Curve-Fitting 法による低温熱特性測定装置

吉 和 雅 雄・岩 田 章

川崎重工業株式会社技術研究所 673 明石市川崎町 1-1

(1975年4月18日受理)

Characteristics of an Apparatus based on Curve-Fitting Method
for Measuring Thermal Properties in Cryogenic Temperatures

Masao YOSHIWA and Akira IWATA

Technical Research Laboratory, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.,
1-1 Kawasaki-cho, Akashi, Hyogo, 673, Japan

(Received April 18, 1975)

Synopsis :

An apparatus was developed in order to obtain thermal properties of nonmetallic materials for cryogenic storage tanks.

The present apparatus was designed to determine rapidly heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity on the base of curve-fitting method developed by Harmathy, but the apparatus developed by authors was markedly different as regards the performance characteristics from that reported by him, that is, the new apparatus could be used to measure thermal conductivity in the wide range, approximately 0.01 to 10 kcal/m.h. °C, and to measure heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity in the temperature range of -180 to $+50^{\circ}\text{C}$.

Firstly, the study was carried out with the polyurethane foam to confirm the performance characteristics of the apparatus conformed ASTM C177-74 and JIS A 1413. Consequently the three conclusions were found :

(1) the measured values of thermal conductivity at approximately -160°C and $+30^{\circ}\text{C}$ agreed respectively with those obtained by using the guarded hot plate apparatus.

(2) maxima of the relative errors in measurements were estimated to be $\pm 16\%$ for the thermal conductivity and to be $\pm 10\%$ for the thermal diffusivity (in case of structural materials, however, those of concretes were $\pm 5\%$ for the thermal conductivity and $\pm 3\%$ for the thermal diffusivity) and

(3) the time required for measuring thermal properties on a condition was less than 8 hours : it was shorter in 70 to 80% than that attained by the guarded hot plate apparatus.

Secondly, in total seven different commercially available materials were evaluated by use of the apparatus.

The materials investigated were such structural materials as concretes, woods, frozen soils and autoclaved lightweight concretes (ALC) as well as such insulating materials as calcium silicates, phenolic foams and polyurethane foams.

The measured results were as follows :

(1) heat capacity of these materials decreased in a monotone with decreasing in temperature, but each experimental curve on heat capacity to temperature of them had a crook at about 0°C in case of the wood containing water of 50% and the soil containing water of 30% respectively. It may be caused by freezing of the free water in the materials.

(2) thermal conductivity of the insulating materials and ALC decreased monotonically as decrease in temperature, while that of the structural materials except for ALC did not show monotonic decrease with decreasing in temperature.

1. はじめに

わが国における LNG 関連産業の進展にともない、各種材料の低温物性値の測定は非常に盛んになってきた。筆者らも、船用および陸用 LNG タンクの基礎研究として、各種材料の低温物性値を測定してきた。このような測定では、硬質ポリウレタンフォーム(PUF)などの断熱材やコンクリートなどの非金属構造材の熱特性を得るためにとりわけ長時間を要するというのが、これまでの問題点であった。

熱伝導率が 1 kcal/mh°C 程度以下の構造材や断熱材の熱伝導率測定方法としては、熱保護板方式などの定常法が最もよく研究されており^{1)~3)}、JIS⁴⁾⁵⁾や ASTM^{6)~8)}でもこの方法が採用されている。実際、すでに報告されている断熱材などの測定結果は、定常法によるものが多い^{9)~13)}。これまで筆者らも、直径 160 mm×厚さ 15 mm の小型供試体や、2.5m×2.0m×厚さ 0.2m の大型供試体の熱伝導率を決定するために、熱保護板方式を採用してきた^{14)~16)}。しかし、定常法による測定は、定常的な温度勾配を供試体へ与えたあと行なうため、かなり長時間を要する。とくに断熱材の場合は、一般に材料の不均一性が大きい供試体はかなり大きくしないと有効な測定結果が得られず、しかも温度拡散率が小さいことと相まって、その測定に長時間を要する。実際、筆者らの小型供試体(直径 160mm)の熱伝導率を-160°Cで測定するには約50時間を要し¹⁴⁾、大型供試体(2.5m×2.0m)の熱伝導率を-160°Cと室温の平均値として求めるには約200時間を要した¹⁴⁾。この上、各種材料の温度拡散率または比熱を低温で測定するために、ASTM¹⁷⁾で規格化されているような定常法で測定すると仮定すると、熱伝導率測定と同様な理由によって、熱伝導率測定とほぼ同程度の長時間を要する。結局、一つの小型供試体の熱伝導率、温度拡散率および比熱のすべてを低温で決定するには、従来の定常法に従う限り約100時間も必要となる。

このような問題点、すなわち要長時間性を排除するには、供試体が熱平衡に達する前に測定を行なう非定常法を採用し、しかも熱伝導率と温度拡散率または比熱を同時に測定するのが最も合理的である。非定常法で熱特性を得るための方式は、すでに多く報告されており^{18)~22)}、しかもこれらの方式にしたがった装置も市販されている。しかし、筆者らの目的は断熱材や非金属構造材の熱伝導率、温度拡散率および比熱を室温から LNG 温度領域で迅速に決定することだが、このような目的に適う市販装置や試作装置の報告例は見当たらない。このような情勢から、新しい装置の試作から手がけることになり、測定すべき材料の種類や測定項目を勘案して、新装置の方式としては1964年に HARMATHY によって完成された Curve-Fitting 法を採用した²⁰⁾。本方式の適用例は、HARMATHY によるコンクリートの高温熱特性試験しか見当たらないが²⁰⁾、今回、この適用例を参考にして、Table 1 に示すような特性をもつ装置を試作した。さらに本試作装置を使って、断熱材(PUF、フェノールフォームおよびケイ酸カルシウム板)と非金属構造材(コンクリート、凍結土、木材および ALC)の熱伝導率、温度拡散率および比熱を決定した。以下に、本装置の概要および種々の材料についての測定結果を報告する。

Table 1 Characteristics of the Apparatus

Thermal Conductivity Range of Test Specimen	10~0.01 Kcal/m. h. °C
Dimension of Test Specimen	120×200×200mm high
Temperature Range	-180~+50°C
Time Required for Measurement	3~8h.
Maximum Heater Output	2590Kcal/m ² . h (0.3W/cm ²)

2. 測定原理および装置

今回試作した低温熱特性測定装置の外観を Fig. 1 に、そのブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。本

