

サンドウィッチ構造材料(3) アルミニウム蜂巢中芯の機械的性質

小 野 寺 重 男

この報告はU.S.Navy Bureau of Aeronautics Oder No.NAer01628 and U.S.Air Force No.AF-18(600)-102 and Do (33-616) 53-20 に発表されたものの抄訳で

Hexcel Products, Inc・製蜂巢中芯Honycomb Company of America 製波型芯(共に接着剤: vinyl-phenolic-type) を使用したサンドウィッチ構造材料について試験方法、強度剛性値、試験結果の解析、設計資料等が発表されている。

このアルミニウム中芯は比較的薄く強度の強い表板を接着構成し航空機用サンドウィッチ材料として用いられる。

Expanded-type (Hexagonal-type)

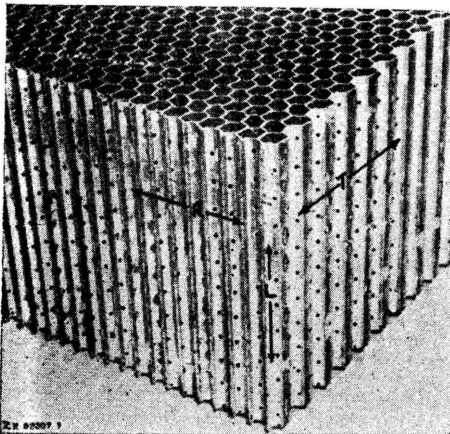
中芯について

Hexcel Products, Inc の蜂巢中芯には細孔、Honeycomb Company of America の波型芯には1/32"の通気孔(第1図)がある。

アルミニウム板の標準厚さは0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005"であり、各空胞直径は $1/8, 3/16, 1/4, 3/8$ "である。

中芯は次の組合せによるものを試験に供した。

第1図 アルミニウム蜂巢中芯とその名称



アルミニウム板 標準厚さ (in)	空胞直径 (in)	中芯の型
0.001	1/8	蜂巢
0.002	3/16	蜂巢
0.002	1/4	波型・蜂巢
0.002	3/8	波型
0.003	1/4	波型・蜂巢
0.003	3/8	波型
0.004	1/4	波型
0.004	3/8	波型・蜂巢
0.005	1/4	波型
0.005	3/8	波型

中芯の試験

航空機用サンドウィッチ構造材料として、曲げ、圧縮剪断試験が行われた。

圧縮試験

試片は2in角(R.T方向)、厚さ $1/2$ 、8in(L方向)送り速度0.003"/試片厚さ1"/毎分にて試験し、応力-歪曲線より比例限界応力、圧縮強度、弾性係数を求めた。

圧縮試験結果の解析

圧縮試験の結果は第1表、第2図 第3図に示す通りでその偏差(最高、最低、平均値)も図示してある。強度はアルミニウム板の厚さ(t)と空胞直径(S)に関係しアルミ:中芯面積比は $2.67t/s$ であり、171lb.cu.ftの中芯では中芯比重は $W = 456t/s$ で与えられその誤差は10%以下である。

弾性係数は $EL = 26.700t/s$ でその計算値は実測より10%程度多い。

比例限界応力は

$$f_L = 2.67ft \quad ft = 12.200lb/sq.in$$

$$F_L = 2.67Ft \quad Ft = 20.200lb/sq.in$$

蜂巢中芯は波型芯に比し接着剤を少量より使用せず接着剤量を無視しうるので

$$FL = 118w$$

波型芯には

$$FL = 118W - 72 \quad (3/8 \text{ in 空胞直径})$$

$$FL = 118W - 108 \quad (1/4 \text{ in } \text{ " } \text{ "})$$

剪断試験

試験はLT又はLR方向について行われた。中芯挫屈については(1,5,6,7,8,12)に、歪みについては(4,6,9,11)、その応用については(2,14)に発表されている。

剪断試片は厚さ $1/2$ in、巾2in、長さ6inの中芯を厚さ $1/2$ inの銅板にエポキシ樹脂接着剤により圧力 15 lb/sq. in 、温度 200° F 、2時間の条件で接着し、6in方向に 0.010 in/ 毎分の速度で破壊を起す迄引張る。試験時の破損は何れも中芯部分に於て生ずる。上記試験による応力 - 歪曲線より比例限界応力、剪断強度、同弾性係数を求めた。(第1表、第4,5,6,7,8,10図)

