

航空機構造解析の基礎と実際 第1版第1刷の誤記訂正

ページ	訂正箇所	内容
8	表 1.4-2 2次元の構造要素	表中の"Plate" のつづりの誤記を修正.
49	図 2.1-1 トルクリンク	図中の "2773" → "2772 lb" に修正.
55, 56	2.1.4.2 カの釣り合い	x軸まわりとy軸まわりのモーメントの釣り合い式の間違いと, 解の間違いを訂正.
181	図 2.7-10 ストップ金具バックアップの インターコストルのフリーボディダイ アグラム	図を修正. 式の誤記を訂正.
207	2.7.8 リブのクラッシュ荷重 – Brazier 効果	"Brazier" のつづりの誤記を修正.
628 - 637	参考文献	[1-1], [1-3]: 新しい情報を追加. [1-9]: 誤記訂正. [2-84]: [2-95]と重複していたので欠番とした.

1.4.2 2次元部材

平面板の要素である。どのような荷重を受け持つかによって、さらに分類される。実際には、平面板は面内力（軸力、せん断力）、面外力（曲げモーメント、ねじりモーメント、面外せん断力）を受け持つことができるが、いろいろな要素が組み合わされた構造物となった場合、いくつかの荷重は無視できるくらい小さくなることが多いので、せん断パネルや面内板のように単純化した構造要素とみなすことができる（表 1.4-2）。

(1) せん断パネル（Shear Panel）

せん断荷重だけを受け持つ平面要素である。NASTRAN では SHEAR 要素でモデル化する。

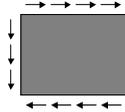
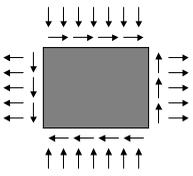
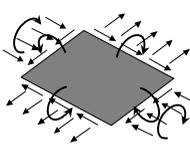
(2) 面内板（Plate without Bending Stiffness）

面内荷重だけを受け持つ平面要素である。NASTRAN では TRIA3 要素または QUAD4 要素に面外剛性を入れないでモデル化する。

(3) 曲げ板（Plate with Bending Stiffness）

面内荷重と面外荷重を受け持つ平面要素である。NASTRAN では TRIA3 要素または QUAD4 要素に面外剛性を入れてモデル化する。

表 1.4-2 2次元の構造要素

分類	構造要素	説明	図	内部荷重
2次元(平面)部材	せん断パネル (Shear Panel)	面内のせん断力だけを受け持つ。		単位幅あたりのせん断荷重=せん断流 (Shear Flow)
	面内板 (Plate without Bending Stiffness)	面内の力(軸力, せん断力)だけを受け持つ。		単位幅あたりの軸力 せん断荷重(Stress Resultant)
	曲げ板 (Plate with Bending Stiffness)	面内の力, 曲げモーメント, ねじりモーメント, 面外せん断力を受け持つ。		単位幅あたりの軸力 せん断荷重 曲げモーメント ねじりモーメント 面外せん断荷重(Stress Resultant)

2.1 剛体要素の釣り合いとフリーボディダイアグラムの例

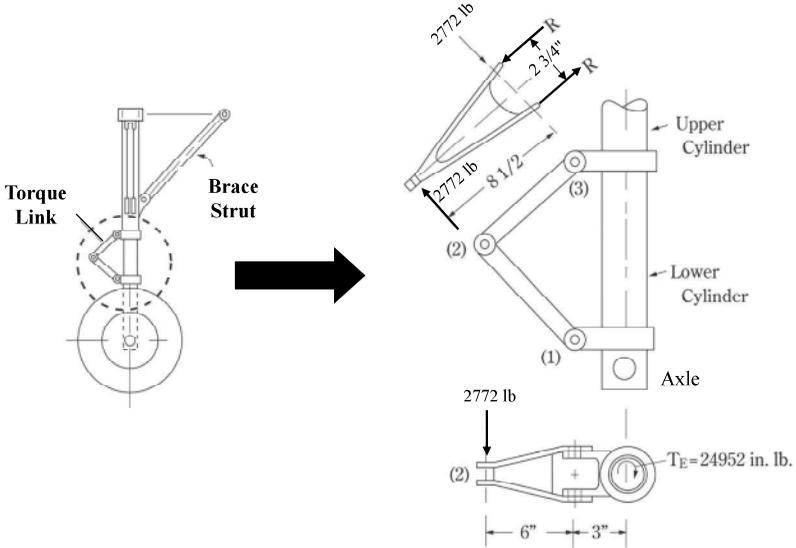


図 2.1-1 トルクリンク

2.1.2 アイドラーリンク

アイドラーリンク (Idle Link) は、特定の方向の荷重を逃がすのに使われる金具である。図 2.1-2 に示すのは舵面のヒンジ金具をつなぐのに使われるアイドラーリンクの例である。アイドラーリンクと機体側ヒンジ金具は通しボルトで結合されており、回転可能になっているため、ヒンジライン方向の荷重が機体側のヒンジ金具に入らない。