装置は、低温槽を中心として、温度制御系、熱特性測定系、冷媒自動補給系およびガス置換系から成り立っ

ている。

2.1 Curve-Fitting 法の原理

本方式の原理は、半無限物体における一次元熱流の問題としてすでに解かれている²³⁾ので、本文ではその計算結果を記するにとどめる。Fig. 3 で示すように、無限大の均質供試体中へ熱容量無限小の平面状ヒータ板を配置する。時刻 $t < 0$ で供試体の温度をゼロとし、 $t \geq 0$ でヒータ板から一定熱量 q が発しているとする、 $T_l(t)$ および $T_0(t)$ はそれぞれ(1)式および(2)式で表わされ²³⁾、定性的には Fig. 3 のようになる。

$$T_l(t) = \frac{ql}{k} \cdot \left(\frac{\kappa t}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{l^2}{\kappa t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$T_0(t) = \frac{q}{k} \cdot \left(\frac{\kappa t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

さらに(1)式から次式が求まる。

$$\frac{T_l(2t)}{T_l(t)} = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{ierfc}\{(1/2\sqrt{2}) \cdot (l^2/\kappa t)^{\frac{1}{2}}\}}{\text{ierfc}\{(1/2) \cdot (l^2/\kappa t)^{\frac{1}{2}}\}} \quad (3)$$

したがって、時刻 t および $2t$ における供試体内温度を実測すれば(3)式から温度拡散率 κ を求めることができ、この κ を(1)式へ代入すると熱伝導率 k を求めることができる。また(2)式からも、ヒータ板温度の実測値と(3)式から求めた κ を用いて熱伝導率 k を求めることができる。このようにして求めた k および κ から、(4)式を使って比熱 C を求めることができる。

Fig. 1 a General View of the Apparatus

Fig. 2 Schematic Diagram of the Apparatus

Fig. 3 Principle of Curve-Fitting method

$$C = \frac{k}{\kappa \rho} \quad (4)$$

実際には、(1)式や(3)式を直接解いて k や κ を算出するのではなく、HARMATHY²⁰⁾の方法に従って、(1)式および(3)式をあらかじめ電算機で解いたFig.4のような特性曲線を使えばよい。しかし筆者らは測定精度を高めるために、(1)式および(3)式からTable A1に示す特性表を作成した。

2.2 試作装置の概要

2.2.1 低温槽

低温槽の概略図をFig.2に示す。低温槽の冷却は、液体窒素を冷媒とし、ヘリウムガス層を通じて行なった。低温槽の温度制御は、低温槽外周へ設置したシーズヒータの発熱量をPID制御することによって行なった。シーズヒータの最大出力は200Wであり、液体窒素の消費をできるだけ少なくするために、低温槽が設定温度近くに達すると、ヘリウムガス層の圧力をTable 2に示すような圧力に設定した。

Table 3に示したような材料は、低温槽内部を真空に保持したままでは測定できないため、乾燥ヘリウムガスを低温槽へ満たして常時大気圧に保持した。供試体の冷却は、このヘリウムガスを介して行なった。

Fig. 4 Characteristic Curves Based on Eq. (1) and Eq. (3)

Table 2 Standard of GHe Pressure in GHe Layer

Cryostat Temperature (°C)	GHe Pressure (Torr)	Output of Sheath Heater (Watt)
− 50	5×10^{-3}	40
−100	1×10^{-1}	20
−160	5×10^{-1}	0

Table 3 L-values of Specimens

Specimen		L-value (mm)
Insulating Material	Phenolic Foam	10
	Polyurethane Foam	10~13
	Calcium Silicate Board	15
Structural Material	Concrete	15
	Frozen Soil	15
	Wood	15
	ALC	15

本装置では、約2時間で低温槽を+50°C から−180°C の任意温度に設定できる。しかし、実際の測定に

は供試体自身が所定温度に達しなければならないため、さらに5時間程度を要する。このような時間損失を少なくするために、同時に2ケの異種材料を測定できるようにした。また、冷媒としての液体窒素は、白金抵抗測温体を液面検出センサとして自動補給した。

2.2.2 供試体内温度測定系

供試体内温度の測定位置、すなわち Fig. 3 における l 値を決定するには、 $T_l(t)$ が数 °C 以上になると、 $T_l(2t)/T_l(t)$ が約 1.6~6 の範囲にくるように配慮しなければならない。もしこれらの条件を満たしていない場合は、記録計チャートからの $T_l(t)$ の読み取りや、Fig. 4 および Table A1 からの k や κ の読み取りの際に誤差が大きくなる。また、 $T_l(t)$ や $T_l(t)/T_l(2t)$ を決定するには時刻 t も重要な因子であり、本装置では記録計のチャート送り速度を勘案して約2~4分とした。このような諸条件ならびに被測定材料の k や κ の予想値を(1)式へ代入することにより、Table 3 に示すような l 値を決定した。

供試体内温度を測定するには、次の3点に特に注意しなければならない。

Table A1 Characteristics Table Based on Eq. (1) and Eq. (3)