剪断試験結果の解析

剪断剛性 $G_{LT} = 5.160.000 \text{ t/s}$ で与えられ、実測値は $3.850.000 \text{ lb/sq. in}$ で、計算値より15%少い。

比例限界応力は

$$f_{LT} = 1.34 \text{ ft t/s} \quad \text{ft} = 12.300 \text{ lb/sq. in}$$

剪断強度

$$F_{LT} = 1.34 \text{ Ft t/s} \quad \text{Ft} = 23.900 \text{ lb/sq. in}$$

比重との関係は

蜂巢中芯では

$$F_{LT} = 70W$$

波型芯では

$$F_{LT} = 70W - 43 \quad (3/8 \text{ in})$$

$$F_{LT} = 70W - 64 \quad (1/4 \text{ in})$$

LT方向の剪断強度はL方向の約60%で

$$F_{LT} = 0.594FL$$

$$\text{又は } F_{LT} = 0.56 FL$$

がよく一致する。

剛性と弾性係数との関係は

蜂巢芯では

$$G_{LT} = 0.193EL$$

この際の実測値は実測値より約15%少い。

波型芯では

$$G_{LT} = 0.248EL$$

$$\text{又は } G_{LT} = 0.271EL$$

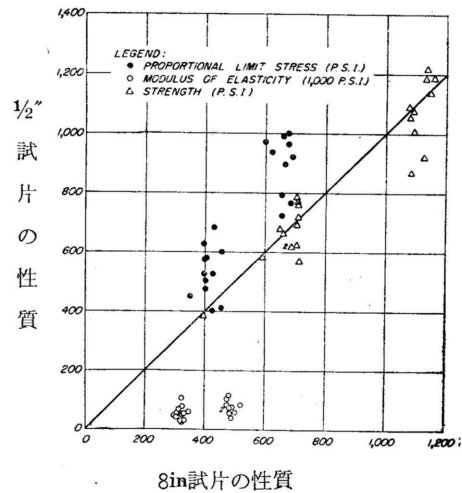
がよく一致する(第6図)。

LR方向については中芯との関係が明瞭でなく、第1表に示す如く比例限界応力、剪断応力共LT方向の約 $1/2$ である。蜂巢の G_{LR} は G_{LT} の約40%である(第8図)

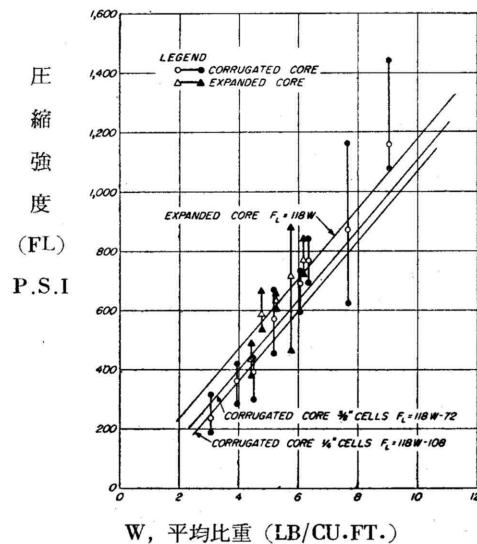
サンドウィッチ構造材料の曲げ試験

アルミニウム中芯に厚さ 0.064 in アルミニウム板を両面に剪断試験の際に述べたと同様の条件で接着したサンドウィッチ構造材料につき、厚さ2in、支点距離8.18in、試片長さ9.18inで曲げ試験を行った。(第2表)

