

みんなくりポジトリ

国立民族学博物館 学術情報リポジトリ National Museum of Ethnology

大型民族学資料の虫害防除法： 加温空気を用いたオン・サイト殺虫法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2010-02-16 キーワード (Ja): キーワード (En): heated air heat treatment pest control museum pests large-size ethnographic objects 作成者: 森田, 恒之, 園田, 直子, 日高, 真吾 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15021/00004014

大型民族学資料の虫害防除法 —加温空気を用いたオン・サイト殺虫法—

森田 恒之*・園田 直子**・日高 真吾***

On Site Heat Treatment for Large-size Ethnographic Objects

Tsuneyuki Morita, Naoko Sonoda, Shingo Hidaka

文化財の殺虫処理に用いられてきた臭化メチル製剤は、オゾン層破壊物質として規制が強化され、2005年以降は実質的に使用できなくなる。このような状況のなか、国立民族学博物館では、展示中の木造漁船に虫害が発生したことを契機とし、展示場から移動不可能な大型民族学資料を対象とした抜本的な解決法を研究開発する必要にせまられた。

そこで、共同研究の成果として開発したのが、加温空気によるオン・サイト殺虫処理である。この方法は、特別な処理施設を必要とせず、電源さえ確保できればどこでも実施可能である。装置は、発砲スチロール製のパネルを組み合わせた断熱箱、送風パイプ、熱風発生機で構成され、容易に移動あるいは保管できる。熱風発生機と断熱箱の間だけで加温空気を循環させる方式を採用したので、箱外部の温度や湿度には影響を与えない。また、処理の対象とする資料を、前もって気密シートで密封することで、木材からの放湿による変形をほとんど無視することができる。供試虫を使用した実験から、設定温度が一定時間維持できれば、100%の殺虫効果が得られることが明らかになった。

加温空気によるオン・サイト殺虫処理の最終実験は、2003年3月、展示場の木造漁船を対象に実施した。現在のところ、虫害の再発は認められていない。

Methyl bromide gas or mixtures containing it have been widely used as pest control fumigants on cultural properties in Japan. However, the application of this chemical must be strictly controlled after 2005, because of its

* 国立民族学博物館名誉教授

** 国立民族学博物館博物館民族学研究部

*** 国立民族学博物館民族学研究開発センター

Key words : heated air, heat treatment, pest control, museum pests, large-size ethnographic objects

キーワード : 加温空気, 高温処理, 虫害対策, 文化財害虫, 大型民族学資料

depletive effect on the ozone layer, specified in the Montreal Convention.

The National Museum of Ethnology has developed, to meet such strict controls, a thermal treatment system, applicable to large-size ethnographic objects displayed in an exhibition hall. The system is composed of three parts: a thermal isolation container with polystyrene foam panels, a heat generator, and connecting pipes. This system can be used anywhere where there is a power supply, and can be easily moved or stored. Hot air at about 70°C circulates inside a closed space, composed of a container and a generator with connecting pipes, so that the temperature and the relative humidity of the exhibition hall are not affected. The object to be treated is perfectly sealed in an air barrier plastic sheet prior to the heat treatment, and in this way there is no free space to evaporate moisture from the object, so the risk of deformation due to water loss is negligible. When a sufficient temperature has been maintained for a suitable time, 100% pest mortality can be expected. The first application of this “on site heat treatment for large-size ethnographic objects” was made on an Indian fishing boat in an exhibition hall of the National Museum of Ethnology, in March 2003.

1 はじめに	3.1 船のつり上げ
1.1 本研究の背景	3.2 船の包み込みと脱気
1.2 殺虫処理法の選択	3.3 断熱箱の組立, パイプの接続
2 加温空気を用いたオン・サイト殺虫処理装置の開発	3.4 温湿度のモニタリング
2.1 概略	3.5 断熱箱の加温, 加温停止, 自然冷却
2.2 断熱箱	4 殺虫処理実験の結果
2.3 パイプおよび接続部分	4.1 殺虫処理実験中の温度・湿度の変化
2.4 熱風発生機	4.1.1 温度・湿度変化の概要
2.5 気密シート	4.1.2 多点温度計による記録の統計学的解析
3 大型民族学資料(テッパ船)の殺虫処理実験	4.2 供試虫による判定
	5 おわりに

1 はじめに

1.1 本研究の背景

これまで文化財の虫害から守るために、さまざまな化学物質が使われてきた。古くは、青酸ガス、ホルムアルデヒド（ホルマリンガス）、クロルピクリン、リン化アルミニウム等が使われた。日本では、1950年代から臭化メチル単体ガスを、1975年頃からは臭化メチルと酸化エチレンの混合ガスを広く使用している。

現在進行している虫害の駆除にはガス燻蒸が一番有効であるが、あくまでも一過性の処置であり残効性はない。酸化エチレンは、強力な殺菌力があり医療機材の消毒にも広く使われているが、臨界濃度以上になると爆発するおそれがあるうえに、近年は発ガン性を有する疑いが指摘されている。一方、臭化メチルはオゾン層破壊物質として規制の対象にあげられている。日本を含む先進国における臭化メチルの生産等の規制スケジュールは、1997年のモントリオール議定書第9回締約国会議において、2009年末全廃から2004年末全廃へと前倒しに強化され、2005年以降は実質的に使用できなくなる。国立民族学博物館ではこうした規制を予測して1980年代初めから有害ガスを使用しない虫害防除法の開発を手がけてきた（Morita et al. 1987）。

このような状況のなか、国の内外で代替物質もしくは化学薬品を用いない方法の開発が進められている。文化財の虫害対策では、処理をおこなう人間に与える影響だけでなく、文化財自体に与える影響をもあわせて考慮しなければならない。環境保全や自然保護の問題もあり、周囲の環境に対する影響も重要な検討事項となる。なお、本論文では、単独の化合物を使用した場合は「化学物質」、複数の化学物質を混合し扱いやすく加工したものを「化学製剤」、上記2つを総称して「化学薬品」と記す。

国立民族学博物館においても虫害対策が問われていた矢先、展示中の大型漁船に虫害が発生した。数年前までであれば、大型資料を密封してガス燻蒸するという選択肢がありえたが、現時点では、2005年以降を念頭に、化学薬品を用いないでおこなえる解決方法を開発しておかなければならない。そこで、平成13年度に共同研究「不活性気体を利用した大型民族学資料の虫害防除法の開発」（代表者 森田恒之）、平成14-15年度に共同研究「国立民族学博物館所蔵資料の保存対策」（代表者 園田直子）を組織し、展示場から移動不可能な大型の民族学資料を対象として、抜本的な解決方法を検討した。この2つの共同研究の参加者は次のとおりである。なお、氏名の後に記した所属は平成15年度現在のものである。

森田恒之（本館名誉教授）、園田直子、日高真吾（本館）
 木川りか（独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所）
 斉藤明子（千葉県立中央博物館）
 伊達仁美（京都造形芸術大学）
 木村広、後出秀聡（(株)液化炭酸）

共同研究を通じて開発した「加温空気を用いたオン・サイト殺虫法」の実験概要は、共同研究者の連名で、すでに2003年6月の文化財保存修復学会第25回大会で発表している（森田ほか2003）。しかしながら、装置の構造、熱風発生機の選択条件、温度・湿度モニタリングの方法および測定結果の分析については未発表であったため、ここにその詳細をまとめる。

1.2 殺虫処理法の選択

虫害の被害を受けたのは、南アジア展示場に展示中のテッパ船（H163254）（写真1）である。インド、オリッサ州プーリー市で使用されていた漁船で、1989年、アンダマンニコバル諸島ポートブレア市で収集されたものである。1996年11月、第7展示棟の一般公開時から展示されている。ヒラタキクイムシの被害が見受けられたため、数回にわたり常温蒸散性のピレスロイド系薬剤（住化ライフテック社ブンガノンVA）を噴霧したが、完全に虫害を止めるにはいたらなかった。2001年夏、再び虫害が発生し、船体を構成する大きな三本の角材の数十か所に虫穴があき、その周辺に虫粉がおちる状態となった。

マストを倒したテッパ船の大きさは、長さ約8m、幅約1.75m、高さ約0.75mである。このような大型資料を殺虫処理するにあたっては、以下の3条件を満足させることが必要と考えた。

- (a) 大型資料を展示場から外にださずに処置を施す
- (b) 観覧者および他の展示資料に対する安全性を確保する
- (c) 短期間（できれば土・日を除いた5日以内）で処置が終了する

以上をもとに、化学薬品をまったく用いない方法を選択することとし、まず国内外で現在開発されている主要な殺虫法を比較検討した。化学薬品を用いない方法は、低酸素濃度処理、二酸化炭素処理、温度処理の3種類に大別できる。

低酸素濃度処理は、空気を遮断するフィルムで資料を密閉し、酸欠状態をつくることで殺虫する方法である。小型の資料では、脱酸素剤を用いると簡便に酸欠の条件を満たすことができる。中型・大型資料の場合は、窒素やアルゴンなどの不活性ガスで

空気を置換するなどの方法をとる。処理中は処理空間内の酸素濃度を 0.2% 以下に保持する必要がある。周辺温度にもよるが、期間は 1～3 週間程度かかる。文化財全般に適しているが、木材深部の害虫への効果は低い（独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所編 2001）。

二酸化炭素処理は、日本でも民具を対象に使用が始まっている（日高 2002a, 2003）。二酸化炭素濃度 60～70%（すなわち空気 30～40%）で実施する。低酸素濃度処理と比較すると酸素濃度をそれほど低く保持しないのでよいため、殺虫処理の環境を実現しやすい利点がある。周辺温度にもよるが、期間は 2 週間程度必要である。なお、カミキリムシなど一部の木材害虫には十分な殺虫効果が得られないことが報告されている（日高 2002b）。二酸化炭素処理に関しては、当初、封入したガスを 40℃ まで上げて処理期間を短縮することを検討したが、予備実験の過程で、乾燥した二酸化炭素は温度上昇にともない対象資料からの急激な水分の放出をうながし、割裂などの重大な損傷を誘発する危険が認められたので、実用化試験の対象候補から外した。