$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$
1.600	5.5589	0.889596	1.900	1.2400	0.250832	2.200	0.6541	0.120377	2.500	0.4455	0.070155
1.610	5.0887	0.834736	1.910	1.2049	0.243530	2.210	0.6439	0.117947	2.510	0.4410	0.069050
1.620	4.6817	0.785370	1.920	1.1716	0.236549	2.220	0.6340	0.115589	2.520	0.4365	0.067971
1.630	4.3268	0.740736	1.930	1.1400	0.229873	2.230	0.6244	0.113300	2.530	0.4321	0.066915
1.640	4.0153	0.700203	1.940	1.1100	0.223480	2.240	0.6151	0.111077	2.540	0.4278	0.065884
1.650	3.7401	0.663239	1.950	1.0814	0.217355	2.250	0.6061	0.108919	2.550	0.4236	0.064875
1.660	3.4957	0.629408	1.960	1.0542	0.211482	2.260	0.5974	0.106821	2.560	0.4195	0.063889
1.670	3.2775	0.598337	1.970	1.0283	0.205849	2.270	0.5889	0.104783	2.570	0.4155	0.062924
1.680	3.0818	0.569719	1.980	1.0036	0.200441	2.280	0.5807	0.102801	2.580	0.4115	0.061980
1.690	2.9055	0.543277	1.990	0.9800	0.195246	2.290	0.5727	0.100874	2.590	0.4077	0.061056
1.700	2.7460	0.518782	2.000	0.9575	0.190252	2.300	0.5649	0.099000	2.600	0.4039	0.060152
1.710	2.6013	0.496034	2.010	0.9359	0.185450	2.310	0.5573	0.097176	2.610	0.4002	0.059268
1.720	2.4694	0.474865	2.020	0.9153	0.180829	2.320	0.5500	0.095402	2.620	0.3966	0.058402
1.730	2.3489	0.455115	2.030	0.8955	0.176379	2.330	0.5428	0.093674	2.630	0.3930	0.057555
1.740	2.2384	0.436656	2.040	0.8765	0.172093	2.340	0.5359	0.091992	2.640	0.3895	0.056724
1.750	2.1368	0.419370	2.050	0.8583	0.167962	2.350	0.5291	0.090354	2.650	0.3861	0.055912
1.760	2.0431	0.403154	0.060	0.8408	0.163978	2.360	0.5225	0.088758	2.660	0.3828	0.055116
1.770	1.9565	0.387914	0.070	0.8241	0.160134	2.370	0.5161	0.087203	2.670	0.3795	0.054336
1.780	1.8763	0.373570	0.080	0.8079	0.156424	2.380	0.5098	0.085688	2.680	0.3762	0.053572
1.790	1.8019	0.360049	0.090	0.7924	0.152843	2.390	0.5037	0.084211	2.690	0.3731	0.052823
1.800	1.7326	0.347289	2.100	0.7775	0.149382	2.400	0.4977	0.082771	2.700	0.3700	0.052090
1.810	1.6680	0.335225	2.110	0.7631	0.146037	2.410	0.4919	0.081367	2.710	0.3669	0.051371
1.820	1.6077	0.323807	2.120	0.7492	0.242802	2.420	0.4863	0.079997	2.720	0.3639	0.050667
1.830	1.5512	0.312988	2.130	0.7358	0.139674	2.430	0.4808	0.078661	2.730	0.3610	0.049976
1.840	1.4983	0.302725	2.140	0.7229	0.136647	2.440	0.4754	0.077356	2.740	0.3581	0.049298
1.850	1.4486	0.292977	2.150	0.7104	0.133717	2.450	0.4701	0.076083	2.750	0.3553	0.048634
1.860	1.4018	0.283709	2.160	0.6984	0.230879	2.460	0.4650	0.074841	2.760	0.3525	0.047988
1.870	1.3578	0.274889	2.170	0.6867	0.128129	2.470	0.4599	0.073628	2.770	0.3498	0.047344
1.880	1.3163	0.266488	2.180	0.6755	0.125465	2.480	0.4550	0.072443	2.780	0.3471	0.046717
1.890	1.2771	0.258477	2.190	0.6646	0.122822	2.490	0.4502	0.071285	2.790	0.3444	0.046103