舵面側から上向き荷重 P_z と後向き荷重 P_x が負荷されるとする。まず、アイドラーリンクに働く力を考える。このとき、上向き荷重の反力は機体側ヒンジ金具の上側ラグの面でとり、後ろ向き荷重の反力とモーメントは、通しボルトとブッシュの当たり面の力でとる。図 2.1-2 に反力を記入してあるが、矢印の向きは任意に決めればよい。計算結果が負になれば反力の向きが逆であったことがわかる。一番大事なことは、釣り合い式の計算ではなく、外力と反力を正しく描くことである。フリーボディーダイアグラムを正しく描かなければ正しい答えは得られない。以下に反力の計算を示す。

2.1 剛体要素の釣り合いとフリーボディダイアグラムの例

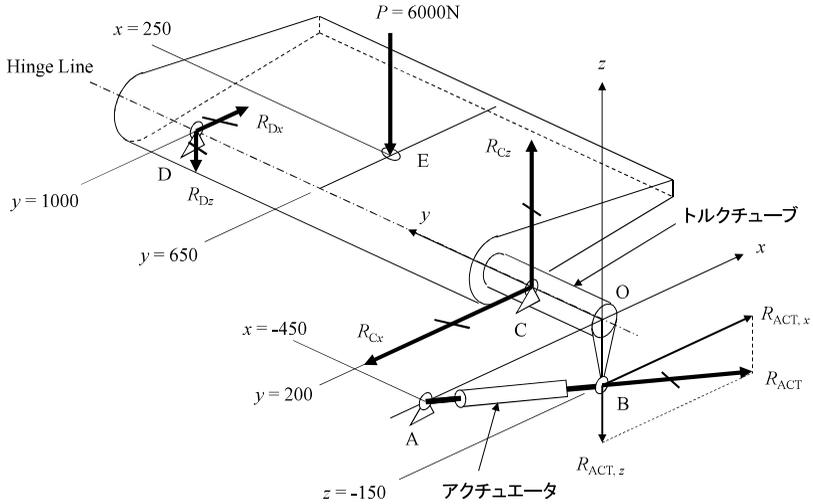


図 2.1-7 舵面構造

2.1.4.2 力の釣り合い

釣り合い式は以下ようになる。

$$x \text{ 方向: } R_{ACT,x} - R_{Cx} + R_{Dx} = 0$$

$$z \text{ 方向: } -R_{ACT,z} + R_{Cz} - R_{Dz} - 6000 = 0$$

$$x \text{ 軸まわり: } R_{Cz} \times 200 - R_{Dz} \times 1000 - 6000 \times 650 = 0$$

$$y \text{ 軸まわり: } -R_{ACT,x} \times 150 + 6000 \times 250 = 0$$

$$z \text{ 軸まわり: } R_{Cx} \times 200 - R_{Dx} \times 1000 = 0$$

$$\text{アクチュエータ荷重の方向: } R_{ACT,x} = \frac{450}{150} R_{ACT,z}$$

未知数（反力）が6個で、方程式が6個であるので、釣り合い式だけですべて

第2章 内部荷重の解析

の反力が決まる静定構造であることがわかる。
この連立方程式を解くと次の解が得られる。

$$\begin{aligned}R_{ACT,x} &= 10000\text{ N}, & R_{ACT,z} &= 3333\text{ N} \\R_{Cx} &= 12500\text{ N}, & R_{Cz} &= 6792\text{ N} \\R_{Dx} &= 2500\text{ N}, & R_{Dz} &= -2542\text{ N}\end{aligned}$$

ヒンジ点が増えると不静定構造となり、構造の剛性を考慮しないと反力を求めることができない。

2.2 トラス構造の解析

トラス (Truss) 構造は、軸力だけを受け持つ棒要素が組み合わさってできた構造である。トラス構造が安定であるためには三角形を組み合わせた形状になっていなければならない。

トラス構造では、棒要素どうしの結合は回転可能なピン結合 (Pin Joint) とみなす。実際のトラス構造で棒要素が剛に結合されていたとしても、伝達される曲げモーメントが小さい場合は、解析上はピン結合としてよい (図 2.2-1)。トラス構造では、外力は結合点にしか負荷できない。

トラス構造の内部荷重解析とは、トラスを構成する棒要素の軸力を求めることである。静定トラスであれば力の釣り合いからだけで棒要素の軸力を計算できる。しかし、部材が余分にある不静定トラスの場合には、各棒要素の剛性を考慮して変形を計算しないと各棒要素の軸力が決まらない。

