

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 會 報 告

第 22 号

昭 和 33 年 6 月

船舶の不燃構造に関する研究.....第 26 研 究 部 会

Investigation on the Fire Protecting Construction of Ships

.....The 26 th Research Committee

The Report
of the
Shipbuilding Research Association
of Japan,
Tokyo, JAPAN
No. 22
June 1958

第26研究部会委員名簿

主査	浜田 鉦		
幹事	翁長 一彦		
委員	石原 美隆	伊藤 国男	井上 英治
	猪熊 正元	今井 袈裟知	梅沢 春雄
	江頭 健	大塩 棟三	沖 正二
	狩野 洋太郎	菅 四郎	桑山 則男
	古関 精一	後藤 周三郎	小林 英一郎
	五幣 淳次	小松 弘	笹原 徳治
	佐藤 健一郎	篠原 資八	柴田 義幸
	高田 健	土川 義朗	中村 成勝
	西尾 敏	三田 義夫	宮崎 光

Membership of the 26th Research Committee

Chairman	Takeshi HAMADA		
Secretary	Kazuhiko ŌNAGA		
Members	Yoshitaka ISHIHARA	Kunio ITŌ	Eigi INOUE
	Masamoto IGUMA	Kesachi IMAI	Haruo UMEZAWA
	Takeshi ETO	Tōzo ŌSHIO	Shoji OKI
	Yōtarō KANŌ	Shirō KAN	Norio KUWAYAMA
	Seiichi KOSEKI	Shūzaburō GOTŌ	Eiichirō KOBAYASHI
	Junji GOHEI	Hiroshi KOMATSU	Tokuji SASAHARA
	Kenichirō SATŌ	Sukehachi SHINOHARA	Yoshiyuki SHIBATA
	Takeshi TAKATA	Girō TSUCHIKAWA	Seishō NAKAMURA
	Bin NISHIO	Yoshio MITA	Hikaru MIYAZAKI

INVESTIGATION ON THE FIRE PROTECTING CONSTRUCTION OF SHIPS

§ 1. Introduction

This paper gives a report on investigations made on the fire protecting construction of ships as regulated at the International Conference on Safety of Life at Sea, 1948. The requirements are that the fire protecting bulkheads or decks that construct the divisions have to maintain their suitable heat insulations and integrities, so the researches which have been carried out are:

1) Theoretical analysis of thermal conduction

In the case that an insulated division is heated from one side, the problem is to find out the face temperature of the unexposed side. It is to be discussed at a non-steady state, so the solutions are given with approximations.

2) Measurement of thermal diffusivity

In order to calculate efficiency of insulation by the solutions mentioned above, thermal diffusivities of insulating materials must be known. We measured thermal diffusivities of materials which were used in ships construction.

3) Heating test of sample

The experimental works were carried out by "The Standard Fire Test" ruled in the Conference of 1948. A number of test samples of bulkheads, decks and door assemblies were designed, made and tested, and their integrities and insulating values were investigated.

4) Fire test of full-scale cabin

It is the object of the test to investigate the fire load on board ship, and to examine integration of fire protection.

§ 2. Theoretical analysis of thermal conduction

In the case of the thermal conduction at the fire, the time period is too short so the problem must be considered under a non-steady state.

To simplify the problem, we discuss it on the basis of the following state.

1) Thermal diffusivity is a linear function of temperature. As shown in § 4, it is noted approximately.

2) The fire temperature is constant. In truth the fire temperature increases with time, but this is discussing it severely.

The solution which gives the temperature of the unexposed surface is obtained by the method of small perturbation. When a panel is heated from one side, the temperature of the unexposed surface at the zero approximation is given by the equation (2-9). Solution of its first approximation is given by the equation (3-8), and if the length of time is considerable by the equation (4-1).

For the steady state, the solution is given exactly by the equation (5-6).

And if the period of time is short, it is recognized approximately that the unexposed

face temperature of a panel is nearly the same as the inside temperature of its material of infinite thickness, at the point away from the exposed surface the distance of which corresponds to the thickness of the panel. Its equation is shown in (2-10).

§ 3. Heat insulating materials of ships

For the heat insulating materials of ships, it is recognized that they must not only be incombustible, but light in weight, water proof, vibration resistant, suitably strong and rigid, easy to work with and so on.

Characters of materials which were used for ships fire protecting structures were discussed. Rock wool board, hard asbestos board, sprayed asbestos, flexible board (asbestos cement board) and magnesia deck composition are known to be useful and suitable for this purpose. Their incombustibility was tested by the method shown in Fig. 2 and Table 1.

§ 4. Thermal diffusivities of insulating materials

As mentioned in the introduction, thermal conduction in the case of fire is in a non-steady state. Then in the measuring of heat insulation as in § 2, thermal diffusivity must be known. Though thermal conductivities of insulating materials have been measured mostly for being used in steady state problems, their thermal diffusivities have not been known.

They were measured by the method shown in the Fig. 4. That is, if a material (volume considered approximately infinite) is heated from one surface periodically, temperatures of planes that are vertical to the thermal stream vary periodically. And on two planes (their distance X) measuring them, its thermal diffusivity is calculated with their amplitudes A_1 and A_2 , phase lag ϕ , and period T as shown in equation (5). An apparatus was made as illustrated in Fig. 5 and Photo. 1. The specimen and periodic heater were enclosed with an electric furnace, so we could measure its thermal diffusivity on a wide range of temperature.

Measured thermal diffusivities of rock wool board and hard asbestos are shown in Fig. 7, Table 2 and 3. Value of hard asbestos board does not vary greatly, but that of rock wool board increases with temperature, so the former has better character for insulation than the latter.

§ 5. Calculation of heat insulation

As mentioned in § 2, we got the solutions which gave the unexposed face temperature of an insulating division when heated by constant temperature from one side. But they are so complicated that it is hardly possible to calculate even the first approximation.

As an example, calculations are shown of the zero approximation and in the case of infinite thickness. Though value of the former is lower than the true value, and the latter is higher than that, they are sufficiently accurate for practical designing of heat insulation against fire. In the calculation of the former, it is convenient to use Table 4 and Fig. 8. In the latter calculating charts are illustrated in Figs. 9, No. 1 and 2.

A couple of samples are shown in Table 6. They are the unexposed surface temperatures of two hard asbestos panels. The first calculation being the zero approximation, and the second being the cases of infinite thickness and the third being a practical measurement. Their exposed face temperatures are 900°C , time periods are 15 minutes, and thickness of the panels are 16 mm and 20 mm. The mean value of the calculations is about the same as the practically measured temperature.

§ 6. Heating tests of samples of bulkheads and decks

It is the object of these tests to research their integrities and insulations by "The Standard Fire Test". The test furnace that was used is shown in Fig. 10, and Photo. 2. All test samples are full size, width of bulkhead samples is 1,300 mm, and its height is 2,140 mm, and width of deck sample is 1,720 mm, its length is 1,200 mm.

Samples designed were 69 out of which 24 were made and tested. They are named by the following rules.

1) First letter shows its construction in Roman numerals.

I.....Bulkhead structured with incombustible materials only.

II..... Bulkhead structured with combustible and incombustible materials.

III..... Deck structured with incombustible materials only.

IV..... Deck structured with incombustible and combustible materials.

2) The first numeral is suffixed with A or B, and shows A or B class division. The suffix of C is not one that is regulated in the rule.

3) Second letter shows its insulating value.

H.....It is so insulated that the average unexposed temperature will not rise more than 139°C above the initial temperature nor will the temperature at any point rise more than 180°C above the initial temperature within the time period of 60 minutes.

M.....It is insulated the same as the above within the period of 30 minutes.

L.....It is insulated the same as the above within the period of 15 minutes.

O.....It is not insulated.

4) The third letter shows the designed number for each construction in Arabic numerals.

Each test was carried out according to the International Conference, the Rule of Ships Fire Protecting Construction in Japan, the United States Coast Guard, the British Statute of Ministry Transport and fire tests rules on building structures of Japan Industrial Standard, American Standard for Testing Materials and British Standard.

Constructions and test results of samples are shown in Tables 9~12 and photos. 3~33. The A class bulkheads or decks maintained their integrities sufficiently except II(A)M6 and II(A)M7. These samples had their ceilings made of wood, and it is necessary to be careful in such cases as those. And some of them which maintained sufficient insulation in average temperature didn't maintain their insulation at such parts as stiffeners, beams, or parts made with other metals. These parts have to be insulated.

In the B class bulkheads, IBM1 and IIBM7 are most suitable. The latter is a typical structure in Method III, in which the combustible materials can be used. Generally, it is better to compose them with many thin incombustible boards like IIBM7.

§ 7. Conclusions of the first part

The studies made between § 2 and § 6 were carried out in 1955. The conclusions are as follows:—

Firstly, it was possible to calculate the temperature of the unexposed surface of a panel when the panel was heated from one side, so the effects of thermal conduction by fire were acquired.

Secondly, it was possible to measure thermal diffusivities of insulating materials, so the characters of the insulating materials in use in ships fire protecting structures were noted.

Thirdly, the heating tests of the samples of bulkheads and decks which were preventing

the fire were carried out, so their typical structures were determined, standard for designing and constructing to prevent fire was ascertained. Their details were shown in the Tables 9~12. Especially, Method III does not need the use of the automatic sprinkler system or a wide use of incombustible hard asbestos board which are not well developed in this country. Accordingly, it was thought that Method III was suited to our use, and the studies of it were made.

§ 8. Introduction of the second part

The second part of the studies was made in 1956. This time, the heating tests of the samples were continued following the first part and the fire test of a cabin were carried out.

§ 9. Heating tests of the samples of door assemblies

Heating tests examined in the second part are of samples of door assemblies which are installed in divisions. Those methods or objects are the same as those of notations in § 6.

The tests which contained two A class doors and three B class doors were carried out. The structures and results were shown in Table 13 and photos. 34~39.

Though the A class doors were self-closing types by gravity, they were not sufficiently effective. The reason being, to increase the moment of self-closing, the door weight has to be increased, so there is a limit in that way. Also their effectiveness would be lost in the ships rolling or inclined conditions.

The B class doors were recognized as having sufficient integrities.

§ 10. Fire test of a cabin

The main objects of the test are to research the fire which has occurred in ships and to research a complete integration of fire protecting structures.

For those purposes, the test was carried out as far as possible realistically and severely.

The test cabin was constructed in Method III for the reason mentioned in § 7, and the types of the bulkheads which were recognized their performance in the heating tests were used in the partitions of the cabin. A sketch of the cabin was illustrated in Fig. 14, and the general arrangement is shown in the appendix.

There were two adjacent rooms on A and F side, and a passage on C side. In the test room two side scuttles were opened on P side wall, one door which contained a louver in the bottom half with a area of 0.15 square meters was made on C side wall. A mechanical ventilation system was installed and it provided the test room with approximately 280m³/h of air. All furniture and personal effects were shown in Tables 14~19.

Measurements of temperatures, burning weight, compositions of burned gas, air volume that was supplied or exhausted, deformations of the construction and so on were made as shown in Table 20. The measured results and the conditions of the test were illustrated in Figs. 15~35, and Photos. 40~47.

The results are as follows briefly: —

- 1) The fire temperature is approximately uniform and the same as the temperature of the Standard Fire Curve.
- 2) The temperature of the fire varies with the air volume which is supplied or exhausted.
- 3) Fire prevention of each of the bulkheads shows the result that is given in the heating test of its sample, and many details on designing and constructing for fire prevention were acquired.

4) The B class bulkheads of C side and F side maintained sufficient insulations and integrities as required by the regulations, but they burned through before the fire died out. Especially, at the top parts of the sashes which joined the bulkheads and the inside of the ceilings in the unexposed sides, hazards of igniting were observed.

5) Although the downward transmission of the fire through the floor deck were effectively prevented, its upward transmission through the roof deck was observed, especially in some parts near P side wall which rose above the deck. There is more need of insulating the deck to prevent the fire for the period of 60 minutes.

6) It is very interesting to discuss the fire condition comparing it with those of the other tests. The list of the fire tests was shown in Table 22.

§ 11. Conclusions of the second part

The two studies were achieved in the second part of § 9~ § 10. The first were the heating tests of the door assemblies, and many results which contributed to the designs and the constructions, especially self-closing systems for fire protecting structures, were acquired.

The second was the fire test of the cabin. This test was carried out to achieve a complete integration of all categories of insulations and integrities. Many contributions were acquired for not only fire protecting but life-saving, escaping and fire appliances. The results of them were noted in § 10.

目 次

(第 1 年度)

I 研究の要旨	
1. 緒 言	(1)
2. 各種規程の要求	(1)
3. 研究の内容	(1)
II 理 論 研 究	
1. 緒 言	(2)
2. 一次元熱伝導	(2)
2・1 基礎方程式	(2)
2・2 第 0 近似解	(3)
2・3 第 1 近似解	(6)
2・4 時間が相当経過した時の裏面温度	(14)
2・5 定 常 解	(16)
III 船用不燃構造断熱材	
1. 緒 言	(17)
2. 岩 綿 板	(17)
3. 硬質石綿板	(18)
4. スプレイドアスベスト	(19)
5. フレキシブル板	(20)
6. マグネシヤ・デッキコンポジション	(20)
IV 断熱材の温度伝導率	
1. 緒 言	(20)
2. 測定装置	(22)
3. 測定方法	(23)
4. 測定結果	(24)
5. 結 言	(24)
V 断熱性能の計算	
1. 緒 言	(25)
2. 第 0 近似解の計算例	(25)
3. 無限厚の計算例	(27)
4. 数値計算に対する考察	(29)
VI 防火構造供試体の加熱試験	
1. 緒 言	(29)
2. 試験設備	(30)
3. 試験方法	(31)
3・1 概 要	(31)
3・2 標準火災試験	(31)
3・3 供試体取付又は支持方法	(32)
3・4 供試体加熱側の決定	(32)
3・5 温度測定方法	(33)

4. 試験状況各論	(33)
4・1 A 級 隔 壁	(33)
4・2 A 級 甲 板	(35)
4・3 B 級 隔 壁	(35)
5. 各供試体の比較検討	(48)
5・1 断 熱 効 果	(48)
5・2 加熱面について	(49)
6. 所 見	(49)
6・1 防火構造における可燃性材料について	(49)
6・2 加熱試験における可燃性材料および裏面温度の取扱いについて	(49)
6・3 裏面温度が制限をこえる特殊の個所について	(50)
VII 結 び	(50)

(第 2 年 度)

VIII 前年度研究との関連	(51)
IX 防火扉供試体の加熱試験	
1. 緒 言	(52)
2. 試験状況各論	(52)
2・1 A 級 扉	(52)
2・2 B 級 扉	(54)
3. 結 論	(54)
X 船室模型火災実験	
1. 緒 言	(57)
2. 船室模型の概要	(57)
3. 実 験 要 領	(61)
4. 実 験 状 況	(61)
4・1 着火前の状況	(61)
4・2 実験観測記録	(62)
4・3 鎮火後の状況	(65)
5. 実験計測結果	(67)
5・1 室内空気温度	(67)
5・2 天井及び床甲板の温度	(67)
5・3 F 壁及び C 壁の温度	(74)
5・4 P 壁 温 度	(74)
5・5 隣室通路内の温度	(74)
5・6 その他の温度	(75)
5・7 燃 焼 重 量	(75)
5・8 燃烧ガス組成	(75)
5・9 開口部の流出入風速	(75)
5・10 変 形 量	(76)
6. 実験結果に対する考察	(76)
7. 船室火災の一般的考察 (諸実験例との比較)	(78)
8. 結 論	(79)
XI 結 び	(82)

I 研究の主旨

1 緒言

本試験研究は船内に発生した火災による被害を局部的のものとし、その蔓延を防止する等の有効な対策をたてることを目的とするもので、船舶防火構造規程の適用を受ける国際航海従事の旅客船に対して直接緊要な研究であることは云う迄もないが、一般貨物船、油槽船に対しても本試験研究の成果が適当に採用され、船舶火災に対する安全性を一層増大させることが望ましい。

2 各種規程の要求

1948年の「海上における人命の安全のための国際条約」に加入している各国では、いずれもこれをもととして防火構造に関する規程が設けられ、昭和27年には我が国でも「船舶防火構造規程」が定められた。

これらによれば、船の防火構造区画を形成する隔壁や甲板にはA級耐火区画と、B級防火区画との2種類のものが定められてある。一般にA級区画は鋼構造であつて、60分の標準火災試験の間、煙又は焰の通過を阻止しうる保全性と、適当な断熱値とを必要とする。またB級区画は一般に不燃性材料またはその内層を有する構造であつて、30分の標準火災試験の間焰の通過を阻止しうる保全性と、適当な断熱値とを必要とする。

ここに云う標準火災試験については後に述べるが、略々国際的に定められた加熱試験方法である。

断熱値はその区画の重要度に依り定められるものであるが、一般にある時間内は裏面側平均温度が初期温度から 139°C (A級区画では最高 180°C) を超えて上昇しないことが要求され、この制限温度に達する迄の時間で断熱値の大小を表示している。

3 研究の内容

このような規程の要求を充たす要素は断熱性能と保全性能とに分けられるが、後者には変形、破壊、燃焼、強度が含まれ工作法の如何も問題となる。

この目的のため、代表的な防火構造区画用隔壁および甲板数十種類を設計し、その実物大供試体を標準火災試験により加熱試験して、断熱性能と保全性能とを細部に亘り調査し、代表的な防火構造を定め今後の設計資料を得た。

また断熱性能については、特に火災の場合のような短時間内の非定常熱伝導を解明するとともに、この数値計算に必要な温度伝導率の広範囲な測定を行い、要求された断熱値に対する断熱材の必要量を求め、また加熱試験結果との対照を行った。

II 理 論 研 究

1 緒 言

断熱材の断熱性能を計算に依り求めるには、一次元熱伝導方程式を解かねばならない。従来防熱の問題として取上げられていたのは何れも定常状態ばかりであつたが、火災の場合のように短時間の断熱を扱う時には非定常状態が問題となる。

また、従来各種の断熱材について熱伝導率は比較的屢々求められているに拘らず、温度伝導率が未知なるために数値計算が出来ず、かつ有限の厚さの断熱材の熱伝導については殆んど解かれていない。

まずここでは温度伝導率が温度の一次函数であると仮定して、有限の板厚の一次元非定常熱伝導を解いた。

本研究では後に述べるように二・三の断熱材の温度伝導率をかなりの温度範囲にわたつて測定し得たが、その結果はほぼ温度の一次函数とみなしてよい。

また、実際の火災にせよ、標準火災試験にせよ、火災温度は時間と共に除々に増加するものではあるが、ここでは解を容易にするために、まず跳躍函数的に急激に一定温度に加熱された場合につき解き、一部では標準火災試験温度に似せた緩やかな加熱の場合を解いて前者と比較してみた。ある結果では問題とする時間内では前者の方がわずか数%厳密側に出るだけである。また、定常解は簡単に求められるので終りに併せて述べる。

2 一次元熱伝導

2・1 基礎方程式

一定室温からの上昇温度を θ とし、温度伝導率が温度の一次函数として $a(1+\epsilon)\text{ m}^2/\text{h}$ と表わされたとすれば、 x 軸を板厚方向にとつて

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ a(1+\epsilon\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \epsilon a \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right\} \dots\dots\dots (1-1)$$

加熱面 $x=0$ にとり、跳躍函数的に $\theta^\circ\text{C}$ 上昇するとすれば

$$x=0 \text{ で } \theta(0, t) = \theta \dots\dots\dots (1-2)$$

板厚を $d\text{ m}$ とし、熱伝導率を $\lambda\text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、熱伝達率を $E\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とすれば

$$x=d \text{ で } \lambda \frac{\partial \theta(d, t)}{\partial x} = -E\theta(d, t)$$

であるが、 $E/\lambda = h$ と置き、放熱面の温度は余り高くないとして h は常数とすれば

$$x=d \text{ で } \frac{\partial \theta(d, t)}{\partial x} = -h\theta(d, t) \dots\dots\dots (1-3)$$

最初は総ての部分が室温にあるとして

$$t=0 \text{ で } \theta(x, 0)=0 \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

解くべき方程式 (1-1) は非線型であるから、 ε を微小量として θ を ε の幂に展開する。

$$\theta = \theta^0 + \varepsilon \theta^1 + \varepsilon^2 \theta^2 + \varepsilon^3 \theta^3 + \dots \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

(1-5) を方程式 (1-1) と条件 (1-2) 乃至 (1-4) に代入し、 ε の同じ幂の項を等置すれば、方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta^0}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta^1}{\partial t} &= a \left\{ \frac{\partial^2 \theta^1}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \theta^0}{\partial x} \right)^2 + \theta^0 \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial x^2} \right\} \\ \frac{\partial \theta^2}{\partial t} &= a \left\{ \frac{\partial^2 \theta^2}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial \theta^0}{\partial x} \frac{\partial \theta^1}{\partial x} + \theta^0 \frac{\partial^2 \theta^1}{\partial x^2} + \theta^1 \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial x^2} \right\} \\ &\vdots \end{aligned}$$

境界条件は、 $x=0$ で

$$\theta^0(0, t) = \Theta \quad \theta^1(0, t) = \theta^2(0, t) = \dots = 0$$

$x=d$ で

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta^0(d, t)}{\partial x} &= -h \theta^0(d, t) \\ \frac{\partial \theta^1(d, t)}{\partial x} &= -h \theta^1(d, t) \\ \frac{\partial \theta^2(d, t)}{\partial x} &= -h \theta^2(d, t) \dots \end{aligned}$$

初期条件は $t=0$ で

$$\theta^0(x, 0) = \theta^1(x, 0) = \theta^2(x, 0) = \dots = 0$$

θ^0 に関する線型方程式の解が第 0 近似であり、それを用いて θ^1 を求めれば、これが第 1 近似である。

以下同様にして近似を進めればよい。

2・2 第 0 近似解

解くべき方程式と条件は

$$\frac{\partial \theta^0(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta^0(x, t)}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

$$t=0 \text{ で } \theta^0(x, 0)=0 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$x=0 \text{ で } \theta^0(0, t)=\Theta \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

$$x=d \text{ で } \frac{\partial \theta^0(d, t)}{\partial x} = -h \theta^0(d, t) \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

(2-1) 乃至 (2-4) を t に関して Laplace 変換する。即ち

$$\theta^0(x, s) = \int_0^\infty e^{-st} \theta^0(x, t) dt$$

とすれば

$$s \bar{\theta}^0(x, s) = a \frac{d^2 \bar{\theta}^0(x, s)}{dx^2} \quad (2-1)'$$

$$x=0 \text{ で } \quad \bar{\theta}^0(0, s) = \frac{\Theta}{s} \quad \dots\dots\dots(2-3)'$$

$$x=d \text{ で } \quad \frac{d\bar{\theta}^0(d, s)}{dx} = -h\bar{\theta}^0(d, s) \quad \dots\dots\dots(2-4)'$$

(2-1)' 及び (2-3)' を更に x に関して Laplace 変換する, 即ち

$$\bar{\bar{\theta}}^0(\xi, s) = \int_0^\infty e^{-\xi x} \bar{\theta}^0(x, s) dx$$

とする。また, その際 $x=0$ における $d\theta^0/dx=L$ とおくと, L はパラメーター s のみの函数であるから常数である。

$$\frac{s}{a} \bar{\bar{\theta}}^0(\xi, s) = \xi^2 \bar{\bar{\theta}}^0(\xi, s) - \xi \frac{\Theta}{s} - L$$

即ち

$$\bar{\bar{\theta}}^0(\xi, s) = \frac{\Theta \xi}{s \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} + \frac{L}{\xi^2 - \frac{s}{a}} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

(2-5) を ξ から x に逆変換すれば

$$\left. \begin{aligned} \bar{\theta}^0(x, s) &= \frac{\Theta}{s} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x + L \sqrt{\frac{a}{s}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x \\ \frac{d\bar{\theta}^0(x, s)}{dx} &= \frac{\Theta}{s} \sqrt{\frac{s}{a}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x + L \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2-5)'$$

(2-4)' によつて L を決定すれば

$$L = -\frac{\Theta}{s} \frac{\sqrt{\frac{s}{a}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + h \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d}{h \sqrt{\frac{a}{s}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d}$$

この L を (2-5)' に代入して

$$\begin{aligned} \theta^0(x, s) &= \frac{\Theta}{s} \left\{ \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \frac{h \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x \right\} \\ &= \frac{\Theta}{s} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} (d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} (d-x)}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d} \quad \dots\dots\dots(2-6) \end{aligned}$$

(2-6) を s から t に逆変換するのであるが, 今

$$\tanh \sqrt{\frac{s}{a}} d = -\sqrt{\frac{s}{a}} / h$$

を満足する s を

$$\sqrt{\frac{s}{a}} = \nu + i\mu \quad (\nu, \mu \text{ 共に実数})$$

と置けば $\nu=0$ でなければならぬことが容易に判る。よつて

$$\sqrt{\frac{s}{a}} = i\mu \quad s = -a\mu^2 \quad \tan \mu d = -\frac{\mu}{h}$$

この関係を満足する正根 μ ，即ち固有値を小さい方から順次 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ とすれば， $\mu_{2n+1}d$ は第 2 象限， $\mu_{2n}d$ は第 4 象限の角である。

$$\tan \mu_n d = -\frac{\mu_n}{h}, \quad \sin \mu_n d = -\frac{(-1)^n \mu_n}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}, \quad \cos \mu_n d = \frac{(-1)^n h}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \dots\dots\dots (2-7)$$

なお μ_n の決定には Fig. 1 を使うと便利である。求める固有値が μ_n ならば， hd を定めて $n=n$ の曲線の縦座標を読めば，これが小数以下の数値を与えるから，これに $3n-1$ を加えればよい。

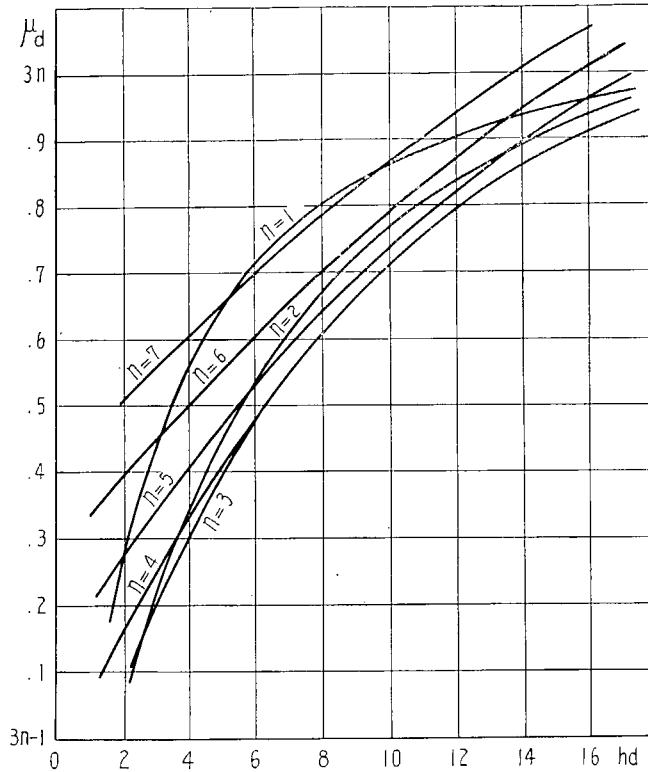


Fig. 1. Relation between μ_n and Relative Thermal Diffusivity h

Mellin の逆変換積分を L_s^{-1} と記すと

$$\begin{aligned} \theta^0(x, t) &= L_s^{-1} \bar{\theta}^0(x, s) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{zt} \theta^0(x, z) dz \\ &= \lim_{z \rightarrow 0} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x)}{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}d} \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} 2\theta \left[\frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x)}{z \left\{ \frac{1+hd}{\sqrt{az}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}d + \frac{d}{a} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}d \right\}} e^{zt} \right]_{z=-\mu_n^2}^2 \\ &= \Theta \frac{1+h(d-x)}{1+hd} + 2\Theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h \sin \mu_n(d-x) + \mu_n \cos \mu_n(d-x)}{\mu_n \{ (1+hd) \cos \mu_n d - \mu_n d \sin \mu_n d \}} e^{-a\mu_n^2 t} \end{aligned}$$

(2-7) によつて書直すと

$$\frac{\theta^0(x, t)}{\Theta} = \frac{1+h(d-x)}{1+hd} - 2 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{\mu_n Q_n} e^{-a \mu_n^2 t} \dots\dots\dots (2-8)$$

裏面温度は $x=d$ において

$$\frac{\theta^0(d, t)}{\Theta} = \frac{1}{1+hd} + 2 \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n} e^{-a \mu_n^2 t} \dots\dots\dots (2-9)$$

ここに $Q_n = h^2 d + \mu_n^2 d + h$

また加熱面 $x=0$ における境界条件が跳躍函数的でなくて標準火災温度曲線のごとき場合は、

$$x=0 \text{ で } \theta(0, t) = \Theta(1 - e^{-at})$$

の如く近似し、前同様に計算するか、或いは (2-8) を用い Duhamel の定理によつて計算すれば

$$\frac{\theta^0(x, t)}{\Theta} = \frac{1+h(d-x)}{1+hd} (1 - e^{-at}) - 2 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{\mu_n Q_n} e^{-a \mu_n^2 t} \frac{\alpha}{\alpha - a \mu_n^2} \{1 - e^{-(\alpha - a \mu_n^2) t}\} \dots (2-8)'$$

$$\frac{\theta^0(d, t)}{\Theta} = \frac{1 - e^{-at}}{1+hd} + 2 \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} e^{-a \mu_n^2 t}}{Q_n} \frac{\alpha}{\alpha - a \mu_n^2} \{1 - e^{-(\alpha - a \mu_n^2) t}\} \dots\dots\dots (2-9)'$$

t の小さいところでは裏面の放熱を無視して半無限として取扱つてよい。この場合は温度伝導率が一定ならば衆知のごとく

$$\frac{\theta(x, t)}{\Theta} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \dots\dots\dots (2-10)$$

である。

また標準火災温度曲線における 1 時間迄の曲線を $\Theta(1 - e^{-at})$ と近似した場合、(2-8) と (2-8)' あるいは (2-9) と (2-9)' との差は、 t の小さいところを除けば極めて僅かである。 $t=1$ では (2-9) は (2-9)' 自身の数 % 大きくなる。したがつて (2-8) 或いは (2-9) で計算を行つておけば安全側である。

2・3 第 1 近似解

$$\frac{\partial \theta^1}{\partial t} = a \left\{ \frac{\partial^2 \theta^1}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \theta^0}{\partial x} \right)^2 + \theta^0 \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial x^2} \right\}$$

に (2-8) を代入すれば、解くべき方程式は次のごとくなる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta^1(x, t)}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 \theta^1(x, t)}{\partial x^2} + a \Theta^2 \left[\left(\frac{h}{1+hd} \right)^2 + \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \cos \mu_n x}{Q_n} e^{-a \mu_n^2 t} \right. \\ & + 2 \frac{1+h(d-x)}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{Q_n} e^{-a \mu_n^2 t} \\ & + 4 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2 (\cos^2 \mu_n x - \sin^2 \mu_n x)}{Q_n^2} e^{-2a \mu_n^2 t} \\ & + 4 \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \cos \mu_n x \cos \mu_m x}{Q_n Q_m} e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2)t} \\ & \left. - 4 \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{\mu_n \mu_m (h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \sin \mu_n x \sin \mu_m x}{\mu_n Q_n \mu_m Q_m} e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2)t} \right] \dots (3-1) \end{aligned}$$

但し \sum' は $n=m$ を除いた和をとるものとする。初期条件と境界条件は

$$t=0 \text{ で } \theta^1(x, 0)=0 \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$x=0 \text{ で } \theta^1(0, t)=0 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$$x=d \text{ で } \frac{\partial \theta^1(d, t)}{\partial x} = -h\theta^1(d, t) \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

(3-1) 乃至 (3-4) を t に関して Laplace 変換する。

$$\begin{aligned} s\bar{\theta}^1(x, s) = & a \frac{d^2 \bar{\theta}^1(x, s)}{dx^2} + a\theta^2 \left[\frac{h^2}{(1+hd)^2 s} + \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \cos \mu_n x}{Q_n(s + a\mu_n^2)} + 2 \sum_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{Q_n(s + a\mu_n^2)} \right. \\ & - \frac{2h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2) x \sin \mu_n x}{Q_n(s + a\mu_n^2)} + 4 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2 \cos 2\mu_n x}{Q_n^2(s + 2a\mu_n^2)} \\ & + 2 \sum'_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \{ \cos(\mu_n - \mu_m)x + \cos(\mu_n + \mu_m)x \}}{Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\}} \\ & \left. - 2 \sum'_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \{ \cos(\mu_n - \mu_m)x - \cos(\mu_n + \mu_m)x \}}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\}} \right] \quad \dots\dots\dots (3-1)' \end{aligned}$$

$$x=0 \text{ で } \bar{\theta}^1(0, s)=0 \quad \dots\dots\dots (3-3)'$$

$$x=d \text{ で } \frac{d\bar{\theta}^1(d, s)}{dx} = -h\bar{\theta}^1(d, s) \quad \dots\dots\dots (3-4)'$$

(3-1)' 乃至 (3-3)' を更に x について Laplace 変換する。

前節におけると同様未知の $d\bar{\theta}^1(0, s)/dx = K$ と置けば

$$\begin{aligned} s\bar{\bar{\theta}}^1(\xi, s) = & a\xi^2 \bar{\theta}^1(\xi, s) - aK \\ & + a\theta^2 \left[\frac{h^2}{(1+hd)^2 s\xi} + \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)\xi}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2)} + 2 \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2 (h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2)} \right. \\ & - \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2 (h^2 + \mu_n^2)\xi}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2)} + 4 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)\xi}{Q_n^2(s + 2a\mu_n^2)(\xi^2 + 4\mu_n^2)} \\ & + 2 \sum'_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\}} \left\{ \frac{\xi}{\xi^2 + (\mu_n - \mu_m)^2} + \frac{\xi}{\xi^2 + (\mu_n + \mu_m)^2} \right\} \\ & \left. - 2 \sum'_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\}} \left\{ \frac{\xi}{\xi^2 + (\mu_n - \mu_m)^2} - \frac{\xi}{\xi^2 + (\mu_n + \mu_m)^2} \right\} \right] \end{aligned}$$

書直すと

$$\begin{aligned} \bar{\bar{\theta}}^1(\xi, s) = & \frac{K}{\xi^2 - \frac{s}{a}} \\ & - \theta^2 \left[\frac{h^2}{(1+hd)^2 s\xi \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} + \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)\xi}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2) \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} \right. \\ & + 2 \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2 (h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2) \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} \\ & \left. - \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2 (h^2 + \mu_n^2)\xi}{Q_n(s + a\mu_n^2)(\xi^2 + \mu_n^2) \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} + 4 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2 \xi}{Q_n^2(s + 2a\mu_n^2)(\xi^2 + 4\mu_n^2) \left(\xi^2 - \frac{s}{a} \right)} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{(\mu_n - \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \xi}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \left\{ \xi^2 + (\mu_n - \mu_m)^2 \right\} \left(\frac{\xi^2}{s} - \frac{s}{a} \right)} \\
& + 2 \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{(\mu_n + \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2) \xi}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \left\{ \xi^2 + (\mu_n + \mu_m)^2 \right\} \left(\frac{\xi^2}{s} - \frac{s}{a} \right)} \Big]
\end{aligned}$$