$\frac{T_l(2t)}{T_l(t)}$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{k T_l}{ql}$	$\frac{T_l(2t)}{T_l(t)}$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{k T_l}{ql}$	$\frac{T_l(2t)}{T_l(t)}$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{k T_l}{ql}$	$\frac{T_l(2t)}{T_l(t)}$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{k T_l}{ql}$
2.800	0.3418	0.045499	3.400	0.2401	0.023099	4.000	0.1904	0.013659	4.600	0.1609	0.008884
2.810	0.3393	0.044907	3.410	0.2390	0.022874	4.010	0.1898	0.013552	4.610	0.1605	0.008826
2.820	0.3368	0.044326	3.420	0.2379	0.022652	4.020	0.1891	0.013447	4.620	0.1601	0.008769
2.830	0.3343	0.043756	3.430	0.2368	0.022433	4.030	0.1885	0.013343	4.630	0.1597	0.008712
2.840	0.3319	0.043197	3.440	0.2358	0.022217	4.040	0.1879	0.013239	4.640	0.1593	0.008655
2.850	0.3295	0.042647	3.450	0.2347	0.022004	4.050	0.1873	0.013137	4.650	0.1589	0.008599
2.860	0.3271	0.042107	3.460	0.2337	0.021795	4.060	0.1868	0.013036	4.660	0.1586	0.008544
2.870	0.3248	0.041578	3.470	0.2326	0.021587	4.070	0.1862	0.012936	4.670	0.1582	0.008489
2.880	0.3226	0.041057	3.480	0.2316	0.021383	4.080	0.1856	0.012837	4.680	0.1578	0.008435
2.890	0.3203	0.040547	3.490	0.2306	0.021182	4.090	0.1850	0.012740	4.690	0.1574	0.008381
2.900	0.3181	0.040045	3.500	0.2296	0.020983	4.100	0.1845	0.012643	4.700	0.1571	0.008327
2.910	0.3160	0.039552	3.510	0.2286	0.020787	4.110	0.1839	0.012548	4.710	0.1567	0.008274
2.920	0.3138	0.039068	3.520	0.2276	0.020593	4.120	0.1833	0.012453	4.720	0.1563	0.008222
2.930	0.3117	0.038592	3.530	0.2266	0.020402	4.130	0.1828	0.012359	4.730	0.1560	0.008170
2.940	0.3097	0.038124	3.540	0.2257	0.020213	4.140	0.1822	0.012267	4.740	0.1556	0.008118
2.950	0.3076	0.037664	3.550	0.2247	0.020027	4.150	0.1817	0.012175	4.750	0.1553	0.008067
2.960	0.3056	0.037213	3.560	0.2238	0.019844	4.160	0.1811	0.012085	4.760	0.1549	0.008017
2.970	0.3037	0.036769	3.570	0.2229	0.019662	4.170	0.1806	0.011995	4.770	0.1546	0.007966
2.980	0.3017	0.036333	3.580	0.2219	0.019484	4.180	0.1801	0.011906	4.780	0.1542	0.007917
2.990	0.2998	0.035904	3.590	0.2210	0.019307	4.190	0.1795	0.011818	4.790	0.1539	0.007867
3.000	0.2979	0.035482	3.600	0.2201	0.019133	4.200	0.1790	0.011731	4.800	0.1535	0.007819
3.010	0.2961	0.035067	3.610	0.2192	0.018961	4.210	0.1785	0.011645	4.810	0.1532	0.007770
3.020	0.2942	0.034660	3.620	0.2183	0.018791	4.220	0.1780	0.011560	4.820	0.1528	0.007722
3.030	0.2924	0.034259	3.630	0.2175	0.018623	4.230	0.1774	0.011476	4.830	0.1525	0.007675
3.040	0.2906	0.033864	3.640	0.2166	0.018457	4.240	0.1769	0.011392	4.840	0.1522	0.007628
3.050	0.2889	0.033477	3.650	0.2158	0.018294	4.250	0.1764	0.011310	4.850	0.1518	0.007581
3.060	0.2872	0.033095	3.660	0.2149	0.018132	4.260	0.1759	0.011280	4.860	0.1515	0.007535
3.070	0.2855	0.032719	3.670	0.2141	0.017973	4.270	0.1754	0.011148	4.870	0.1512	0.007489
3.080	0.2838	0.032350	3.680	0.2132	0.017815	4.280	0.1749	0.011068	4.880	0.1508	0.007443
3.090	0.2821	0.031987	3.690	0.2124	0.017660	4.290	0.1744	0.010988	4.890	0.1505	0.007398
3.100	0.2805	0.031629	3.700	0.2116	0.017506	4.300	0.1740	0.010910	4.900	0.1502	0.007353
3.110	0.2789	0.031277	3.710	0.2108	0.017355	4.310	0.1735	0.010833	4.910	0.1499	0.007309
3.120	0.2773	0.030931	3.720	0.2100	0.017205	4.320	0.1730	0.010756	4.920	0.1495	0.007265
3.130	0.2757	0.030590	3.730	0.2092	0.017057	4.330	0.1725	0.010680	4.930	0.1492	0.007221
3.140	0.2742	0.030255	3.740	0.2084	0.016911	4.340	0.1720	0.010604	4.940	0.1489	0.007178
3.150	0.2726	0.029924	3.750	0.2076	0.016766	4.350	0.1716	0.010530	4.950	0.1486	0.007135
3.160	0.2711	0.029599	3.760	0.2069	0.016623	4.360	0.1711	0.010456	4.960	0.1483	0.007092
3.170	0.2696	0.029276	3.770	0.2061	0.016482	4.370	0.1706	0.010383	4.970	0.1480	0.007050
3.180	0.2683	0.028964	3.780	0.2053	0.016343	4.380	0.1702	0.010310	4.980	0.1477	0.007008
3.190	0.2667	0.028653	3.790	0.2046	0.016206	4.390	0.1697	0.010239	4.990	0.1473	0.006967
3.200	0.2653	0.028348	3.800	0.2039	0.016070	4.400	0.1693	0.010168	5.000	0.1470	0.006925
3.210	0.2639	0.028047	3.810	0.2031	0.015935	4.410	0.1688	0.010098	5.010	0.1467	0.006885
3.220	0.2625	0.027750	3.820	0.2024	0.015802	4.420	0.1684	0.010028	5.020	0.1464	0.006844
3.230	0.2611	0.027458	3.830	0.2017	0.015671	4.430	0.1679	0.009959	5.030	0.1461	0.006804
3.240	0.2597	0.027171	3.840	0.2010	0.015542	4.440	0.1675	0.009891	5.040	0.1458	0.006764
3.250	0.2584	0.026887	3.850	0.2003	0.015414	4.450	0.1671	0.009823	5.050	0.1455	0.006725
3.260	0.2571	0.026608	3.860	0.1996	0.015287	4.460	0.1666	0.009757	5.060	0.1452	0.006686
3.270	0.2558	0.026333	3.870	0.1989	0.015162	4.470	0.1662	0.009690	5.070	0.1450	0.006647
3.280	0.2545	0.026062	3.880	0.1982	0.015038	4.480	0.1658	0.009625	5.080	0.1447	0.006609
3.290	0.2332	0.025795	3.890	0.1975	0.014916	4.490	0.1653	0.009560	5.090	0.1444	0.006571
3.300	0.2519	0.025532	3.900	0.1968	0.014795	4.500	0.1649	0.009495	5.100	0.1441	0.006533
3.310	0.2507	0.025273	3.910	0.1961	0.014675	4.510	0.1645	0.009432	5.110	0.1438	0.006495
3.320	0.2495	0.025017	3.920	0.1955	0.014557	4.520	0.1641	0.009368	5.120	0.1435	0.006458
3.330	0.2482	0.024765	3.930	0.1948	0.014440	4.530	0.1637	0.009306	5.130	0.1432	0.006421
3.340	0.2470	0.024516	3.940	0.1942	0.014325	4.540	0.1633	0.009244	5.140	0.1429	0.006384
3.350	0.2459	0.024272	3.950	0.1935	0.014211	4.550	0.1629	0.009182	5.150	0.1427	0.006348
3.360	0.2447	0.024030	3.960	0.1929	0.014098	4.560	0.1625	0.009122	5.160	0.1424	0.006312
3.370	0.2435	0.023792	3.970	0.1922	0.013986	4.570	0.1621	0.009061	5.170	0.1421	0.006276
3.380	0.2424	0.023558	3.980	0.1916	0.013876	4.580	0.1617	0.009002	5.180	0.1418	0.006240
3.390	0.2412	0.023327	3.990	0.1910	0.013767	4.590	0.1613	0.008943	5.190	0.1416	0.006205