見た目にはトラス構造となっていないなくても、トラス構造とみなすと荷重の伝わり方が理解しやすくなる場合があるので、トラス構造をしっかりと理解しておくことは重要である。また、内部荷重を計算する各種の方法を理解するのに役立つので、トラス構造の解析方法を以下にくわしく説明する。

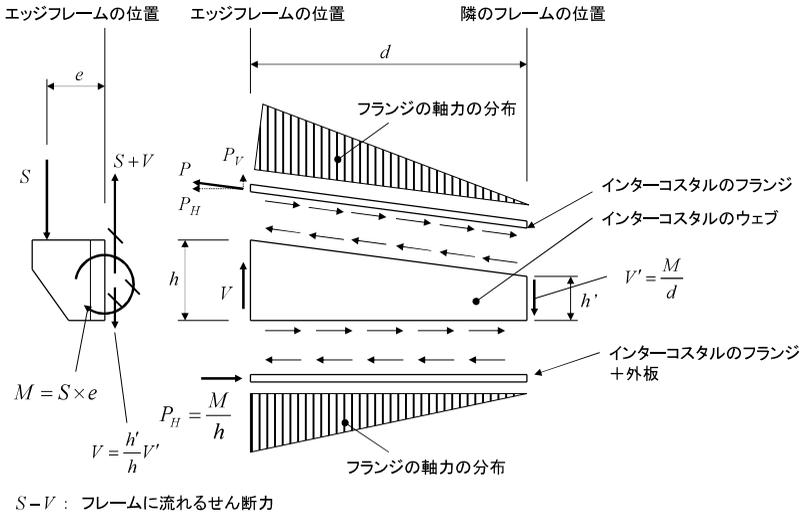


図 2.7-10 ストップ金具バックアップのインターコストルのフリーボディダイアグラム

2.7.5 内圧が負荷される円筒

旅客機は高高度を飛行するので、客室内に圧力をかけて快適性を確保している。これを与圧（Pressurization）という。与圧は胴体外板の板厚を決める重要なパラメータである。与圧に対しては、胴体の断面形状は円形が一番効率が良い。内圧が負荷される円筒（図 2.7-11）の外板の応力を説明する。円筒の半径を R 、板厚を t 、内圧を p とする。円筒断面を半分に切ってフリーボディダイアグラムを描くと図 2.7-12 の左図のようになるので、外板の周方向応力（フープ応力、Hoop Stress）は、 $f_{hoop} = pR/t$ であることがわかる。同じように、軸方向の釣り合いを考えると円筒の両端に断面積分の圧力が働くので（図 2.7-12 の右図）、軸方向応力（Axial Stress）は、 $f_{axial} = pR/2t$ となる。これらの関係式は重要であるので、覚えておいてほしい。直径が大きくなると、外板応力は増加する。

断面が円形からはずれると、外板の周方向応力は局所的な曲率半径でほぼ決まる。円形からはずれることで最も大きな影響を受けるのはフレームの曲げモーメントである。断面形状が円形になろうとして、フレームの曲げモーメント

2.7.8 リブのクラッシュ荷重 – Brazier 効果

主翼に揚力がかかると、上面外板に圧縮応力、下面外板に引張応力が発生して主翼が上方へ反る。外板が反っている状態で外板に軸応力がかかるので軸応力の向きの変化により、外板が翼の内部に引き込まれるような力（翼断面をつぶす力）が発生する（図 2.7-32）。これを Brazier 効果（Brazier Effect）と呼ぶ。翼断面がつぶれないようにするためにリブが必要であり、Brazier 効果によりリブに働く力をリブのクラッシュ荷重（Crushing Load on Rib）という。リブのクラッシュ荷重は、変形によって生じる荷重であるので、線形 FEM 解析では現れない荷重であることに注意されたい。

