

リン化水素及びフッ化スルフリルによるグラナリアコクゾウ *Sitophilus granarius* L. 及びコクゾウムシ *S. zeamais* MOTSCULSKY の殺虫効果

内藤浩光・小川 昇・谷川展暁・後藤睦郎*・三角 隆
相馬幸博・今村太郎**・宮ノ下明大**

横浜植物防疫所調査研究部・*神戸植物防疫所・**独立行政法人食品総合研究所

Effects of Gas Mixtures of Phosphine and Sulfuryl Fluoride on Mortality of the Granary Weevil: *Sitophilus granarius* L., and the Maize Weevil: *S. zeamais* MOTSCULSKY (Coleoptera: Rhynchophoridae). Hiromitsu NAITO, Noboru OGAWA, Nobuaki TANIGAWA, Mutsuro GOTO,* Takashi MISUMI, Yukihiro SOMA, Taro IMAMURA** and Akihiro MIYANOSHITA** (Research Division, Yokohama Plant Protection Station, 1-16-10, Shin-yamashita, Naka-ku, Yokohama 231-0801, Japan, *Kobe Plant Protection Station and **National Food Research Institute. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan* 42: 1-5 (2006).

Abstract: Fumigation tests using sulfuryl fluoride (SF) and phosphine (PH) were conducted to develop an alternative to methyl bromide fumigation. Egg, larval, and pupal stages of *Sitophilus granarius* and *S. zeamais* were tested. SF fumigation showed high efficacy toward larval and pupal stages of both weevils: The stages were killed completely at 10 mg/l for 24 hours at 15°C. However, the mortalities of the egg stage of each weevil were 26.4 and 3.6%, respectively, with SF showing the least efficacy toward the egg stage. Mixture gas fumigation of SF 30 mg/l and PH 2 mg/l for 24 or 48 hours at 15°C was conducted to cover the weak point of SF. The mixture gas fumigation showed high efficacy toward all stages: however, 100% mortality was not obtained in the pupal stage of *S. zeamais* by the mixture gas for 48 hours. This result was not in accord with the result of SF fumigation. Then, mixture gas fumigations taking account of the order of the injection of both gases and the pace of increase of PH gas concentration were conducted, and this made clear that these factors affected the mortality of larval and pupal stages of both weevils. These results indicated that mixture gas fumigation of SF and PH has promise as an alternative to methyl bromide fumigation, but it is necessary to take into account the method of the PH dosing.

Key words: phosphine, sulfuryl fluoride, mixture gas, fumigation, mortality, granary weevil, maize weevil

はじめに

臭化メチルは、輸入農産物に付着する検疫害虫を駆除するくん蒸剤として最も使用されるとともに、国内においてはショウガなどの土壤病害、ウリ科作物のウイルス病及び収穫後のクリの害虫防除等を目的に使用されてきた。しかしながら、この臭化メチルはオゾン層を破壊する物質に指定され、その生産及び使用が検疫など一部の用途を除いて規制されている（楯谷，1993）。

また、平成 8 年の植物防疫法の改正により、検疫有害動植物の概念が我が国の植物検疫制度に取り入れられた結果、コクゾウムシなど一部の病害虫については植物検疫の対象とはしない、いわゆる非検疫有害動植物が規定された。この結果、これら非検疫有害動植物のみが輸入検査で発見されたとしても、くん蒸・廃棄などの措置をとることなく輸入が認められ、これら非検疫有害動植物が付着したまま国内へ流通することとなった。米、麦などの穀類については、これまで品質保持のため流通の過程で臭化メチルを使用してくん蒸されてきたが、前述のとおり検疫用途以外での臭化メチルの使用が規制され

たため 2005 年以降は使用できず、これに代わる防除方法を開発することが急務とされている。

リン化アルミニウム剤によるくん蒸は、輸入穀類、豆類などに付着する害虫に対するくん蒸方法として、我が国の植物検疫でも長く利用されてきた。本くん蒸剤は、空気中の水分と反応して殺虫有効成分であるリン化水素を発生することからくん蒸時間が長くなること、くん蒸終了後の残さの処理が必要なこと、そして、穀類の主要害虫であるコクゾウムシ類の蛹を完全殺虫することができないこと（森・川本，1966；森ら，1969）といったデメリットがある。しかし、最近になってリン化アルミニウム剤をリン化水素に分解し、サイロ、倉庫へ投薬する庫外投薬機が開発され、くん蒸時間を大幅に短縮することが可能となった。

