解説

アルミニウム合金製サンドイッチ構造

國本 隆*

The aluminum alloy sandwich construction

Takashi KUNIMOTO*

1. ま え が き

サンドイッチ構造は、軽量構造の一つとして、早くから航空機の構造などに活用されてきた。今日では、航空機のみならず、車両、船舶、建築等にも用いられるようになっている。したがって、材料力学的解析は、十分行われているが、新しい分野を開拓していくと必然的に色々の問題に遭遇することは、当然である。ここでは、この種の構造の特徴および力学的性質を主体にして、一通りの資料をまとめて、設計等の一助にしたいと思う。なお、アルミニウム合金サンドイッチ構造とは、表面板（表板、表面材ともいう）と心材（コアともいう）が、すべてまたはいずれか一つがアルミニウム合金からなるサンドイッチ構造を意味する。以下サンドイッチ構造と称する。

2. 構造の特長

サンドイッチ構造は、複合構造の一形態であって、薄い表面板2枚を、厚い心材に結合した積層の構造で、応力外皮構造の様式といえる。表面板が面内荷重と曲げモーメントに抵抗し、心材によって隔離されているので、構造の曲げ剛性を受け持つことになる。また、心材は、表面板の間のせん断力を伝達し、共通な中立軸のまわりに、有効な機能を果たすと共に、せん断剛性の大部分を受け持つことになる。したがって、適切な材料を表面板と心材に選定すれば、（剛性/重量）の値が高い構造が得られる。このように、表面板と心材を結合して一体化することによって、構成要素材料の単体としては、得られない特長が実現し、要求性能を満足する構造を創造することができる。サンドイッチ構造のさらに具体的な特性は、(a)軽量で剛性が高い、(b)遮熱、防音という遮断性が優れている、(c)構造様式の多様化が計れる、(d)工作、設備上の構成が容易である、(e)表面が平滑、等の利

点が挙げられる。特に、軽くて強い、あるいは、剛性が高いことは、きわめて魅力的なことである。

3. 構造の構成要素

サンドイッチ構造は、通常、表面板と心材および接着剤から構成される（図1¹⁾参照）。

(1) 表面板：薄くて強いことが第一であるが、成形性、耐食性、熱と電気的特性、装飾性も用途によっては必要となるであろう。アルミニウム合金板、マグネシウム合金板、鋼板、ステンレス鋼板、チタニウム合金板等が用いられる。また、被覆板としては、各種FRP、硬質塩ビ板、メラミン化粧板、ハードボード類、石膏ボード、軽石綿板等が考えられる。

(2) 心材：薄い強靱な平面板を隔離連結することが主役であるので、(a)軽量かつせん断強さ、圧縮強さが高い、(b)成形加工が容易である、(c)表面板の接合が容易である、(d)価格が安い、等が必要条件である。材質的には、耐食性がよいアルミニウム合金、ステンレス鋼、チタニウム合金等が多く用いられている。プラスチックとしてはFRP、木材ではバalsa材、紙はクラフト紙であ

図1 ハニカムサンドイッチ構造¹⁾

* 東海大学工学部（平塚市）。Faculty of Engineering, Tokai University (Hiratsuka-shi, Kanagawa).
受理日：平成元年7月10日

表 1 心材の特性²⁾

材質		項目		成 形	パ ン チ ン グ レ イ ス	はく厚 (mm)	セ ル サ イ ズ (mm)	密 度 (g/cm ³)	状 態		圧 縮 (10 ⁻² kgf/mm ²)		せん断 (10 ⁻² kgf/mm ²)			
									温度 (°C)	湿度 (%)	強 さ	比例限	強 さ	比例限		
															T	T
アルミニウムハニカム	3003-H19	P	有	0.05	9.5	0.050	24	50	13.2	5.9	8.4	4.4	4.5	2.4		
	3003-H19	P	有	0.10	9.5	0.083	24	50	32.1	17.5	20.9	10.2	9.9	4.6		
	3003-H19	P	有	0.10	6.5	0.123	24	50	44.0	31.3	32.1	17.8	16.2	7.6		
	5052-H39	E	有	0.05	6.4		24	50	29.5	19.7	22.5	11.3	12.7	7.7		
	5052-H39	P	無	0.05	6.4		24	50			13.2	12.7				
	5052-H39	E	有	0.075	6.4		24	50	59		33.8	18.3	20.4	10.5		
	2024-T81	E	無	0.038	6.4		24	50	16.9		11.9	7.0				
	2024-T81	E	無	0.05	3.2		24	50	62.5		55	30.3				
アルミニウムウェブ	3003-H19		有	0.05	6.4	0.074	24	50	25.6	20.7	18.7	10.4	5.8	4.1		
	5052-H38		有	0.05	6.4	0.074	24	50	28.0	22.3	20.3	9.9	9.4	5.3		
グラニスカファアイバ	fabric 112, finish 114 フェノール系ナイロン樹脂	E			4.8	0.100	23	50	48.5	24.7	28.5	13.3	8.8	5.8		
							Wet*		26.6	10.5	15.9	8.2	6.5	3.2		
	fabric 112, finish 136 ポリエステル樹脂	P			6.4	0.134	23	50	52.2	26.1	20.2	12.5	8.0	4.0		
							Wet*		33.4	16.4	14.5	6.6	4.7	2.6		
クラフト紙	601b クラフト紙+20% アルコール可溶 PE				16.8	0.027	27	30	7.1	4.9	6.3	3.9	3.5	1.4		
	1251b クラフト紙+35% アルコール可溶 PE				16.8	0.058	27	30	27.5	15.5	20.4	10.6	8.6	4.2		
バルサ材	D ₀					0.080	21	64	49.3	28.9	9.2	8.5				
	D ₀					0.161	21	64	117.7	95.1	19.7	15.5				