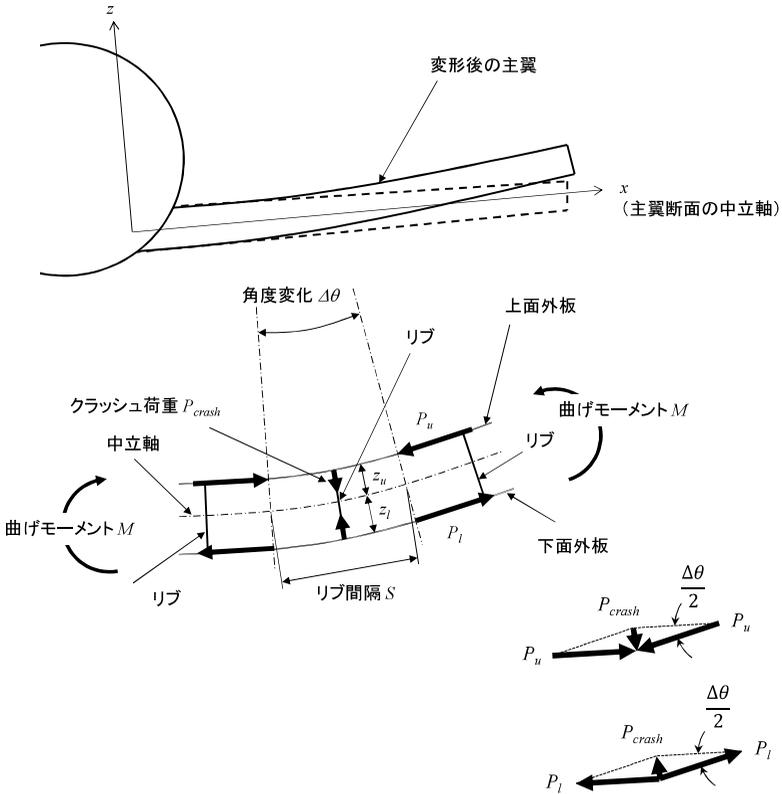


図 2.7-32 リブのクラッシュ荷重

参考文献

本書を作成するにあたって参考にした教科書と文献を以下に示す。

教科書

- 航空機構造（日本語）

[1-1] 小林繁夫, 「増補新版 航空機構造力学」, プレアデス出版, 2014.

航空機に働く荷重から, 損傷許容性まで航空機構造力学の全般をわかりやすく解説した最もよい入門書であり, 最初に読むべき教科書である. 理論的な解説が充実している. 増補新版で有限要素法と耐熱構造についての記述が追加された.

[1-2] 新沢順悦, 藤原源吉, 川島孝幸, 「航空機の構造力学」, 産業図書 (株), 1989.

[1-1]とよく似た教科書である. Peery の教科書に載っている例題をそのまま使っている. 例題が多いのがよい.

- 航空機構造（英語）

[1-3] D. J. Peery and J. J. Azar "Aircraft Structures", McGraw-Hill, New York, 1982.

航空機構造解析の入門書の名著であった Peery の教科書の改訂版で, 有限要素法についての説明が追加された. 入門書として最適である. 旧版が Dover Publications から再刊された.

[1-4] E. F. Bruhn, "Analysis and Design of Flight Vehicle Structures," S. R. Jacobs & Associates, Inc., 1973.

航空機構造解析の解説書とマニュアルを兼ねた本である. 理論的な解説とともに, 実際の構造解析で出くわすような例題が多く記載されており, 理解に役立つ. 強度解析の実務に役立つチャートが多く掲載されている. 航空機構造解析者の必携の書である. 有限要素法が生まれた頃の本であるので, マトリックス構造解析の章は内容が古くなり, 役に立たない.

[1-5] M. C. Niu, "Aircraft Structural Design," Conmilt Press Ltd., 1989.

Bruhn の本をやさしくしたような教科書である. 実機構造の図がたくさん記載されているので, 実機例を知るのに便利である. 設計の指針の詳細説明がある. 例題は載っているが, 理論的な解説はほとんどない. 日本語訳が出ている.

- [1-6] M. C. Niu, “Airframe Stress Analysis and Sizing,” Conmlt Press Ltd.
[1-5]と同じ著者による航空機構造の強度計算の教科書である。内容が重なっているところが多い。日本語訳が出ている。
- [1-7] Jean-Claude Flabel, “Practical Stress Analysis for Deign Engineers,” Lake City Publishing Co., 1997.
単純化のしかたとフリーボディダイアグラムの描き方を詳しく説明している。書名のとおりに設計者向けの教科書である。解析担当者向けとしてはもの足りない。
- [1-8] T. H. G. Megson, “Aircraft Structures for Engineering Students, Fourth Edition,” Elsevier Aerospace Engineering.
題名どおり、航空機構造解析の大学生向けの教科書である。理論的な面が充実している。ただし、学生用の教科書であるため、実務者向きではない。
- [1-9] W. F. McCombs, “A Supplement to Analysis & Design of Fliihgt Vehicle Structures For Increased Scope and Usefulness,” Datatech.
Bruhnの本[1-4]の補足である。
- [1-10] J. Schijve, “Fatigue, Static Tensile Strength and Stress Corrosion of Aircraft Materials and Structures,” Report LR-630, 1990, Delft University of Technology.
航空機構造の疲労に関するわかりやすい教科書である。ぜひ読んでほしい。