比較的短時間で殺虫効果があり、かつ化学薬品を使用しないでおこなうことができる安全性の高い方法として、国外とくに欧米において既に数多くの文献や実施報告が発表されているのが、高温処理（Strang 1992, 1995, 2001; Xavier-Rowe et al. 2000）と低温処理（Berkouwer 1994; Berry 2001; Florian 1986, 1987, 1990; Gilberg 1991; Griffin 2001; Nesheim 1984; Strang 1992, 1994, 2001, n.d.）である。高温処理は、対象となる資料を数時間から 1 日程度、50～60℃ に保つことで殺虫する方法である。低温処理では、資料を -20～-40℃ の環境に一定期間（-30℃ で 5 日間、-20℃ で 2 週間程度）おくことによって殺虫する（独立行政法人文化財研究所東京文化財研究所編 2001）。

上記 (a), (b), (c) の条件をみだし、かつ今回処理の対象となるのが大型の木造資料であることを考えあわせ、最終的には、高温処理に焦点をしばった。共同研究の分担者とともに半年にわたり、処置条件の設定、そして、大型資料を処置する装置の開発をおこなった。2002 年 1 月、テッパ船と等容積になる木材を用いて大規模な予備実験をおこなった後、同年 3 月、展示場内においてテッパ船の殺虫処理実験をおこなった。そのときの反省をふまえてさらなる改善をおこない、2003 年 3 月、再実験をおこなった。

2 加温空気を用いたオン・サイト殺虫処理装置の開発

2.1 概略

加温空気による殺虫処理をおこなうために、図1にしめすような装置を考案した。この装置は、気密性のあるシートでつつみこんだ資料の周辺をおおう断熱箱、移動可能な熱風発生機、断熱箱と熱風発生機を接続する往復2系統のパイプおよび備品で構成されている。断熱箱上部に接続したパイプから送りこまれる加温空気は、箱側面のパイプをとおって再び熱風発生機にもどる循環システムになっている。使用した機材を表1にまとめる。

2.2 断熱箱

今回処理の対象となる船のために、外寸で全長930 cm、幅240 cm、高さ134.5 cmの断熱箱を作成した。図2に示すように、箱の上方および両側面はそれぞれ9枚のパネルで構成されている。各パネルは、厚さ5.5 mmの合板に50 mmの発泡スチロールを

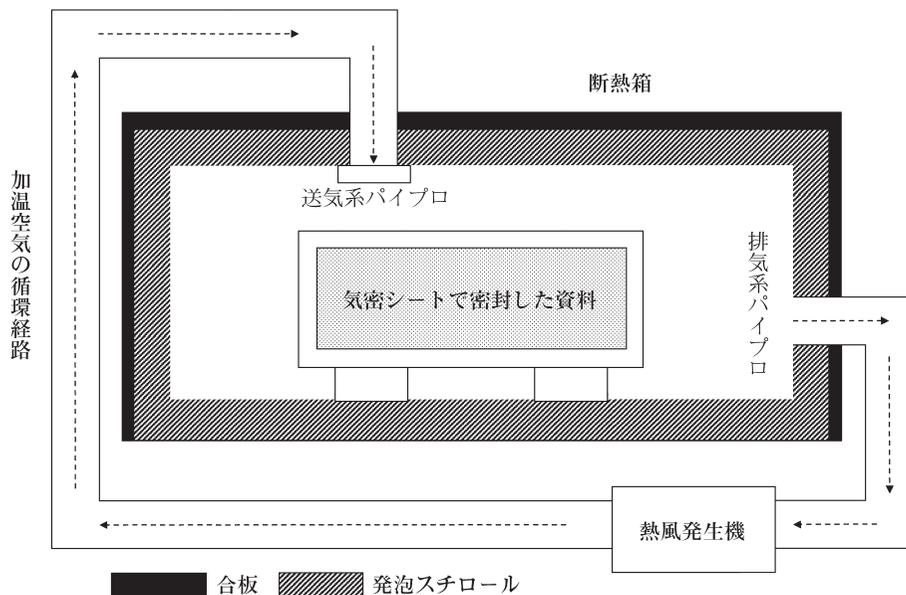


図1 加温空気殺虫処理装置の概略図

はりつけたものである。合板と発泡スチロールの重ねあわせる位置を少しずつずらしておくことで、横に並べたパネルが倒れにくい工夫をしている。パネルを箱型に組み立てながら広幅の粘着テープで固定し、さらに金属製の補強枠で全体を安定させるようにした。

床面も、天井と両側壁と同様、発泡スチロールを長さ方向に9列並べている。発泡スチロールの横幅にあわせて1列は複数枚で構成されているが、敷き詰めて使用するので、ずれる心配はない。床面のため補強の合板は貼り付けていないが、発泡スチロールは厚さ 80 mm のものを使用している。

表1 加温空気による殺虫処理で使用した機材

断熱箱 (大藤工務店)	
外寸 930 cm(全長) × 240 cm(幅) × 134.5 cm(高さ)	} 1式
合板ベニア 厚さ 5.5 mm	
発泡スチロール 厚さ 50 mm	
(底は合板ベニアがないので、厚さ 80 mm)	
金枠	10
熱風発生機 (竹網製作所)	
TSK-100 (電気容量 45 kW, 風量 32 m ³ /min)	1
TSK-60 (電気容量 15 kW, 風量 15 m ³ /min)	1
配管関係 (竹網製作所)	
特注 4 分岐管	1
断熱フレキホース 内外アルミ WA125 (4 m 定尺)	7
ホースバンド B125	14
ホースバンド B175	14
エンドキャップ HE125	14
吐出口ディフューザ ODZ125	6
プッシュカバー PKZ125	6
合フランジ FD200	2
フランジパッキン P200	2
ホースバンド B200	6
アルミフレキホース AF200 (4 m 定尺)	1
Y 管 Y200	1
合フランジ FD125	1
フランジパッキン P125	1
気密シート	
バリアークロスシート (藤森工業製)	1
厚さ 0.25 mm	
大きさ 6 × 10 m	
パレット 100 cm(長さ) × 89 cm(幅) × 12 cm(高さ)	2

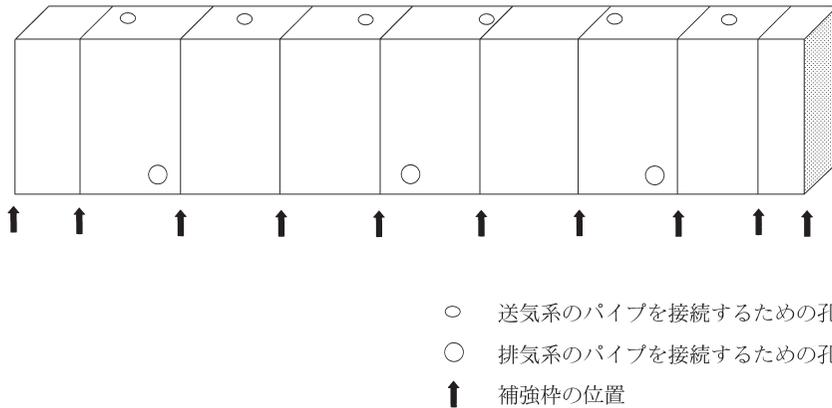


図2 大型漁船の殺虫処理のために製作した断熱箱

箱の入り口とその対面は、それぞれ1枚のパネルである。他のパネルと同様、厚さ5.5 mmの合板に50 mmの発泡スチロールを貼り付けたものである。

断熱箱には、側壁3か所、天井面6か所に熱風発生機と接続するパイプ用の孔を開けておいた。天井面は、熱風発生機から加温空気を送り込む送気系、側壁は箱内の空気を熱風発生機に還流する排気系用である。

2.3 パイプおよび接続部分

断熱箱に加温空気を送風する送気系のパイプには、熱の損失をできる限り防ぐために、間に断熱材のつまった二重のアルミ管を用いた。2.4に述べるように熱風発生機は大型と小型の2種類を使用した。6本の送気系パイプのうち、4本は大型の熱風発生機に、2本は小型の熱風発生機に接続するために特注の4分岐管とY管を用いた。箱内の温度分布をなるべく均一にするため、送風口には空気の拡散を目的としたディフューザーを装着した。

断熱箱の空気を熱風発生機に還流するために、3本の排気系パイプを用意した。小型の熱風発生機と接続する1系統のパイプは送風用と同一のもの、大型と接続する2系統は断熱材の封入がない、やや大口径のパイプを使用した。後者は、ウレタン布等を巻き付けて断熱を補った。

2.4 熱風発生機

上記のような大型の断熱箱に加温空気を送り込み、かつ効果的に内部を加温させる

には、まず、処理のための熱量と送風量を算出する必要がある。算出結果を満たす機能を具えた熱風発生機を準備しなければならない。

熱量の算出は、炉材（発泡スチロール）の放散熱量、炉材壁面に蓄えられる壁蓄熱量、処置の対象となる船に吸収される熱量（ワーク吸収熱量）、配管放熱、配管圧損、分岐管放熱などを考慮した。余裕率として、この結果を1.2倍した¹⁾。

送風量は、事前におこなった小規模実験の結果をもとに、1分あたり断熱箱体積の最低1.5倍と設定した²⁾。

以上のことから、本件で実施したテッパ船の殺虫処理では、熱量は約21 kW、送風量は約50 m³/minとした。また、これらの熱量と送風量を確保するため、実際に用いる熱風発生機は電気容量15 kW、風量15 m³/min（竹綱製作所製TSK60）および電気容量45 kW、風量32 m³/min（竹綱製作所製TSK100）の2つを同時に使用した。