$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$	$T_l(2t)$ $T_l(t)$	$\frac{\kappa t}{l^2}$	$\frac{kT_l}{ql}$
5.200	0.1413	0.006170	5.600	0.1315	0.004975	6.000	0.1235	0.004082	6.400	0.1168	0.003401
5.210	0.1410	0.006136	5.610	0.1313	0.004949	6.010	0.1233	0.004063	6.410	0.1166	0.003386
5.220	0.1407	0.006101	5.620	0.1311	0.004924	6.020	0.1231	0.004043	6.420	0.1164	0.003371
5.230	0.1405	0.006067	5.630	0.1308	0.004898	6.030	0.1229	0.004024	6.430	0.1163	0.003356
5.240	0.1402	0.006033	5.640	0.1306	0.004873	6.040	0.1227	0.004005	6.440	0.1161	0.003341
5.250	0.1399	0.006000	5.650	0.1304	0.004849	6.050	0.1226	0.003987	6.450	0.1160	0.003327
5.260	0.1397	0.005967	5.660	0.1302	0.004824	6.060	0.1224	0.003968	6.460	0.1158	0.003313
5.270	0.1394	0.005934	5.670	0.1300	0.004799	6.070	0.1222	0.003950	6.470	0.1157	0.003298
5.280	0.1392	0.005901	5.680	0.1298	0.004775	6.080	0.1220	0.003931	6.480	0.1155	0.003284
5.290	0.1389	0.005868	5.690	0.1296	0.004751	6.090	0.1219	0.003913	6.490	0.1154	0.003270
5.300	0.1386	0.005836	5.700	0.1293	0.004727	6.100	0.1217	0.003895	6.500	0.1152	0.004256
5.310	0.1384	0.005804	5.710	0.1291	0.004703	6.110	0.1215	0.003877	6.510	0.1151	0.004242
5.320	0.1381	0.005772	5.720	0.1289	0.004680	6.120	0.1213	0.003859			
5.330	0.1379	0.005741	5.730	0.1287	0.004656	6.130	0.1212	0.003841			
5.340	0.1376	0.005710	5.740	0.1285	0.004633	6.140	0.1210	0.003823			
5.350	0.1374	0.005679	5.750	0.1283	0.004610	6.150	0.1208	0.003806			
5.360	0.1371	0.005648	5.760	0.1281	0.004587	6.160	0.1206	0.003788			
5.370	0.1369	0.005617	5.770	0.1279	0.004564	6.170	0.1205	0.003771			
5.380	0.1366	0.005587	5.780	0.1277	0.004542	6.180	0.1203	0.003754			
5.390	0.1364	0.005557	5.790	0.1275	0.004519	6.190	0.1201	0.003736			
5.400	0.1361	0.005527	5.800	0.1273	0.004497	6.200	0.1200	0.003719			
5.410	0.1359	0.005497	5.810	0.1271	0.004475	6.210	0.1198	0.003702			
5.420	0.1356	0.005468	5.820	0.1269	0.004453	6.220	0.1196	0.003685			
5.430	0.1354	0.005439	5.830	0.1267	0.004431	6.230	0.1195	0.003669			
5.440	0.1352	0.005410	5.840	0.1265	0.004409	6.240	0.1193	0.003652			
5.450	0.1349	0.005381	5.850	0.1263	0.004388	6.250	0.1191	0.003636			
5.460	0.1347	0.005352	5.860	0.1261	0.004367	6.260	0.1190	0.003619			
5.470	0.1345	0.005324	5.870	0.1259	0.004345	6.270	0.1188	0.003603			
5.480	0.1342	0.005296	5.880	0.1257	0.004324	6.280	0.1186	0.003587			
5.490	0.1340	0.005268	5.890	0.1255	0.004303	6.290	0.1185	0.003571			
5.500	0.1338	0.005240	5.900	0.1253	0.004282	6.300	0.1183	0.003555			
5.510	0.1335	0.005213	5.910	0.1251	0.004262	6.310	0.1182	0.003539			
5.520	0.1333	0.005186	5.920	0.1250	0.004241	6.320	0.1180	0.003523			
5.530	0.1331	0.005158	5.930	0.1248	0.004221	6.330	0.1178	0.003507			
5.540	0.1328	0.005132	5.940	0.1246	0.004201	6.340	0.1177	0.003492			
5.550	0.1326	0.005105	5.950	0.1244	0.004180	6.350	0.1175	0.003476			
5.560	0.1324	0.005079	5.960	0.1242	0.004161	6.360	0.1174	0.003461			
5.570	0.1322	0.005052	5.970	0.1240	0.004141	6.370	0.1172	0.003446			
5.580	0.1319	0.005026	5.980	0.1238	0.004121	6.380	0.1171	0.003431			
5.590	0.1317	0.005000	5.990	0.1236	0.004101	6.390	0.1169	0.003415			

- (i) 本方式は非定常法であるため、供試体内温度測定用センサの熱容量を極力小さくしなければならない。
- (ii) Table 3 に示した材料では材質の不均一性が大きいので、供試体内温度はできるだけ広い範囲での平均値としなければならない。同じ理由から、ヒータ板の上・下表面に接触している供試体についてそれぞれ k や κ を求め、それらの平均値をその材料の測定値としなければならない。
- (iii) 理論式(1)と(2)をそのまま適用し、さらに測定精度を高めるために、時刻 $t = 0$ での供試体内温度 $T_l(0)$ を基準にして $T_l(t)$ を測定しなければならない。

Fig. 5 Details of System for Measuring Specimen Temperature

Fig. 6 Details of Heater System

以上の3点を考慮して試作したのが Fig. 5 に示す測定系である。この測定系では、直径 0.12mm のクロメル・アルメル熱電対 (CA 対) を用い、multiple-junction 法を採用した²⁴⁾。すなわち、CA 対の接合点を順次供試体内所定位置および測定中に温度が変化しない供試体外面へ配置し、合計 5 ケの CA 対を直列に接続した。この両端へ直径 0.2mm の銅線を接続して装置外へ導出し、内部抵抗 1M Ω の記録計へ直接接続した。このような CA 対配置によって上記 3 条件を満足すると同時に、熱電対の起電力を 5 倍に増幅し測定誤差を $1/\sqrt{5}$ に減少させて測定できる。ただし、断熱材の場合は測定中に供試体を流れる熱量が非常に少なく^{*}、0.12mm の CA 対でもその熱容量を無視し得ず、後述するように熱伝導率測定値において熱電対

の熱容量に起因する誤差は、約 $\pm 9\%$ であった。

2.2.3 ヒータ板

Curve-Fitting 法においてヒータ板に最も強く要求される条件は、ヒータ板の熱容量が十分に小さいということである。本方式では熱特性を測定中のヒータ板は一定熱量 q を発しなければならないが、ヒータ板の熱容量が無視できない場合は、ヒータ板自身が $C_H \cdot dT_0(t)/dt$ の熱量を吸収するため、ヒータ板の消費電力とヒータ板から供試体への熱流出量の間に差が生じたり、時間経過に伴って熱流出量が変化するなどして、測定結果が乱される。このような不都合を避けるため、厚さ 25 μ のタンタルシートをヒータ板に選び、しかも、ヒータ板へ電力を供給するための導線も、Fig. 6 に示すように、直径 2mm のビスでスポット的に結線した。このようなスポット的結線の結果、ヒータ板における電圧分布はヒータ板の両端で多少歪む。したが

* : PUF の場合、 $l=10$ mm の位置で約 5mW/cm² の熱流である。

って、ヒータ板の単位面積当りの発熱量 q を求めるには、Fig. 6 のような回路による実測値を多少補正しなければならない。

本装置では、ヒータ板への供給電流は最大70Aであり、装置内の配線には直径2.5mmの銅線を使っている。この銅線を通して流入した熱や銅線自身の電気抵抗による発熱は、この銅線を冷却管に通して吸収した。またヒータ板の温度は、直径0.12mmのCA対を使用し、測定中に温度上昇のない供試体外面をゼロ点として、ヒータ板の温度上昇分 $T_0(t)$ を測定した。

