

序文

航空機構造の科目は非常に広範囲にわたる内容を含んでいる。軽量構造に特化した応用だけではなく、重量構造の古典的な解析方法の大部分についても考慮しなければならない。学部学生向けに書かれた一冊の本のなかで航空機構造の解析と設計のすべての段階を取り扱うことは不可能である。そこで、新しい材料や新しい製作方法が開発されても変化しない基礎的な構造理論に重点を置いた。この本に示した理論の大部分はどのような設計要求にも、どのような材料にも適用可能である。特定の航空機に適用される詳細設計仕様や材料特性に応じて、設計技術者がこの理論に補足すればよい。

学部学生や現場の技術者が犯す重大な誤りの多くは、単純な力の釣り合い式を適用する際の誤りに起因している。航空機構造の解析に対する基本的な力学原理の適用が非常に重要であることを強調しておく。変形と不静定構造については、後の章で取り扱う。空気力の分布と飛行荷重条件に関しては空気力学の知識が必要である。前もって必要な空気力学については、学生は航空機構造の科目と並行して履修するので、これらの項目はこの本の後ろの方で説明した。

初めの原稿を読んで批評をしてくださったジョセフ・マーチン・ジュニア博士、アレクサンダー・クレミン博士、レイモンド・シュネイヤー教授、ジョージ・コーエン氏に感謝する。P. E. ヘムケ博士、A. A. ブリエルマイア博士、C. E. デューク氏からの有益な意見と批評に感謝する。

デイビッド J. ピアリー
ステートカレッジ、ペンシルバニア州
1949 年 8 月

目 次

序 文	i
-----	---

第 1 章 力の釣り合い

1.1 釣り合い方程式	1
1.2 2つの力が働く部材	3
1.3 トラス構造	9
1.4 結合点法によるトラスの解法	11
1.5 断面法によるトラスの解析	14
1.6 トラスの図式解法	16
1.7 曲げを受ける部材を含むトラス	19

第 2 章 空間構造物

2.1 釣り合い方程式	24
2.2 モーメントと偶力	25
2.3 代表的な空間構造の解析	27
2.4 空間枠組み構造のねじり	39
2.5 翼構造	44
第 2 章の参考文献	55

第 3 章 慣性力と荷重倍数

3.1 並進運動	56
3.2 回転する物体の慣性力	67
3.3 並進運動の加速度による荷重倍数	80
3.4 角加速度に対する荷重倍数	85

第 4 章 慣性能率, モールの円

4.1 重心	88
4.2 慣性能率	89
4.3 傾いた軸まわりの慣性能率	99
4.4 主軸	101
4.5 慣性乗積	102

4.6	慣性能率に関するモールの円	106
4.7	組み合わせ応力のモールの円	112
第4章の参考文献		120

第5章 セン断力, 曲げモーメント線図

5.1	せん断力と曲げモーメント	121
5.2	荷重, セン断力, 曲げモーメントの関係	125
5.3	せん断力線図の面積としての曲げモーメント	126
5.4	ひとつの面内に無い荷重が負荷される部材	132

第6章 対称断面梁のせん断応力と曲げ応力

6.1	曲げの式	137
6.2	梁のせん断応力	139
6.3	自由表面のせん断応力の方向	147
6.4	薄いウェブのせん断流	149
6.5	せん断中心	151
6.6	箱型断面のねじり	158
6.7	箱型梁(ボックスビーム)のせん断流の分布	160
6.8	テーパードした梁	169
6.9	フランジ面積が変化する梁	176

第7章 非対称断面の梁

7.1	2つの主軸に関する曲げ	183
7.2	曲げ応力の一般式	186
7.3	横方向に支持された非対称梁	193
7.4	3つの集中フランジを持つ梁	199
7.5	非対称梁のせん断流	201
7.6	断面が変化する梁	204
7.7	主翼基準軸の選択	207
7.8	後退角のための主翼の曲げモーメントの補正	210
第7章の参考文献		213

第8章 セミモノコック構造の部材の解析

8.1	薄いウェブに入る集中荷重の分布	214
8.2	胴体隔壁に働く荷重	218
8.3	翼のリブの解析	224
8.4	テーパードしたウェブのせん断流	232