2.5 気密シート

資料を包み込むシートは、空気および水蒸気を遮断できなければならない。さらに、何らかの方法でシートを完全密閉した袋状に加工できることが必要である。

そこで、ガス燻蒸用の気密シート（藤森工業製バリヤークロスシート）を用いた。この気密シートはポリエチレン、ポリエチレン延伸糸織布、ポリエチレン、エチレン・ビニルアルコール共重合樹脂、ポリエチレンの積層構造になっている。両外側がポリエチレン層なので、簡単に熱圧着で密閉することができる。ポリエチレン延伸糸織布は全体の強度を高める働きをし、内側のポリエチレンは密着性を与える。エチレン・ビニルアルコール共重合樹脂により、ガスバリアー性が付加されている。シートの厚さは約0.25 mm、引張強度は5 cm幅で70 kg、引張伸度は5 cm幅で10%、酸素透過度2.0 cc/m²/day、二酸化炭酸透過度4.0 cc/m²/day、耐熱性70～80℃という特徴をもつ³⁾。

3 大型民族学資料（テッパ船）の殺虫処理実験

3.1 船のつり上げ

船底と断熱箱の床面との間に十分な空間を確保し、加温空気の循環を妨げないようにしなければ、船底の温度が上昇せず、殺虫効果が得られない。そこで、重機を用いて船のつり上げ作業をおこなった。

作業前に、展示場床面を保護するための養生シートを敷いた（写真2）。船底を、断熱箱の床面より20 cm 釣り上げ（写真3）、気密シートを敷いたパレットに設置した（写真4）。

3.2 船の包み込みと脱気

残りの気密シートを船の上にかぶせて全体を覆う（写真5）。シートの端部を熱圧着しながら、船全体を密封する（写真6）。端部を約10 cm 程度残して、電気掃除機のノズルの先端を袋状にしたシート内に差しこみ、内部の空気を十分に吸引した。その後、袋内に空気が戻らないよう注意しながら、開口部も熱圧着した。

なお、船体の封入に先立ち、気密シート内の温湿度モニタリング用の機器類ならびに効果測定用の供試虫を所定か所に配置した。

3.3 断熱箱の組み立て、パイプの接続

気密シートで密閉された船の周囲を、前記の断熱箱用部材で囲んで断熱箱を組み立て（写真7,8）、さらに金属製の補強枠で全体を固定した。入り口を封鎖する前に箱内の温湿度モニタリング用の機器類を配置した。

断熱箱と2台の熱風発生機の間には、送気および排気系のパイプを接続し、ひとつの循環システムとした（写真9）。

3.4 温湿度のモニタリング

温度および湿度モニタリング用に使用した機器を表2にまとめた。

断熱箱および密閉した気密シート内部の温度変化をリアルタイムで観測し、手動による温度制御の容易をはかるために、サーミスタ式多点温度計（宝工業製サーミスタ多点温度計K721）を利用した。センサー部は、サーミスタを径3 mm、長さ30 mmの金属管で包んだものを、長さ3.5 mのコードで中継機を介して、計測器本体に接続した。中継器は約1 mの間隔で2台を直列に使用し、それぞれ20点ずつ測定点を分担した。中継器と本体間の距離は10 mである（図3）。

センサーは、測定範囲 -5°C から 100°C のものを使用した。この装置は60点以内のセンサーを接続して、1分以上24時間までの任意の間隔で温度を測定し表示するとともに印字することができる。なお、表示のみは任意の時刻にも可能である。製造から20年以上を経過した旧式の装置であるが、近年のデータロガーと比較するとセンサー部（保護部を含む）が小さく、かつデータを瞬時に直読できる利点がある。



写真1 南アジア展示場での大型漁船 (H163254)



写真2 殺虫処理に先立ち、マストをおろした状態の大型漁船。下にあるのは養生シート。

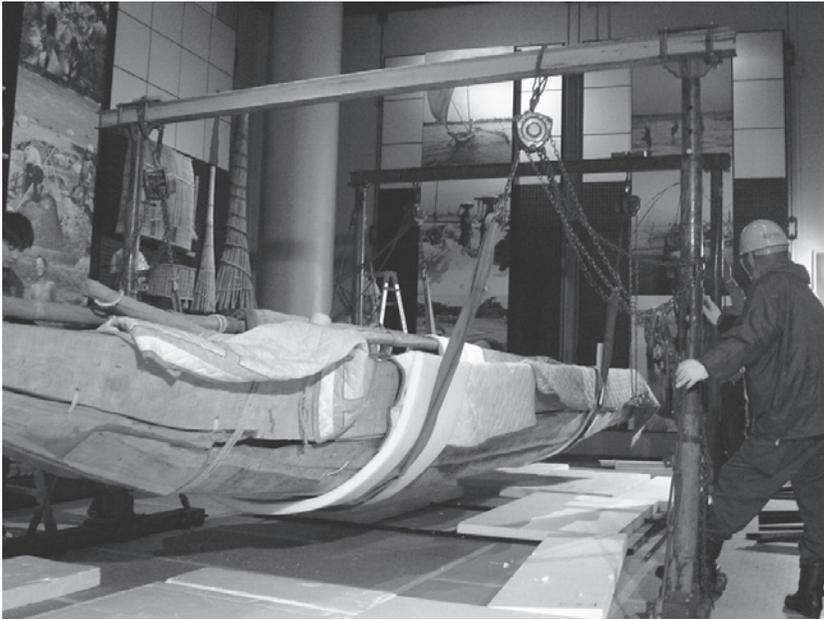


写真3 船を持ち上げ、下に断熱効果のある発泡スチロール板をならべる。



写真4 発泡スチロール板の上に、パレット、気密シートを敷いた後、船をおろす。

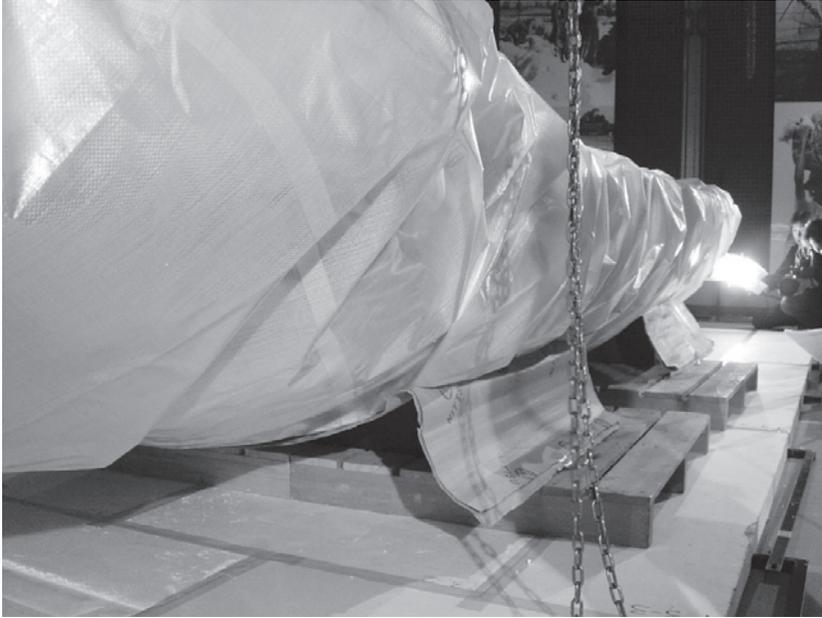


写真5 気密シートで覆われた船。



写真6 気密シートの端部をヒートシーラーでシールする。



写真7 船の周囲に発泡スチロール板を並べ、断熱箱をくみだてる。気密シート内は、すでに脱気してある。



写真8 組み立てた断熱箱の内部。これから、温度モニタリング用の機材を設置する。



写真9 加温空気による殺虫処理装置の全容。

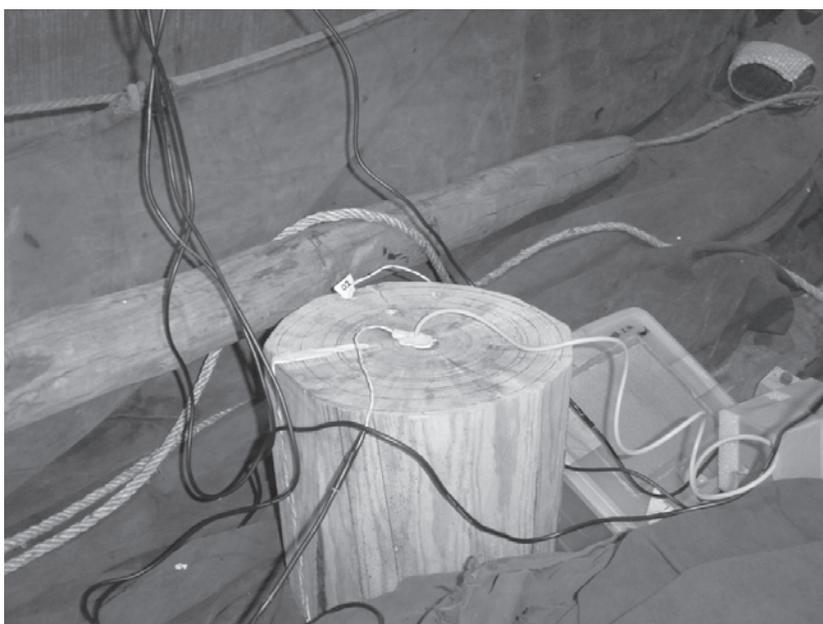


写真10 温度センサーおよびデータロガーをうめこんだ試験用杉丸太。

表2 温湿度モニタリング用の機器

サーミスタ式多点温度計 K721 (宝工業製)	1 式
無線機能付データロガー (VERITEQ 社製)	
データロガー SP-2000-RF	6
ロガー接続子機 RF-WLS-24	6
フラットケーブル	6
PC 接続親機 RF-WBS-24	1
無線機能なしデータロガー (テイアンドデイ社製)	
Thermo Recorder おんどとり RH	8

中継機は、仕様では 100°C 以下では十分に耐熱性があることになっているが、万が一の誤作動を避けるために発泡スチロールの箱で包んで保護をした。計測部本体は断熱箱の外に設置し、データをいつでも見られるようにした。