表 2 接着剤の特性²⁾

接 着 剤	一般的な 化学形式	製造業者	接着部のせん断強さ (kgf/mm ²)									室温での 疲労強度 (kgf/mm ²)	室温での 曲げ強度 (kgf/mm ²)	室温で 1.13 kgf/mm ² 200時間 (mm)	のときの クリープ変形 82℃で 0.57 kgf/mm ² 200時間 (mm)
			各温度下 での試験			各条件にさらした後の試験									
			室 温	-55 ℃	82℃ (149℃ で10分間)	塩噴 水を 30日 間	水道 水30 日間	JP-4 燃料 7日間	非凍 結流 体7日 間	水圧 オイル 7日間	炭化 水素7 日流 体間				
[MIL-A-5090Bの要求性能]			1.76	1.76	0.88	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	0.42	68.0	0.38	0.38
FM-47液体	フェノール系 ビニール	Bloomingsdale Rubber Co.	3.14	1.81	3.02	3.34	3.63	2.77	2.86	2.74	3.20	0.49	98.8	0.018	0.023
Redux 775 Film	フェノール系 ビニール	CIBA Co. Inc.	3.36	2.87	1.46	3.36	3.16	3.46	3.48	3.23	3.23	0.75	105	0.05	0.089
Metlbond 4021	フェノール系 ニトリルゴム	Narmco resins and Coating Co.	3.24	2.12	2.08	2.97	3.28	3.48	3.38	3.38	3.32	0.77	108	0.28	0.076
[MIL-A-8431の要求性能]			1.59	1.59	1.41	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	0.42	59.0	0.38	0.38
Plastiloc 650 (MIL-A-8431 Type I)	フェノール系 エポキン	Industrial Products Divi- sion B.F. Goodrich Co.	2.63	2.11	1.59	2.39	2.40	2.58	2.55	2.57	2.59	0.56	89.8	0.15	0.22
EC1469 (MIL-A-8431 Type I)	エポキン	Minnesota Minings and Manufactur- ing Co.	2.49	2.31	2.45	2.54	2.61	2.28	2.24	2.16	2.23	0.42	67.6	0.05	0.06
AF31 (MIL-A-8431 Type I)	フェノール系 ニトリルゴム	Minesota Min- ings and Manufactur- ing Co.	2.76	2.68	1.68	2.81	2.87	2.75	2.75	2.80	2.79	0.42	84.8	0.05	0.06

図 2 (a) 引張荷重 Y が作用するハニカム心材

図 2 (b) 1/4単位セル

$$\delta_x = \int (y_1 - y) (M_y / D_0) ds + \int (N / H_0) ds \quad (1)$$

$$\delta_y = - \int (x_1 - x) (M_x / D_0) ds + \int (N / H_0) ds \quad (2)$$

ここで、 x_1, y_1 は、変位を求める点の座標、

D_0 : 平板の曲げ剛性、 H_0 : 平板の引張剛性、 M_x, M_y : x, y 方向の曲げモーメント、 N : 軸力、また、

$$M_y = M_{y(S=a+b)} - (Y/2) (m/2 - x) \quad (3)$$

いま、変形後も波頭部分 ($0 \leq S \leq b/2$) と谷部 ($a+b/2 \leq S \leq a+b$) が平行状態を保つとすれば、次式が成り立つ。

$$(1/D_0) \int_0^{a+b} M_y ds = 0 \quad (4)$$

より

$$M_{y(S=a+b)} = mY/8$$

が得られ、これを(3)式に代入すると、

$$M_y = (Y/2) (x - m/4) \quad (5)$$

すべての辺は、伸縮しないという仮定から、(1)、(2)式の S の範囲は、 $b/2 \leq S \leq b/2 + a$ に限定することができる。したがって、

$$\left. \begin{aligned} x &= b/2 + (S-b/2) \cos \theta \\ y &= -\{t_0/2 + a \sin \theta - (S-b/2) \sin \theta\} \\ N &= (Y/2) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

x 方向の変位 δ_x は、(ただし、 $a \gg t_0$ とする)

$$\begin{aligned} \delta_x &= \delta_{x1} + \delta_{x2} = -(1/D_0) \int_{b/2}^{b/2+a} M_y(y+t_0/2) dS \\ &\quad + (1/H_0) \int_{b/2}^{b/2+a} N \cos \theta ds \\ &\div -(Y/24D_0) a^3 \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (7)$$

同様に、 y 方向の変位 δ_y は、

$$\begin{aligned} \delta_y &= \delta_{y1} + \delta_{y2} = -(1/D_0) \int_{b/2}^{b/2+a} M_y(m/2-x) dS \\ &\quad + (1/H_0) \int_{b/2}^{b/2+a} N \sin \theta dS \div (Y/24D_0) a^3 \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (8)$$

ポアソン比 ν_{yc} は、一般に、

$$a \sin \theta + t_0 \div a \sin \theta$$

と見なすことができるので、

$$\begin{aligned} \nu_{yc} &= -(\epsilon_x/\epsilon_y) = (-2\delta_x/m) / (2\delta_y/c') \\ &\div \sin \theta \tan \theta / (\cos \theta + b/a) \end{aligned} \quad (9)$$

y 方向の引張剛性 H_{yc} は、

$$\begin{aligned} H_{yc} &= (Y/m) (2\delta_y/c') \\ &= H_0 (t_0/a)^2 \{\sin \theta / \cos^2 \theta \cdot (a \cos \theta + b)\} \end{aligned} \quad (10)$$

4.1.2 x 方向のポアソン比 ν_{xc} と引張剛性 H_{xc}

前項と同様の考え方により、それぞれ次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= (X/24D_0) a^3 \sin^2 \theta \\ \delta_y &= -(X/24D_0) a^3 \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

既述のように、 $a \sin \theta + t_0 \div a \sin \theta$ とおくことにより、

$$\begin{aligned} \nu_{xc} &= -(\epsilon_y/\epsilon_x) = (-2\delta_y/c') / (2\delta_x/m) \\ &\div (\cos \theta + b/a) / (\sin \theta \cdot \tan \theta) \end{aligned} \quad (12)$$

x 方向の引張剛性 H_{xc} は、

$$\begin{aligned} H_{xc} &= (x/c') (2\delta_x/m) \\ &\div H_0 (t_0/a)^2 \cdot (a \cos \theta + b) / (a^2 \sin^3 \theta) \end{aligned} \quad (13)$$

4.1.3 ポアソン比の数値例⁴⁾

b/a が、0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 について、 θ を $0^\circ \sim 180^\circ$ まで変化させた場合の数値計算の結果より、つぎのことが言える。

(a) b/a のいかににかかわらず、 $0 < \theta < 90^\circ$ では、 ν_{xc} , ν_{yc} はともに正となり、心材を曲げた場合、くら形に変形する。また、 $\theta = 0$ で $\nu_{yc} = 0$ 、 $\theta = 90^\circ$ で $\nu_{xc} = 0$ となる。このことは、 $\theta = 0$ では x 軸方向に平行な円筒がつくれる。 $\theta = 90^\circ$ では、 y 軸方向に平行な円筒がつくれることを意味する。

(b) $b/a = 0$ の場合、負のポアソン比はない。

(c) $b/a = 0.5$ の場合、 $90^\circ < \theta < 104.4^\circ$ において、ポアソン比は負となる。

(d) $b/a = 1.0$ の場合、 $\theta > 90^\circ$ では、 ν_{xc} , ν_{yc} とも負とな

り、心材を曲げた場合、ドーム形に変形する。特に、 $b/a = 2.0$ で $\theta = 120^\circ$ 、 $b/a = 5.0$ で $\theta = 102^\circ$ の場合、 ν_{xc} , ν_{yc} はともに -1 となり、心材を曲げた場合、球状に変形する。以上の各種形状を表 3 に示す。