一方、フッ化スルフリルは、沸点が低く（-55.2℃）、気化器を使用することなくポンペから直接投薬することが可能であるものの、輸入木材に対する臭化メチル代替消毒技術開発の過程で木材害虫の卵に対して殺虫効果が低いことがわかっている（SOMA *et al.*, 1996; MIZOBUCHI *et al.*, 1996; 相馬ら，1997, 1999）。

そこで、コクゾウムシ類2種を用い、国内流通用に限らず検疫用としても利用可能な臭化メチル代替消毒技術として、リン化アルミニウム剤の庫外投薬機及びフッ化スルフリルボンベによるくん蒸が適用できるかどうか殺虫試験を実施したので報告する。

材料及び方法

供試虫

2000年にイギリスから導入し食品総合研究所（以下、食総研）及び当所調査研究部において飼育されているグラナリアコクゾウ *Sitophilus granarius* L.（農林水産省指令12横植第336号）及びコクゾウムシ *S. zeamais* MOTSCULSKY の卵、幼虫及び蛹を使用した。

25℃、70%R.H.に調整された恒温室において、グラナリアコクゾウは小麦を飼料として、コクゾウムシは玄米及び小麦を飼料として、飼料100gあたり1,000～2,000頭の成虫を2日間放飼することにより産卵させた。その後、殺虫試験に供試する目的のステージを得るため飼育を続け、卵は産卵後1～4日経過したものを、幼虫は産卵後12～14日経過したものを、グラナリアコクゾウの蛹は産卵後35～37日経過したものを、コクゾウムシの蛹は産卵後28～30日経過したものをくん蒸試験に供試した。蛹は、くん蒸前に飼料を切開調査し、蛹化率を確認した。

くん蒸

食総研及び当所調査研究部に設置されている内容積約5.3lのガラス製くん蒸ビンを使用した。くん蒸条件は、15℃、24又は48時間とした。供試虫の寄生した飼料は、くん蒸前日1試験区あたり10～20gに分け、くん蒸温度（15℃）に設定したくん蒸実験室に置いた。くん蒸時には、この小分けした飼料をステンレスメッシュ製の容器（径2cm×高さ7cm）又はポリエステル繊維製バッグ（約7×5cm）に収容し、くん蒸ビン空間部に吊り下げて処理した。リン化水素（純度約10%、以下PH）及びフッ化スルフリル（純度99%以上、以下SF）は、それぞれのボンベからガラス製シリンドで所

定量採取し、投薬量分の空気をあらかじめ吸引しやや減圧状態のくん蒸ビンに投薬した後速やかに常圧に戻し、マグネットスターラーを用いて約1時間かくはんした。くん蒸中のガス濃度は、ガスクロマトグラフ（TCD装備、島津製作所製）を使用してくん蒸中1回（投薬当日）測定した。くん蒸終了後は、ガス排出装置を用いて1時間排気した。

殺虫効果の確認

排気終了後、供試虫の寄生した飼料を取り出し、容器に入れて飼育条件下に戻した。殺虫率は、対照区及び処理区からの羽化脱出成虫数をカウントし、対照区の脱出成虫数をもとに算出した。なお、くん蒸処理した供試虫は生育が遅れる傾向があるため、殺虫効果の確認は対照区の成虫脱出終了後少なくとも1カ月間行った。

結果及び考察

1. SF 単独くん蒸

SF 単独くん蒸による殺虫効果を Table 1 に示す。

グラナリアコクゾウは、5 mg/l、15℃、24時間のくん蒸で幼虫及び蛹の殺虫率が100%となったが、卵は30 mg/lでも26.4%であった。コクゾウムシは、5 mg/lで蛹が、10 mg/lで幼虫が100%の殺虫率となったが、卵は30 mg/lでも3.6%であった。このことは、カミキリムシ、パークビートル、アンブロシアビートルなどの木材害虫に対するSFの殺虫効果について調査したSOMA *et al.* (1996) 及び相馬ら (1997) の結果と同様であり、SFはコクゾウムシ類に対しても、幼虫、蛹に対する殺虫効果は高いが、卵に対しては効果が低いことがわかった。

2. PH、SF 混合ガスくん蒸

リン化アルミニウム剤（以下A/P）の貯穀害虫に対する殺虫効果について調査した森・川本 (1966) によれば、PH 2 mg/l、15℃、24時間のくん蒸でグラナリアコクゾウの幼虫、成虫及びコクゾウムシの成虫は100%の殺虫率となったものの、グラナリアコクゾウ

Table 1. Mortalities of *S. granarius* and *S. zeamais* fumigated with sulfuryl fluoride at doses of 5, 10 and 30 mg/l for 24 hours at 15℃.