8.5 セミモノコック構造の切欠き	237
第8章の参考文献	248

第9章 翼幅方向の空気力分布

9.1 一般的な考慮事項	249
9.2 翼の渦	251
9.3 吹きおろし速度を求める基礎的な式	255
9.4 楕円形の翼	259
9.5 ねじれがない翼の近似的な揚力分布	260
9.6 ねじれのある翼の近似的な揚力分布	262
9.7 フーリエ級数を使って翼幅方向の揚力分布を計算する方法	270
9.8 フーリエ級数の係数の決め方	274
9.9 係数 A_n の計算	277
9.10 誘導抵抗の翼幅方向の分布	281
9.11 空気力分布に影響を及ぼす他の要因	285
9.12 揚力線理論の限界	286
第9章の参考文献	288

第10章 航空機の外部荷重

10.1 一般的な考慮事項	290
10.2 基本的な飛行条件	291
10.3 構造解析に必要な空力データ	295
10.4 釣り合いをとるための尾翼荷重	296
10.5 速度-荷重倍数線図	298
10.6 突風荷重倍数	300
10.7 空気力計算の数値例	304
第10章の参考文献	311

第11章 航空機構造用材料の力学特性

11.1 応力-歪曲線	312
11.2 金属材料の名称	315
11.3 材料の強度と重量の比較	318
11.4 サンドイッチ材料	321
11.5 材料の代表的な設計データ	324
11.6 無次元の応力-歪曲線の式	326
11.7 安全率と安全余裕	328
第11章の参考文献	330

第12章 継手と結合金具

12.1 概要	331
12.2 ボルト継手とリベット継手	332
12.3 標準部品	338
12.4 金具の解析の精度	344
12.5 偏心荷重を受ける結合	350
12.6 溶接継手	354
第12章の参考文献	359

第13章 引張, 曲げ, ねじりを受ける部材の設計

13.1 引張部材	360
13.2 塑性曲げ	361
13.3 一定の曲げ応力	363
13.4 台形分布の曲げ応力	365
13.5 曲り梁	369
13.6 円形の軸のねじり	373
13.7 円形断面でない軸のねじり	375
13.8 ねじり部材の端の拘束	380
13.9 弾性限を超えるねじり応力	382
13.10 組み合わせ応力と応力比	385
第13章の参考文献	391

第14章 圧縮を受ける部材の設計

14.1 梁のたわみの式	392
14.2 長い柱	393
14.3 偏心荷重を受ける柱	395
14.4 短い柱	397
14.5 柱の端末拘束条件	399
14.6 その他の短柱の式	402
14.7 実用的な設計の式	405
14.8 接線剛性の式の無次元表示	411
14.9 偏心荷重が終極強度におよぼす影響	415
14.10 圧縮を受ける平板の座屈	419
14.11 平板の終極圧縮荷重	424
14.12 平板の塑性座屈	429
14.13 無次元座屈曲線	432
14.14 局所クリップリングで破壊する柱	435

14.15 圧縮を受ける曲面板	441
第 14 章の参考文献	447

第 15 章 セン断ウェブの設計

15.1 平板の弾性座屈	449
15.2 曲率のある長方形板の弾性座屈	451
15.3 完全張力場の梁	454
15.4 張力場の角度	459
15.5 半張力場梁	463
15.6 曲面張力場ウェブ	470
第 15 章の参考文献	477

第 16 章 構造の変位

16.1 計算した変位の適用と限界	478
16.2 軸方向荷重を受ける部材の歪エネルギー	478
16.3 トラスの変位	480
16.4 曲げによる歪エネルギー	485
16.5 梁の変形の式	486
16.6 図を使った積分	491
16.7 構造の角度変位	493
16.8 ねじれ変形による変位	494
16.9 相対変位	499
16.10 セン断変形	501
16.11 箱型梁（ボックスビーム）のねじり	504
16.12 解析方法の精度	506
16.13 梁の断面のワーピング	507
16.14 マックスウェルの相反定理	509
16.15 弾性軸，または，セン断中心	511
16.16 カステリアーノの定理	514
第 16 章の参考文献	517

第 17 章 不静定構造

17.1 不静定次数	518
17.2 1 次不静定のトラス	519
17.3 1 次不静定の他の構造	524
17.4 高次の不静定のトラス	528
17.5 その他の高次の不静定構造	534

17.6	不静定力の選択	540
17.7	円形の胴体リング	549
17.8	不規則な胴体リング	553
17.9	ボックスビームの不静定性	556
17.10	複数のセルのボックスビームのねじり	558
17.11	複数のセルを持つ梁のせん断	560
17.12	複数のセルのある構造の実用的な解析	566
17.13	せん断遅れ	571
17.14	ワーピング変形の長手方向の変化	573
17.15	せん断遅れの数値計算例	576
17.16	不静定構造の終極強度	578
17.17	最小仕事の方法	581
	第 17 章の参考文献	583