また、ハニカム心材のポアソン比が等方性となる θ と b/a との関係は、(9)式と(12)式を等しいとおけば、ポアソン比が ± 1 となる。 b/a と θ の存在範囲は、 $\theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)]$ と $b/a = -(1/\cos \theta)$ の2式より、 $\theta < 135^\circ$ を得る。 $\theta = 90^\circ$ およびその付近において、 b/a が非常に大きな値を示し、実用の範囲を超えてしまうから、 $\theta = 90^\circ$ 前後において、ポアソン比が等方性を示すハニカム心材はできない。以上のことから、正負のポアソン比を組合わせて、任意のポアソン比の心材を合成することができる。一般に、かく構造の有利性が証明されているにもかかわらず、曲面成形が困難であるため、心材(特に、ハニカム心材)は、主として平面状態で使用されている。現在行われている曲面成形加工方法で、負のポアソン比を有する心材を活用することにより、加工工程の能率化が可能となる。

4.2 弾性係数

サンドイッチ構造は、表面板や心材の構成を工夫することにより、構造の強度、あるいは剛性などの特性を向上させることができる。波形心材やハニカム心材は、一定形状から構成されていて、局部的にみると空間を含む不連続体であるが、その波数、またはセルサイズに比べてサンドイッチ板の寸法が大きいとき、強度および剛性などの諸性質は、その平均値を考慮して連続した材質として取り扱うことができる。

4.2.1 心材の弾性係数⁵⁾

いま、波形心材およびハニカム心材と同じ材料で、かつ同じ厚さ t_0 の平板について、その縦弾性係数、ポアソン比、せん断弾性係数をそれぞれ E , ν , G とし、その平板の引張り、曲げ、せん断およびねじりの各剛性を、それぞれ H_0 , D_0 , GA_0 , GJ_0 で表すと、

$$H_0 = Et_0 / (1 - \nu^2), \quad D_0 = Et_0^3 / 12 (1 - \nu^2),$$

$$GA_0 = Gt_0, \quad GJ_0 = (1/3) Gt_0^3$$

によって与えられる。

(1) 波形心材: 波板の単位体 (1 波長) を考え、座標を図 3 に示すようにとる。この単位体に図 4 に示すように、垂直力 (X , Y)、曲げモーメント (M_x , M_y)、トルク (T) およびせん断力 (N_y , Q_x , Q_y) をそれぞれ作用させたときに生じる変形を考えることにより、各種の剛性が求められる。いま、 H_{xc} , H_{yc} : x , y 方向の引張剛性、 ν_{xc} , ν_{yc} : x , y 方向のポアソン比 D_{xc} , D_{yc} : x , y 方向の曲げ剛性、 G_{xc} , G_{yc} : zx , zy 面の横せん断剛性、 GA_x , GJ_x : xy 面内の横せん断剛性、 xy 断面のねじり剛性、とすると、図 3 のように、1 波長は $m = 2(a \cos \theta + b)$ 、1 波長の実

表 3 ポアソン比に関係するいろいろな形状^{a)}

条 件	(a) 心材要素が食い違いなく 接合されている場合	(b) 心材要素が食い違って接 合されている場合	(c) ポアソン比が正の心材要素と 負の心材要素とを合成 任意のポアソン比の心材を作 ることができる														
$\nu=0$ $0<\theta$ $<90^\circ$	<p>心材の形状 くら形</p>	<p>心材の形状 くら形</p>	<p>心材の形状 円筒形</p>														
$\nu=0$ $\theta=0$ $\nu_{yc}=0$ $\theta=90^\circ$ $\nu_{xc}=0$	<p>心材の形状 円筒形</p>	<p>心材の形状 円筒形</p>	記事 <table><tr><th colspan="2">θ の 存 在 範 囲</th></tr><tr><th>b/a</th><th>θ の 範 囲</th></tr><tr><td>0</td><td>$0^\circ < \theta < 90^\circ$</td></tr><tr><td>0.5</td><td>$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 104.4^\circ$</td></tr><tr><td>1.0</td><td>$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 120.0^\circ$</td></tr><tr><td>2.0</td><td>$0^\circ < \theta < 180^\circ$</td></tr><tr><td>5.0</td><td>$0^\circ < \theta < 180^\circ$</td></tr></table>	θ の 存 在 範 囲		b/a	θ の 範 囲	0	$0^\circ < \theta < 90^\circ$	0.5	$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 104.4^\circ$	1.0	$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 120.0^\circ$	2.0	$0^\circ < \theta < 180^\circ$	5.0	$0^\circ < \theta < 180^\circ$
θ の 存 在 範 囲																	
b/a	θ の 範 囲																
0	$0^\circ < \theta < 90^\circ$																
0.5	$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 104.4^\circ$																
1.0	$0^\circ < \theta < [90^\circ + \sin^{-1}(b/2a)] = 120.0^\circ$																
2.0	$0^\circ < \theta < 180^\circ$																
5.0	$0^\circ < \theta < 180^\circ$																
$\nu < 0$ $\theta < 90^\circ$	<p>心材の形状 ドーム形</p>	<p>心材の形状 ドーム形</p>

図 3 波形心材の単位要素 (1 波長)

図 4 単位要素への負荷

長は, $m_s = 2(a+b)$ で表し, 1 波長間の断面の y 軸まわりの断面二次モーメントを I とすると,

$$I = t_0 \int_0^{2(a+b)} z^2 dS = t_0 a^2 (a+3b) \sin^2 \theta / 6 \quad (14)$$

となり,

$$H_{xc} = H_0 (m_s / m) = H_0 (a+b) / (a \cos \theta + b) \quad (15)$$

$$H_{yc} = D_0 (m_0 / I) = H_0 (t_0 / a)^2 (a \cos \theta + b) / \{ (a+3b) \sin^2 \theta \} \quad (16)$$

$$\nu_{xc} = \nu$$

$$\begin{aligned} \nu_{yc} &= \nu (m / m_s) (H_{yc} / H_0) \\ &= \nu (t_0 / a \sin \theta)^2 (a \cos \theta + b)^2 / \{ (a+b) (a+3b) \} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} D_{xc} &= H_0 (I / m t_0) \\ &= D_0 (a \sin \theta / t_0)^2 (a+3b) / (a \cos \theta + b) \end{aligned} \quad (18)$$

$$D_{yc} = D_0 (m / m_0) = D_0 (a \cos \theta + b) / (a+b)$$

ここで, ν : 平板のポアソン比

(15)式より, (18)式を用いると次の関係が求められる。

$$\begin{aligned} \nu_{xc} / \nu_{yc} &= H_{xc} / H_{yc} = D_{xc} / D_{yc} = 12 m_s I / (m^2 t_0^3) \\ &= (a+b) (a+3b) / (a \cos \theta + b) (a \sin \theta / t_0)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