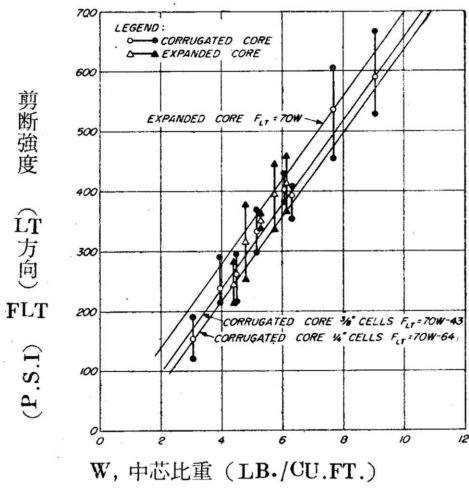
第2図 長・短柱圧縮試験の比較



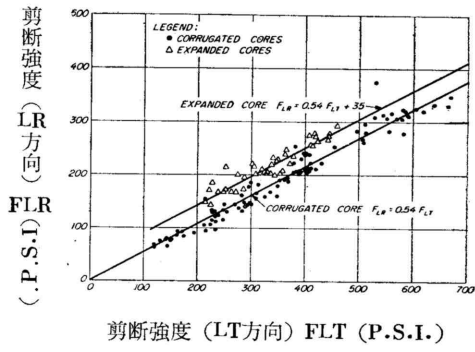
第3図 アルミニウム蜂巢中芯の最大・最小平均圧縮強



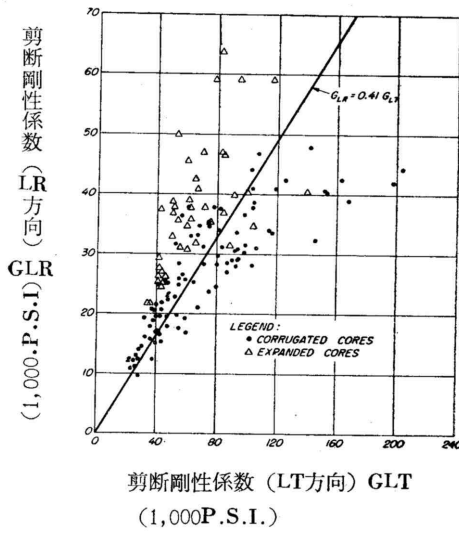
第4図 アルミニウム中芯の最大・最小
平均値剪断強度 (LT方向)



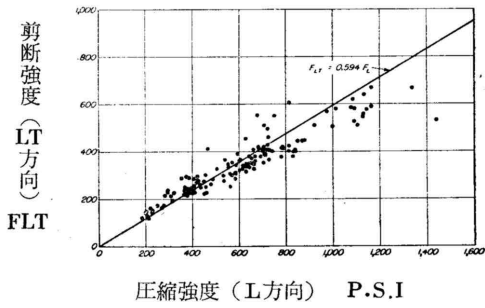
第7図 剪断強度LR方向とLT方向の関係



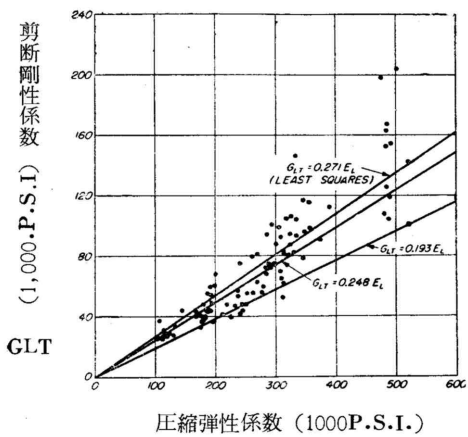
第8図 剪断剛性係数 (GLR) と剪断剛性
係数 (GTT) の関係



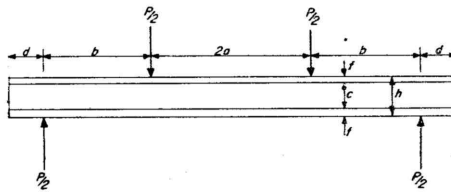
第5図 アルミニウム蜂巢中芯の剪断強度と
圧縮強度の関係



第6図 アルミニウム蜂巢中芯の剪断剛性係
数と圧縮弾性係数の関係



第9図 サンドウィッチ曲げ試片の名称



曲げ試験結果の解析

試験は二点荷重で第9図の通りである。

$$W = \frac{Pb\Delta f}{2E_r I} \left[\frac{a^2}{2} + ab + \frac{b^2}{3} \right] + \frac{2cblm^2 P}{G(h+c)^2 I^2} \dots (1)$$