下位関数の積の逆変換に関する Borel の定理を用いて ξ から x に逆変換すると

$$\begin{aligned}
\bar{\theta}^i(x, s) = & K \sqrt{\frac{a}{s}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x \\
& - \Theta^2 \Big[\frac{ah^2}{(1+hd)^2 s^2} \left(\cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - 1 \right) + \frac{4ah}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{h^2 + \mu_n^2}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2} \left(\cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \cos \mu_n x \right) \\
& + 2a \sum_{n=1} \frac{\mu_n(h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2} \left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\frac{s}{a}}} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \sin \mu_n x \right) - \frac{4a^2 h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2(h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)^3} (\cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \cos \mu_n x) \\
& + \frac{2ah}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n(h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2} x \sin \mu_n x + 4a \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2}{Q_n^2(s + 2a\mu_n^2)(s + 4a\mu_n^2)} (\cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \cos 2\mu_n x) \\
& + 2a \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{(\mu_n - \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n - \mu_m)^2\}} \left\{ \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \cos(\mu_n - \mu_m)x \right\} \\
& + 2a \sum'_{\substack{n=1 \\ m=1}} \frac{(\mu_n + \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n + \mu_m)^2\}} \left\{ \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} x - \cos(\mu_n + \mu_m)x \right\} \Big]
\end{aligned}$$

$d\bar{\theta}^i/hx$ を求め、(3-4)' を満足することく K を決定すれば

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{\theta}^i(x, s)}{\Theta^2} = & \frac{ah^2}{(1+ha)^2 s^2} \left\{ 1 - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d} \right\} \\
& + \frac{4ah}{1+hd} \left\{ \sum_{n=1} \frac{h^2 + \mu_n^2}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2} - \sum_{n=1} \frac{a\mu_n^2(h^2 + \mu_n^2)}{Q_n(s + a\mu_n^2)^3} \right\} \left\{ \cos \mu_n x \right. \\
& \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d} \right\} \\
& + \frac{2a\{1+h(d-x)\}}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n(h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2} \\
& - \frac{2ah}{1+hd} \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sin h \sqrt{\frac{s}{a}} x}{Q_n(s + a\mu_n^2)^2 \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d \right)} \\
& + 4a \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2}{Q_n^2(s + 2a\mu_n^2)(s + 4a\mu_n^2)} \left\{ \cos 2\mu_n x \right. \\
& \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d} \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2a \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(\mu_n - \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n - \mu_m)^2\}} \times \left\{ \cos(\mu_n - \mu_m)x \right. \\
& \quad \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}x \right\} \\
& \quad \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d} \right\} \\
& + 2a \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(\mu_n + \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m \{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n + \mu_m)^2\}} \times \left\{ \cos(\mu_n + \mu_m)x \right. \\
& \quad \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}x \right\} \\
& \quad \left. - \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d}{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d} \right\}
\end{aligned} \tag{3-5}$$

(3-5) を s から t に逆変換すれば所求の解を得る。この逆変換は、第 2, 第 3 及び第 4 項に高位の極があるため少し複雑になる。項別に逆変換を示すと次のようになる。

$$L_s^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}x}{s^2 \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d \right)}$$

これは第 0 近似の計算結果を利用すれば

$$\begin{aligned}
& = \int_0^t \left\{ \frac{1+h(d-x)}{1+hd} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{\mu_n Q_n} e^{-a\mu_n^2 \tau} + \frac{hx}{1+hd} + 2h \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sin \mu_n x}{\mu_n Q_n} e^{-a\mu_n^2 \tau} \right\} d\tau \\
& = t - \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \{ \sqrt{h^2 + \mu_n^2} - (-1)^n h \} \sin \mu_n x}{\mu_n^3 Q_n} (1 - e^{-a\mu_n^2 t})
\end{aligned}$$

$$L_s^{-1} \frac{1}{(s + a\mu_n^2)^2} = t e^{-a\mu_n^2 t} \qquad L_s^{-1} \frac{1}{(s + a\mu_n^2)^3} = \frac{t^2}{2} e^{-a\mu_n^2 t}$$

$$L_t^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}x}{(s + a\mu_n^2)^2 \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d \right)}$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \phi''(-a\mu_n^2) + \phi'(-a\mu_n^2)t + \frac{1}{2} \phi(-a\mu_n^2)t^2 \right\} e^{-a\mu_n^2 t}$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}x}{(z + a\mu_n^2)^2 \left(\frac{1+hd}{\sqrt{az}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}d + \frac{d}{a} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}d \right)} e^{zt} \right|_{z=-a\mu_m^2}$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \phi''(-a\mu_n^2) + \phi'(-a\mu_n^2)t + \frac{1}{2} \phi(-a\mu_n^2)t^2 \right\} e^{-a\mu_n^2 t} - \frac{2}{a} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m$$

$$\times \frac{\mu_m \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \{ h \sin \mu_m(d-x) + \mu_m \cos \mu_m(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sin \mu_m x \}}{(\mu_n^2 - \mu_m^2) Q_m} e^{-a\mu_m^2 t}$$

$$L_s^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}x}{(s + a\mu_n^2)^3 \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}d \right)}$$

$$\begin{aligned}
&= \left\{ \frac{1}{6} \phi'''(-a\mu_n^2) + \frac{1}{2}(-a\mu_n^2)t + \frac{1}{2} \phi'(-a\mu_n^2)t^2 + \frac{1}{6} \phi(-a\mu_n^2)t^3 \right\} e^{-a\mu_n^2 t} \\
&- \frac{2}{a^2} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \\
&\quad \times \frac{\mu_m \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \{ h \sin \mu_m(d-x) + \mu_m \cos \mu_m(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \sin \mu_m x \}}{(\mu_n^2 - \mu_m^2) Q_m} e^{-a\mu_m^2 t} \\
&L_s^{-1} \frac{\sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{(s + a\mu_n^2) \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d \right)} \\
&= \left\{ \frac{1}{2} \psi''(-a\mu_n^2) + \psi'(-a\mu_n^2)t + \frac{1}{2} \psi(-a\mu_n^2)t^2 \right\} e^{-a\mu_n^2 t} \\
&+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left| \frac{\sinh \sqrt{\frac{z}{a}}}{(z + a\mu_m^2) \left(\frac{1+hd}{\sqrt{az}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \frac{d}{a} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z=-a\mu_m^2} \\
&= \left\{ \frac{1}{2} \psi''(-a\mu_n^2) + \psi'(-a\mu_n^2)t + \frac{1}{2}(-a\mu_n^2)t^2 \right\} e^{-a\mu_n^2 t} \\
&- \frac{2}{a} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\mu_m \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \sin \mu_m x}{(\mu_n^2 - \mu_m^2)^2 Q_m} e^{-a\mu_m^2 t}
\end{aligned}$$

ここに $\phi(z)$ 及び $\psi(z)$ は

$$\begin{aligned}
I(z) &= h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d \\
J(z) &= (z + a\mu_n^2) \left\{ h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} (d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} (d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x \right\} \\
H(z) &= (z + a\mu_n^2) \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x
\end{aligned}$$

としたとき

$$\phi(z) = \frac{J(z)}{I(z)} \quad \psi(z) = \frac{H(z)}{I(z)}$$

今 $I(z)$, $J(z)$, $H(z)$ 及びそれらの導函数において $z = -a\mu_n^2$ を代入したものを仮りに I_n , $I_n' \dots$, J_n , J_n' 等と記すこととすれば

$$\left. \begin{aligned}
\phi(-a\mu_n^2) &= \frac{J_n'}{I_n} & \phi'(-a\mu_n^2) &= \frac{J_n'' I_n' - J_n' I_n''}{2I_n'^2} \\
\phi''(-a\mu_n^2) &= \frac{2I_n'(J_n''' I_n' - J_n' I_n''') - 3I_n''(J_n'' I_n' - J_n' I_n'')}{6I_n'^3} \\
\phi'''(-a\mu_n^2) &= \{ I_n'^2 (3J_n'''' I_n' + 2J_n''' I_n'' - 2J_n'' I_n''' - 3J_n' I_n'''') - 8I_n' I_n'' (J_n''' I_n' - J_n' I_n''') \\
&\quad + 9(I_n''^2 - 4I_n' I_n''') (J_n'' I_n' - J_n' I_n'') \} / 12I_n'^4
\end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi'(-a\mu_n^2) &= \frac{H_n'}{I_n'} & \psi''(-a\mu_n^2) &= \frac{H_n''I_n' - H_n'I_n''}{2I_n'^2} \\ \psi'''(-a\mu_n^2) &= \frac{2I_n'(H_n'''I_n' - H_n'I_n''') - 3I_n''(H_n''I_n' - H_n'I_n'')}{6I_n'^3} \end{aligned} \right\}$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} I_n' &= -(-1)^n i \frac{Q_n}{a\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} & I_n'' &= (-1)^n i \frac{Q_n}{2a^2\mu_n^3 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ I_n''' &= (-1)^n i \frac{\mu_n^2 d \{ \mu_n^2 d^2 + 3(1+hd) \} - h \{ h\mu_n^2 d^3 + 3(1+hd) \}}{4a^3\mu_n^5 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ I_n'''' &= (-1)^n i \frac{\mu_n^2 d \{ \mu_n^2 d^2 (2-hd) + 15(1+hd) \} + h \{ \mu_n^4 d^4 - 3(\mu_n^2 d^2 + 5)(1+hd) \}}{a^4\mu_n^7 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ J_n' &= 2i \{ h \sin \mu_n(d-x) + \mu_n \cos \mu_n(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sin \mu_n x \} \\ J_n'' &= \frac{2i}{a\mu_n} [\mu_n(d-x) \sin \mu_n(d-x) - \{ 1 + h(d-x) \} \cos \mu_n(d-x) - (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \cos \mu_n x] \\ J_n''' &= -\frac{3i}{2a^2\mu_n^3} [\{ 1 + h(d-x) \} \mu_n(d-x) \sin \mu_n(d-x) + \{ \mu_n^2(d-x)^2 - 1 - h(d-x) \} \\ &\quad \times \cos \mu_n(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} x (\mu_n x \sin \mu_n x - \cos \mu_n x)] \\ J_n'''' &= -\frac{i}{a^3\mu_n^5} \left[\{ \mu_n^3(d-x)^3 + 3\mu_n(d-x) \overline{1+h(d-x)} \} \sin \mu_n(d-x) + \{ h\mu_n^2(d-x)^3 \right. \\ &\quad \left. + 3 \overline{1+h(d-x)} \} \cos \mu_n(d-x) + (-1)^n \frac{9}{4} \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \mu_n x^2 \sin \mu_n x \right. \\ &\quad \left. + (-1)^n \frac{3}{4} \sqrt{h^2 + \mu_n^2} x (1 + \mu_n^2 x^2) \cos \mu_n x \right] \\ H_n' &= 2i \sin \mu_n x & H_n'' &= -i \frac{2x \cos \mu_n x}{a\mu_n} & H_n''' &= i \frac{3x(\cos \mu_n x - \mu_n x \sin \mu_n x)}{2a^2\mu_n^3} \\ L^{-1} \frac{1}{(s+2a\mu_n^2)(s+4a\mu_n^2)} &= \frac{e^{-2a\mu_n^2 t} - e^{-4a\mu_n^2 t}}{2a\mu_n^2} \\ L_s^{-1} \frac{1}{\{s+a(\mu_n^2+\mu_m^2)\} \{s+a(\mu_n-\mu_m)^2\}} &= \frac{e^{-a(\mu_n^2+\mu_m^2)t} - e^{-a(\mu_n-\mu_m)^2 t}}{2a\mu_n\mu_m} \\ L_s^{-1} \frac{1}{\{s+a(\mu_n^2+\mu_m^2)\} \{s+a(\mu_n+\mu_m)^2\}} &= \frac{e^{-a(\mu_n^2+\mu_m^2)t} - e^{-a(\mu_n+\mu_m)^2 t}}{2a\mu_n\mu_m} \\ L_s^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \frac{h^2+3\mu_n^2}{h^2+\mu_n^2} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{(s+2a\mu_n^2)(s+4a\mu_n^2) \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d \right)} \\ &= \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \frac{h^2+3\mu_n^2}{h^2+\mu_n^2} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}}{(z+4a\mu_n^2) \left(h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z=-2a\mu_n^2} \\ &\quad + \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) - \frac{h^2+3\mu_n^2}{h^2+\mu_n^2} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}}{(z+2a\mu_n^2) \left(h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z=-4a\mu_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \sum_{m=1} \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x}{(z + 2a\mu_n^2)(z + 4a\mu_n^2) \left(\frac{1+hd}{\sqrt{az}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \frac{d}{a} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z = -a\mu_m^2} \\
& = \frac{h \sin \sqrt{2} \mu_n(d-x) + \sqrt{2} \mu_n \cos \sqrt{2} \mu_n(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sin \sqrt{2} \mu_n x}{2a\mu_n^2(h \sin \sqrt{2} \mu_n d + \sqrt{2} \mu_n \cos \sqrt{2} \mu_n d)} e^{-2a\mu_n^2 t} \\
& \quad - \frac{h \sin 2\mu_n(d-x) + 2\mu_n \cos 2\mu_n(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sin 2\mu_n x}{2a\mu_n^2(h \sin 2\mu_n d + 2\mu_n \cos 2\mu_n d)} e^{-4a\mu_n^2 t} \\
& \quad - \frac{2}{a} \sum_{m=1} (-1)^m \frac{\mu_m \sqrt{h^2 + h_m^2} \{h \sin \mu_m(d-x) + \mu_m \cos \mu_m(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_m^2}{h^2 + \mu_m^2} h \sin \mu_m x\}}{(2\mu_n^2 - \mu_m^2)(4\mu_n^2 - \mu_m^2) Q_m} e^{-a\mu_m^2 t} \\
& \quad L_s^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{\{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n - \mu_m)^2\} \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d \right)} \\
& = \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x}{\{z + a(\mu_n - \mu_m^2)\} \left(h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z = -a(\mu_n^2 + \mu_m^2)} \\
& + \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x}{\{z + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \left(h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z = -a(\mu_n^2 - \mu_m^2)} \\
& + 2 \sum_{i=1} \left| \frac{h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{z}{a}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} x}{\{z + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{z + a(\mu_n - \mu_m)^2\} \left(\frac{1+hd}{\sqrt{az}} \cosh \sqrt{\frac{z}{a}} d + \frac{d}{a} \sinh \sqrt{\frac{z}{a}} d \right)} e^{zt} \right|_{z = -a\mu_i^2} \\
& = - \frac{h \sinh \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2}(d-x) + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2}(d-x)}{2a\mu_n \mu_m (h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d)} \\
& \quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} x}{\sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d} e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2) t} \\
& + \frac{h \sin (\mu_n - \mu_m)(d-x) + (\mu_n - \mu_m) \cos (\mu_n - \mu_m)(d-x)}{2a\mu_n \mu_m \{h \sin (\mu_n - \mu_m) d\}} \\
& \quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin (\mu_n - \mu_m) x}{(\mu_n - \mu_m) \cos (\mu_n - \mu_m) d} e^{-a(\mu_n - \mu_m)^2 t} \\
& - \frac{2}{a} \sum_{i=1} (-1)^i \frac{\mu_i \sqrt{h^2 + \mu_i^2} \{h \sin \mu_i(d-x) + \mu_i \cos \mu_i(d-x)\}}{(\mu_n^2 + \mu_m^2 - \mu_i^2)} \\
& \quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \mu_i x}{\{(\mu_n - \mu_m)^2 - \mu_i^2\} Q_i} e^{-a\mu_i^2 t}
\end{aligned}$$

同様にして

$$\begin{aligned}
& L_s^{-1} \frac{h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}}(d-x) + (-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{\{s + a(\mu_n^2 + \mu_m^2)\} \{s + a(\mu_n + \mu_m)^2\}} \left(h \sinh \sqrt{\frac{s}{a}} d + \sqrt{\frac{s}{a}} \cosh \sqrt{\frac{s}{a}} d \right) \\
&= \frac{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2}(d-x) + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2}(d-x)}{2a\mu_n\mu_m \{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d} \\
&\quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} x}{+ \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d} e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2)t} \\
&+ \frac{h \sin(\mu_n + \mu_m)(d-x) + (\mu_n + \mu_m) \cos(\mu_n + \mu_m)(d-x)}{2a\mu_n\mu_m \{h \sin(\mu_n + \mu_m) d} \\
&\quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin(\mu_n + \mu_m) x}{+ (\mu_n + \mu_m) \cos(\mu_n + \mu_m) d} e^{-a(\mu_n + \mu_m)^2 t} \\
&- \frac{2}{a} \sum_{i=1} (-1)^i \frac{\mu_i \sqrt{h^2 + \mu_i^2} \{h \sin \mu_i(d-x) + \mu_i \cos \mu_i(d-x)\}}{(\mu_n^2 + \mu_m^2 - \mu_i^2)} \\
&\quad + \frac{(-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \mu_i x}{\{(\mu_n + \mu_m)^2 - \mu_i^2\} Q_i} e^{-a\mu_i^2 t}
\end{aligned}$$

よつて (3-5) の逆変換は

$$\begin{aligned}
\frac{\theta^2(x, t)}{\Theta^2} &= \frac{2h^2}{(1+hd)^2} \sum_{n=1} \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \{ \sqrt{h^2 + \mu_n^2} - (-1)^n h \} \sin \mu_n x}{\mu_n^3 Q_n} (1 - e^{-a\mu_n^2 t}) \\
&+ \frac{4ah}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2) \cos \mu_n x}{Q_n} \left(t - \frac{1}{2} a\mu_n^2 t^3 \right) e^{-a\mu_n^2 t} + \frac{2a \{1 + h(d-x)\}}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n (h^2 + \mu_n^2) \sin \mu_n x}{Q_n} t e^{-a\mu_n^2 t} \\
&- \frac{8h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{h^2 + \mu_n^2}{Q_n} \left[\sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\mu_m^3 \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \{ h \sin \mu_m(d-x) + \mu_m \cos \mu_m(d-x) + (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sin \mu_m x \}}{(\mu_n^2 - \mu_m^2)^3 Q_m} \right. \\
&\quad \left. \times e^{-a\mu_m^2 t} \right] \\
&+ \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n} \left[\sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\mu_m \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \sin \mu_m x}{(\mu_n^2 - \mu_m^2)^2 Q_m} e^{-a\mu_m^2 t} \right] \\
&+ \frac{4ah}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{h^2 + \mu_n^2}{Q_n} \left[\left\{ \frac{1}{6} a\mu_n^2 \phi'''(-a\mu_n^2) + \frac{1}{2} (a\mu_n^2 t - 1) \phi''(-a\mu_n^2) + \left(\frac{1}{2} a\mu_n^2 t^2 - t \right) \phi'(-a\mu_n^2) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(\frac{1}{6} a\mu_n^2 t^3 - \frac{1}{2} t^2 \right) \phi(-a\mu_n^2) \right\} e^{-a\mu_n^2 t} \right] \\
&- \frac{2ah}{1+hd} \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n} \left\{ \frac{1}{2} \psi''(-a\mu_n^2) + \psi'(-a\mu_n^2) t + \frac{1}{2} \psi(-a\mu_n^2) t^2 \right\} e^{-a\mu_n^2 t} \\
&+ 2 \sum_{n=1} \frac{(h^2 + \mu_n^2)^2}{Q_n^2} \left[- \left\{ \frac{h \sin \sqrt{2} \mu_n(d-x) + \sqrt{2} \mu_n \cos \sqrt{2} \mu_n(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sin \sqrt{2} \mu_n x}{h \sin \sqrt{2} \mu_n d + \sqrt{2} \mu_n \cos \sqrt{2} \mu_n d} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \cos 2\mu_n x \right\} \frac{e^{-2a\mu_n^2 t}}{\mu_n^2} \right. \\
&\quad \left. + \left\{ \frac{h \sin 2\mu_n(d-x) + 2\mu_n \cos 2\mu_n(d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sin 2\mu_n x}{h \sin 2\mu_n d + 2\mu_n \cos 2\mu_n d} - \cos 2\mu_n x \right\} \frac{e^{-4a\mu_n^2 t}}{\mu_n^2} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\mu_n \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \left\{ h \sin \mu_m (d-x) + \mu_m \cos \mu_m (d-x) + \frac{h^2 + 3\mu_n^2}{h^2 + \mu_n^2} h \sin \mu_n x \right\}}{(2\mu_n^2 - \mu_m^2)(4\mu_n^2 - \mu_m^2)Q_m} e^{-a\mu_m^2 t} \Big] \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n - \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m} \\
& \quad \times \left[\frac{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} (d-x) + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} (d-x)}{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d} \right. \\
& \quad + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} x \\
& \quad \left. + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d \right] - \cos(\mu_n - \mu_m)x \Big\} \frac{e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2)t}}{\mu_n \mu_m} \\
& - \left\{ \frac{h \sin(\mu_n - \mu_m)(d-x) + (\mu_n - \mu_m) \cos(\mu_n - \mu_m)(d-x)}{h \sin(\mu_n - \mu_m)d} \right. \\
& \quad + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin(\mu_n - \mu_m)x \\
& \quad \left. + (\mu_n - \mu_m) \cos(\mu_n - \mu_m)d \right\} - \cos(\mu_n - \mu_m)x \Big\} \frac{e^{-a(\mu_n - \mu_m)^2 t}}{\mu_n \mu_m} \\
& + 4 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{\mu_i \sqrt{h^2 + \mu_i^2} \left\{ h \sin \mu_i (d-x) + \mu_i \cos \mu_i (d-x) \right. \\
& \quad \left. + (-1)^{n+m} \frac{h^2 + \mu_n \mu_m + (\mu_n - \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \mu_i x \right\}}{(\mu_n^2 + \mu_m^2 - \mu_i^2)} \\
& \quad \times \left. \frac{e^{-a\mu_i^2 t}}{\{(\mu_n - \mu_m)^2 - \mu_i^2\} Q_i} \right] \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n + \mu_m)(h^2 + \mu_n^2)(h^2 + \mu_m^2)}{\mu_n Q_n Q_m} \\
& \quad \times \left[- \left\{ \frac{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} (d-x) + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} (d-x)}{h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d} \right. \right. \\
& \quad + (-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} x \\
& \quad \left. + \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} \cos \sqrt{\mu_n^2 + \mu_m^2} d \right\} - \cos(\mu_n + \mu_m)x \Big\} \frac{e^{-a(\mu_n^2 + \mu_m^2)t}}{\mu_n \mu_m} \\
& - \left\{ \frac{h \sin(\mu_n + \mu_m)(d-x) + (\mu_n + \mu_m) \cos(\mu_n + \mu_m)(d-x)}{h \sin(\mu_n + \mu_m)d} \right. \\
& \quad + (-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin(\mu_n + \mu_m)x \\
& \quad \left. + (\mu_n + \mu_m) \cos(\mu_n + \mu_m)d \right\} + \cos(\mu_n + \mu_m)x \Big\} \frac{e^{-a(\mu_n + \mu_m)^2 t}}{\mu_n \mu_m} \\
& + 4 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{\mu_i \sqrt{h^2 + \mu_i^2} \left\{ h \sin \mu_i (d-x) + \mu_i \cos \mu_i (d-x) \right. \\
& \quad \left. + (-1)^{n+m} \frac{h^2 - \mu_n \mu_m + (\mu_n + \mu_m)^2}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} \sqrt{h^2 + \mu_m^2}} h \sin \mu_i x \right\}}{(\mu_n^2 + \mu_m^2 - \mu_i^2)} \\
& \quad \times \left. \frac{e^{-a\mu_i^2 t}}{\{(\mu_n + \mu_m)^2 - \mu_i^2\} Q_i} \right] \dots\dots\dots (3-8)
\end{aligned}$$

(3-8) が求める第 1 近似解であつて、この中の $\phi(-a\mu_n^2)$, $\psi(-a\mu_n^2)$ 及びそれらの導函数には (3-1), (3-7) を代入すればよい。

2・4 時間が相当経過した時の裏面温度

第 1 近似解 (3-8) は相当に複雑であつて、更にこれ以上高次の近似解を求めることは不可能に近

い。実際の場合には t の小さい場合の解と、 $t \rightarrow \infty$ の定常解とを求め、次に t は相当に大きいとして (3-8) の省略を行つた解を使えばよいだろう。

t が相当大きくて (2-8) における指数項の積が省略できる場合の第 1 近似解は、(3-8) における鎖線以下の項はなくなる。更にその場合 $x=d$ において裏面温度のみを求める場合は著しく簡単になる。 J_n, H_n, ϕ, ψ 等において $x=d$ とおいたものに添字を付けることとすれば

$$\begin{aligned} J'_{nd} &= 0 & H'_{nd} &= -(-1)^n \frac{2i\mu_n}{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ J''_{nd} &= -\frac{2i(1+hd)}{a\mu_n} & H''_{nd} &= -(-1)^n \frac{2ihd}{a\mu_n \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ J'''_{nd} &= \frac{3i(1+hd + \mu_n^2 d^2)}{2a^2 \mu_n^3} & H'''_{nd} &= -(-1)^n \frac{3i(hd + \mu_n^2 d^2)}{2a^2 \mu_n^3 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}} \\ J''''_{nd} &= -i \frac{12-9\mu_n^2 d^2 + 3hd(1 + \mu_n^2 d^2)}{4a^3 \mu_n^5} \end{aligned}$$

よつて

$$\begin{aligned} \phi_d &= 0 & \psi_d &= \frac{2a\mu_n^2}{Q_n} \\ \phi'_d &= (-1)^n \frac{(1+hd)\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n} & \psi'_d &= \frac{1+2hd}{2Q_n} \\ \phi''_d &= -(-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2} d^2}{2aQ_n} & \psi''_d &= h \left(\frac{M_n}{6a\mu_n^3 Q_n^2} + \frac{1-2\mu_n^2 d^2}{4a\mu_n^3 Q_n} \right) \\ \phi'''_d &= \frac{(-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{4a^2 \mu_n^4 Q_n} \left\{ \frac{3(4-5\mu_n^2 d^2) + 9hd(1 + \mu_n^2 d^2)}{4} + \frac{(1+hd)M_n}{Q_n} \right\} \end{aligned}$$

ここに $M_n = \mu_n \{ \mu_n^3 d^3 + 3(1+hd)\mu_n d \} - h \{ hd\mu_n^2 d^2 + 3(1+hd) \}$

これらを (3-8) の鎖線以上の項に代入すれば、裏面温度の第 1 近似解は

$$\begin{aligned} \frac{\theta^t(d, t)}{\theta^2} &= \frac{2h}{(1+hd)^2} \sum_{n=1} \frac{h - (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{\mu_n^2 Q_n} (1 - e^{-a\mu_n^2 t}) \\ &+ \frac{h}{1+hd} \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{\mu_n^2 Q_n^2} (X_n + Y_n) e^{-a\mu_n^2 t} - \frac{a}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n^2} Z_n t e^{-a\mu_n^2 t} \\ &+ \frac{8h}{1+hd} \sum_{n=1} \frac{h^2 + \mu_n^2}{Q_n} \left[\sum_{m=1}' \frac{\mu_m^4 \{ (-1)^n \sqrt{h^2 + \mu_n^2} - (-1)^m \sqrt{h^2 + \mu_m^2} \}}{(\mu_n^2 - \mu_m^2)^3 Q_m} e^{-a\mu_m^2 t} \right] \\ &- \frac{4h}{1+hd} \sum_{n=1} (-1)^n \frac{\mu_n^2 \sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{Q_n} \left[\sum_{m=1}' \frac{\mu_m^2 e^{-a\mu_m^2 t}}{(\mu_n^2 - \mu_m^2)^2 Q_m} \right] \end{aligned} \quad (4-1)$$

ここに

$$X_n = \frac{1}{8} (h^2 + \mu_n^2) \{ 4 + 3\mu_n^2 d^2 + 3hd(1 + \mu_n^2 d^2) \}$$

$$Y_n = \frac{1}{6} \{ (h^2 + \mu_n^2)(1+hd) - h\mu_n \} \frac{M_n}{Q_n}$$

$$Z_n = (4h^2 + 2\mu_n^2)d + h(h^2 + \mu_n^2)d^2 + 5h$$

h, d したがって μ_n を定め、あらかじめ X_n, Y_n, Z_n を計算しておけば、相当時間が経過した場合の第1近似の裏面温度ははなはだ簡単に求めうる。しかも大低の場合最後の二重和の二項は省略できる。

2・5 定 常 解

$t \rightarrow \infty$ の場合、定常解は熱伝導率の温度係数を $\varepsilon \text{ 1/}^\circ\text{C}$ として方程式

$$\frac{d}{dx} \left\{ (1 + \varepsilon \theta) \frac{d\theta}{dx} \right\} = 0 \quad (5-1)$$

を境界条件

$$x=0 \text{ で } \theta(0) = \theta \quad (5-2)$$

$$x=d \text{ で } \frac{d\theta(d)}{dx} = -h\theta(d) \quad (5-3)$$

の下に解けばよい。(5-1) を積分して

$$(1 + \varepsilon \theta) \frac{d\theta}{dx} = A \quad \text{及び} \quad \theta + \frac{\varepsilon}{2} \theta^2 = Ax + B$$

両式から A を消去して

$$\frac{1 + \varepsilon \theta}{\theta + \frac{\varepsilon}{2} \theta^2 - B} d\theta = \frac{dx}{x}$$

上式を解いて

$$\log Cx = \log \left(\theta + \frac{\varepsilon}{2} \theta^2 - B \right) \quad \text{すなわち}$$

$$Cx = \theta + \frac{\varepsilon}{2} \theta^2 - B$$

(5-2) により $B = \theta + \frac{\varepsilon}{2} \theta^2$ を上式に代入し、 θ について解けば

$$\theta = \frac{-1 \pm \sqrt{(1 + \varepsilon \theta)^2 + 2\varepsilon Cx}}{\varepsilon} \quad (5-4)$$

(5-2) により正号をとる。(5-3) により

$$\begin{aligned} \frac{C}{\sqrt{(1 + \varepsilon \theta)^2 + 2\varepsilon Cd}} &= -h \frac{-1 + \sqrt{(1 + \varepsilon \theta)^2 + 2\varepsilon Cd}}{\varepsilon} \\ \varepsilon^2(1 + 2hd)^2 C^2 + 2\varepsilon h \{1 + 2hd(1 + \varepsilon \theta)^2 - hd\} C + h^2(1 + \varepsilon \theta)^2 \{(1 + \varepsilon \theta)^2 - 1\} &= 0 \\ C &= \frac{hd - (1 + 2hd)(1 + \varepsilon \theta)^2 \pm \sqrt{h^2 d^2 + (1 + 2hd)(1 + \varepsilon \theta)^2}}{\varepsilon(1 + 2hd)^2} h \end{aligned}$$

この C を (5-4) 右辺に代入すれば、ルート内は

$$\frac{2h^2 x d + (1 + \varepsilon \theta)^2 (1 + hd) \{1 + 2h(d - x)\} \pm 2hx \sqrt{h^2 d^2 + (1 + 2hd)(1 + \varepsilon \theta)^2}}{(1 + 2hd)^2}$$

これが常に正であるためには正号をとらねばならない。よつて

$$\theta(x) = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{\sqrt{2h^2 x d + (1 + \varepsilon \theta)^2 (1 + 2hd) \{1 + 2h(d - x)\}} + 2hx \sqrt{h^2 d^2 + (1 + \varepsilon \theta)^2 (1 + 2hd)}}{1 + 2hd} - 1 \right\} \quad (5-5)$$

裏面温度は

$$\theta(d) = \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \frac{\sqrt{2h^2d^2 + (1+\varepsilon\Theta)^2(1+2hd)} + 2hd \sqrt{h^2d^2 + (1+\varepsilon\Theta)^2(1+2hd)}}{1+2hd} - 1 \right\} \quad (5-6)$$

(5-5) 及び (5-6) において $\varepsilon \rightarrow 0$ とすれば、それぞれ

$$\theta(x) = \frac{1+h(d-x)}{1+hd} \Theta \quad \text{及び} \quad \theta(d) = \frac{\Theta}{1+hd}$$

となり、(2-8) 及び (2-9) の定常項と一致する。

III 船舶用不燃構造断熱材

1 緒 言

不燃構造用断熱材として必要なことはまず不燃性材料であることの他に、船用として軽量であること、温度常数の低いこと、工作容易で場所をとらぬこと、非吸湿性・耐震動性で適当な強度・剛性を有すること、等々が重要な要素となる。

従来船用の保温材としてはグラスウール、石綿、および硅酸カルシウム、ビニール系材料、コルク板、岩綿等が多く使用されてきたが、グラスウール、ビニール系材料は耐熱温度が低く、コルク板は可燃性であるためいずれも防火構造には不向きである。

現在、船舶防火構造用として考えられ、又多く使用されているものとしては岩綿板、スプレイドアスベスト、フレキシブル板、硬質石綿板等があげられる。特に硬質石綿板は相当の強度を有し、単独で羽目板として用いられる利点がある。また普通使用されているマグネシヤコンポジションは完全な不燃性材料とは云い難いが、甲板用断熱材として有効である。

なお、ここに云う不燃性とは国際条約に示されている様に、約 750°C に熱せられた時に燃えず、且つ検火炎で点火されるのに十分な量の引火性の蒸気を発生しないものを云う。この不燃性の試験方法は米國 Coast Guard をはじめ、後に述べる防火試験諸規則に各々規定されているが何れも似通つた方法であり、本試験研究に用いた各種断熱材は Fig. 2 及び Table 1 に示す方法を用いて一応その不燃性を確認した。

以下に本研究に用いた船用断熱材についての諸性質および当部会で測定した諸数値を示しておく。

2 岩 綿 板

防火用断熱材中では最も歴史が古く実用に供されてきたものである。岩綿板とは火山岩、苦土質鉱物等を原料として、これを熔鉱炉又は電気炉により高温で熔解し、圧搾空気で吹飛ばして繊維としたものを、適当な不燃性接着剤により成形させたものである。

重量は極めて軽いが脆く、壁等の内部構造にしか用いられない。なお、吸湿性・耐震動性等の耐久性に多少の懸念がある。

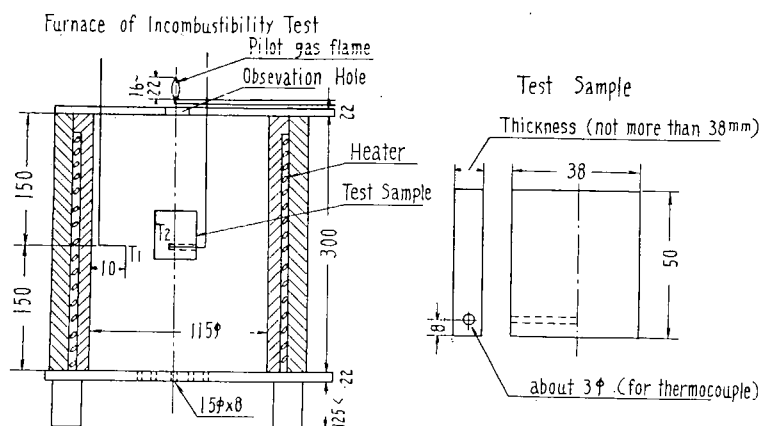


Fig. 2. Incombustibility Test

Table 1 Method of Incombustibility Test

Apparatus	Described in Fig. 2
Size of Test Sample	50×38 mm (Thickness should not be more than 38 mm)
Before Test	A small hole which inserted a thermocouple is drilled in the sample (Fig. 2). The sample is dried for a period of 6 hours in a drier which is controlled at a temperature of 100°C, and is cooled naturally in it.
Furnace Temperature	about 750°C
Operation	The sample is suspended to the position in the furnace for not more than 30 seconds. Temperatures T_1 and T_2 are measured at intervals not exceeding 1 minute. The test period is 15 minutes.
Definition	<ol style="list-style-type: none"> 1. The sample does not flame. 2. The pilot gas flame does not occur anything changed. 3. The temperature of the sample T_2 does not exceed the furnace temperature T_1 by more than 50°C.*

Remarks * In U.S. Coast Guard T_2 shall not exceed T_1 by more than 10°C, and in British Standard T_1 shall not be raised 50°C or more above 750°C.