すなわち, 波が高くなるにつれこの比は大きくなり, $H_{xc} \gg H_{yc}$, $D_{xc} \gg D_{yc}$ とおくことができる。つぎに, それぞれせん断力 N_{xy} , Q_x , Q_y が作用する場合の変形を考えると次式が求められる。

$$GA_c = GA_0 (m / m_s) = GA_0 (a \cos \theta + b) / (a+b) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} G_{sxc} &= GA_0 \{ (a+b) \sin^2 \theta \} / \{ 2 (a \cos \theta + b) \} \\ G_{syc} &= 12 D_0 (a \cos \theta + b) / \{ a b^2 (a+b) \sin \theta \} \end{aligned} \quad (21)$$

また, トルク T の作用によるねじり率は, 次式となる。

$$GJ_c = GJ_0 (a+b) / (a \cos \theta + b) \quad (22)$$

(2) ハニカム心材: 波形心材の場合と同様に, ハニカ

図5 せん断力 S_x , あるいは, S_y が別々に作用するハニカム単位セル

図6 サンドイッチ構造の形式

ム心材の単位体（単位セル）を考え、座標を図5に示すようにとる。 S_x , S_y をそれぞれ x , y 方向のせん断力とする。ハニカム心材の剛性としては, zx および zy 面内のせん断剛性 G_{zx} および G_{zy} と面に直角の方向 (z 方向) の引張剛性 H_{zx} が主要な特性となり、一般に、他の剛性を省略して差し支えない。したがって, H_{zx} は波形心材の x 方向の引張剛性 H_{xc} に等しい。ゆえに, (15)式より

$$H_{zx} = H_0(a+b) / (a \cos \theta + b) \quad (23)$$

つぎに, せん断力 S_x , S_y が作用したときの x , y 方向のひずみより

図7 等価図心

図8 圧縮荷重を受けるサンドイッチ構造の破壊様式

$$\left. \begin{aligned} G_{zx} &= G t_0 (a \cos^2 \theta + b) / \{ (a \sin \theta + t_0) (a \cos \theta + b) \} \\ &\div G (t_0/a) (a \cos^2 \theta + b) / \{ \sin \theta (a \cos \theta + b) \} \\ G_{zy} &= G t_0 \sin \theta / (a \cos \theta + b) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

4.2.2 サンドイッチ構造の弾性係数

図6に示すような(a)波形心材や(b)ハニカム心材を有するサンドイッチ板, および(c)普通サンドイッチ板の諸剛性を求めるに当たって, 添字 1, 2 および c はそれぞれ表面板 1, 2 および心材を, また, 添字 x , y はそれぞれ x , y 方向を表し, $E' = E / (1 - \nu^2)$ とおく。

引張剛性では, 既述のように, 波形心材およびハニカム心材の H_{xc} と H_{yc} は, 通常, 無視し, 普通サンドイッチ板においても, E'_1 と E'_2 は, E'_c よりはるかに大であるから, 同様に無視することができる。

曲げ剛性では, 普通サンドイッチ板の心材とハニカム心材の H_{xc} , D_{xc} , D_{yc} , および波形心材の H_{yc} , D_{yc} を無視することができる。ただし, 波形心材の H_{xc} は無視できない。波形心材サンドイッチ板の x 方向の曲げ剛性については, 図7に示すような等価図心の位置 e_1 , e_2 を求めておく必要がある。すなわち,

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \frac{E'_2 t_2 h + E' t_0 (a+b) (t_1 + t_c) / \{2(a \cos \theta + b)\}}{E'_1 t_2 + E'_2 t_2 + E' t_0 (a+b) / (a \cos \theta + b)} \\ e_2 &= \frac{E'_1 t_1 h + E' t_0 (a+b) (t_2 + t_c) / \{2(a \cos \theta + b)\}}{E'_1 t_1 + E'_2 t_2 + E' t_0 (a+b) / (a \cos \theta + b)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

一軸ねじり剛性は、やや複雑になるが、ハニカム心材の場合、 $G_c \ll G_1, G_2$ が成り立つとき簡単になる。 xy 面内のせん断剛性、横せん断剛性、面内ねじり剛性等を併せて表示すると、表 4 のようにまとめられる。

表 4 サンドイッチ構造の弾性係数

項 目		普通サンドイッチ板	波形心材サンドイッチ板	ハニカム心材サンドイッチ板
引張剛性	x 方向 H_x	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2$	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2 + E' t_0 \frac{a+b}{a \cos \theta + b}$	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2$
	y 方向 H_y	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2$	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2$	$E'_1 t_1 + E'_2 t_2$
面内せん断剛性 GA		$G_1 t_1 + G_2 t_2$	$G_1 t_1 + G_2 t_2$	$G_1 t_1 + G_2 t_2$
曲げ剛性	x 方向 D_x	$h^2 \frac{E'_1 t_1 E'_2 t_2}{(E'_1 t_1 + E'_2 t_2)}$	$E'_1 t_1 e_1^2 + E'_2 t_2 e_2^2 + E' t_0 \frac{a+b}{a \cos \theta + b} \left(\frac{t_1 + t_c}{2} - e_1 \right)^2 + \frac{E'_1 t_1^3}{12} + \frac{E'_2 t_2^3}{12} + E' t_0 \frac{a^2 (a+3b) \sin^2 \theta}{12 (a \cos \theta + b)}$	$h^2 \frac{E'_1 t_1 E'_2 t_2}{(E'_1 t_1 + E'_2 t_2)}$
	y 方向 D_y	$h^2 \frac{E'_1 t_1 E'_2 t_2}{(E'_1 t_1 + E'_2 t_2)}$	$h^2 \frac{E'_1 t_1 E'_2 t_2}{(E'_1 t_1 + E'_2 t_2)}$	$h^2 \frac{E'_1 t_1 E'_2 t_2}{(E'_1 t_1 + E'_2 t_2)}$
横せん断剛性	x 方向 D_{Qx}	$G_{2xc} h$	$G t_0 h \frac{(a+3b) \sin^2 \theta}{2 (a \cos \theta + b)}$	$G t_0 h \frac{a \cos^2 \theta + b}{a \sin \theta (a \cos \theta + b)}$
	y 方向 D_{Qy}	$G_{2yc} h$	$E' t_0 h \frac{(a \cos \theta + b)}{ab^2 (a+b) \sin \theta}$	$G t_0 h \frac{\sin \theta}{a \cos \theta + b}$
一軸ねじり剛性 GJ		$4h^2 \frac{G_1 t_1 G_2 t_2}{(G_1 t_1 + G_2 t_2)}$	$\frac{G_c t_c G_2 t_2 (t_2 + t_c)^2 + G_c t_c G_1 t_1 (t_1 + t_c)^2 + 4h^2 G_1 t_1 G_2 t_2}{G_1 t_1 + G_2 t_2 + G_c t_c}$	$4h^2 \frac{G_1 t_1 G_2 t_2}{(G_1 t_1 + G_2 t_2)}$
面内ねじり剛性 D_{xy}		$2h^2 \frac{G_1 t_1 G_2 t_2}{(G_1 t_1 + G_2 t_2)}$	$\frac{G_c t_c G_2 t_2 (t_2 + t_c)^2 + G_c t_c G_1 t_1 (t_1 + t_c)^2 + 4h^2 G_1 t_1 G_2 t_2}{2 (G_1 t_1 + G_2 t_2 + G_c t_c)}$	$2h \frac{G_1 t_1 G_2 t_2}{(G_1 t_1 + G_2 t_2)}$

