

航空機構造の FEM モデル作成のルール

Rules for Modeling Structures

Ian Taig 著

滝 敏美 訳

2010 年 10 月 13 日	初回公開
2012 年 6 月 16 日	改訂 1

最新版のダウンロードは, http://www.geocities.jp/toshimi_taki/index.htm から

目次

1	はじめに.....	1
2	モデル形状の選択	1
2.1	形状データの出所	1
2.2	モデル形状への適用	2
3	構造のモデル化のルール.....	2
3.1	全般.....	2
3.1.1	モデルと実構造が直接対応する場合	4
3.1.2	CSHEAR 要素の使い方の注意	6
3.1.3	4辺形パネル要素の荷重の説明	7
3.2	胴体フレーム.....	12
3.2.1	一般胴体フレーム	12
3.2.2	厚いリングフレーム	14
3.2.3	機械加工フレーム	15
3.2.4	圧力隔壁	16
3.2.5	床	17
3.3	翼 – リブ, 桁, 外板	18
3.4	胴体外板.....	19
3.4.1	粗い分割によるモデル化.....	19
3.4.2	細かい分割によるモデル化.....	21
3.5	後縁.....	22
3.6	複合材パネルのモデル化	23
3.6.1	1つの異方性パネルによるモデル化.....	23
3.6.2	複数の CQUAD4 要素でモデル化.....	25
3.6.3	NASTRAN の PCOMP カードの使用.....	26
3.6.4	2次元要素を使用して厚さ方向を考慮したモデル化.....	27
3.7	ハニカムコアのモデル化	28
3.8	サンドイッチ構造のモデル化.....	29
3.9	結合	30
3.10	ヒンジ.....	32
3.11	メカニズム	33
3.12	穴と補強材	34
3.13	対称性の利用	37
3.14	ソリッド要素によるモデル化	40
3.15	歪ゲージ要素	40
4	剛な荷重経路.....	41
4.1	モデルの不安定の除去	41
4.2	局所的な変位の付与.....	43
4.3	非常に剛な構造.....	45
4.4	メッシュサイズの変更と異なる種類の要素の結合	46
4.5	平均的な動きの取得	47
4.6	負荷荷重の分配	48

4.7	節点における自由度の向きの変更	49
4.8	独立自由度と従属自由度について	51
4.9	RBE1 要素の従属自由度と独立自由度の入れ替え	51
5	拘束と支持	52
5.1	静定な支持	52
5.2	境界の拘束	53
5.3	変形した形状の付与	54
5.4	断面を平面に保つ	55
5.5	MPC を使った拘束関係式	55
6	誤差を小さくするには	57
6.1	片持ち梁のテスト	57
6.2	長方形板のテスト	57
6.3	誤差を小さくするモデル化の方法	57
7	荷重の負荷	61
7.1	荷重カードの説明	61
7.2	荷重ケースの定義	63
7.3	荷重のチェック	63
7.4	対称荷重成分と反対称荷重成分	63
7.5	単位荷重ケース	64
7.6	点荷重	67
7.7	分布荷重	67
7.8	圧力	68
7.9	燃料圧力	70
7.10	慣性力	71
7.11	釣合いケース	72
7.12	全機荷重釣合い表	72
8	参考文献	74
	訳者あとがき	75

図のリスト

図 2.2-1 翼構造の節点	2
図 2.2-2 胴体外板の節点	2
図 2.2-3 傾いた胴体フレームの節点	3
図 2.2-4 リング・フレームの節点	3
図 2.2-5 ロンジロンや桁フランジの節点	1
図 2.2-6 オフセットした結合点	1
図 3.1-1 外板とロンジロン	4
図 3.1-2 NASTRAN のアウトプット	5
図 3.1-3 棒要素の軸力分布	5
図 3.1-4 せん断パネル要素 (CSHEAR)	6
図 3.1-5 フレームのモデル化に F1, F2 を使った例	6
図 3.1-6 GPFB 出力	7
図 3.1-7 辺 3-4 の荷重	7
図 3.1-8 辺 6-3 の荷重	7
図 3.1-9 辺 5-6 の荷重	8
図 3.1-10 辺 4-5 の荷重	8
図 3.1-11 辺のせん断流のまとめ	9
図 3.1-12 パネルの軸力の計算	9
図 3.1-13 長方形パネル要素	9
図 3.1-14 一般4辺形要素	10
図 3.1-15 「PARAM NOELOF」を使った場合の出力 – 「ELEMENT INTERNAL FORCES AND MOMENTS」.....	11
図 3.2-1 胴体フレームのモデル化 – せん断パネル要素と棒要素	12
図 3.2-2 胴体フレームのモデル化 – 梁要素	13
図 3.2-3 厚いリングフレーム	14
図 3.2-4 機械加工フレーム	15
図 3.2-5 圧力隔壁のモデル	16
図 3.2-6 床	17
図 3.3-1 翼	18
図 3.4-1 胴体外板 – 粗い分割によるモデル化	20
図 3.4-2 胴体外板 – 細かい分割によるモデル化	21
図 3.5-1 後縁材	22
図 3.6-1 複合材パネルの材料基準方向の定義	23
図 3.6-2 複数の CQUAD4 要素によるモデル化	25
図 3.6-3 PCOMP カードの使用	26
図 3.6-4 2次元要素による厚さ方向のモデル化	27
図 3.7-1 サンドイッチ構造の前縁のモデル化	28
図 3.7-2 ハニカムコアの剛性	28
図 3.8-1 サンドイッチパネル	29
図 3.9-1 分解可能な結合部のモデル化	30
図 3.9-2 結合部の間接的なモデル化	31
図 3.10-1 ヒンジのモデル化	32
図 3.11-1 メカニズム	33

図 3.12-1 補強材付きのパネル	36
図 3.13-1 胴体の対称性	37
図 3.13-2 穴あき試験片	38
図 3.13-3 接着試験片	39
図 4.1-1 支持されていない外板パネル	42
図 4.1-2 CHEAR 要素の不安定	42
図 4.1-3 面内回転	42
図 4.2-1 ヒンジブラケット	44
図 4.3-1 エンジンの結合	45
図 4.4-1 メッシュサイズの変更	46
図 4.4-2 異なる種類の要素の結合	46
図 4.5-1 任意位置の点の変位	47
図 4.5-2 結合点	47
図 4.5-3 フレームの動きの平均	48
図 4.6-1 RBE1 要素を使った荷重の分配	48
図 4.6-2 RBE3 要素を使った荷重の分配	49
図 4.7-1 RBAR 要素によるグローバル自由度の変更	50
図 4.9-1 RBE1 要素の従属自由度と独立自由度の入れ替え	51
図 5.1-1 静定的な支持	52
図 5.2-1 胴体の結合部の拘束	53
図 5.2-2 主翼の根元の拘束	53
図 5.2-3 試験片の拘束	53
図 5.3-1 境界への強制変位の付与	54
図 5.3-2 配管のモデル	54
図 5.4-1 断面を平面に保つ	55
図 5.5-1 同じ変位を複数の節点に与える	56
図 5.5-2 構造間の荷重伝達	56
図 6.3-1 片持ち梁のテスト	58
図 6.3-2 長方形板のテスト	59
図 6.3-3 誤差を小さくする方法	60
図 7.1-1 PLOAD カードの荷重の向きの定義	62
図 7.4-1 荷重の対称成分と反対称成分	64
図 7.5-1 剛体運動によるチェック	66
図 7.7-1 分布荷重の負荷	67
図 7.8-1 圧力データ	68
図 7.8-2 圧力を負荷する面の形状	69
図 7.8-3 圧力の方向	69
図 7.9-1 燃料圧力データ	70

表のリスト

表 3.12-1	穴と補強材の考慮の判定基準	34
表 3.12-2	せん断ウェブの等価剛性	35
表 3.13-1	対称面と拘束条件	38
表 7.12-1	全機荷重釣合い表	73

1 はじめに

適切な節点配置, 要素の組合せ, 寸法, 拘束, 材料, 荷重・荷重で実構造をモデル化するのは, 実構造の荷重, 応力, 変形を計算することを目的としている。このモデル化はすべての荷重経路と実物に即した荷重の分布を模擬していなくてはならない。

解析の規模と適用範囲を設定する段階では, どのようにモデル化するかという方針を決めなければならない。例えば, フレームで囲まれた外板パネルの粗いメッシュで胴体をモデル化すると決めたならば, 外板にせん断パネル要素と棒要素を使うことになる。

モデル化の実行においては落とし穴が無数にあるので, すべての要求を考慮していなければならない。分割が多すぎるのは, 将来に見込みのない恐竜のようなものであり, 逆にあまりに簡単すぎるモデル化は重要な荷重経路を見落とすことになってしまう。PATRAN のようなプリプロセッサの使用で複雑な構造を簡単にモデル化できるようになったが, これにより必ずしもより正確なモデルができるようになったわけではない。

剛性マトリックスの作成, 荷重の負荷, 拘束条件の適用, 変位の計算, 荷重と応力を計算するための後退代入は, 正確な数学的なプロセスである。しかし, これは必ずしもモデルが適切であるということを意味するわけではない。正確さと適切さを混同してはならない。適切さはユーザーの手中にある。

全般的な正確さは, 入手した情報の出所と質にかかっている。予備的な概略図面, 不確実な荷重, 暫定的な材料に基づいて詳細な解析を行うのは無意味である。「入手したデータがどれくらい確実なものか」という質問はめったに出ないが, データによって解析結果に驚くほどの差が出てくるだろう。

モデル化のプロセスにおいて, 定義された形状と計算された要素の寸法を必要とし, それらが断面積が剛性を模擬していなければならないが, その両方を満足するということはほとんどない。したがって, 多くの場合, 解析モデルは妥協案になっているので, 解析結果の解釈を実構造に即して行うことになる。

ストレス・エンジニアは解析結果を盲目的に使用してはならない。モデル化, 荷重・荷重, 拘束の間違ひは点検の段階でつぶさなければならないが, 間違ひはなかなか絶滅できない。予想できない結果が出ることを覚悟しなければならない。

明確な方法論とすべての要求を理解してからモデル化を始める必要がある。

2 モデル形状の選択

モデル形状を決める段階は2つある。ひとつはデータの出所を決めることで, もうひとつはデータをモデルの形状に適用することである。これらの段階のそれぞれにいくつかの選択肢がある。

2.1 形状データの出所

形状データの正確さだけではなく, データ入手にどれだけ時間がかかるかということも重要である。例えば, 主翼の解析では, 主翼の断面形状データがないとその入手まで長い時間がかかる。構造線図ができていない段階では, 解析結果は近似でしかなく, 詳細な解析は無意味である。

a) 詳細図面

図面ですべての形状データが与えられている場合, NASTARN, PATRAN に直接データを入力できる。

b) スケール図面

図を手で計測するか, デジタイザで数値化する。

c) 構造線図

主要部材(リブ, 桁等)の交点を与えられる。

d) サーフェス・データ

CATIA データで入手できる。

e) ソリッド・データ

CATIA データで入手できる。

2.2 モデル形状への適用

形状データをそのままモデル形状とすることもあるが、適切なモデル化となるようにユーザーが形状データを修正することもある。

a) 翼構造等

比較的薄い構造であるので、外板の面内力と剛性を正しくするため、外板の板厚の中心をモデル形状とする(図 2.2-1)。

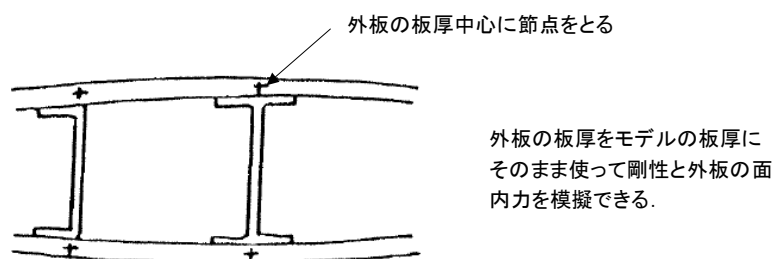


図 2.2-1 翼構造の節点

b) 胴体シェル

モデル形状として、アウターモールドライン(OML)をとるか、インナーモールドライン(IML)をとるか、外板板厚中心をとるかを決める必要がある(図 2.2-2)。どの方法をとるかでフレームのフランジ断面積を決めるルールが決まる。どの方法をとっても寸法の誤差は小さい。

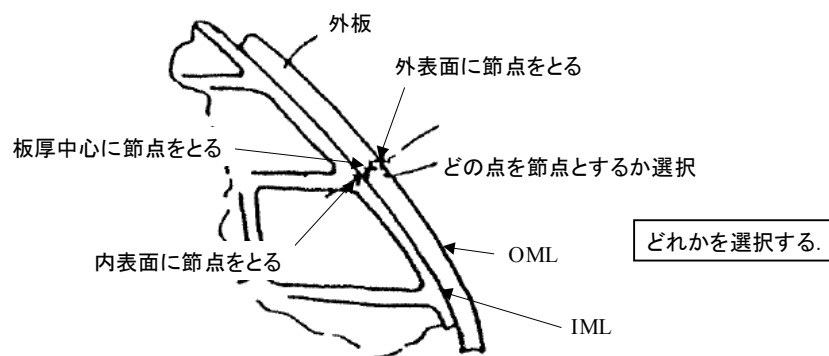


図 2.2-2 胴体外板の節点

c) 胴体フレーム

傾いたフレームは、節点座標を局所座標系で定義すべきである(図 2.2-3)。局所座標系を使うことにより、小さなキンクによって面内剛性が失われるという問題を防止することができる。

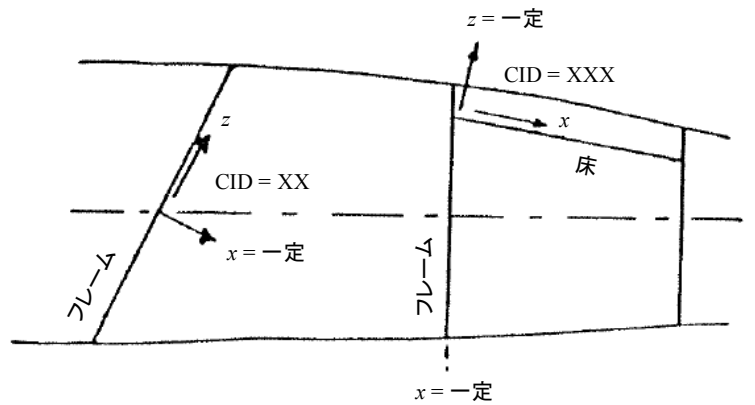


図 2.2-3 傾いた胴体フレームの節点

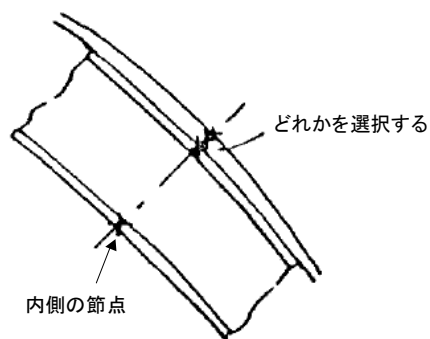
d) 胴体の床, せん断ウェブ

形状が一平面にあることを確認すること. 必要に応じて節点座標を局所座標系で定義すること.

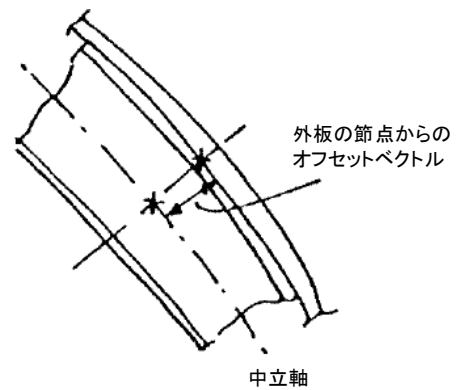
e) リング・フレーム

せん断ウェブと棒(ROD)でモデル化する場合, 節点は外板の節点と内側の点を使う(図 2.2-4 の左の図).

梁要素(BAR)でモデル化する場合, 節点は外板の節点を使い, 中立軸をオフセット・ベクトルで定義する(図 2.2-4 の右の図).



せん断パネル／棒のモデル化



梁のモデル化

図 2.2-4 リング・フレームの節点

f) ロンジロン, 桁

適切な(まっすぐな)線上にあることを確認すること. 形状がまちがっていてキンクしていると剛性が減少し, キンク位置で不自然なキンク荷重が発生する(図 2.2-5).