市販のものは略々大きさ 610×910 mm (2×3 尺), 厚さ 25 mm および 50 mm である。本試験研究に用いたものは岩綿耐熱保温板と称し, 特に高温用として製作されたもので, 測定した物理的性質は略々次の様であつた。

かさ比重……………0.25

熱伝導率…………… $0.043 + 0.00013\theta$ kcal/mh°C (但し $\theta = 100 \sim 500^\circ\text{C}$ にて)

3 硬質石綿板

石綿と珪酸カルシウムを主成分とし, 湿式又は抄造式等で圧縮成形した硬質のボードであり, 圧縮または成形の工程により比重や強度をある程度変えることができる。

この硬質石綿板の一番の利点は, 単独で羽目板に用いうる強度をもち木材に代えて不燃性構造とすることができる。普通の木材の如く裁断・穿孔等の工作も容易ではあるが, ネジ保持力や衝撃に對す

る吸収エネルギーにはまだ多少信頼性がない。したがって壁材，羽目板として用いても，重量のある備品の取付等には未だ問題がある。

寸法は 910×1,820 mm (3×6 尺)，または 1,220×2,440 mm (4×8 尺) で，厚さは 12 mm から 25 mm までが多く使用されるが，単独で間仕切り用の壁とする場合には強度・断熱性から 22 mm 位が適当である。また鋼壁の内張りとしては 16 mm 天井張りとしては 12 mm またはそれ以下のものが普通用いられるようである。また硬質石綿板はそのままでは美観を損うため，多くは表面処理をした上にフレキシブル板またはベニヤ等を接着し化粧張りしてある。

熱伝導率は岩綿板よりかなり大きい，熱容量もまた大きい，温度伝導率はむしろ岩綿より低く，短時間の断熱には有利である。

本研究に用いた硬質石綿板は密度の異なる 2 種類のものがあり，(1) 軽い方は主に壁材，羽目板として，また，(2) 重く強度・ネジ保持力の大きいものは根太材として使用した。それらの物理的諸性質は略々次の通りであつた。

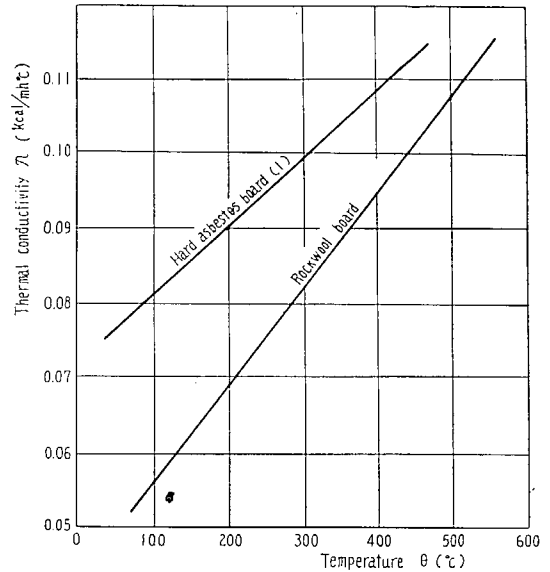


Fig. 3. Thermal Conductivity of Insulating Materials

	(1)	(2)	Remarks
Density	0.63	0.93	
Water Contained (%)	2.6	1.2	
Thermal Conductivity (Kcal/mh°C)	0.072+0.00009θ	—	
Bending Stress (kg/cm ²)	<div> <div>Normal</div> <div>Heated</div> <div>Water absorbed</div> </div>	<div>133</div> <div>105</div> <div>84</div>	<div>at 500°C, for 3 hours</div> <div>Absorbing for 24 hours</div>
Impact Value (kg/cm ²)	1.8	3.3	By Izot Tester
Holding Strength for Screw (kg)	42	65	Driving a P.K. Screw which is 4.2 mm diameter and 32 mm in length to the depth of 10 mm.

4 スプレイドアスベスト

他の断熱材と異なり，スプレイドアスベスト (Sprayed Asbestos) は構造物に直接吹付施工をして断熱層を形成する。石綿繊維と接着剤とをよく混合して送風器で送り出し特殊なノズルで水と混合して吹付ける。水は接着剤と反応するものではあるが施工を容易にするため，反応に必要な量の数倍を用いて後は自然乾燥させる。完全硬化時間は約 2 昼夜，完全自然乾燥時間は温湿度・施工厚さまたは天候にもよるが，厚さ 20~25 mm のもので測定した一例では 15 日程度である。

吹付面には普通 300~450 mm 間隔でアンカークリップを設け，また鋼板錆止めと接着を良好にす

るためアスファルト系の塗料を塗る。厚さは断熱性から 20~25mm 位の場合が多いが、50mm 位まで施行できる。いずれも吹付は 2~3 回に分けて行い、1 回吹付直後表面を板でおさえ吹付を繰り返す。したがって密度や厚さを均一とし、かつ定つた値にすることにはかなり熟練を要するようである。

充分乾燥された試料につき測定した諸性質は次の通りであつた。

カサ比重 0.25~0.30

熱伝導率 $0.036+0.00014\theta$ kcal/mh°C (カサ比重 0.25 の場合)

附着力 (引張) 50~80 g/cm²

5 フレキシブル板

不燃性材料としては特に目新しいものではないが、主原料は石綿とセメントで抄造強圧成形される。前記の材料に比較して重量の大きいこと、断熱性の少いこと等が不利な点であるが、薄くてかなりの可撓性があり、平滑な表面が得られるために天井張りや、壁表面の内張り、硬質石綿板の化粧張り等として用いられる。寸法はやはり 910×1,820mm (3×6 尺) のものと 1,220×2,480mm (4×8 尺) のものがある。

本研究に使用したものは、

カサ比重 約 1.8

熱伝導率 約 0.45 kcal/mh°C (45°C において)

撓み 5.1mm } 厚さ 5mm, 巾 200mm, スパン 200mm で曲げ試験
曲げ強さ 376 kg/cm² } を行つたもの

吸水率 16.7% (24 時間浸漬)

厚さは羽目板類の化粧張りとしては 2~5mm のもの、単板としては 5~8mm のものを使用した。

6 マグネシヤ・デッキコンポジション

デッキコンポジションにはコルク粒、蛭石等を混入したものもあるが、本試験研究には従来の木粉が入っているマグネシヤ・デッキコンポジションを用いた。

カサ比重 1.8~1.9

熱伝導率 $0.15+0.002\theta$ kcal/mh°C

IV 断熱材料の温度伝導率

1 緒言

船の耐火構造を構成する材料として緊要なものに断熱材料があるが、その最も重要な性能はそれが不燃材料であることおよび断熱性の優良であることの二つである。後者の断熱性良否の尺度として最も適切かつ唯一のものはその材料の温度伝導率である。すなわち、この値を知ることによりこれら

断熱材料の断熱性を容易に比較判定でき、また以下に述べるとおりこれを用いて計算により裏面温度をある程度推定できる。

温度伝導率 a は非定常熱伝導の基礎方程式

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

c ……比熱 (kcal/kg°C) ρ ……密度 (kg/m³) λ ……熱伝導率 (kcal/mh°C)

から

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad \dots\dots\dots (2)$$

として表わされ、非定常熱伝導を論ずるときなくてはならぬ数値である。耐火構造に用うる断熱材については 常温から約 800°C の温度範囲にわたってその温度伝導率を測定する必要があるが、この様な測定は非常にむづかしく今迄に殆んど試みられたことはない。

本研究においてはこれら断熱材の温度伝導率測定に必要な装置を新しく作り、取敢えず最も普通に用いられる硬質石綿板および岩綿の二者についてそれぞれの温度伝導率を広範囲の温度にわたって測定することに成功した。

今 Fig. 4 に示すように略々無限に広いと思われる固体の一面から、周期 T をもって周期的に変動する温度で加熱したとする。

この時固体内の I—I 面における温度が

$$\theta_1 = A_1 \sin \omega t$$

$$\text{但し } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

であつたとすれば、熱流の方向に x だけ離れた II—II 面では、—

$$\theta_2 = A_2 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{但し } \varphi = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot x$$

したがつて、この両者の位相差 φ を測定すれば

$$a = \frac{\pi x^2}{T \varphi^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

から温度伝導率が求められ、あるいは両者の振巾の比からも

$$a = \frac{\pi x^2}{T \left(\log \frac{A_1}{A_2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{但し } A_2 = A_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}x}$$

と求められる。

実際には位相差 φ および振巾 A_1, A_2 を測定し、(3)、(4) 両式の幾何平均から

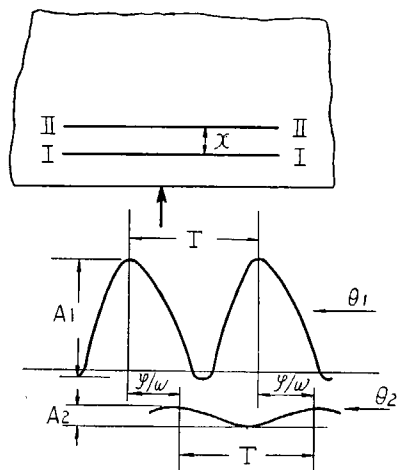


Fig. 4. Measurement of Thermal Diffusivity

$$a = \frac{\pi x^2}{T_{\phi} \left(\log \frac{A_1}{A_2} \right)} \dots \dots \dots (5)$$

で温度伝導率を求める。

2 測 定 装 置

上記の如く、温度伝導率測定のための試験片には、略々半無限に広い固体の一面から一次元の温度波を加えねばならない。実際には 100×100 mm 乃至 200×200 mm 試料 5~10 枚を積層し、厚さを約 100 mm としたものを試験片とした。これは色々をやつてみた経験と推定値とから、試験片の大きさを 100~200 mm の立方体の大きさとすれば、周辺からの熱の放散の影響は無視でき略々無限の大きさのものと同様と考えられるからである。

温度波を測定する熱電対はこの各層の間に挿み、一応空気層等の影響がないようによく密着させた。加熱電源を周期的に断続させて供試体の一面から温度波を加えれば、ある厚さの断熱材を距てた箇所では温度は殆んど sin 曲線を描くことが認められる。

さらに、高温の範囲にわたつてこの測定を行うため、試料全体を電気炉の中におさめて試験片全体を一定の高温に保つた上で以上の測定を行うように試みた。

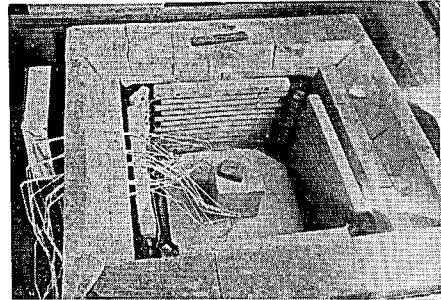


Photo. 1. Apparatus of Thermal Diffusivity measurement

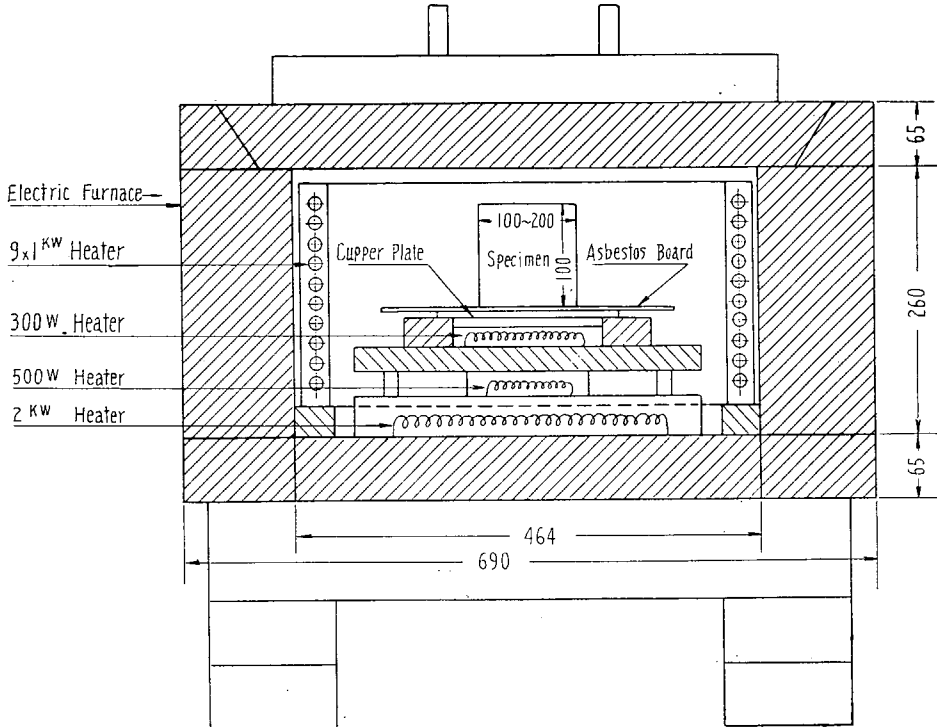


Fig. 5. Apparatus of Thermal Diffusivity Measurement (1)

測定装置は Fig. 5 及び Photo. 1 に示す。

300~500 W 電熱線は試験片の下面から断続的に加熱して温度波を与えるものであり、又 500 W 電熱線は、熱流を一次元として各層の温度分布が均一になるよう調整するものである。試験片全体を高温にするための電気炉は 9 KW のもので炉内温度を最大 800°C 迄上げることができる。

3 測定方法

測定試料は硬質石綿板では 100×100×10 mm を 10 枚、岩綿では 200×200×23.5 mm を 5 枚積層した。これらは、あらかじめ温度 110°C に 8 時間保ち充分乾燥させたものである。この熱源に近い下部 3 枚の試料には、あらかじめ校正した熱電対 (径 0.29 mm) を挿入し、各層の間に空隙が生じないように留意して密着させた。

同一の層で 2 点温度を測定したのは、その面では均一温度で一次元の熱流となつていることを確かめるためのものである。温度は 6 点又は 12 点の電位差計式自動温度記録計で記録させ、温度波が定常に達した後測定にとりかかる様にした。この測定の際には、温度波の位相差と振幅を精密に測るため特に Fig. 6 の如き結線方式で熱電対に生ずる熱起電力に逆電圧を与え、熱波形の部分のみを拡大して記録させた。記録紙の送り速度は 180 mm/h、記録打点間隔は 15 秒である。

このようにして測定した温度波は完全な sin 曲線ではなく、多少の高調波を含むため 1 週期を 12 等分し、フーリエ解析を行う。

すなわち、I-I 面の温度 θ_1 、II-II 面の温度 θ_2 をそれぞれ

$$\theta_1 = a_0 + a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos 2\theta_1 + a_3 \cos 3\theta_1 + \dots + b_1 \sin \theta_1 + b_2 \sin 2\theta_1 + b_3 \sin 3\theta_1 + \dots$$

$$\theta_2 = \alpha_0 + \alpha_1 \cos \theta_2 + \alpha_2 \cos 2\theta_2 + \alpha_3 \cos 3\theta_2 + \dots + \beta_1 \sin \theta_2 + \beta_2 \sin 2\theta_2 + \beta_3 \sin 3\theta_2 + \dots$$

とすれば、第 2 高調波以上は省略できるから

$$A_1 = 2\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad A_2 = 2\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2} \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1} - \tan^{-1} \frac{\beta_1}{\alpha_1}$$

測定値から a_1 , b_1 , α_1 , β_1 を求め、 A_1 , A_2 , φ を算出し (5) 式に入れて温度伝導率 a を求めうる。

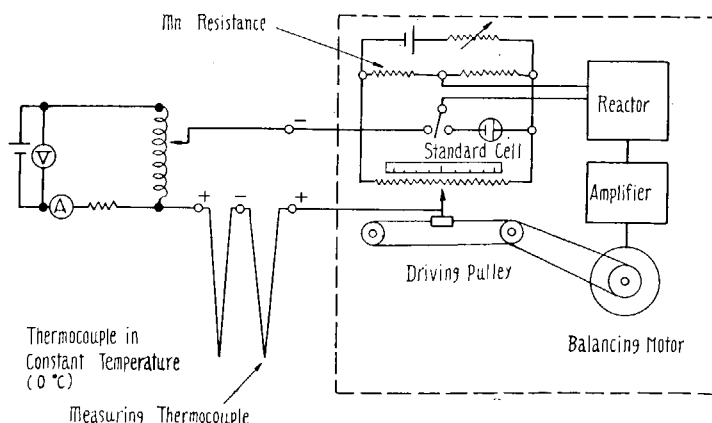


Fig. 6. Apparatus of Thermal Diffusivity Measurement (2)

4 測定結果

以上の測定により Fig. 7 及び Table 2~3 の結果を得た。

Table 2. Thermal Diffusivity of Hard Asbestos Board

θ (°C)	73	148	176	218	280	330	403
a (m ² /h)	7.2×10^{-4}	6.8×10^{-4}	6.6×10^{-4}	6.5×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.5×10^{-4}	6.7×10^{-4}

Table 3. Thermal Diffusivity of Rock wool Board

θ (°C)	150	170	350	602
a (m ² /h)	8.07×10^{-4}	8.53×10^{-4}	1.01×10^{-3}	1.43×10^{-3}

5 結 言

上記の如く、硬質石綿板の温度伝導率は、材料温度 300°C 前後において最小値をもち、温度に対してもその変動が比較的小であるが、岩綿のそれは温度の増加とともに著しく増加してゆく、すなわち、定常状態の断熱を対象とするときは熱伝導率の小さい岩綿が有利であるのに対し、短時間の非定常断熱にあつては硬質石綿板が却つて有効であることは誠に興味あることと思う。

測定結果に含まれる誤差には主に I-I 面と II-II 面間の厚み x と、温度の測定値の精度が影響する。特に、高温の測定時における岩綿は前後で x が変化することがあり、その精度は充分のものが得られない。また、II-II 面の温度波振幅 A_2 の充分な有効数字をうるためには材料の加熱温度および、 A_2 の関係などに多くの考慮を要する。

また、操作上の問題としては、一次元の熱流をうるため多くの熱源を設置したが、それらの容量・配置などは煩雑な手数と経験との結果えられたものである。

しかし、この試験結果から、このような装置と方法によれば常温附近での温度伝導率測定は勿論高温における値も調整に慎重を期せば信用ある数値を求めうるとの確信を得た。

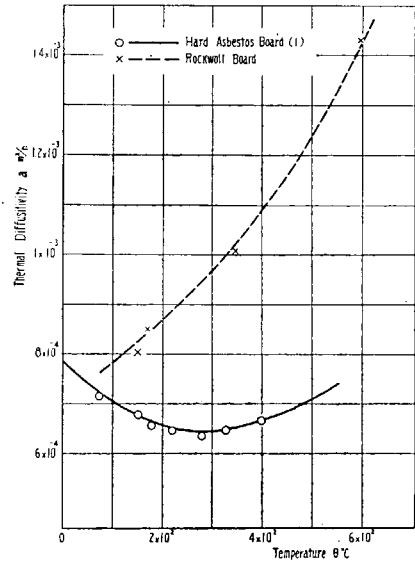


Fig. 7 Thermal Diffusivity of Materials

V 断熱性能の計算

1 緒 言

非定常熱伝導の解は第II章で述べた如く、一応解くことができた。しかしこれに実際の数値を入れて計算するのは相当煩雑であり、特に第1近似ですら殆んど不可能に近い。

したがって実用上の数値をうる程度の精度として第0近似解と厚さが無限に厚いと考えたときの数値計算例をここに掲げておく。第0近似解から求めた裏面温度は真の値より小さく、また無限厚の解より求めた値は真の値より大であるから、この兩者を知つておけば実用上便利である。但し計算の假定として加熱温度は一定温度であるとし、温度伝導率の温度に対する変化は考慮に入れない。

2 第0近似解の計算例

第II章2・2に述べた如く、加熱温度がはじめより一定温度 Θ である場合の裏面温度 $\theta(d, t)$ は(2-9)式、即ち

$$\frac{\theta(d, t)}{\Theta} = \frac{1}{1+hd} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{h^2 d + \mu_n^2 d + h} e^{-u_{\mu_n}^2 t}$$

で表わされる。あるいは

$$\theta(d, t) = \frac{\Theta}{1+hd} + \Theta \sum C_n e^{-\frac{a(\mu_n d)^2}{d^2} t}$$

$$\text{但し } C_n = 2(-1)^n \frac{\sqrt{h^2 + \mu_n^2}}{h^2 d + \mu_n^2 d + h}$$

である。第1項は定常解(温度伝導率が一定として)である。

通常使用される断熱材の熱伝導率、厚さおよび熱伝達率から、 hd の値は4~14の範囲をとるものと考え、この範囲で $\mu_n d$ および C_n の値を計算したものを Table 4 に示す。この表を使用すれば数値計算は割に容易となる。なお相対熱伝達率 h には Fig. 8 の熱伝達率 E^* を利用する。

一例として硬質石綿板(厚さ $d=22\text{mm}$) が 760°C (この温度は標火災曲線の15分における加熱温度である) で15分間加熱された場合を計算してみる。この場合、定常裏面温度は **trial and error** で求め、計算を簡単にするために相対熱伝達率 h は定常裏面温度の時の値を使用した。即ち定常裏

* E は自然対流による垂直平面板の熱伝達率

$$E_k = 2.2 \sqrt[4]{\theta - \theta_r} \quad \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

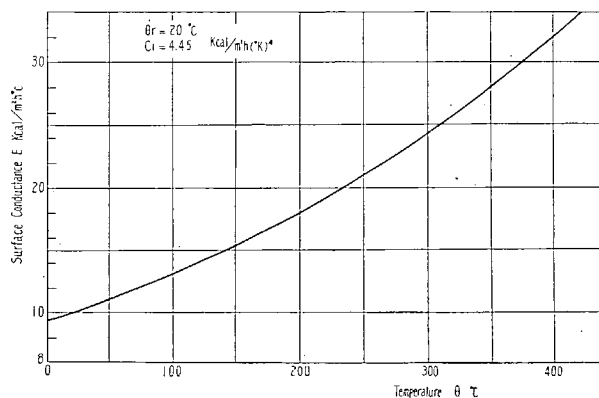
と輻射による熱伝達率

$$E_s = \frac{C \left\{ \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \right\}}{T - T_r} \quad \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

との和として求めたもの。室温 (θ_r, T_r) は 20°C とし、輻射恒数 C は $44.5 \text{ kcal/m}^2\text{h} (^\circ\text{K})^4$ として算出した。(渡辺常正: 熱伝達と保温材より引用)

Table 4. Table of Zero Approximation

hd	n	μ_{nd}	$(\mu_{nd})^2$	C_n	hd	n	μ_{nd}	$(\mu_{nd})^2$	C_n
4.00	1	2.567	6.59	-0.358	10.00	1	2.864	8.20	-0.176
	2	5.355	28.7	0.274		2	5.767	33.3	0.161
	3	8.303	68.9	-0.207		3	8.707	75.8	-0.143
	4	11.335	128	0.162		4	11.702	137	0.125
	5	14.408	207	-0.132		5	14.733	217	-0.109
	6	17.505	306	0.1095		6	17.792	317	0.0958
	7	20.610	425	-0.0951		7	20.867	436	-0.0847
6.00	1	2.716	7.38	-0.267	12.00	1	2.903	8.40	-0.162
	2	5.536	30.6	0.226		2	5.833	34.0	0.150
	3	8.467	71.8	-0.183		3	8.790	77.3	-0.135
	4	11.481	130.8	0.150		4	11.790	139	0.119
	5	14.531	211	-0.125		5	14.818	220	-0.105
	6	17.607	310	0.106		6	17.870	319	0.0930
	7	20.703	428	-0.0918		7	20.940	438	-0.0827
8.00	1	2.802	7.85	-0.212	14.00	1	2.935	8.60	-0.131
	2	5.666	32.1	0.188		2	5.885	34.7	0.124
	3	8.603	50.5	-0.192		3	8.860	78.5	-0.115
	4	11.602	134	0.136		4	11.863	141	0.105
	5	14.640	215	-0.116		5	14.893	222	-0.0954
	6	17.703	313	0.102		6	17.943	322	0.0854
	7	20.788	433	-0.0882		7	21.007	441	-0.0776

Fig. 8. Relation between Surface Conductance E and Surface Temperature θ

而温度 $\bar{\theta}$ を 150°C と仮定すれば

$$E = 15.4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \quad (\text{Fig. 8 より})$$

$$\lambda = 0.0855 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \quad (\text{Fig. 3 より})$$

したがって

$$h = E/\lambda = 180 \text{ l/m}$$

また

$$\Theta = 760^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Theta}{1 + hd} = 153^\circ\text{C} \doteq \bar{\theta}$$

即ち定常裏面温度は約 150°C が正しい。温度伝導率 a は θ と $\bar{\theta}$ との平均値約 440°C における値を用いて

$$a=6.8\times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{h} \quad (\text{Fig. 7 より})$$

また $hd=3.96\approx 4.00$

したがって Table 4 の $hd=4.00$ の欄を用いて計算すると Table 5 の通りとなり

$$\theta(d, t)=\bar{\theta}+\sum \theta_n \approx 150-27=123^{\circ}\text{C}$$

となる、ことに

$$\theta_n=\theta C_n \cdot e^{-\frac{at}{d^2}(\mu_n d)^2}$$

を表わす。

もし hd の値が Table 4 中に掲げた値の間にくる時は挿入法を用いればよい。

Table 5. A Sample of Calculation of Zero Approximation

hd	n	$(\mu_n d)^2$	C_n	θ	$\frac{at}{d^2}$	$\frac{at}{d^2}(\mu_n d)^2$	$e^{-\frac{at}{d^2}(\mu_n d)^2}$	θ_n
4.00	1	6.59	-0.358	760	0.351	2.32	0.0983	-26.7
	2	28.7	0.274			10.1	0.00004	
	3	68.9	-0.207					
	4	128	0.162					
	5	207	-0.132					
	6	306	0.1095					

さらに他の一例として温度伝導率の等しい硬質石綿板が 900°C で 15 分間加熱された場合の計算を行つてみた。厚さ 16mm および 20mm の場合の計算結果だけを示せば、

$$d=16\text{ mm} \quad \theta \approx 207^{\circ}\text{C} \quad d=20\text{ mm} \quad \theta \approx 166^{\circ}\text{C}$$

となる。

3 無限厚の計算例

この場合は (2-10) 式の通り

$$\frac{\theta(x, t)}{\theta} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2at}}\right)$$

で示される。

Fig. 9 に温度伝導率 a を種々に変えた場合、加熱面から x だけ距つた点の温度と加熱時間との関係を示す。実用されている断熱材の温度伝導率 a の範囲は $6\sim 10\times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{h}$ とし、 x は 16, 20, 25, 40 および 60mm で温度を計算してある。

この表を用いて、前の例と同様な厚さ 22mm に対応する硬質石綿板 (温度伝導率 $a=7.0\times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{h}$) を 15 分間で 760°C 加熱した場合の裏面温度を見出せば、図から

$a=7\times 10^{-4}$ にて 15 分で

$$x=20\text{ mm} \quad \theta/\theta=0.285 \quad x=25\text{ mm} \quad \theta/\theta=0.180$$

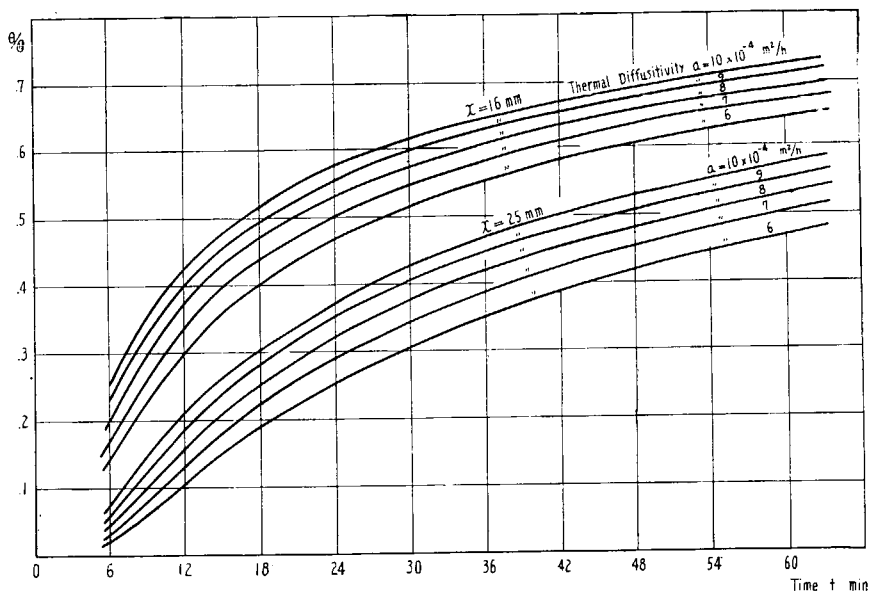


Fig. 9. Chart illustrating Temperatures in Infinite Thickness Material (No. 1)

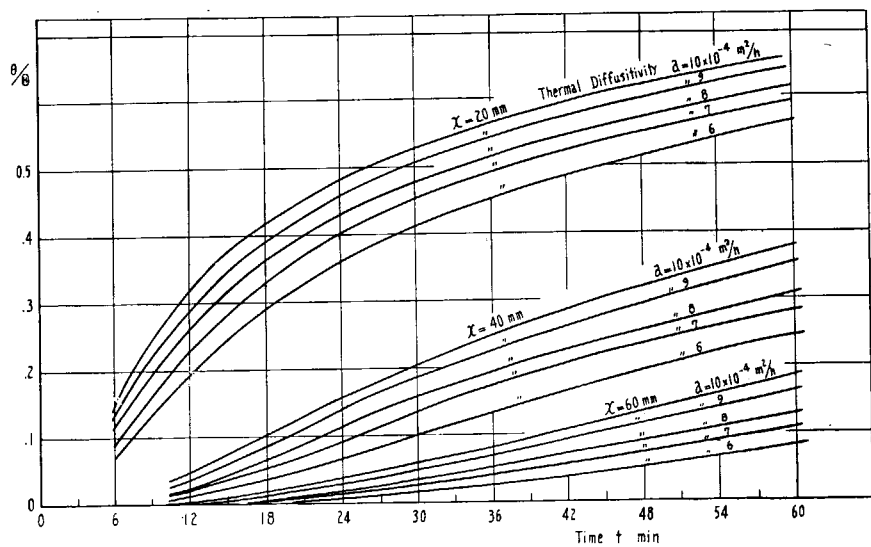


Fig. 9. Chart illustrating Temperatures in Infinite Thickness Material (No. 2)

挿入法で

$$x = 22 \text{ mm} \quad \theta/\theta_0 = 0.243$$

$$\theta = 760^\circ\text{C} \text{ であるから } \theta = 185^\circ\text{C}$$

となる。

また、他の一例として加熱温度 $\theta = 900^\circ\text{C}$ として厚さ 16mm および 20mm に対応する場合には
15 分で

$$x = 16 \text{ mm} \quad \theta/\theta_0 = 0.393 \quad \theta = 354^\circ\text{C}$$

$$x = 20 \text{ mm} \quad \theta/\theta_0 = 0.285 \quad \theta = 257^\circ\text{C}$$

となる。

4 数値計算に対する考察

以上の二例の計算結果を比較して見ると、厚さ 22mm の硬質石綿板を 15 分間 760°C で加熱した場合、第 0 近似解では 123°C、無限厚とした解は 185°C となり、真の数值はこの両者の間にあるべきである。

しかし一方 この例を実際に 標準加熱した場合の結果（第 VI 章で述べる供試体 IB M 1 を参照）は 69°C で、いずれの計算結果よりも低い。この理由として次の事が考えられる。

- (1) 計算の際の加熱温度は終始一定としたが、実験の加熱温度は標準火災温度曲線に合わせるため緩やかに上昇していること。
- (2) 計算では加熱温度即ち表面温度としているが、実際には表面温度は加熱温度（ガス焰の温度）よりかなり低いこと。
- (3) 実際には断熱材が多少の含水量を持つため水分が蒸発する際の潜熱の影響が含まれること。

次に、これらの影響を除いた時の実験結果がどの様になるかを掲げる。

これは高温の金属板に、あらかじめ充分乾燥してある試料（硬質石綿板）を密着させてその表裏面温度を求めてみたものである。先の第 0 近似解と無限厚板の計算結果と対照させるため、加熱表面温度 $\theta=900^{\circ}\text{C}$ 、板厚 $d=16$ および 20mm の場合には、15 分における裏面温度 θ がそれぞれ Table 6 のようであった。

Table 6. Temperatures of Measurements and Calculations

Thickness	Measuring Temperature	Zero Approximation	Calculations in Infinite Thickness
16 mm	260°C	207°C	354°C
20 mm	190°C	166°C	257°C

即ち両者の計算値の平均は略々実測値に等しい。

VI 防火構造供試体の加熱試験

1 緒 言

本試験研究は甲板・隔壁をはじめ扉・窓等の閉鎖装置、その他の耐火性能を広く対象とすべきであるが、今回の加熱試験は甲板・隔壁についてのものである。

供試体は合計 69 箇のものが設計され、うち 24 箇を選び製作試験した。

設計の方針として最初は耐火性を要求される隔壁・甲板等を構成する材料はすべて不燃性のものとしたが、設計および加熱試験の進捗に伴い、B 級隔壁については、第三方式* の場合に限り不燃性材

* 第 3 方式とは国際条約で定められた防火構造方式の一つで、可燃性材料の使用が或る程度許され、火災警報装置を設備するものを云う。

料の内層を有しその外部に木製材料を加える事が必要かつ許されとの結論に達し、この種のものも追加した。

使用した断熱材は何れも第Ⅲ章に述べたものの市販品とし、A級区画では30分および60分、B級隔壁では30分の計画断熱値を持たせるようにした。

また、不燃構造を設ける場所により、その形式には、ステイフナー、ビーム等を覆うものと、しからざるもの、あるいは木製内張り類の有無等の区別があり、さらにそのいずれか一方側からの火災のみを考慮すればよいもの等もある。