表 5 全般座屈

区 分	条 件	式	記 事
面内圧縮座屈	圧縮負荷縁 2 辺支持	$P_{\sigma} = \frac{P_1}{P_1 + U} \left[P_2 + U \left(1 + \frac{P_2}{P_1} \right) \right]$ (a)	$U = t_c G_c, P_1 = \pi^2 D_1 / a^2$ $P_2 = 2\pi^2 D_f / a^2$ *1 表面板のみの曲げ剛性は無視
		$D_1 \gg D_f, P_1 \gg P_2$ のとき*1 $\frac{1}{P_{\sigma}} = \frac{1}{P_1} \left(1 + \frac{\pi^2 D_1}{U a^2} \right)$ (b)	
	板の周辺全縁が単純支持または固定	$P_{\sigma} = K_c \pi^2 D / b^2$ (c)	*2 4 辺単純支持の場合、 a/b に対し最小値をとる
		$K_c = \frac{4}{(1+V)^2}$ *2 (d)	表面板が厚い場合、塑性座屈 $E_f = 2E_c E_i / (E + E_i), E_i$: 接線係数
面内せん断座屈	周辺単純支持	$S_{\sigma} = K_s \pi^2 D / b^2 = U = t_c G_c$ (e)	$A = (b/a)^2$
		$K_s = \frac{4(4+3A)}{3+(13+9A)}$ (f)	条件 $0 \leq V \leq 1/(1+A)$
		$K_s = 1/V$ (f)	条件 $V > 1/(1+A)$
	周辺固定	$K_s = \frac{27+17A}{3+(23+13A)V}$ (g)	条件 $0 \leq V \leq 3/[4(1+A)]$
		$K_s = 1/V$ (g)	条件 $V > 3/[4(1+A)]$

備考：板の細長比 a/b に対する K_c の値を、剛性比 V をパラメータとして図示する。

5. 座 屈

サンドイッチ構造の心材として、ハニカム心材および波形心材の外に、連続心材がある。幅の広い板の円筒曲げ、または4周を支持した板でも、波長の短い波形が全幅にわたって生じて破壊する。その場合、単位幅を考えると、サンドイッチ柱の理論を適用して差し支えない。このような連続心材を有するサンドイッチ板の圧縮破壊は、次のような形式が考えられる（図8参照）。

(1) 柱全体として弾性的に不安定となり、表面板と心材が一体となり座屈変形を生じ、ついに曲げ応力またはせん断応力のいずれかで破壊する。また、サンドイッチ柱のある部分、あるいは全体が荷重の方向に平面でないと、荷重と共にたわみが増し、曲げ応力またはせん断応力のいずれかで破壊する。

(2) 表面板と心材がはがれて、その表面板の局所的不安定によって、しわが生じて破壊する。これをリンクリング (wrinkling または ripple-type buckling) と言い、表面板が完全に平面である場合には、弾性的に支持され

た表面板の座屈による破壊である。

(3) 表面板が完全に平面でない場合は、荷重と共にたわみが増大し、座屈の問題ではなく、圧縮強度は、心材または接着部が、柱のある位置で最終強度になるときの表面板の応力が定められる。表面板は、完全な平面でないから、その座屈応力は表面板の応力の上限を与えるに過ぎない。

(4) 表面板または心材の応力が、材料の最大圧縮強度に達して破壊する。この場合の圧縮強度は、材料の特性によって決められる。

サンドイッチ柱の圧縮強度を考える場合、これらの各項を検討の上、最小値を取らなければならない。

いま、サンドイッチ板の表面板と心材がともに等方性材料とみなされる場合、板全体としての全般座屈の式を、面内圧縮座屈と面内せん断座屈に分けてまとめると表5のとおりである。また、柱としての座屈および表面板のリンクリング座屈を、セル間座屈と圧壊強さを含め、種々の座屈形態について求められた式をまとめて表6に示す。なお、曲面板、円筒等の座屈については、あ

図9 端末処理，結合，充填の方法¹⁵⁾

座屈形態の式

付 記 事 項	関 連 図	文 献	備 考
<p>L: 柱の長さ, ρ: 断面の回転半径, σ: 破壊のさいの表面板の応力, G_c: 心材のせん断剛性率</p> <p>B は右図で与えられる値 2024-T アルクラッドでは 31.15 kgf/mm^2 7075-T アルクラッドでは 56.25 kgf/mm^2</p>	<p>アルミニウム合金の L/ρ と破壊応力との関係</p>	5)	ハニカム心材について論じられているが、連続心材についても適用可
<p>①心材のひずみエネルギーと表面板の曲げエネルギーの和が圧縮荷重のなす仕事に等しいとする。</p> <p>②表面板の小さい変形は、心材の中心部に影響を及ぼさない。</p> <p>③心材の変形は、表面材より、それぞれ W の幅の周辺部に限る。</p> <p>α, w, L は右図(a), (b)に示すとおり。</p> <p>(30)式の記号 E_f: 表面板の縦弾性係数*¹, E_c: 心材の表面板に直角方向の縦弾性係数, G_c: 心材の荷重方向の横弾性係数*²</p> <p>右図(b)のように仮定、各表面板の波形は 90° の位相差がある。b/t が小さい所では、非対称であり、b/t が材料の特性から定められる一定値より大きい場合には、対称変形となる。</p>	<p>(a)対称形リンクリング</p> <p>(b)非対称形リンクリング</p> <p>(c) b/t とリンクリング応力との関係</p>	6)	<p>b/t が表面板および心材の特性から定められる一定値より大きい場合のみ成立する。</p> <p>*¹ ヤング率 *² せん断弾性係数</p> <p>左図(c)において、(30)式(33)式で表される曲線は、(31)式で与えられる b/t で接する。 (34)式(36)式およびその接点を与える(35)式の関係を示す。</p>
<p>W_0: 初期たわみ振幅, λ: 初期たわみの波長, t_f: 表面板の厚さ, K: 係数 W_0 は(38)式 $\alpha = 2\pi/\lambda$, λ: リンクリングの長さ 心材の伸びのエネルギーと表面板の曲げエネルギーの和と圧縮荷重の仕事との関係を仮想変位の原理から求める。τE_f: 表面板の相当弾性係数</p>	<p>圧縮時にサンドイッチ構造に作用する荷重</p>	7)	<p>$W = Q_c t_f / (2E_c)$ Q_c: 心材接着部の最大引張強さ</p>
		8)	
<p>$\bar{E}_f = E_f / (1 - \nu_f^2)$, $C = (E_c / G_c) (t_f / h)^2$ $S = P_\alpha / (t_f \bar{E}_f)$, $F = (G_c / \bar{E}_f) (h / t_f)$ $s = S / C$ と $f = F / 2C$ との関係は図で与えられている。</p>		9)	