文献

本書を書くために参考にした本と文献を挙げる。NACA, NASA のレポートはインターネットから無料で入手できる。

- [2-1] 林毅編, 「軽構造の理論とその応用 (上下)」, 日本科学技術連盟, 1966.
理論的な解説が行き届いていて、薄板の構造力学を勉強するには最適である。変分原理 (エネルギー法) の解説が簡潔でわかりやすい。残念なことに本書は絶版になっている。40年前の本であるが、今でも内容は古くなっていない。
- [2-2] C. L. デイム, I. H. シャームス, (砂川恵監訳), 「材料力学と変分法」, ブレイン図書出版 (株), 1977.
変分原理 (エネルギー法) の教科書である。理論的な面を強調している。例題が多く、理論的な教科書にしてはわかりやすい。変分原理の教科書としては最高だろう。

参考文献

- [2-3] K. Washizu, “Variational Methods in Elasticity and Plasticity,” Pergamon Press, 1968.
構造力学の変分原理に関する名著である。
- [2-4] 滝敏美, 「表計算ソフトの最適化機能を用いた構造問題へのエネルギー法の直接解法の適用」, 第 50 回構造強度に関する講演会講演集, 2008 年.
本書の例題で使ったエネルギー法による直接解法を紹介した論文。
- [2-5] “Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS),” Department of Transportation Report DOT/FAA/AR-MMPDS-01, January 2003.
航空機用金属材料の強度データ集. インターネット <http://www.everyspec.com/> から検索してダウンロードできる. 最新版は有料であるが, この初版は無料である。
- [2-6] “Composite Materials Handbook, Volume 1. Polymer Matrix Composites, Guidelines for Characterization of Structural Materials,” MIL-HDBK-17-1F, June 17, 2002.
“Composite Materials Handbook, Volume 3. Polymer Matrix Composites, Material Usage, Design and Analysis,” MIL-HDBK-17-3F, 23 January, 2003.
航空機用複合材料の詳細解説. 複合材の力学, 材料試験法, 構造要素試験法, 構造設計のノウハウまでを解説している. インターネット <http://www.everyspec.com/> から検索してダウンロードできる。
- [2-7] S. J. Garvey, “The Quadrilateral ‘Shear’ Panel, The Peculiar Stressing Problems Arising in the Structure of the Non-Rectangular Swept Wing,” Aircraft Engineering, May 1951, p.134-135, 144.
- [2-8] G. E. Maddux, L. A. Vorst, F. J. Giessler and T. Moritz, “Stress Analysis Manual,” AFFDL-TR-69-42 (AD0759199).
米空軍が発行した航空機構造の強度計算マニュアルである. インターネット <http://www.dtic.mil/dtic/> から検索してダウンロードできる。
- [2-9] M. Farley, “Establishing New Methodologies With MSC SOFTWARE Products to Develop a 747SP Finite Element Model for FAA Certification of Airframe Design Modification.”
- [2-10] R. J. Burt, “Structural Certification of the F-16 Block 52+ Aircraft,” 2005 USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference, 29 November 2005.
- [2-11] W. C. Young, “Roark’s Formulas for Stress and Strain,” Sixth Edition, McGraw-Hill Book Company.

構造力学の公式集である。

- [2-12] 倉西正嗣, 「弾性学」, (株) 国際理工研究社, 1949 年.
- [2-13] Engineering Sciences Data Unit, “Elastic Direct Stresses and Deflections for Flat Rectangular Plates under Uniformly Distributed Normal Pressure,” ESDU 71013, May 1971.
- [2-14] S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, “Theory of Plates and Shells,” Second Edition, MacGraw-Hill, Inc.
- [2-15] M. B. Tate and S. J. Rosenfeld, “Preliminary Investigation of the Loads Carried by Individual Bolts in Bolted Joints,” NACA TN 1051, 1946.
- [2-16] H. Huth, “Influence of Fastener Flexibility on the Prediction of Load Transfer and Fatigue Life for Multiple-Row Joints,” Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints, ASTM STP 927, 1986, pp.221-250.
- [2-17] Ian Taig, “Rules for Modelling Structures”
インターネットの Engineering Tips Forum (<http://www.eng-tips.com/>) の Aircraft Engineering Forum で紹介されていた資料. イギリスの British Aerospace 社のチーフエンジニアが書いた航空機構造の FEM モデル化の解説.
- [2-18] “NASTRAN-xMG User’s Reference Manual V 2.5.0,” The MacNeal Group LLC.
- [2-19] P. Hoogenboom and J. Blaauwendraad, “Quadrilateral Shear Panel,” Engineering Structures 22, 2000, p.1690-1698.
- [2-20] R. Hariri, “Post-buckling Behaviour of Tee-Shaped Aluminum Columns,” PhD Thesis, 1967, University of Michigan, USA.
- [2-21] J. Mennink, “Cross-sectional Stability of Aluminum Extrusions, Prediction of the Actual Local Buckling Behaviour,” Ph.D. Thesis, 2002, Technical University of Eindhoven, The Netherlands.
- [2-22] J. E. Duberg, “A Numerical Procedure for the Stress Analysis of Stiffened Shells,” Journal of the Aeronautical Sciences, Volume 16, Number 8, August 1949, pp.451-462.
- [2-23] R. T. Barrett, “Fastener Design Manual,” NASA RP-1228, 1990.
- [2-24] 航空機部品・素材産業振興に関する調査研究成果報告書 No.1102「新 6000 系合金の航空機用鍛造／押出材の開発」, 1997 年 3 月, 社団法人航空宇宙工業会.

