁止対象病虫害に挙げられているモモシクイガおよびナシヒメシクイ *Grapholita molesta* (Busck) について、高濃度炭酸ガスおよび高温を組み合わせたくん蒸処理の殺虫効果について検討した。また、輸入禁止対象病虫害には指定されていないものの、その寄生が台湾等輸出相手国における流通販売上で問題視されるため、エアガン等による除去が慣例的に行われているリンゴのナミハダニ *Tetranychus urticae* Koch 休眠雌成虫についても同様の検討を行った。

また、これら殺虫試験と平行して、高濃度炭酸ガスおよび高温処理がニホンナシおよびリンゴの果実品質に及ぼす影響について評価した。さらに、リンゴやニホンナシでは貯蔵中の炭酸ガス濃度が高いと障害が発生することが報告されていること(村岡ら, 1985a,b)、一般に収穫後の高温は果実の老化を促進することから、新規鮮度保持剤1-methyl-cyclopropene (1-MCP) (Sisler and Serek, 1997) の処理が、くん蒸処理による障害発生やその他の品質低下を防止できるかどうかについても検討した。

本文に入るに先立ち、供試虫の提供あるいはシクイムシ類寄生果実作出にご助力いただいた、果樹害虫研究チームの柳沼勝彦氏(現省農薬リンゴ研究果樹サブチーム)および三代浩二氏、果樹研究所省農薬リンゴ研究果樹サブチームの井原史雄氏および新井朋徳氏(現果樹害虫研究チーム)、豊島真吾氏(現野菜茶業研究所)に深謝する。また、炭酸ガスくん蒸装置を設計施工し、維持管理いただいた株式会社朝日熱学の神昭典氏および黒坂勇史氏に厚く御礼申し上げる。

なお、本研究は先端技術を活用した農林水産研究高度化事業「高濃度炭酸ガスと1-MCP剤による生鮮物検疫システムの開発(課題番号1715)」の助成により行われた。

材料および方法

1. 炭酸ガスくん蒸装置

高濃度炭酸ガス処理は果樹研究所に試作された2室からなる温度および炭酸ガス濃度を制御可能な炭酸ガスくん蒸装置を用いて行った。同装置は株式会社朝日熱学により設計施工された。各室の庫内容積は10m³ (2.5m × 2m × 2m) であり、温度制御は空冷式とし、加熱用のヒーターは天吊ユニットクーラーの吹き出し口に組み込まれた。炭酸ガスは庫外に設置したガスポンプから供給した。庫内の空気を定期的にサンプリングして自動分析し、炭酸ガス濃度を自動制御する仕様とした。

2. 殺虫試験

炭酸ガスくん蒸処理条件はアクリル樹脂製の炭酸ガス処理容器（容積約1L）を用いた予備的試験の結果をもとに、それぞれ数段階の炭酸ガス濃度、温度、および処理時間を組み合わせて処理区を設定した。処理後のモモシクイガおよびナシヒメシクイ食入果実は23℃、16時間明所、8時間暗所（16L8D）条件下に置き、処理10～16日後に果実の切開調査を行った。モモシクイガおよびナシヒメシクイは実際に果実に食入した個体数、および果実内で死亡した幼虫個体数の計数は困難であった。そこで、川上ら（1994）に従い、炭酸ガス無処理区の全果実から摘出あるいは脱出した老熟幼虫個体数を全処理区の供試個体数と仮定し、それぞれ殺虫率を算出することとした。

1) ナシヒメシクイ - ニホンナシ成熟果試験

ナシヒメシクイは果樹研究所果樹害虫研究チームで幼果リンゴを餌とし、22.5℃、16L8D条件下で継代飼育されている系統を供試した。ニホンナシ‘二十世紀’は2007年8月末～9月に鳥取県農林総合研究所園芸試験場内で収穫された果実を用いた。ナシ果実への接種は、直接産卵させる方法（Experiment 1）、および採取した卵を果実上に置き、ふ化幼虫を果実内に食入させる方法（Experiment 2）をとった。Experiment 1では果実を収容したアクリルケージ内に雌雄成虫を合計約100頭放し、25℃、16L8D条件下で24-48時間産卵させた後、産卵された果実を取り出した。Experiment 2では、人工飼料シルクメイト2S（日本農産工業株式会社）による飼育で得られた成虫を収容した容器内にパラフィン紙（5cm × 2cm）を置き、25℃、16L8D条件下で24時間産

卵させた。産卵されたパラフィン紙を取り出し、1果あたり10卵を果実上に置いてふ化幼虫に食入させた。ナシヒメシクイでは果皮の変色により被害果は外部から識別できるとされるが（真梶・堤, 2005）、食入後間もない若齢幼虫による被害果は選果の過程で見過ごされる可能性が高い。そこで、殺虫試験はふ化後3～6日経過した若齢幼虫を対象として行った。くん蒸処理条件は炭酸ガス濃度（40または60%）、処理時間（16, 20, 24時間）を組み合わせる処理区を設定した。処理温度は35℃とした。