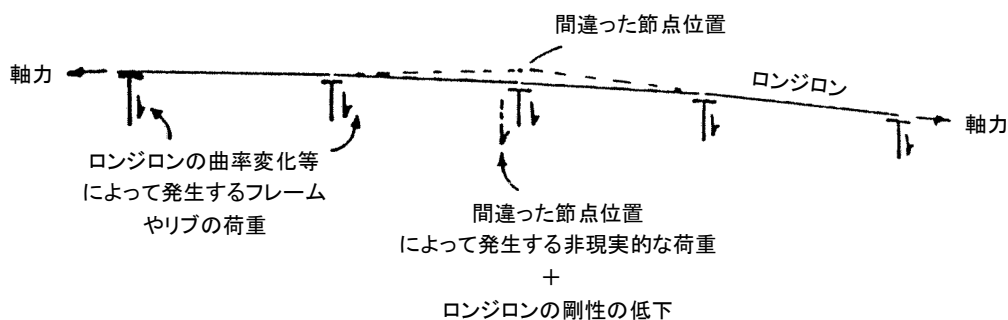


図 2.2-5 ロンジロンや桁フランジの節点

g) オフセットした結合点

主荷重経路からオフセットした結合点のモデル化に注意すること. オフセットが適切にモデル化され, 近傍の構造がキンク荷重を受け持つことができるようにモデル化されている必要がある. もしそうでなければ, モデル上は結合点をモデルの交点(外板/フレーム/ロンジロン)に設定するのがよい(図 2.2-6). 後の強度計算のなかでオフセットの影響を考慮する.

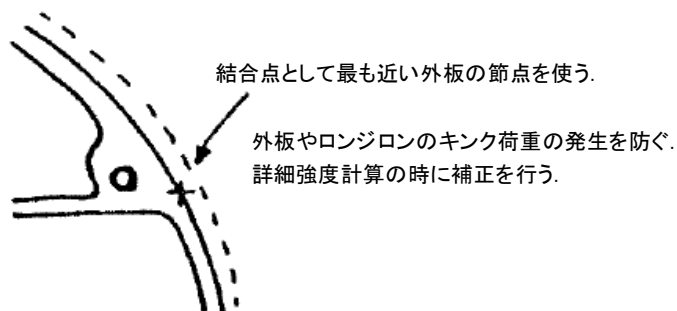


図 2.2-6 オフセットした結合点

h) ヒンジライン

「ロッキング・アップ」を防ぐため, ヒンジ点は一直線上にあること. 全体座標系に近い局所座標系を定義すること. ヒンジのモデル化の項(3.10 項)を参照のこと.

3 構造のモデル化のルール

3.1 全般

前述したように、実構造をモデル化した NASTRAN モデルを作成する際には、まず解析の目的と適用範囲を明確にする必要がある。

明らかにすべきことは以下のとおり。

- 節点の数
- すべての主要荷重経路
- 他の構造とのインターフェース・ポイント
- 荷重の要求、拘束の要求、必要に応じて追加の節点を定義する。

NASTRAN は「変位法」に基づいている。節点の変位を解く。モデル化のプロセスの目的は、モデルに適切な剛性を持たせることである。これは、通常はモデルに適切な板厚、断面積を与えることで実現できるが、モデルの形状の選び方によっては修正が必要になる。

ひとつの要素で異なる断面積または材料の複数の部材をモデル化している場合には、要素の材料剛性に応じた断面積を使う必要がある。実構造の荷重を出すときには同じ関係を使う。

NASTRAN の要素力と応力は負荷した荷重と釣り合っている。しかし、モデル形状が実部材の図心と等しく、要素の寸法(板厚、断面積)が実部材と等しいときだけに NASTRAN の応力は実部材の応力と等しい。

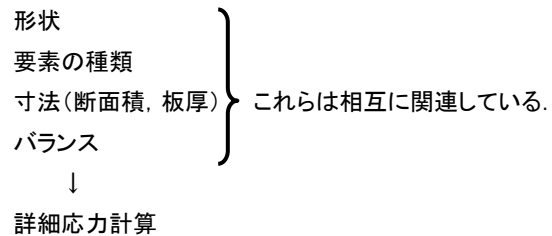
したがって、多くの場合には、後の強度計算には要素力を使う。モデル形状と寸法の補正をしたあとで、要素に働く力と実構造に働く力が釣り合っていることを確認する必要がある。

以下のページでモデル化の方法と実構造への補正方法について説明する。

航空機構造のいろいろな部位とそのモデル化の方法を 3.2 項以下で個々に説明する。FEM モデルの要素の寸法はモデル形状と要素種類の選択と関係しており、要素寸法の決め方はそれぞれの項目で具体的に説明する。FEM 解析結果の解釈はモデル化の方法と密接に関連しており、これについてもそれぞれの項目で説明する。

結果の解釈

モデル化において、モデルと実構造の等価性を実現するために種々の方法が使用される。実構造に対する正しい結果を得るには、このプロセスを逆に行う必要がある。すなわち、解析結果の実構造への補正方法はモデル化の方法に依存している。



NASTRAN は「変位法」による解析方法である。

- = 節点における変位について解く。
- = 要素力と応力は負荷荷重と釣り合う。

しかし、NASTRAN で得られた応力は、次の限られた条件のもとでのみ実構造でも正しい値となる。

- a) 部材の図心の位置が正しい。

および、

- b) 要素の寸法が正しい。

ユーザーは、形状と寸法の補正をしたあとで、要素力と実構造の力が釣り合っていることを確認しなければならない。

3.1.1 モデルと実構造が直接対応する場合

モデルと実構造で部材の図心の位置が一致しており、かつ、要素の寸法も一致している場合のモデル化の方法と解析結果の解釈を以下に示す。

a) 断面積の関係

図 3.1-1 に示すように棒要素(CROD)とせん断パネル要素(CSHEAR)でモデル化する場合、モデルの棒要素の断面積は「ロンジロンの断面積+外板の有効幅」とする。材料が異なる場合には、断面積を足す前にヤング率の補正をする。

材料が同じ場合、

$$A_{CROD} = A_{longeron} + \sum t_{skin} w_e$$

ここで、 A_{CROD} : モデルの棒要素(CROD)の断面積

$A_{longeron}$: 実構造のロンジロンの断面積

t_{skin} : 実構造の外板の板厚

w_e : 実構造の外板の有効幅

材料が異なる場合、

$$A_{CROD} = \frac{E_{longeron}}{E_{CROD}} A_{longeron} + \sum \frac{E_{skin}}{E_{CROD}} t_{skin} w_e$$

ここで、 E_{CROD} : モデルの棒要素(CROD)のヤング率

$E_{longeron}$: 実構造のロンジロンのヤング率

E_{skin} : 実構造の外板のヤング率

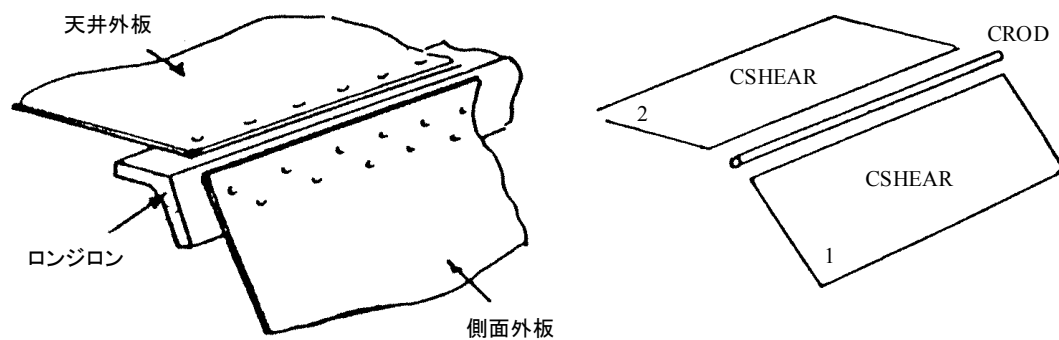


図 3.1-1 外板とロンジロン

b) NASTRAN のアウトプット

図 3.1-2 の左の図で、棒要素(CROD)の端の荷重を E とし、せん断パネル要素(CSHEAR)のせん断流を q_1, q_2 としたとき、節点荷重(GPFORCE)は右の図のようになる。

棒要素の内部の軸力 P の分布は図 3.1-3 のようになっている。棒要素の中央で E となり、線形分布をしている。棒要素の軸力は、ロンジロンと外板に次のように分配される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{ロンジロンの軸力: } \frac{PA_{longeron}}{A_{total}} \\ \text{外板の軸力: } \frac{PA_{skin}}{A_{total}} \end{array} \right\} \text{各部材の応力は等しい } \sigma = \frac{P}{A_{total}}$$

ここで, $A_{longeron}$, A_{skin} , A_{total} は PROD の断面積を評価した断面積

異なる材料が使われている場合は応力は次の式で表される.

$$\sigma = \frac{PA_{skin}}{A_{total}} \cdot \frac{E_{skin}}{E_{CROD}}$$

ここで, E_{skin} : 外板のヤング率

E_{CROD} : CROD の断面積

外板のせん断荷重は辺の FORCE 出力から得られ, 軸力は有効幅を使って上の式で計算される. 応力は軸力とせん断流と実板厚 t_{actual} とモデルの板厚 t_x の比から次の式で計算される.

$$\sigma = \frac{q}{t_x} \cdot \frac{t_x}{t_{actual}}$$

リベットまたはボルトに働くせん断荷重 P_s は次の式で表される.

$$P_s = \frac{ql}{N} = \frac{q}{pitch}$$

ここで, N : ファスナの数

q : 辺のせん断流

l : 辺の長さ

$pitch$: ファスナ・ピッチ



図 3.1-2 NASTRAN のアウトプット

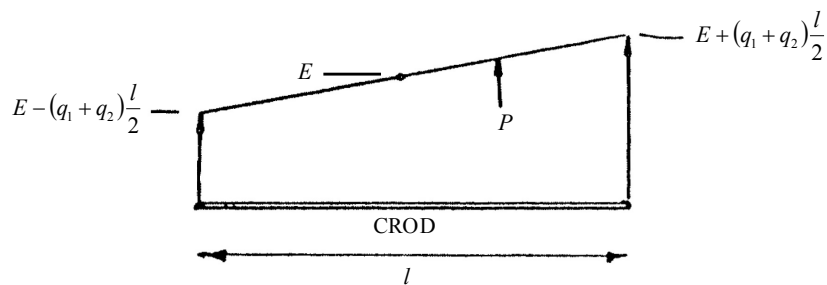


図 3.1-3 棒要素の軸力分布

3.1.2 CSHEAR 要素の使い方の注意

CSHEAR 要素は、通常はせん断力だけを受け持つので、等価な断面積に入る端面の軸荷重を受け持つ CROD 要素を周囲に配置する必要がある。この伸びの剛性がないとパネルは不安定となり、「Fatal Error」となるか、過大な変位が出力される。

せん断要素に軸剛性を持たせるための手段として、PSHEAR データに F1, F2 の係数を入れる方法がある(図 3.1-4)。F1 または F2 を 1.0 とすると、 $0.5w_1t$ または $0.5w_2t$ の断面積の CROD 要素を入れたことと等価となる。すなわち、この場合、端面の軸荷重に対してパネルが 100%有効である。

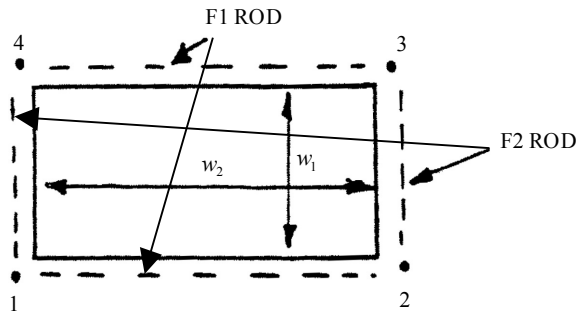


図 3.1-4 せん断パネル要素(CSHEAR)

パネルが軸荷重に対して 100%有効でない場合は、次の2つの方法が使える。

a) $F < 1.01$

軸剛性の有効断面積を $0.5F1 \times w_1t$ または $0.5F2 \times w_1t$ とする。有効断面積はパネルの幅の関数である。

b) $F > 1.01$

軸剛性の有効断面積を $0.5F1 \times t^2$ または $0.5F2 \times t^2$ とする。有効断面積はパネルの板厚の関数である。

(訳者注:有効幅を $F1 \times t$ または $F2 \times t$ としていることになる。)

この係数は、フレームのモデルの不安定を除去するために、高さ方向の軸剛性を持たせることに使用できる(図 3.1-5)。

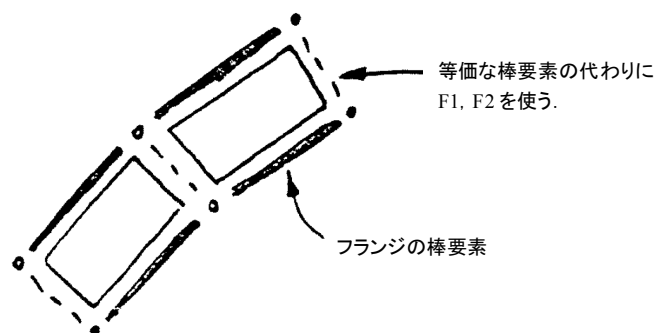


図 3.1-5 フレームのモデル化に F1, F2 を使った例

フランジ断面積を計算する際に、ウェブ板厚の寄与分 ($A_w/6$) を含めるには $F = 1/3$ とおけばよい。(注意: F1 または F2 を 1.0 とすると曲げ剛性が大きくなりすぎる。)

F 係数を適用した場合にせん断パネルの軸力を計算するには、コーナーの力 F-FROM-4, F-FROM-5 を調べる。F 係

数がない場合には、コーナーの力が等しく、辺のせん断力の値となる。F 係数があると、コーナーの力が異なり、せん断力の寄与分を差し引くことにより、軸力を計算できる。長方形のパネルが全体座標の方向に平行して置かれている場合、コーナーの力が GPFORCE Balance (GPFB) の値と等しい。次の項を参照のこと。

3.1.3 4辺形パネル要素の荷重の説明

長方形の要素の場合には、GPFORCE Balance (GPFB) の出力を使えば、せん断荷重成分と軸力成分を容易に計算できる。このせん断荷重成分と軸力成分は要素 (CSHEAR, CQUAD4) の FORCE 出力と等しい。

一般の4辺形パネル要素の場合には、GPFB 出力を変換して辺に沿う荷重を計算し、隣り合う辺の成分を差し引くことによってせん断荷重成分と軸力成分を得ることができる。計算例を以下に示す。

a) 計算例

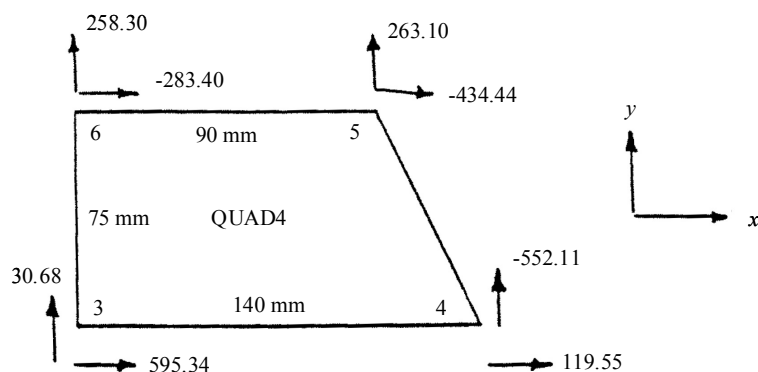


図 3.1-6 GPFB 出力

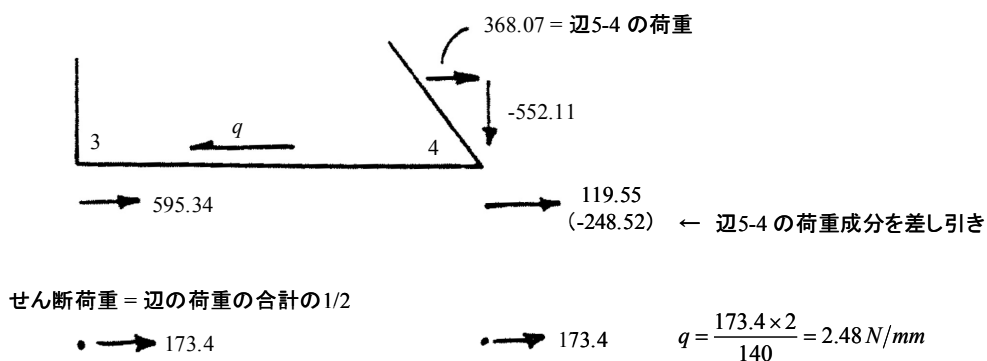


図 3.1-7 辺 3-4 の荷重

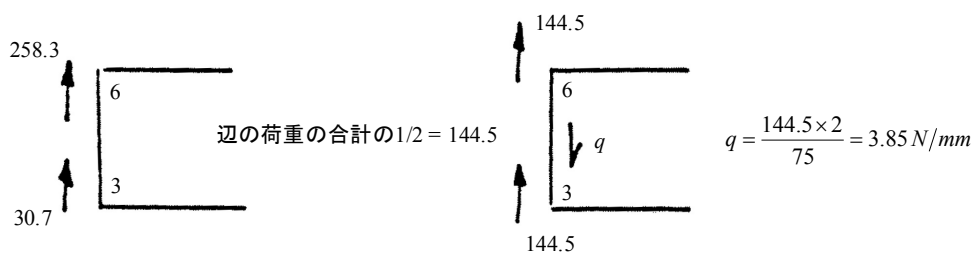


図 3.1-8 辺 6-3 の荷重

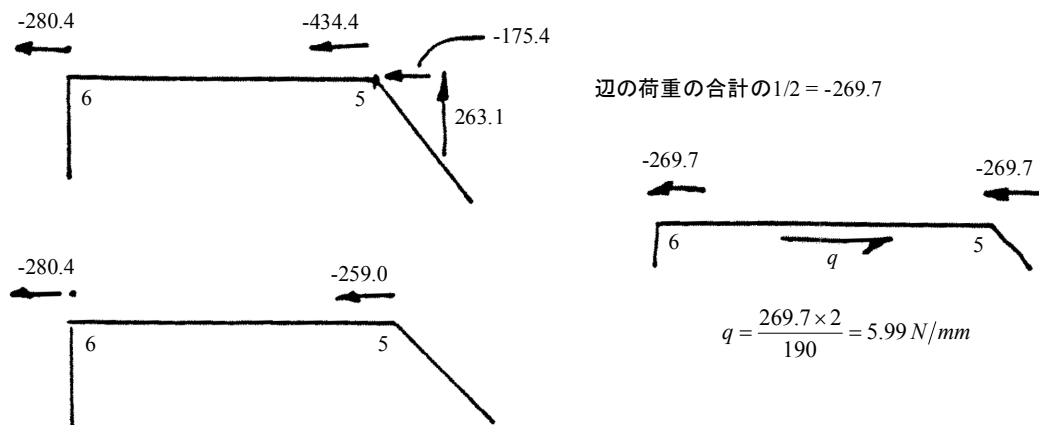
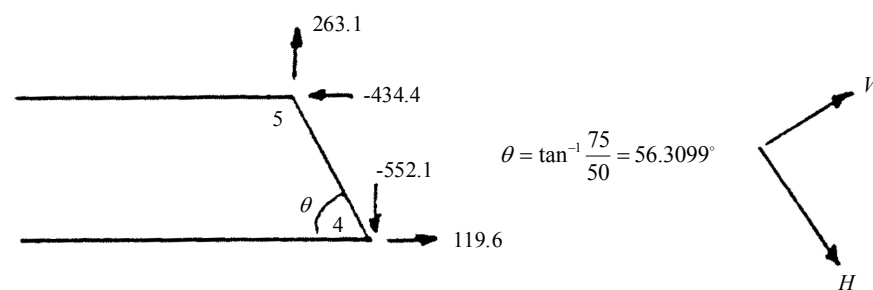