これらを一応考慮し、最も普遍的と思われる供試体を選び細部の寸法・構造・工作法等はなるべく現在の造船所における方法を採用した。

なお、供試体には便宜上次の方針にしたがつて符号をつけてある。

1) 1番目のローマ数字は供試体の種類を表す。

I………不燃性材料だけで構成された隔壁

II………可燃性材料を併用して構成された隔壁

III………不燃性材料だけで構成された甲板

IV………可燃性材料を併用して構成された甲板

2) 1番目のローマ数字にはAまたはBの添字(Suffix)を附し、それぞれA級区画またはB級区画用構造を示す。

また、Cは規程の要求以下のものである。

3) 2番目の文字は計画断熱値を示す。

H………断熱値 60 分以上のもの

M……… “ 30 分以上 60 分未満のもの

L……… “ 15 分以上 30 分未満のもの

O……… “ 15 分未満のもの

4) 3番目の文字は計画した供試体番号を示し、アラビア数字で表す。この番号は種類別(例えばIA II B など毎)に附す。

したがって、例えば I A M 16 とは、不燃性材料だけで構成され、30 分以上の計画断熱値をもつ、A級隔壁の、16 番目に設計(製作または実験番号とは異なる)されたものを表わす。

供試体寸法は加熱試験装置に取付ける関係から、隔壁供試体はいずれも巾 1,300 mm, 高さ 2,140 mm であるが、甲板供試体は巾 1,486 mm, 長さ 950 mm のものと、巾 1,720 mm, 長さ 1,200 mm のものとがある。また、A 級隔壁の主鋼構造は大部分その寸法を統一した。すなわち、鋼板板厚は 6 mm, ステイフナーは 75×75×6 (mm) 山型逆付, そのスペース 610 mm である。また、A 級甲板板厚は 6 mm, ビームは 125×75×7 (mm) 山型逆付である。

2 試 験 設 備

供試体の加熱に使用したガス加熱炉は特にこの種の試験のために設計製作した。加熱炉はガスバーナーの設けられた加熱部と供試体を取付ける支持台の二つよりなり、支持台はレール上を自由に前後

に移動することができる。加熱部は耐火煉瓦製の炉壁にガスバーナーを蜂の巣状に並べ、供試体はこれに向きあつた支持台に取付け加熱されるようになってゐる。加熱面は垂直面・水平面よりなつてゐるので、隔壁および甲板の供試体を別箇に、またはそれらを組合せた構造物として同時に加熱することができる。

ガスにはブローで空気を圧送して燃焼させており、ガス量と空気量を加減して任意の加熱温度を与えることができ、また箇々のバーナーのcockを加減して温度分布を均一にすることができる。

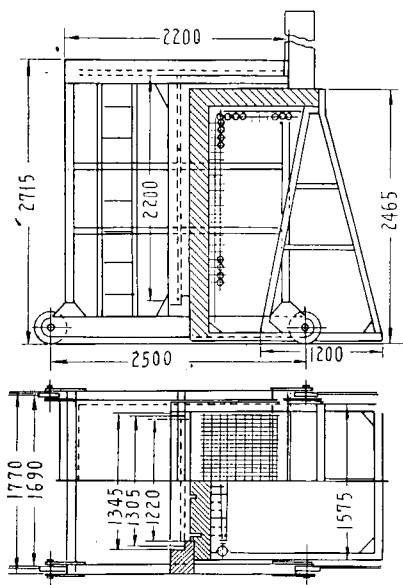


Fig. 10. Furnace of Standard Fire Test

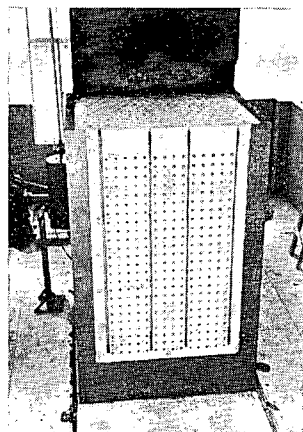


Photo. 2. Furnace of Standard Fire Test

3 試験方法

3.1 概要

試験方法は国際条約をもととし、我国の船舶防火構造規程、米国 Coast Guard の規則 (Federal Register 72.05 Structural Fire Protection, Specification 164.008 Bulkhead Panels for Merchant Vessels) 及び英国 Ministry of Transport の規程 (No. 1948 Merchant Shipping Rule, Part V-Fire Protection) 等に従い、また細かい測定方法等は建築物の試験方法を参考として、J.I.S. A 1302 (鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート造、および鉄骨コンクリート造の防火被覆試験方法)、American Society for Testing Materials: E 119-54 (Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials), British Standard 476: 1953 (Fire Tests on Building Materials and Structures) 等に準拠したが、その結果どの規程にもほぼ合致し、一番厳しいものとなつたようである。

3.2 標準火災試験

標準火災試験で与えられる加熱温度と経過時間の関係はおおむね Table 7 または Fig. 11 に示す通りで、この値は耐火構造物内の一般可燃物が燃焼する時その周辺に与える加熱温度の標準として国

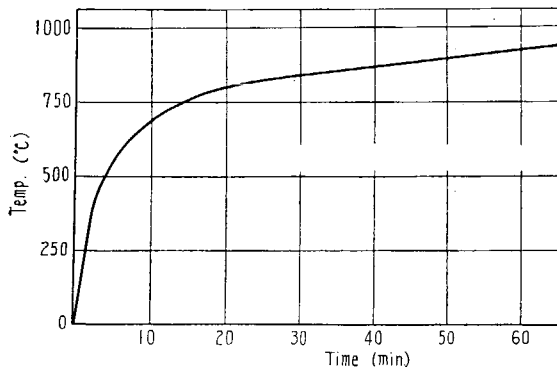


Fig. 11. Standard Fire Curve

Table 7. Standard Fire Temperature

Time	Furnace Temperature
5 min	538°C
10	704
30	843
60	927

際的に定められたものである。

この加熱温度にはある範囲の差が許されており、これに関しての各種規則は Table 8 のようである。

Table 8. Furnace Temperature of Test

Rules	Items	Temperatures	Ratio of area under standard fire curve and area under furnace temperature curve.
JIS. A-1302		—	Within 10% for 1 hour.
ASTM: E 119-54		—	Ditto.
B.S. 476: 1953		<ol style="list-style-type: none"> 1. Furnace Temperature does not exceed 871°C during the first 10 minutes of test. 2. It does not vary from Standard Temperature by more than $\pm 167^{\circ}\text{C}$ after the first 10 minutes. 	Within 15% for 30 minutes and 10% for 1 hour.

今回の試験の加熱状況をみるに 2 例 (I A H 12, I A H 7) を除きすべて規則に合格した。

3・3 供試体取付又は支持方法

隔壁供試体はすべて上下縁を固定し左右両縁は自由の状態を取付けた。なるべく供試体を実船の構造の一部と考えられる状態に近くし、実験中に生ずる熱応力や変形が同等になるようにとの考えである。

甲板供試体は船体構造の一部と考えられるような取付方法となしえなかつたので、単に四周を支持し、四隅を固定する方法をとつた。なお、隔壁供試体では参考のため壁面に垂直方向の変形量 (隔壁の主構造の変形量) を測定した。測定箇所は供試体中心線に沿い高さを 4 等分した 3 箇所でピアノ線をプーリーを介して重錘により展張させてその移動量を読んだ。精度は 0.5 mm 程度である。

3・4 供試体加熱側の決定

各隔壁供試体の加熱側は、はじめ断熱上不利と推定されるような側から加熱すること、および直接鋼板面が露出しているものは変形が著しくなるよう鋼板側から加熱することを基準としてそれぞれ定めた。しかし実験の結果はむしろ反対側から加熱した場合の方が不利であろうと推定されるものも出たので、これらについては両面より加熱してみても比較すべきである。

甲板供試体は下側から延焼する場合を考えてすべて下面を加熱面とした。

3・5 温度測定方法

温度測定にはアルメルクロメル裸熱電対（径 0.65 mm）を用い、次の 7 箇の計器を温度範囲により適宜切換スイッチで使用して、温度を原則として 3 分毎に読みとつた。

温度指示計	0～100/200°C	1
〃	0～500°C	1
〃	0～1,000°C	1
〃	0～1,200°C	2
温度自記記録計（6 点）	0～100/500°C	1
〃（〃）	0～500/1,000°C	1

測定箇所は次の 4 群に分けられる。

- イ) 加熱温度 供試体表面より 20mm 突出させた点で測定し、隔壁供試体では 9 箇所、甲板供試体では 5 箇所の平均を加熱温度とした。
- ロ) 裏面温度 供試体裏面に密着させた熱電対を 10×10 cm、厚さ 1 cm のアスベストパットで覆い、原則として加熱温度測定点と対応する位置を選び、隔壁供試体では 9 箇所、甲板供試体では 5 箇所を測定した。
- ハ) 供試体の内部温度 供試体内における温度勾配を測るため、原則として供試体の中央で厚さの方向に数箇の熱電対を挿入して温度を測定した。これには一般的な部分（ステイフナー又はビーム等を避けて）と構造上の特殊の部分（ステイフナー、ビーム、その他貫通金物、支持金具等の部分）との二つの群がある。

4 試験状況各論

4・1 A 級 隔 壁

A 級隔壁供試体は合計 11 箇の加熱試験を行い、その内 不燃性材料だけで構成されたもの（ⅠA）9 箇、木製内張りを併用したもの（ⅡA）2 箇で、これを断熱値で区分すれば計画断熱値 60 分以上のもの（断熱値 H）6 箇、30 分以上 60 分未満のもの（断熱値 M）5 箇である。

これらの詳細な構造図、測定結果等の一例は附図に示すが、概要を綜合したものを Table 9～10 に示す。

A 級隔壁はいずれもその主体が鋼構造であるため、1 時間以上加熱試験しても裏側へ煙や焰が抜けるものはない。また各供試体に用いた種々の断熱材の耐火性は次のようであつた。

1. 硬質石綿板

（イ） 隔壁鋼板が直接加熱された場合

一般に変形が大きく、そのため断熱材やまたその取付ビス類が破損したものがある。折損した取付ビスはチャンネルライナーと硬質石綿板とを取付けてあるもので、この境の面で平滑に切れており、チャンネルライナーが熱膨脹したためにスクリューに剪断応力がかかつて切れたものと想像された。

また、変形が著しかつたために、硬質石綿板に亀裂が生じて遂には完全に割れてしまったものもあるが、この場合は取付ビスは折損しなかつた為に断熱材の脱落は免かれた。(I A H7 の場合)
(ロ) 硬質石綿板が直接加熱された供試体

実験開始後 58 分頃に加熱側の硬質石綿板が爆裂音と共に割れ、事実上破壊脱落したもの 1 箇所を除き、他のものは 60 分の加熱試験中、かなりの亀裂は認められても破壊脱落する迄には至らなかつた。その他硬質石綿板のみを単独に加熱した結果に徴しても、一般に硬質石綿板の耐火性はこの程度のものと認められる。

2. スプレイドアスベスト

スプレイドアスベストは直接焰で加熱された場合 (I A H 18 のような場合) は鋼板との接着面に間隙を生じ、脆くなり殆んど強度を失い、僅かにクリップで支えられていたが実際には間もなく脱落するものと思われる。これに対し、接着している鋼板の反対面から加熱されたものは崩壊することはなかつたが、鋼板面から離れクリップで支えられているのは前者と同様であつた。

3. フレキシブル板

厚さ 8 mm のフレキシブル板は加熱に対して予想外に丈夫であり、一般に 40~45 分位迄保全性を保ち、甲板の天井張りの場合も略々同様であつた。

4. 岩 綿 板

岩綿板は崩壊脱落等のおそれあるものはなかつたが、I A H 12 では岩綿板の四隅継目部分に多少の隙間があり、それが第 1 層第 2 層とも同一の所に重なつていた箇所では断熱値が低下したため、供試体裏面のフレキシブル板表面が茶褐色に変色した。船に装備した場合、振動その他により隙間が生じてくることが考えられるから、厚さ 50 mm 位の岩綿板は必ず 2 層とし、その継目は常にずらす方が安全である。

これら A 級供試体はすべて各々の一般部分が充分の計画断熱値を持つにも拘わらず、ステイフナー、チャンネルライナー等構造上の特殊な箇所が断熱上の弱点となることは、しばしば認められ、その例として I A H7, I A H18, I A M14 等がある。特に計画断熱値の低いものはステイフナー等の断熱に注意を要する。

また、A 級隔壁に木製内張りを取付けた供試体 (II A M6 および 7) の加熱試験の結果は、いずれも計画の断熱値 30 分以上を有したが、60 分間の加熱試験が終らぬ内に内張りが炭化あるいは発火し、保全性はあるにも拘わらず裏面に焰が通過したと同様の結果になつた。この事は国際条約の条文にもある通り、可燃性内張りがある場合の A 級隔壁は少くとも 60 分の断熱値を必要とし、それ以下の断熱値では極めて危険の多いことを示している。

なお、木製内張りの内面は、高温部材との接触面から発火するばかりでなく、輻射熱のためエアースペースを隔てて発火することが多い。したがつて木材に直接々触しないステイフナーウェブ等もそれが高温となる懼れがあれば断熱材で被覆する必要がある。

また、これらの供試体のように、加熱面の反対側にエアースペースを設けたものは内部の空気の流れのため上部が高温になり、この附近内張りより最初に発火した。

4・2 A 級 甲 板

A級甲板供試体は3箇の加熱試験を行つた。計画断熱値はいずれも60分以上のものであり、断熱性・保全性はいずれも優秀で、構造上不安な点は認められなかつた。

変形のためデッキコンポジションに亀裂が生じたものもあるが、いずれも鋼板には強固に附着しており、かつ殆んど不燃性と認めてよく、その断熱性は極めて有効である。

厚さ5mmのフレキシブル板天井張りは30分間程度の保全性を有し、それだけ鋼板が直接加熱されるのを遅らすのに役立つており、また割りピンやスタッドによる岩綿板の取付方法も適当と認められた。

一般にデッキコンポジションのある甲板は既にある程度の断熱効果を持つため、断熱値を保たせるため必要な断熱施工は簡単ですみ、25mm厚の岩綿板で保護するか、あるいは甲板下のエアースペースを隔てて不燃性天井張りを設けるだけで60分以上の断熱性を持たせることができる。

また、ビームが被覆されず露出したもの、および鋼板が直接加熱されるものはそれぞれビーム直上およびアンカーピース直上が断熱上の弱点となつてゐるが、制限温度をこえたものはない。

4・3 B 級 隔 壁

B級隔壁供試体計8箇の中、不燃性構造のものは1箇(ⅡB M1)で、他はすべて木材と併用したものである。なお、他に規程以外の参考用木製隔壁2箇(Ⅱc L1, 2)を加熱試験した。

不燃性材料のB級隔壁はⅡB M1の様に硬質石綿板をスチールサッシュに嵌込むものが最も代表的でかつ有効な方法である。硬質石綿板の厚さは船室間仕切壁として単独で使用する場合、強度上から22mm程度が適当であり、その断熱値は30分である。また厚さ16mmのものの断熱値は15分である。

しかしこの構造ではスチールサッシュの断熱が困難であるから、この部分は可燃物を近接せしめぬよう充分考慮しなければならない。

木材と併用したB級隔壁は、断熱材に硬質石綿板を使つたものと、フレキシブル板を使つたものがある。いずれもこれら断熱材と合板を数枚積層接着させた単一のパネルとして用いた。しかしこのパネルの中に断熱材の継目を有するものは、その箇所が保全性能上の欠陥となり、いずれの場合もこの部分から反対面へと燃え抜けた。したがつてこの様なパネルはそれ自体の中に断熱材の継目を持たせず、すべて構造上の継目としてスチールサッシュまたはそれに類する方法をとるのがよい。但しこのような構造上の継目は一般に断熱の弱点である上に、構造自体が可燃物で構成されているから、継目の形式はⅡB M1に類似したものでは危険である。例えばⅡA M7に採用したアスベストライナー等をサッシュと組合せたもの等につき、充分考慮しなければならない。

また、同一厚さの断熱材を使用する場合は、なるべく薄く可撓性のある材料を数多く内層として設ける方が断熱材の変形・剝離・破壊等の危険性を減らす見地から有利である。したがつてⅡB M7の如く、フレキシブル板の3~6mm程度のものを2層以上設けるのが最も簡単で、且つ効果的であると思われるが、木材壁又は硬質石綿板壁に比してやや重量が増加する。またこの種のB級隔壁は一般に保全性に対する余裕が少いから、この中に用いる不燃材の厚さは今回実験したものより幾分大とすることが望ましい。

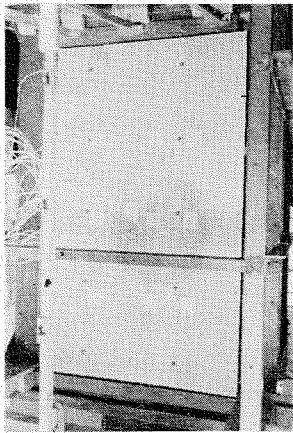


Photo. 3. IAH12 Test Sample
Illustration of test.

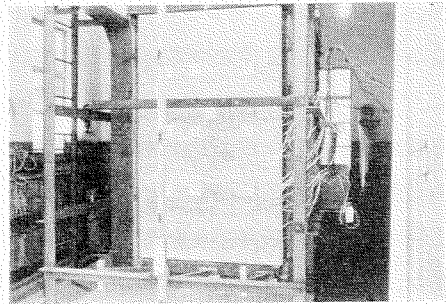


Photo. 4. IAH5 Test Sample
Illustration of test.

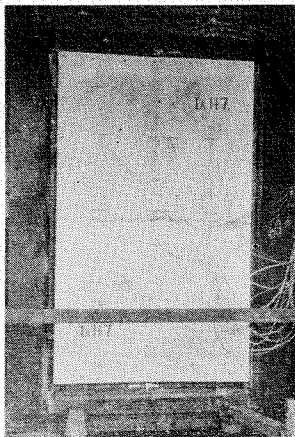


Photo. 5. IAH7 Test Sample.
Showing the sample at a period of 60 minutes.
Deformation is considerable and hard asbestos
board cracks at the middle of sample.



Photo. 6. IAH1 Test Sample
Illustration of exposed surface after the test.
The hard asbestos boards collapse.

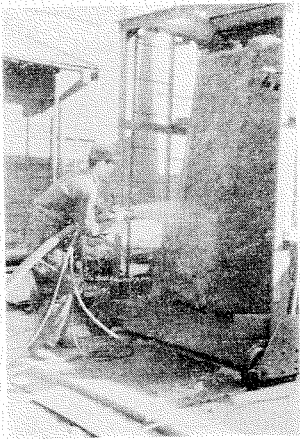


Photo. 7. IA H 17 Test Sample
Illustrating spraying asbestos.

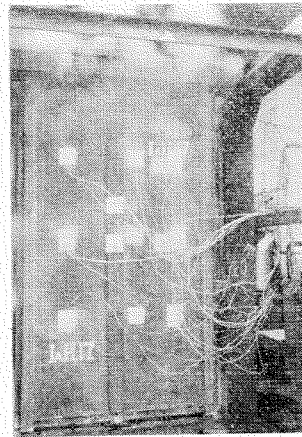


Photo. 8. IA H 17 Test Sample
Illustration at a period of 20 minutes. Asbestos is not dried enough, so it discharge a lot of steam, and its temperature does not reach more than 100°C.



Photo. 9. IA H 18 Test Sample
Illustration of exposed side after test. Some part of sprayed asbestos is stripped off deliberately.



Photo. 10. IA M 16 Test Sample
Illustration of test. Deformation is considerable.

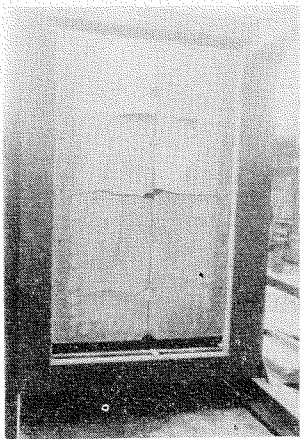


Photo. 11. IA M14 Test Sample

Illustration of the after test. Exposed flexible boards cracked considerably, but maintained integrities for 40 minutes.

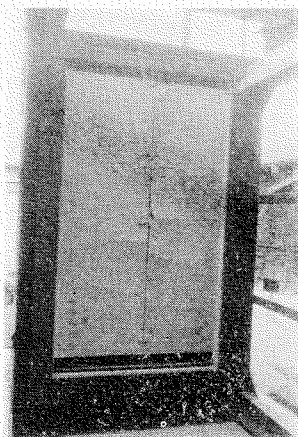


Photo. 12. IA M13 Test Sample

Showing the exposed side after test. Hard asbestos board cracked, but were not damaged.



Photo. 13. IIA M6 Test Sample

After the 60 minutes test, showing the inside of wood ceiling, upper part is more charred.

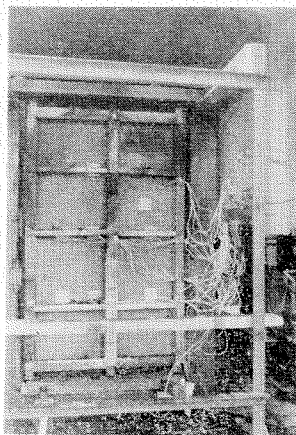


Photo. 14. IIA M7 Test Sample

Illustration of unexposed side without plywoods that are burned out after test.

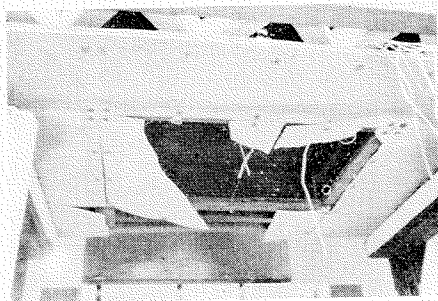


Photo. 15. IIIA H 2 Test Sample
Showing the ceiling damaged after test.

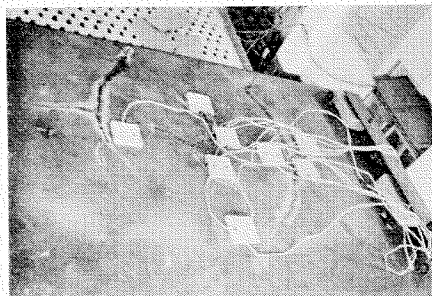


Photo. 16. IIIA H 2 Test Sample
Illustration of deck composition after test.

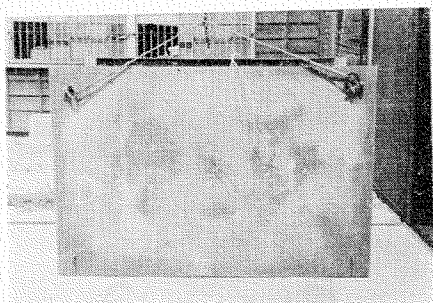


Photo. 17. IIIA H 3 Test Sample
Illustration of upper face of deck composition
which does not any crack.

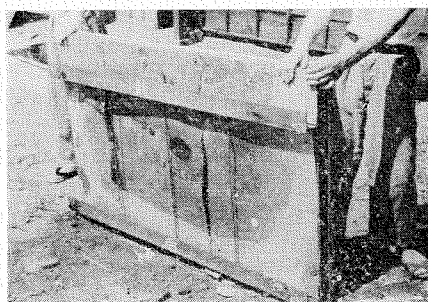


Photo. 18. IIIA H 4 Test Sample
Illustrating the exposed side of sample.

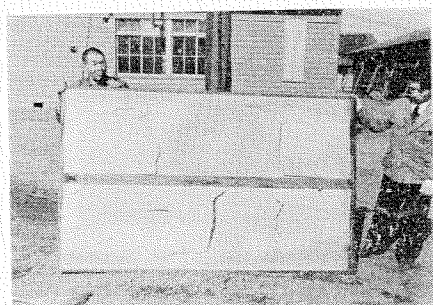


Photo. 19. IB M 1 Test Sample
Showing the exposed side of sample. Flexible
board facing cracks and is striped slightly.

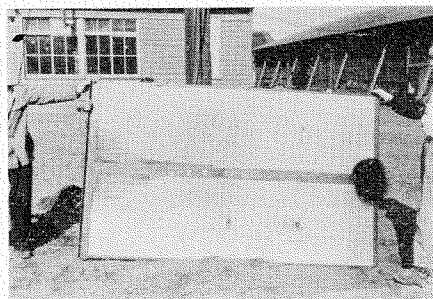


Photo. 20. IB M 1 Test Sample
Showing the unexposed side of sample. Cracks
do not reach through to the unexposed side.



Photo. 21. IIБ M 2 Test Sample
Illustration of the sample at the end of 30 minutes test. The sample still burns.



Photo. 22. IIБ M 2 Test Sample
At 35 minutes, flames spread over the unexposed surface.

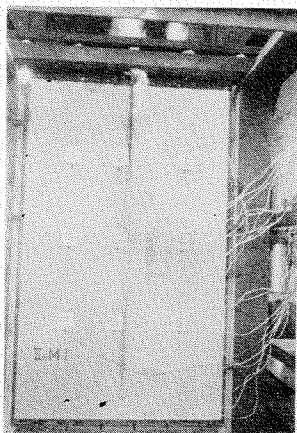


Photo. 23. IIБ M 1 Test Sample
Flame passed through the sample in joint at a period of 28 minutes.

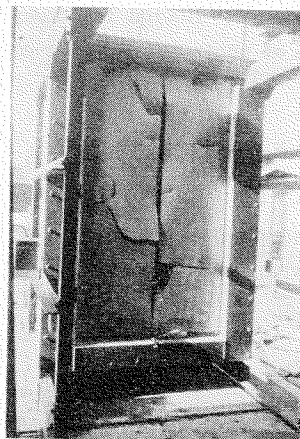


Photo. 24. IIБ M 1 Test Sample
Illustration of the exposed side after test.

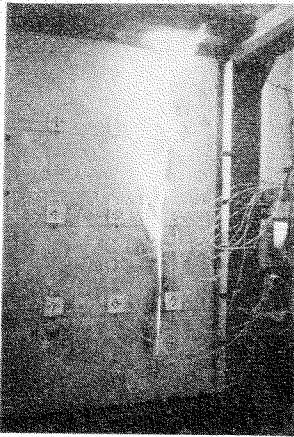


Photo. 25. IIБ M 3 Test Sample
Illustration at the end of test. Unexposed
side woods started to burn.

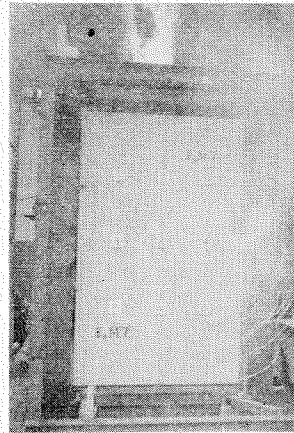


Photo. 26. IIБ M 7 Test Sample
Showing the unexposed side at the end of a
period of 30 minutes test. The unexposed woods
don't burn yet.

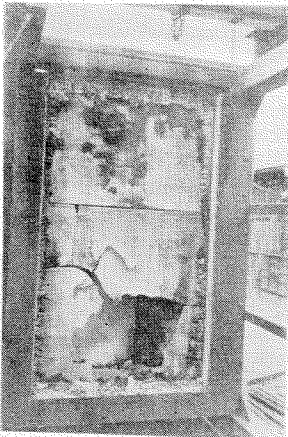


Photo. 27. IIБ M 7 Test Sample
Showing the exposed side after test. Integrity
was maintained.



Photo. 28. IIБ M 9 Test Sample
After the test, unexposed side wood started to
burn.

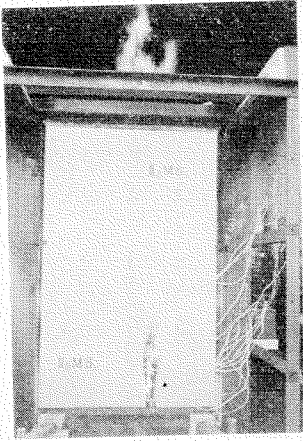


Photo. 29. IIB M 8 Test Sample
At the end of test, unexposed side wood started to burn at the joint of hard asbestos board.

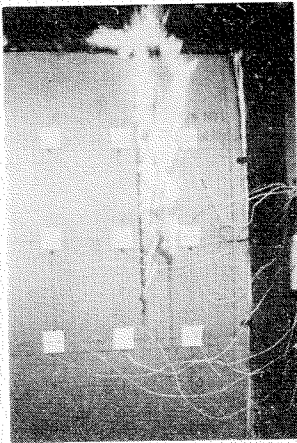


Photo. 31. IIC L 1 Test Sample
Illustration at the end of 30 minutes test. After that, the sample burnt out at all.

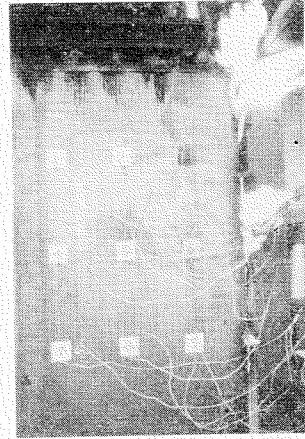


Photo. 30. IIB M 6 Test Sample
Illustration of the test sample at a period of 21 minutes.

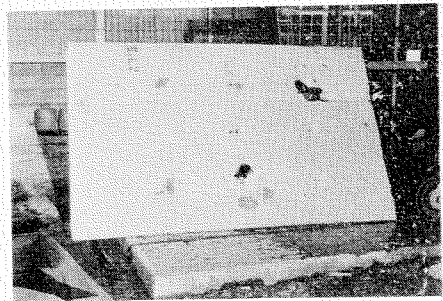


Photo. 32. IIC L 2 Test Sample
Illustrating the unexposed surface after test. It burnt through at two parts.

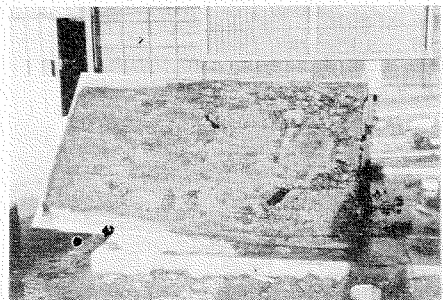
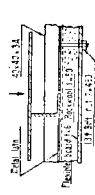
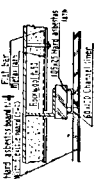
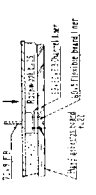

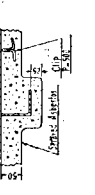
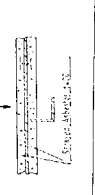


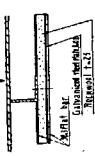
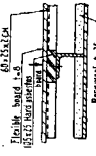
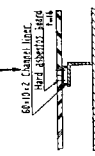
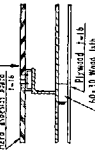
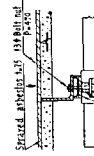
Photo. 33. IIC L 2 Test Sample
Illustrating the exposed surface after test. Wood charred considerably.

Table 9. Heating Tests of A-Class Bulkheads (Insulation H)

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)	Integrity (min)	Insulating Value (min)	Time (min)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
						Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of Area under Furnace Temperature and Standard Fire Temperatures	Average	max.		
IAH12		263	more than 90	more than 90	0	—	—	7	7	Bolt heads which are on the unexposed surface are weak points in insulation. Deformation was considerable. Rock wool joints in the cases they made since clearance have low insulation.	Joints of Rock wool should be shift each other. This structure is not suitable for the cases other side has a possibility of fire.
					15	-120	0.90	7	36		
					30	-145	0.86	16	191		
					45	-154	0.83	38	262		
					60	-143	0.83	70	298		
					90	—	—	114	340		
IAH5		279	more than 90	more than 90	0	—	—	12	12	Screws that fitted hard asbestos board were damaged considerably, for the deformation was large.	It is considered that the fittings of hard asbestos board are much rather strong.
					15	-40	0.93	12	12		
					30	-90	0.92	20	20		
					45	-7	0.93	36	36		
					60	+53	0.96	60	60		
					90	—	—	104	104		
IA(H)7		238	more than 90	45	0	—	—	11	11	Hard asbestos board cracked, for the deformation was large. Insulation on the liner could not reach 60 minutes instead of more than 90 minutes on the other places.	For developing the insulation at joints of hard asbestos boards, it is desired to decrease the height of channel liner to 10 mm and to change flexible liner to hard asbestos board in thickness of 15 mm.
					15	-162	0.89	11	16		
					30	-213	0.77	35	82		
					45	-197	0.77	69	160		
					60	-193	0.81	86	289		
					90	—	—	147	435		
IAH1		277	more than 90	more than 90	0	—	—	10	10	Exposed side hard asbestos boards cracked intensively at the end of 58 minutes period. And the lath of hard asbestos board fractured.	It is observed that the damages of hard asbestos boards are permissible. Integrity and insulation are sufficient.
					15	-53	0.92	12	12		
					30	+49	0.98	20	20		
					45	+55	1.02	40	40		
					60	+46	1.03	70	70		
					90	—	—	132	132		
IAH17		301	more than 90	more than 90	0	—	—	6	6	Because sprayed asbestos was not dry sufficiently, it discharged a lot of steam and unexposed temperature did not reach 100°C. Deformation was considerable.	Sprayed asbestos must be much dried. It is observed that the sample has sufficient insulation of the period of 60 minutes even if asbestos is dried enough.
					15	-25	0.90	34	34		
					30	-53	0.93	94	94		
					45	-49	0.92	91	91		
					60	-43	0.95	88	88		
					90	—	—	85	85		
IAH18		232	more than 90	70	0	—	—	16	16	Sprayed asbestos on the exposed side was brittle, and stripped off in some part.	Insulation is sufficient. It need not to cover on the stiffener like IAH17.
					15	0	0.94	20	20		
					30	+7	1.05	40	40		
					45	+8	1.04	54	54		
					60	+26	1.02	63	63		
					90	—	—	122	122		

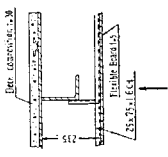
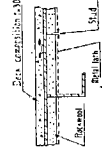
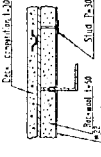
1. In the name of test sample, that one marking () does not maintain designed value, i.e. IA(H)7 does not maintain insulating value for 60 minutes. 2. Arrows illustrated in structures show furnace side. 3. Thickness of steel plates are 6mm, stiffeners are 75×75×6 mm.