表 6 つづき

座屈形態と発表者名	誘導された式および内容	式番号
表面板の局部座屈	ハニカム心材のセルの壁間では、表面板が心材と接触していないので、面内圧縮を受けると、表面板がセル間でたわむ。 $\sigma_{\sigma} = KE_f(t_f/b)^{1/2}$ $b/t \leq \sqrt{3.62E_f/\sigma_y}$	(46)
圧壊強さ R. K. McFarland Jr.	ハニカム心材および波形心材を有するサンドイッチ構造は、面に垂直な圧縮荷重をうけると、壁面が座屈して圧壊する。 $\sigma_{\sigma} = \sigma_y \left(\frac{t_H}{b} \right)^2 \left[\frac{2\pi}{\sqrt{3}K} + 4 \right] + 1.155\tau_y \left(\frac{t_H}{b} \right)$	(47)

とがきで文献の引用をするだけに止める。

6. 設 計

航空機、ミサイルを始めとして車両、船舶、建築など多くの構造物を設計する場合、(a)荷重の軽減および荷重分布様式の合理化、(b)固有重量の軽い材料の使用、(c)強度および剛性の大きい材料の使用、(d)適切な構造様式の選定、(e)工作について十分な可能性と信頼性がある工作法、(f)他の目的のために使用する構材をも支持構材として利用、(g)妥当な価格、等が考えられる。そして、これらの各項を満足する構造としては、サンドイッチ構造が優れている。特に、航空機、ミサイル等においては、高性能が優先的に要求される。それを満足する材料としては、表 7 に示すとおり、アルミニウム合金がきわめて適している。最近では、特に、新素材として複合材料が活用されてきた。サンドイッチ構造では、それらの優れた素材を用いて、新しい構造を創造することが設計者にとつてきわめて必要であり、知恵の出し所である。

6.1 最適設計

サンドイッチ構造を活用する主目的は軽量化にあるわけで、種々の条件を指定し最適化することが、植村^{(12),(13)}、島村⁽¹⁴⁾等によって具体的に行われている。以下二、三の例を示す。

(1) 負荷曲げモーメントを指定した場合（強度上からの軽量最適化）

単位幅当たりの全体重量（ただし、接着剤の重量は無視） W は、 $W = 2\rho_f t_f + \rho_c h$ （ただし、 h ：表面板中心間距離、 t_c ：心材の厚さ、かつ $h \equiv t_c$ とする）。負荷モーメント M と表面板の許容応力 σ_f との関係は、

$$M = \sigma_f t_f h \text{ より } t_f = M/(\sigma_f h)$$

したがって、

$$W = 2\rho_f(M/\sigma_f h) + \rho_c h$$

W の最小値は、これを h で偏微分して 0 とおくことにより、

$$W_{\min} = h[2\rho_f(t_f/h) + \rho_c] = 2\rho_c h$$

すなわち、全体重量が心材重量の 2 倍であり、心材と表面板とが等しい重量配分になっているときが最適である。

(2) サンドイッチ板が四辺単純支持で、一軸圧縮を受け、全体が一体座屈することを限界とする場合（座屈上からの軽量最適化）。

板の単位面積当たりの重量 $W = 2\rho_f t_f + \rho_c h$ 単位分布幅当たりの座屈荷重 P_{σ} は、

$$P_{\sigma} = 2\sigma_f t_f = \{4/(1+V)^2\}(\pi D/b^2) \quad (\text{表 5(d) 式})$$

ここで、

$$V = (\pi D^2)/(b^2 D_Q)$$

ただし、

$$D = \{E_f/(1-\nu_f^2)\}(t_f h^2/2)$$

$$D_Q = t_c G_c$$

$$\therefore P_{\sigma} = A t_f h^2 / (1 + A t_f h / 4 G_c)$$

ここで、

$$A = (2\pi^2/b^2)\{E_f/(1-\nu_f^2)\}$$

$$\Phi = P_{\sigma} + \lambda W = A t_f h^2 / (1 + A t_f h / 4 G_c)$$

$$+ \lambda (2\rho_f t_f + \rho_c h)$$

より、 $V = (\pi^2 D)/(b^2 D_Q)$ として、 W の最小化を Lagrange の方法により求めると、 $W_{\min} = (1/2)(3-V)\rho_c h$ 、すなわち、心材重量の $(3-V)/2$ 倍となる。 D_Q が大一心材のせん断弾性係数が大一であれば、心材重量の 1.5 倍が全体重量となるときの最適となる。

(3) 曲げ剛性を指定した場合（製作コスト上からの最

付 記 事 項	関 連 図	文 献	備 考
周辺単純支持とすると、 $K=3.62$	ハニカムの形状		心材を一边 b の正方形板でおきかえる。 文献 ¹²⁾ 参照
σ_Y : 引張降伏応力, t_H : セル厚, τ_Y : セン断降伏応力, b : セルサイズ, K : 実験的に定められる値	圧縮荷重と変位の関係	10) 11)*	動的最大圧縮応力の収束値は静的値の約1.4~1.7倍*