図 3.1-9 辺 5-6 の荷重



GPFB荷重を H - V 軸方向に変換すると

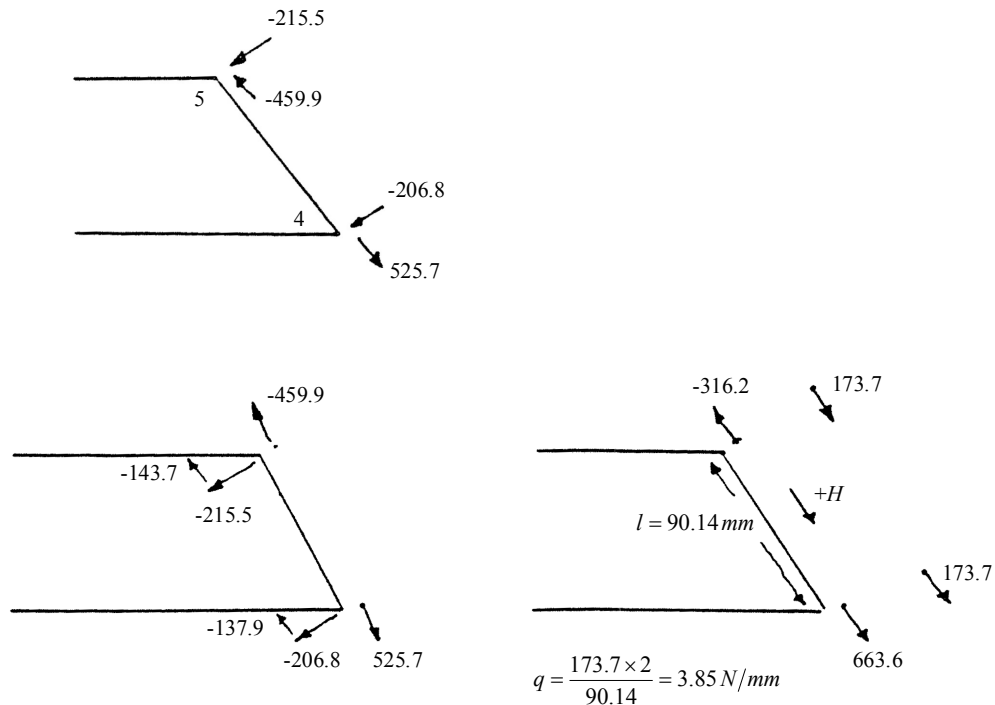


図 3.1-10 辺 4-5 の荷重

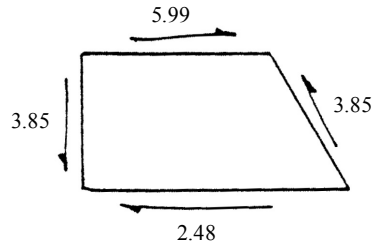


図 3.1-11 辺のせん断流のまとめ

パネルの軸力は以下のようにして計算する。
 各節点の辺に沿う力の差の 1/2 が軸力である。この軸力はパネルの幅の半分に働くと考える。最大軸応力と最小軸応力は辺の中点における値となる。

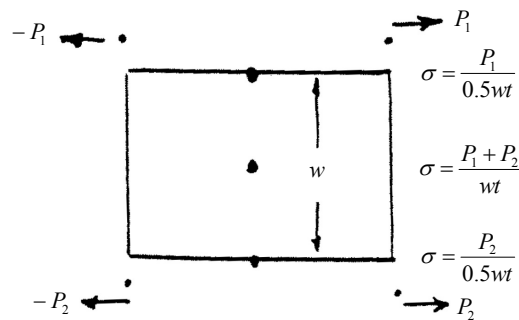


図 3.1-12 パネルの軸力の計算

b) GPFORCE Balance (GPFB) から軸力成分とせん断成分を計算する方法

1) 長方形パネル要素

長方形パネル要素が全体座標系と平行でない場合には、力を辺の方向に変換する。

パネルのせん断流 q は、

$$q = \frac{F_1 + F_2}{l} \quad \text{ここで, } l: \text{辺 1-2 の長さ}$$

パネルの軸応力 σ は、

$$\sigma = \frac{F_1 - F_2}{0.5wt} \quad \text{ここで, } w: \text{は辺 1-2 に垂直な幅, } t: \text{板厚}$$

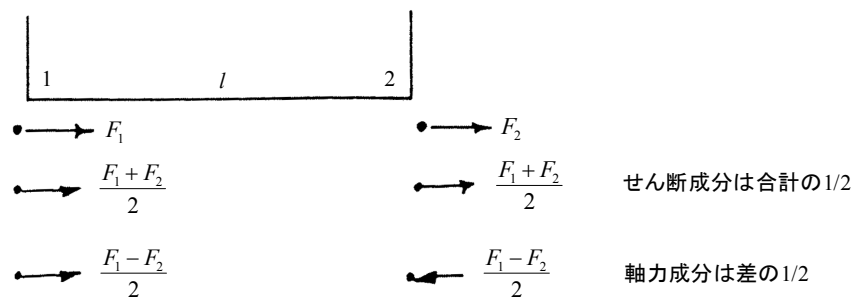


図 3.1-13 長方形パネル要素

2) 一般4辺形パネル要素

- ① 各節点で荷重を辺の向きに変換する.
- ② 隣接する辺の荷重成分を差し引く.
- ③ $\bar{X}_1$ と $\bar{X}_2$ を使って1)の計算をする.

注:パラメータ・カードで「PARAM NOELOF 1」を使うと, $\bar{X}_1$ と $\bar{X}_2$ を直接出力することができるが, 符号が反対である.

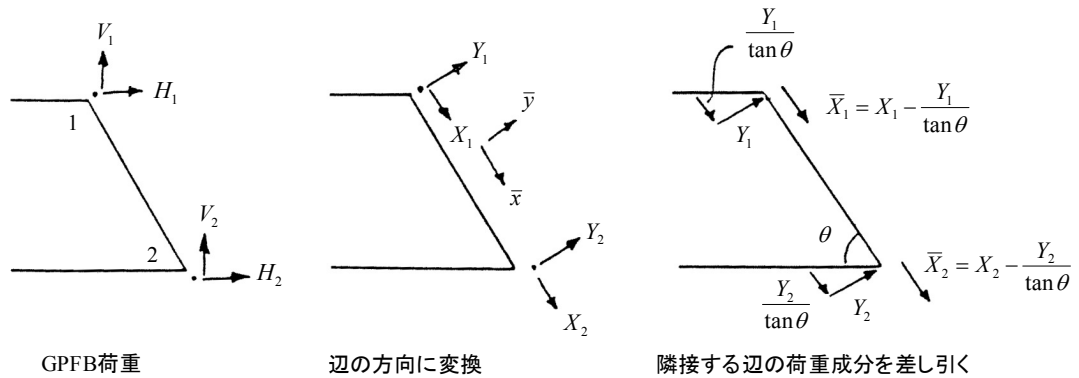


図 3.1-14 一般4辺形要素

「PARAM NOELOF 1」を使った場合について以下に説明する.

GPFB 出力はパネル要素の節点に働く力の全体座標系方向の成分を表示する. パネルの辺の方向が全体座標系と平行な場合にのみ GPFB 出力をそのまま辺のせん断力と軸力の計算に使える. パネルの辺の方向が全体座標系から傾いている場合には, 前述したような面倒な計算をしないとせん断力と軸力を求めることができない.

NASTARN の中に辺のせん断力と軸力を直接出力する機能がある. これを使えば, せん断力と軸力を合計の 1/2 と差の 1/2 で簡単に計算できる.

「BULK DATA」の「PARAM」カードに

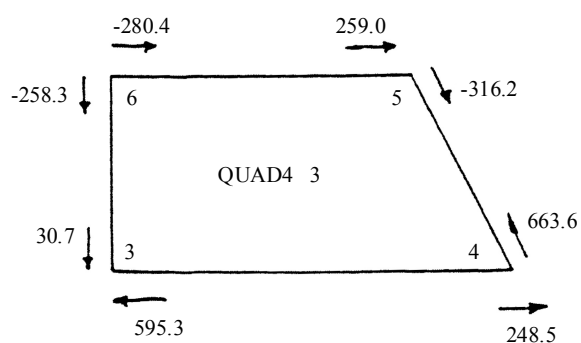
PARAM NOELOF 1

を入れることにより「ELEMENT INTERNAL FORCES AND MOMENTS」出力が得られる.

パネルとその他の要素の辺の方向の力が GPFB 出力と同様に出力される. 力の向きは, 参照点から荷重点の向きを正とする. 力のベクトルの向きとしては GPFB 荷重と逆向きである. EIF (Element Internal Force) が要素の内部荷重であって GPFB 荷重と釣り合っているためである.

「ELEMENT INTERNAL FORCES AND MOMENTS」出力の例を図 3.1-15 に示す.

ELEMENT INTERNAL FORCES AND MOMENTS (INTERNAL ACTIONS FROM REFERENCE-POINTS TO LOAD-POINT)								
LOAD POINT-ID	ELEMENT -ID	ELEMENT TYPE	REFERENCE POINT-1	FORCE-1	MOMENT-1	REFERENCE POINT-2	FORCE-2	MOMENT
3	2	QUAD4	2	2.093722E+02	0.0	6	-1.004949E+02	0.0
3	3	QUAD4	6	3.067943E+01	0.0	4	5.953369E+02	0.0
3	8	ROD	2	8.041026E+02	0.0	0	0.0	0.0
3	9	ROD	4	4.181440E+02	0.0	0	0.0	0.0
3	12	ROD	6	6.981548E+01	0.0	0	0.0	0.0
4	3	QUAD4	3	2.485225E+02	0.0	5	-6.635554E+02	0.0
4	9	ROD	3	4.181440E+02	0.0	0	0.0	0.0
4	10	ROD	5	-5.382942E+02	0.0	0	0.0	0.0
5	3	QUAD4	4	-3.162063E+02	0.0	6	2.590393E+02	0.0
5	6	QUAD4	6	-1.136974E+02	0.0	12	-3.863735E+02	0.0
5	10	ROD	4	-5.382942E+02	0.0	0	0.0	0.0
5	11	ROD	6	-1.453421E+02	0.0	0	0.0	0.0
5	23	ROD	12	-4.661270E+02	0.0	0	0.0	0.0
6	2	QUAD4	3	2.988660E+02	0.0	7	4.045027E+02	0.0
6	3	QUAD4	5	-2.804495E+02	0.0	3	-2.583323E+02	0.0
6	5	QUAD4	7	-5.285955E+02	0.0	11	-3.344448E+02	0.0
6	6	QUAD4	11	3.771284E+02	0.0	5	2.654961E+02	0.0
6	11	ROD	5	-1.453421E+02	0.0	0	0.0	0.0
6	12	ROD	3	6.981548E+01	0.0	0	0.0	0.0
6	13	ROD	7	-3.620258E+01	0.0	0	0.0	0.0
6	21	ROD	11	6.766563E+01	0.0	0	0.0	0.0



パネル 3 の辺の荷重は上の出力から得られる。
これらの値は図 3.1-7～図 3.1-10 で計算した
値と同じである。

図 3.1-15 「PARAM NOELOF」を使った場合の出力 – 「ELEMENT INTERNAL FORCES AND MOMENTS」

3.2 胴体フレーム

胴体フレームには、リング状のフレーム、機械加工の部分的または完全なフレーム、圧力隔壁といったいろいろな形態がある。

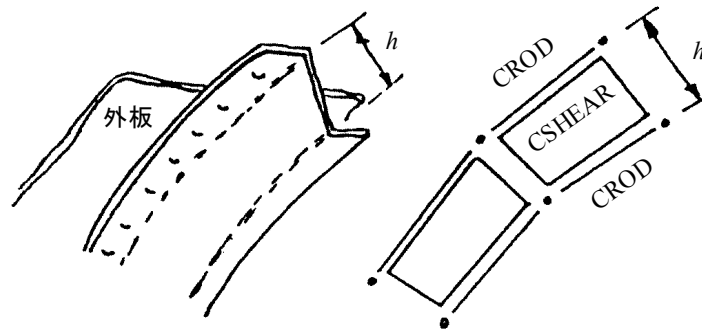
3.2.1 一般胴体フレーム

薄いリング状のフレームでは2種類のモデル化が可能である。

a) せん断ウェブと棒によるモデル化

フレームは、CSHEAR 要素とCROD 要素を使って、せん断ウェブと棒によるモデル化ができる(図 3.2-1)。寸法としては、ウェブの有効断面積とフランジの断面積の合計を使う。形状としてはフランジの平均距離を使い、CROD の断面積を決めるにはフランジの有効係数を考慮する。

応力の計算: 棒の末端荷重から計算した曲げモーメントとせん断荷重をフレームの応力計算に使うこと。胴体外板の有効断面積が別の CROD でモデル化されている場合は、フレームの荷重は簡単に分離できる。外側の CROD が外板の有効断面積を含んでいる場合は、フレームのフランジの荷重分担を考慮してフレームの曲げモーメントを算出する必要がある。



外形形状は平均高さ h を使う。

CROD の断面積には(外形形状の)補正は不要。

$$A_{CROD} = Flange Area \times Efficiency + \frac{Web Area}{6}$$

効率(Efficiency)は ESDU のデータシートによる(3.4 項参照)。

応力の計算方法: 平均高さ h と CROD の要素力を使って曲げモーメントの分布を計算する。CSHEAR の要素力をせん断力として使う。

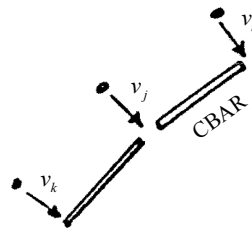
外板の有効断面積は別の CROD としてモデル化する。そうでない場合は、外側のフランジ要素の荷重が外板の荷重を受け持っているとしてフレームの荷重を計算する。

図 3.2-1 胴体フレームのモデル化 - せん断パネル要素と棒要素

b) 梁要素によるモデル化

外側の節点とフレーム断面の中立軸へのオフセット・ベクトルでCBAR要素を定義する(図 3.2-2)。フレームの曲げモーメントとせん断力が直接出力される。梁要素は同一平面内にある(たとえば, $x = \text{一定}$)ことを確認すること。もし、そうになっていなければ, A, I1, I2, J 等のすべての要素特性データを入力すること。せん断剛性のデフォルト値はゼロ(剛性無限大)であることに注意すること。

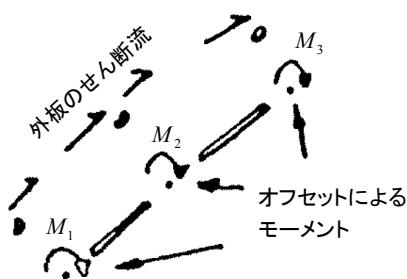
応力の計算: 外板の面内せん断力が節点に働くので、節点で曲げモーメントが階段状に変化する。したがって、梁要素の両端の曲げモーメントの値を使うのではなく、両端の平均値を使うこと。梁要素の中央の曲げモーメントが適切な値である。