2) モモシクイガ - リンゴ成熟果試験

モモシクイガは、果樹研究所果樹害虫研究チームで継代飼育されている系統を供試した。供試虫は2007年10月に福島県で収穫されたリンゴ‘ジョナ・ゴールド’成熟果実に接種した。供試虫を果実に接種するために、濾紙に産下させたモモシクイガ卵を、1果あたり10～20卵ずつ果実上に置いた。卵は23℃、16L8D条件下で孵化させ、幼虫を果実に食入させた。幼虫食入開始後3日以内の果実をプラスチック容器（40cm × 32.5cm × 14cm）に一列に並べ、くん蒸した。幼果試験の結果を参考に、くん蒸処理条件は温度を35℃、処理時間を24時間とし、炭酸ガス濃度は40、50または60%とした。

3) ナミハダニ休眠雌成虫 - リンゴ成熟果試験

ナミハダニは1999年10月に果樹研究所リンゴ研究拠点でリンゴより採集され、累代飼育されていた系統を入手した。飼育は20℃、16L8Dでインゲンマメ *Phaseolus vulgaris* L.リーフディスク（5cm × 5cm）を用いて行った。休眠雌成虫は以下の方法で作出し、供試した。累代飼育系統から雌成虫を約50頭リーフディスクに移し、2-3日産卵させた後、雌成虫を除去した。産下された卵は、東北個体群で100%近い休眠率を誘起するとされる18℃、9L15Dの温度日長条件下（Takafuji et al., 1991）で成虫まで飼育してそのまま維持し、体色が淡橙色に完全に变化した休眠雌成虫のみを供試した。

ナミハダニ休眠雌成虫は収穫果実ではがくあ部に集合している。そこで、リンゴ‘ふじ’のがくあ部に1果あたり50頭の雌成虫を接種し、離脱を防ぐために48μm目合いのナイロンゴースでがくあ部を覆った。ハダニを接種したリンゴ果実は蓋に5cm × 5cmの穴を開け48μm目合いのナイロンゴースを張ったプラスチック容器（40cm × 32.5cm × 14cm）に収容し、くん蒸処理を行った。くん蒸条件は、温度を35℃、処理時間を24時間

とし、炭酸ガス濃度は40または60%とした。処理後の果実は25℃、16L8D条件下に置き、1日後に死亡個体数および苦悶虫数を計数した。苦悶虫はインゲンマメリーフディスクに移して25℃、16L8D条件下に置き、処理3日後に再度観察した。

3. 果実品質評価試験

1) 供試果実

試験は2006年および2007年に実施し、ニホンナシは‘幸水’および‘豊水’の2品種、リンゴは‘つがる’‘ジョナ・ゴールド’‘王林’および‘ふじ’の4品種の成熟果実を供試した。Table 1に供試果実の生産地ならびに収穫日を示した。ナシは収穫当日、リンゴは収穫1日後の果実を試験に用いた。

2) 炭酸ガスくん蒸処理および1-MCP処理

処理区は、炭酸ガスくん蒸処理区、1-MCP (SmartFresh™, Rohm and Hass, Japan) 処理後に炭酸ガスくん蒸処理を行う1-MCP + 炭酸ガスくん蒸処理区、および無処理区とした。炭酸ガスくん蒸処理区においては、後述する炭酸ガスくん蒸処理時の温度条件まで果実温を確実に上昇させるために、35℃で16時間保温した後、炭酸ガスくん蒸処理を行った。炭酸ガスくん蒸条件は、殺虫試験結果をもとに、温度を35℃、処理時間を24時間とし、炭酸ガス濃度は40%または60%とした。1-MCP + 炭酸ガスくん蒸処理区では、炭酸ガスくん蒸処理の前に1-MCP処理を行った。2006年の1-MCP処理は、35℃保温条件下においたプラスチック密閉容器内で、濃度1ppmの1-MCPに果実を16時間暴露処理することによって行った。2007年の1-MCP処理は、炭酸ガス処理装置庫内で1ppmの1-MCPに35℃下で16時間暴露処理することによって行った。1-MCP処理終了後は直ちに開封して、炭酸ガスくん蒸処理を行った。また、各処理を実施している期間中、25℃（ニホンナ

シ）あるいは20℃（リンゴ）条件下に置いたものを無処理区とした。処理後の果実は各処理区毎に段ボール箱に入れ、ニホンナシは25℃、リンゴは20℃の恒温条件下でそれぞれ果実品質調査までの間保存した。2006年の全試験および2007年の‘王林’の試験については各処理10-15果、2007年の‘幸水’および‘ふじ’の試験では各処理72果を使用した。

3) 果実品質調査

果実の品質調査は、2006年の‘幸水’は処理開始13日後、‘豊水’、‘つがる’、‘ジョナ・ゴールド’および‘ふじ’は処理開始14日後、2007年の‘王林’および‘ふじ’は処理開始15日後にそれぞれ行った。果実は各区10果ずつ無作為に取り出し、地色、油上がり（リンゴ）を調査した後、果肉硬度、pH（ニホンナシ）または滴定酸含量（リンゴ）、および糖度（Brix）を調査した。また、処理果実全果について、炭酸ガス障害発生程度を調査し、加えて‘ふじ’ではみつ入り指数、ニホンナシでは老化による果肉水浸状症状の程度について調査した。地色は果実カラーチャート（山崎・鈴木、1980）を用い、‘つがる’および‘ジョナ・ゴールド’は‘ふじ地色’、‘王林’は‘王林地色’、ニホンナシは‘ナシ地色’を基準に、ていあ部付近の地色を評価した。‘ふじ’は着色が良好で地色判定が困難であったため、地色の評価は行わなかった。リンゴの油上がりは、官能で4段階評価とし、0：全く感じられない（無）、1：少しべたべたするが商品性に影響なし（少）、2：べたべたする、商品性に影響あり（中）、3：とてもべたべたして不快、商品性に影響あり（多）とした。果肉硬度は、果実赤道面の相対する2カ所の果皮を薄く削ぎ、硬度計（FT327、直径11mm円柱形プローブ使用、富士平工業）を用いて測定した。糖度、pHまたは滴定酸含量は、果肉部分からジューサーで搾汁した果汁を用いて測定した。Brixは糖度計（PR-101、ATAGO）、pHは

Table 1. Harvest data of each fruit used in the fruit quality experiments.