Species	Stage	n ¹⁾	Mortality (%±S.D.)		
			5 mg/l	10 mg/l	30 mg/l
<i>S. granarius</i>	Egg	345	—	—	26.4±7.4
	Larva	1,215	100	100	100
	Pupa	1,071	100	100	100
<i>S. zeamais</i>	Egg	633	—	—	3.6±5.1
	Larva	2,082	99.9±0.2	100	100
	Pupa	1,874	100	100	100

¹⁾ Total number of insects tested in three replicates excluding larval stage of *S. zeamais*, and that of larval stage of *S. zeamais* in two replicates.

Table 2. Mortalities of *S. garanarius* and *S. zeamais* fumigated with mixture gas of phosphine and sulfuryl fluoride for 24 and 48 hours at 15°C.

Species	Stage	<i>n</i> ¹⁾	Mortality (%±S.D.)		
			24 hrs		48 hrs
			2+10 ²⁾	2+30 ³⁾	2+30 ³⁾
<i>S. garanarius</i>	Egg	632	100	—	100
	Larva	1,860	100	100	100
	Pupa	1,290	94.6± 6.9	98.7±1.8	100
<i>S. zeamais</i>	Egg	560	98.6± 0.0	—	100
	Larva	1,618	93.4± 5.4	99.3±0.8	100
	Pupa	1,027	47.6±13.4	99.6±0.6	99.4±0.9

¹⁾ Total number of insects tested of egg and pupal stages in two replicates, and that of larval stage in three replicates.

²⁾ PH₃ 2 mg/l+SO₂F₂ 10 mg/l. Both gases were injected into the bottle continuously.

³⁾ PH₃ 2 mg/l+SO₂F₂ 30 mg/l. Both gases were injected into the bottle continuously.

の卵、蛹、コクゾウムシの卵、幼虫及び蛹の殺虫率は、約 60～90% であった。このことと前述の SF 単独くん蒸の結果から、PH と SF を混合してくん蒸した場合、SF の殺虫効果によりこれらの幼虫及び蛹が完全に殺虫され、残る卵についても両薬剤の相乗効果による殺虫効果の増大が期待された。そこで、両薬剤を混合したくん蒸試験を行った。その結果を Table 2 に示す。

グラナリアコクゾウの卵は、PH 2 mg/l、SF 10 mg/l、24 時間及び PH 2 mg/l、SF 30 mg/l、48 時間の両試験区において 100% の殺虫率であり、コクゾウムシの卵は、PH 2 mg/l、SF 30 mg/l、48 時間で 100% であった。幼虫及び蛹の結果をみると、グラナリアコクゾウの幼虫を除き 24 時間くん蒸では 100% の殺虫率が得られず、コクゾウムシの蛹は PH 2 mg/l、SF 30 mg/l、48 時間のくん蒸でも 100% の殺虫率が得られなかった。このことは、SF 10 mg/l、24 時間のくん蒸によりこれらの幼虫及び蛹で 100% の殺虫率が得られた SF 単独くん蒸の結果と整合しない。

BOND & MONRO (1967) 及び BOND *et al.* (1969) は、ゴキブリ及び *Tribolium* 属成虫を用い、PH の殺虫作用発現には酸素が必要であることを明らかにした。また、中北 (1987) は、PH のコクゾウムシ成虫に対する作用機構を調べ、PH は濃度の上昇に伴って強い呼吸抑制作用を示すこと、PH の毒性は虫体の酸素消費量と密接に関係していることを確認している。これらのことから、PH、SF 混合くん蒸においては両薬剤の投薬順序、そして、PH の投薬の仕方が殺虫効果に影響することが考えられた。高濃度の PH を先に投薬した場合、供試虫の呼吸が強く抑制される結果 SF が虫体内へ十分取り込まれず、特に幼虫、蛹に対する SF の殺虫効果が発揮されない可能性がある。実際、今回のくん蒸試験では、2 mg/l 分のガス体の PH を SF と同時に投薬しており、このことが殺虫効果に影響したのではないかと考えられた。

そこで、両薬剤の投薬順序による殺虫効果への影響及び PH の投薬所用時間の違いによる殺虫効果への影響を

調べるため、次の 2 つの試験を行った。

3. PH、SF 時間差投薬くん蒸

PH と SF の投薬順序の違いによる殺虫効果を確認するため、PH を投薬後 60 分経過してから SF を投薬する区、PH を投薬後引き続き SF を投薬する PH・SF 同時投薬区、SF を投薬後 60 分経過してから PH を投薬する区の 3 くん蒸区を設けた（最初のくん蒸剤の投薬時刻をくん蒸開始とした）。その結果を Table 3 に示す。