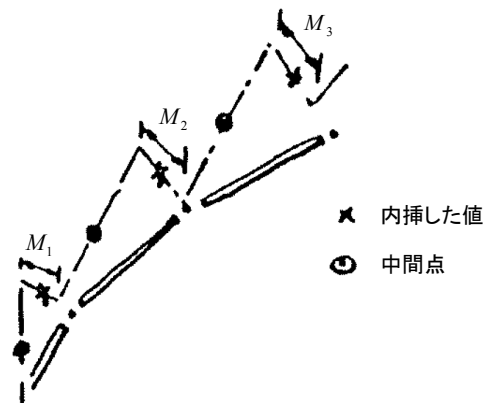
梁要素(CBAR)のオフセット

オフセットベクトル v_i の計算、断面特性の計算が必要である。回転自由度が作られる。

要素方向の節点荷重を出力するには「CBAR0」カードを使う。



梁要素(CBAR)の荷重



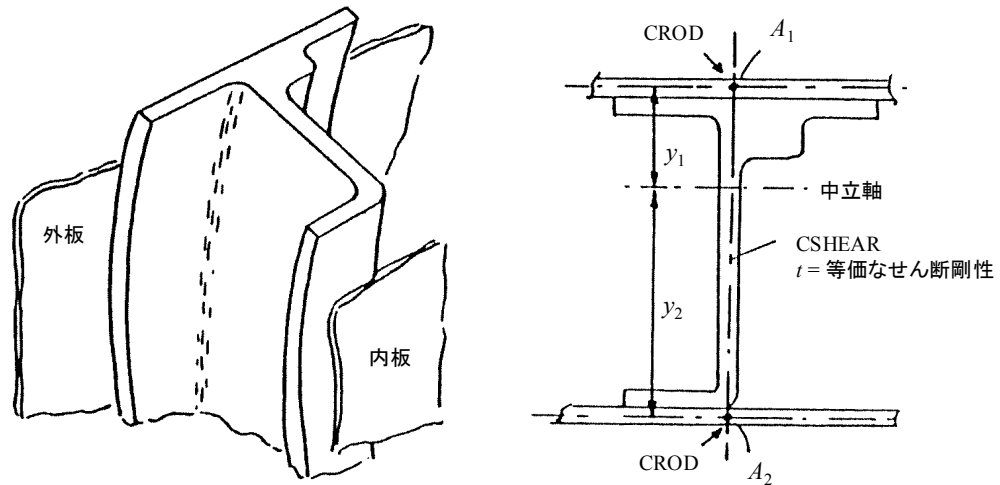
曲げモーメントの分布

応力の計算方法: NASTRAN の出力は要素の端の軸力、モーメント、せん断力である。端のモーメントには外板のせん断の影響が含まれているので上右図のように階段状になる。平均を使うこと。

図 3.2-2 胴体フレームのモデル化 - 梁要素

3.2.2 厚いリングフレーム

正しい断面2次モーメントと中立軸を使うようにモデル化する。胴体外板位置に外側の節点を取り、内板があればそこに節点を取り、実構造の応力は、梁理論を使って計算する。その方法を図 3.2-3 に示す。



CROD の断面積 A_1, A_2 の計算方法

- ① ESDU 71004 の方法を使ってフランジの効率係数を決める。
- ② 断面2次モーメント I と中立軸の位置を計算する。このとき、フランジの断面積は効率係数をかけて補正し、フランジの幅は局所的な断面2次モーメントの計算に考慮する。
- ③ 次の連立方程式で A_1 と A_2 を計算する。

$$\left. \begin{aligned} A_1 y_1^2 + A_2 y_2^2 &= I \\ A_1 y_1 &= A_2 y_2 \end{aligned} \right\} A_1 \text{ と } A_2 \text{ を計算することができる。}$$

応力の計算方法

NASTRAN の CROD の要素応力 σ_1, σ_2 から線形補間または梁理論を使ってフレームの上下面の応力を計算する。

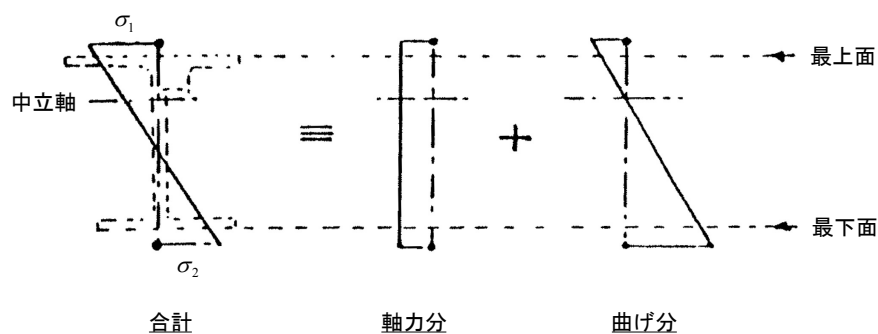


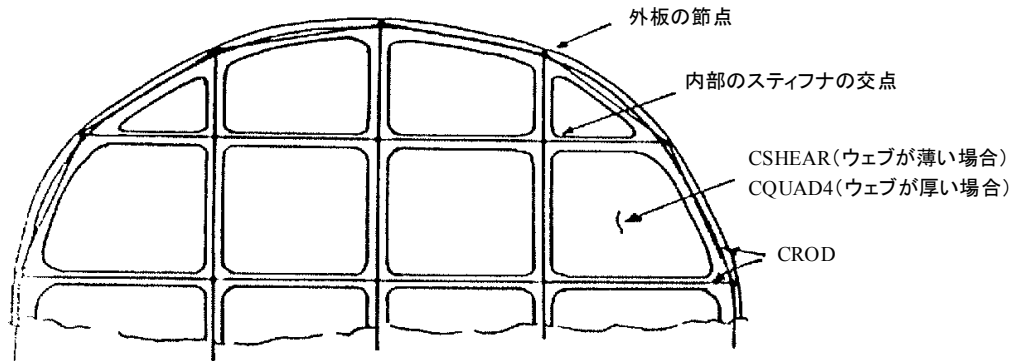
図 3.2-3 厚いリングフレーム

3.2.3 機械加工フレーム

スティフナ配置をできるだけ模擬するようにモデル化する。CROD でスティフナを、CSHEAR で薄い(面内軸力を受け持たない)パネルを、CQUAD4 で厚い面内軸力を受け持つパネルをモデル化する(図 3.2-4)。断面積と板厚が正しければ、実構造のための補正は不要である。

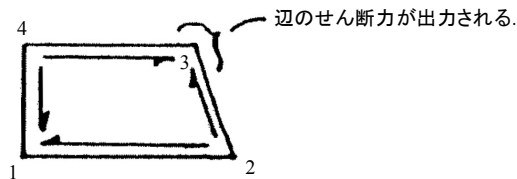
CSHEAR はパネルの辺のせん断荷重を直接出力できるが、CQUAD4 要素は要素座標系での要素中心の応力の出力が得られる。

CQUAD4 パネルの GPFORCE BALANCE を出力することにより、辺のせん断力と軸荷重を計算できる。GP FORCE BALANCE は全体座標系で出力されるので、辺の方向に荷重を分解する必要がある。



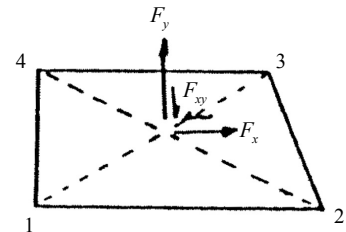
ROD の断面積とパネル要素の断面積が実構造と一致してれば、補正は不要である。

CSHEAR の荷重:



CQUAD4 の荷重:

要素の荷重は要素中心で要素座標系の向きで出力される。



GP FORCE BALANCE 出力を使えばパネルの辺の方向の荷重が出力されるので、それを使って辺の方向のせん断力と軸力を計算できる。

長方形パネルの場合には下の図のようになる。

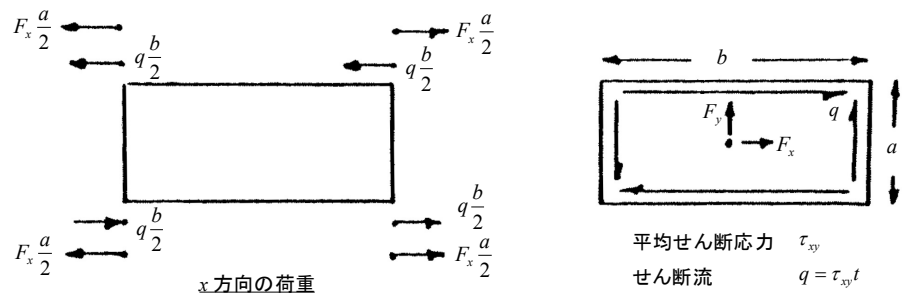


図 3.2-4 機械加工フレーム

3.2.4 圧力隔壁

圧力隔壁の簡単なモデル化は、面内荷重荷重のみを考慮するもので、圧力荷重の影響は後の強度計算で考慮する。モデルのすべてのスティフナの断面積は正しい値を使い、曲げ荷重は負荷されないものとする(図 3.2-5 の上の図)。この方法を使えば、モデルを簡略化でき、回転の自由度を導入せずに済む。

しかし、もう少し詳細なモデル化では、圧力による曲げの影響も考慮し、圧力も荷重ケースの一部として負荷する。この場合には、スティフナは CBAR でモデル化する(図 3.2-5 の下の図)。

CBAR は正しい中立軸の位置にオフセットさせることにより、要素の中心の曲げモーメントが正しく表現される。要素の曲げモーメントは両端の値を平均化したものを使う。CBAR をオフセットさせないモデル化とする場合は、せん断力のオフセットを考慮して要素の曲げモーメントを補正する必要がある。

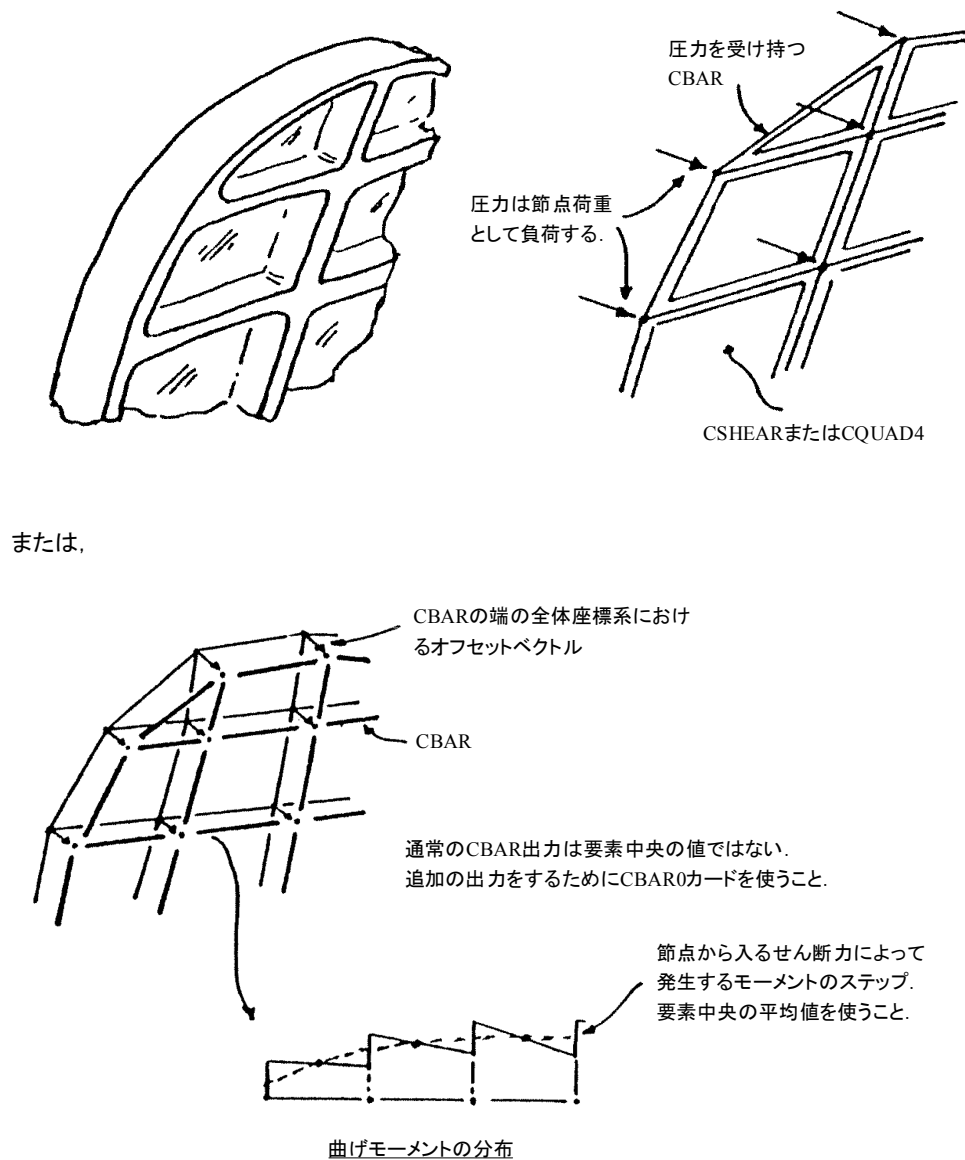


図 3.2-5 圧力隔壁のモデル

3.2.5 床

床については、面内の軸力とせん断に関しては断面がすべて有効であるとしてモデル化する。圧力による面外曲げに関しては、曲げをとらないモデル化と曲げをとるモデル化の両方がある(図 3.2-6)。面外曲げをとらない普通のモデル化では、CROD 要素と CSHEAR 要素を使い、CROD がスティフナの全断面積とパネルの有効断面積を代表する。

スティフナのオフセットが大きい場合やパネルに圧力を負荷する場合には、オフセットベクトルを含んだ CBAR を使う。このとき、CROD を残すが、パネルの軸力を伝えるためである。

初期設計段階においては、圧力の効果は詳細応力計算のときに考慮し、モデルでは面内剛性だけを含める。これによってモデルでは回転の自由度は不要になる。

パネルの有効軸力断面積は CSHEAR カードで $F1, F2 = 1.0$ と設定することにより自動的に考慮される。このとき、有効断面積は各辺でパネルの幅の $1/2$ である。

モデル形状に関する注意: 床のモデルの節点は一平面にあることを確認すること。必要に応じて局所座標系を定義して使用すること。節点のわずかな平面からのずれがあると、面内荷重を受け持てなくなる。

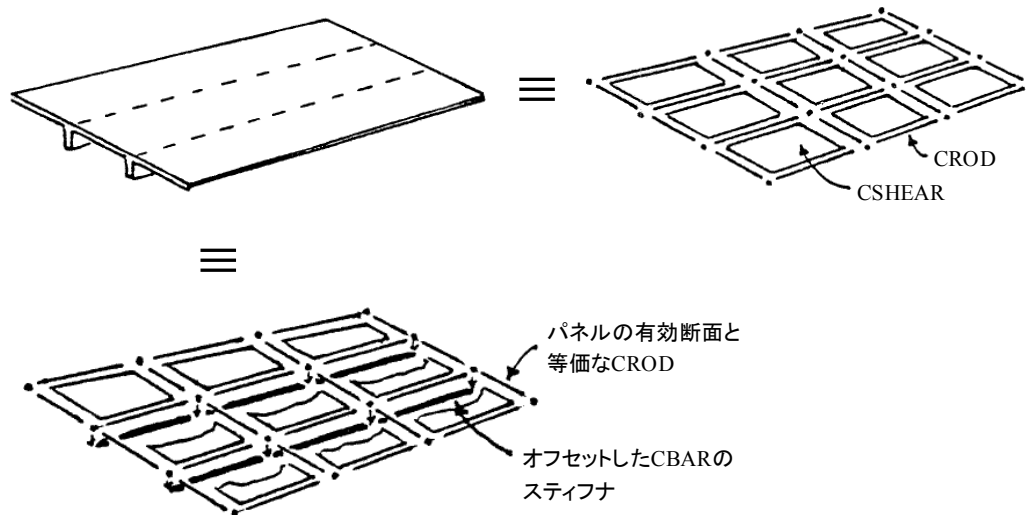


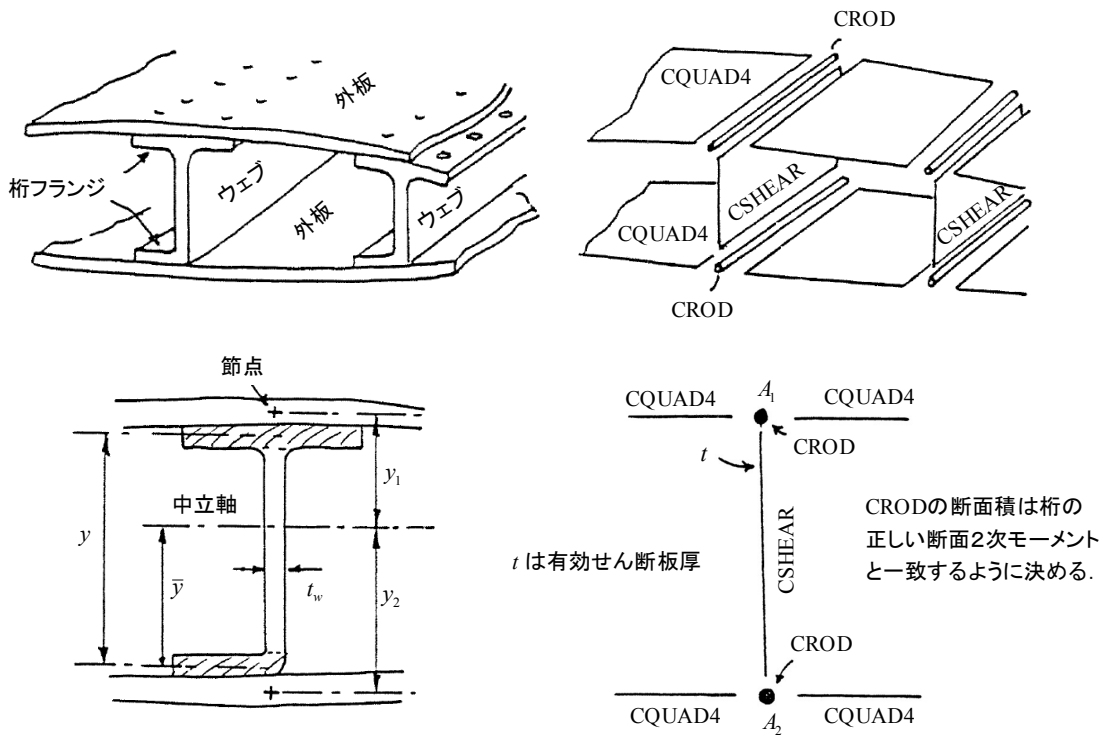
図 3.2-6 床

3.3 翼 - リブ, 桁, 外板

主翼, 尾翼等は薄い構造で, 外板が主に曲げを受け持ち, 内部の構造である桁とリブが主にせん断を受け持つ。したがって, モデル化においてはこれらの部材の剛性を正しく模擬しなければならない。