2.2.4 供試体の形状

Curve-Fitting 法においては供試体を無限大と仮定しているため、実際に測定に供される有限な大きさの供試体では、この有限性が誤差の原因になる。この点に関してはすでに HARMATHY²⁰⁾によって解析されており、この誤差が無視できる条件として、 $a \geq 4l$ 、 $b \geq 8l$ および $d \geq 12l$ の3条件が与えられている。この結果と Table 3 の l 値を使って供試体の大きさを決定し、すでに述べたCA対やヒータ板の配置を考慮して、Fig. 7 に示すような4枚の小片で供試体1ヶを形成した。測定に際しては、供試体の周囲を厚さ15mmの断熱材で囲むことにより、端末効果をより一層少くした。

しかし、1ヶの供試体を4ヶの小片で構成すると、各小片の接触面が熱抵抗となり測定誤差の原因になる。このような不都合は、熱伝導率が比較的高くしかも堅い材料であるコンクリートの場合に最も顕著である。したがってこの種の材料の場合は、各接触面をよく研磨しグリースなどを少量塗布することによって接触熱抵抗を避けた。その他の材料については、接触面を平らに仕上げて供試体の厚さ方向に多少加圧することによって接触熱抵抗をなくした。

3. 測定結果および検討

3.1 PUF による本装置の性能チェック

本装置を使って断熱材の熱特性を測定する場合は、タンタルヒータ板やCA対の熱容量に起因する誤差が大きい。このような懸念から、まずPUFの熱特性を本装置と熱保護板方式による装置を使って比較測定

Fig. 7 Details of Experimental Set Up of Specimen

し、本装置の信頼性を確認した。なお、熱保護板方式による装置は熱伝導率測定にしか使用できないが、これまで筆者らの使用してきた装置であり、信頼性はすでに確認されている。

本装置により得られた PUF の実験曲線を、Fig. 8 に示す。Fig. 8 の $T_l(t)-t$ 曲線から、時刻 t が 80 秒、120 秒……のときの $T_l(t)$ を読み取って、 $T_l(2t)/T_l(t)$ を計算し、さらにこれらの値に対応する $\kappa t/l^2$ や kT_l/ql を Table A1 から読み取れば、それぞれの t に対する κ や k が算出できる。このような操作を順次記したデータシートの一例を Table 4 に示す。PUF の測定によって、以下に示す4項目の結果が得られた。

- (i) いろいろな t に対する κ や k のばらつきは、1%以下であった。
- (ii) ヒータ板の温度 $T_0(t)$ から k を算出したが、 $T_l(t)$ から算出した k とよく一致した。

Fig. 8 Experimental Curves of $T_0(t)$, $T_l(t)$ and $V_0(t)$ to time for PUF at Room Temperature

(iii) ヒータ板の上・下に接している小片-1と小片-4の測定結果がよく一致した。

(iv) 本装置による測定結果と熱保護板方式の装置による測定結果は、後述の Fig. 10 に示すようによく一致した。以上のような測定結果によって、本装置の信頼性が確認された。

3.2 PUF の測定結果における誤差

本装置の示す最大測定誤差を見積るため、前節に示した PUF の測定結果に含まれている誤差を、次の4項目に分けて検討した。

(i) $T_l(t)$ の測定精度に起因する誤差

$T_l(t)$ の測定では記録計チャートの読み取りに伴う誤差が最大であり、約±1%である。この誤差に起因する熱特性測定値の誤差は、Fig. 8 の $t=180$ 秒の場合について考察すると、 $T_l(2t)/T_l(t)$ は2.77 から2.71 の範囲で不確定となる。この不確定さによって k および κ に誤差が生じるが、その誤差は Table A1 からそれぞれ ±4% および ±2.3% である。

(ii) ヒータ板の温度上昇に伴う電気抵抗の上昇に起因する誤差

熱特性測定中は、Fig. 8 から明らかなように、供試体内に挿入されたヒータ板の温度が5~10°C 上昇する。この温度上昇にともなうヒータ板の電気抵抗が上昇する結果、本測定のようにヒータ板の電源が定電流電源の場合は、Fig. 8 に見られるヒータ電圧 V_0 の漸増にともなうヒータ板の発熱量は漸増する。このような発熱量の増加率がそのまま供試体内温度の上昇率になると仮定すると、Fig. 8 における $t=400$ 秒での $T_l(t)$ および $T_l(2t)$ の測定誤差はそれぞれ 1.9% および 2.6% となり、 k および κ の測定誤差はそれぞれ ±3% および ±2.7% である。

このような誤差を小さくするには、コンスタンタンのような電気抵抗の温度係数が小さい材料をヒータ板として使用すればよいが、コンスタンタンは電気比抵抗が小さいため他の実験的困難を伴うので、本装置ではタンタル板を採用した。

(iii) ヒータ板の熱容量に起因する誤差

ヒータ板の温度上昇にともなうもう一つの誤差原因は、ヒータ板自身がその熱容量に応じて熱を吸収する

Table 4 Sample Calculation for Obtaining k, κ and C

Material : Polyurethane Foam, Initial Temperature : 19°C, $l=10.3\text{mm}$, $\rho=120\text{Kg/m}^3$, $q=34.5\text{Kcal/m}^2\cdot\text{h}$ (4.03 mW/cm²), Measured Piece : Piece 1 shown in Figure 7

t (sec)	$T_l(t)$ (×0.2mV)		$T_l(t)$ (°C)		$T_l(2t)$ (°C)		$T_l(2t)$ (°C)		$\frac{\kappa t}{l^2}$ m ² /h	$\frac{kT_l}{q^t}$ Kcal/mh°C	k Kcal/mh°C	$T_0(t)$ °C		C Kcal/Kg°C
	$T_l(2t)$	$T_l(t)$	$T_l(2t)$	$T_l(t)$	$T_l(2t)$	$T_l(t)$	$T_l(2t)$	$T_l(t)$				mV		
80	0.103	0.025	0.515	0.12	4.20	4.20	0.179	—	0.0117	—	—	0.098	2.45	—
120	0.193	0.062	0.965	0.31	3.14	3.14	0.275	—	0.0303	—	—	0.120	2.99	0.0349
160	0.282	0.103	1.41	0.515	2.74	2.74	0.359	8.57	0.0494	0.0343	0.0343	0.138	3.44	0.0350
200	0.368	0.148	1.84	0.74	2.49	2.49	0.452	8.64	0.0718	0.0347	0.0347	0.154	3.85	0.0350
240	0.451	0.193	2.26	0.965	2.34	2.34	0.538	8.57	0.0925	0.0342	0.0342	0.168	4.20	0.0351
280	0.529	0.238	2.65	1.19	2.23	2.23	0.629	8.57	0.114	0.0342	0.0342	0.184	4.68	0.0346
320	0.604	0.282	3.02	1.41	2.14	2.14	0.720	8.60	0.136	0.0344	0.0344	0.195	4.88	0.0349
360	0.676	0.327	3.38	1.64	2.07	2.07	0.829	8.78	0.161	0.0351	0.0351	0.207	5.18	0.0349
400	0.744	0.368	3.72	1.84	2.02	2.02	0.911	8.71	0.180	0.0349	0.0349	0.220	5.50	0.0346
Average of Piece 1										0.0345	0.334	0.0349		
Average of Piece 4 from Other Data Set										0.0342	0.339			
Average of Piece 1 and 4										0.0344	0.337	0.0349		