表 7 構造用材料の機械的性質

区分	項目		比 重	弾性率	引張強さ	降伏点	比強さ	比安定性	比剛性
	材料		ρ	E [kgf/mm ²]	σ_t [kgf/mm ²]	(0.2%) [kgf/mm ²]	σ_t/ρ	$\sqrt{E}/\rho$	E/ρ
鋼	Cr-Mo 鋼	AISI 4130	7.9	22000	150	120	19.0	19	2780
	NI-Cr-Mo 鋼		7.9	22000	180	150	22.8	19	2780
	18-8ステ	(冷間圧延)	8.0	22000	70~125	35~105	8.8~15.6	18.5	2750
	ンレス鋼	(焼なまし)	8.0	22000	60	30	7.5	18.5	2750
軽合金	Al 合金	2024-T4	2.8	7450	44	33	15.7	31	2660
		7075-T6	2.8	7320	57	50	28.3	31	2610
	Mg 合金	AZ31(展伸材)	1.8	4500	25~31	15.4~23	13.8~17.2	37	2500
		AZ92(鋳物)	1.8	4000	28	16	15.4	35	2200
	Ti 合金	(純粋に近いもの)	4.5	10500	50	40	11.1	23	2330
		RC-130B	5.0	11000	105	95	21.0	21	2200
		Ti-150A	5.0	11000	125	112	25.9	21	2200
プラスチック	強化ポリエステル積層板	ガラス繊維 (重量比45~60%)	1.6~1.8	1100~1700	23~31		14.4~17.2	21~23	690~950
		ガラス繊維 (重量比60~65%)	1.7~1.9	1300~2300	28~34		16.5~17.9	21~24	760~1050
木 材	ひのき, スプルース		0.45	900	5		11.1	67	2000

適化)

サンドイッチ板の製作コストを単位板面積 (m²) 当たり K (¥) とすると,

$$K=K_f+K_c+K_K$$

ここで, K_f : 上下表面板コスト= $2C_f\rho_f t_f$

K_c : 心材コスト= $C_c\rho_c h$ (ただし $h\cong t_c$)

K_K : 接着加工コスト, C_f, C_c : 表面板, 心材の単価 (¥/kg), 厚さ方向の寸法単位 (mm), 接着加工コスト K_K が一定とすると,

$$K-K_K=2C_f\rho_f t_f+C_c\rho_c h$$

また, 曲げ剛性 D は,

$$D=E_f t_f h^2/\{2(1-\nu_f^2)\}$$

$$\therefore t_f=2D(1-\nu_f^2)/(E_f h^2)$$

したがって,

$$K-K_K=4C_f\rho_f D(1-\nu_f^2)/(E_f h^2)+C_c\rho_c h$$

これより,

$$t_f/h=C_c\rho_c/(4C_f\rho_f)$$

したがって,

$$K - K_K = 1.5C_p \rho_c h = 1.5K_c$$

すなわち、

$$K_f = 0.5K_c$$

上下表面板のコストが心材コストの1/2になっている場合が最適である。

6.2 サンドイッチ構造の継手取付部および端末部の設計

サンドイッチ構造の設計で重要な箇所は、取付部、端末部である。したがって、概部の設計には、強度上、工作上、十分留意する必要がある。サンドイッチ板の継手取付部および開口、または、弱い心材と薄い表面板を保護して、局部的な集中荷重および応力集中を避けるため、板全体に分散させることが必要である。サンドイッチ板の端末処理は、(1)ハニカム心材を押し寄せて固めるか、セルに充填材(樹脂)を充填して補強する、(2)表面板を曲げて合わせる、(3)型材を押込む、等の方法を用いる。局部的補強や取付座部の補強には、さらに、挿入材を心材部に入れたり、裏付材を接着する。箱形構造にす

図10 航空機における部材の断面¹⁾

(a) 胴体断面 (b) ミサイル翼 (c)(d) 操縦
だ面 (e)(f) けた、ウェブ (g) 翼

図11 輸送橋¹⁵⁾

る場合は、隅部はモーメントをできるだけ伝達するように補強材を用いる。(図9参照)

6.3 応用例¹⁵⁾

サンドイッチ構造は軽量構造として、最も有効適切な構造の一つであるから、航空機に採用されているのは必然の結果とみて差し支えない。その特性が優れているから、建築、車両、船舶等にも広く活用されている。

具体的には、航空機関係では、翼、舵面、フェアリング、パイロン、ドア等、建築、車両では、床、仕切り、壁等、その他舟艇、コンテナ、テーブル、等がある。

図10～図12に代表的なものを示す。

7. 構造の製作と修理

7.1 製作

サンドイッチ構造は、表面板と心材との固着結合によって製作する。したがって、構成要素によって分類すると表8のようになる。

図12 輸送用コンテナ¹⁵⁾

表8 表面板と心材の固着法

表面板/心材	固 着 法	記 事
固体/固体	接着剤を挿入して接着	
非固体/固体	発泡成形の心材に、表面板素材(液体、繊維材)のFRPの湿式積層、繊維 ^{*1} を狭んで樹脂を塗布し、ローラをかけて脱泡し、放置して硬化 ^{*2} させる。接着剤は介入しない。	^{*1} マット、ロービング、クロスとする。 ^{*2} 固化とキュアリング
固体/非固体	予備成形した表面板を適当な間隔に保ち、注入孔とガス抜き穴を残して密閉し、注入孔から発泡材を混合した樹脂を注入すると内部で発泡反応を生じて膨張し、空間を満たし、サンドイッチ構造ができ上がる ^{*3} 。複雑な立体成形が可能であるが、膨張を支える金型が必要である。	^{*3} 注入発泡または現場発泡

ハニカム心材を製作するには、アルミニウム合金板の薄板（はく）から一定間隔で相互接着した折畳みブロックを作り、これを所要の高さ（心材の厚さ）に切断して、 $y(W)$ 方向に展張すれば完成する。厚目のはくの場合は、リボンを予備成形して接着するのが一般である。

7.2 修理

現場の修理は、切開充填式で行うが、手工具（ナイフ、糸のこ、はさみ等）と切りふさぎの修復材料があればよい。損傷部の修理方法の例を図13に示す。

図13 修理要領²⁾

図14 心材比重と心材厚さとの関係¹⁵⁾

8. 試験と検査

要素材の特性試験としては、表面板も心材も、引張、圧縮、曲げ、せん断等の各試験を行う。心材の比重とそれぞれの強さとの関係を求めた試験結果の例を、図14～図16に示す。また、構造体としての特性試験は、引張、圧縮、せん断、曲げ、局部座屈、衝撃等がある。そのうち、サンドイッチ構造の短柱における表面板の終極圧縮強さ、ウェブの終極せん断強さの例を、図17および図18に示す。

曲げ試験を行う場合、あらかじめ計算をする。その場合用いられる代表式は、床の設計にも適用される。すなわち、はりに P なる荷重が作用するとき生ずる表面板の圧縮あるいは引張応力 σ_f は、3点曲げおよび4点曲げの場合、それぞれつぎのようになる。