Fruit	Cultivar	Date harvested	Location
Japanese pear	‘Kosui’	August 22, 2006	Tsukuba, Ibaraki
	‘Hosui’	September 5, 2006	Tsukuba, Ibaraki
Apple	‘Tsugaru’	September 19, 2006	Takizawa, Iwate
	‘Jonagold’	October 16, 2006	Shiwa, Iwate
	‘Orin’	October 28, 2006	Takizawa, Iwate
	‘Fuji’	November 13, 2006	Iizaka, Fukushima
		November 17, 2007	Iizaka, Fukushima

Table 2. Mortality of *G. molesta* in Japanese pear fruits fumigated with high concentrations of carbon dioxide.

Treatments	Experiment 1			Experiment 2		
	No. tested fruits	No. surviving ^z	Mortality ^y (%)	No. tested fruits	No. surviving ^z	Mortality ^y (%)
Untreated	10	20	0	12	66	0
40%CO ₂ -35 -20h				12	16	75.8
40%CO ₂ -35 -24h	16	4	80.0			
60%CO ₂ -35 -16h				26 ^x	0	100
60%CO ₂ -35 -20h	14	0	100	14	0	100
60%CO ₂ -35 -24h	16	0	100			

^zTotal number of larvae emerged from fruits.

^yMortalities were calculated on the assumption that the number of larvae burrowed into the fruit was identical to the number of surviving individuals in the control.

^xTotal number of 2 replications.

pHメーター (twinpH B-212, HORIBA) で測定した。滴定酸含量は自動滴定酸測定機 (Foodstat FS-51, 東興化学研究所) で測定し、リンゴ酸として換算した。炭酸ガス障害程度は、果実を赤道面に平行に4分割し、切断面における障害発生程度を、0:なし, 1:微, 2:全体1/3以下, 3:全体1/3以上の4段階で評価し、指数2および3のものを重症果とした。ニホンナシの果肉水浸状症状の程度は、佐久間ら(1995)のナシのみつ症の4段階評価基準を参考に、果実赤道部の切断面における水浸状を呈する果肉の面積割合について、0:なし, 1:微(1cm²以下), 2:全体の1/3以下, 3:全体の1/3以上の4段階で評価した。リンゴの蜜入り指数については、青森県のりんご生産指導要項(青森県リンゴ生産指導要項編集委員会, 2006)を参照して、0:なし, 1:極少, 2:10%程度(少), 3:30%程度(中), 4:50%以上(多)の5段階で評価した。

結 果

1. 殺虫試験

ナシヒメシクイ幼虫は炭酸ガス濃度60%, 35℃, 16時間で100%の死虫率が得られたが、炭酸ガス濃度40%では完全殺虫できなかった(Table 2)。

モモシクイガ幼虫に対する試験では、炭酸ガス濃度60%, 35℃, 24時間の処理でも1.3%の老熟幼虫が脱出し、完全殺虫できなかった(Table 3)。

ナミハダニ休眠雌成虫は炭酸ガス濃度40%および60%ともに24時間後の調査時点ではそれぞれ9.4%, 2.1%の苦悶虫が認められた(Table 4)。しかし、72時間後の調査では両処理区ともにすべての苦悶虫も死亡

し、結果として100%の殺虫効果が得られた。本試験では接種部位をナイロンゴースで覆って処理したため、くん蒸によりハダニが果実上から離脱するかどうかは検証できなかった。

2. 果実品質評価

1) リンゴの果実品質への影響

リンゴ‘つがる’, ‘ジョナ・ゴールド’, および‘王林’の3品種の果実品質に及ぼす炭酸ガスくん蒸の影響をTable 5に示した。これら3品種に炭酸ガスを単独で処理した場合、地色と油上がりについては無処理と有意な差は認められなかった。果肉硬度は‘つがる’の炭酸ガス60%処理区および‘王林’の炭酸ガス40%および60%処理区で無処理区に比べ有意に高く保たれていた。滴定酸含量は‘ジョナ・ゴールド’の炭酸ガス40%処理区で無処理区に比べて有意に減少し、炭酸ガス60%処理区でも減少傾向が認められたが、‘つがる’

Table 3. Mortality of *C. sasakii* in mature apple fruits fumigated with high concentrations of carbon dioxide.

Treatments	No. tested fruits	No. surviving ^z	Mortality ^y (%)
Untreated	30	157	0
40%CO ₂ -35 -24h	30	90	42.7
50%CO ₂ -35 -24h	30	9	94.3
60%CO ₂ -35 -24h	30	2	98.7

^zTotal number of larvae emerging from fruits.

^yMortalities were calculated on the assumption that the number of larvae burrowed into the fruit was identical to the number of surviving individuals in the control.