Table 10. Heating Tests of A-Class Bulkheads (Insulation M)

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)	Integrity (min.)	Insulating Value (min.)	Time (min.)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
						Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of Area under Furnace Temperature and Standard Fire Temperature	Average	Max.		
I _A M16		245	more than 60	40	0 15 30 45 60	— -46 +44 +36 +14	— 0.99 1.02 1.08 1.03	18 34 75 172 214	Deformation was large. Distribution of the unexposed surface temperatures was uniform.		
I _A M14		293	more than 60	45	0 15 30 45 60	— -53 +26 -20 +12	— 0.86 0.98 1.01 1.00	17 31 51 75 109	17 5 108 195 268	Unexposed side of the stiffener had bad insulation. Other parts sufficiently insulated for the period of 60 minutes.	If stiffener web is covered, insulation shall be sufficient and maintain for the period of 60 minutes. The weight is considerable for thick flexible board.
I _A M13		256	more than 60	50	0 15 30 45 60	— -48 +29 +41 +30	— 0.96 0.99 1.07 1.09	25 56 94 146 193	Unexposed surface temperature was uniform.		Simply construction and suitably for bulkhead maintained insulation M.
II _(A) M6		270	more than 60	35	0 15 30 45 60	— -61 -11 +25 +23	— 0.95 0.97 1.02 1.04	7 38 104 185 258	7 61 142 246 312	This is a sample of ceiling wood panels to I _A M13. Wood lathes and plywoods of upper parts charred but didn't flame.	The unexposed temperatures are much higher than those of I _A M13, so it needs attention to ceil a wall with woods.
II _(A) M7		230 (Except woods)	more than 60	35	0 15 30 45 60	— -40 +33 -72 —	— 1.06 0.97 0.96 —	20 75 93 200 —	20 80 125 335 —	Woods started to flame at the end of 45 ~50 minutes period. It reached to the ignition point by heat radiation.	This is unsuitable for A-Class construction for the reason mentioned above. Covering the web decreases the hazard wood starts to burn. The asbestos liners are efficient to insulation.

1. In the name of test sample, that one marking () does not maintain designed value, i.e. II_(A)M6 does not maintain A Class integrity.
2. Arrows illustrated in structures show furnace side.
3. Thickness of steel plates are 6 mm, stiffeners are 75×75×6 mm.

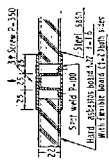

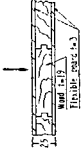
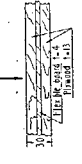
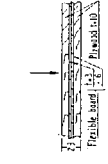
Table 11. Heating Tests of A-Class Deck

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)	Integrity (min.)	Insulating Value (min.)	Time (min.)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
						Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of Area under furnace Temperature and Standard Fire Temperature	Average	Max.		
III AH2		109*	more than 90	75	0	—	—	28	28	At 45 minutes, flexible boards of ceiling cracked and steel deck was heated directly. And then the deck deformed considerably, deck composition cracked and temperatures of surface on anchor pieces rose.	
					15	-11	0.61	34	40		
					30	+ 5	0.99	67	86		
					45	+30	1.05	87	103		
					60	- 4	1.02	107	138		
					90	—	—	124	265		
III AH3		110*	more than 90	more than 90	0	—	—	30	30	Deformation was slight, deck composition didn't crack.	Unexposed temperatures on the beam rose higher than the other places, but it is not need to insulate the beam.
					15	-65	0.97	35	41		
					30	-12	0.98	56	82		
					45	-19	1.00	89	104		
					60	0	1.00	104	113		
					90	—	—	110	131		
III AH4		106*	more than 90	more than 90	0	—	—	30	30	The sample deformed slightly as the beams were heated directly, but the deck composition did not crack.	Ditto
					15	-49	0.98	34	40		
					30	-59	1.00	44	76		
					45	-18	0.94	62	98		
					60	- 8	1.00	79	109		
					90	—	—	103	133		

*: Weights are ones per one beam space (800 mm) × 1,000 mm.



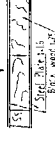
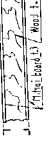
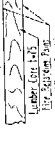
Arrows illustrated in structures show furnace sides.
Thickness of steel plates are 6 mm, Beams are 125 × 75 × 7 mm.

Table 12. Heating Tests of B Class Bulkheads (No. 1)

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)	Integrity (min.)	Insulating Value (min.)	Time (min.)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
						Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of Area under Furnace Temperature and Standard Fire Temperature	Average	Max.		
I _B M1		64.2	more than 60	30	0 15 30 45 60	— +67 +72 +78 +53	— 1.02 1.03 1.06 1.06	10 69 148 270 363	10 213 480 627 640	Steel sash temperatures of unexposed side rose higher than other parts.	
II _(B) M2		71	less than 30	30	0 15 30	— —16 +47	— 0.94 1.02	15 38 76		The sample burned to unexposed side, and lost integrity at 28 minutes.	Flame pass through the joint of flexible boards. So it must be better to joint with strap or sash. Insulating materials must be increased in thickness.
II _(B) M1		58	less than 30	30	0 15 30	— —17 +20	— 0.83 0.99	15 52 98		At 23 minutes after start, Flame passed through the sample, and integrity was lost.	Ditto
II _(B) M3		64	less than 30	30	0 15 30	— —10 +33	— 1.17 0.91	9 31 121		At 28 minutes after start, the sample burned to unexposed side, and lost integrity.	Ditto
II _B M7		83	30	30	0 15 30	— +40 +15	— 1.28 0.95	7 25 90			It must be considered to joint in the same way of II _B M1. The cores of double flexible board are efficient to integrity. This is a typical B Class bulkhead combined with combustible materials.

1. In the name of test sample, that one marking () does not maintain designed value, i.e. I₀₀M2 does not maintain B Class integrity.
2. Arrows illustrated in structures show furnace side.

Table 12. Heating Tests of B Class Bulkheads etc. (No. 2)

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)	Integrity (min.)	Insulating Value (min.)	Time (min.)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
						Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of Area under Furnace Temperature and Standard Fire Temperature	Average	Max.		
II(m)M9		70	Less than 30	30	0 15 30	-9 -17	0.95 0.97	9 41 86		At the joint of hard asbestos board, wood started to burn at 38 minutes and the sample lost integrity.	The joint of hard asbestos board should be avoided in a panel. Thickness of hard asbestos board should be more rather. This is better in insulating value, and less in integrity than II(m)M7.
II(m)M8		53	Less than 30	30	0 15 30	-10 +13	1.13 1.01	3 22 83		This sample does not maintain integrity in the same way of II(m)M9 at 28 minutes.	Ditto
II(m)M6		100	Less than 30	30	0 15 30	+27 +35	0.93 1.03	14 35 97		It is observed that the sample does not maintain integrity for 30 minutes.	The block wood that maintains strength burns, and integrity is lost. It should be insulated.
II(c)L1		45	Less than 30	30	0 15 30	+33 +25	1.26 1.02	11 27 91		At 25 minutes, the sample burned to unexposed side.	
II(c)L2		48	Less than 30	30	0 15 30	-372 -21	0.88 1.00	7 35 79		At 26 minutes, unexposed face paint started to make foam, and fire passed through the sample.	Foam paint is efficient to delay burning for about 10 minutes.

1. In the name of test sample, that one marking () does not maintain designed value, i.e. II(m)M9 does not maintain B Class integrity.

2. Arrows illustrated in structures show furnace side.

5 各供試体の比較検討

5.1 断熱効果

各供試体について、供試体内部の温度勾配を調べるため、数箇の熱電対を中間に挿入し温度を求めた。これによつて使用した各種の断熱材、エアースペース等の効果を推定することができる。もつとも加熱温度の分布を完全に均一にすることは不可能に近いから、供試体内部の一点で測つた温度をもつて、その平面全部の温度と考えることは危険であるが、大体の傾向を論ずることができる。

- (1) エアースペースは低温の場合は相当の断熱効果をもつが、高温になるにつれてその効果は減少する。また、壁または甲板に設けるエアースペース厚さには自ら制限があり、極端に小さくすることはできない。したがつてエアースペースの厚さによる影響はあまり認められない。
- (2) エアースペースでは高温になる程輻射による伝熱が大きな割合を占め、しばしばエアースペース内の空気温度よりも、その被加熱面側の表面温度の方が高くなつていくものがある (IA H12 のハ-1 と ハ-2、または IA H1 のハ-5 と ハ-6、IIA H2 のハ-2 と ハ-4、IA M14 のハ-1 と ハ-2 および IA M16 のハ-2 と ハ-3 の温度がその関係を示している)。
- (3) 上記の影響は勿論、その両面の材料の輻射恒数や温度等によるわけであるが、IA H12 の例で見るとそのエアースペースを貫通しているステイフナーの熱伝導よりも、輻射による伝導の影響の方が急激である。即ちエアースペースの部分での ハ-1、ハ-2 等はステイフナーの部分での ニ-1、ニ-2 等よりも早く高温になり、それが略々定常に近くなつたのを示す頃になつてから、ニ-1、ニ-2 はなお熱伝導によつて上昇を続けている。この傾向は岩綿の中央で測定した ハ-3 と ニ-3 の比較で一層顕著である。

また、IA H12 の岩綿厚さを半減した IA M16 でも似た傾向が認められる。

- (4) 供試体 IA H12、IA M16、IA M13 等の如く、ステイフナーの部分に特に断熱材を用いないものは、ステイフナーの熱伝導のため、そこが断熱上の弱点となりやすいから、要すれば (特に断熱値 H のものは) IA H5、IA M14 の如く、ステイフナーに断熱材の根太を使用する方が安全である。

即ち、IA H5 の場合は、ステイフナーは岩綿で覆われずにエアースペース内に露出している為、ステイフナーはかなり高温となつていくにも拘らず、25mm 厚の根太に依り断熱されている裏面温度は却つて一般裏面温度よりも低くなつていく。

- (5) IA M14 はステイフナー・フランジ部分を硬質石綿で断熱しているにも拘らず、ウェッブを断熱していないために高温のフレキシブル板からの輻射でウェッブ温度が上昇し、この取付点裏面が高温となつた。またこれを反対面から加熱すれば、フレキシブル板の一般部分裏面が同様の影響を受けると思われる。よつてステイフナー・ウェッブを断熱すれば断熱値 H をえられると思う。
- (6) IA H7 は硬質石綿板の継目の箇所にチャネル・ライナーを設けたため、この部分の断熱性が劣りその裏面は計画断熱値を保ち得なかつた。即ち硬質石綿板とチャネルとの間には断熱材をはさむ必要がある。
- (7) 供試体 IA H1 の各種の点の温度は 始め上昇が緩やかで 後になる程急となり、90 分の終了時

でも定常状態には程遠い。これは硬質石綿板の熱容量が大きく温度伝導率が小さいためである。特に裏面側（スチフナー側）の硬質石綿板の内面温度 $\bar{h}-6$ と裏面温度とを比較してみると明らかで、この様子は $IA\ H\ 5$ ($\bar{h}-5$ と裏面温度の比較), $IA\ M\ 13$ ($\bar{h}-10\sim 12$ と $\bar{h}-1$ および $\bar{h}-2$ の比較), および $IA\ H\ 7$ ($\bar{h}-2$ と裏面温度の比較) のおのおの場合も同様である。

- (8) 云う迄もなく加熱された鋼板又は鋼材に連らなつて裏面迄貫通している鋼材部分（例えば $IB\ M\ 1$ のサッシュおよび $IA\ H\ 12$ のボルトナット等）は断熱上の弱点となる。したがつて甲板の場合はアンカーピース上の裏面が弱点となる（即ち $IIIA\ H\ 2$ の $\bar{h}-8$ の部分）。但し $IIIA\ H\ 3$ および 4 の如く鋼板が直接加熱されなければ此の影響は殆んど認められず、露出しているビームの真上が弱点となる。同様に $IA\ H\ 7$ 供試体はチャンネルライナー部分が最も弱点である。

5・2 加熱面について

各隔壁供試体は先に述べた様に断熱上若しくは変形上一応不利と思われる面を選びこれを加熱面としたが、この反対面から加熱した場合を推定すれば、略々次のことが考えられる。

- (1) 保全性が信頼できぬもの 供試体 $IA\ H\ 12$ の断熱材は $450\times 610\text{ mm}$ 間隔のボルトで取付けられているに過ぎず、この実験状況よりみてフレキシブル板、岩綿板は共に脱落するおそれがある。
- (2) 断熱性が劣ると認められるもの もしも長時間に亘つた場合には $IA\ H\ 5$ のスチフナー裏が弱点になると思われるが 60 分の断熱値は保有できるであろう。又 $IA\ M\ 14$ のチャンネルの箇所および $IIA\ M\ 7$ のスチフナー裏はいずれも高温となり、特に後者は 30 分の断熱値を保ちえないものと思われる。
- (3) 上記以外のものは、一応同程度かまたはより優秀なものと推定できる。

6 所 見

6・1 防火構造における可燃性材料について

国際条約で規定されているように、第 1 方式は A 級 B 級をとわず原則的に可燃物を使用してはならないが、居住場所に限り壁及び天井の全表面に厚さ 2.54 mm で張つた可燃性被覆はさしつかえなく、これは単なる化粧張りとする。

第 2 方式で対象となる防火構造は A 級だけであるが、その可燃物に対する考慮は第 3 方式に準ずればよい。

第 3 方式においても可燃物はなるべく用いないことが望ましい。しかし所要経費の低減、室内装飾工事の容易などの見地から我が国では可燃性材料の併用が要望されている。このような場合 A 級では保全性および断熱性とも、少くとも 90 分程度の不燃構造（例えば $IA\ H\ 5$, $IA\ H\ 12$ など）に木製内張を附加し、また B 級では $IIA\ M\ 7$ などを標準とするのが適當であろう。但し、これらの B 級隔壁は一般に大きさ 4×8 尺程度のパネル板を組合せて構成されるであろうから、その周辺を連結するサッシュが所要の断熱値を保持できるよう充分な考慮を必要とする。

6・2 加熱試験における可燃性材料および裏面温度の取扱について

上に述べたように、同じ可燃性材料でも A 級、B 級区画により、また、各方式により取扱い方が異なる。したがつて、加熱試験の場合もそれぞれ取扱い方を考慮しなければならず、また裏面温度の定義

も違ってくる。本実験では種々討議の上、次のような方針が最も妥当であるとの結論に達した。すなわち、第1方式ではA級およびB級とも可燃性被覆があればこれを取り除いて加熱試験を行う。したがって裏面温度とは不燃性材料の曝露面の温度となる。

第2方式および第3方式では不燃性材料だけで構成されたA級隔壁は第1方式に準ずる。可燃性材料の内張を有する場合、それが加熱側にあるときはこれを取除き、裏面側にあるときは附けたままの状態で加熱試験を行い、裏面温度は不燃性材料の表面、すなわち、内張の内部で測定する。

第3方式のB級隔壁は可燃物の有無に拘らずそのままの状態で行い隔壁を形成する曝露面で測定した温度を裏面温度とする。

6・3 裏面温度が制限を超える特殊の個所について

防火構造のあるものには裏面に露出した一部の特殊の個所（例えば IA H12 のボルト頭、IB M1 のスチールサッシュなど）で加熱実験の早期に制限裏面温度を超えるものがある。これらの個所は設計の際できるだけ避けるよう努むべきである。

VII 結 び

本試験研究の成果は、これを大別すれば

1. 非定常熱伝導を解明した理論研究の完成
2. 断熱材の温度伝導率測定方法の確立
3. 実物大隔壁および甲板模型の加熱実験による具体的な設計資料の集成

の3である。第1は均一な材料の単板がその表面から加熱されたとき任意時間後における裏面温度を算出する方法を明らかにした。更に複雑な構造を有する一般の船体隔壁または甲板に直接これを応用することは不可能であるが、これら不燃構造の一面が加熱されたとき、その反対面におよぶ温度の伝導状況に関し定性的な理解をうることに極めて役立つ。第2は材料の温度伝導率を測定できることとなつたため、船舶の不燃構造に将来採用されるであろう各種断熱材の性能について一つの指針を与えることができた。第3は実物大模型の標準火災実験を行うことによりそれぞれ所要の保全性および断熱値を有する略々代表的な防火構造の標準を定め得た。

この種の実験は我々の知る限りでは米国および英国で少しく行われているに過ぎない。これらはすべて不燃構造で形成されたA級に限られ、かつ使用した断熱材はすべて硬質石綿板（米国および英国）およびスプレイドアスベスト（英国）であつた。蓋し欧米諸国が第1方式もしくは第2方式を採用し、またこれらの断熱材が広く普及されている現状と想像を合わせれば当然のことであろう。翻つて我が国における硬質石綿板およびスプレイドアスベストの歴史は極めて日が浅く、その生産量、価格などの点で将来に俟つべき多くの問題がある。また第1方式および第2方式は相当の経費を要するが、一般貨物船にも防火構造を汎く普及させたいとの主旨から、我が国では第3方式に対する資料もある程度必要であるとの見解に達して本試験には可燃性材料と組合せたB級隔壁を加えたものである。

今後、船舶防火構造の設計に当り本研究の成果が適切に採用され、船舶安全性の向上に資することが出来るものと期待するものである。

VIII 前年度研究との関連

本研究は船内の火災の蔓延を阻止する具体的対策をたてる目的のために今述べて来たところの前年度研究に引続いて行われた。

即ち、前年度研究に於いて、

1. 断熱材の温度伝導率測定と、非定常熱伝導解による断熱性能の研究
2. 実物大隔壁および甲板供試体の加熱実験による断熱性能、保全性能の研究

を終了し、防火構造の断熱性判定の方法を解明すると共に、代表的な構造の断熱性、保全性に関する具体的な資料を集めることが出来た。

しかし尚、前年度の研究だけでは防火構造の総合的結論を導き出す迄には至っていない。即ち、まず隔壁・甲板等の防火性に関する資料は得たが、これに附随する種々の開口部、特に防火扉の防火性に関してはまだ何らの資料も得ていない。

さらに、防火構造の根本問題に遡つて、火災荷重について種々の検討を加える必要がある。従来の本研究に於いては、凡て国際条例に規定された標準火災試験を火災荷重として来たが、これは陸上耐火建築物の火災資料から導き出されたものであつて、船舶の構造・材料・機能等の特殊性を考えれば船内の火災がそれと同等であるとは云えない。

欧米で行われた船舶火災実験でも、この点を研究目的の一つとしているが、船舶火災の多様性を考えれば僅か数回の実験で結論を出すことは難かしいと思われるし、又これらの実験では火災性状を左右する要素（流入空気量、排出ガス量、可燃材料等）に関する資料が不足している。

又、従来隔壁・甲板供試体の標準火災試験は数多く行われ、それらの耐火・防火性能については多くの資料が得られたが、これだけでは判定不能な要素も多く見出されて来た。即ち最も弱点となりやすい隔壁の継手、甲板との接合部分、各種貫通金物、電纜、トランク等からの危険性等については未研究の部分が多く、又、実際に構造物として火災になつた場合の変形、及びそれで生ずる各種隔壁、扉類の変形破壊と云う点にも多くの疑問が残されている。

従つて、本年度研究の内容は次の如くに定められた。

1. 前年度研究の、防火構造供試体の加熱試験の延長として、防火扉に関する試験研究
2. 船内火災荷重の判定、防火構造の総合的資料を得るための船室模型火災実験

IX 防火扉供試体の加熱試験

1 緒 言

防火構造に設けられる扉には、A級構造に対するA級耐火扉と、B級構造に対するB級扉とがある。法規上、何れも断熱性能は要求されないが、それが取付けられている隔壁と同等の耐火性を有することが必要である。

従つて実験に於いても断熱値の測定は従となつて、扉の変形、蝶番、ラッチ又はロック等の強度等の保全性の観測が重要となる。

今回実験を行つたものは A 級扉 2 箇、B 級扉 3 箇の合計 5 箇である。A 級扉は何れも主垂直区画用、階段囲壁用として自動閉鎖方式を備え、鋼壁に取付けられ、又、B 級扉は主に船室用の軽量のもので、硬質石綿板壁に取付けられる。使用した断熱材、工作法の趣旨、供試体符号、試験設備、試験方法、供試体取付方法、測定方法等は従来の供試体試験方法と同様である。但し、供試体符号中、第 1 番目のローマ数字 V は扉の意味である。(前年度報告 VI 章、1 参照)

供試体の加熱側は何れも蝶番の露出している側とした。これは蝶番等の扉の保持金具の耐火性のためには厳密側の試験となること、通常船室扉は内開きであるから火災側となりやすい船室側からの状況に似せるためとであり、陸上建築物の諸規則、米国 Coast Guard 等の試験方法に従っている。

2 試験状況各論

2・1 A 級 扉

A 級耐火扉は A 級隔壁に設けられるものであるから、主に大火災となつた場合にこれを阻止するのが目的である。

この種の扉は常時開放状態にあり、火災時にだけ作動して閉鎖状態となるのが建前と考えられる。従つて扉自体の耐火性ヒンズ、ラッチ、ロック等の耐火保全性の他に、さらに長期間に亘る信頼性等が重要である。又、自動閉鎖装置があるものはその信頼性がさらに重要視される。

以上の趣旨に従つて 2 箇の供試体が製作試験された。その構造の詳細、試験結果等は附図に示すが、概要を Table 13 に掲げる。

供試体 VAH1 は岩綿を充填した板厚 1.5 mm の Hollow Steel 製である。ヒンズは真鍮装のスパイラルヒンズを上・下 2 箇所に設け、これにより扉はその自重で開いた状態から自動的に閉鎖する。ヒンズの軸の径は 10mm、スパイラルのピッチは 25mm (スパイラルの傾斜は約 38.5 度) である。しかしこのような形式ではヒンズの摩擦が大きく影響し、扉の自動的閉鎖能力には自から限度がある。Fig. 12 に扉の自動閉鎖のモーメント及び開けるに要するモーメントの実測値を掲げる。

理論上は何れのモーメントも扉の開度に関係に一定の筈であるが、これが開度により違ふのは僅かの歪によるヒンズの摩擦力の差、扉の傾斜等によると考えられる。さらに壁面を僅か傾けた場合に

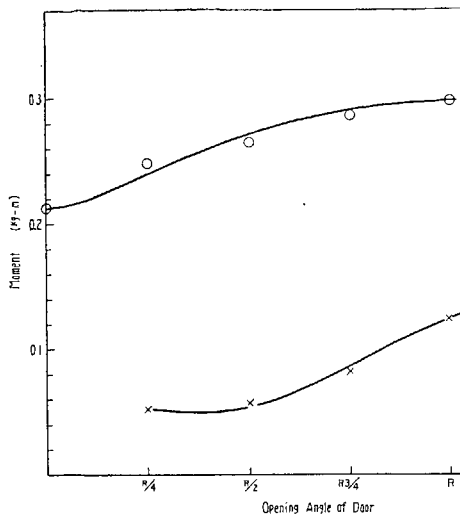


Fig. 12 Moment to Open Door (○ Mark), and Moment of Self-closing (× Mark)
VAH1 Test Sample

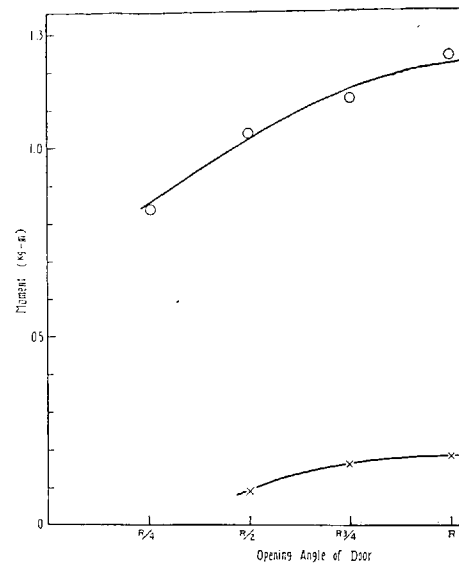


Fig. 13. Moment to Open Door (○ Mark), and Moment of Self-closing (× Mark)
VAH2 Test Sample.

は扉の自動閉鎖能力は全く信頼出来なくなる。扉の重量を大きくすると閉鎖力は増すが一方開けるのにも力を要し、又、スパイラルヒンジの構造等に無理が生ずる。

ラッチは上・中・下の3箇所に設けられ、中央部のハンドルにロットで連結されていて一挙動で開閉出来る。

加熱試験の結果は扉の熱変形のためヒンジが破損し、そのため30分で試験を打切った。ヒンジが破損し始めた時刻は不明であるが、試験終了時には上・下のヒンジは蝶番の羽根の部分で完全に切れており、この保全性はA級扉としては不十分と考えられる。

断熱性については、扉の枠、補強材、ラッチ、ハンドル等裏面温度が高温になる箇所が多く、一般部分の裏面温度をもつて断熱性を論ずることは余り意味がない。最高温度はかなり高くなつて計画断熱値を上廻るが、これ以上の断熱は不要と考えられる。

供試体 VAH2 は板厚 4.5 mm の Single Steel 型であり、VAH1 に較べて扉の枠等も強力な部材を使用してある。断熱材は同じく岩綿を主として用いた。ヒンジは鋼製で、上・下2箇所であるが、扉のヒンジ側中央部にボスがあり扉を閉鎖したとき枠の孔と嵌合するようになっている。そしてこのヒンジの軸心線が鉛直線から約 $1^{\circ}45'$ 傾けてあり、扉を開くにつれて扉の重心が昇り、扉の自重の水平分力が生じてそれが閉鎖力となる。この力は 180° 開放で最大に達し、それ以上開けると逆方向に作用するため閉鎖力は失われる。

しかし VAH1 と同様、軸の摩擦が大きく、又傾斜した場合の閉鎖力を大きくするためには扉重量を大きくするか、軸心の傾斜を大きくしなければならないが、何れも開くのに大きな力を要するようになり、且つ軸心の傾斜も美観、その他から自ら限度がある。

ラッチは VAH1 と同様、上・中・下の3箇所でハンドルで一挙動で作動するが、扉の重量が大き

く、開くに要する力も大きいため、ハンドルの強度が不足気味であつた。

試験の結果の耐火性は良好であり、ラッチ、ハンドル、ヒンヂ等は異状なく、一時間の保全性を認めた。

2・2 B 級 扉

B級防火扉はB級隔壁に設けられるものであるから、一般には船室用の扉と考えられる。従つて軽量で常時の使用に耐えるものでなければならない。

今回製作試験した供試体は何れも硬質石綿板壁にサッシュを設けて扉を取付けた供試体で、硬質石綿板製扉の VB M1, Single Steel 扉の VB O2, Hollow Steel 扉の VB O3 の計3箇である。

何れの供試体もヒンヂは5インチのものを上・中・下の3箇所に、ロックは中央に1箇設えている。何れも従来造船所で使われている部分をそのまま流用したものであるが、30分間の加熱試験に於いてはその耐火性は充分と認められた。

断熱値では VB M1 が最も優れているが、長期間の使用に耐えるためには VB O2 の方が優れている。

供試体 VB O3 は断熱性では VB M1 にずつと劣るが、Single Steel 扉の VB O2 よりは多少優れ、且つ表面がフラッシュで防音上にもよく船室用扉に適しているので、防火構造用として最も利用される型と考えられる。

3 結 論

防火扉の耐火性能に就いては、断熱性能よりも保全性能が重要であることは始めにも述べたが、さらに扉としての取扱い上の機構が重要と考えられ、特に自動閉鎖装置等がある場合はその機能が問題となる。

従つて単に加熱試験だけによる耐火性能だけで、扉の良否を判定することは避けねばならない。

今回の実験では上記の趣旨から、加熱実験に先立ち、扉の開閉機構、自動閉鎖力等に関しても多少の検討を加えて見たが、勿論これで充分なものではなく、もつと長期間に亘り繰返し使用してみなければ、本当にその良否は判定出来ないと考えられる。

しかし一応の試験結果から得られた結論は次のようになる。

- (1) A級扉の加熱試験結果では、VA H1 はヒンヂの保全性に欠陥があり適当とは認められない。VA H2 の耐火保全性能は良好である。
- (2) B級扉の加熱試験結果では、何れの供試体もその防火性能は充分と考えられる。しかし実船に於ける従来の習慣、居住性等を加味して考えれば VB O3 の Hollow Steel 型が最もよい。
- (3) A級構造は一般にその構造上加熱された場合の熱応力が甚しく、又扉重量も大きいため、ハンドル、ラッチ、ヒンヂ等の金具類は頑丈なものとするべきで、通常の本製扉、又はスチールサッシュ扉等と同一の部品では無理と思われる。
- (4) A級扉の自動閉鎖装置には今回は最も単純な重力式を採用した。しかし重力式では、自動閉鎖力を大きくするためには扉等可動部分の重量を大きくせねばならず、一度閉つた扉を開けるのに大きな力を要するようになり、扉の機能上自ら或る限度がある。さらに今回の供試体のよう

な機構では、船の動揺時、傾斜時には自動閉鎖能力は全く期待出来ず、これは船用として致命的な欠陥である。

ドアチェック等のバネ、又は油圧を利用する方法では、長時間に亘る信頼性、火災時に於ける機能等に多少の疑問があるので、これらについて今後更に検討を加え確実な機能を持つ様一層の改善が望まれる。



Photo. 34. VAH1 Test Sample Illustration at 28 min. Door is deformed considerably.

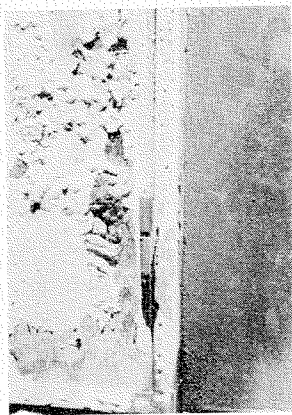


Photo. 35. VAH1 Test Sample Showing the lower hinge damaged.

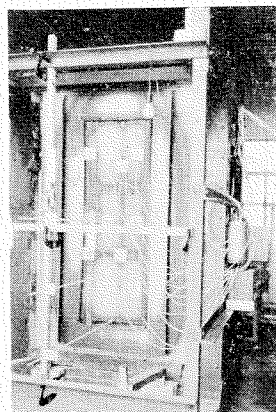


Photo. 36. VAH2 Test Sample Illustration at 44 min.



Photo. 37. VB1M1 Test Sample Showing the furnace side of the sample after test.



Photo. 38. VB02 Test Sample Illustration of test.

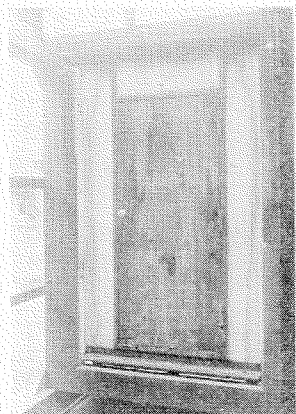
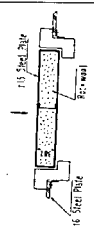
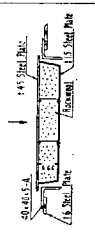
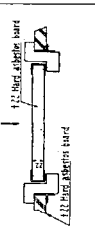
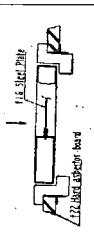
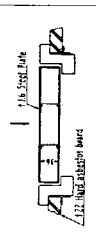


Photo. 39. VB03 Test Sample After test, furnace side of the sample.

Table 13. Heating Tests of Door Assemblies

Name of Test Sample	Structure	Weight (kg)		Integrity (min.)	Insulating Value (min.)	Time (min.)	Furnace Temperature		Unexposed Surface Temperature (°C)		Remarks	Results
		Door	Total				Difference of Standard Fire Temperature (°C)	Ratio of areas under Furnace Temperature and Standard Fire Temperature	General	Max.		
V _A H1		40.5	124.1	15	more than 30	0 15 30	— -17 -7	— 0.91 0.84	19 76 128	19 204 454	Self closing by door weight itself. Installing two spiral hinges (5'') and three latch-bolts.	Both hinges damaged, integrity is not sufficient.
V _A (H)2		65.5	130.5	more than 60	30	0 15 30 45 60	— +20 -18 -17 -16	— 1.03 0.99 0.98 0.98	20 49 106 197 249	20 162 320 420 465	Self closing by door weight itself. Installing two steel hinges, one boss and three latch-bolts. Hinge axis is inclined 1°46' from vertical.	Good integrity.
V _B M1		73	100	30	30	0 15 30	— -58 -23	— 0.89 0.95	22 77 87	22 125 225	Installing two hinges (5'') and one latch	Good integrity and insulation. Door weight is rather heavy.
V _B O2		24	69	30	0	0 15 30	— -141 -60	— 0.87 0.95	20 521 622	20 539 630	Ditto	
V _B O3		37.5	66.5	30	0	0 15 30	— -44 +23	— 0.89 0.98	17 372 599	17 447 659	Ditto	This is not insulated but has sufficient integrity. This is suitable for cabin door.

1. In the name of test sample, that one marking () does not maintain designed value, i.e. V_AH1 does not maintain A class integrity, V_A(H)2 does not maintain insulating value for 60 minutes.