ここで W=中央の歪み

P = 荷重

b = 荷重点迄の距離

$\lambda f = (1-\nu^2)$, ν はポアソン比

a = 荷重点間の1/2の距離

E_f = 表板の弾性係数

f = 表板厚さ

c = 中芯厚さ

h = サンドウイッチ材料厚さ

$$I = \frac{f(h+c)^2}{8} + \frac{f^3}{6}$$

$$I_m = I - \frac{f^3}{6}$$

G = 中芯の剛性係数

又二点荷重であるから $P_{1,2} \cdot W_{1,2}, b_{1,2}, a_{1,2}$ 等とすると剛性係数は

$$G = \frac{2cb_1P_1I_m^2 \left[\frac{3a_2^2 + 6a_2b_2 + 2b_2^2}{3a_1^2 + 6a_1b_1 + 2b_1^2} - I \right]}{W_1(h+c)^2I^2 \left[\frac{3a_2^2 + 6a_2b_2 + 2b_2^2}{3a_1^2 + 6a_1b_1 + 2b_1^2} - \frac{P_1b_1W_2}{P_2b_2W_1} \right]} \quad \dots\dots\dots(2)$$

17inスパンの中央集中荷重、8inスパンに於ける二点荷重に於て $a_1=0, b=8.5, a_2=2, b_2=2$ を(2)に代入すると、

$$G = \frac{38.70cP_1I_m^2}{W_1(h+c)^2I^2 \left[13.92 \frac{P_1W_2}{P_2W_1} - 1 \right]} \quad \dots\dots\dots(3)$$

この計算値は実測値より若干大きな数値を与う。前述各種の中芯を用いたサンドウイッチ材料曲げ試験結果は第2表に示してある。

表板の強度大で中芯部分で剪断をおこす際には、中芯の剪断応力は

$$\tau = \frac{P}{(h+c)} \cdot \frac{I_m}{I} \cdot K \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$I = \frac{f(h+c)^2}{8} + \frac{f^3}{6}$$

$$I_m = I - \frac{f^3}{6}$$

$$K = 1 - \frac{\sin\alpha d \sinh\alpha(a+x) + \cosh\alpha(b+d-x) \cosh\alpha a}{\cosh\alpha(a+b+d)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$d = \sqrt{\frac{12G\lambda f I}{cf^4 E_f}}$$

よって剪断応力係数Kは(5)式にFより与えられる。

K, α の値は第11図参照のこと。

$$\text{又 } K_{\max} = \frac{F_{LT}(h+c)}{P} \cdot \frac{I}{I_m}$$

である。(第12図参照) F.P.L. Rept No.105Aによれば

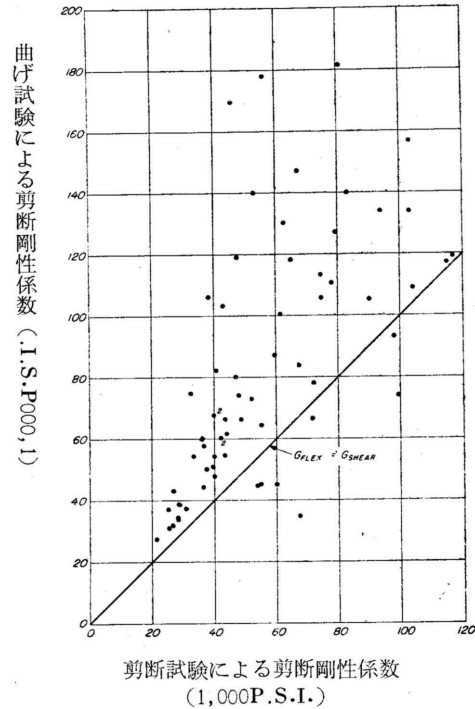
$$K_{\max} = 1 - e^{-\frac{\alpha b}{2}}$$

$$\frac{\alpha b}{2} = 1$$

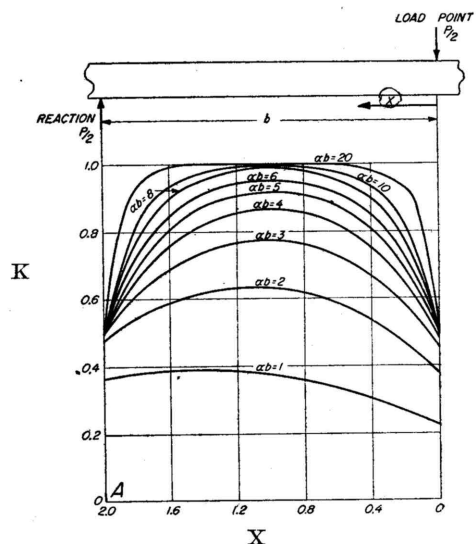
$\alpha b > 10$ の時の K_{\max} は1.0であり、 $K=0.39$ では $\alpha b=1$ である。