グラナリアコクゾウの卵は約 97～99% の高い殺虫率を示し、コクゾウムシの卵は約 55～65% の殺虫率であったが、投薬順序の違いによる傾向はみられなかった。いずれの殺虫率も Table 2 の結果に比べ低くなったが、卵に対する殺虫効果は主に PH によるものと考えられ、PH の毒性が虫体の酸素消費量と密接に関係していることを考えると卵の発育状態が関係しているのかもしれない。コクゾウムシの幼虫はすべての試験区で 100% の殺虫率となった。この結果は一部 Table 2 と異なるものであるが、この原因については不明である。これに対しグラナリアコクゾウの幼虫、蛹及びコクゾウムシの蛹は、PH を先に投薬するよりも SF を先に投薬した場合で殺虫率が高く、SF 投薬後 1 時間あけて PH を投薬することによりいずれも 100% の殺虫率を得ることができた。このことから、コクゾウムシ類の幼虫、蛹に対しても PH による呼吸抑制作用が働き、SF の殺虫効果を阻害している可能性が高い。

本試験の結果、PH、SF 混合くん蒸においては、PH よりも先に SF を投薬することが幼虫及び蛹の殺虫効果に対して重要であると考えられた。

4. PH の投薬所要時間の異なる PH、SF 混合くん蒸

PH の投薬所要時間の差による殺虫効果を確認するため、所定量 (2 mg/l) の PH を 1 度に投薬する区、4 回に分けて投薬する区、そして、10 回に分けて投薬する

Table 3. Mortalities of *S. granarius* and *S. zeamais* fumigated with mixture gas of phosphine 2 mg/l and sulfuryl fluoride 30 mg/l for 24 hours at 15°C.

Species	Stage	<i>n</i> ¹⁾	Mortality (%±S.D.)		
			PH>SF ²⁾	PH/SF ³⁾	SF>PH ⁴⁾
<i>S. granarius</i>	Egg	1,035	97.1± 1.3	99.4±0.5	98.3± 2.3
	Larva	951	99.7± 0.5	100	100
	Pupa	1,699	78.1± 3.1	99.6±0.8	100
<i>S. zeamais</i>	Egg	1,899	61.1±10.3	54.8±4.3	65.1±12.1
	Larva	1,704	100	100	100
	Pupa	1,326	87.2± 5.6	99.5±0.8	100

¹⁾ Total number of insects tested in three replicates.

²⁾ Sulfuryl fluoride was injected into the bottle at 60 minutes after injection of phosphine.

³⁾ After injection of phosphine, sulfuryl fluoride was injected into the bottle immediately.

⁴⁾ Phosphine was injected into the bottle at 60 minutes after injection of sulfuryl fluoride.

区を設定した。PH の投薬を分けた区（4 回投薬区、10 回投薬区）は、投薬と投薬の間隔を 30 分開け、最初にガスを投薬した時をくん蒸開始時刻とした。したがって、4 回投薬区では投薬開始から終了まで 1 時間 30 分、10 回投薬区では 4 時間 30 分かかった。PH、SF 混合くん蒸の場合、最初に PH を投薬した直後に所定量の SF を投薬した。その結果を Table 4 に示す。

PH 単独くん蒸の殺虫効果をみると、幼虫は両種とも 99.5% 以上の殺虫率を示し、蛹はグラナリアコクゾウで約 22~35%、コクゾウムシで約 68~74% の殺虫率であり、投薬区による差は認められなかった。PH、SF 混合くん蒸をみると、両種の幼虫はいずれの投薬方法によっても 100% の殺虫率であったが、蛹では 4 回及び 10 回投薬区で 100% の殺虫率となったものの 1 回投薬区で 100% とならなかった。このことは、徐々に PH 濃度を上昇させることにより PH の呼吸抑制作用の発現が遅れ、その間に SF が虫体に取り込まれ殺虫効果が発揮されたことを示唆している。

本試験の結果、PH 単独くん蒸においては一度に投薬

するか、時間をかけて投薬するかはあまり重要でないが、PH、SF 混合くん蒸においては、一度に PH を投薬するよりもある程度時間をかけて投薬することが有効と考えられた。