Table 4. Mortality of diapausing female *T. urticae* on apple fruits fumigated with high concentrations of carbon dioxide.

Treatments	No. mites tested	1 day after			3 days after			Mortality (%)
		Normal	Writhing ^z	Dead	Normal	Writhing ^z	Dead	
Untreated	210	198	12	0	198	0	12	5.7
40%CO ₂ -35 -24h	532	0	50	482	0	0	532	100
60%CO ₂ -35 -24h	1210	0	25	1185	0	0	1210	100

^zNo. of mites which can't walk normally.

および‘王林’では無処理区と差は認められなかった。糖度は、無処理区と差は認められなかった。これら3品種では果肉褐変等の炭酸ガス障害は全く認められなかった。1-MCP処理と組み合わせた場合、地色の抜けと油上がりは、無処理区ならびに同濃度の炭酸ガス処理区に比べて有意に抑制され、果肉硬度は有意に高く保たれた。滴定酸含量は無処理区ならびに同濃度の炭酸ガス処理区に比べて高く保たれていた。糖度については一定の傾向は認められなかった。また、炭酸ガス単独処理同様、3品種ともに炭酸ガス障害の発生は認められなかった。

Table 6には‘ふじ’の果実品質に及ぼす炭酸ガスくん蒸の影響を示した。‘ふじ’では、炭酸ガスくん蒸処理単独の場合、40%および60%のどちらの炭酸ガス処理においても、油上がりは無処理区に比べて抑制される傾向が認められた。果肉硬度は無処理と差が認められなかった。滴定酸含量は、無処理に比べて2006年の60%炭酸ガス処理区では有意に減少したが、2007年の40%炭酸ガス処理区では差が認められなかった。糖度には差は認められなかった。蜜入り指数は無処理に比べて低下する傾向があった。果肉にす入りが生じて褐変する炭酸ガス障害の発生は40%および60%のどちらの処理区でも認められた。1-MCPと組み合わせた場合において、油上がりは無処理区に比べて抑制傾向であったが、同濃度の炭酸ガス処理区とは差が無かった。果肉硬度および滴定酸含量は無処理ならびに同濃度の炭酸ガス処理に比べて高く保たれた。糖度や蜜入り指数は無処理と差が認められなかった。1-MCP処理を行った場合においても炭酸ガス障害の発生が認められ、かつ、炭酸ガス単独処理に比べて発生率が增大する傾向が認められた。

2) ニホンナシの果実品質への影響

ニホンナシ‘幸水’および‘豊水’の果実品質に及ぼす炭酸ガスくん蒸の影響をTable 7に示した。炭酸ガス単独処理の場合、地色の抜けは両品種ともに無処理に比べて抑制されていた。果肉硬度は両品種ともに無

処理に比べて低下した。pHは、‘幸水’では無処理と差が認められなかったが、‘豊水’では無処理より有意に高く、酸の減少が進んでいた。糖度は無処理と差が認められなかった。老化による果肉水浸状症状の程度は‘幸水’では無処理と差が認められなかったが、‘豊水’では無処理に比べて有意に高く、果肉劣化が進んでいた。炭酸ガス障害は両品種ともに高率で発生し、‘幸水’の炭酸ガス60%処理区では100%の発生率であった。炭酸ガス障害の症状は、‘幸水’ではす入りを伴う比較的境界の明瞭な果肉褐変が多かったのに対し、‘豊水’では境界の不明瞭な果肉褐変が多く認められた。1-MCP処理と組み合わせた場合においては、果肉硬度は両品種とも無処理区と差がないが、同濃度の炭酸ガス単独処理に比べて高く保たれた。pHは‘幸水’では無処理区および同濃度の炭酸ガス処理区よりも低く保たれたが、‘豊水’では無処理区より高くなった。糖度は1-MCP + 60%炭酸ガス処理区で高かったものの、処理による一定の傾向は認められなかった。果肉水浸状症状は、‘幸水’では無処理区および同濃度の炭酸ガス処理区よりも有意に軽減された。‘豊水’では無処理区より有意に助長され、同濃度の炭酸ガス処理区と同程度であった。1-MCP処理と組み合わせた場合、両品種とも炭酸ガス障害の発生が認められた。‘幸水’では1-MCP処理により炭酸ガス障害が増大する傾向があったのに対し、‘豊水’では減少する傾向が認められた。

考 察

リンゴまたはニホンナシの収穫果実への寄生が認められる3種害虫のうち、ナミハダニ休眠雌成虫は炭酸ガス濃度40%の35、24時間処理で、ナシヒメシンクイ幼虫は60%の35、16時間処理で100%の死虫率が得られた。一方、モモシンクイガ幼虫は予備的に行ったりんご幼果を用いた試験では60%の35、24時間処理で100%の死虫率が得られたが(土田ら、未発表)、成熟果を用いた本試験ではいずれの条件でも完全殺虫できなかった。輸出を目的とした殺虫技術の開発は輸入国

Table 5. Effects of combination of carbon dioxide fumigation and 1-MCP treatment on quality of apple fruit 'Tsumgaru', 'Jonagold', and 'Orin'