α 即ち αb は中芯剪断剛性(G)に関係し、 \sqrt{G} に比例する、又材料の厚さ、表板厚、表板の同弾性係数に無関係である。

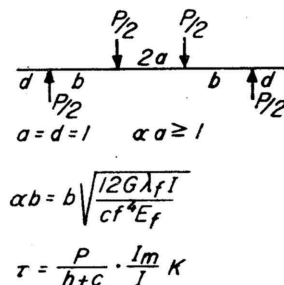
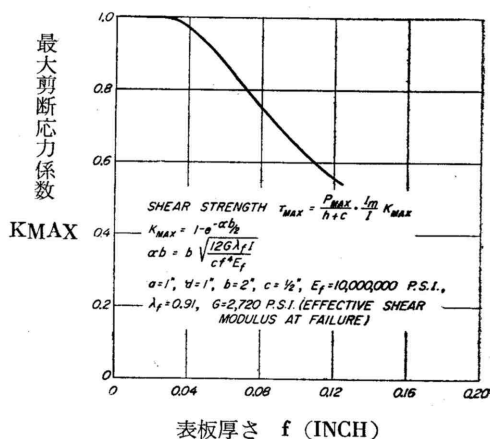
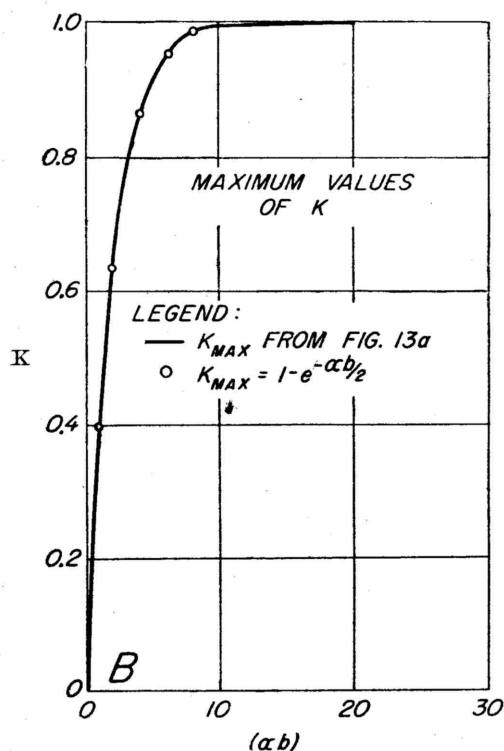
第10図 アルミニウム蜂巢中芯(LT方向の曲げ剪断試験による各剛性係数の比較