参考文献

- [2-25] “Stress Course for Liaison Engineers,” USAF Reserve Officers ABDR Training Program.
インターネットで見つけた強度計算の入門書。米空軍の講習会のテキストである。例題が多い。
- [2-26] G. Gerard, “Handbook of Structural Stability, Part IV – Failure of Plates and Composite Elements,” NACA TN-3784, 1957.
- [2-27] “Aeronautical Structures Manual, Volume I,” NASA TM X-73305, 1975.
NASA が発行した強度計算マニュアルである。
- [2-28] “Aeronautical Structures Manual, Volume II,” NASA TM X-73306, 1975.
- [2-29] G. Gerard, “The Crippling Strength of Compression Elements,” Journal of Aeronautical Sciences, January 1958, pp.37-52.
- [2-30] H. B. Crockett, “Predicting Stiffener and Stiffened Panel Crippling Stresses,” Journal of Aeronautical Sciences, November 1942, pp.501-509.
- [2-31] R. Needham, “The Ultimate Strength of Aluminum-Alloy Formed Structural Shapes in Compression,” Journal of Aeronautical Sciences, April 1954, pp.217-229.
- [2-32] E. H. Schuette, “Observations on the Maximum Average Stress of Flat Plates Buckled in Edge Compression,” NACA TN-1625, 1949.
- [2-33] E.E. Lundquist, " The Compressive Strength of Duralumin Columns of Equal Angle Section," NACA TN-413, 1932.
- [2-34] W. Ramberg and W. R. Osgood, “Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters,” NACA TN-902, 1943.
- [2-35] Y. Kim and T. Pekoz, “Behavior and Design of Aluminum Members in Bending,” Report 03-04, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, August 2003.
- [2-36] F. P. Cozzone, “Bending Strength in the Plastic Range,” Journal of Aeronautical Sciences, May 1943, pp.137-151.
- [2-37] S. P. Timoshenko and J. Gere, “Theory of Elastic Stability,” Second Ed., 1961, Dover Publication Inc.
- [2-38] K. Chan, H. Guzman, K-W. Liu, and T-J Tzong, “Implementation and Certification of Integral Structures on the C-17 Aircraft,” 29 Nov., 2005.
- [2-39] G. Gerard and H. Becker, “Handbook of Structural Stability, Part III – Buckling of Curved Plates and Shells,” NACA TN-3783, 1957.

- [2-40] M. A. Melcon and A. F. Enshrud, "Analysis of Stiffened Curved Panels Under Shear and Compression," *Journal of Aeronautical Sciences*, February 1953, pp.111-119.
- [2-41] "Joint Service Specification Guide, Aircraft Structures, General Specification For," JSSG-2006, 30 October, 1998.
- [2-42] S. B. Batdorf, M. Schildcrout and M. Stein, "Critical Stress of Thin-Walled Cylinders in Axial Compression," NACA TN-1343, 1947.
- [2-43] M. Stein and R. W. Fralich, "Critical Shear Stress of Infinity Long, Simply Supported Plate with Transverse Stiffeners," NACA TN-1851, 1949.
- [2-44] A. F. Grisham, "A Method for Including Post-Buckling of Plate Elements in the Internal Loads Analysis of Any Complex Structure Idealized Using Finite Element Analysis Methods," AIAA Paper No.78-515.
- [2-45] P. Kuhn, J. P. Peterson and L. R. Levin, "Summary of Diagonal-Tension, Part I.," NACA TN-2661, 1952.
- [2-46] P. Kuhn, J. P. Peterson and L. R. Levin, "Summary of Diagonal-Tension, Part II.," NACA TN-2662, 1952.
- [2-47] A. G. Tsongas and R. T. Ratay, "Investigation of Diagonal-Tension Beams with Very Thin Stiffened Webs," NASA CR-101854, 1969.
- [2-48] R. M. Mello, R. E. Sherrer and M. D. Musgrove, "Intermediate Diagonal Tension Field Shear Beam Development for the SST," *Journal of Aircraft*, Volume 9, No.7, July, 1972, pp.470-476.
- [2-49] H. Becker, "Handbook of Structural Stability, Part II – Buckling of Composite Elements," NACA TN-3782, July 1957.
- [2-50] G. L. Gallaher and R. B. Boughan, "A Method of Calculating the Compressive Strength of Z-Stiffened Panels that Develop Local Instability," NACA TN-1482, November 1947.
- [2-51] R. B. Boughan and G. W. Baab, "Charts for Calculation of the Critical Compressive Stress for Local Instability of Idealized Web and T-Stiffened Panels," NACA WR L-204, 1944.
- [2-52] G. Gerard and H. Becker, "Handbook of Structural Stability, Part I – Buckling of Plates," NACA TN-3781, July 1957.
- [2-53] S. Yusuff, "Buckling Phenomena of Stiffened Panels," *Journal of the Aero/space Sciences*, August 1958, pp.507-514.