Cultivar	Ground color (color chart index) ^{z,y}	Waxing index ^{z,y,x}	Flesh firmness (N) ^{z,w}	Titratable acidity (%) ^{z,w}	Brix (%) ^{z,w}	Frequency of fruit with carbon dioxide injury(%) ^y /Frequency of severe ones (%) ^y
'Tsumgaru'	3.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0	59.41 ± 1.08	0.228 ± 0.004	12.96 ± 0.14	
14 days after treatment						
Treatments						
untreated	5.2 ± 0.1	2.3 ± 0.2	42.03 ± 1.06	0.174 ± 0.003	12.94 ± 0.15	0.0 / 0.0
40%CO ₂	5.2 ± 0.1	2.7 ± 0.2	44.87 ± 0.96	0.177 ± 0.003	13.69 ± 0.18	0.0 / 0.0
60%CO ₂	4.7 ± 0.2	2.9 ± 0.1	48.83 ± 0.90	0.178 ± 0.004	13.28 ± 0.07	0.0 / 0.0
40%CO ₂ +1-MCP	4.0 ± 0.1	1.3 ± 0.2	50.82 ± 0.90	0.191 ± 0.004	13.40 ± 0.10	0.0 / 0.0
60%CO ₂ +1-MCP	4.0 ± 0.2	1.4 ± 0.2	56.10 ± 0.50	0.197 ± 0.004	13.08 ± 0.27	0.0 / 0.0
'Jonagold'	2.4 ± 0.2	0.0 ± 0.0	67.94 ± 1.41	0.519 ± 0.011	13.03 ± 0.12	
14 days after treatment						
Treatments						
untreated	3.5 ± 0.2	2.8 ± 0.1	44.04 ± 1.62	0.430 ± 0.008	13.58 ± 0.11	0.0 / 0.0
40%CO ₂	3.8 ± 0.1	2.6 ± 0.2	44.92 ± 0.87	0.387 ± 0.008	13.56 ± 0.10	0.0 / 0.0
60%CO ₂	3.9 ± 0.2	2.9 ± 0.1	47.65 ± 0.83	0.407 ± 0.007	13.52 ± 0.13	0.0 / 0.0
40%CO ₂ +1-MCP	2.4 ± 0.2	0.1 ± 0.1	70.56 ± 0.68	0.462 ± 0.008	13.97 ± 0.15	0.0 / 0.0
60%CO ₂ +1-MCP	2.7 ± 0.2	0.2 ± 0.1	68.00 ± 0.48	0.419 ± 0.007	13.29 ± 0.09	0.0 / 0.0
'Orin'	4.6 ± 0.1	0.0 ± 0.0	69.22 ± 0.58	0.231 ± 0.026	14.19 ± 0.17	
15 days after treatment						
Treatments						
untreated	6.4 ± 0.2	0.8 ± 0.1	46.76 ± 0.99	0.199 ± 0.019	14.91 ± 0.13	0.0 / 0.0
40%CO ₂	6.7 ± 0.1	0.7 ± 0.2	53.89 ± 1.31	0.197 ± 0.006	15.01 ± 0.10	0.0 / 0.0
60%CO ₂	6.5 ± 0.1	0.5 ± 0.2	55.22 ± 1.01	0.189 ± 0.004	15.03 ± 0.13	0.0 / 0.0
40%CO ₂ +1-MCP	5.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1	69.54 ± 1.51	0.252 ± 0.008	15.08 ± 0.08	0.0 / 0.0
60%CO ₂ +1-MCP	5.1 ± 0.2	0.4 ± 0.1	67.00 ± 1.56	0.232 ± 0.009	15.13 ± 0.18	0.0 / 0.0

^z Values indicate mean ± SE.

^y Values labeled with different letters are significantly different ($p < 0.05$) by the Steel-Dwass test.

^x Grades for levels of greasiness on surface of apple pericarp as indices, 0: not greasy, 1: slightly greasy, 2: greasy, 3: very greasy

^w Values labeled with different letters are significantly different ($p < 0.05$) by Tukey's test.

^v The symptom of carbon dioxide injury in fruit are brown heart and cavities. Grades for carbon dioxide injury as indices of the area involved in the fruit equatorial plate, 0: No area involved, 1: 1cm² or less, but not zero, 2: more than 1cm², but less than 1/3 of whole area, 3: more than 1/3 of whole area.

^u The carbon dioxide injury index 2 and 3 were assumed to be severe carbon dioxide injury.

Table 6. Effects of combination of carbon dioxide fumigation and 1-MCP treatment on quality of 'Fuji' apples

	Waxing index ^{z,y}		Flesh firmness (N) ^{z,w}		Titratable acidity (%) ^{z,w}		Brix (%) ^{z,w}		Watercore intensity ^{z,w}		Frequency of fruit with carbon dioxide injury (%) ^y /Frequency of severe ones (%) ^t	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Pre treatment	0.0±0.0	0.2±0.1	60.33±0.83	63.44±1.01	0.333±0.008	0.357±0.015	14.89±0.17	14.51±0.28	3.3±0.2	2.6±0.4		
14-15 days after treatment												
Treatments												
untreated	0.7±0.3 a	0.3±0.1 a	58.71±0.76 a	58.71±0.76 a	0.288±0.011 a	0.267±0.011 a	15.41±0.21 a	15.38±0.15 a	1.4±0.3 a	1.1±0.1 a	0.0/ 0.0	1.4/ 1.4
40%CO ₂	0.1±0.0 b	0.1±0.0 b	60.48±0.72 ab	60.48±0.72 ab	0.294±0.005 ab	0.294±0.005 ab	15.91±0.15 ab	15.91±0.15 ab	0.5±0.2 a	0.6±0.1 b	20.0/ 0.0	64.6/ 16.9
60%CO ₂	0.3±0.2 ab	0.0±0.0 b	60.49±0.72 a	63.50±0.74 b	0.248±0.004 b	0.323±0.009 b	15.67±0.13 a	16.31±0.17 b	1.6±0.4 a	0.8±0.1 ab		68.6/ 23.9
40%CO ₂ +1-MCP	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	63.50±0.74 b	63.50±0.74 b	0.272±0.004 ab		15.50±0.18 a					
60%CO ₂ +1-MCP	0.0±0.0 b	0.0±0.0 b	63.50±0.74 b	63.50±0.74 b	0.272±0.004 ab		15.50±0.18 a					

^z Values indicate mean ±SE.