第11図 サンドウイッチ材料曲げ試験スパンbに於ける中芯の剪断応力の偏異



第12図 各種表板厚さのサンドウィッチ曲げ試験に於ける最大剪断応力係数



第1表 アルミニウム蜂巢中芯の機械的性質

(1)	(2)	(3) 圧縮試験 (L)			(6) 剪断試験 (LT)			(9) 剪断試験 (LR)					
中芯比重	アルミニウム板厚さ	比 限 心 力 (fL)	例 界 力 (FL)	圧 縮 度 (FL)	弾 性 係 数 (EL)	比 限 心 力 (fLT)	例 界 力 (FLT)	剪 断 度 (FLT)	剪 断 剛 性 (GLT)	比 限 心 力 (fLR)	例 界 力 (FLR)	剪 断 度 (FLR)	剪 断 剛 性 (GLR)
Lb./cu.ft.	In.	p.s.i.	p.s.i.	p.s.i.	1,000p.s.i.	p.s.i.	p.s.i.	p.s.i.	1,000p.s.i.	p.s.i.	p.s.i.	p.s.i.	1,000p.s.i.
0.002 ^o Foil Corrugated to 3/8 ^o Cells													
平均	3.05	0.0019	127	234	122.2	80	152	29.1	40	79	12.8		
最小	2.68	18	84	187	100.3	64	119	21.6	33	63	9.6		
最高	3.50	22	206	315	198.1	99	191	37.8	46	95	15.9		
偏差	.26	.....	34	38	25.7	12	22	4.8	4	11	2.0		
0.003 ^o Foil Corrugated to 3/8 ^o Cells													
平均	3.96	0.0029	225	361	189.9	128	238	42.3	69	118	18.6		
最小	3.61	27	146	286	143.7	100	212	36.7	58	94	15.1		
最高	4.24	31	293	420	244.8	181	290	59.6	86	143	21.9		
偏差	.24	.....	37	45	27.4	26	22	5.8	8	16	2.4		

(1)	(2)	(3)		(4)		(5)		(6)			(7)			(8)			(9)			(10)			(11)																								
中芯比重	アルミニウム板厚	圧縮試験		弾性係数		剪断試験(LT)			剪断試験(LR)			剪断試験(LR)			剪断試験(LR)			剪断試験(LR)			剪断試験(LR)																										
		比 限 心 (fL)	例 界 力 (FL)	圧 強 (FL)	縮 度 (FL)	弾 係 (FL)	性 数 (FL)	比 限 心 (fLT)	例 界 力 (FLT)	剪 断 度 (FLT)	剪 断 性 (GLT)	比 限 心 (fLR)	例 界 力 (GLR)	剪 断 度 (GLT)	剪 断 性 (GLR)	比 限 心 (fLR)	例 界 力 (GLR)	剪 断 度 (GLT)	剪 断 性 (GLR)	比 限 心 (fLR)	例 界 力 (GLR)	剪 断 度 (GLT)	剪 断 性 (GLR)																								
0.004° Foil Corrugated to 3/8" Cells																																															
平均	5.18	0.0038	385	571	252.1	162	332	57.0	80	172	25.6	最小	4.46	36	249	455	233.3	140	297	41.0	65	145	22.2	最高	5.85	40	512	672	282.6	204	369	79.5	116	193	36.4	偏差	.37	78	60	16.2	17	27	11.6	13	17	3.6
.005° Foil Corrugated to 3/8" Cells																																															
平均	6.32	0.0048	443	767	306.0	182	393	75.2	116	226	32.9	最小	5.86	44	401	694	269.6	140	352	52.3	82	189	25.2	最高	6.67	49	472	841	345.0	232	409	146.0	133	252	37.8	偏差	.28	27	55	21.3	29	17	23.6	15	19	3.6
.002° Foil Corrugated to 1/4" Cells																																															
平均	4.50	0.0019	251	393	190.6	133	262	47.9	67	142	19.0	最小	3.90	18	174	299	175.9	106	216	32.6	61	113	16.6	最高	5.60	20	297	438	219.1	165	296	67.4	74	177	22.2	偏差	.46	35	39	11.8	17	29	10.0	4	17	1.7
.002° Foil Expanded to 1/4" Cells																																															
平均	4.41	0.0024	346	436	69.4	141	244	41.9	110	166	25.4	最小	4.22	22	296	378	44.9	116	214	35.2	84	144	21.6	最高	4.54	25	391	490	103.3	158	281	46.4	133	185	29.4	偏差	.12	29	41	19.3	18	23	3.6	16	12	2.5
.003° Foil Corrugated to 1/4" Cells																																															
平均	6.05	31	415	690	314.8	208	402	87.8	96	209	29.6	最小	5.91	29	350	595	277.0	164	380	55.4	62	202	27.0	最高	6.29	32	455	736	348.0	263	429	103.9	116	222	37.5	偏差	.11	30	39	20.3	31	14	13.2	14	5	2.8
.004° Foil Corrugated to 1/4" Cells																																															
平均	7.68	39	513	873	329.7	280	536	98.4	125	287	33.8	最小	7.25	38	444	625	270.9	230	455	80.5	108	252	29.0	最高	8.19	41	687	1,165	389.9	361	605	117.0	148	311	44.1	偏差	.30	83	180	36.3	34	45	13.0	11	22	4.2
.005° Foil Corrugated to 1/4" Cells																																															
平均	9.05	49	692	1,159	492.0	340	590	144.6	155	325	42.1	最小	8.66	45	597	1,078	476.0	279	527	103.0	124	304	37.6	最高	9.79	50	940	1,441	521.0	414	667	202.8	174	374	46.8	偏差	.35	91	113	15.0	45	48	34.4	15	20	3.0
.001° Foil Expanded to 3/8" Cells																																															
平均	4.79	14	420	591	109.1	160	315	59.4	108	211	37.6	最小	4.62	13	350	534	85.6	100	252	42.9	59	194	30.6	最高	5.22	14	500	667	172.7	198	378	72.5	134	233	49.9	偏差	.18	42	43	29.9	27	35	11.0	21	12	5.7
.002° Foil Expanded to 3/8" Cells																																															
平均	5.75	24	585	716	80.7	237	396	87.0	130	246	39.8	最小	5.38	22	392	465	19.9	125	336	60.1	114	199	31.2	最高	6.12	25	745	881	126.4	294	446	139.9	182	276	59.0	偏差	.30	123	127	27.2	49	43	22.8	21	28	7.6
.003° Foil Expanded to 1/4" Cells																																															
平均	6.16	33	690	772	47.4	227	412	87.6	122	273	57.2																																				
.003° Foil Expanded to 3/8" Cells																																															
平均	5.28	45	504	633	75.5	184	350	61.8	116	214	39.7																																				