ことである。しかし、Fig. 8 から明らかなように、ヒータ板の温度上昇は、ヒータ板への通電開始直後を除くと経過時間に対してほぼ直線的なので、ヒータ板の吸熱量は一定となり、予め補正が可能である。本装置では、ヒータ板の熱容量が 1.1 cal/°C でヒータ板の温度上昇速度は Fig. 8 の場合 0.6°C/min であるから、ヒータ板の発熱量に対する吸熱量の比は 3.6% であった。Table 4 に示した q 値は、上記の比率の他

Table 5 Densities and Symbols of Test Materials

Materials		Density (Kg/m³)	Symbol	Water Content (%)	Remarks
Structural Material	Concrete	2340	◼	—	indoor curing
	Frozen Soil	1890	■	30	
	Wood	570	⊙	50	Heat flows in the same direction as fibers.
		460	◉	20	
	ALC	590	⊕	13	
Insulating Material	Calcium Silicate	200	×	9	
	Penolic Foam	40	△	—	
	Polyurethane foam	120	▲	—	
		36	▲	—	

に Fig. 6 で示したヒータ板両端における電圧分布の歪みもあわせて補正したものである。

(iv) $T_l(t)$ 測定用 CA 対の熱容量に起因する誤差

本装置で使用している直径 0.12 mm の CA 対の熱容量は $1.13 \times 10^{-3} \text{cal/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}$ である。Fig. 8 の場合、この CA 対の昇温速度は 0.33°C/min だから吸熱量は約 $3.7 \times 10^{-3} \text{cal/min}\cdot\text{cm}$ である。一方、CA 対はその直径の 2 倍の幅を流れてくる熱によって温度上昇すると仮定すると、この熱流量は $1.44 \times 10^{-3} \text{cal/min}\cdot\text{cm}$ だから熱流量に対する吸熱量の比率は 2.4% となり、それだけ $T_l(t)$ を小さく測定したことになる。この結果から k および κ の測定誤差はそれぞれ 9 % および 5 % となった。

これまで述べてきた測定誤差をすべて加えると、 k および κ の測定誤差はそれぞれ $\pm 16\%$ および $\pm 10\%$ であり、熱保護板方式による装置の約 2 倍になった。しかし断熱材よりも熱伝導率の大きい材料ではヒータ板や熱電対の熱容量に起因する誤差が小さくなるので、総合的な測定誤差も小さくなる。たとえば、コンクリートの場合では k および κ の測定誤差はそれぞれ $\pm 5\%$ および $\pm 3\%$ になった。

3.3 各種材料の熱特性試験結果

本装置を用いて、Table 5 に示した材料の熱特性を測定した。以下に若干の検討を加える。

3.3.1 比熱測定結果

Fig. 9 Heat Capacity of Different Materials
(.....: expectation curve, symbols
: the same as in Table5)

比熱測定結果を Fig. 9 に示す。今回の供試体はすべて電気絶縁体なので、比熱は主として格子振動のエネルギーによって決まる。したがって DEBYE の理論により温度降下とともに比熱は小さくなる。しかも、含水率 50% の木材や 30% の土では 0°C およびそれ以下の温度で供試体中の自由水が凍結するため、比熱はその加算則からより急激な低下をする*。この現象に関してはすでに 2～3 の報告例がある^{25,26)}。これに対して含水率 20% の木材ではこのような屈曲は検出できなかった。この理由は、含水率 20% の木材では木材に吸収されたほとんどの水が木材繊維と化学結合して自由水は存在していないためであり、木材の低温強度試

験結果からも同様な含水率効果が得られた²⁷⁾。

3.3.2 熱伝導率測定結果

Fig. 10 に測定結果を示す。熱伝導率測定データはかなり報告されており、コンクリートでは文献(9)や(28)、凍結土では 0°C 近傍のみであるが文献(26)、さらに断熱材については文献(10)～(16)などがある。しかし、今回測定したような材料では材料の厳密な規格がないため、各所で測定されている供試体の特性はかなり異なる。したがって、筆者らの測定結果と他所の測定結果に対して、厳密な定量的比較は行なえない。このような点を考慮すると、今回の測定結果は一応他所の測定結果と一致した。

格子振動による熱伝導率は一般に(5)式で表わされる。

$$k = \frac{1}{3} \cdot C \cdot v \cdot m \quad (5)$$

Table 5 に示すような多晶質材料では、 v や m はあまり温度に依存せず、熱伝導率は大概比熱に比例する。しかし含水率 50% の木材および 30% の土は、比熱の項でも述べたように 0°C およびそれ以下の温度で供試体中の自由水が凍結するため、熱伝導率はその加算的性格から急激に大きくなる*。他方コンクリートや木材では、温度降下に対して熱伝導率は上昇あるいは一定値を示しているが、この理由としては、これらの材料では比較的結晶粒径が大きいため、温度低下にともなって m が増加することが考えられる。

断熱効果を兼ねた構造材の評価は、熱伝導率と強度の比で行なわれることが多い。今回測定した供試体についても、筆者らの測定した圧縮最大強度をもとにして、約 -160°C で同様な評価を行なったのが Fig. 11 である。この評価から、木材と密度 120kg/m³ の PUF が構造材として比較的勝れていることがわかった。

4. むすび

断熱材や非金属構造材の熱伝導率、温度拡散率および比熱を決定するため Curve-Fitting 法にもとづく装置を試作し、次のような結論を得た。

(i) Curve-Fitting 法による低温熱特性測定装置の試作に成功した。測定温度は -180°C ～ +50°C であり、測定可能な熱伝導率の範囲は 0.01

Fig. 10 Thermal Conductivity of Different Materials

▲ : symbol of measured values of PUF having density of 120kg/m³ by the apparatus based on a guarded hot plate method, other symbols : the same as in Table 5