センサーは、試験用杉丸太内部に 3 点、断熱箱内部に 30 点、密閉袋内に 5 点、室温測定用に 1 点の計 39 点である。試験用杉丸太は、船を構成する木材内部の温度を直接測定することができないため使用した。丸太は直径、長さともに約 260 mm である。直径は、船に使われた木材とほぼ等しくした。外周から 130 mm (中央)、60 mm、15 mm の 3 カ所に約 130 mm の深さまで穴をあけ、その中に温度センサーをうめこんでいる (写真 10)。

断熱箱内部のセンサーは、I, II, III, IV, V の各仮想測定面において、断熱箱側壁の上端 (P1) と下端 (P3)、天井中央部 (P2)、左舷船体下部 (P6)、船体の下 (P4) の 5 点に配置したほか、船の右舷側側壁から床 30cm の地点 (P5) 5 点へ釣り下げた (図 4)。さらに密閉した袋内の様子を知るために船首側 2 点、中央部 1 点、船底外側 (中央部) 1 点、試験用杉丸太の外皮面を測定点とした (図 5)。多点温度計は、後述の 2

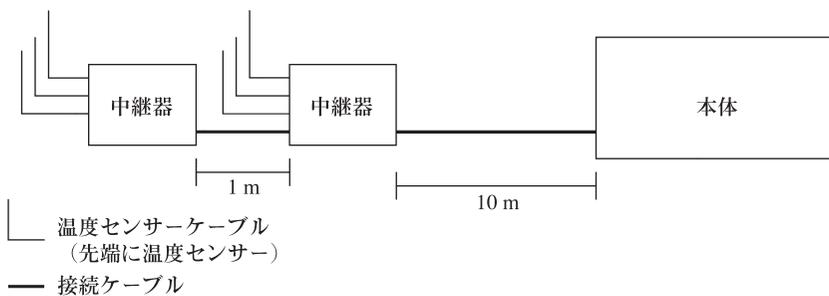


図3 サーミスタ式多点温度計の概略図

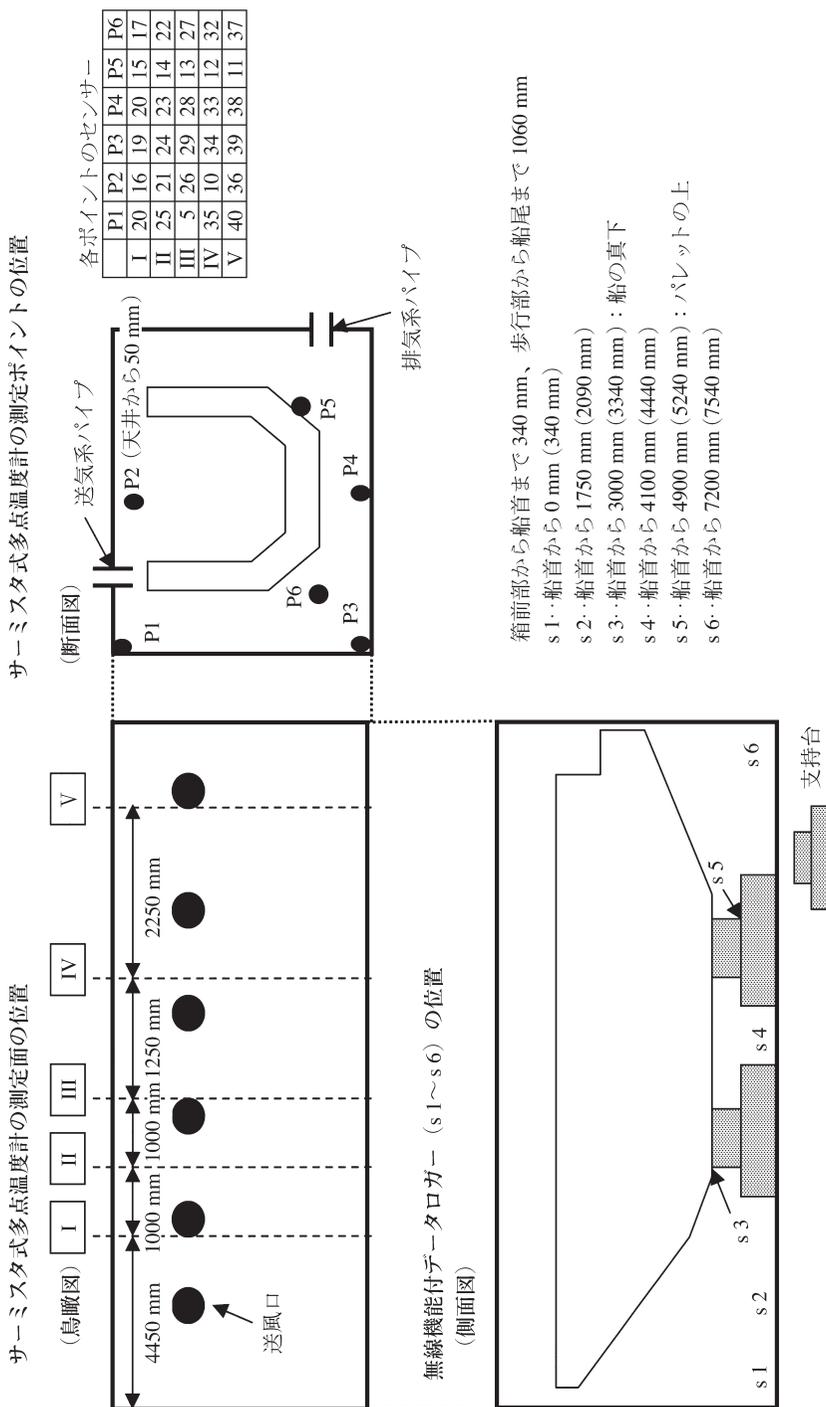


図4 気密シート外の温湿度モニタリングの位置
(サーミスタ式多点温度計, 無線機能付データロガー)

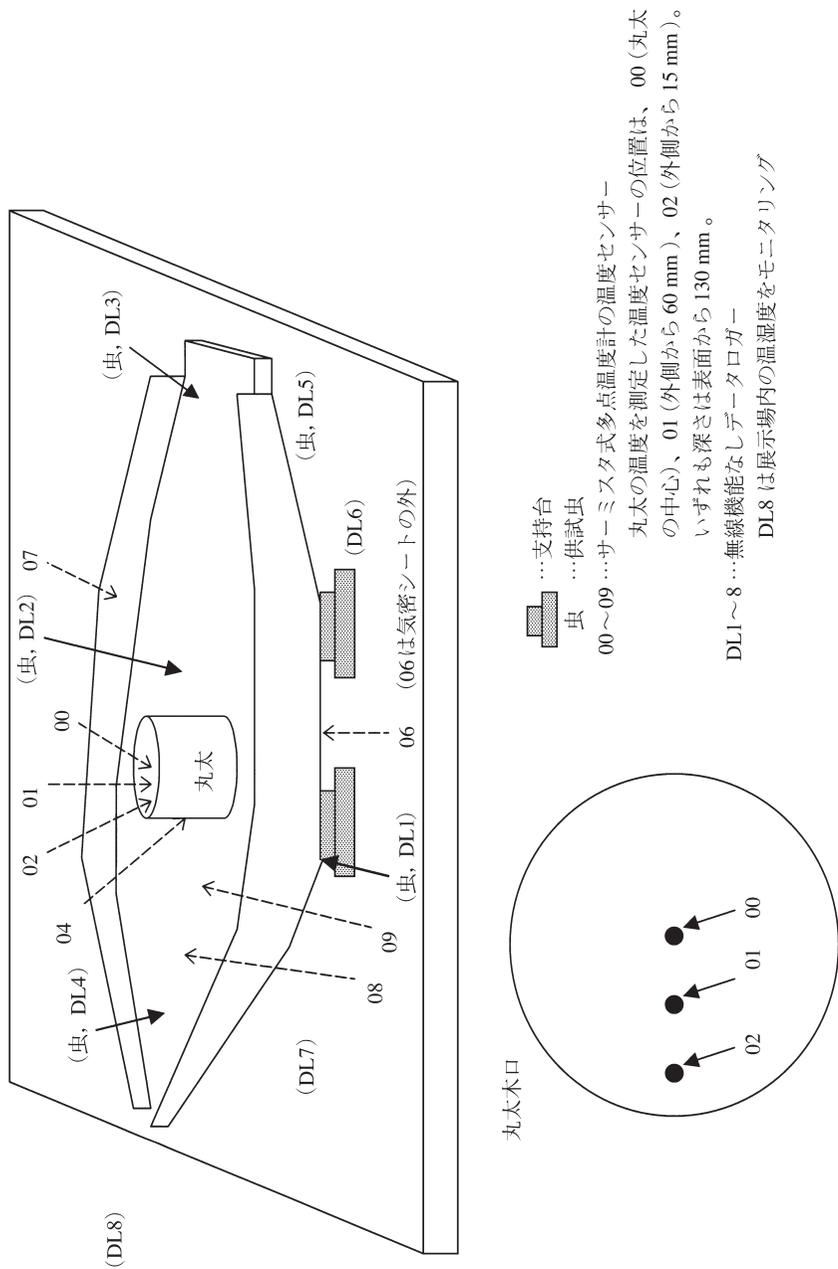


図5 気密シート内の湿度モニタリングの位置 (サーミスタ多点温度計、無線機能なしのデータロガー)

種類のデータロガーで観測したデータ（5分間隔で記憶）との比較を容易にするために利用したが、データ入力負担を考慮し、15分間隔で計測・印字記録をした。電気的な出力装置を備えてはいるが、旧式の装置であるために現代のコンピュータが対応できるインターフェースをもたないので、計数処理用のデータは、印字をもとに手入力に頼った。

多点温度計によるリアルタイムの温度モニタリングと平行して、無線機能付の温湿度データロガー（VERITEQ社製データロガー Spectrum2000RF）を断熱箱内部の床上6点（図4）、無線機能なしのデータロガー（ティアンドデイ社製 Thermo Recorder おんどとり RH）を丸太中央（写真10）、船の内部6点、室内コントロール用（図5）に設置した。