第 18 章 特殊な解析方法

18.1	面積モーメント法	584
18.2	共役梁の方法	586
18.3	弾性荷重法によるトラスの変位	591
18.4	ビームカラム	596
18.5	ビームカラムの荷重の重ね合わせ	601
18.6	ビームカラムの近似計算法	605
18.7	引張が働く梁	606
18.8	モーメント分布法	608
18.9	モーメント分布法の実際の手順	614
18.10	結合点の変位	619
18.11	軸力が作用する部材のモーメント分布	624
18.12	モーメント分布法の応用	628
	第 18 章の参考文献	630

付 録		632
-----	-------	-----

訳者あとがき		637
--------	-------	-----

索 引		639
-----	-------	-----

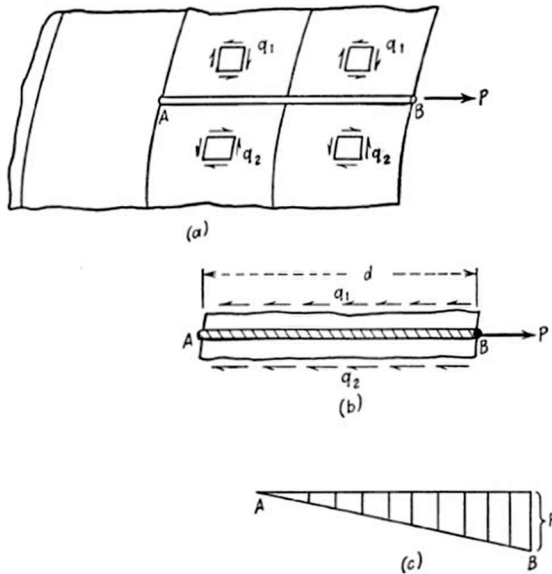


図 8.1

図 8.1(b)に示す力の釣り合いから、 $P = (q_1 + q_2)d$ である。スティフナの必要長さ d は、ウェブのせん断強度に依存する。補強材が長ければせん断流 q_1 と q_2 が減少する。補強材の端の点 A には必ず横切る方向の補強材を配置する。補強材の端がウェブの中ほどで止まっていると、補強材の端でせん断流の急な変化が発生し、望ましくない応力集中の状態となる。

本章では、薄いウェブはその境界の純粋なせん断にだけ耐えると仮定する。実際の構造では、薄いウェブはせん断力によってしわが発生することにより、計算されたせん断に加えて張力場応力 (tension field stress) が付加される。張力場応力の影響については後の章で説明する。張力場応力は本章の方法で計算する応力に単純に重ね合わせることができるので、本章で使う方法は張力場ウェブのせん断荷重の分布を計算するにも有効である。場合によってはウェブのしわによって発生する張力場応力が補強材に付加的な圧縮力を生じることがある。この荷重を別に計算して、本章で計算した荷重に代数的に足し合わせればよい。

簡単な数値例を使ってせん断ウェブに荷重を伝達する方法を説明する。図 8.2(a)に示した梁は、2つの桁で両端を支持された主翼のリブに類似しており、図に示すように 3,000 lb の荷重が負荷されている。

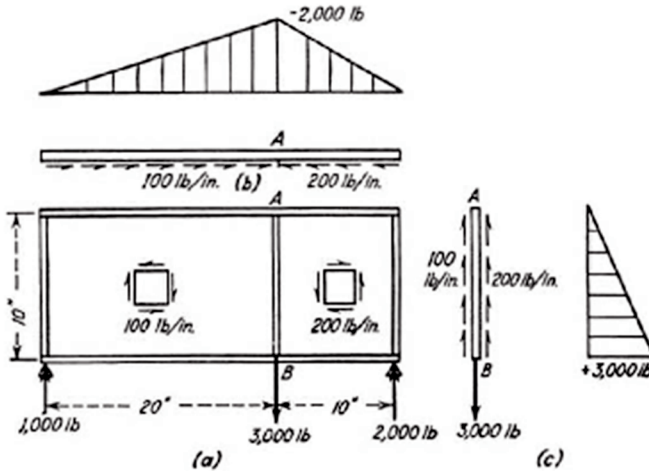


図 8.2

補強材 AB がウェブの水平方向の長さに逆比例した割合でこの荷重を2つのウェブに伝達する。垂直方向のせん断力が梁のどの断面でも外部反力と釣り合っていないからである。 AB 内の軸力を図 8.2(c)に示す。 B 点で 3,000 lb で、 A 点でゼロになるように変化している。上側フランジの軸力は梁の曲げモーメント図から求めてもよいが、図 8.2(b)に示すようにせん断流の合計から求めることもできる。点 A での圧縮力が長さ 20 in.に働く 100 lb/in.のせん断流から 2,000 lb と計算される。または、長さ 10 in.に働く 200 lb/in.のせん断流から求めてもよい。