参考文献

- [2-54] W. J. Stroud, W. H. Greene and M. S. Anderson, “Buckling Loads of Stiffened Panels Subjected to Combined Longitudinal Compression and Shear: Results Obtained With PASCO, EAL, and STAGS Computer Programs,” NASA TP-2215, January 1984.
- [2-55] G. Gerard, “Handbook of Structural Stability, Part V – Compressive Strength of Flat Stiffened Panels,” NACA TN-3785, August 1957.
- [2-56] G. Gerard, “Effective Width of Elastically Supported Flat Plates,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, October 1946, pp.518-524.
- [2-57] J. C. Ekvall, “Static Strength Analysis of Pin-Loaded Lugs,” *Journal of Aircraft*, Vol. 23, No. 5, May 1986, pp.438-443.
- [2-58] “Aerospace Fasteners, Numerical Listing of Parts, 1995 Edition,” SPS Technologies.
- [2-59] “In-Flight Separation of Vertical Stabilizer American Airlines Flight 587, Airbus Industrie A300-605R, N14053, Belle Harbor, New York, November 12, 2001” National Transportation Safety Board Aircraft Incident Report NTSB/AAR-04/04, 2004.
- [2-60] “Damage Tolerance Assessment Handbook, Volume II: Airframe Damage Tolerance Evaluation,” DOT/FAA/CT-93/69.II, DOT-VNTSC-FAA-93-13.II, October 1993.
- [2-61] Xiaojiang Gao, “Strength Determination of Heavy Clip-Angle Connection Components,” Master’s Thesis, University of Cincinnati, 2002.
- [2-62] G. Gerard, “Secant Modulus Method for Determining Plate Instability Above the Proportional Limit,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, January 1946, pp.38-48.
- [2-63] Engineering Sciences Data Unit, “Strength of Angles and Club-foot Fittings (Transmitting Tensile Loads),” ESDU 84039, May 2006.
- [2-64] K. Kathiresan, T. M. Hsu and T. R. Brussat, “Advanced Life Analysis Methods – Crack Growth Analysis Methods for Attachment Lugs,” AFWAL-TR-84-3080, Volume II, 1984.
- [2-65] P. Kuhn, “Stresses in Aircraft and Shell Structures,” McGraw-Hill Book Co., 1956.
- [2-66] T. Swift, “Damage Tolerance in Pressurized Fuselages,” 11th Plantema Memorial Lecture, New Materials and Fatigue Resistant Aircraft Design, The

- Proceedings of the 14th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, 1987.
- [2-67] R. J. H. Wanhill, "Milestone Case Histories in Aircraft Structural Integrity," NLR-TP-2002-521.
- [2-68] P. Christiansen, G. R. Bateman and A. Navarrete, "C-130 Center Wing MSD/MED Risk Analysis," 2006 USAF Aircraft Structural Integrity Program Conference, 28 November 2006.
- [2-69] H. J. Grover, S. M. Bishop and L. R. Jackson, "Fatigue Strengths of Aircraft Materials, Axial-Load Fatigue Tests on Notched Sheet Specimens of 24S-T3 and 75S-T6 Aluminum Alloys and of SAE 4130 Steel with Stress-Concentration Factors of 2.0 and 4.0," NACA TN-2389.
- [2-70] "Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis," ASTM E 1049-85.
- [2-71] M. A. Melcon and F. M. Hoblit, "Developments in the Analysis of Lugs and Shear Pins," *Product Engineering*, 24, May 1953, pp.160-170.
- [2-72] W. D. Pilkey and D. F. Pilkey, "Peterson's Stress Concentration Factors (3rd Edition)," John Wiley & Sons, 2008.
- [2-73] 西田正孝, 「応力集中 増補版」, 森北出版, 2001年.
- [2-74] "Commercial Airplane Certification Process Study, An Evaluation of Selected Aircraft Certification, Operations, and Maintenance Processes," FAA, 2002.
- [2-75] D. F. Bryan, "The B-52G-H Wing Cyclic Test Program," AFDL-TR-70-144, Proceedings of the Air Force Conference on Fatigue and Fracture of Aircraft Structures and Materials, 1969.
- [2-76] H. Ansell and T. Johansson, "Widespread Fatigue Damage in Combat Aircraft," AGARD-CP-568, pp.17-1-17-11, 1995.
- [2-77] U. G. Goranson, "Fatigue Issues in Aircraft Maintenance and Repairs," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No.6, pp.413-431, 1997.
- [2-78] M. M. Spencer, "The Boeing 747 Fatigue Integrity Program," *Advanced Approaches to Fatigue Evaluation*, Sixth ICAF Symposium, NASA SP-309, pp.127-178, 1971.
- [2-79] J. P. Waszczak and T. A. Cruse, "A Synthesis Procedure for Mechanically Fastened Joints in Advanced Composite Materials," AFML-TR-73-145, Volume II, 1973.
- [2-80] K. N. Shivakumar and J. C. Newman, Jr., "Stress Concentrations for