^y Grades for levels of greasiness on surface of apple pericarp as indices: 0: not greasy, 1: slightly greasy, 2: greasy, 3: very greasy

^x Values labeled with different letters are significantly different ($P < 0.05$) by the Steel-Dwass test

^w Values labeled with different letters are significantly different ($P < 0.05$) by Tukey's test

^v Grades for watercore intensity as indices: 0: none, 1: slight, 2: moderate, 3: severe

^u The symptom of carbon dioxide injury in fruit are brown heart and cavities. Grades for carbon dioxide injury as indices of the area involved in the fruit equatorial plate: 0: No area involved, 1: 1 cm² or less, but not zero, 2: more than 1 cm², but less than 1/3 of whole area, 3: more than 1/3 of whole area.

^t The carbon dioxide injury index 2 and 3 were assumed to be severe carbon dioxide injury.

Table 7. Effects of combination of carbon dioxide fumigation and 1-MCP treatment on quality of Japanese pear fruit ‘Kosui’ and ‘Hosui’

Cultivar	Ground color (color chart index) ^{z,x}	Flesh firmness (N) ^{z,y}	pH ^{z,y}	Brix (%) ^{z,y}	Water soaked disorder intensity ^{z,x,w}	Frequency of fruit with carbon dioxide injury(%) ^y /Frequency of severe ones (%) ^y	
‘Kosui’ pre treatment 13 days after treatment	2.6 ± 0.2	24.73 ± 1.04	5.260 ± 0.022	12.67 ± 0.22	0.0 ± 0.0		
	Treatments						
	untreated	4.3 ± 0.1 a	18.53 ± 0.46 a	5.620 ± 0.051 a	12.80 ± 0.13 ab	3.3 ± 0.2 a	0.0/ 0.0
	40%CO ₂	3.6 ± 0.2 b	16.56 ± 0.33 bcd	5.700 ± 0.076 a	12.52 ± 0.14 a	4.0 ± 0.0 a	27.3/ 9.1
	60%CO ₂	3.5 ± 0.1 b	16.10 ± 0.41 d	5.650 ± 0.052 a	12.55 ± 0.18 a	4.0 ± 0.0 a	100.0/ 100.0
40%CO ₂ +1-MCP	3.6 ± 0.1 b	18.21 ± 0.51 ab	5.157 ± 0.034 b	12.57 ± 0.18 a	0.4 ± 0.1 b	42.9/ 14.2	
60%CO ₂ +1-MCP	3.8 ± 0.1 ab	18.00 ± 0.47 abc	5.186 ± 0.027 b	13.31 ± 0.20 b	0.5 ± 0.2 b	100.0/ 71.4	
‘Hosui’ pre treatment 14 days after treatment	3.7 ± 0.2	21.39 ± 0.56	4.560 ± 0.034	12.95 ± 0.21	0.5 ± 0.2		
	Treatments						
	untreated	4.9 ± 0.1 c	18.16 ± 0.42 b	4.417 ± 0.027 a	12.83 ± 0.25 a	0.4 ± 0.2 a	0.0/ 0.0
	40%CO ₂	4.7 ± 0.1 bc	15.82 ± 0.27 a	4.577 ± 0.017 b	12.63 ± 0.14 a	2.1 ± 0.1 b	53.8/ 23.1
	60%CO ₂	4.5 ± 0.1 bc	17.44 ± 0.74 ab	4.638 ± 0.037 b	13.31 ± 0.11 a	3.7 ± 0.1 c	76.9/ 46.2
40%CO ₂ +1-MCP	4.4 ± 0.1 b	18.85 ± 0.47 b	4.556 ± 0.017 b	13.20 ± 0.17 a	1.6 ± 0.1 b	33.3/ 5.6	
60%CO ₂ +1-MCP	4.0 ± 0.1 a	19.45 ± 0.60 b	4.631 ± 0.031 b	13.08 ± 0.17 a	3.6 ± 0.2 c	69.2/ 46.2	

^z Values indicate mean ± SE.

^y Values labeled with different letters are significantly different ($P < 0.05$) by the Steel–Dwass test

^x Values labeled with different letters are significantly different ($P < 0.05$) by Tukey’s test

^w Grades for water soaked disorder intensity on fresh as indices, 0: none, 1: slight, 2: medium, 3: severe

^v The symptoms of carbon dioxide injury in fruit are brown heart and cavities. Grades for carbon dioxide injury as indices of the area involved in the fruit equatorial plate, 0: No area involved, 1: 1 cm² or less, but not zero, 2: more than 1 cm², but less than 1/3 of whole area, 3: more than 1/3 of whole area.