3.5 断熱箱の加温，加温停止，自然冷却

1日目の午後9時，殺虫処理装置の組み立てが終了した。夜間は作業による温度管理ができないため，実質的な加温開始は翌日とし，それまでの間を予熱期間とした。予熱は，最初の30分間に70°Cの温風を送り，その後60°Cの送風を続けた。

2日目の午前9時，加温を開始した。加温空気の温度設定は，実験用杉丸太の中心部分およびサーミスタ式多点温度計で断熱箱内部の温度をモニタリングしながら，送風空気の温度を調整した。木材芯部の温度を，殺虫効果のある50°Cから60°Cに維持するためには，熱風発生機から送り込む空気の温度が少なくとも80°C前後であることが予備実験の結果から明らかになっていた。モニタリング用に設置した丸太の中心温度が50°Cに達したとき，仮想測定面ⅢのP1との温度差が約15°Cであった。そこで，船のどの部分にもコールドスポットが生じないように，断熱箱内に設置されたすべての温度センサーが75°Cに達するまで待つことにした。午後6時に目的を達し，その12時間後に熱風発生機のヒーターを停止するようにタイマーをセットした。

3日目の午前6時に送風が中止した後，断熱箱はすぐには開けずに自然冷却を待った。午前9時，配管をはずし，9時30分より断熱箱を解体した。午前10時に気密シートを開封した。このとき，資料表面にも気密シート内部のいずれにも結露は確認されなかった。前準備のときと同様の方法で資料を持ち上げ，断熱箱を取り除き，展示を復元した。

熱風発生機から送り出される空気の送風温度は，図6の白抜き部分を参照されたい。なお，（）内に前後とあるのは2つある熱風発生機の位置であり，小型（TSK60）が前方，大型（TSK100）が後方となる。

4 殺虫処理実験の結果

4.1 殺虫処理実験中の温度・湿度の変化

4.1.1 温度・湿度変化の概要

サーミスタ式多点温度計，無線機能付データロガー，無線機能なしのデータロガーの記録を総合してみよう。断熱箱内には，天井部に設置した6本の送気系パイプから加温空気が送り込まれているが，ふたつの熱風発生機から送られる風量に差が生じるため，断熱箱上部，船体内部，断熱箱下部，いずれの地点でも，大型熱風発生機に依存する船尾のほうが船首より高い温度を示す傾向がみられた。

温度の推移をみていくと，多くの測定点で，実験第2日目の午前9時頃を境に温度分布の挙動が異なっているのがわかる。この時刻から加温を開始したので変化があつて当然である。そこで多点温度計が記録したデータをもとに統計学的解析（増山1977,1978）をおこない，温度変化の基本パターンの分類，および，温度変化の様子を調べた。その詳細は4.1.2に詳述することとし，ここでは，試験用杉丸太を設置した

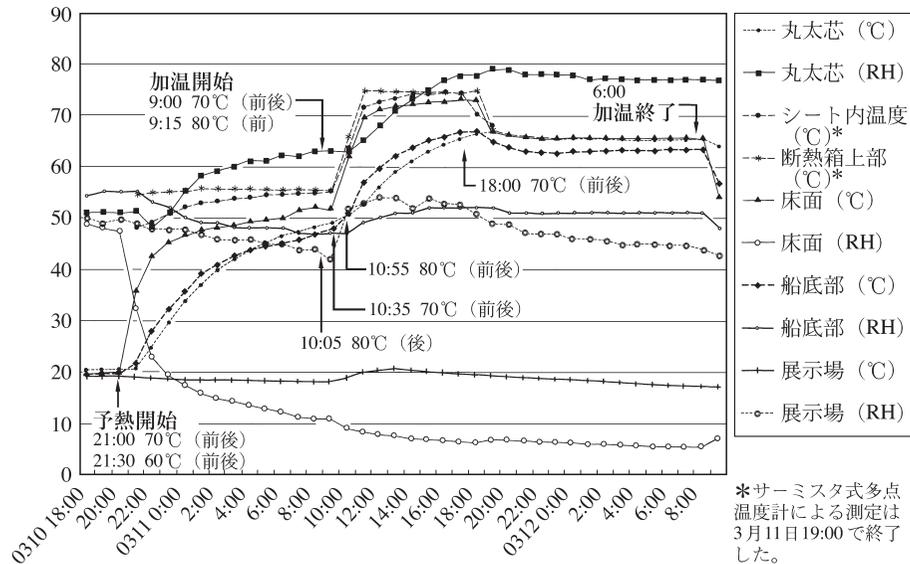


図6 加温空気による殺虫処理：仮想測定面 III における代表的な温湿度の推移

船体中央部、仮想測定面Ⅲにおける温湿度の推移(図6)をもとに、目的とした温度処理の条件はみたされたか、過乾燥は防ぐことができたかの点について検証したい。図6をみると、今回の条件下では、もっとも温度が上昇しにくい木材芯部(試験用杉丸太で測定)でも、21時間以上55°C以上を保っており、殺虫処理の条件は十分に満たしていることが分かる。

湿度に着目しよう。断熱箱内は、温度上昇にともなって過乾燥の状態になる。気密シート内の湿度は緩やかに上昇し、最終的には75%RH前後で安定する。温度上昇にともない、資料中の水分が分散されるが、気密シート内は密閉空間である上に、脱気の効果で内容積が小さくなっており、蒸発した水分はごく短時間で飽和状態に達する。加温処理の際、資料を気密シートで脱気密封しているかぎり、通常懸念される過乾燥はない。実際、処理の前後において、試験用杉丸太の質量に変化は認められなかった。

4.1.2 多点温度計による記録の統計学的解析

データを実験第2日目の午前9時以前(予熱)と以降(加温)の2段階に分けて、それぞれについて測定点相互の温度変化に関する相関係数を求めてみた。2日目の午後7時以降は記録装置に異常が生じたので計算対象から除外したが、すでに自然冷却にはいった段階なので加温の影響を検討する上での実害はない。また計測時間帯にも数回の信号異常が発生したが、ごく短時間で復旧したのでデータ欠損が生じた部分については線形補完によってこれを補った。

予熱と加温それぞれの段階での相関係数(R_x)を表3-1および3-2に示す。 x は予熱(1)、加温(2)の別である。この2つの表をもとに、 $R_x < 0.8$ となる組み合わせを $M_x mn = 1$ 、そうでないものを $M_x mn = 0$ とし、 $M_3 mn = M_1 mn + M_2 mn$ を求めた。ただし、 mn は関係を求める2つの測定点番号である。 $M_3 mn = 2$ の値を表4に示す。 $M_3 mn = 2$ に該当する m 、 n の2つの点の間には、予熱、加温いずれの段階においても相関が少ないことを示している。

そこで $M_3 mn = 2$ に該当する m および n 点の温度変化を改めて抽出し、折れ線グラフ化してみた(図7)。グラフ上では、高い相関を持つ複数の線同志がA、B、Cの3つの群をなしている。したがってA、B、Cの3グループがこの実験における温度変化の基本パターンであると理解できる。各グループの基本的な構成要素はつぎのとおりである。

表4 表3に基づく低相関測定点一覧
X<0.8/PO

	11	15	20	21	25	34	35	36	37	38	39	40
0	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
1	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
2	0	1	0	0	1	1	1	2	1	1	1	1
5	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2
11		2	0	0	2	1	2	2	2	2	2	2
12		1	0	0	1	1	0	2	1	1	1	1
15			2	2	0	1	1	0	0	1	0	1
20				0	2	2	2	2	2	2	2	2
21					2	2	2	2	2	2	2	2
22					1	1	1	2	1	1	1	1