図 8.3 に示す片持ち梁に、水平方向成分 1,500 lb と垂直方向成分 3,000 lb の荷重 R が負荷されている。水平方向の補強材 AB が荷重の水平方向成分を受け持ち、垂直方向の補強材 CBD が垂直方向成分を受け持つ。これらの補強材の交点 B は荷重 R の作用線上になければならない。せん断流 q_1 と q_2 がこれらの補強材の釣り合いから計算される。補強材 AB は図 8.3(c)に示すような力の釣り合い状態にあるので、

$$10q_1 - 10q_2 = 1,500 \quad (8.1)$$

同様に、部材 CBD の力の釣り合いは 8.3(b)のようになっており、

$$5q_1 + 10q_2 = 3,000 \quad (8.2)$$

(8.1)式と(8.2)式を連立して解くと、 $q_1 = 300$ lb/in.と $q_2 = 150$ lb/in.が得られる。こ

8.1 薄いウェブに入る集中荷重の分布

これらの値は、2つの荷重成分について別々に梁を解析して、それらの結果を足し合わせて求めることもできる。

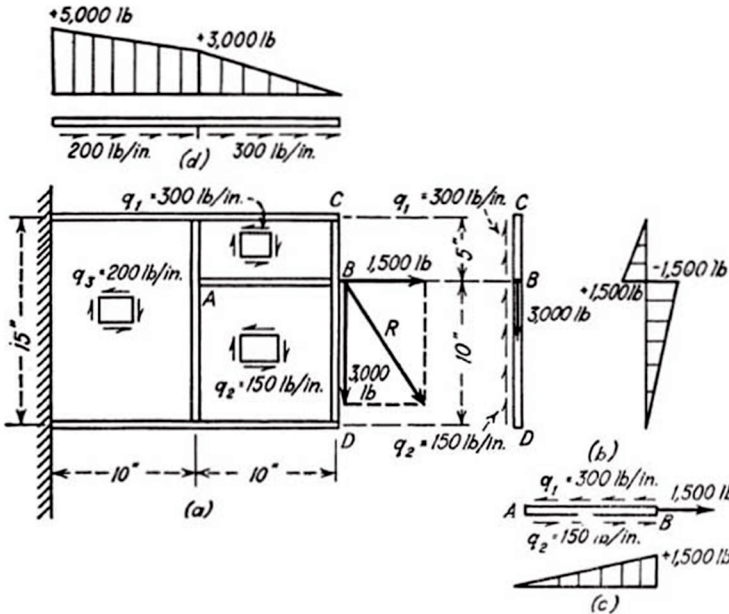


図 8.3

垂直荷重単独では 200 lb/in. のせん断流が各ウェブに発生し、水平荷重単独では上側のウェブに 100 lb/in. 、下側のウェブに -50 lb/in. のせん断流が発生する。各部材の軸力を図 8.3(b)から(d)に示すが、これらの値は曲げモーメント図からは求めることができない。

上で検討した荷重はウェブの面内に働くと仮定した。負荷荷重がすべての軸方向の成分を持つ場合には、図 8.4(a)に示すように、荷重が2つのウェブの交差する場所に作用するように構造を配置する必要がある。この図では、力 R の3つの成分を力の成分の方向に向いた補強材を使ってウェブに分布させている。場合によってはこの方法が現実的ではないことがあり、図 8.4(b)に示すようにウェブに垂直な荷重が避けられないことがある。その荷重が小さければ、補強材の曲げ強度がこの荷重に耐えることができるように設計してもよい。多くの場合には、荷重が大きいため図 8.4(c)に示すようにこの荷重に対抗するウェブ $ABCD$ のような追加部材が必要である。この部材はリブ間またはバルクヘッド

第8章 セミモノコック構造の部材の解析

間を橋渡しし、3つの反力 F_1 , F_2 , F_3 でこの面内のどのような荷重にも耐える (図 8.4(d)参照).