モデルの形状は外板の板厚中央で代表すると, 外板の荷重と剛性は実構造と一致する。桁とリブのモデル化については, 断面2次モーメントを一致させるようにする。これは厚いフレームで説明した方法(3.2.2 項)と同じである。

外板は CQUAD4 要素でモデル化する。桁/リブのウェブは CSHEAR 要素で, フランジは CROD 要素でモデル化する(図 3.3-1)。CSHEAR 要素は外板の辺の位置にしか CROD 要素がないので, 安定化のために翼の厚さ方向の剛性が必要である。PSHEAR カードの F 係数でこの剛性を与えることができる。他の方法として, RR0D 要素を使うこともできる。この要素により上面外板と下面外板の節点の厚さ方向の自由度をつなぐ。これらの方法を使わないと, ウェブの剛性が特異となって, 過大な変位が発生する。



モデルの外形状は外板の厚さの中央にとる。こうすると, モデルの断面積が正しいと CQUAD4 の荷重が実構造と一致する。

CROD の断面積 A_1, A_2 の計算方法

$$A_1 y_1^2 + A_2 y_2^2 = I : \quad \text{桁/リブの断面2次モーメント}$$

$$A_1 y_1 = A_2 y_2 : \quad \text{中立軸の位置を同じとする}$$

A_1 と A_2 を計算することができる。

応力の計算方法

$$\text{上面フランジの応力: } \sigma_U = \frac{\sigma_{A1}}{y_1} (y - \bar{y})$$

$$\text{下面フランジの応力: } \sigma_L = \sigma_{A2} \frac{\bar{y}}{y_2}$$

注意: 桁/リブのウェブの PSHEAR カードの F1, F2 を使って翼厚さ方向の軸剛性を与えること。

図 3.3-1 翼

3.4 胴体外板

胴体外板のモデル化は最も難しいと言える。モデル化は次のような要因に関連している。

- 分割(メッシュ)のサイズ
- フレームの支持方法
- 外板の厚さ
- 設計条件, 座屈を許すか／許さないか等

モデル化の方法は2種類(粗い分割によるモデル化と細かい分割によるモデル化)に分類できる。

3.4.1 粗い分割によるモデル化

粗い分割によるモデル化では, フレーム間の外板は1つの要素でモデル化される。外板の曲げとフープによる引っ張り効果は表現できない(与圧荷重はフレームの節点に負荷される)。これらの効果は詳細応力計算の中で考慮しなければならない。したがって, 外板はせん断要素(CSHEAR)でモデル化され, 外板の有効な軸剛性は棒要素(CROD)でモデル化される(図 3.4-1)。

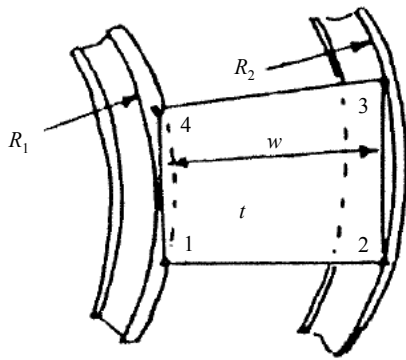
機軸方向には外板は 100%有効で, このために PSHEAR カードの F 係数を使う。この場合には, 機軸方向の CROD にはロンジロンかストリング断面積を入れる。反対に, F 係数を使わない場合には, CROD の断面積にはロンジロンかストリング断面積に加え, 外板の有効断面積も含める必要がある。

外板のフレームで区切られる辺に沿う CROD の断面積は, 外板の周方向の有効断面積とするが, フレーム結合列数に応じて外板の有効断面積を決める公式が ESDU 71004 に載っている。この CROD はフランジの断面積とは無関係に決まるので, フレームのフランジとは別にモデル化すべきである。

厚い外板では有効断面積は 100%に近づく(インテークダクト等)ので, すなわち軸荷重に対して 100%有効であるとして CSHEAR の代わりに CQUAD4 を使う。この場合には, CROD はロンジロンとストリングのためだけに使う。

設計条件については, 材料剛性で調節する。すなわち, 座屈する構造ではヤング率を低減する。

注意: CQUAD4 要素を外板に全面的に使用すると, 著しく剛性が高くなり, 不適切な荷重経路と変形を生じる。



CSHEAR の厚さ = t

平均パネル幅(リベット列間) = w

辺 1-2 と辺 4-3 の上の CROD は外板の軸力にフルに有効である.

辺 1-4 と辺 2-3 の上の CROD はフレームとの結合方法により有効断面積が変わる. ESDU 71004 に計算式が載っている(下を参照).

- 辺 1-4 と辺 2-3 の CROD の断面積 - フレームが外板に1列のリベットで結合されている場合

$$\text{辺 1-4 の CROD の断面積} = 0.39\sqrt{R_1 t^3}$$

$$\text{辺 2-3 の CROD の断面積} = 0.39\sqrt{R_2 t^3}$$

$$F2 \text{ 係数を使う場合は, } F2 = \frac{0.39(\sqrt{R_1 t^3} + \sqrt{R_2 t^3})}{wt} \text{ とする.}$$

- 辺 1-4 と辺 2-3 の CROD の断面積 - フレームが外板に2列以上のリベットで結合されている場合
上の式に Wt を加えること. W は最外列のリベット列間の距離(下の図).

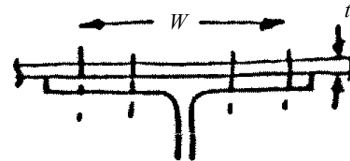
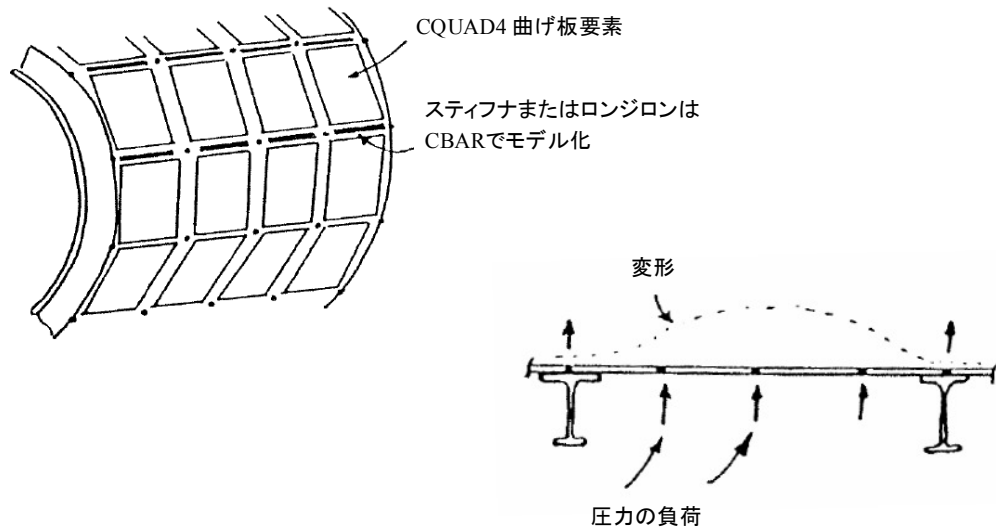


図 3.4-1 胴体外板 - 粗い分割によるモデル化

3.4.2 細かい分割によるモデル化

細かい分割によるモデル化の場合には、外板の曲げとフープ引っ張りの効果を考慮できるようにフレーム間の外板を機軸方向に細かく分割する。このため、モデルには回転の自由度が付加されるので、解析時間が増加する。これらの効果を表現するために、分割はじゅうぶん細かく(フレーム間を最小4分割)する必要がある。

パネルは CQUAD4 曲げ要素で、ロングロンとストリングは CBAR とする。圧力はフレーム間の節点にも負荷する(図 3.4-2)。



- 圧力はフレーム間の節点にも負荷する。
- 曲面外板の影響も評価できる – フープ引っ張り等
- CBAR でモデル化したストリングとロングロンの荷重は実構造と等しい。
- このモデル化では回転自由度が増える。
- 解析時間が増加する。

図 3.4-2 胴体外板 – 細かい分割によるモデル化

3.5 後縁

以前は、後縁は局所的な圧力による強度検討が必要なだけで、強度後縁のモデル化は重要な課題ではなかった。

しかし、空力弾性データを使って最適化を行うようになったため、後縁の変位が関心の的になっている。フラッタに対しては後縁の剛性と質量が重要である。

実際の構造では、ほとんどの場合後縁は1点で交わることはなく、モデル化において実際の高さを模擬することが不可欠である。普通の方法は、後縁材の幅を板厚とした細い CQUAD4 要素を使うものである(図 3.5-1)。外板の要素は後縁で離れており、正しい剛性を模擬できている。

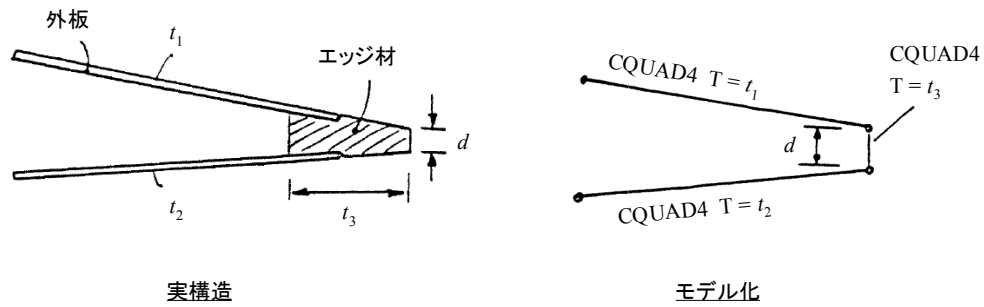


図 3.5-1 後縁材

3.6 複合材パネルのモデル化

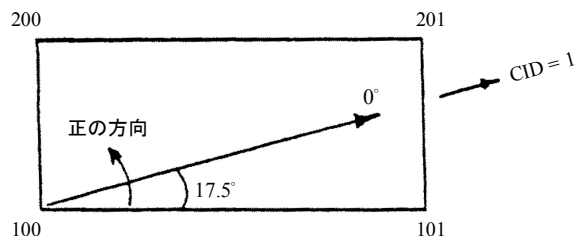
複合材パネルは現在の構造の多くの部分を占めるようになってきている。複合材パネルは以下に示すようなモデル化ができる。

- 1つの異方性の CQUAD4 要素でモデル化
- 複数の CQUAD4 要素でモデル化
- NASTRAN の PCOMP カードの使用
- 2次元要素を使用して厚さ方向を考慮したモデル化

方法 a) と c) では、正しい曲げ剛性を与えることができる。方法 b) では面内剛性だけを考慮できる(この方法は通常は最適化解析に使う)。

3.6.1 1つの異方性パネルによるモデル化

面内剛性だけをもつ4辺形要素 CQUAD4 を使う場合には、1枚の MAT2 カードで材料特性を定義する。剛性マトリックスは専用のプログラムで計算する。(訳者注: 複合材の剛性の計算は MIL-HDBK-17 を参照のこと。) 繊維の方向は0度方向を基準にする。0度方向は CQUAD4 カードで角度として与えるか、座標系番号として与える(図 3.6-1)。



材料の基準方向は、辺 1-2 からの角度、または局所座標系 1 で与える。

図 3.6-1 複合材パネルの材料基準方向の定義

NASTRAN の CQUAD4 カードは下のようになる。

```
CQUAD4 1 1 100 101 201 200 17.5
または、
CQUAD4 1 1 100 101 201 200 1
```

ここで、下の行の8番目の欄の「1」は局所座標系番号を示す。

注意: 材料の基準方向は座標系「1」の X 軸のパネル面への投影と定義されている。パネル面と材料の基準方向を定義する座標が平行でない場合に注意すること。

合計厚さ 4.0 mm の積層板を考える。積層構成を、

Layer	Thickness	% Thickness	1/2 unit t	
+45	0.5	12.5	.0625	
-45	0.5	12.5	.0625	
0	2.0	50.0	.25	
90	1.0	25.0	.125	(板厚の単位:mm)

とし、単層板(ラミナ)の剛性を、

```
MATERIAL      E1      E2      G12      NU12      MAT. NO.
M      136888.8888      6888.8888      3888.8888      .3888      1
```

(剛性の単位:MPa)

とすると、この積層板の面内剛性マトリックスは、

INPLANE STIFFNESS MATRIX

#.79663336E+05	#.97416582E+04	#.00000000E+00
#.97416582E+04	#.47033777E+05	#.24414063E-02
#.00000000E+00	#.24414063E-02	#.10934483E+05

(剛性の単位:MPa)

となる。このマトリックスの上の三角の成分から、MAT2(材料番号 1)カードは、

MAT2 1 79663.3 9741.66 0.0 47033.8 0.0 10934.5

となる。PSHELL カードは、

PSHELL PID 1 4.0

となる。

曲げ剛性を考慮する必要があるときは、単位板厚の積層板の曲げ剛性を専用のプログラムで計算する。曲げの材料特性値は単位板厚の積層板の曲げ剛性マトリックスを 12.0 倍したものになり、面内剛性の材料特性とは別に曲げ剛性用の材料特性を別の MAT2 カードで定義する。

例を以下に示す。下のように実際の積層板の積層構成を単位板厚に換算する。すなわち、各層の板厚は積層板の合計板厚でノーマライズした値である。単層板の剛性は前述の例と同じとする。

PLY NO.	THICKNESS	ANGLE	MATERIAL NO.	ANGLE WITH DATUM
1	#.06250	#.00000	1	#.00000
2	#.06250	45.00000	1	45.00000
3	#.06250	#.00000	1	#.00000
4	#.06250	-45.00000	1	-45.00000
5	#.06250	#.00000	1	#.00000
6	#.06250	90.00000	1	90.00000
7	#.06250	#.00000	1	#.00000
8	#.06250	90.00000	1	90.00000
9	#.06250	90.00000	1	90.00000
10	#.06250	#.00000	1	#.00000
11	#.06250	90.00000	1	90.00000
12	#.06250	#.00000	1	#.00000
13	#.06250	-45.00000	1	-45.00000
14	#.06250	#.00000	1	#.00000
15	#.06250	45.00000	1	45.00000
16	#.06250	#.00000	1	#.00000

面内剛性は、前述の例と同じで、

INPLANE STIFFNESS MATRIX

#.79663336E+05	#.97416582E+04	#.00000000E+00
#.97416582E+04	#.47033777E+05	#.24414063E-02
#.00000000E+00	#.24414063E-02	#.10934483E+05

(剛性の単位:MPa)

面内剛性の MAT2 カード(材料番号 1)は、前述の例と同じで、

MAT2 1 79663.3 9741.66 0.0 47033.8 0.0 10934.5

曲げ剛性は、

RIGIDITY MATRIX

#.79856396E+04	#.11217456E+04	#.35051205E+03
#.11217456E+04	#.19525704E+04	#.35051202E+03
#.35051205E+03	#.35051279E+03	#.12211477E+04