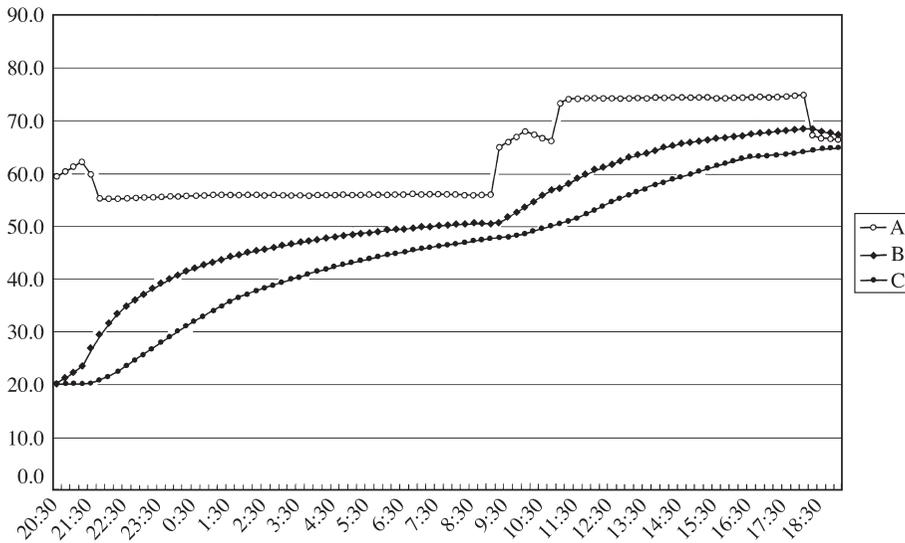


図7 温度変化の三つの基本パターン

表3 多点温度計の測定値に基づく相関係数

3-1 予熱時の相関

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
0	1.0	0.9	0.9	0.9	-0.3	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	-0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	0.8	0.9	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.3	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.1	-0.9		
1		1.0	0.9	0.9	-0.3	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	-0.4	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.3	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.0	-0.9		
2			1.0	0.9	-0.4	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.2	-0.9		
3				1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	1.0	-0.5	-0.2	-0.3	-0.4	0.0	-0.8		
4					-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1	0.3	1.0	-0.2	-0.3	-0.4	0.0	-0.9		
5						-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	0.6	0.1	0.5	-0.5	0.5	0.4	0.1	0.4		
6							1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.2	1.0	-0.4	-0.1	-0.9	
7								1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	-0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	-0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	-0.1	0.1	-0.6	-0.3	-0.5	0.8	-0.2	-0.8		
8									1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	1.0	-0.9		
9										1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	1.0		
10											1.0	0.9	0.9	0.8	-0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.3	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.1	-0.9	
11												1.0	0.9	0.8	-0.4	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	1.0	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.0	-0.9		
12													1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	1.0	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.2	-0.9		
13														0.9	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	0.3	1.0	-0.2	-0.3	-0.4	0.0	-0.8		
14															-0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	-0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.0	0.3	-0.5	0.9	-0.3	-0.3	0.0	-0.8		
15																-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-0.6	-0.6	1.0	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.4	0.6	0.4	0.9	0.8	0.6	0.9	0.8	0.5		
16																	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.9		
17																		1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	-0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	-0.1	0.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8		
18																			1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	-0.3	
19																				1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.1	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	-0.9		
20																					1.0	0.9	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.3	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.1	-0.9		
21																						1.0	0.9	0.9	-0.4	1.0	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.3	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.3	0.0	-0.9		
22																							1.0	0.9	-0.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.2	-0.9	
23																								1.0	-0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.0	0.3	-0.5	-0.2	-0.3	-0.4	0.0	-0.8		
24																									-0.6	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.1	0.3	-0.5	-0.1	-0.3	-0.3	0.0	-0.9		
25																										-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.4	0.6	0.4	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.5		
26																											1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	-0.9		
27																												1.0	0.9	1.0	0.9	-0.1	0.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	-0.8		
28																													1.0	1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	-0.9		
29																														1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	-0.9		
32																															1.0	0.9	0.1	0.2	-0.6	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	-0.9	
33																																0.9	0.0	0.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	-0.9	
34																																	0.2	0.4	-0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.8	
35																																		0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	-0.2	
36																																			0.5	0.7	0.7	0.6	0.7	-0.2	
37																																				0.9	1.0	1.0	0.8	0.4	
38																																						1.0	1.0	1.0	0.1
39																																							1.0	0.9	0.2
40																																								0.9	0.2
41																																									-0.1

*30, 31は欠番である

3-2 加熱時の相関

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41			
0	1.0	1.0	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
1		1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
2			0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6			
3				1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8		
4					1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.4		
5						0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8		
6							1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7		
7								1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.8	
8									1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.6	
9										0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6		
10											1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
11												1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
12													0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6			
13														1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.8		
14															1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8			
15																0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8			
16																	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7		
17																		1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.8		
18																			1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.6		
19																				0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6		
20																					1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
21																						1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4			
22																							0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6		
23																								1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8		
24																									1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8		
25																										1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9		
26																											1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	
27																												1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.8
28																													1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.6	
29																														0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	
32																															0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	
33																																1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	
34																																	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	
35																																		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	
36																																			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9		
37																																					1.0	1.0	1.0	0.8		
38																																						1.0	1.0	0.8		
39																																							1.0	0.8		
40																																								0.8		

*30, 31は欠番である

A : 5, 15, 25, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 (d = 1.40)

B : 2, 12, 22 (d = 0.00)

C : 0, 1, 10, 11, 20, 21 (d = 0.12)

とくに A 群のようにばらつきを持つ多数の線が群をなすグラフを限られた紙面で表示すると大変見にくくなるので、図 7 は便宜的に各群の平均値を利用した。

データ間のばらつきを知るめやすとして、各測定時データの標準偏差をさらに平均した値 (d) をそれぞれの群のうしろのカッコ内に示した。d 値が大きいほどばらつきが大きい。

M₃mn ≠ 2 に相当し、A, B, C いずれの群にも属しにくいものも、B ほどの独立性は示さないが、A, C 両群の間でたがいに平行しあるいは交差したさまざまなパターンで分布している。下記測定点の値は実験途中でセンサーの落下によって正確なデータを得られていない疑いがあるが、大筋において A, C 両群の間にあるようである。

AC 中間群 : 4, 6, 7, 8, 9, 16, 18, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 32, 33

したがって、B と AC 中間群を 1 群とみなしてもよいだろう。

なお、11 ~ 15, 17, 22, 36, 37 の各センサーは断熱箱を解放した時点で、所定位置から床面その他へ落下していたことが確認されている。これらのデータは実験過程のどの時点でセンサーが所定位置から落下したものを確認したうえで再検討を必要があろう。

A 群は、最も高温域にあって、送風機からの温度変化に敏感に反応している。予熱開始の直後から一定の高温を維持し、加温開始とともに送気状態に対応した温度の上下を示している。34 ~ 40 は船尾に近く、船体周囲の空間も十分に確保されているため送りこまれた加温空気がそのままよく流れたと思われる。36, 37 は測定点からのセンサー落下があったにもかかわらず A 群に属するのは、センサーが船を包むシート上や広い空間に浮いたような形で留まったためである。5, 25 の位置は、中央より船首側だが、側壁の上端は障害物がなく、十分な熱対流が得られたと考えられる。舳先が上がった船首部分も先端から船体下に向かって広い空間があることがその理由であろう。15 が A 群に属するのも同様の理由が考えられる。空間的には 15 と左右対称に近い位置にあった 17 も同様の傾向を示した可能性があるが、センサーが断熱材の床面に落下していたために検証は困難である。

C 群は、加温空気からの熱をゆっくりと受け止めながら、もっとも低温域で緩やかな温度上昇を示す。0 と 1 は試験用丸太材の中心に近い 2 点である。10 と 21 はいず

れも箱内部の天井に近く、しかも送風口より高い位置にあった。送りこまれる温風は平たい傘状のディフューザーの助けを借りて送風口から強い力で円錐台状に拡散するために、これらの部分では主対流と別の対流が生まれ、2つの渦の間で熱伝導を繰り返しながら温度が上昇したものと考えられる。その結果、間接的に暖められる木芯部と極めて近いゆっくりとした温度変化を示したものと判断したい。11はA群に属する36～40とほぼ同一平面上の下方に設定してあったが、センサーがシートの折り目の間に落下したために伝熱が阻害されたらしい。このことから微小な空気溜りができるとその部分の伝熱が悪くなることが予想される。20の位置もこのあたりで舳先を包むシートの一部が箱の内側に接近していた個所があり、そのためにコーナー部の対流が十分でなかったようだ。

B群は、A群とC群の中間にあって、温度上昇は緩やかではあるが加温空気からの影響の痕跡もはっきり読み取れる。2は試験用丸太材内部で辺部に近い部分である。この部分がA、C群の中間値を示すのは十分に納得が行く。残る2点、12と22はいずれも船体の下部につるした個所であるが、ともに途中で断熱材の床面に落下したもので情報の信頼性は十分ではない。その他はA、B、Cいずれの群にも属さないが、B群ほどの独立性は示さないままに、A、C両群の中間で、たがいに平行しあるいは交差したさまざまなパターンで分布している。いずれにせよ箱内の温度変化はA、C両群の温度変化の幅に挟まれた範囲にある。この意味でA、C両群に含まれないものをすべてB群とみなしてよさそうである。

A、C両群を代表する温度変化を知るために、各群から1点ずつ測定データを抽出し、計測時ごとの温度の差分を求めてみた。

数列 $T_0 = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ があるとき、 $d(t1)_x = t_{(x+1)} - t_x$ (ただし $x < n$) とする。 $d(t1)_x$ の集合を (T1) とすれば (T1) = $\{d(t1)_1, d(t1)_2, \dots, d(t1)_n\}$ である。さらに $d(t1)_x$ と $d(t1)_{(x+1)}$ の差分 $d(t2)_x$ を求めると、その集合 (T2) は (T2) = $\{d(t2)_1, d(t2)_2, \dots, d(t2)_n\}$ である。同様にして (T3), (T4) を得る。(T1) の各要素が等値もしくはそれに近いとき T_0 は1次式に、(T2) が同じ条件を満たせば T_0 は2次式に、同様に T_n なら T_0 は n 次式に従うことが知られている。しかし n が大きくなると誤差も拡大するので有効なのは $n \leq 3$ 程度までである。(増山 1978)

A群を代表する34については、22時30分から翌朝9時まで、9時から10時15分まで、11時から18時までの3つの時間帯で (T1) の各要素がほぼ近い値を示した。この3つの時間帯ごとに、得られる3つの1次式の回帰線が連続していると考えてよい。22時、9時、10時15分、18時はそれぞれ送風機に操作を加えた時間に一致す

る。10時15分から11時の間は温度調整のため送風機を頻繁に操作しているのだからかなりの乱れが生じているが、その他の時間でも回帰線を挟んだかすかな乱れがみえる。22時30分から翌朝9時まで（予熱）、11時15分から18時まで（加温）の2つの時間帯の実測値と回帰線を図8-1と8-2に示した。回帰式はそれぞれ $y = 0.04x + 53.77$ と $y = 0.02x + 73.0$ である。送り込む加温空気に操作を加えなければ、ほぼ直線的にきわめてゆっくりとした温度上昇を続けることが分かる。

C群からは試験用丸太材の中心に埋めこんだ0を選んだ。この T_0 について差分を見ると、23時から翌日10時までと11時30分から18時過ぎまでの時間帯で（T2）がほぼ同値を示すので、それぞれが独立した2次曲線に従うと予想した。そこで、測定値 t_x の平方根 $\sqrt{t_x}$ に対して1次の回帰線を求め、得られた式を二乗したものが図9-1および9-2である。予熱段階ではA群よりやや遅れて温度があがりはじめるが、その後はほぼ直線に近い緩やかな2次曲線に従って温度上昇をすることが見てわかる。加温の開始（9時）から30分おくらせて温度上昇が始まり、それからさらに1時間ほどすると安定した一定の上昇傾向が見られるようになる。ちなみに得られた回帰線は予熱時が、 $\sqrt{y} = 0.37x + 55.68$ 、加温後が $\sqrt{y} = 0.32x + 72.35$ である。展開すると加温時のあがり方は予熱時に較べて15%弱となる。加温が進むにつれて蓄熱量が次第に飽和状態に近づいていくことがわかる。