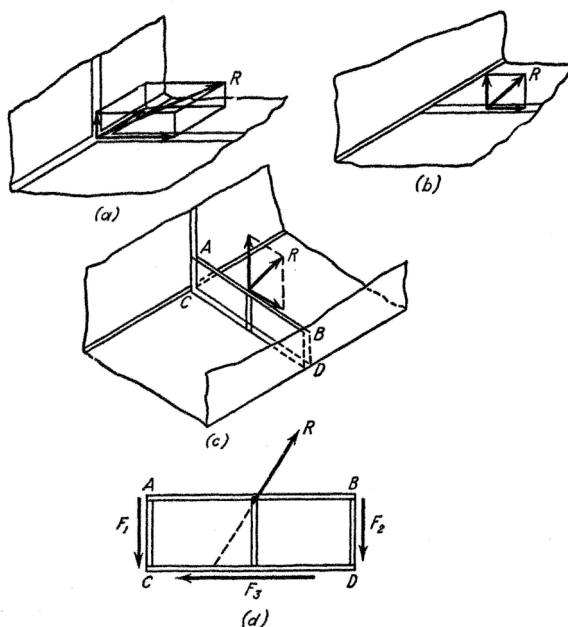


図 8.4

操縦系統のプーリーを支持するブラケットから来るような小さい荷重であつても支持されていないウェブに垂直な方向に荷重を負荷してはならない. このようなブラケットは補強材に取り付けるか、2つのウェブの交差する場所に取り付けるべきである.

8.2 胴体隔壁に働く荷重

集中荷重を航空機の胴体または翼の殻 (シェル) に伝える構造要素を隔壁 (バルクヘッド, bulkhead) と呼ぶ. 隔壁はその全周が翼または胴体の外板に連続的に取り付けられている. 隔壁は補強材またはビードが付いた一面のウェブであつたり, アクセス孔がついたウェブであつたり, トラス構造であつたりする. 胴体内装の邪魔にならないように, 胴体の隔壁は通常, 開口部のあるリングや

枠組み（フレーム）となっている．翼の翼弦方向の隔壁はふつうリブと呼ばれ、胴体の隔壁はリングまたはフレームと呼ばれる．翼と胴体の隔壁は外板に荷重を伝えることに加え、ストリングの支えと外板のせん断流を再配分する役割も持つ．隔壁の設計の最初のステップは隔壁に働く荷重、すなわち、隔壁を釣り合い状態に保つ荷重を求めることである．胴体のリングの場合、この最初のステップは、応力を求めるという次の段階の問題よりは易しい．胴体のリングとそれに類似した構造の応力解析については不静定構造を取り扱う後ろの章で説明する．

胴体の殻（シェル）はふつう垂直な中心軸に関して対称で、この中心軸に対して対称に荷重が負荷される．胴体の曲げ応力は簡単な曲げの方程式、 $f = My/I$ で求めることができ、胴体のせん断流が第 6 章で導いた式で計算される．

$$q = \frac{V_w}{I} \int y dA \quad (6.27)$$

対称の箱型構造に(6.27)式を適用するには、せん断流が中心軸の上端と下端でゼロになるので、構造の半分を考えればよい．したがって、(6.27)式の各項は胴体シェルの半分に適用すればよい．ストリングやロンジロンが中心軸の上端か下端に配置されている場合には、その断面積の半分か構造の半分に属しているとみなす．

図 8.5 に示す胴体リングの中心線に垂直荷重 P が負荷されている．この垂直荷重 P はリングの周囲に働いているせん断流 q と釣り合っている（図 8.5(c)参照）．この問題はせん断流 q の分布を求めることである．図 8.5(a)と(b)に示すように、リングのすぐ前方の断面には外部せん断力 V_a が働いており、リングのすぐ後方の断面にはせん断力 V_b が働いている．リングの荷重 P はこれらのせん断力の差であり、次の式で表される．

$$V_a - V_b = P \quad (8.3)$$

しばらくの間、ストリング荷重の面内成分で受け持たれるせん断力を無視すると、リングの近傍の 2 つの断面に働くせん断流は次のようになる．

$$q_a = \frac{V_a}{I} \int y dA \quad (8.4)$$

$$q_b = \frac{V_b}{I} \int y dA \quad (8.5)$$

リングの周囲に伝達される荷重 q は q_a と q_b の差と等しくなければならないので、

$$q = q_a - q_b \quad (8.6)$$