以上の結果、SF はコクゾウムシ類の幼虫及び蛹に対して高い殺虫効果を持つものの、卵に対する殺虫効果は低くこれを完全殺虫することは困難と考えられた。PH、SF 混合くん蒸は、コクゾウムシ類の幼虫、蛹に対して高い殺虫効果を示した。ただ、卵に対しては、殺虫効果がばらついた。これは、24 時間という条件では PH の殺虫効果が十分発揮されなかったためと思われる。また、混合くん蒸においては両薬剤の投薬順序、PH の投薬方法が殺虫効果に影響することが確認された。すなわち、コクゾウムシ類の幼虫及び蛹に対しては、PH を先に投薬した場合その呼吸抑制作用が虫体への SF の取込を阻害して殺虫効果を低下させるため、SF を投薬しある程度の時間をおいて PH を投薬するか、時間をかけて PH を投薬することが効果的であると考ええる。PH、SF 混合くん蒸は、開発された庫外投薬機を利用することに

Table 4. Mortalities of *S. granarius* and *S. zeamais* fumigated with phosphine and mixture gas of phosphine and sulfuryl fluoride for 24 hours at 15°C.

Species	Stage	<i>n</i> ¹⁾	Mortality (%±S.D.)					
			PH ₃ 2 mg/l			PH ₃ 2 mg/l+SO ₂ F ₂ 30 mg/l ²⁾		
			1 ³⁾	4 ⁴⁾	10 ⁵⁾	1 ³⁾	4 ⁴⁾	10 ⁵⁾
<i>S. granarius</i>	Larva	3,692	99.8± 0.3	99.7±0.3	99.8±0.3	100	100	100
	Pupa	5,664	22.5±10.9	22.9±7.5	35.0±8.8	99.6±0.8	100	100
<i>S. zeamais</i>	Larva	3,309	99.8± 0.4	99.6±0.7	99.9±0.2	100	100	100
	Pupa	4,674	73.9± 2.1	70.8±1.3	68.1±6.5	99.9±0.2	100	100

¹⁾ Total number of insects tested in three replicates excluding larval stage of *S. zeamais* in mixture gas fumigation, and that of larval stage of *S. zeamais* in two replicates.

²⁾ After the first injection of phosphine, sulfuryl fluoride was injected into the bottle immediately.

³⁾ 2 mg/l of phosphine gas was injected into the bottle at once.

⁴⁾ 0.5 mg/l of phosphine gas was injected four times at half-hour intervals.

⁵⁾ 0.2 mg/l of phosphine gas was injected ten times at half-hour intervals.

よりコクゾウムシ類を完全に殺虫できる可能性のあることが示唆され、穀類に対する臭化メチル代替消毒技術として期待される。今後、本くん蒸方法を実用化するには、薬剤の投薬方法に留意し、48 時間以上の条件で殺虫効果を確認する必要があると考える。

引用文献

- BOND, E. J. and H. A. U. MONRO (1967) The role of oxygen in the toxicity of fumigation to insects. *J. Stored Prod. Res.* 3: 295–310.
- BOND, E. J., J. R. ROBINSON and C. T. BUCKLAND (1969) The toxic action of phosphine. *J. Stored Prod. Res.* 5: 289–298.
- MIZOBUCHI, M., I. MATSUOKA, Y. SOMA, H. KISHINO, S. YABUTA, M. IMAMURA, T. MIZUNO, Y. HIROSE and F. KAWAKAMI (1996) Susceptibility of forest insect pests to sulfuryl fluoride. 2. Ambrosia beetles. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan* 32: 77–82.
- 森 武雄・池上雍春・楯谷昭夫 (1969) 燐化水素に対するコクゾウムシの感受性. 植防研報 7: 67–69.
- 森 武雄・川本 登 (1966) 燐化アルミニウム剤の性状と効果に関する研究. 植防研報 3: 24–35.
- 中北 宏 (1987) 貯穀害虫くん蒸剤ホスフィンの作用機構に関する研究. 日本農薬学会誌 12: 299–309.
- 相馬幸博・内藤浩光・三角 隆・川上房男 (1999) フッ化スルフリル・臭化メチル混合ガスくん蒸による木材害虫の殺虫効果. 植防研報 35: 15–19.
- 相馬幸博・溝渕三必・扇田哲男・三角 隆・岸野秀昭・赤川敏幸・川上房男 (1997) 木材害虫のフッ化スルフリル感受性に関する試験. 3. 25℃ における感受性. 植防研報 33: 25–30.
- SOMA, Y., S. YABUTA, M. MIZOBUCHI, H. KISHINO, I. MATSUOKA, M. GOTO, T. AKAGAWA, T. IKEDA and F. KAWAKAMI (1996) Susceptibility to forest insect pests to sulfuryl fluoride. 1. Wood borers and bark beetles. *Res. Bull. Pl. Prot. Japan* 32: 69–76.
- 楯谷昭夫 (1993) くん蒸剤としての臭化メチルの使用及びオゾン層の保護. 植物防疫 47: 193–195.