これらから、箱内の温度は、直接熱対流にふれる位置では直線、中間に伝導（二つの異なる対流間での熱移動を含む）をともなう位置では2次曲線に従うことが理解できる。この結果は、今後の実用化に向けて、作業の途中で目標到達の達成時期を予測する上で役立つだろう。

4.2 供試虫による判定

供試虫は以下の2種類を用意し、船の内部5点（図5）に設置した。ヒラタキクイムシはこの大型漁船の加害害虫であり、ヒラタコクヌストモドキは熱への耐性が強いところから選択した。（井上1989）

- (1) ヒラタキクイムシが生息している合板（210 mm × 210 mm × 6 mm）
 - (2) ふすま粉とヒラタコクヌストモドキとを封入した木材片（48 mm × 48 mm × 100 mm）
- それぞれの供試虫は、処理後にとりだした。

ヒラタキクイムシが生息している合板はそのままの状態ですべて25°C、60%RHの恒温恒湿槽に入れて、2ヶ月継続観察した。ヒラタコクヌストモドキの成虫は、処理完了24時間後に完全に死滅していることを確認した。卵、幼虫、蛹については、25°C、

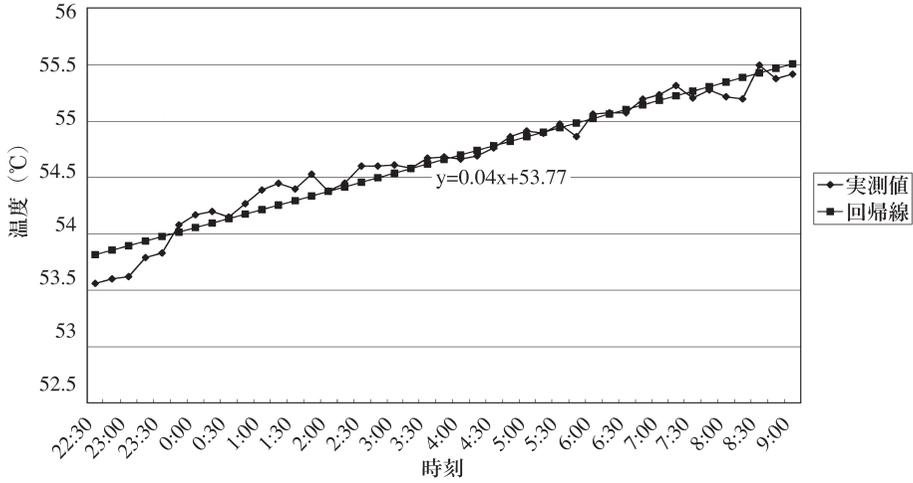


図 8-1 A 群の回帰線 (予熱時)

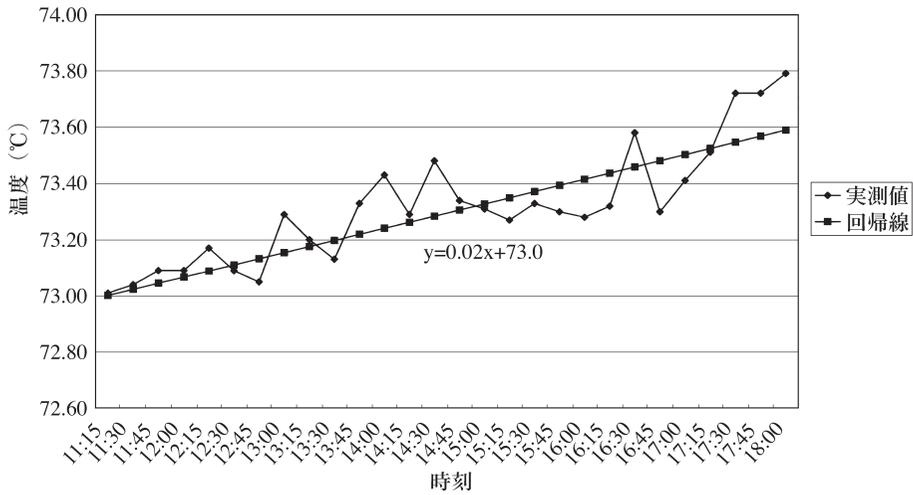


図 8-2 A 群の回帰線 (加温時)

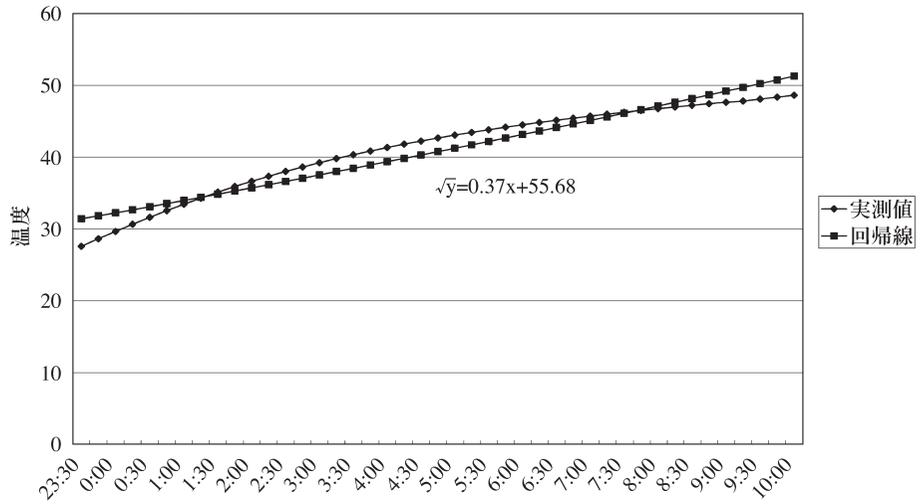


図 9-1 C 群の回帰線 (予熱時)

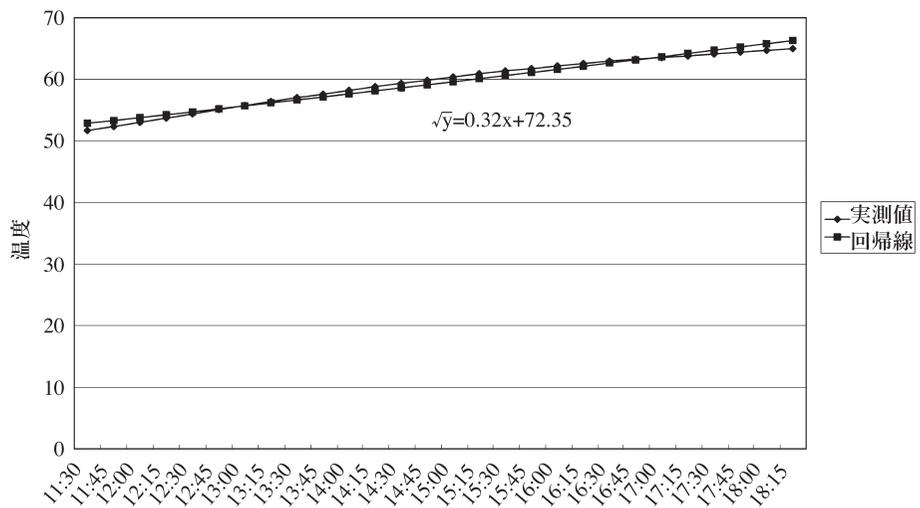


図 9-2 C 群の回帰線 (加温時)

表5 加温空気の殺虫処理の効力結果

実施日：平成15年3月10～12日 飼育：25℃・RH60%

供試 サンプル 経時	木材片試料（ヒラタコクスストモドキ）												合板片（ヒラタキイムシ）	
	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		Cont.		処理	無処理
	成虫	卵・幼虫 蛹	成虫	卵・幼虫 蛹	成虫	卵・幼虫 蛹	成虫	卵・幼虫 蛹	成虫	卵・幼虫 蛹	成虫	卵・幼虫 蛹	虫粉の有無 (羽化数)	虫粉の有無 (羽化数)
開放直後	10/10	0(-)	10/10	0(-)	10/10	0(-)	10/10	0(-)	10/10	0(-)	0/10	0(+)	- (0)	+ (2)
7日後		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		8(+)	- (0)	+ (1)
14日後		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		6(+)	- (0)	+ (2)
1ヶ月後		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(+)	- (0)	+ (2)
1.5ヶ月後		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		1(+)	- (0)	+ (0)
2ヶ月後		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		0(-)		1(-)	- (0)	+ (1)
羽化合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	16	0	8
殺虫率	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			100%	

(備考) 木材片 成虫：死滅数/供試数 卵・幼虫・蛹：羽化数 (幼化が認められるも：+)
 合板片 幼虫の生存：虫粉の確認：+ ()：羽化数

60%RHの恒温恒湿槽2ヶ月間入れて、フ化の様子を経過観察した。2ヶ月あれば、これらの虫のライフサイクルは完結するはずである。(日本家屋害虫学会編 1995)

対照区として同様に供試虫を準備し、処理試料との比較をおこなったところ、処理区のいずれの供試虫も100%死滅していることが確認できた(表5)⁴⁾。また、2003年7月現在、処置した漁船に虫害の再発は認められない。

5 おわりに

高温処理の原理を応用した、加温空気による殺虫処理は、従来の化学薬品を用いる方法に比較して、安全であり環境汚染の心配がない。今回開発した方法では特別な処理施設を必要とせず、電源さえ確保できれば展示空間だけでなく収蔵空間でも実施が可能である。処置装置は、パネルを組み合わせた断熱箱、パイプ、熱風発生機で構成され、容易に移動あるいは保管できる。また、加温空気は断熱箱の中だけに送られ循環しているので、断熱箱外部の温度や湿度には影響を与えないところから、展示空間や収蔵空間のような厳しい温度および湿度管理が要求される場所でも使用可能である。処理の対象となる資料は気密シートで密封されているので、直接加温空気にさらされることなく、木材からの放湿変形はほとんど無視できる。供試虫による実験から明らかのように、設定温度さえ到達できれば、殺虫効果は100%ある。