2. Arrows in illustrated in structures show furnace side.

X 船室模型火災実験

1 緒 言

先にも述べた通り、本実験の主目的は

- (1) 火災性状の解明
- (2) 構造体の防火性の調査

の二つである。

今迄の供試体加熱試験が凡て標準火災試験に則っていたのに反し、本実験はその目的からあく迄も実状に即し、凡ゆる条件をなるべく実際の船に於けると同様にする方針で行われた。

船内火災としては、その火災の原因、その区画等により種々の場合が考えられるが、先ず国際条約によつて最も厳しく防火構造が要求されている居住区船室を対象とした。即ち船室模型を使用し、周囲の条件を実船と同様に調えた。

2 船室模型の概要

実験をなるべく実状に近くして行ふとの趣旨から、船室模型は実物大の大きさとし、代表的な定員2名のツーリスト級客室に最小限の隣室、通路を加えたものとした。

防火構造方式を如何なる方式にするかについて種々の検討の結果第3方式によつた。

この船室模型の一般配置図を Fig. 14 に、さらに詳細図を附図に示す。

船室模型の主構造は鋼構造溶接とし、床甲板、天井甲板、及び船室外壁等に相当するP側壁は何れ

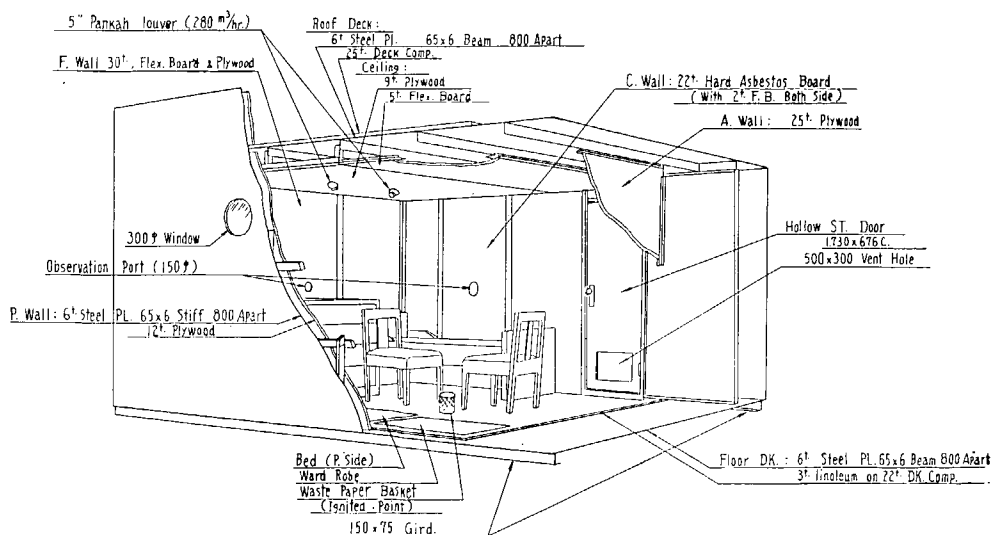


Fig. 14 Model of the Fire Test Room

も厚さ 6 mm, 梁又は防撓材は 65×6 mm フラットバー, 同間隔は 800 mm である。機関室壁に相当する C 側は山型の柱で支持し, 床甲板下部には縦強度を保たせ, 且つ全体の支持のため 150×75×7/10.5 mm の山型を逆付けした。これらの諸寸法は 大体実船の上部構造の一部と考えられ, 且つ加熱試験の供試体とも同程度になるように定められたものである。

船室周囲の各隔壁は供試体加熱試験結果と比較するため, なるべく前年度研究で試験したものから適当なものを選んだ。即ち, 通路隔壁には 硬質石綿板をスチールサッシュに嵌め込んだ IB M1 を, F 側壁にはフレキシブル板の両面を合板ではさみ接着させた IIB M7 と同型式のものをそれぞれ用いた。この両者とも, 供試体で加熱試験した結果 30 分以上の断熱性・保全性を有する B 級隔壁と認められていたものである。A 側壁は第 3 方式に準じて特に防火隔壁とせず, 普通の合板製隔壁が焼失する状況を調べた。但し合板の難燃処理の効果を比較するため, 未処理のもの, 処理済のもの, 及びアスベストシートを内層とする難燃処理の試作合板の計 3 種類を用いてある。

P 壁内張りは可燃性材料とし, 木製根太に 12 mm の合板を張つてある。

床甲板は デッキ コンポジション 22 mm を張つた上に リノリウムを敷き, 天井張りは 木製根太に 9 mm の合板を張り, 一部は 銅製根太に厚さ 5 mm のフレキシブル板を張つた。その工作法等は, IIIA H2 の場合と同様である。天井甲板の上面はさらに居住区があるとの仮定で, 25 mm のデッキ コンポジションを張つてある。

室内の備品・家具等は凡て木材等の可燃材料製とし, 火勢が十分に強まつて火災としては最も苛酷な条件となるように配慮した。

又, F 側隣室, 通路, 上部区画等には, それぞれ隔壁, 又は甲板を隔てて火災の影響が如何に及ぶかを調査するため, 種々の可燃性材料を配置した。即ち F 側隣室及び通路内にも船室内と同様可燃性材料で天井張りを行い, 且つ家具, カーテン等を隔壁に沿い配置し, それらが隔隔のサッシュや継目にも接するようにした。又, 天井甲板上では P 壁を延長してそれに相当する内張りを一部設け, 又, 甲板上面にも木材を取付けた。尚各種材料の比較のため, マットレスは数種類用い, 又, カーテンはその半ばに防焰加工をしてある。

A 壁は防火構造としていないので A 側隣室には特に可燃材料は設けず, 又下部の床甲板下面にも可燃性材料はおいていない。

開口部の大きさ, 配置等は火勢を左右する大きな要素と考えられるので, これも実際の状態に則し, 且つ考えられうる限り最悪の状態となるように配慮した。即ち, 舷窓 (径 300 mm) は 2 箇共開放し, 扉の下部にはルーバーに相当する開口を設けた。この開口には盲蓋を設けてあり全開するとかなり大きなものとなるが, 必要に応じてこれを調節し得るようにしてある。扉自体を開くことは実際の客室の状況に反し, 又扉の耐火性試験とならぬため極力避けるようにした。

尚, 舷窓はアルミニウム合金枠, 厚さ 10 mm の強化ガラス入り, 扉は板厚 16 mm の Hollow Steel 型で VB O3 と同形式である。

機械通風は C 壁上部を貫通して天井裏に設けられたトランクにより, 2 箇のパンカールバー (吹出口径 50 mm) から給気され, その量は送風器のダンパーで加減した。

F, C 及び A 側の各壁には室内の火災状況観測のため 150~250 mm の観測窓を設け, 強化ガラス

を嵌め込み、さらに盲蓋を設けてある。

又、参考のための付随実験として、火災警報装置（サーミスターを用いた差動式の試作品）とスプリングラーヘッドを天井に設備した。

鋼材部分には錆止のペイント 2 回塗り、P 壁にはその上に仕上げ塗り 1 回、室内、隣室、通路等は仕上げ塗り 2 回とし、フタル酸系オイルペイントを用いた。

船室模型全部に使用された可燃性材料、及びその中で船室内にだけ装置されたものは Table 14 の如くなり、さらにその内訳は Table 15~19 に示す通りである。殆んど凡ての材料は実物を用いているが、手廻品等の中、衣類は一部を裁断屑で代用している。

船室内の可燃物全重量は約 635 kg、床面積当り 69 kg/m² となつて、実状の最大に近く、最悪の条件と考えられる。尚、表中の発熱量は火災便覧その他による。

Table 14 Combustible Material in Test

Items	Total			in Test Room			
	Weight kg	Burning weight kg	Calorific values kcal	Weight kg	Burning weight kg	Calorific values kcal	Weight per unit floor area kg/m ²
1. Structures	338.1	310.2	1,300,000	220.4	220.4	925,000	24
2. Furniture (in test room)	283.35	283.35	1,181,400	283.35	283.35	1,181,400	38
3. Ditto (in adjacent room)	100	85	340,000	—	—	—	—
4. Personal effects	86.92	86.92	360,500	86.92	86.92	360,500	9.5
5. etc.	78.2	45	157,000	45	45	157,000	0.5
Total	887	810	3,338,900	635	635	2,623,900	69

Table 15 Combustible Structures

Items	Weight			Material	Remarks
	in Test Room	in Adjacent Spaces	Total		
P wall lathes	20.5	10.2	30.7	Wood 4,200 kcal/kg	Burn out
" panels	29.1	14.5	43.6		
F wall	36.8	36.8	73.6		
A wall	92.1	—	92.1		
Lathes of ceiling	16.0	—	16.0		
Ceiling panels	25.9	—	25.9		
Total	220.4	61.5	281.9		
Lathes of ceiling in F side adjacent room		5.0	5.0	Ditto	Burn out
Ceiling panels in F side adjacent room		9.7	9.7		
Lathes ceiling in passage		3.4	3.4		
Ceiling panels "		10.2	10.2		
Lathes of P wall upper roof deck		13.0	13.0		
Panels of P wall upper roof deck		14.9	14.9		Remained
Total		56.2	56.2		
Grand Total	220.4	117.7	338.1	Burning Weight 310.2 kg Calorific Value 1,300,000kcal	

Table 16 Combustible Furniture in Test Room

Items	Number	Materials	Weight kg	Specific Calorific Values kcal/kg	Calorific Values kcal	Remarks
Beds	2	Wood	90.75	4,200	406,000	} Burn out
Wordrobe	1	"	71.38	"	300,000	
Chest of Drawers	1	"	45.00	"	189,000	
Chairs	2	Wood & Hairlock	9.70	"	40,700	
Mattress	1/2	Maolan	9.20	"	38,600	
"	"	Hairlock	3.00	"	12,600	
"	"	Moltplane	3.20	—	—	
"	"	Form Rubber	4.00	7,500	30,000	
Trunk gratings	2	Wood & Cotton	26.00	4,000	104,000	
Curtains	9	Cotton & Rayon	6.50	"	26,000	
Pillows & Fabrics etc.		Cotton	5.62	"	22,500	
			3.00	"	12,000	
Total			283.35		1,18,1400	

Table 17 Combustible Furniture in Adjacent Spaces

Spaces	Items	Number	Materials	Weight kg	Specific Calorific Values kcal/kg	Calorific Values kcal	Remarks
F Side	Beds (1/3)	2	Wood	40	4,000	160,000	} Burn out
"	Locker	1	"	30	"	120,000	
"	Curtain	1	Cotton & Rayon	0.8	"	3,200	
"	Mattress	2	Hairlock Cotton	15	"	60,000	
Passage	Locker	1	Wood	15	—	—	Remaind
"	Curtain	1	Cotton & Rayon	0.8	4,000	3,200	Burn out
	Total			100		340,000	

Table 18 Combustible Personal Effects

Items	Number	Materials	Weight kg	Specific Calorific Values kcal/kg	Calorific Values kcal	Remarks
Brankets	4	Wool	5.62	4,500	25,300	} on each bed in chest 25 kg, in robe 20 kg, under beds 7.5 kg and remainders were distributed in room 0.5 kg on chest remainders used in ignition under each bed
Sheets	4	Cotton	1.30	4,000	5,200	
Clothes		Wool	18.75	4,500	84,400	
"		Cotton	48.75	4,000	195,000	
"		Rayon	7.50	"	30,000	
News paper		—	2.00	"	8,000	
Alcohol		—	1.00	5,000	5,000	
Life jacket	2	Kapok	2.00	3,800	7,600	
Total			86.92		360,500	

Table 19 Other Combustible Materials

Items	Materials	Weight kg	Specific Calorific Values kcal/kg	Calorific Values kcal	Remarks
Under coat Paint	Zinc chromate	17.0	4,000	157,000	Some part burned. Burn out.
Finish Paint	Oil paint	22.0			
Linoleum		39.2			
Total		78.2		157,700	

3 実験要領

実験実施に当つては、測定の内容を観測と計測とに大別した。火災の進捗状況、隔壁の防火性の細部の状況等主に観測に頼るべき事項が多いため、観測記録には特に多数の人員を用い、同一事項でも重複して記録し、後で取捨選択する方法をとつた。

観測員のメモによる他に記録用にはテープレコーダー 3 台、16 mm シネ撮影機 2 台、8 mm シネ撮影機 3 台を用い、それぞれ状況を記録した。

計測は主に火災状況の解明、隔壁甲板の断熱性及び隣室区画への延焼時期判定等の資料を得るために行つた。従つて温度が主要計測事項となるが、さらに燃焼速度、開口部からの流出入空気量、燃焼ガスの組成、構造体の変形等をも計測した。

計測内容の一覧を Table 20 に示す。

温度は何れも 0.65 mm 径の裸熱電対を用い、構造物の外面温度は 100×100×10 mm のアスベストパッドを用いて、供試体の加熱試験の場合と同一の方法によつてゐる。

燃焼重量、又は燃焼速度は、船室模型全体を 4 台の L 型動力計で支持し、火災の全期間を通じてその全重量を測定して求めた。

開口部の流出入空気量は、何れも高温にさらされた箇所で気流々速を測定せねばならぬため、非常に困難が伴い精確な値は得られない。今回は銅管をピトー管に利用して大気圧との差圧から風速を求めて見たが、この値は定性的に概ねの傾向を知るだけに役立つており、実際の燃焼のために供給された空気量、又は燃焼による発生ガス量を求めることは出来なかつた。

変形の測定は、熱膨脹係数が殆んど零のインバール線を用い、これを隔壁や甲板に沿ひ展張して基線とし、熱膨脹による構造体の伸びをダイヤルゲージで読みとつたものである。実際の測定には種々の困難が伴つたため、計測は床甲板と C 側隔壁のみに限られたが、この値と構造物の温度とから内部応力を一応推定することが出来る。

4 実験状況

4・1 着火前の状況

各備品類は Fig. 14 通りに配置した。

チェストは上から 2 番目の抽出を半ば引出し、ワードローブは F 側の扉を半開して少量の繊維品を床上にはみ出させた。着火点のそばのカーテンは何れもやや上げ、その他のカーテンは束ねた状態とした。

Table 20 Measuring Items

Items	Items	Position	Points	Remarks	Mark No.
Temperatures	Air temperatures in test room (fire temperatures)	Upper position Middle position Lower position	6 7 3	Under ceiling about 200 mm Middle of deck height Upper floor deck about 400 mm	1~6 7~13 14~16
	Air temperatures in adjacent space		4	Placing 200mm under ceiling in each room	19~21, 61
	Temperatures in furniture	in robe and chest	2		17, 18
	Structure temperatures	Roof deck	6	On the deck and in the ceiling	22~27
		Floor "	6	On and under the deck	28~33
C Wall		9	Inside and outside of C wall	34~38, 57~60	
P "		2	Inside and outside of P wall	43, 44	
F "		4	Inside and outside of F wall	39~42	
A "		1	Inside A wall	45	
etc.	Window	4	At A side wall	46~49	
	Frame of window	18	Near A side window	63~80	
	etc.	5	At passage and F side room	50~53, 62	
	Pitot Tube	5	For measuring air velocity	54~56, 81~82	
	Each corner of model	4			
Burning weight					
	Test room Window		2 1		
Gas composition				at A side wall	
	Exhaust gas	Window	4		Pitot tube 4~7
Air velocity	Supply air	Trunk (mechanical V.) Louver of door	1 5		Pitot tube 1~3 Robinson 1~2
	C wall (vertical) Floor deck		5 1 1	Door frame sash, hard asbestos board A-F direction P-C "	1~5 6 7
Deflection				Temperature, humidity, wind direction and velocity	
Climate					

手廻品としての繊維品類は可燃物表 Table 18 に示す通りで、この中約 25 kg をチェスト抽出しに、20 kg をワードローブ中に、7~8kg を各ベッドの下におき、残り約 15kg を C, F, A 壁内面に略々均一に配分して吊るし、又ベッド、小椅子上にも配置した。ライフジャケットは各ベッド下におき、他に新聞紙 2.0 kg を初期火災を助ける様撒置した。アルコールは 0.5 kg ビン入りのまま 1 箇チェスト上におき、他の 1 ビンは着火用に用いた。

着火点は P 側ベッドの裾と、小椅子、及びワードローブに近い点を選び、屑籠に新聞紙をつめ、アルコール 0.5 kg をふりかけた。

舷窓は 2 箇共開放し、扉の下部に設けられた通風口は 2/5 だけ開け (500×300 mm, 0.15 m²) でおき、着火直後に扉自体を閉鎖した。

機械通風は 15 回/h 換気の割合で約 280 m³/h の給気を行わせた。

4・2 実験観測記録

0 分 0 秒 32 年 7 月 1 日 (月) 12. 06 着火。紙屑籠激しく燃え始める。

0—3~5 サーマスター警報装置作動

0—47 スプリンクラー No. 1 (78°C) 作動

1—15 " No. 2 (105°C) "

3—0 ワードローブからはみ出している衣類、椅子の上の衣類が少し燃え始める。舷窓からは僅かに白煙が出始める。

6 P 壁内張りの A 側端から煙が洩れ始める。

7 ワードローブ及びリノリウムに着火する。舷窓から出る煙の量が増し、黒色に変わる。室内は黒煙が充満し、観測は困難となる。

8 舷窓、P 壁内張りの両端 (A, F 側)、F 側隣室天井張り、C 側通路天井張り等の内部より煙が噴出する。

8—45 爆裂音をたてる、続いて大きな爆裂音、A 壁上・下縁から茶褐色の煙が洩れる。

9 火勢が増した様子で本格的火災に入つたと思われる。床のリノリウム、ベッド (P 側寄り) に着火している。

10 P 壁舷窓周辺のペイントが泡状にふくれ始める。P 壁内張りが燃え始めたと認められる。

10—30 舷窓 (A 側寄り) から火焰が噴出する。マットレスのフォームラバーが激しく黒煙をあげて燃えている。船室上部は濃い煙に包まれ、隣室、通路等の天井張り裏から黒煙が甚しく洩れる。

11 舷窓カーテン燃える。

12 舷窓周辺の外板が変形し始める。C 壁サッシュから煙が洩れ始める。

13 F 側寄り舷窓からも焰を噴出し始める。天井張りはずでに着火していると認められる。舷窓からは煙と焰が激しく噴出している。

14 C 壁扉のペイント変色し粒状になる。煙の色が白色又は黄色味を帯びてきた (マットレスの燃焼がフォームラバー部からセルトブレン部に移つた)。舷窓周辺のペイントは黒茶色

- に変色始め、ふくれも増す。
- 15分0秒 船室床から水滴が落ち始める。
- 17 舷窓の煙は再び黒煙となる。
- 17—45 A壁観測窓のガラス破壊、火焰が激しく噴出する。
- 19 C壁扉のペイント変色剝離して一部燃える。室内の燃焼音（パチパチという音）崩壊音が激しくなる。
- 20 P壁鋼板の変形が著しくなる。
- 21—40 室内で大きな爆裂音。F壁継目から煙が洩れ始める。
- 22 爆裂音盛ん。
- 24—10 室内にて大きな爆裂音、A壁外方へ膨れ出す。
- 25 A壁のP側寄り継目（アスベストシート入り合板③と難燃処理合板④の継目）から燃え抜け始める。
- 26—15 F壁観測窓のガラス破壊。A壁の側隅からも焰が出、又観測孔周辺からも燃え徐々に延焼する。A側隣室空気温度急激に昇る。
- 27 P壁舷窓周辺のペイントは完全に焦げる。天井甲板の中央部は約 50 mm 凹入している。
- 28—18 爆裂音と共にC壁に衝撃がある（通路のローカーの蓋が落ちる）。C壁内面温度計測用 No. 58 熱電対が外れたのを認める。
- 30 A壁全面で燃焼盛ん。
- 31 P壁外面のワードローブに相当する箇所のペイントが大きく剝離し布の様に垂れ下がり始める。P壁の凹凸が甚しくなる。
- 33 天井甲板中央の凹みは最大約 30 cm に達し、デッキコンボには亀裂が多数見えるが、まだ剝離した様子は認められない。
- 34 A壁上半部焼け崩れる。
- 35 ワードローブが焼け崩れたらしい。
- 38 A壁完全に燃え落ちる。
- C壁サッシの変形が増す。P壁の凹凸も増す。P壁ペイントさらに剝離して垂れ下る。室内は合板天井張り全部燃焼、フレキシブル板はまだあまり脱落していない。チェスト、C側ベット激しく燃焼中。C壁内面が剝離しているのを認めた。爆発音が続く。
- 40—30 C壁観測窓のガラス破壊、火焰が噴出する。
- 42 P壁外面のペイント一部燃える。
- 45 C壁のサッシの撓み量は約 100 mm 位、外面はまだ異状はない。
- 46—20 F側隣室のカーテンに着火、それが燃え落ちてベットに着火する。
- 47 フレキシブル板天井張り一部落下。
- 50 F側隣室燃焼盛んとなる。室内の火勢は衰えて来た。
- 54 C壁外面（通路内）のA側寄りカーテンに着火する。
- 59 F側壁の近くで爆裂音がした。

60分0秒 室内の可燃物は殆んど燃え尽きる。

燃焼は主にF側隣室内にて続いている。

62 C壁外面（通路内）のF側寄りカーテンが発火した。

63 通路天井張り発火（通風トランクの附近から）、忽ち火は一面に拡る。

64—45 送風器停止

65—30 C側外壁のフレキシブル板爆裂を始める。

68 危険のため、燃焼重量、空気流量、変形の測定を中止する。

70 自記温度計を除き凡ての計測終了、又は中止。

71 通路内天井張りは殆んど燃え尽きる。室内及びF側隣室は残火がうずたかくなり、焰はF壁附近だけとなる。

83 実験終了

4・3 鎮火後の状況

実験は着火後 83 分で終了したが、その時刻ではすでに可燃物は凡て燃え尽き、赤熱状態の残火となり、以後変化は生じなかつた。尚、何らの消火活動も行わず、凡ては火災の成りゆきのままにまかせた。

室内の可燃物はP壁内張り、天井張り、A壁、F壁の合板、家具類、手廻品等に至る迄完全に燃え尽きて何一つ残らなかつた。

船室の各隔壁、甲板の状況と、それに隣接する区画の状況は略々次の通りである。

即ち、まずP壁は木製の根太に合板張りであつたため、完全に焼失しており、外面の上塗りペイントは焼け焦げて粒状になり一部は布のように剝離していた。これは主にワードローブがあつた箇所であつて、急激な加熱を受けたものと考えられる。尚、実験中ペイントは時々燃えるのが見られたが何れも小規模のもので、且つP壁外部には何ら可燃物がないため延焼の危険性は全くなかつた。P壁鋼板は天井甲板に次いで変形が最も著しかつた。

天井甲板は最も変形が著しく、上面のデッキコンポジションには無数の亀裂が生じており、大部分は容易に剝離した。天井張りの中、可燃性材料のものは完全に焼失していたが、フレキシブル板の一部は尚取付いていた。しかしこれも亀裂は甚しく、強度も失われていて叩けば容易に脱落するものであつた。

天井甲板上面に、鋼甲板に直かに接して設けた木材の根太は何れも大部分焼失していたが、デッキコンポジション上においた木材が船室内の火災が殆んど下火になつた頃に燃えているのを認めた。P壁の延長部分に設けた内張りはP壁防撓材に接する根太の下部とその附近の内張りが多少炭化しているだけで、他はあまり異状なかつた。

床甲板は殆んど変形が認められず、下面のペイントも異状はなかつた。リノリウムは全部焼失しており、デッキコンポジションは脆くなつていて容易に砕くことが出来た。

通路隔壁のC壁は一部で爆裂、剝離等を起こしたものもあるが、硬質石綿板自体がサッシュから外れるようなことは認められなかつた。扉のすぐF側寄りの硬質石綿板一枚はその50～60%に亘つて

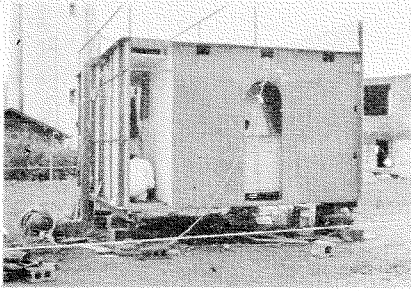


Photo. 40 Fire test room
View from F side before test.

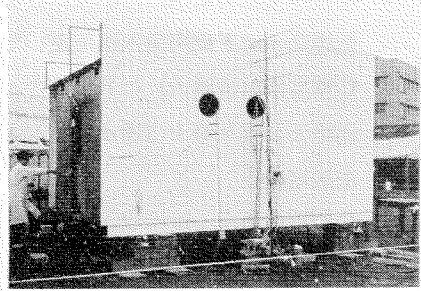


Photo. 41 Fire test room
View from P side before test.

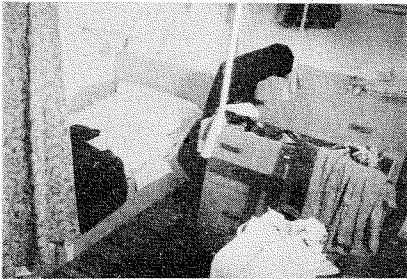


Photo. 42 Fire test room
Showing inside of room.



Photo. 43 Illustration of test
At 37 min. after start. View from A side.
A. wall is burning out.



Photo. 44 Illustration of test
At 50 min. after start, View from F-P side.

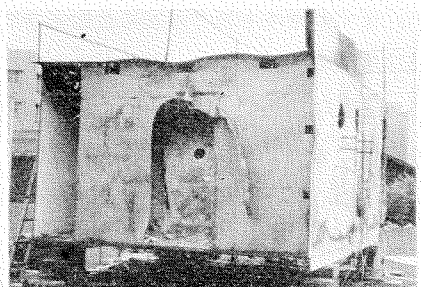


Photo. 45 Illustration after test
View from F side.



Photo. 46 Showing the roof deck after test

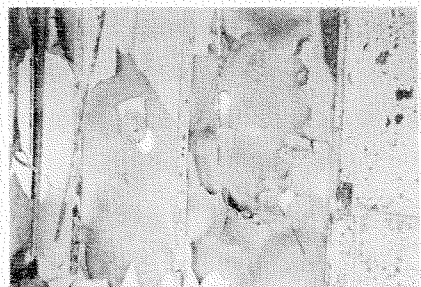


Photo. 47 Showing the C side wall after test
View from inside of room.

大きく爆裂剝離しており、54 分に発火した通路のカーテンは丁度この箇所^{（1）}に当っている^{（2）}ので、この硬質石綿板の爆裂剝離による結果と認められる。尚、爆裂した時刻は 28 分頃と推定される。

通路内のカーテン、天井張りは燃えてしまったが、ロッカーは隔壁のサッシュに接する箇所が多少炭火しただけで残存していた。

F 壁の両面の合板、及び隣室内の家具類も完全に焼失した。F 壁の内層のフレキシブル板は辛うじて残っていたが、甚だしく変形、亀裂を生じており、容易に破壊される状態にあつた。

室内にあつた真鍮製金具類は総て異状なく残存していたが、舷窓のアルミ枠及びガラスは溶けて脱落し、原形を止めていなかった。

C 壁に設けた扉には何ら損傷はなかつたが、強固に取付いていて開閉は不能であつた。

天井張り裏には、C 壁を貫通して電線を設けておいたが、通路天井張りも燃えたため、電線は鎧装を残しただけで内部は全部燃え、電線の延焼程度は解からなかつた。

5 実験計測結果

計測結果は Fig. 15~35 に示す。

5・1 室内空気温度 (Fig. 15~16)

- イ. 着火後 6 分頃迄は火勢も弱い^{（1）}が、以後は急激に温度が昇り標準火災温度に近づいている。
- ロ. 着火 6 分以降は、室内空気温度の分布は上部がやや高く、下部が低い^{（2）}が割に均一な分布を示す。
(但しニ項に述べるように 2, 3 の例外はある。)
- ハ. A 壁が焼け抜けた 38 分以降は室内温度は一様に増加し、平均温度は約 100~150°C 高くなっている。これは開口部が増加したための影響と思われる。可燃物量が多いため、火災継続時間はかなり長く、最盛期は略々 45 分頃である。
- ニ. 温度分布の細かい点について云えば、0~10 分の間では室中央部の No. 6 が最も高い。これは No. 6 が保護管に入っていない裸熱電対の故と思われる。15 分~40 分では着火点附近の No. 2 (上部)、No. 9 (中部)、No. 14 (下部) は他に較べてやや高い。40~50 分では燃焼の遅れていた F 側附近の火勢が激しく、No. 8, 13 (中部) が最高を示している。着火点附近の下部の No. 14 は附近に可燃物が少く、且つ開口部に近いため、40 分以後は急に温度が下り最も低い。

5・2 天井及び床甲板の温度 (Fig. 18~19)

- イ. 天井張りが発火した直後にエアースペース内の温度 (No. 22, 24, 26) は急に昇り、以後略々空気温度と等しい温度を示している。C 側寄り天井張りは多少着火するのが遅れたと見え、No. 26 の温度上昇は他に較べてやや遅い。
- ロ. 天井甲板上面の温度の中、No. 23 だけやや高いのは P 側よりで排気口舷窓に近く加熱が激しかつたことと、デッキコンポジションの亀裂又はアンカーピースに近かつたこと等によると思われる。
- ハ. 床甲板上面の温度は徐々に昇り、火災の最盛期が過ぎた後も略々一定の高温を示す。これは残火が堆積するからであろう。

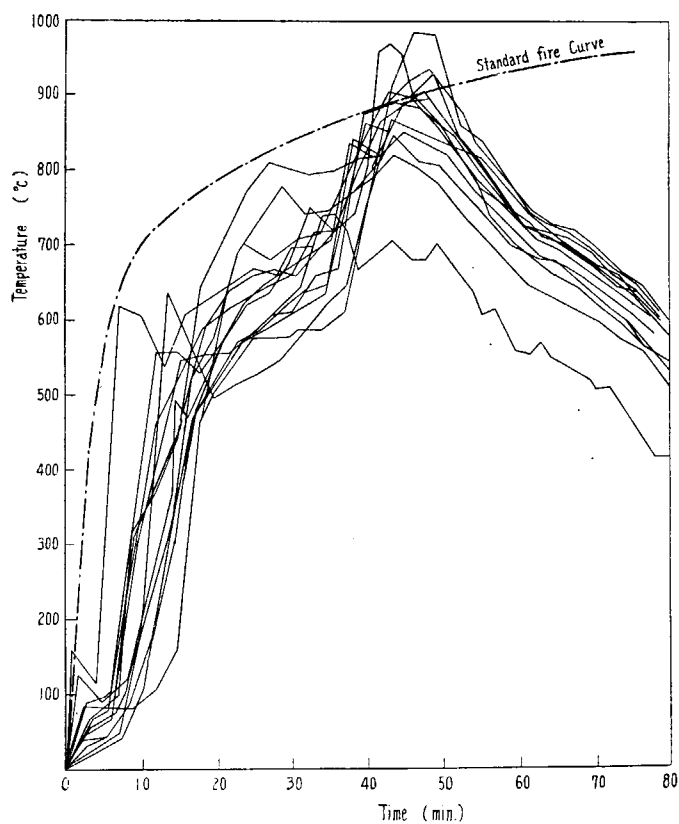


Fig. 15 Air Temperatures in Test Room No. 1~16

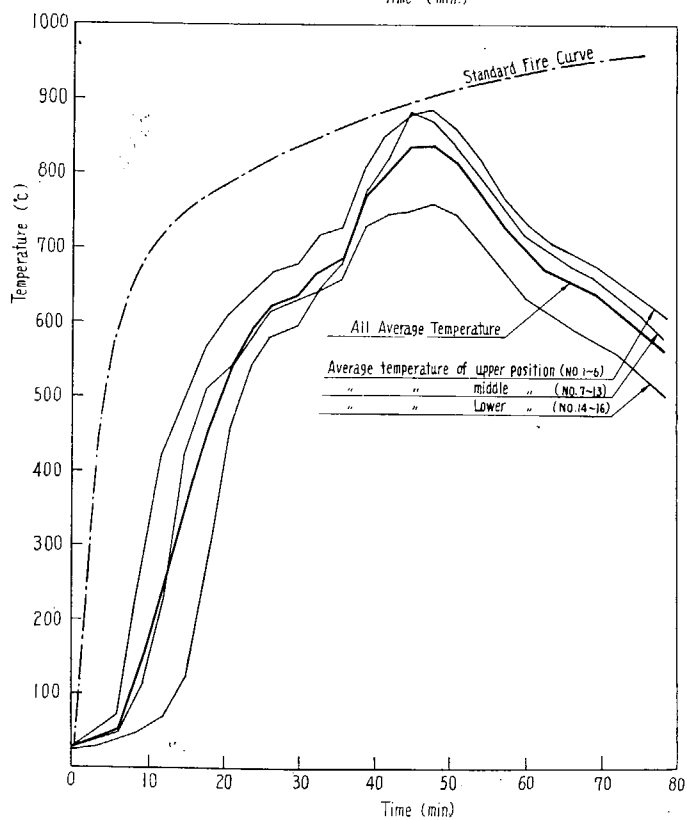


Fig. 16 Average Air Temperatures in Test Room.