^u The carbon dioxide injury index 2 and 3 were assumed to be severe carbon dioxide injury.

の植物検疫規制をクリアする必要がある。検疫処理では一般に開発された殺虫処理基準を適用して大規模殺虫試験が行われ、一般に99.9968%以上の殺虫率(Probit 9)が得られることが必要であるとされている(Landolt et al., 1984)。例えば、台湾への輸入検査でモモシクイガが発見された場合、台湾向け農産物の対象生果実について、1回目は生産した都道府県から、2回目の発見では全国からの輸出が停止される取り決めになっているため、1例でも発見されればその影響は極めて大きい。したがって、本研究におけるモモシクイガの殺虫試験結果は死亡率は98.7%と高率ではあったが、求められる要件は満たしていない。また、完全殺虫が確認されたナミハダニおよびナシヒメシクイにおいても、本研究で得られた処理条件を検疫技術として確立するためには、さらなる大規模試験の実施が必須となる。本研究ではナシヒメシクイ、モモシクイガともに果実食入後6日以内の若齢幼虫を対象とした。しかし、モモシクイガでは臭化メチルに対して5齢幼虫が最も耐性が高いとされている(川上ら, 1994)。リンゴの晩生種である‘ふじ’の収穫果では5齢幼虫が食入している可能性が高い。したがって、ナシヒメシクイと合わせて、炭酸ガスに対する耐性が最も高いステージの調査を行い、全ステージを完全殺虫可能なくん蒸条件を確立することが今後の課題である。

高濃度炭酸ガス処理が果実品質に及ぼす影響を調査した結果、リンゴ‘つがる’、‘ジョナ・ゴールド’、‘王林’については、炭酸ガス60%および40%の高濃度炭酸ガス処理による炭酸ガス障害は発生しないことが明らかになり、本試験の方法による殺虫処理が可能であることが判明した。その他の果実品質に及ぼす影響としては、‘つがる’および‘王林’においては、二酸化炭素によるエチレン生成抑制に起因すると推測される果肉硬度の維持といったプラスの効果が認められた。‘ジョナ・ゴールド’では、炭酸ガス処理によって滴定酸含量の低下が認められたものの、その他の項目においては、大きな品質低下は認められなかった。1-MCP処理を組み合わせた場合、無処理区および同濃度の炭酸ガス処理区よりも、地色の抜け、油上がりが有意に抑制され、果肉硬度や滴定酸含量が高く維持された。これは1-MCPの果実品質保持効果(Blankenship and Dole, 2003)を追認するものであるが、‘ジョナ・ゴールド’では炭酸ガス処理による酸含量の低下を抑制することから、高濃度炭酸ガス処理による品質低下を緩和する一定の効果が認められた。しかし、糖度等の計測値では差は認められないものの、高濃度炭酸ガス処理

した果実は、1-MCPの有無に関わらず甘味が薄く感じられ食味の低下が認められた(中村ら, 未発表)。この原因についてはさらに検討が必要である。一方、リンゴ‘ふじ’においては、高濃度炭酸ガス処理による炭酸ガス障害が認められ、本試験の方法による殺虫処理は適していないことが明らかになった。これらの障害は、果実の熟度によって影響を受け、熟度がより進んだ蜜入り果で発生が多かった(中村ら, 未発表)。「ふじ」に認められた障害は、果心部および果肉部におけるす入り症状と内部褐変で、CA貯蔵により生じる既報の障害(村岡ら, 1985a,b)と同様であった。1-MCP処理を組み合わせた場合、これら炭酸ガス障害の発生は増大した(Table 6)。同様な現象が、1-MCP処理したリンゴ‘Empire’および‘McIntosh’をCA貯蔵した場合に報告されていることから(DeEll et al., 2003)、炭酸ガス耐性が弱いリンゴ品種において、高濃度炭酸ガス処理時の品質低下防止を目的とした1-MCPの利用は適切でないことが判明した。ニホンナシ‘幸水’‘豊水’においては、高濃度炭酸ガス処理による炭酸ガス障害の発生が顕著であり、有意な硬度の低下およびpHの上昇が認められた。また、ニホンナシ‘二十世紀’においても重篤な炭酸ガス障害が発生することが明らかになっていることから(池田ら, 私信)、ニホンナシはリンゴに比べ炭酸ガス耐性が低いと推察された。1-MCP処理を組み合わせた場合においても、‘幸水’では、高濃度炭酸ガスによる硬度の低下や老化による果肉水浸状症状は軽減されるが、炭酸ガス障害の発生は増大する傾向があった。‘豊水’では、硬度の低下抑制は認められるものの、果肉水浸状化症状の軽減効果や炭酸ガス障害の発生抑制効果は十分ではないことから、本試験の方法による殺虫処理は適していないと判断された。

Neven and Hansen(2010)は、コドリンガ *Cydia pomonella* (L.)を用いて濃度制御された空気が虫体に及ぼす作用の生理的メカニズムの解明を行い、低濃度の酸素はATP合成を、高濃度の二酸化炭素はATPの利用をそれぞれ阻害することを明らかにした。さらに、このような空気制御下での高温処理は短時間でコドリンガに致死的な作用をもたらすことを明らかにした。本研究では、高濃度の炭酸ガスと高温を組み合わせたくん蒸処理を行ったが、空気でバランスを取った形になるため、炭酸ガス濃度40, 50, 60%における酸素濃度は、それぞれ約12, 約10, 約8%であったと推定される。殺虫効果に関してこれら3つの要素には相乗効果があると考えられるが(Neven and Hansen, 2010)、その組み合わせは多岐にわたり、また対象害虫(ステージ)によっ