(剛性の単位:MPa)

曲げ剛性の影響が重要である座屈解析等のためには積層構成を完全に設定して計算した曲げ剛性マトリックスを使う必要がある。

要素の板厚として実板厚を使い、単位板厚の曲げ剛性マトリックスに 12.0 をかけたものが曲げの材料特性の MAT2 カード(材料番号 2)のデータとなる。PSHELL カードの「12I/T³」の欄は 1.0 とする。

(訳者注:実板厚の曲げ剛性マトリックス[D]の成分に 12/T³ (T は積層板の合計板厚)をかけたものが曲げの材料特性の MAT2 カードのデータとなる。)

```

MAT2    2      95827.7 13461.0 4206.1  23430.8 4206.1  14653.8
PSHELL  PID    1      4.0    2      1.0

```

PSHELL カードの「MID3」の欄が空白であると、板の面外せん断剛性が無限大であることを示す。通常はこの数値を設定する。炭素繊維複合材の場合、マトリックス(樹脂)のヤング率が 6000MPa 程度であり、有効板厚が 0.4~1.0 であるので、MAT1 カード(材料番号 3)で定義する。結局 PSHELL カードと MAT カードは次のようになる。

```

PSHELL  PID    1      4.0    2      1.0    3      0.8
MAT2    1      79663.3 9741.66 0.0    47033.8 0.0    10934.5
MAT2    2      95827.7 13461.0 4206.1  23430.8 4206.1  14653.8
MAT1    3      6000.0      0.3

```

3.6.2 複数の CQUAD4 要素でモデル化

積層板を板厚方向に4枚の CQUAD4 要素に分割する(図 3.6-2)。各要素が異なる繊維方向の層を表わし、単層板(ラミナ)の材料特性を定義するひとつの MAT2 カードを参照する。

このモデル化の主な用途は、各積層方向の板厚の最適化の解析である。このモデル化では曲げ剛性の影響を適切に評価できないので、曲げ剛性の検討は別の詳細解析で行わなければならない。

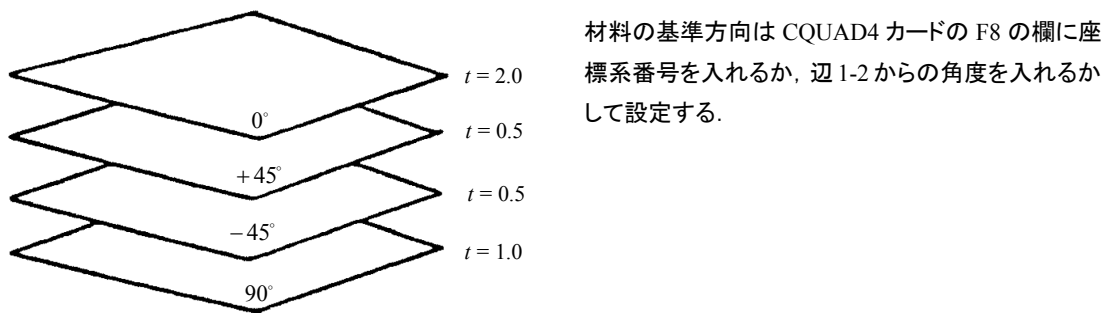


図 3.6-2 複数の CQUAD4 要素によるモデル化

単層板(ラミナ)の面内剛性マトリックスが次のようであるとすると、

INPLANE STIFFNESS MATRIX

```

0.13654216E+06  0.18071758E+04  0.00000000E+00
0.18071758E+04  0.60239185E+04  0.00000000E+00
0.00000000E+00  0.00000000E+00  3.00000000E+04

```

MAT2 カードは、

```

MAT2    1      136542. 1807.2    0.0    6023.9  0.0    3000.0

```

となる。

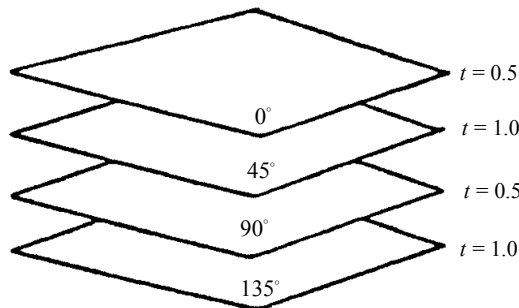
3.6.3 NASTRAN の PCOMP カードの使用

NASTRANには積層板を定義するためのPCOMPカードがある(図 3.6-3). 積層板の各層の厚さ, 方向, 材料を定義すると, NASTRAN の解析の中で自動的に PSHELL と MAT2 カードが生成される.

曲げと面外せん断剛性の影響は自動的に含まれるので, 面内剛性だけを考慮するモデル化はこの方法ではできない. PCOMP を使うと作業の大きさと複雑さが増すので, 強度計算の部門では PCOMP はほとんど用いられない. (訳者注: 現在ではモデルのサイズは問題とはならないので, PCOMP は普通に使われている.)

すべての積層順序を入力しておく, 「RFALTER」を使えば, 各層の応力を出力することができる. 「RFALTER」については NASTRAN User's Handbook を参照されたい. PCOMP カードは通常の CQUAD4 の材料特性 ID で参照する.

厚さ 3.0mm の積層板のデータの例を以下に示す.



各層の角度はCQUAD4カードで基準方向に対する角度または座標系番号 CID で定義する. 角度は辺 1-2 から測り, パネル内部に向かう方向を正とする. この例では材料番号を「5」としている.

図 3.6-3 PCOMP カードの使用

PCOMP データは次のようになる.

```
PCOMP 1
+81A30285 0.5 0. YES 5 1.0 45. YES 1B1A3028
+81A30305 0.5 90. YES 5 1.0 135. YES 1B1A3030
1B1A3032
```

NASTRAN が計算した PSHELL と MAT2 を下に示す. 3つの MAT2 カードは, それぞれ面内剛性, 曲げ剛性, 面外せん断剛性の材料データを表わす.

```
*** USER INFORMATION MESSAGE 4379, THE USER SUPPLIED PCOMP BULK DATA CARDS ARE REPLACED BY THE FOLLOWING

PSHELL 1 100000001 3.0000E+00 200000001 1.0000E+00 0 1.0000E+00 0.0
-1.5000E+00 1.5000E+00 400000001
MAT2 100000001 6.0778E+04 2.6866E+04 2.7836E-03 6.0778E+04 5.1585E-03 2.9032E+04 1.6500E-06
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
MAT2 200000001 8.7414E+04 2.5524E+04 -1.2647E+04 3.6825E+04 -1.2647E+04 2.7690E+04 1.6500E-06
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
MAT2 400000001 8.3363E+03 -2.0127E+03 6.3237E+03 -4.3110E+03 6.3237E+03 -2.0127E+03 1.6500E-06
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0
```

3.6.4 2次元要素を使用して厚さ方向を考慮したモデル化

この方法は試験片や構造の一部を詳細に解析するときに使うモデル化である(図 3.6-4)。解析する問題の仕様と、解析によって得られる情報がわかっていることが必要である。境界支持条件と荷重負荷条件が与えられている必要があり、対称性を使ってモデルのサイズを減らすことがよく行われる。2次元要素を使った板厚方向のモデル化では、板厚方向の材料が母材(マトリックス(樹脂))である材料剛性マトリックスの設定が必要である。

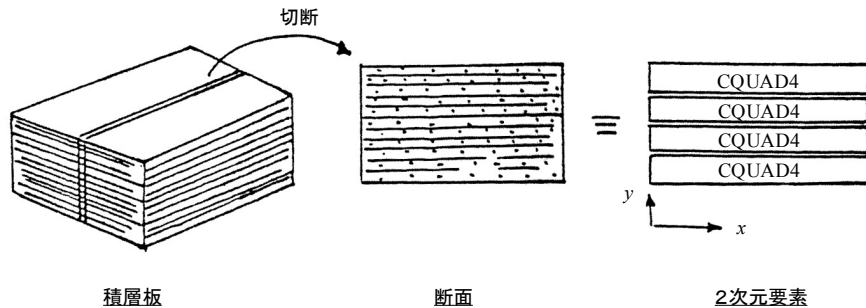


図 3.6-4 2次元要素による厚さ方向のモデル化

各 CQUAD4 要素の x 方向の剛性は積層の向きによるが、 y 方向の剛性は母材(マトリックス)の剛性である。 E_x 、 E_y が決まればコンプライアンス・マトリックスの逆行列を求めることにより、MAT2 のデータを得ることができる。

この方法の詳細を以下に示す。

- 各 CQUAD4 要素でモデル化する積層構成を決める。
- 各要素に対してコンプライアンス・マトリックスを計算し、CQUAD4 の x 方向の E を求める。
- 要素の材料特性は次のようになる。

E_x : x 方向の剛性

E_y : 母材(マトリックス)のヤング率

G : 母材(マトリックス)のせん断剛性

0.3: ポアソン比

- 上の要素の材料特性からコンプライアンス・マトリックスを計算し、その逆行列を求めて剛性マトリックスを得る。
- 剛性マトリックスの成分から MAT2 データを作成する。

上に述べた方法は厚さ方向のモデル化の一般的な方法を示したものであり、問題によっては材料データの修正が必要である。断面が解析対象の中心部から切り出されたものであれば、 x 方向の有効剛性が増加するのでポアソン比の影響を考慮する必要がある。断面が自由端に近いのであれば、別の取り扱いとなる。このような観点について材料担当部門と相談したうえでモデル化をすること。

3.7 ハニカムコアのモデル化

フラップ、前縁構造、尾翼等の内部構造に使われるハニカムコアをモデル化する必要がある。CHEXA と CPENTA のソリッド要素がこの目的のために使われる。これらの要素の隅の点で形状が定義される。要素の辺の中央の点を追加の節点とすることもできるが、ハニカムコアのモデル化には不要である。

応力は要素の中央または節点の値が出力できるが、応力は材料基準軸方向の値である。この基準軸は全体座標系、局所座標系または要素座標系を選ぶ。CHEXA 要素では要素座標系は要素の形に依存し、CPENTA 要素では要素座標系は節点のリストの順序による。したがって、どちらの要素の場合でも PSPLID カードの4つめの欄で材料基準軸を設定するのが望ましい。

注意:ハニカムコアは極度に異方性なので、材料の方向は製造図にしたがうこと。薄い曲面パネルでひとつの材料方向だけを設定すると、要素の方向が変わるにつれて面外剛性が正しくなくなる(図 3.7-1)。

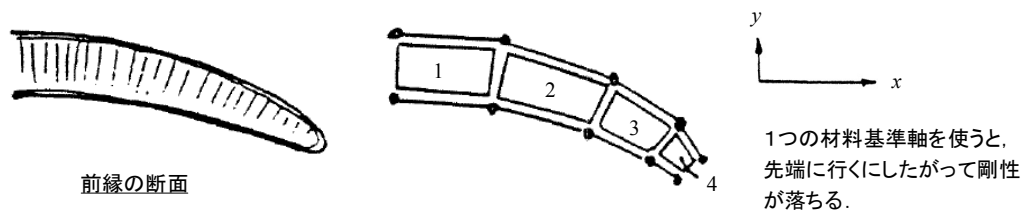


図 3.7-1 サンドイッチ構造の前縁のモデル化

材料特性は 9×9 の剛性マトリックスを表わす MAT9 カードを使って定義できる。MAT9 の材料座標系とハニカムコアの L 方向(リボン方向)、W 方向が対応していることを確かめること。

ハニカムコアの PSOLID カードと MAT9 カードの例を以下に示す。材料番号を 15、材料座標系番号を 5 とした。

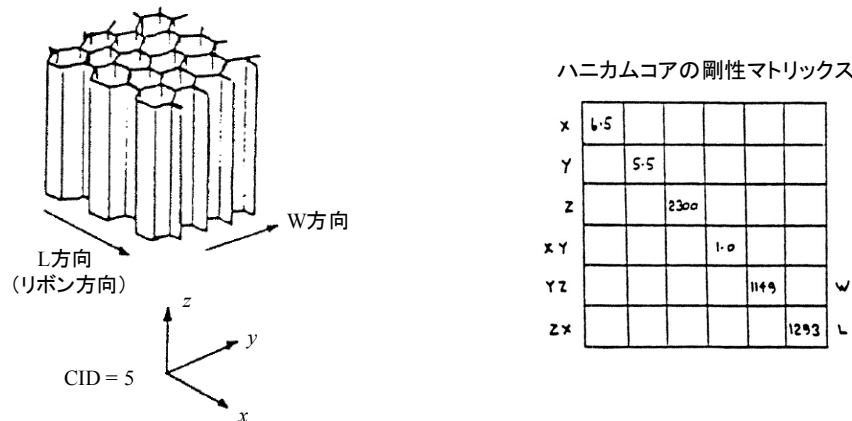


図 3.7-2 ハニカムコアの剛性

PSOLID	ID	15	5					
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
MAT9	15	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5
+	0.0	0.0	0.0	0.0	2300.	0.0	0.0	0.0
+	1.0	0.0	0.0	1149.	0.0	1293.		

ハニカムコアの L 方向と W 方向の剛性と z 方向の剛性はハニカムコアのデータシートに載っている. x, y, xy 方向の剛性は非常に小さいので, データがなければ 1.0 とおけばよい.

3.8 サンドイッチ構造のモデル化

サンドイッチパネルのモデル化は, ①2枚のスキンと内部のコアを別々にモデル化する方法と, ②これらの3つの構成要素をまとめて1つの曲げ板要素としてモデル化する方法がある(図 3.8-1). 後者の方法を以下に示す.

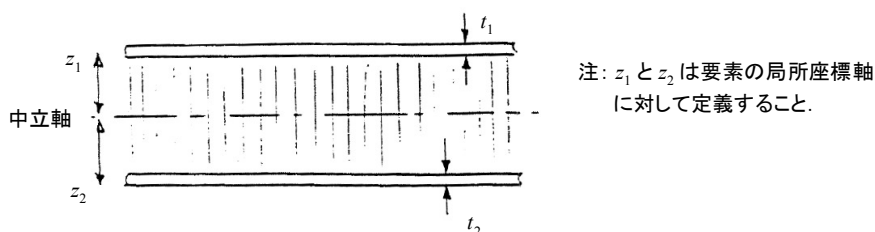


図 3.8-1 サンドイッチパネル

- PSHELL の面内剛性の板厚をスキン板厚の合計 (t_1+t_2) とし, 面内材料剛性はスキンの値を使う.
- 断面の曲げ剛性 I を計算する.
- $t = t_1 + t_2$ として, 係数 $K = \frac{12I}{t^3}$ を計算する.
- 曲げはすべてスキンで受け持つと仮定すると, $MID2 = MID1$ として, $MID2$ と上で計算した係数 K を PSHELL カードの5番目と6番目の欄に入れる.
- PSHELL の面外せん断剛性の材料特性 $MID3$ はコアのせん断剛性を使い, 面外せん断板厚 t_s (コアの厚さ) とスキン板厚の合計 t の比 $\frac{t_s}{t}$ を入れる.

PSHELL カードの構成は次のようである.

PSHELL	PID	MID1	t	MID1	K	MID3	ts/t
		↑		↑		↑	
		面内		曲げ		面外せん断	

z_1 と z_2 を PSHELL カードの2枚目に正しく設定すれば, スキンの応力が NASTRAN で直接出力される.

PSHELL カードの例を下に示す.

```
PSHELL 5      1      3.0      1      250.0      2      10.0
```

このデータは, サンドイッチパネルの曲げ剛性が 3.0mm 厚のスキンの剛性の 250 倍であり, コアの厚さが 30.0mm であることを示している.