第2表 蜂巢中芯(波型芯)サンドウイッチ材料の曲り試験結果

中芯比重	中芯剪断係数計算値 (GLT)		破壊荷重 (P)	中芯剪断度 (FLT)	最大剪断応力係数	中芯比重	中芯剪断係数計算値 (GLT)		破壊荷重 (P)	中芯剪断度 (FLT)	最大剪断応力係数	中芯比重	中芯剪断係数計算値 (GLT)		破壊荷重 (P)	中芯剪断度 (FLT)	最大剪断応力係数
	Lb./cu.ft.	1,000 p.s.i.					Lb./in. of width	Lb./in. of width					Lb./cu.ft.	1,000 p.s.i.			
平均 3.05	0.002 ²	Foil, 3/8" Cells	38.6 | 215	152	0.80	3.96	0.003 ²	Foil, 3/8" Cells	71.1 | 315	238	0.86	5.18	0.004 ²	Foil, 3/8" Cells	212.3 | 444	331	.85
平均 6.36	0.005 ²	Foil, 3/8" Cells	117.9 | 548	398	0.83	4.50	0.002 ²	Foil, 1/4" Cells	56.7 | 354	263	0.85	7.68	0.004 ²	Foil, 1/4" Cells	128.8 | 690	527	.88
平均 5.92	0.003 ²	Foil, 1/4" Cells	70.8 | 533	413	0.88	9.58	0.005 ²	Foil, 1/4" Cells	145.2 | 801	598	0.85						

第3表 アルミニウム蜂巢中芯の設計値

平均中芯比重	標準寸法		中芯型式	圧縮試験 (L)		剪断試験 (LT)		剪断試験 (LR)		
	Lb./cu.ft.	In.		In.	比限応力 (FL)	弾性係数 (EL)	比限応力 (FLT)	剪断係数 (GLT)	比限応力 (FLR)	剪断係数 (GLR)
3.05	0.002	0.375	C	84	187	64	26.4	34	63	10.7
3.96	.003	.375	C	146	286	100	42.9	58	94	15.4
4.41	.002	.250	C	378	378	116	36.5	84	144	21.6
4.50	.002	.250	G	174	299	106	35.1	61	113	16.6
4.79	.001	.125	E	249	534	100	61.5	59	194	34.6
5.18	.004	.375	E	249	455	140	56.0	65	145	25.0
5.75	.002	.188	E	350	465	125	101.0	114	199	32.0
6.05	.003	.250	C	401	595	164	92.2	62	202	32.7
6.32	.005	.375	C	444	694	140	65.0	82	189	30.8
7.68	.004	.250	C	444	625	230	83.7	108	252	37.0
9.05	.005	.250	C	597	1,078	279	103.0	124	304	41.0