図15 心材比重と圧縮強さとの関係¹⁵⁾（各社の試験結果）

図16 心材比重とせん断強さとの関係¹⁵⁾

図17 短柱における表面板の圧縮強さ¹⁾

$$\left. \begin{aligned} \sigma_f^{(3)} &= PL / \{2t(t+t_c)b\} \\ \sigma_f^{(4)} &= PL / \{4t(t+t_c)b\} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

最大たわみ δ は、それぞれつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\max}^{(3)} &= PL^3 / (48D) + PL / (4U) \\ \delta_{\max}^{(4)} &= 11PL^3 / (768D) + PL / (8U) \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

なお、スパンの中央に生ずるせん断応力 τ_c は、

$$\tau_c = P / \{(t+t_c)b\} \quad (50)$$

ここで、

$$D = E_f(t^3 - t_c^3)b / 12(1 - \nu_f^2)$$

$$\approx E_f t(t+t_c)^2 b / 8(1 - \nu_f^2)$$

$$U = G_c(t+t_c)^2 b / 4t_c$$

$$\approx G_c t(t+t_c)b / 2t_c \approx G_c t_c b$$

ただし、 L ：スパンの長さ、 E_f ：表面板の縦弾性係数、 G_c ：心材の横弾性係数、 t 、 t_c ：全板厚、心材および表面板の厚さ、 ν_f ：表面板のポアソン比

なお、心材および接着剤で新しい材料を使用する場合は、接着方法の適否を確認する必要がある。心材の形状、清浄度、運搬による破損度をみるための試験を行う。心材と表面板の接着強度、はりの曲げ試験をする。けたに用いるときは、温度を上げて心材と接着剤のクリープを決める。用途によっては、静的のみならず動的試験を行う。実用上の試験としては、塩水噴霧あるいは湿気、煮沸と耐薬試験、および腐食の検査も必要である。特殊なものとしては、放射線による接着部および寿命に及ぼす影響も留意する必要がある。

主な試験と検査には、ASTM, MIL (米軍), FS (米連邦), DIN 等の規格が整備されている。一般に、検査としては、寸法、重量、欠陥、性能の品質管理が行われる。中で問題になるのは、欠陥検査である。構造体の内部は完成後に検査することができない。それを補う方法

図18 ウェブの b/d に対する終極せん断強さ¹⁾

として、打音検査がある。音調で判定するには、経験を要するから、裁縫のルーレットのような“スーパーホイール”を定速で転がして、音調を集音したり、オシロ波形で記録して判定することもある。また、吸引検査、すなわちカップ状のテストを当てて、減圧すると接着不良部がふくれあがるので、欠陥部位を確定することができる。その他としては、X線検査、金属表面板直下の接着不良に対しては超音波検査、接着はがれの探知には共振検査、金属製構造では、熱伝導の差で接着不良の探知をする加熱示温検査等が行われる。

9. あとがき

サンドイッチ構造について、必要な知識の概要を記したが、個々の問題に関しては、必ずしも十分とは言えない。波形心材の弾性係数については、C. Libve and E. Hubka¹⁶⁾の研究、構造の理論解析では、平板について C. Libove and S. Batdorf¹⁷⁾、曲面板について M. Stein and J. Mayers¹⁸⁾、殻について E. Reissner¹⁹⁾がそれぞれ行っている。ハニカム心材の圧縮特性について、C. B. Norris²⁰⁾は解析と実験を行い、池田²¹⁾は等方性サンドイッチ平板の曲げ理論を展開している。全般的に実際面から資料をまとめたものとして、ANC-23 part I, II²²⁾(改定されて MIL-HDBK-23A²³⁾)、また設計を主体としたものとしては、植村¹³⁾、宮入²⁴⁾等がまとめている。研究論文の要旨をまとめたものとしては、弾性要覧²⁵⁾があり、赤坂^{26), 27)}もまた種々の理論解析をまとめている。

最後に、サンドイッチ構造の特長を理解し、広い分野において活用し、その優位性を十分発揮されることを期待したい。興味ある方々が、この種の構造をさらに未知の分野に活用し、有益な資料を提供されることを切望する。本稿を作成するに当たり、特に竹内正氏、荒井辰雄氏、石井靖幸君および森徳高君のご協力に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) B. R. Noton: Aero Reserch T.N., **3** (1957), 1.
- 2) MIL-HDBK-23: Composite Construction for Flight Vehicles Part I, **10** (1959).
- 3) 石井：サンドイッチ構造の弾性係数 東海大卒業論文, **3** (1985), 1.
- 4) 國本, 竹内：軽金属, **5** (1950), 202.
- 5) W. W. Troxell and H. C. Engel: J. Aeronaut. Sci., **7** (1947), 414.
- 6) N. J. Hoff and S. E. Mautner: J. Aeronaut. Sci., **7** (1945), 285.
- 7) C. C. Wan: J. Aeron. Sci., **9** (1947), 531.
- 8) S. Yusuff: J.R.A.S., **59** (1955), 30.
- 9) J. N. Goodier and C. S. Hsu: J. Aeronaut. Sci., (1954), 526.
- 10) R. K. McFarland Jr.: AIAA, J., **6** (1963), 1380.
- 11) 國本, 山田：軽金属, **37** (1987), 327.
- 12) 植村：機械学会誌, **71** (1968), 10.
- 13) 植村：複合材料設計, **2** (1975), 23.
- 14) 島村, 宮入：サンドイッチ構造, 日刊工業新聞社, (1974).
- 15) B. R. Noton: Aluminium, Stockholm, **8, 9, 10, 12** (1958), **1, 5** (1959).
- 16) C. Libove and E. Hubka: NACA TN 2289 (1951), 1.
- 17) C. Libove and S. B. Batdorf: NACA Rep. 899 (1948), 139.
- 18) M. Stein and J. Mayer: NACA Rep. 1008 (1951), 129.
- 19) E. Reissner: NACA Rep. 975 (1950), 483.
- 20) C. B. Norris: NACA TN1251 (1947), 1.
- 21) 池田：航空学会誌, **3** (1955), 289.
- 22) ANC-23: Sandwich Construction for Aircraft Part I, II, Bulletin, **5** (1951).
- 23) MIL-HDBK-23A: Structural Sandwich Composite, **12** (1968).
- 24) 宮入：複合材料設計, プラスチックス, **23** (1972), **24** (1973).
- 25) 長柱研究委員会編：弾性安定要覧, コロナ社, (1959), 479.
- 26) 林編：複合材料工学, 日科技連, (1971).
- 27) 赤坂：軽構造の理論とその応用 (林編), 下巻第15章, 日科技連, (1966).