* : 0°C の水の比熱は約 1 Kcal/kg°C であるのに対して、氷のそれは約 0.5Kcal/kg°C である。

* : 0°C の水の熱伝導率は約 0.5 Kcal/m・h・°C であり、氷のそれは約 1.9 Kcal/m・h・°C である。

Fig. 11 Ratio of Thermal Conductivity to Compressive Strength of Different Materials at Approximately -160°C (symbols : the same as in Table 5)

~10 Kcal/mh $^{\circ}\text{C}$ である。

(ii) 測定に要する時間は最大 8 時間であり、従来の熱保護板方式による装置と比較して約 1/5 に短縮できた。

(iii) 従来の Curve-Fitting 法では、熱伝導率などの読み取りには特性曲線を使っていたが、今回新たに特性表を作成し、測定精度を上げた。

(iv) 測定誤差は、供試体が断熱材の場合にはヒータ板や熱電対の熱容量が影響して、熱伝導率の場合最大 $\pm 16\%$ であり、熱保護板方式による装置の約 2 倍だった。しかし比較的熱伝導率の高い非金属構造材の場合はもっと誤差は小さく、コンクリートの熱伝導率で約 $\pm 5\%$ だった。

(v) 本装置を使って、コンクリート、凍結土、木材、ALC、ケイ酸カルシウム板、フェノールフォームおよび PUF の熱特性を決定した。密度 120 kg/m^3 の PUF については、熱保護板方式による装置を使っても測定したが、ほぼ同じ測定結果を得た。これらの測定結果によって本装置の信頼性を確認することができた。

(vi) これらの材料の比熱は、温度降下とともに単調減少した。とくに自由水を多く含む材料では 0°C 近傍で急激に小さくなった。

(vii) これらの材料の熱伝導率は、比熱ほど単純な振舞いを示さなかった。コンクリート、凍結土および木材については、熱伝導率は温度降下につれて多少上昇気味かほとんど一定であった。その他の材料については、温度降下とともに熱伝導率は小さくなった。

(viii) 熱伝導率と圧縮強度の比によって構造材とし

ての評価を行なったが、その結果、木材と密度 120 kg/m^3 の PUF が比較的勝れていることが判明した。

今後に残された問題としては、本装置の測定誤差を実験的および理論的により精密に解析することと、その結果にもとづいて本装置の測定誤差をもっと小さくすることである。

おわりに、本装置の製作に協力をしていただいた株式会社理研社代表取締役荻下昂氏に感謝の意を表します。

記号の説明

- a : 供試体の高さの半分 (mm)
- b : 供試体の幅 (mm)
- c : 供試体の比熱 (Kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)

- C_H : ヒータ板の熱容量 (Kcal/ $^{\circ}\text{C}$)
- d : 供試体の長さ (mm)
- k : 供試体の熱伝導率 (Kcal/mh $^{\circ}\text{C}$)
- l : 供試体内温度の測定位置 (mm)
- m : フォノンの平均自由行程 (m)
- q : ヒータ板の発熱量 (Kcal/m 2 h)
- t : 時間 (h, min, sec)
- $T_0(t)$: ヒータ板の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_l(t)$: 供試体内温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- v : フォノンの速度 (m/h)
- V_0 : ヒータ板両端の電圧 (mV)
- κ : 温度拡散率 (m 2 /h)
- ρ : 密度 (kg/m 3)

略 記

- ALC : autoclaved lightweight concrete
- PUF : 硬質ポリウレタンフォーム

$$\text{ierfc } x = \int_x^{\infty} \text{erfc } \xi \, d\xi, \quad \text{erfc } x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

参 考 文 献

- 1) W. Woodside : Rev. sci. Instrum. 28 (1957) 1933.
- 2) I. G. Donaldson : Quart. appl. Math. XIX (1961) 205.
- 3) A. W. Pratt : J. sci. Instrum. 39 (1962) 63.
- 4) JIS A 1413-1968.
- 5) JIS R 2616-1959.
- 6) ASTM C 177-71 : 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 18.
- 7) ASTM C 518-70 : 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 18.

- 8) ASTM C 745-73 : 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 18.
- 9) B.E.Eakin, W.G.Bair, J.J.Ciosner and R.Maroti : Institute of Gas Technology Technical Report, No. 8 published by American Gas Association, Inc., New York (1963)
- 10) R.P.Tye : Proc. XIIIth Int. Cong. Refrig. Ins. Int. (1971) 371.
- 11) 上村晃 : 昭和47年度日本冷凍協会学術講演会講演論文集
- 12) パラマウント硝子 K.K. : 超低温技術 2 (1972) 94.
- 13) R.J.Foley and F.J.Jelinek : Preprints of ICEC 5 (1974) p.3-1.
- 14) 荻原, 吉和, 岩田, 中川 : 日本造船学会論文集 第134号 (1973) 255.
- 15) 吉和, 岩田, 中川 : 昭和49年度日本冷凍協会学術講演会講演論文集 (1974) 15.
- 16) M. Yoshiwa, A. Iwata and S. Nakagawa : Proc. XIVth Int. Cong. Refrig. Ins. Int. (1975)
- 17) ASTM C 351-61 : 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 18.
- 18) W.J.Parker, R.J.Jenkins, C.P.Butler and G.L.Abbot : J. appl. Phys. 32 (1961) 1679.
- 19) W.A.Plummer, D.E.Campbell and A.A.Comstock : J.Amer. Cerm. Soc. 45 (1962) 310.
- 20) T.Z.Harmathy : J.appl. Phys. 35 (1964) 1190.
- 21) Y.Kogure and Y.Hiki : Japan. J.appl. Phys. 12 (1973) 814.
- 22) ASTM D 2326-70 : 1974 Annual Book of ASTM Standards, Part 36.
- 23) H.S.Carslaw and J.C.Jaeger : Conduction of Heat in Solid, 2nd edition, OXFORD UNIVERSITY PRESS, (1959).
- 24) R.B.Scott : Cryogenic Engineering, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1959.
- 25) 山田正 : 木材研究資料 No.5 (1971) 9.
- 26) K.Katayama, M.Hattori, K.Kasahara, I. Kimura and M.Okada : ASHRAE J. April (1973) 56.
- 27) 吉和, 岩田, 中川 : 昭和49年度日本冷凍協会学術講演会講演論文集 (1974) 9.
- 28) A.E.Lentz and G.E.Monfore : J. PCA Res. and Dev. Lab., Sep. (1966)27.