ても各要素に対する感受性は異なる。さらに、果実品質に対する影響にも品種間差異があることから、くん蒸条件の検討は害虫別、樹種（品種）別に詳細に行う必要があることが示唆された。

その一方で、臭化メチルの完全使用禁止を見据え、炭酸ガスくん蒸の他にも様々な代替技術の開発、検討が進められている。化学物質を使用した技術としては、ヨウ化メチル、リン化アルミニウム（リン化水素）くん蒸などがある。しかし、ヨウ化メチルクん蒸は各種害虫に対する殺虫効果は高いが、多くの青果物に障害を発生させる（相馬ら、2007）。一方、リン化水素は青果物に対し障害は発生させないが、モモシンクイガ等のシンクイムシ類は完全殺虫できない（相馬ら、2000）。また、リンゴ果実がくあ部のナミハダニの除去法としては、揺動噴射式果実洗浄機が開発されている（宮崎ら、2006）。この方法では果実品質を損なうことはないが、果心部に侵入した個体は完全には除去できない場合がある。それに対し、炭酸ガスくん蒸では果心部に侵入したハダニも殺虫することができた。このように、いずれの技術も適用範囲にそれぞれ限界があることから、単一の方法で広範な適用は困難であると考えられる。したがって、それぞれの技術を使い分けることにより、お互いに補完し合う形で完全な植物検疫を目指す必要がある。

摘 要

高温条件下における高濃度炭酸ガスくん蒸処理のモモシンクイガ、ナシヒメシンクイおよびナミハダニ休眠雌成虫に対する殺虫効果、ニホンナシおよびリンゴの果実品質に及ぼす影響、ならびに1-MCP処理による障害の軽減効果を評価した。

1. ナシヒメシンクイ幼虫はおよびナミハダニ休眠雌成虫はそれぞれ、炭酸ガス濃度60%および40%の35℃、24時間処理で100%の死虫率が得られた。モモシンクイガ幼虫は完全殺虫できなかった。

2. リンゴでは炭酸ガス単独処理区は無処理区と比較してほぼ同等の果実品質が維持されたが、ナシでは硬度の低下およびpHの上昇が見られた。リンゴの炭酸ガス障害（果心部および果肉部の内部褐変と空洞化）には品種間差があり、リンゴ‘つがる’、‘ジョナ・ゴールド’および‘王林’では発生しなかったが、リンゴ‘ふじ’では高率で発生した。ナシでは両品種ともに水浸状障害およびす入りが高率で発生した。

3. 1-MCP処理により、リンゴ、ナシともに無処理区

よりも果実品質は有意に高く保たれた。‘豊水’では炭酸ガス障害が軽減される傾向が認められたが、‘幸水’および‘ふじ’では助長された。

以上の結果から、高温条件下における高濃度炭酸ガスくん蒸のニホンナシへの適用は困難と判断されたが、リンゴでは品種、害虫種を絞っての適用に可能性を残した。

引用文献

- 1) 青森県りんご生産指導要項編集委員会. 2006. りんご生産指導要項（平成18年改訂版）. P. 162. 財団法人青森県りんご協会, 青森.
- 2) Blankenship, S. M. and J. M. Dole. 2003. 1-Methylcyclopropane: a review. *Postharvest Biol. Technol.* 28: 1-25.
- 3) Carpenter, A., S. Wright and P. Lash. 1996. Response of adult New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus* (Thysanoptera: Thripidae) to high carbon dioxide and low oxygen atmospheres at various temperatures. *Bull. Entomol. Res.* 86: 217-221.
- 4) DeEll, J. R., D. P. Murr, L. Wiley, M. D. Porteous. 2003. 1-Methylcyclopropane (1-MCP) increases CO₂ injury in apples. *Acta Hort.* 600: 277-280.
- 5) 川上房男・元島俊治・宮本憲治・相馬幸博・溝淵三必・中村三恵子・三角 隆・砂川邦男・李 雅雄・赤川敏幸・加藤利之・秋山博志・今村哲夫・田尾正博・金田昌士・杉本俊一郎・米田雅典・加土井仁・勝又 肇・永井宏志・佐々木幹了・一戸文彦・川嶋浩三・工藤亜義・長内敬明・斎藤 彰. 1994. 対米輸出りんご“ふじ”の植物検疫処理. *植防研報* 30: 81-140.
- 6) Landolt, P. J., D. L. Chambers and V. Chew. 1984. Alternative to the use of probit 9 mortality as a criterion for quarantine treatments of fruit fly (Diptera: Tephritidae) infested fruit. *J. Econ. Entomol.* 77: 285-287.
- 7) 宮崎昌宏・齋藤秀文・小林 恭・関 正裕・長坂善禎・建石邦夫・下田武志・小堀陽一・高辻豊二・中村ゆり. 2006. ナミハダニ休眠雌成虫を除去する揺動噴射式果実洗浄機. 平成18年度果樹研究成果情報. 35-36.
- 8) 村岡信雄・森 建・井坂 孝・田村太郎. 1985a. りんご果実の炭酸ガス障害（第1報）炭酸ガス障害の症状とその変化要因. *食総研報* 46: 35-39.