3.9 結合

航空機の構造には製造のためにいろいろな種類の結合が必要である。ほとんどの結合は連続的なボルト／リベット結合であったり、接着結合であったりするので、特別なモデル化は不要である。全体の構造の剛性には影響しないため、これらは局所的な強度計算の際に考慮すればよい。

残る結合方式は、①各ボルトやラグをモデル化する直接的な方法と、②局所的な要素の特性を補正したり、複数の結合／ファスナの影響を同じ位置の節点をつなぐ等価ばね要素でモデル化する間接的な方法がある。要素の特性を補正する場合には、得られた荷重は実構造の寸法にそのまま適用され、パネル要素の辺の荷重からファスナ荷重を計算する。ばね要素を用いた場合には、ファスナ荷重とパネル荷重が出力される。

ボルト／リベット結合のモデル化の問題のひとつは、個々のファスナまたはファスナのグループの剛性の導出である。ファスナ剛性が算出できれば、ばね要素の特性を決めるのは簡単である。ファスナ剛性に関する BAe の Warton Division における研究成果は ESDU 85034 と ESDU 85035 にまとめられている。

結合部の直接的なモデル化については、各結合点で1本のボルトで結合される分解可能な結合では単純であるが、多くのボルトで結合する主翼／胴体結合ではモデル化が複雑である。荷重のオフセットの影響は局所的な構造で処置して、モデルでは非現実的な剛性の低下が起きないようにすべきである。具体的には、結合ボルトの位置をモデル上の剛な点に移動させて全体的な剛性が落ちないようにする(図 3.9-1)。そして、実際のボルト位置のオフセットの影響は強度計算の中で考慮するのである。

大きなラグとピンの組合せの詳細解析は設計のある段階で実施することがある。この詳細解析が行われた場合には、結合部全体の剛性を計算することができ、この結果をばね要素として粗い分割のモデルに反映することができる。

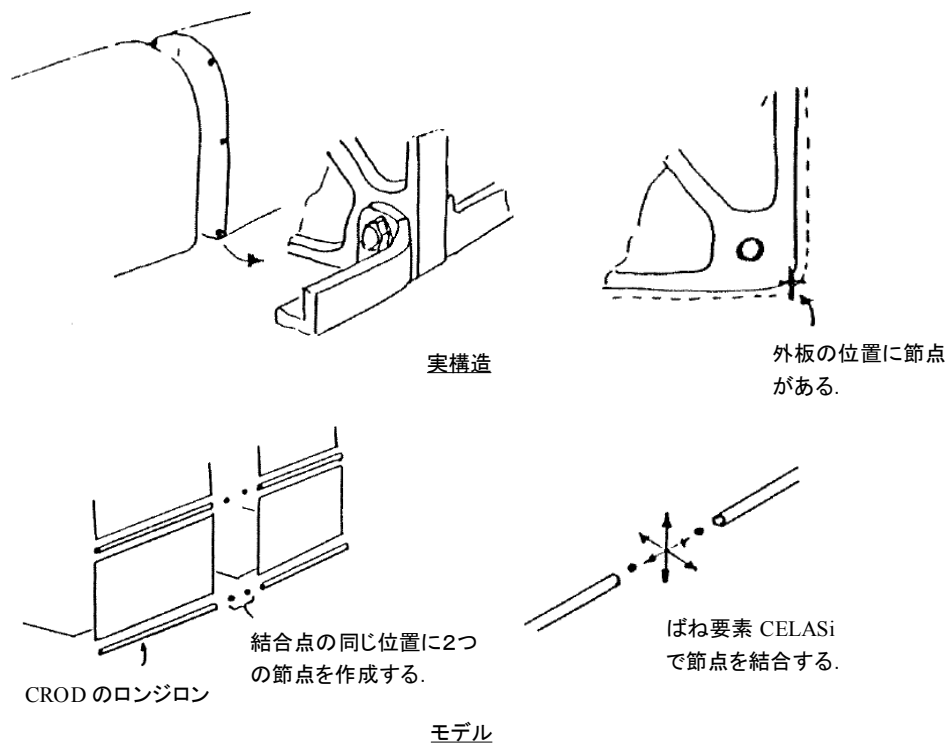


図 3.9-1 分解可能な結合部のモデル化

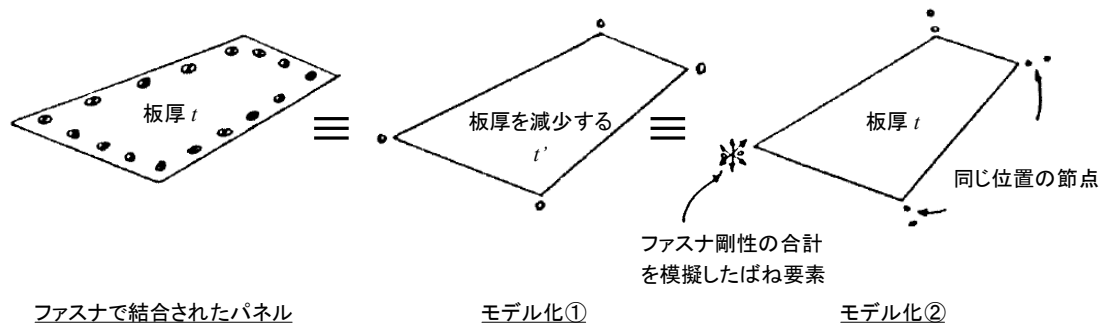


図 3.9-2 結合部の間接的なモデル化

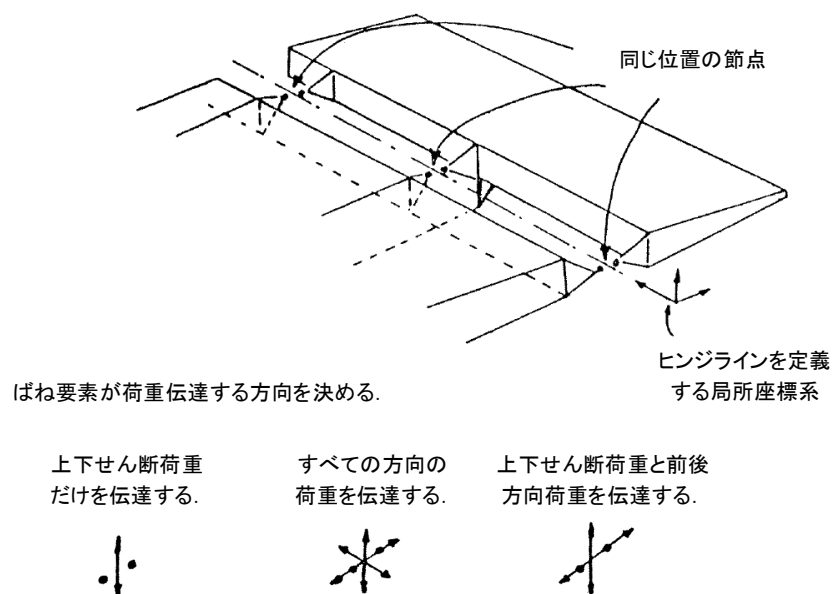
3.10 ヒンジ

ヒンジは次のようにモデル化する。

- ① 同一の節点を2つの部品で共有して、並行移動の自由度だけを共有し、回転を自由にする。
- ② 同じ座標の節点を2つ作成して、これらの節点の必要な自由度を CELASi または MPC で結合する(図 3.10-1)。

スライドする金具の効果を考慮することができるので、2番目の方法が望ましい。構造が複数のヒンジ点で結合されている場合には、これらのヒンジ点が一直線上にあることを保証しなければならない。これを実現する最もよい方法は、ヒンジラインを座標軸とする局所座標系を定義して、その座標系でヒンジ点の節点を定義することである。ヒンジラインに最も近い全体座標系の座標軸に基づいてヒンジラインの座標系を定義するとよい。

警告： ヒンジに冗長性がある場合には、ヒンジ点が一直線上にあることを確認すること。必要に応じてヒンジライン用の局所座標系を使うこと。ヒンジ点が一直線上にないと、ヒンジの動きが固着して、実構造とは異なるヒンジモーメントの荷重経路を形成してしまう。

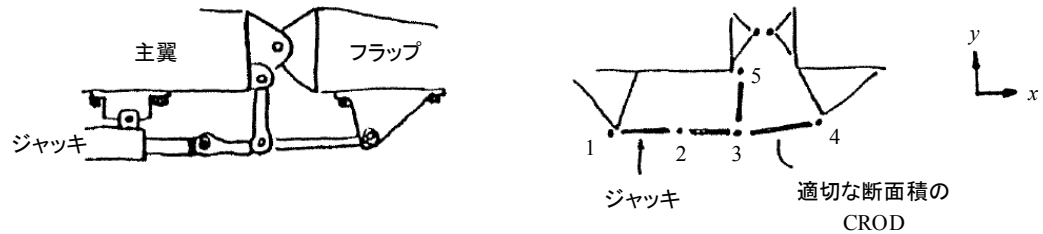


全体座標系で定義された2つのヒンジ点でヒンジラインの局所座標系を定義する。このヒンジ点を定義する GRID カードの第 7 欄(CID)にこの局所座標系を指定する。そうすると、ヒンジ点を結合するばね要素の自由度はヒンジラインの局所座標系の自由度となる。

図 3.10-1 ヒンジのモデル化

3.11 メカニズム

メカニズムは、リンクやジャッキを CROD 要素か RROD 要素でモデル化する(図 3.11-1). NASTRAN では荷重が負荷された状態での変位が計算されるが、線形解析の場合には、この荷重は変形する前の形状に対して計算される(変形する前の位置で釣り合っている)。したがって、変形が大きい場合には注意が必要である。(変形が大きい場合には幾何学的非線形解析を行う必要がある。)



注: 節点2 は z 方向に特異(不安定)となる.

図 3.11-1 メカニズム

3.12 穴と補強材

粗い分割のモデル化において穴や補強材を取り扱うには、等価な剛性を要素の寸法(板厚や断面積)で考慮することで行う。その際に用いられる判定基準は、この局所的な穴や補強材が要素の境界を越えて影響をおよぼすかどうかである。外板の複数の補強材やウェブの連なった軽減孔は無視できない。

AGARD の講義シリーズ 147 には I. C. Taig が書いた有限要素法の実際的な適用に関する論文(参考文献[2])が載っており、それには表 3.12-1 に示すような分類と判定基準が示されている。

表 3.12-1 穴と補強材の考慮の判定基準

種類	下の場合に影響を無視できる
補強材	補強材がつながっておらず、しかも補強材の体積の合計が基準の要素の体積の 10%未満であること。
穴等の剛性を低下させるもの	要素内の連続した荷重経路の 20%未満の断面積の減少で、しかも穴の体積の合計が基準の要素の体積の 5%未満であること。
結合	対応する一様な荷重に対して、要素の周囲のフレキシビリティ(剛性の逆数)の合計が要素のフレキシビリティの 10%未満であること。

この粗いルールは、対応する荷重のもとで、穴や補強材による要素の歪エネルギーの変化が $\pm 10\%$ 未満であることを意図している。

穴等のあるせん断ウェブに関する等価な板厚と端面の荷重に対する有効な断面積を表 3.12-2 に示す(参考文献[2]より)。

表 3.12-2 セン断ウェブの等価剛性

ウェブの種類	有効せん断剛性 (等価な Gt)	フランジと共に働くウェブの有効断面積 A	
		曲げを受ける梁	応力の変化が小さいパネル
一様なウェブ	Gt	$\frac{bt}{6}$	$\frac{bt}{2}$
ハニカムサンドイッチのウェブ	$\sum Gt$ 面板の合計		
せん断座屈したウェブ	$0.6Gt$	$15t^2$ と $\frac{bt}{6}$ の小さいほう	$15t^2$
軽減孔のあるウェブ	$Gt\left(1 - \frac{D}{a}\right)$	$\frac{bt}{6}$	$\frac{(b-D)t}{2}$
波板のウェブ	$Gt \frac{a}{a_d}$	ゼロ: 波板の繰り返し方向	ゼロ: 波板の繰り返し方向 $\frac{bt}{2}$: 波板の繰り返し方向と 直角の方向
浅い Swage (訳者注: ビード?) のあるウェブ	Gt	$15t^2$ と $\frac{bt}{6}$ の小さいほう	$15t^2$: Swage の長手方向と 直角方向 $\frac{bt}{4}$: Swage の長手方向
Castellated ウェブ 	$\frac{Gt}{1 + \frac{\alpha\beta}{1-\alpha} + \frac{0.4\beta^2\gamma^2}{(1-\alpha)^2}}$	ゼロ: 穴の繰り返し方向	ゼロ: 穴の繰り返し方向 $\frac{bt}{3}$: 穴の繰り返し方向と直 角の方向

ここで, a , b , t : ウェブの寸法

a_d : 波板の展開長さ

D : 穴の直径

$\alpha = \frac{\text{穴の幅}}{\text{穴のピッチ}}$

$\beta = \frac{2 \times \text{穴の高さ}}{\text{ウェブの高さ}}$

$\gamma = \frac{\text{ウェブの高さ}}{\text{穴のピッチ}}$

補強材については要素の板厚を増加するか、ひとつの方向の補強材ならば CROD 要素をパネルの補強材の方向の辺に追加することでモデル化する(図 3.12-1)。または、要素の材料特性のヤング率 E を剛性の変化に応じて調節する。要素の剛性が変化した場合の要素力が得られ、その要素力が強度計算の際に実際の構造に適用される。

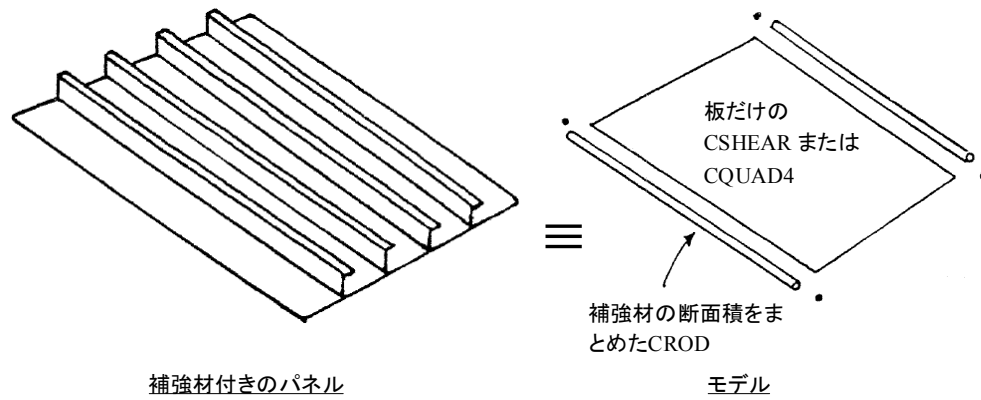


図 3.12-1 補強材付きのパネル

3.13 対称性の利用

モデルを単純化するために対称性が利用され、これにより計算時間が短縮でき、決められた計算時間の制限の中でより細かい分割のモデル化が可能になる。対称性の利用については以下のようにいろいろなことを考慮する必要がある。

- 構造の幾何学的な対称性
- 対称面の数
- 材料特性の対称性があるか。複合材の場合
- 支持条件の対称性
- 荷重条件の対称性

すべての荷重は対称成分と反対称成分に分解することができる。対称成分の荷重と反対称成分の荷重を別々のケースとしてモデルに負荷し、後で足し合わせる。小さいモデルではこの方法をとることを好まないユーザーもいる。

対称性を利用する場合、構造の一部分だけをモデル化する。対称面上にある節点には SPC 等の拘束条件が付与される。対称性と反対称性が利用される。胴体の例を図 3.13-1 に示す。

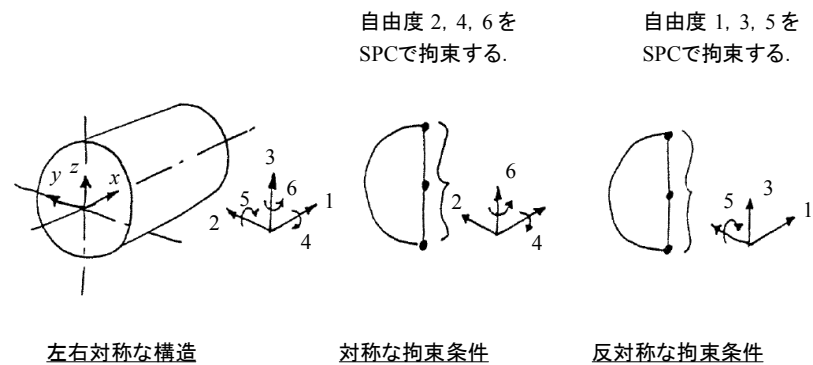


図 3.13-1 胴体の対称性

対称な荷重ケースの場合には、 zx 平面上の節点が自由度 2, 4, 6 方向に拘束され、横方向とロール方向とヨー方向の動きが拘束される。反対称な荷重ケースの場合には、自由度 1, 3, 5 方向に拘束され、前後方向と上下方向とピッチ方向の動きが拘束される。

このような拘束は、対称または反対称の動きを拘束するどのような構造に対しても適用できる。いろいろな対称面に適用する拘束条件を表 3.13-1 に示す。

表 3.13-1 対称面と拘束条件

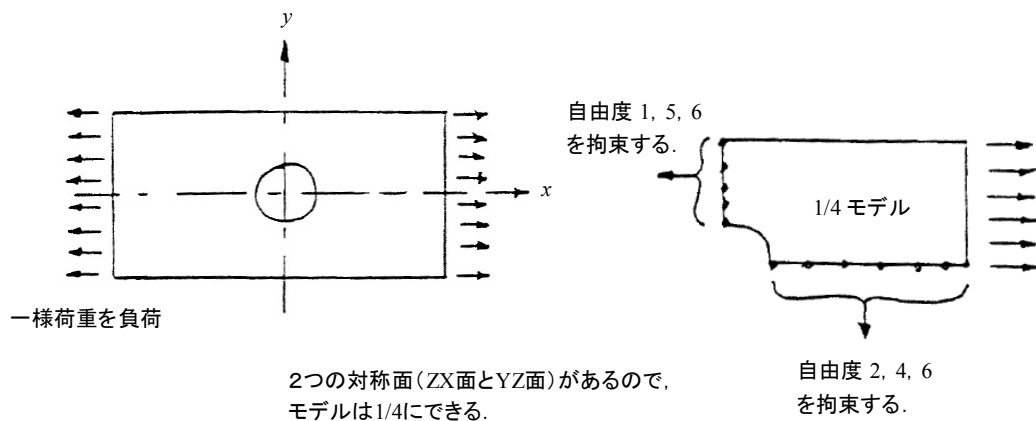
対称な拘束

対称面	X 自由度 1	Y 自由度 2	Z 自由度 3	MX 自由度 4	MY 自由度 5	MZ 自由度 6
XY			拘束	拘束	拘束	
YZ	拘束				拘束	拘束
ZX		拘束		拘束		拘束

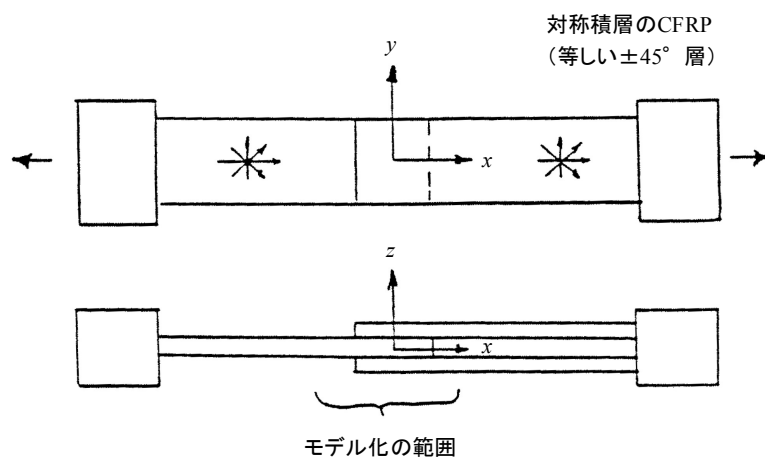
反対称な拘束

対称面	X 自由度 1	Y 自由度 2	Z 自由度 3	MX 自由度 4	MY 自由度 5	MZ 自由度 6
XY	拘束	拘束				拘束
YZ		拘束	拘束	拘束		
ZX	拘束		拘束		拘束	

他の2つの例を図 3.13-2 と図 3.13-3 に示す.