参考文献

- Straight-Shank and Countersunk Holes in Plates Subjected to Tension, Bending and Pin Loading,” NASA TP-3192, 1992.
- [2-81] S. Buchanan, “Development of a Wingbox Rib for a Passenger Jet Aircraft using Design Optimization and Constrained to Traditional Design and Manufacture Requirements,” Altair Engineering CAE Technology Conference 2007, pp.7-1 – 7-8.
- [2-82] J. Fidransky and J. Fiala, “Widespread Fatigue Damage and Single Member Failure Prediction of Military Jet Trainers of Czech Design and Production,” AGARD-CP-568, pp.4-1 - 4-11, Widespread Fatigue Damage in Military Aircraft, 1995.
- [2-83] J. H. Argyris, “Flexure-Torsion Failure of Panels,” Aircraft Engineering, June 1954, pp.174 - 219.
- [2-84] 欠番
- [2-85] L. J. Hart-Smith, “Easily Assembled Structurally Efficient Joints in Metallic Aircraft Structures,” Proceedings of the 18th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, 1995, Melbourne, Australia, pp.331 – 352.
- [2-86] R. Christ, D. Ferg, K. Kilroy, M. Toossi and R. Weisenburger, “Plan, Formulate and Discuss a NASTRAN Finite Element Model of the AH-64A Helicopter Airframe,” NASA CR-18446, 1990.
- [2-87] J. Woo, “Static Aeroelastic Response of an Aircraft With Asymmetric Wing Planforms Representative of Combat Damage,” ARL-TR-153, 1993.
- [2-88] K. Wieland, “A400M Der Künftige Transporter für die Europäischen Luftwaffen,” Airbus Deutschland GmbH, November 29 2001.
- [2-89] D. A. duPlantier, “Analysis of Fuselage Rings by the Column Analogy,” Journal of the Aeronautical Sciences, April, 1944, pp.137-152.
- [2-90] G. Zender and C. Libove, “Stress and Distortion Measurements in a 45° Swept Box Beam Subjected to Bending and to Torsion,” NACA TN-1525, 1948.
- [2-91] “Preparation of Stress Analysis Reports,” No.8594001, NASA Johnson Space Center, Aircraft Operations Division, 2009.
- [2-92] “Fastener Test Methods, Method 4, Lap Joint Shear,” NASM1312-4 Standard Practice, National Aerospace Standards, 1997.
- [2-93] 小林繁夫, 近藤恭平, 「工学基礎講座 7, 弾性力学」, 培風館, 1987年.
- [2-94] D. M. Lue, J.-L. Liu and C.-H. Lin, “Numerical Evaluation on Warping

- Constants of General Cold-Formed Steel Open Sections,” *Steel Structures*, 7 (2007), pp.297-309.
- [2-95] J. H. Argyris, “The Open Tube – A Study of Thin-Walled Structures such as Interspar Wing Cut-out and Open-section Stringers,” *Aircraft Engineering*, April 1954, pp.102-112.
- [2-96] P. Kuhn, J. E. Duberg and G. E. Griffith, “The Effect of Concentrated Loads on Flexible Rings in Circular Shells,” NACA ARR No. L5H23, 1945.
- [2-97] G. Morris, “Defining a Standard Formula and Test-Method for Fastener Flexibility in Lap-Joints,” Ph.D. Thesis, 2004, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [2-98] I. T. Cook and K. C. Rockey, “Shear Buckling of Rectangular Plates with Mixed Boundary Conditions,” *The Aeronautical Quarterly*, November 1963, pp.349-356.