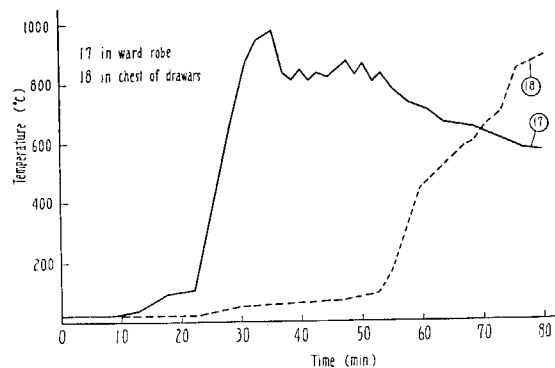


Fig. 17 Temperatures in Furniture

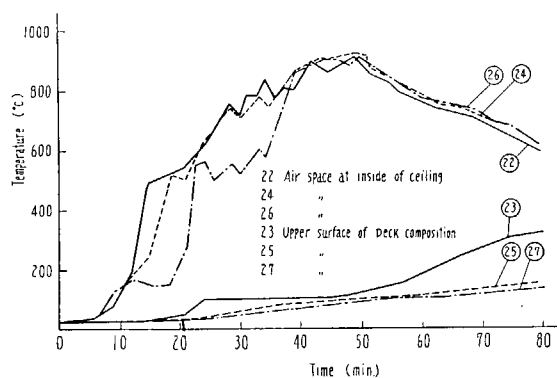


Fig. 18 Temperatures of Roof Deck

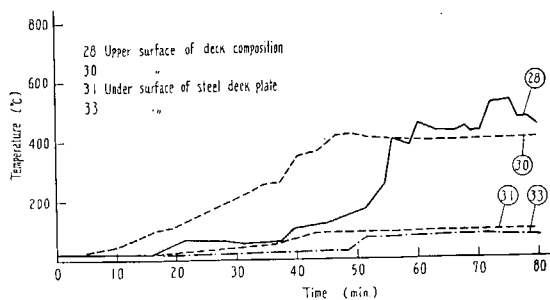


Fig. 19 Temperatures of Floor Deck

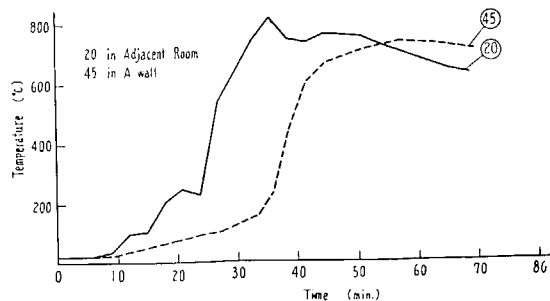


Fig. 20 Temperatures of A side Adjacent Room and A wall

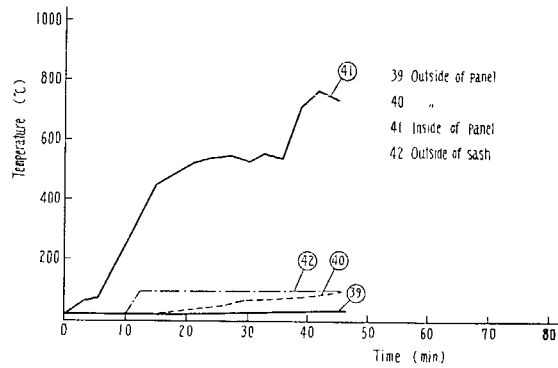


Fig. 21 Temperatures of F wall

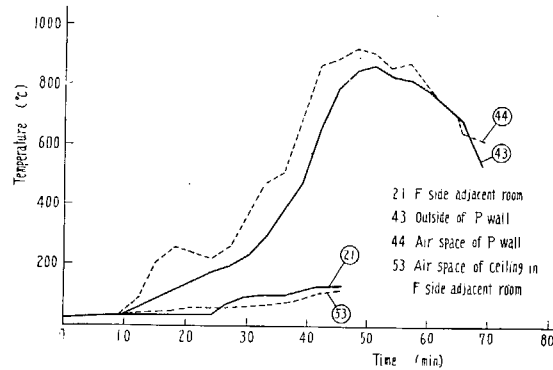


Fig. 22 Temperatures of P wall and F side Adjacent Room

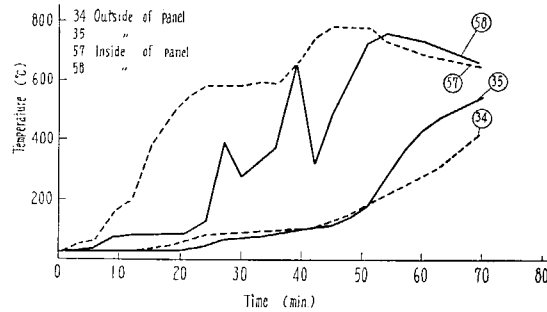


Fig. 23 Temperatures of C wall

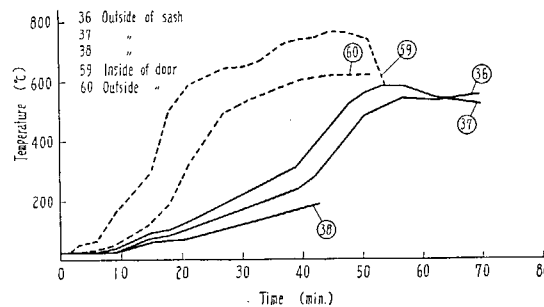


Fig. 24 Temperatures of Door and Sash in C wall

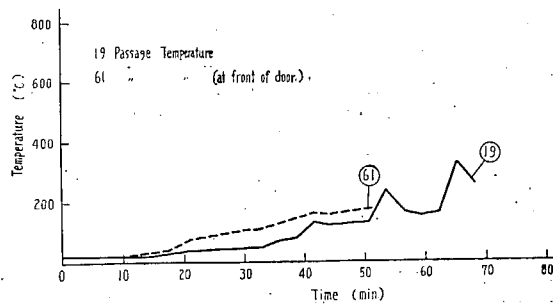


Fig. 25 Air Temperatures in Passage

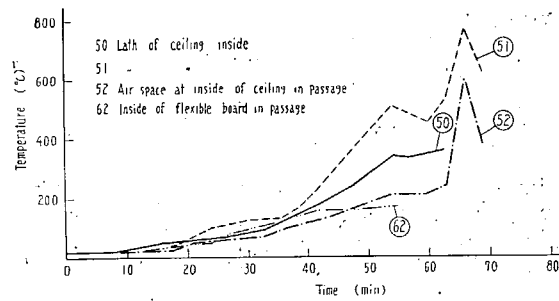


Fig. 26 Temperatures in Passage

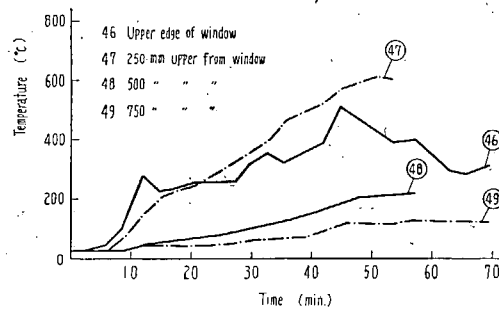


Fig. 27 Outside Temperatures of P wall

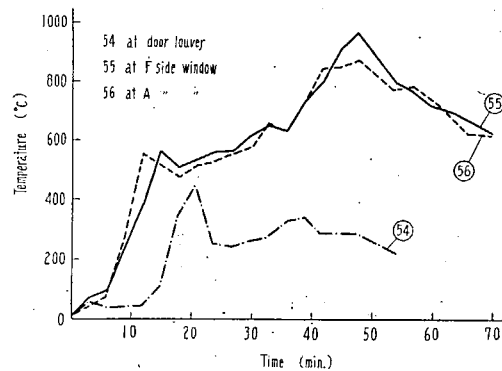


Fig. 28 Air Temperatures at Inlet and Outlet

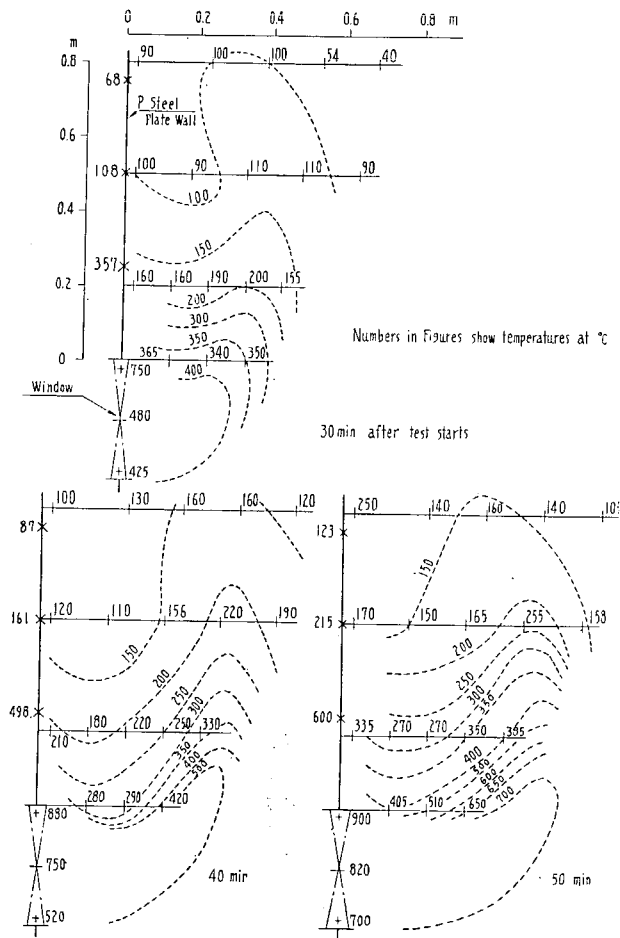


Fig. 29 Flame Temperatures at Window No. 63~82

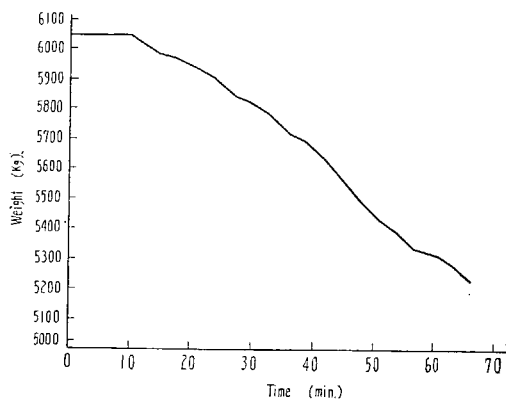


Fig. 30 Burning Weight

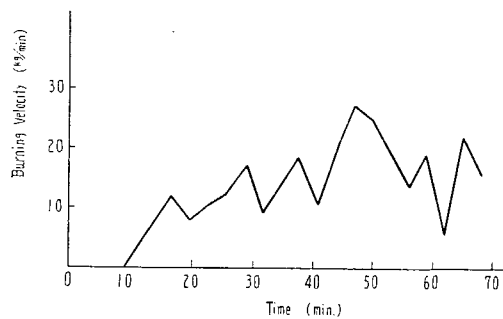


Fig. 31 Burning Velocity

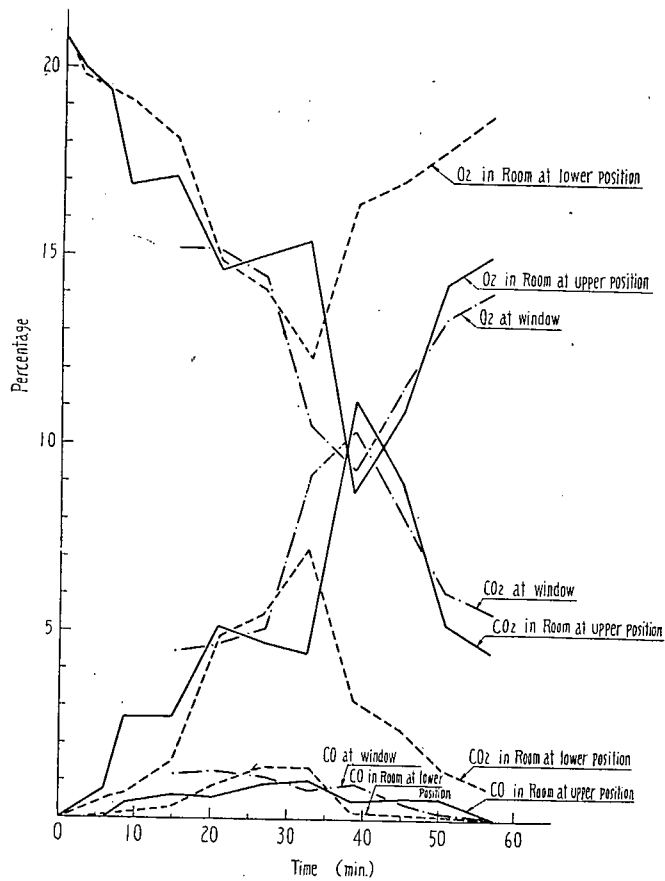


Fig. 32 Compositions of Burning Gas

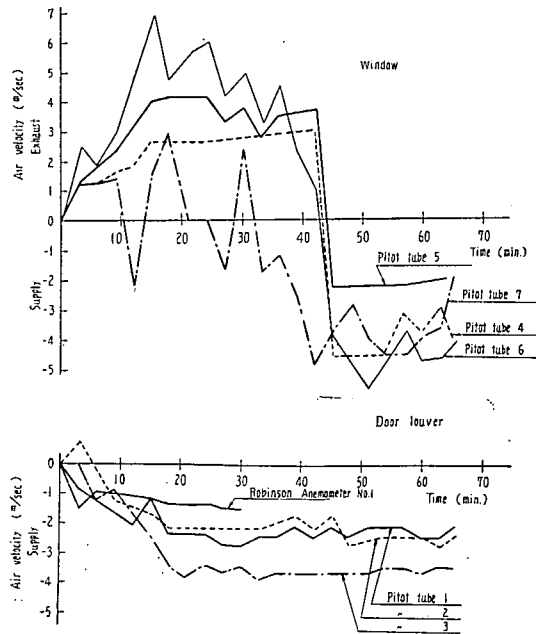
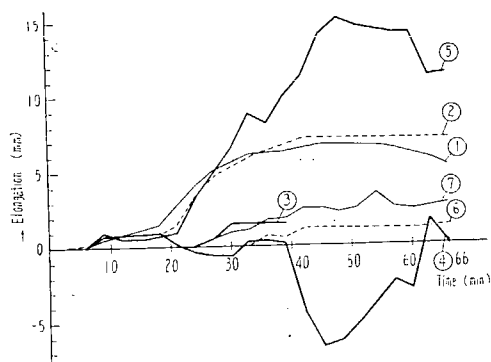
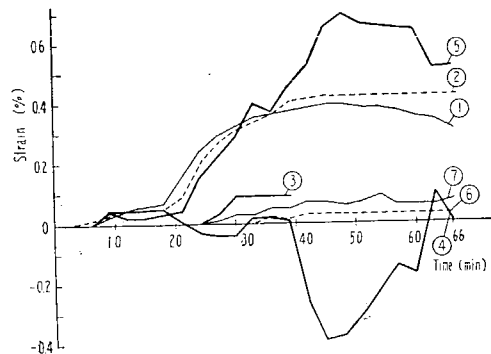


Fig. 33 Air Velocities of Supply and Exhaust



1. Door frame (A side)
 2. " (F side)
 3. Hard Asbestos board wall
 4. Sash
 5. Between decks
 6. Floor deck (A-F direction)
 7. " (P-C ")
- } Vertical in C wall

Fig. 34 Deflection



1. Door frame (A side)
 2. " (F side)
 3. Hard Asbestos board wall
 4. Sash
 5. Between decks
 6. Floor deck (A-F direction)
 7. " (P-C ")
- } Vertical in C wall

Fig. 35 Strain

ニ. 床甲板下面の温度は非常に低く、上部の火災が下部へ延焼する危険性は極めて少ないことを示した。

5・3 F 壁及び C 壁の温度 (Fig. 21, 23, 24)

イ. F 壁, C 壁内面温度 (No. 41, 57) は略々空気温度と同様な傾向で上昇しており、31 分頃 A 壁が燃え抜けた後も空気温度と共に上昇している。従つて F 壁の合板が発火した時刻は、この No. 41 の結果からでは判定出来ない。

ロ. C 壁内面温度 (No. 58) だけは上昇が遅れていて、この原因は不明である。しかし 28 分頃、温度上昇中に急に温度が下つているのは、他の状況から見て (観測等) この熱電対取付箇所の硬質石綿板が爆裂したことを示すものと思われる。

ハ. F 壁, C 壁とも外面温度 (No. 34~40, 42) は一般の箇所は勿論、継手の部分でも B 級隔壁の断熱値をもつと認められる。

5・4 P 壁 温度 (Fig. 22, 27)

イ. P 壁の内張りに着火したのは、内張り内部の温度 (No. 44) の様子から見て 15~25 分にかけてであろうと推定される。

ロ. P 壁鋼板の舷窓上部で噴出火焰にさらされる所では舷窓上 250 mm の No. 47 が最も高くそれより上では急に低くなつている。

5・5 隣室通路内の温度 (Fig. 20, 22, 25, 26)

イ. 一般に隣室又は通路内の気温は火焰が流入するとすぐに上昇しており、このため延焼時期を精確に判定することが出来る。

ロ. 即ち A 側隣室では、気温 No. 20 は 18 分観測窓破壊と共にやや昇り、更に 25 分 A 壁の燃え抜け始めると共に急に上昇している (Fig. 20)。又、F 側隣室でも、26 分観測窓破壊と共に気温 No. 21 が上つたのが認められる。しかし 46 分頃延焼を始めると共にリード線も焼け、以後は測定され

ていない。(Fig. 22)

ハ、通路に於いても気温 No. 19 の 41 分の上昇は 観測窓破壊を示し、54 分のピークはカーテンの発火を、62 分以降のピークはカーテン及び天井張りの発火を示している。(Fig. 25)

ニ、通路気温を壁の所 (No. 19) と、扉の前 (No. 61) とで比較すると、やはり 扉の断熱性がないため後者の方がやや高いのが認められる。

ホ、通路天井張りの根太の側面温度 (No. 50, 51) から見て、天井張りの発火が観測された 63 分以前にすでに根太は発火していたと認められる。

5・6 その他の温度

イ、可燃物の内部温度測定 A 壁の合板の内部で測定した No. 45 は、A 壁が殆んど焼け落ちた頃に急に上昇しており (Fig. 20)、又、家具内部温度 No. 17, 18 も家具の発火時刻よりずつと遅れて温度が上っている (Fig. 17)。

ロ、空気流入口温度 (ビトー管の先端で測定したもの) はその箇所の真の流入空気温度ではなく、かなり輻射の影響が入つたものと思われる (Fig. 28)。例えば 扉ルーバーの箇所の No. 54 は流入空気の温度としては明らかに過大である。

ハ、同様の理由で、舷窓の噴出火焰温度も真の値とは考えられない。後に 5・9 ロ項、及び Fig. 33 に示す様に、42 分を境として舷窓の気流は流出から流入へ変つているが、この結果は Fig. 28 の No. 55, 56 及び Fig. 29 の温度分布結果とは矛盾している。

5・7 燃 焼 重 量 (Fig. 30, 31)

L 型動力計で測定した燃焼前の全重量 6,045 kg に対し、計測終了時 (66 分) 5,223 kg で、その差は 822 kg となつた (実験前の可燃物実測重量は約 810 kg)。又燃焼速度は 42~45 分の火災最盛期で最大を示し 27 kg/min である。

5・8 燃焼ガス組成 (Fig. 32)

酸素量の最小時 (CO_2 の最大時) は 32~38 分で A 壁が焼け落ちる間に当つており、これ以後は新しい流入空気量のため酸素量は殖えている。同様に一酸化炭素の量も 32 分頃で最大である。

5・9 開口部の流出入風速 (Fig. 33)

イ、予想通り舷窓からは燃焼ガスが流出し、それも A 壁寄りの舷窓の方が流速は大きい。しかし舷窓の様に割に小さい開口でも風速は一樣でなく、上部附近の流出風速は大きく、下部附近では流入となる場合も認められた。

ロ、舷窓の風速は、42 分頃を境として流入へと変つており、A 壁に大きな開口を生じたためと考えられる。

ハ、扉ルーバーからは、少くとも平均約 2 m/sec 程度の風速で空気が流入したと考えられる。この流入空気量は約 1080 m^3/h (51.1 回/h 換気に相当、機械給気の約 4 倍) となる。

ニ、風速の測定は他に適当な方法もないので簡単なビトー管を用いたのであるが、この計測値は余り信頼出来ず、定性的な傾向を窺えるだけである。例えばロビンソンとビトー管の測定結果も一致していない。

ホ. 17 分以降は観測窓が次々と破損し、又 A 壁も燃え抜けたため、結局流入空気量及び排出ガス量の合計を求めることはできない。

5・10 変 形 量 (Fig 34, 35)

イ. 変形量(伸び)の中の、一番大きい値が得られたのは甲板間の伸び⑤であり、最少のものは床甲板の伸び⑥である。

ロ. 床甲板の伸びは、ガーダーの通っている縦方向(A-F)よりも、横方向(P-C)の方が多少大きい。これが自由に熱膨脹したものと考えると、温度は 45~80°C に相当する。(床甲板下面の温度は最大 85~100°C である。)

ハ. C 壁サッシェの垂直方向の変形④は縮んだように測定されたが、これは壁が彎曲したためである。

ニ. C 壁の扉枠は両側とも似た傾向を示し、又彎曲の程度も少かつたため真の伸びに近い値と思われる。40~50 分に於ける伸び 0.4% は、自由に熱膨脹したのと考えれば温度約 310°C に相当する。

6 実験結果に対する考察

(1) 火災温度について

火災の初期を除いて考えれば、本実験により得られた火災温度曲線は標準火災温度曲線をやや下廻るが、その最高温度は標準温度曲線に達している。

尚、船室内の火災温度分布は略々均一と考えてよく、周壁に対する火災荷重の大きさは同一であったと認められる。

火災の一般的現象、特に初期の状況等については後に述べる。

(2) C 壁の防火性について

C 壁の通路隔壁が大きな爆裂を生じたのは着火後 28 分と認められるが、それ以後も火災終了時迄充分な保全性を示した。54 分で、爆裂して剝離した箇所の通路のカーテンが発火し、又、40 分頃以降天井張りの根太が発火温度に達した。その他の延焼は凡て観測窓の欠陥によるものと考えられる。従つて、C 壁の断熱性、保全性等の防火性は B 級隔壁として充分の性能を持つが、船室内の火災が燃え尽きる迄延焼を阻止することは出来なかつたと認められる。

通路の天井張りが発火温度に達したのは、C 壁と天井甲板との接合部でビームが C 壁を貫通するため、ビームの深さだけ断熱性のない薄銅板の壁となつていること、ビームやトランク等の貫通部材があること等のため、これらからの伝熱、輻射で高温になつたものである。

通路においたロッカーは、壁のサッシェに接した所が多少炭化しただけであり、又温度計測結果でもサッシェの上部がより高温となつているのが認められる。

従つて保全性上欠陥の出来やすい、且つ高温になりがちな隔壁の上部は最も延焼の危険が大きく、充分な防火性を持たせるためには可燃性の天井張り等は設けないことが望ましい。

(3) F 壁の防火性について

F 壁はよく火災を阻止していたが、観測窓の欠陥のためここから火焰が噴出し隣室へ延焼し、遂に

Table 21 Climate in Test
Clouded weather slightly raining sometimes.

Time	Wind Direction	Wind Velocity	Atmospheric Temperature	Humidity	Remarks
0 min.	N E	1.7 m/sec	25.5°C	90%	
3	"	1.9	24.5	90	
6	E N E	1.8	24.5	90	
9	N N E	1.1	24.0	95	
12	N E	1.8	24.0	95	
15	"	1.3	24.0	90	
18	"	1.5	24.0	90	
21	"	1.3	24.0	90	
24	E	1.3	24.0	95	
27	E N E	1.4	24.0	95	
30	N E	1.4	23.5	100	
33	"	0.4	23.0	90	
36	E N E	0.5	22.5	90	
39	N E	0.3	22.5	100	
42	E N E	0.9	23.0	100	
45	"	1.0	23.0	95	
48	N N E	0.1	23.0	95	
51	"	0.0	23.0	95	
54	"	0.0	22.5	95	
57	"	0.0	22.5	100	
60	"	0.0	23.0	100	
66	"	0.0	23.0	100	
69	"	0.0	23.0	95	
72	"	0.0	23.0	100	
75	"	0.0	23.5	95	

壁の両面共合板が焼失してしまうに至つた。しかし、これは観測窓の欠陥が原因であり、且つ着火後 46 分を経過している時でもあり、F 壁は B 級隔壁としての防火性を充分備えていると認められる。

(4) 天井甲板の耐火性について

天井甲板は鋼甲板であるため、破壊による保金性の欠陥と云うことはなかつたが、変形は著しかつたためデッキコンポジットに多くの亀裂を生じ、部分的に延焼する危険が生じた。甲板上面温度にかなり高温の箇所があり、又デッキコンポジット上におかれた木材で発火したものがあつたのはその故と考えられる。

従つて 60 分以上延焼を完全に阻止するためには断熱施工が必要であらう。又、何れにせよ鋼甲板に直かに接して取付けた可燃物は殆んど焼失していたことからみて、家具、内張りの類を取付ける前にデッキコンポジットを床全面に施工することが望ましい。

(5) 床甲板の耐火性について

床甲板下面の温度は極めて低く、火災が下部区画へ延焼する危険は殆んどないと考えられる。

(6) P 壁について

P壁の耐火性は問題にする必要はないと考えられる。しかしP壁の鋼壁が上部に延長されたため、この熱伝導により天井甲板上部の内張りが一部炭化していた。内張りの内部は囲まれているため高温になりやすく(本実験では周囲は囲っていない)、且つ発見し難いものであるから、この延焼を防ぐため鋼壁に適当な断熱施工をすることが望ましい。

舷窓からの噴出火焰が上部区画に影響を及ぼすおそれは殆んど認められなかった。

(7) その他

本実験に於いては室内の火災状況を観測するため、F、C、及びAの各壁に観測窓を設けておいたが、火勢が強くなつてからは煙のために殆んど役立たなくなり、却つてこのガラスが次々と破損して隣接区画への延焼を助長する結果となつてしまった。しかしこれは防火隔壁の一部に小さな欠陥があつても、防火上非常に有害なことを実証したと思われる。

本実験では着火直後から周壁の継目や天井裏等から煙が洩れるのが認められ、火勢が強まると共に煙の噴出も著しくなり、ために観測は甚しく妨げられた。従つて実船の火災の場合にも予想以上の煙のため消火活動は著しく妨げられることが想像されるから、これに対する充分の対策を払つておくことが必要であろう。

種々の材料の燃焼状況については余り明確な差は認められていないが、防焰加工を施したカーテンは無処理のカーテンに較べて着火するのが遅く、且つ炭化するだけで激しい焰は出さなかつたのが認められた。従つて火勢の蔓延を阻止するために繊維類はなるべく防焰加工、又は難燃処理をすることが望ましい。

7 船室火災の一般的考察(諸実験例との比較)

この種の実験は欧米に於いてすでに二、三行われており、本実験はその四番目に当る。これらの実験は何れも船室火災を対象とし、アルミニウム合金構造によるもの、第1方式又は第3方式によるもの等の各構造の防火性調査を目的としているが、共通の主実験目的として船室内の火災状況を調査し、標準火災温度の適否を論じている。

従つて本実験結果をも併せてこれらと比較検討することにより、船室火災の一般的現象に関する考察を導き出すことが出来る。尤も数少い実験例であるから決定的な結論を出すことは困難且つ無謀であるが、消火又は防火対策にとつて一応の参考になるものと思われる。

諸実験例の概要を比較して Table 22 に示す。

本実験と他の実験例とを比較してみると最も大きな差異は次の通りである。

1. 他の実験例では着火後火災が継続しない例が多く、何れも扉を開放するか、機械給気量を極端に大きくせぬ限り火災とならないが、本実験ではそのようなことはなかつた。
2. 可燃物重量が多い。
3. 火災継続時間が長い。他の実験例では何れも 25~30 分が最盛期であるが、本実験では 45 分頃である。

まず火災の初期の問題であるが、何れの実験でも着火方法は似たような方法によつてゐるのに、その火勢が強まる場合と然らざる場合とあり、又火勢が強まる迄の時間にも長短があり、これは開口部

の状況で左右されるものと認められる。即ち、米国の実験では舷窓がなく、最初扉の上半部を覆つて実験を始めた処、火勢が容易に強まらず、遂にその覆いを除いた結果火災となつており、又デンマークの例では舷窓と扉下部の小さなルーバー（この開口面積は非常に小さいと思われる）だけでは火災がおきず、機械給気量を極端に大きくして始めて成功している。本実験では丁度その両者を併せたように、舷窓と扉下部の開口が設けてあり、その結果は着火後 6~7 分で何の手段を講ぜずとも火災となつている。又、英国の実験では開口部はさらに大きく、数も多く配置されており、火勢はより早く盛んとなりその温度も高い。

一旦火勢が強まると、米国及びデンマークの実験例では火災温度は略々一致しており、本実験結果もそれに近く、大体標準火災温度に近いと認められる。しかし英国の実験例はかなりの高温を示していること、又本実験例では A 壁が焼失して大きな開口を生じてから火災温度はやや昇つておること、等の結果からこの火災温度もやはり開口部の状況に左右されるのが認められる。

床面積当り燃焼量と火災温度曲線の面積（一応鎮火したと認められる迄で、この場合では火災温度が 375°C 迄降下した時迄の面積を用いている）の比は何れの実験例でも略々同一値となる。

従つて一般の火災の状況を考えると、次のように云うことが出来る。

即ち、船室内で何らかの原因により発生した火はまず初期火災（又は小火）の状態に入る。この時期では火は発火点の附近だけで極めて弱い火勢で燃え続けるだけである。これが次の本格的火災に発展するか否か、又それ迄の時間の長短は、勿論発火の原因、周囲の可燃物の状況等にも左右されるが、普通考えられる条件の下では主に開口部の状況、即ち供給空気量と排出ガス量で定まる。そして、一旦本格的火災に入れば、後は大体標準火災温度に従ひ上昇し、その火災継続時間は可燃物量が多い程長い。

本実験の結果、普通に考えられうる条件の下でも、扉を開放してなくても船室内で発生した火は火災になりうると認められる。扉が閉つておれば発見の時期も遅れる訳であり、従つて火災発見の可能性を大きくし、且つ消火活動を容易にするためにも、初期火災の期間をなるべく大とする工夫が必要であり、室内可燃物の難燃処理対策と共に、出来れば空気の供給口となる下部の開口は無いことが望ましく、又ルーバーも最小限のものに止めることが望ましい。火災警報装置も火災の早期発見上重要にして有効であると認められる。

本格的火災に入つた後は、特別に大きな開口部が生じたりせぬ限り、火災温度は標準温度を大きく上廻ることはなく、又本実験の場合のように最大限の可燃物があつても、火災は略々 1 時間以内で衰え始めると云える。即ち、国際条約による標準火災試験、及びそれに対する最大 1 時間の耐火性の要求は、普通に装備された船室居住区の火災に対しては妥当なものと云うことが出来る。

8 結 論

始めに述べた如く、本船室火災実験はあく迄も実状に即した条件の下で、なるべく苛酷側となるようにとの方針で行われた。

本実験結果で、一般の条件に於ける最も激しい火災の状況を再現することが出来たと共に、他の実験例との比較により火災の一般的現象、及びそれに及ぼす種々の影響を導き出すことが出来た。又防

Table 22 List of Fire Tests

Details		U.S.A. State Room Fire Test 1950, S.N.A.M.E.	Britain Fire Protection in Passenger Ship 1953 T.I.N.A.	Denmark Pindstrup Cabin Fire Test, 1954		Japan Fire Test of Cabin Model 1957, S.R.A.J.
Tests				No. 1	No. 2	
Object		1. Survey of Fire Temperature 2. Assessing Fire Protection of Aluminium Alloy Structures	1. Survey of Fire Temperature 2. Assessing Protection afforded by Insulation to Aluminium Alloy Structures	1. Survey of Fire Temperature 2. Assessing Fire Protection of Novopan 3. Assessing Fire Load for Difference of Ventilation		1. Survey of Fire Temperature 2. Assessing A-Class Construction and B-Class.
Method of Protection		--	Method I	Method III		Method III
Room Class		Tourist Class Passenger Room (3 persons)	Tourist Class Passenger Room (2 persons)	(2 persons)		Tourist Class Passenger Room (2 persons)
Room Size (m)	Length × Width Deck Height Height to Ceiling	3.50 × 2.75 2.82 2.51	2.44	2.44		3.20 × 3.00 2.20 2.02
Floor Area (m ²)		9.62	7.43	5.40		9.60
Volume of Room (m ³)		27.1	18.1	13.2		21.1
Construction	P Side Wall	Aluminium Alloy	Aluminium Alloy with 13 t. Asbestos Board	Steel wall with plywood		Steel wall with plywood
	C "	Ditto	One Panel 13t Asbestos Composition Board Wood Veneered. Two Panels Aluminium Faced Asbestos Composition Board 19 t	26t Novopan		Flexible seat faced 22 t Hard Asbestos Board
	F "	Ditto	Same as P side Wall	26t Novopan		Pile of two 5 t flexible seat and two 10 t plywood
	A "	Ditto	Same as C side Wall and 19t Asbestos Composition Board unfaced	2 × 26t Novopan		plywood
	Roof Deck	Aluminium Alloy, Ceiling of 4.8 t Asbestos Cement Board	Aluminium Alloy with 13 t Asbestos Board	Steel deck with ceiling of plywood		Steel deck covered 25 t deck composition on upper surface and ceiling under side
Floor Deck		Aluminium Alloy	Aluminium Alloy Deck were covered with 5t Latex Cement and 3t Plastic	Steel deck were covered 6 t Ruboleum and 10t Aranbee		Steel deck were covered with 3 t Linoleum and 22 t deck composition

Opening	— One Door	One 250 ϕ Scuttle One 1.980 \times 610 Door — 200 \times 200 Vent Hole (in Roof)	One Window One Door Louver (lower part of door) —	two 300 ϕ scuttle — 500 \times 300 Louver — (lower part of door)
Mechanical Air Supply (m ³ /h) (Ratio to Volume of Room)	306 (11.3)	— (—)	70 (5.3)	280 (15)
Combustible Materials (kg)	—	—	130	220.4
Construction Furniture	162	198	82	283.4
Personal Effect etc.	112	69	—	86.9
Total	274	267	212	45
Calorific Value of Burning Materials (kcal)	1,080,000	1,240,000	785,000	635
Burning Weight per Unit Area (kg/m ²)	25.6	37.3	39.3	2,624,000
Calorific Value per Unit Area (kcal/m ²)	112,000	167,000	145,000	69.0
Area under Fire Temperature Curve (°C-min)	20,500	30,375	—	247,000
(Ratio of Burning Weight per Unit Floor Area and Temperature Curve Area) $\times 10^3$	1.25	1.23	—	54,700
Results	<ol style="list-style-type: none"> Combustion in the room improved after door was opened. There was a difference of 20% between the area of Standard Fire Curve and average fire temperature curve for 30 min. period, but the temperature in the room approximated the Standard Curve. Bare aluminium should not be used in Class B-O construction unless it is protected suitably from fire. 	<ol style="list-style-type: none"> The fire grew after 5~6 min. period. Fire temperature reached 1,300°C at the end of 25 min. period, that was higher than Standard Fire Curve. Aluminium structures can be protected efficiently against the most serious shipboard fires. 	<ol style="list-style-type: none"> In first test, the fire was not able to continue unless door was open. In second test, increasing mechanical supply air and closing door, so the fire grew. Fire temperature was smaller about 100°C than Standard Fire Curve. It reached 800°C at the end of 30 min period. Novopan was able to protect efficiently against the fire. 	<ol style="list-style-type: none"> The fire grew after 6~7 min. period. Fire temperature was about 80% of Standard Fire Temperature at the end of 30 min. period, but the temperature in the room approximated the Standard Curve. It increased and reached 990°C at 45 min. for openings were increased. B class Bulkheads were able to protect efficiently against the fire.