有害物質の放出がないので、処理中の区域を適当な結界で隔離し最小限の安全管理ができれば、展示場内に観覧者を受け入れたままの状態でも実施が可能である。事実、今回の実験は作業区域の周辺をロープで隔離はしたが、すべて公開でおこなった。興味を示した観覧者の質問には立ち会った研究者が対応することもあった。観覧者に裏方の作業を目に見る機会を提供する好機になった。

従来の化学薬品を用いない殺虫処理の大きな問題点は、「1.2 殺虫処理法の選択」です。すでに述べたように、化学薬品を用いる方法に比べると、処理期間が長期化することと、殺虫処理の条件によっては十分な殺虫効果が得られないということであった。しかし、今回行った加温空気による殺虫処理では、実質的な処理期間は2日半であり、木材芯部まで殺虫処理条件を満たすことができた。対象とする資料の材質は限定されるものの、これまで行われてきた化学薬品による燻蒸を見直すための有効かつ実用化が可能な一方法を提示できたといえよう。

残る問題は、断熱箱内部の温度分布を均一にするためのより具体的な方法である。今回の実験のように温度センサーをはじめ、各種の温湿度データロガーを用いれば、

細やかな温度調整が可能であるが、実践的ではない。要所に最小限の数の無線機能をもつ温湿度データロガーを配置して温度のモニタリングをするのが現実的な解決案であろう。そのために、暖まった空気がどのように対流するか、今後さらなる検討が必要である。また、温度推移の統計学的解析から明らかになったように、障害物の有無で、熱の伝わり方のパターンが大きく異なってくる。実用化にあたっては、障害物の容積（たとえば気密シートの折り重なった部分も含む）に留意し、対象資料の周辺には十分な空間を確保することが前提となろう。

多様な素材、使用環境の違い、輸入害虫などの問題をかかえた民族学資料の虫害対策は深刻である。日本の気候では本来生息していない害虫による被害も無視できないため、海外からの新着資料には、代替化学薬品による燻蒸を続けざるをえない。しかし、日本国内で被害を受けた資料には、化学薬品を用いない方法で対応していきたい。加温空気による殺虫処理のほか、ピレスロイド系薬剤の噴霧、二酸化炭素処理、低酸素濃度処理、低温処理などの可能性を組み合わせ、「どのような資料を、どのような目的で、どのような方法で守るか」、そのガイドラインを2005年までにつくることを考えている。

2005年を目前にして、既に発生した被害に対する対策のみならず、その前段階としての虫害が発生しないような環境づくり、害虫の生息調査方法の再検討も含めたIPM（総合的有害生物管理）の重要性を認識している。どのようにすれば被害をださないですか、被害を早期に発見できるかという防除方法の開発や研究にも力を注ぎたい。

注

- 1) 必要熱量および必要風量の計算は、(株)竹網製作所の藤浦節夫氏による。

立上1～1.5時間

ワーク（木造船）

重さ：1000 kg 比熱：0.3 kcal/kg°C

処置前温度：15°C 処置中温度：55°C

炉材（発泡スチロール）

比重：1.205 kg/m³ 比熱：0.24 kcal/kg°C

熱伝導率：0.04 kcal/mh°C 表面積：82.72 m²

壁厚：0.05 m

炉外気温度：10°C

炉内温度 = 炉内壁温度：60°C

- (a) 貫流熱量 = 放散熱量より次の式がなりたつ。

$$\begin{aligned}
 & (\text{炉内壁温度} - \text{炉外壁温度}) \div (\text{炉材壁厚} \div \text{炉材熱伝導率}) \\
 & = 4.88 \times 0.85 \times \left\{ \frac{(273 + \text{炉外壁温度})}{100} \right\}^4 - \left\{ \frac{(273 + \text{炉外気温度})}{100} \right\}^4 \\
 & \quad + 2.1 \times (\text{炉外壁温度} - \text{炉外気温度})^{\frac{1}{4}} \times (\text{炉外壁温度} - \text{炉外気温度})
 \end{aligned}$$

上記の式のうち、4.88は黒体放射量をさす。壁が黒色の場合の放射率は1となるが、ここでは0.85とした。これより炉外壁温度を求めた後、発泡スチロールからの放散熱量を算出した。

$$\begin{aligned}
 & \text{炉外壁温度} = 15^{\circ}\text{C} \\
 & \text{放散熱量} \approx 37 \text{ kcal/m}^2 \times 82.72 \text{ m}^2 = 3060 \text{ kcal}
 \end{aligned}$$

(b) 壁蓄熱量
 $= \text{炉材壁厚} \times \text{炉材比重} \times \text{炉材比熱} \times \{(\text{炉内温度} + \text{炉外壁温度}) \div 2\} \times \text{炉材表面積}$
 $= 0.05 \text{ m} \times 1.205 \text{ kg/m}^3 \times 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \times \{(60^{\circ}\text{C} + 15^{\circ}\text{C}) \div 2\} \times 82.72 \text{ m}^2$
 $= 44.9 \text{ kcal}$

(c) ワーク吸収熱量
 $= \text{重さ} \times (\text{処置中温度} - \text{処置前温度}) \times \text{比熱}$
 $= 1000 \text{ kg} \times (55^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}) \times 0.3 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$
 $= 12000 \text{ kcal}$

(d) すなわち必要熱量は、
 $(\text{3060 kcal} + \text{44.9 kcal} + \text{12000 kcal}) \times 1.2 \div 860 \approx 21 \text{ kW}$
 放散熱量 壁蓄熱量 ワーク吸収熱量

2) 計算では、断熱箱の大きさを以下のように大きく見積もっている。

$$\begin{aligned}
 & \text{長さ} && 10 \text{ m} \\
 & \text{横幅} && 2.4 \text{ m} \\
 & \text{高さ} && 1.4 \text{ m} \\
 & (10 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}) \times 1.5 = 50.4 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

- 3) 液化炭酸（株）開発部の資料より抜粋した。
 4) 液化炭酸（株）開発部の資料より抜粋した。

文 献

- Berkouwer, M.
 1994 Freezing to Eradicate Insect Pests in Textiles at Brodsworth Hall, *The Conservator* 18: 15–22.
- Berry, J.
 2001 Battle of the Beasts: Treatment of a Pest Infestation of the Mounted Mammal Collection at Liverpool Museum (Proceedings of 2001: A Pest Odyssey), In *Integrated Pest Management for Collections*, pp. 130–134.
- 独立行政法人文化財研究所 東京文化財研究所編
 2001 『文化財害虫事典』クバプロ。
- Florian, M-L.
 1986 The Freezing Process—Effects on Insects and Artifact Materials, *Leather Conservation News* 3(1): 1–13.
 1987 The Effect of Artifact Materials of the Fumigant Ethylene Oxide and Freezing Used in Insect Control. In *Preprints of the 8th Triennial Meeting (ICOM Committee for Conservation)*, pp. 199–208.

- 1990 The Effects of Freezing and Freeze, *Collection Forum* 6(2): 45–52.
- Gilberg, M. and A. Brokerhof
 1991 The Control of Insect Pests in Museum Collections: The Effects of Low Temperature on *Stegobium Paniceum* (Linnaeus), the Drugstore Beetle. *Journal of the American Institute for Conservation* 30: 197–201.
- 日高真吾
 2002a 「二酸化炭素による殺虫処理事例」『日本はきもの博物館・日本郷土玩具博物館年報』8: 14–17。
 2003 「民家での二酸化炭素による殺虫処理事例」『文化財の虫菌害』451: 7–13。
- 日高真吾・伊達仁美・後出秀聡・木村広・木川りか・三浦定俊
 2002b 「民俗資料等の二酸化炭素による殺虫処理の実例」『文化財保存修復学会誌』46: 76–95。
- 井上 治
 1989 「貯穀（貯蔵食品）害虫の飼育法（2）飼育の実際」『家屋害虫』11(2): 140–164。
- 増山元三郎
 1977 『少数例のまとめ方 II』増補改訂版，竹内書店。
 1978 『少数例のまとめ方 I』増補改訂版，竹内書店。
- Morita, T., Y. Tsuji and T. Matsunaga
 1987 Application of A New Type of Pyrethroidal Compound on Ethnographic Textiles, In *Preprints of the 8th Triennial Meeting* (ICOM Committee for Conservation), pp. 211–214.
- 森田恒之・園田直子・日高真吾・木川りか・斉藤明子・伊達仁美・木村広・後出秀聡
 2003 「加温空気による大型民族学資料の殺虫処理——木造漁船の事例」『文化財保存修復学会第25回大会発表要旨集』pp. 202–203。
- Nesheim, K.
 1984 The Yale Non-Toxic Method of Eradication Book-Eating Insects by Deep-Freezing. *Restaurator* 6: 147–164.
- 日本家屋害虫学会編
 1995 『家屋害虫辞典』井上書院。
- Strang, T. J. K.
 1992 A Review of Published Temperatures for the Control of Pest Insects in Museums. *Collection Forum* 8(2): 41–67.
 1995 The Effect of Thermal Methods of Pest Control on Museum Collections, in *Biodeterioration of Cultural Property* 3: 334–353.
 2001 Principles of Heat Disinfestation. In *Integrated Pest Management for Collections* (Proceedings of 2001: A Pest Odyssey), pp. 114–129.
 n.d. Controlling Insect Pests with Low Temperature, CCI Notes 3/3.
- Xavier-Rowe, A., D. Imison, B. Knight and D. Pinniger.
 2000 Using Heat to Kill Museum Insect Pests: Is it Practical and Safe?, Contribution to the Melbourne Congress IIC, In *Tradition and Innovation Advances in Conservation*, pp. 206–211.