火性の問題に関してはこの結果の中或るものは供試体の加熱試験結果を再確認し、或はそれから容易に推定し得るものもあつたが、この反面に例えば天井甲板の耐火性、舷窓からの噴出焰の状況、囲壁貫通部附近の延焼状況等、構造上多くの具体的資料を、本実験により始めて得ることが出来た。

又、本実験では火災の原因、消火装置等に対する問題は含まず、実験の目的を火災状況の把握と防火構造の防火性のみに限つた。

XI 結 び

本試験研究は前年度研究に引続いて行われたものであるが、その内容は二つに大別される。即ち、前半では前年度の防火隔壁、防火甲板供試体の加熱試験に引続いて防火扉供試体の加熱試験を行い、その防火上の具体的資料を得た。

次に後半の船室火災実験に於いては、今迄の研究の凡てを綜合し、船室として立体的に構成された防火構造の防火性を試験研究すると共に、火災そのものの性状及び隔壁の防火構造に及ぼす荷重の大きさについて解明せんとした。この結果から防火構造の設計、工作等に関する具体的資料を得、又船室火災の状況について貴重な資料を得たものと信じる。

本研究では火災発生の原因、消火装置の効果等にはふれていないが、結果から導き出される考察では自然これらと関係をもつて論じなければならぬものも生じてきている。

尚、第1乃至第3防火構造方式は何れが有利かと云う点は、スプリンクラー等の消火装置、或いは硬質石綿板等の不燃材料の普及程度、国内生産の問題等主に経済的理由に左右されるものであつて、本実験からは結論を出すことは出来ないが、先年度報告末尾にも述べた通り、我が国の現状から見て最も利用度の多いと考えられる第3方式を本研究の主な対象として来た。

又、附随的に本研究は硬質石綿板等不燃性材料の発達改善を促し、その国産品は欧米諸国のそれに近いものが出るようになったが、今後一層の品質の改良とその普及が望ましい。

本試験研究の成果は、旅客船に限らず一般貨物船、油槽船等の防火構造設計に対して適宜利用される外、さらに船内消火、避難、救命等の対策に対しても何らかの参考となるものと思う。

附 図

APPENDIX

Table 1

No.	Item	Scantling	Unit weight	Number	Total weight
1	Steel pl.	1,300×2,108 ×6	4.71kg/m ²	1	129kg
2	Stiffener	75×75×6A, 2,108mm	14.4 kg	3	43.2
3	Channel liner	10.5×60× 3.8, 1,972	3.5 „	6	21.0
4	Hard asbestos (lath)	25.5×106 ×1,972	5.5 „	3	16.5
5	Hard asbestos board t. 16mm	650×1,983	17.7 „	2	35.4
6	„	642×1,983	17.5 „	1	17.5
7	„	574×1,983	14.6 „	1	14.6
Total					277.2

Table 2

Item	Notation	
Temperature measuring point	1—1	Furnace temperature, being 20 mm away from exposed face
	∴	On the exposed surface
	10—1	Unexposed face temperature, covered by asbestos pad (100×100×10)
	∴	at the back of stiffener
	10—10	At the back of exposed side hard asbestos board
	∴	In the air space of exposed side
	1—2	On the exposed side of test plate
	10—4	On the unexposed side
	10—5	In the air space of unexposed side
	10—6	On the exposed side of unexposed side hard asbestos board
Temperature measuring point	1—1	Between the exposed hard asbestos board and channel liner
	10—2	Between the channel liner and lath of hard asbestos board
	10—3	Between the lath and steel plate
	10—4	Inside face of the stiffener
	10—5	Between the unexposed channel liner and hard asbestos board
Reflection measuring point	upper	Reflection of test sample
	middle	“ “
	lower	“ “

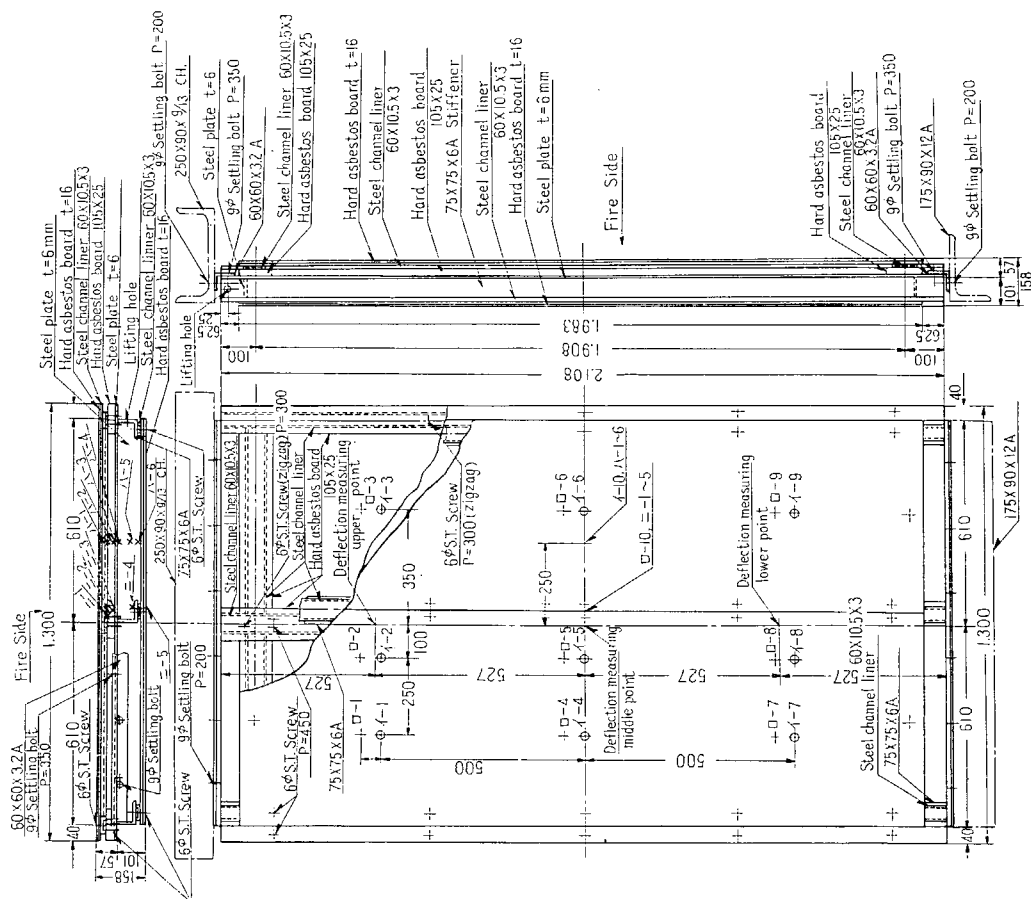


Fig. 1. Test Sample IAH1

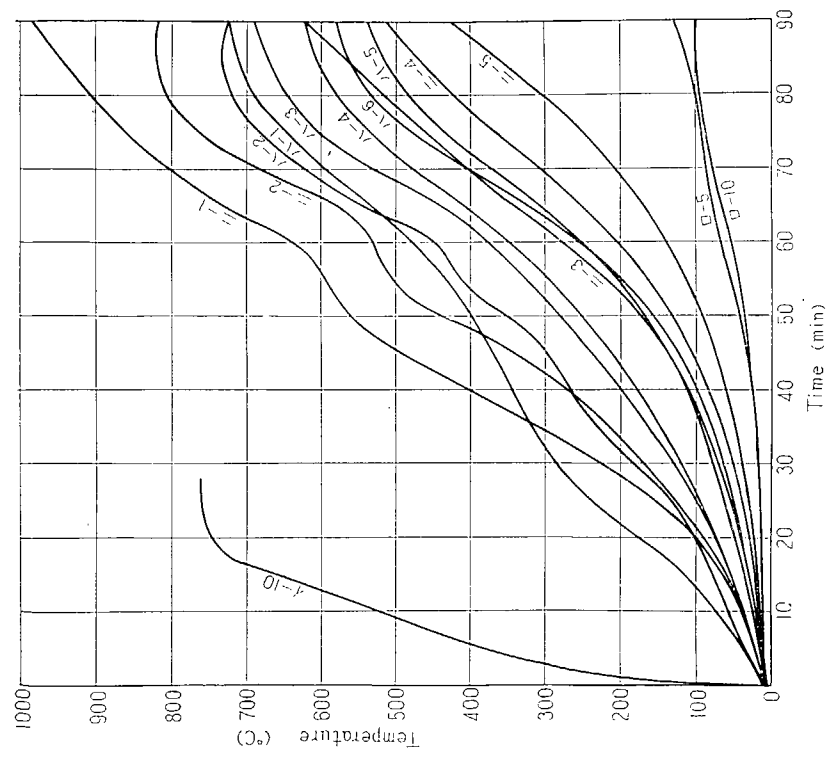


Fig. 2. IAH
Temperature Curves

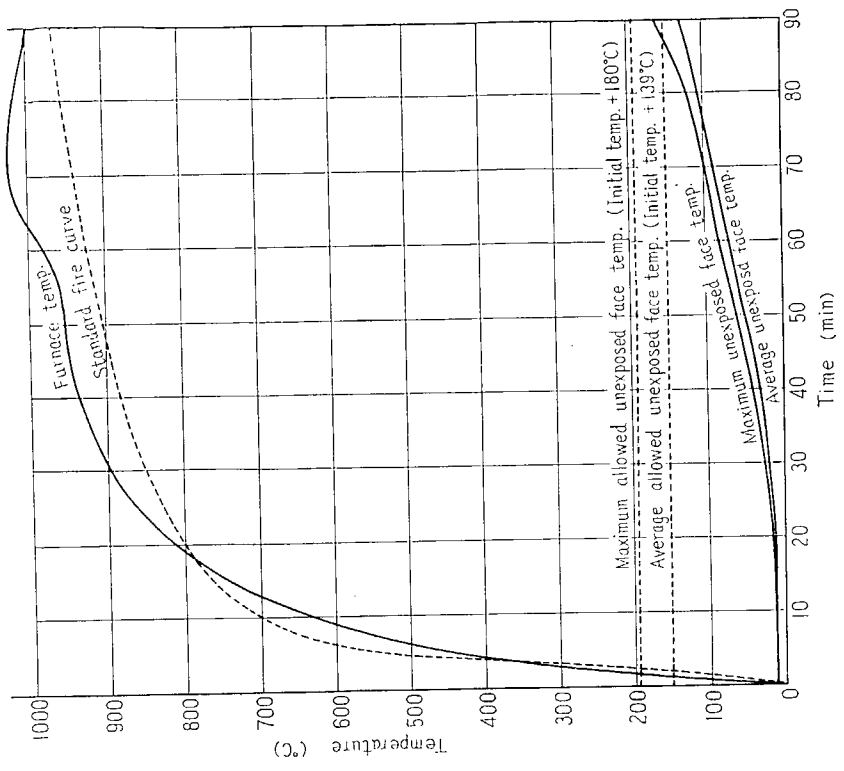


Fig. 3. IAH
Curves of furnace temperature and unexposed face temperature

Table 3

No.	Item	Scantling	Unit weight	Num-ber	Total weight
1	Steel plate (t=6)	1,300×2,108	47.1kg/m ²	1	129.0 kg
2	Suffener	75×75×6A, 2,108	14.4kg/m	3	43.2
3	Hard asbestos board (lath)	25×105×900	2.3kg	6	13.8
4	Channel liner	60×25×2	1.74kg/m	3	6.4
5	Flexible board (t=8)	64.5×1,988	15.6kg/m ²	1	20.0
6	"	569×1,988	"	1	17.7
7	Rock wool (t=25)		6.33kg/m ²		14.9
8	Steel plate				9.4
9	Angle				7.5
10	Screw, Bolt nut	60×60×3.2		2	2.5
	Total				264.4
	Measured weight				293.0

Table 4

Item	Notation	Remarks
Temperature measuring point	1	Furnace temperature, being 20 mm away from exposed face
	10	On the exposed surface
	11	"
	12	"
	1	The exposed face temperature,
	10	covered by asbestos pad ($100 \times 100 \times 10$)
	11	" at the back of channel liner
	1	" at the back of stiffener
	2	In the air space
	2	On the face of rock wool
Deflection measuring point	3	Between the rock wool and steel plate
	1	Between the hard asbestos board (lath) and flexible board
	2	Between the stiffener and hard asbestos board (lath)
	upper middle	Deflection of test sample
	lower	"
		"

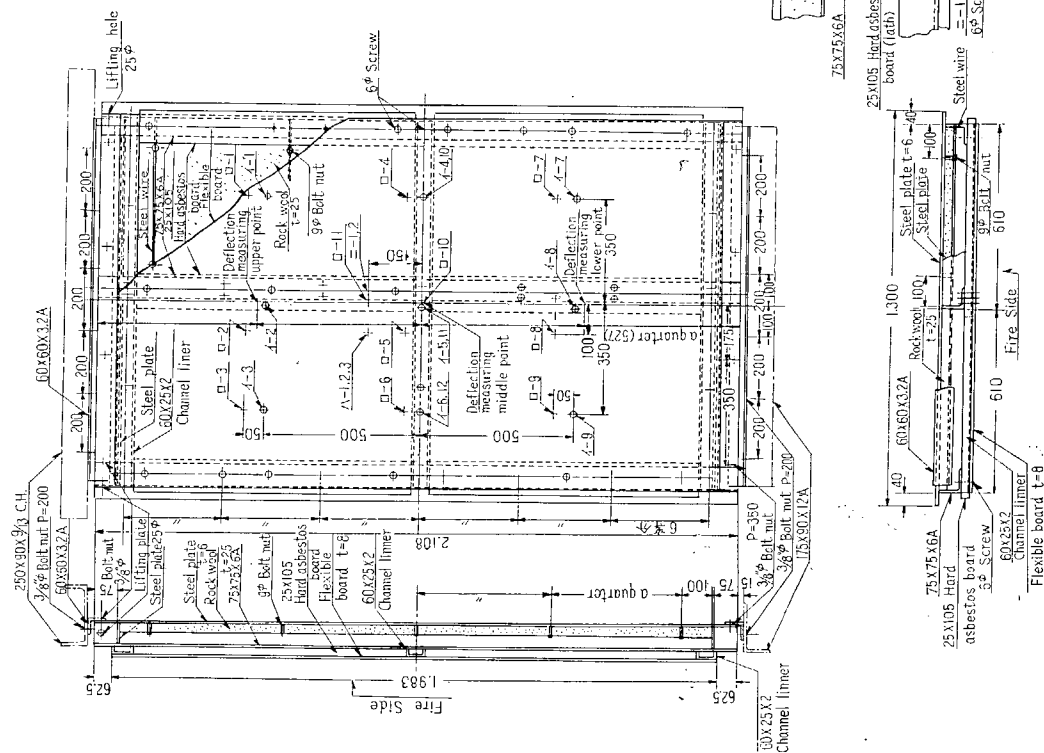


Fig. 4. Test Sample IAM 14

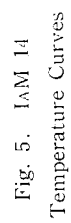


Table 5

No.	Item	Scantling	Unit weight	Number	Total weight
1	Steel plate	t=6	47.1kg/m ²	0.8m ²	37.6 kg
2	Beam	75×125×7 INV.A.	10.7kg/m	1.0m	10.7
3	Deck composition	t=30	density	0.024m ³	48.0
4	Anchor piece				
5	Rock wool	t=25×2	6.3kg/m ²		5.0
6	Galvanized steel plate	# 22 t=0.70	5.5kg/m ²	0.8m ²	4.4
7	Stud				
Total					105.7

Table 6

Item	Notation	Remarks
Temperature measuring point	1-1	Furnace temperature, being 20 mm away from exposed surface
	1-2	" " on the exposed surface
	1-3	Unexposed face temperature, covered by asbestos pad (100×100×10)
	1-4	Back of the beam
	1-5	In the rock wool
	1-6	Under face of steel deck
	2-1	On the steel deck
	2-2	On the anchor piece
	2-3	On the face of beam flange
	2-4	On the beam web
	3-1	At the root of beam
	3-2	On the surface of steel deck at the back of beam

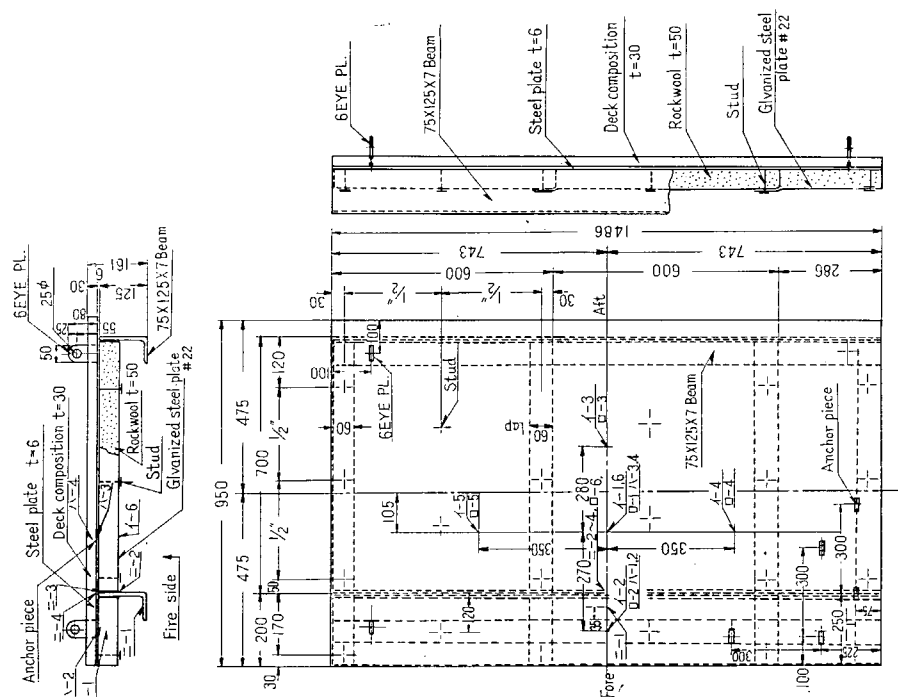


Fig. 6. Test Sample IIIAH4

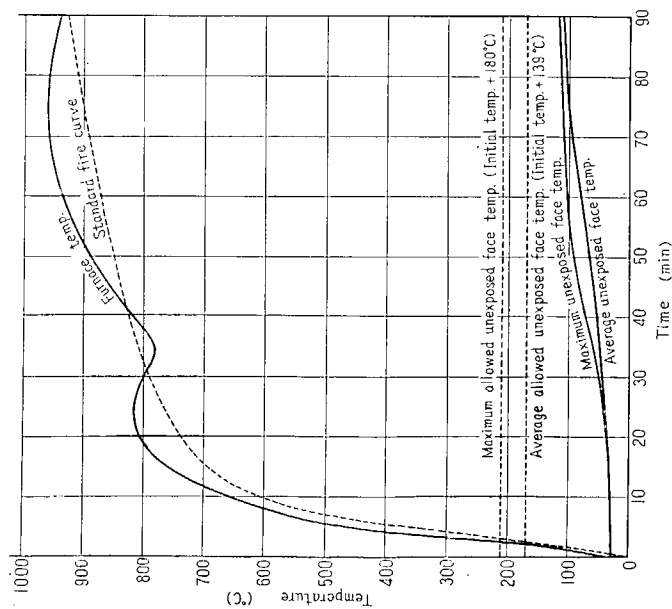


Fig. 7. IIIAH4
Temperature Curves

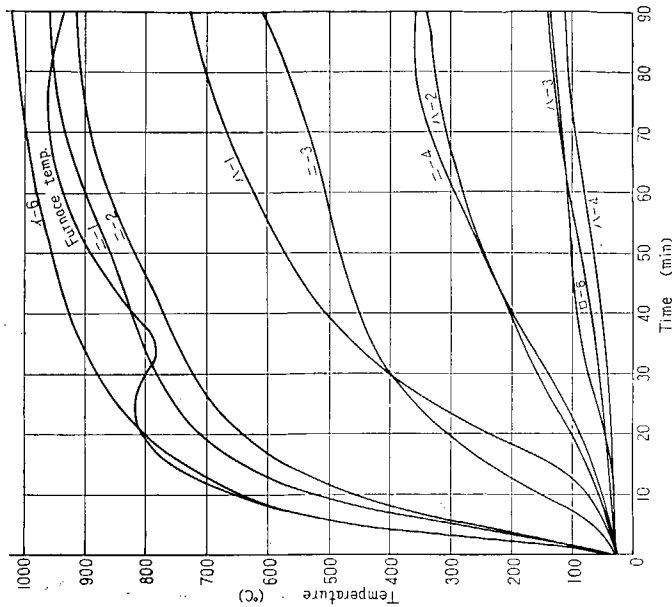
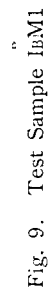


Fig. 8. IIIAH4
Temperature Curves of the Measuring Points

Item	Scantling	Number	Unit weight	Total weight
Steel sash	1.6			15.0 kg
Hard asbestos board	$614 \times 2, 106 \times 22.3$	2	19.0 kg/m ²	49.2
Total				64.2

Item	Notation	Remarks
Temperature measuring point	1—1	Furnace temperature, being 20 mm away from exposed surface
	"—2	"
	"—3	"
	"—4	"
	"—5	"
	"—6	"
	"—7	"
	"—8	"
	"—9	"
	"—10	On the exposed surface of steel sash
	1—1	Unexposed face temperature, covered by asbestos pad ($100 \times 100 \times 10$)
	"—2	"
	"—3	"
	"—4	"
	"—5	"
	"—6	"
	"—7	"
	"—8	"
	"—9	"
	"—10	Unexposed sash temperature, covered by asbestos pad ($100 \times 100 \times 10$)
	1—1	In the steel sash



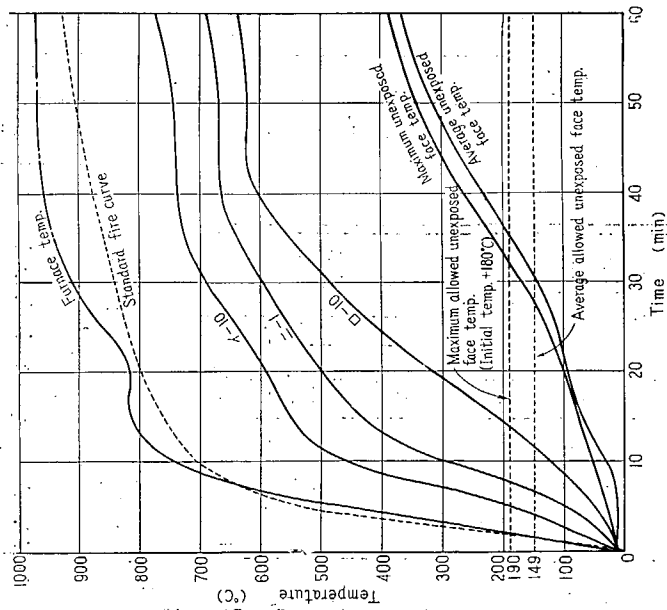


Fig. 10. IBM Temperature Curves

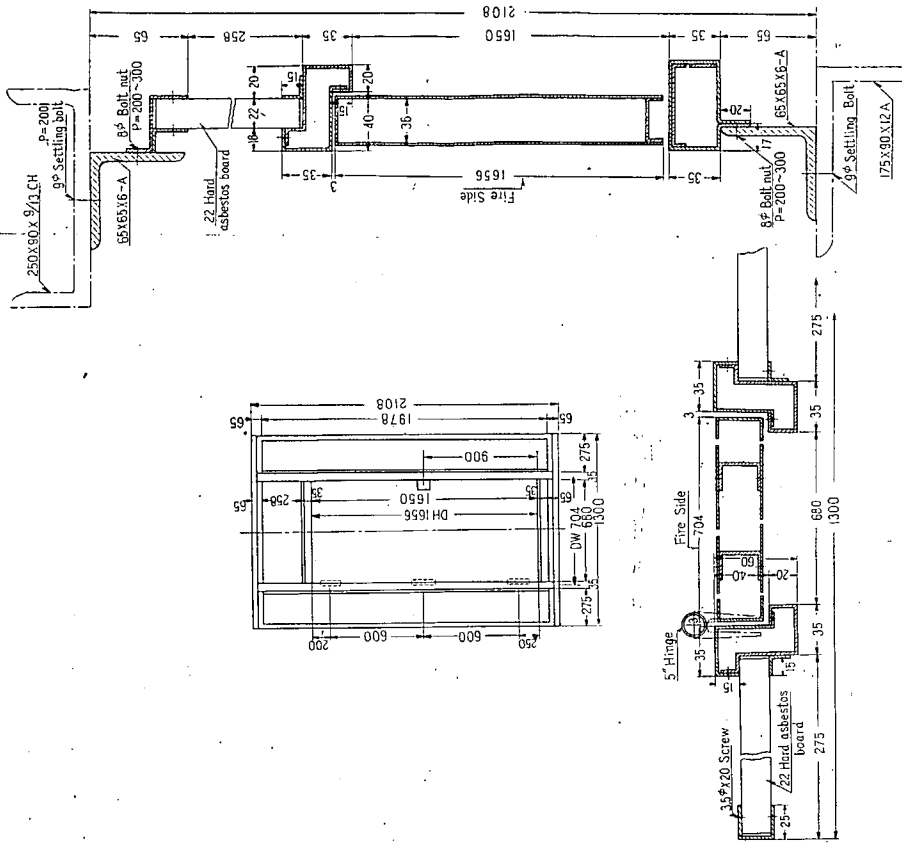


Fig. 11. Test Sample VB03

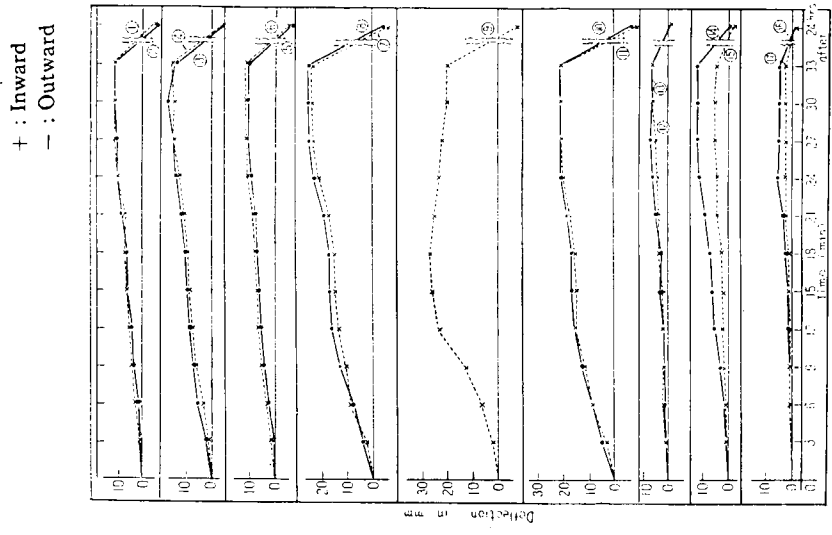


Fig. 14. VB03
Deflection Curves

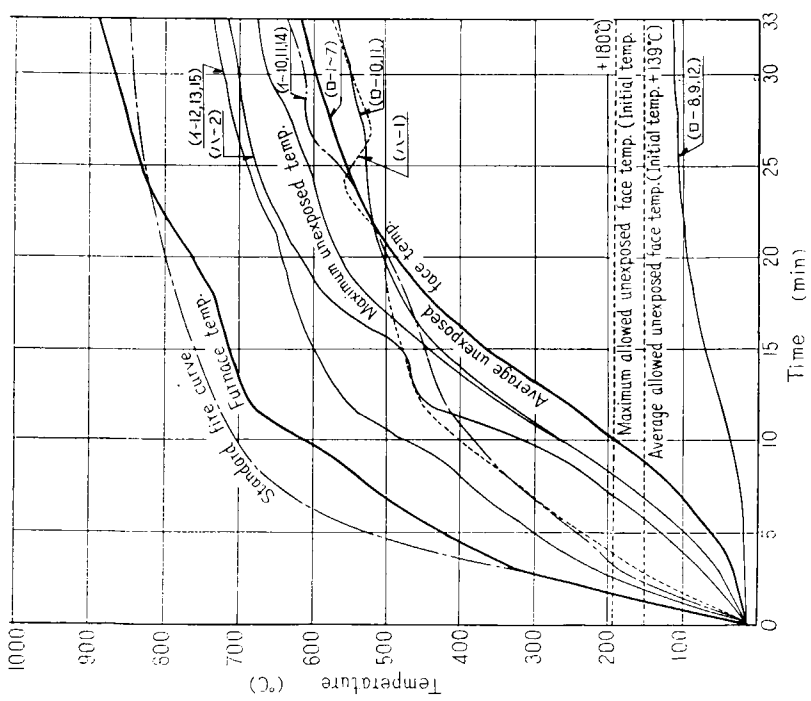


Fig. 13. VB03 Temperature Curves

Table 11 Arrangement of thermocouples
(air temperature)

No.	position	junction
1	upper position	sealed
2	"	"
3	"	"
4	"	"
5	"	"
6	"	bare
7	middle position	sealed
8	"	bare
9	"	"
10	"	"
11	"	"
12	"	"
13	"	"
14	lower position	sealed
15	"	"
16	"	"
17	in ward robe	"
18	in chest of drawers	bare
19	passage	"
20	A. side room	"
21	F. side room	"

Notice { × Thermocouple sealed in steel pipe (1~5, 7, 8, 14~16)
○ Bare thermocouple (6, 9~13, 17~21)

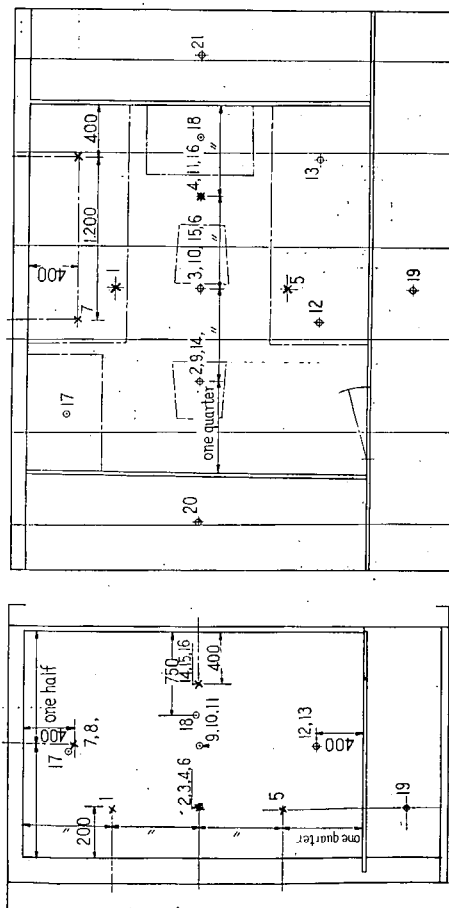


Fig. 16. Arrangement of thermocouples distribution (air temperature)

Table 12 Arrangement of thermocouples
(structure's temperature)

No.		Arrangement
22	Roof	In ceiling
23		On deck comp.
24		In ceiling
25		On deck comp.
26		In ceiling
27		On deck comp.
28	Floor	On deck comp.
29		Under steel deck
30		On deck comp.
31		Under steel deck
32		On deck comp.
33		Under steel deck
34	Passage wall	Outside of wall
35		" "
36		Outside of wall sash
37		" "
38		" "
39	F. side wall	Outside of wall
40		" "
41		Inside of wall
42		Outside of wall joint
43	P. side wall	Outside of steel wall
44		In ceiling
45	A. side wall	In wall
57	C. side wall	Inside of wall
58		" "
59		Inside of door
60		Outside of door

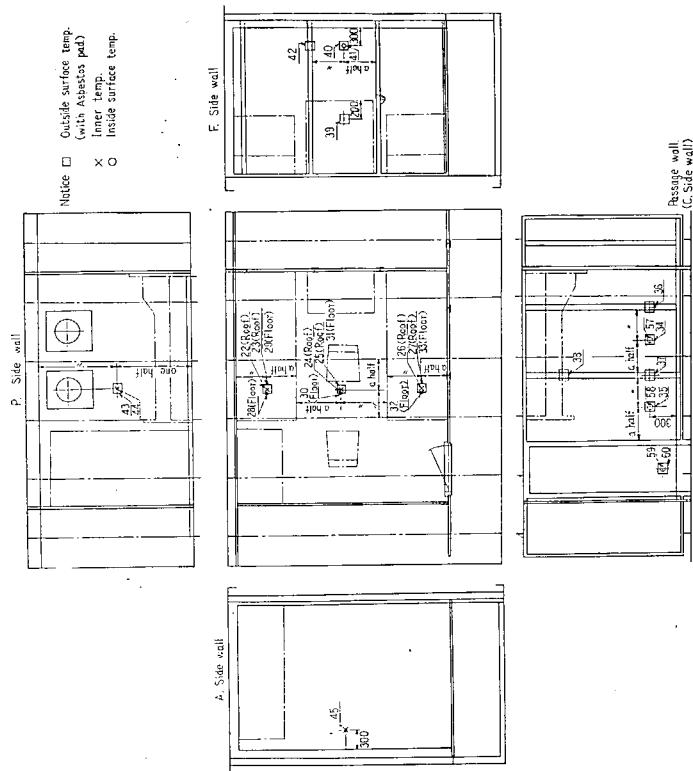


Fig. 17. Arrangement of thermocouple distribution
(Structure's temperature)

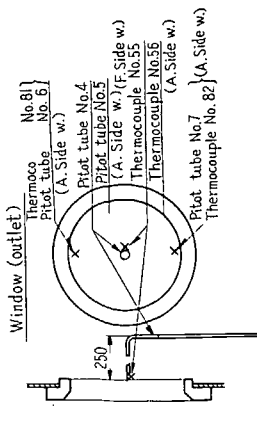


Table 13 Arrangement of thermocouples (other temperature)

No.	Arrangement
46	Upper edge of window
47	Outside surface of side wall
48	"
49	"
50	Lath of passage ceiling
51	"
52	Air space of passage ceiling
53	Air space of F side room ceiling
54	Pitot tube (door)
55	" (F side window)
56	" (A " ")
61	Passage air temperature (front of the door)
62	C side, outside wall
63	" (" ")
78	Flame temperature at window
80	"
81	Pitot tube (A side window)
82	Pitot tube (A side window)

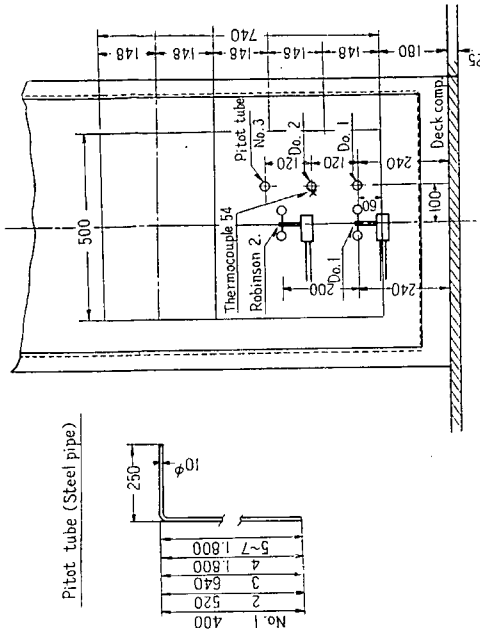
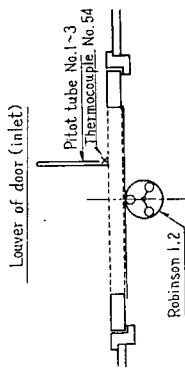


Fig. 19. Arrangement of air velocity measurement

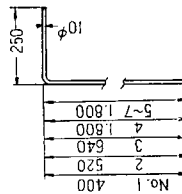
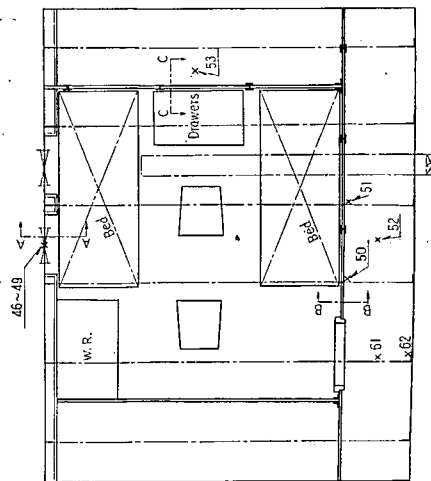


Fig. 18. Arrangement of thermocouple distribution



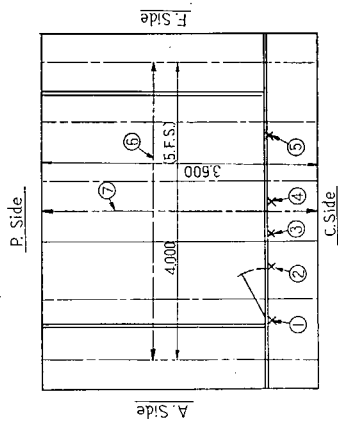
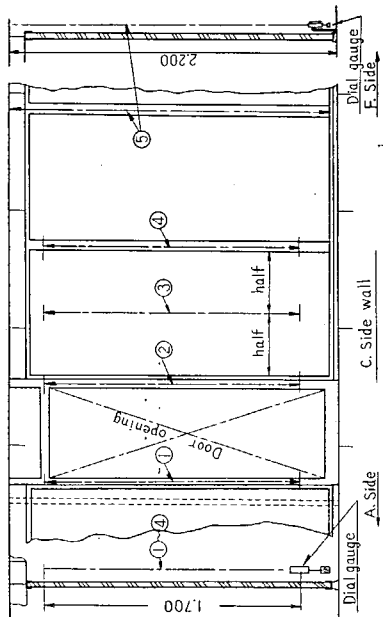


Fig. 20. Arrangement of deflection measurement.

Table 14 Arrangement of Deflection

No.		distance
1	Door frame (A side)	1, 700
2	" " " " " " " "	" "
3	Hard asbestos board vertical on C. wall	" "
4	Sash	2, 200
5	between decks (A-F direction)	4, 000
6	Floor deck (P-C " " " ")	3, 600
7	" " " " " " " "	" "

昭和33年6月20日 印刷
昭和33年6月25日 発行

日本造船研究協会報告 第22号

発行人 出 淵 巽
発行所 社団法人日本造船研究協会
東京都中央区京橋1ノ2
セントラルビル5階
電話 (28) 1 4 0 9

印刷所 創 文 社
東京都荒川区尾久町3ノ2154
電話 (80) 3 6 9 2