CFRP の対称積層板の対称なラップ接着継手に軸力を負荷する問題である。継手の中央部分をモデル化する。



2つの対称面(XY 面とZX 面)があるので、モデルは 1/4 にできる。

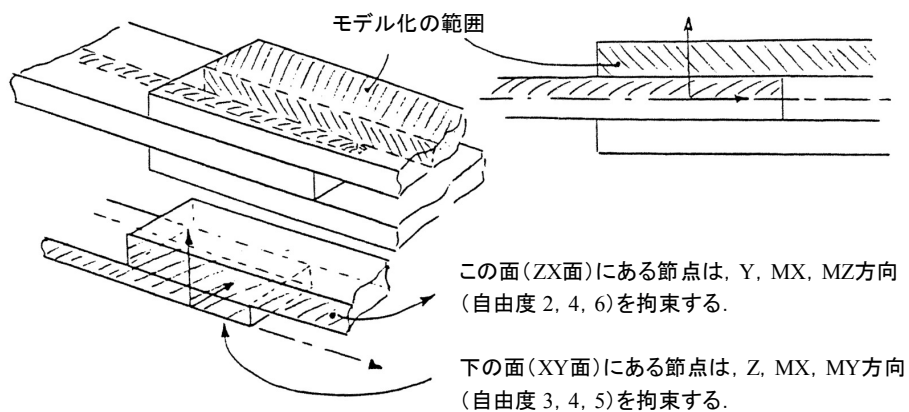


図 3.13-3 接着試験片

3.14 ソリッド要素によるモデル化

ソリッド要素によるモデル化は、CHEXA、CPENTA 等の3次元要素を使って構造をモデル化する方法である。曲げ板要素 CQUAD4 を使ってモデル化していた厚い板を、この方法では節点を板の両方の表面に配置したソリッド要素でモデル化するのである。このように、実際の形状をそのままモデル化できる。

このモデル化においては曲げ荷重は要素の厚さ方向の応力分布で表現できるので、節点の回転の自由度は使われない。

要素の応力の出力は要素の中心と節点位置にだけ行われる。GPFORCE Balance は節点に働くコーナー荷重(辺の方向の荷重ではなく)として出力される。

ソリッド要素は次のような場合に適用される。

- 大きな機械加工部品の解析。形状は CATIA データで得られる。これは非常に特殊な解析で、まれにしか行われない。(訳者注:現在ではコンピュータの能力が格段に向上したので普通に行われる。) EFA(European Fighter Aircraft)のスピゴット・フレームの解析が一例であり、CATIA モデルが NASTRAN モデルに変換された。
- 構造の細部、穴、試験片、炭素繊維強化複合材の層間応力の分布等のマクロ／ミクロな検討。
- フラップやフィンのコア材料のモデル化。

ソリッド要素によるモデル化の欠点のひとつは、正しいコーナー応力を求める場合に同じ節点の隣の要素の応力レベルと平均しなければならないことである。したがって、応力の計算やプロットが手計算では難しい。PATRAN はコンタープロットのルーチンでこの平均化の計算を実行するので、これが表面応力の分布を求める標準的な手段となっている。正しい表面応力を求めるには次に説明する歪ゲージ要素を用いる。

3.15 歪ゲージ要素

歪ゲージ要素は特別な要素ではなくて、NASTRAN のふつうの要素、CQUAD4 や CROD である。非常に薄い、または断面積が非常に小さいこれらの要素をソリッド要素と節点を共有してその表面や辺の上に「貼る」ことによりソリッド要素の応力レベルを「検出」する。このようにして通常の方法では出力できないソリッド要素の応力(たとえば面の中心の応力)を出力することができ、図示もできる。

4 剛な荷重経路

剛な荷重経路や剛な要素は現実には存在しない。しかし、有限要素解析のモデル化においては、これが必要もしくは必須な場合がある。

- モデル化の方法に関わるモデルの不安定(特異性)を取り除く。
- モデルの特異点に局所的な変位を与える。
- 構造中の非常に剛な部材をモデル化する。
- メッシュの大きさを変える、異なる要素種を結合する。
- 節点のグループの平均的な動きを与える。
- 構造に荷重を分配する。
- 節点のグローバル自由度(全体剛性マトリックスに使用する節点の自由度、GRIDカードの第7欄で指定される座標系における自由度)を変える。

リジッド要素に関する説明は NASTRAN の Handbook for Linear Analysis と Application Manual に載っている。

警告: リジッド要素の適用においては、独立自由度と従属自由度の使用が必要である。従属自由度(UM セット)の使用が各リジッド要素、またはその他のモデル化の要求(たとえば SPC の使用、境界点)と矛盾しないように注意しなければならない。剛性が与えられる自由度は S セット(SPC)に出てきてはならない(特異)。これは必ずしも独立自由度に限ったことではない。

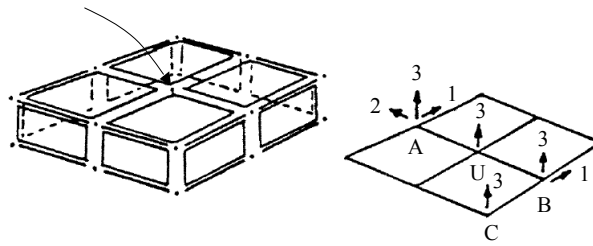
以下に上に列挙した剛な荷重経路の適用に関する説明を示す。

4.1 モデルの不安定の除去

「AUTOSP」を使えばモデルの真の不安定や非常に不安定に近い状態を取り除くことができるが、GRID カードの第 8 欄を使うか、GRDSET カードを使うほうが望ましい。GRID カードや GRDSET カードを使うと節点の特定の自由度を拘束することができる。しかし、不安定に近い状態は自動的にには取り扱えないので、ユーザーが剛体要素を使って取り除く必要がある。いくつかのよくある状況を以下に示す。

- 支持されていない外板パネル(図 4.1-1)。内部構造のモデルよりも細かいメッシュを外板に使うと、外板は曲げ剛性を持っていないので、内部構造に結合されていない外板の節点の面外方向の剛性は非常に低い。これらの節点を拘束しないと、非常に大きな局所変形(数メートル)が起き、外板の局所的な面内剛性が減少してしまう。
支持されていない自由度だけを RBE1 要素を使って近接する固い点につなぐとよい。これによって発生する荷重は小さく、GPFORCE Balance で確認することができる。
- CSHEAR 要素の不安定(図 4.1-2)。翼の桁やリブのせん断ウェブのモデル化において、フランジの CRDO 要素が CSHEAR 要素のこの方向の軸力に対する不安定を取り除いているが、翼の厚さ方向の軸力に対する剛性はモデル化においてふつうは無視され、これが不安定の原因となる。この不安定はウェブの上の節点と下の節点の翼厚方向の自由度を RROD 要素で結ぶことで除去することができる。
- 面内の大きな回転の除去(図 4.1-3)。NASTRAN の板要素は、他の有限要素法パッケージと同様に、節点における面内回転の自由度をサポートしていない。したがって、これらの板要素には潜在的な特異性があるが、曲げ板要素を使った平面のモデルにおいては特異性が自動的に除去される。しかし、わずかにカーブした曲面では、板の面外剛性の小さな成分が積み重なって面内回転剛性を生成する。AUTOSP ではこの特異性を除去できないので、大きな回転が生じる。この回転は RBE1 要素でこの有害な自由度を局所的な面内剛性と結びつけることで除去できる。

中央の節点は内部構造で支持されていない

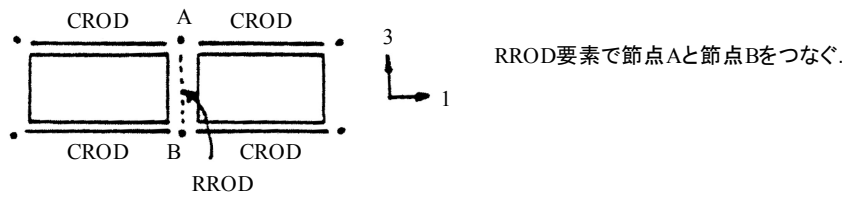


中央の節点 U の自由度 3 を、節点 A の自由度 1, 2, 3 と節点 B の自由度 1, 3 と節点 C の自由度 3 に従属させる。

RBE1	ID	A	123	B	13	C	3
+	UM	U	3				

↑
↑
 従属節点と従属自由度

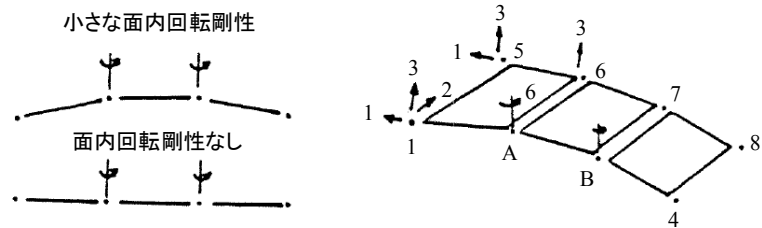
図 4.1-1 支持されていない外板パネル



RROD要素で節点Aと節点Bをつなぐ。

RROD	ID	A	B	3		節点 A の自由度 3 が従属自由度
------	----	---	---	---	-------	--------------------

図 4.1-2 CHEAR 要素の不安定



RBE1	ID	1	123	5	13	6	3
+	UM	A	6				

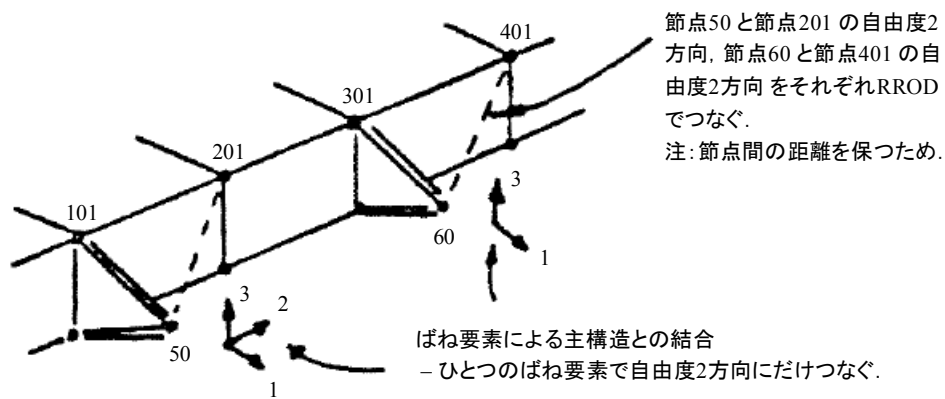
図 4.1-3 面内回転

4.2 局所的な変位の付与

詳細なモデル化でないと実現できない荷重経路を作るために、不安定な節点(特異点)にその場所の変位を与えることがしばしば必要になる。このような場合には、剛体要素で荷重を伝えることができるが、ひとつの荷重経路しかないことが必須である。

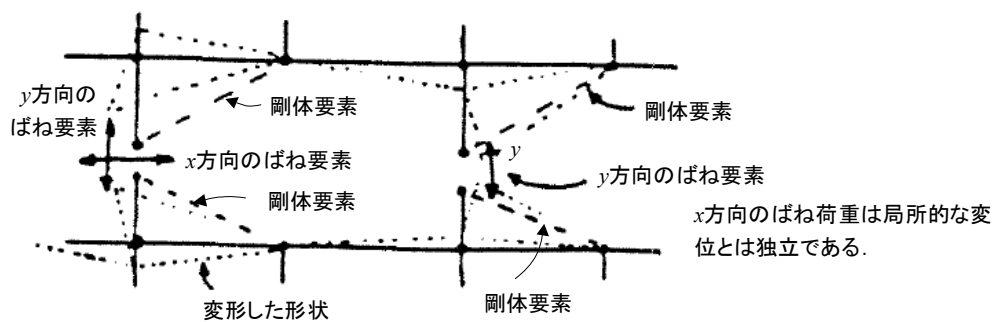
2次元の面内要素でブラケットをモデル化すると、面外には不安定である。このような場合に、RROD 要素で面外荷重を主構造に伝えることができる(図 4.2-1)。RROD 要素はブラケットの節点を主構造の節点に指定したグローバル自由度の方向につなぎ、その2つの節点の固定された距離を保つ。複数のブラケットにも同様の処置をとることができるが、冗長性のある荷重経路とならないように気をつける必要がある。

警告: クローズした荷重経路を形成した場合には、この強制的な変位の付与により非現実的な荷重が発生する。このように、ブラケットによって結合された2つの構造の不安定性を剛体要素で除去するときに、剛体要素によって2つ以上の荷重経路が存在すると、発生した相対変位のために構造内に非現実的な荷重が発生する。



RROD	ID	201	50	2	}	節点 201 の自由度 2 が従属自由度
RROD	ID	401	60	2		節点 401 の自由度 2 が従属自由度

① 剛体要素による結合でx方向に冗長性がない結合



警告:

② 剛体要素による結合でx方向に冗長性のある結合

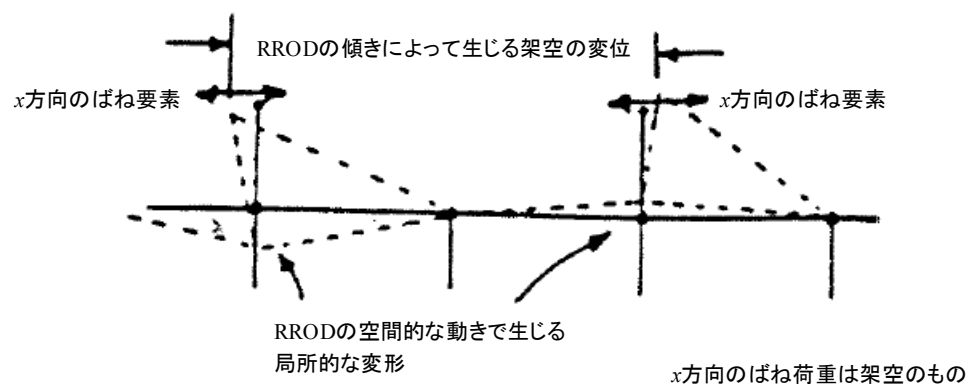


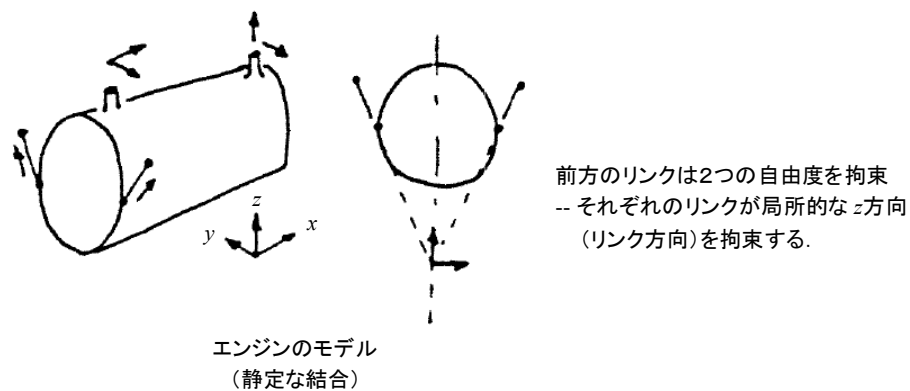
図 4.2-1 ヒンジブラケット

4.3 非常に剛な構造

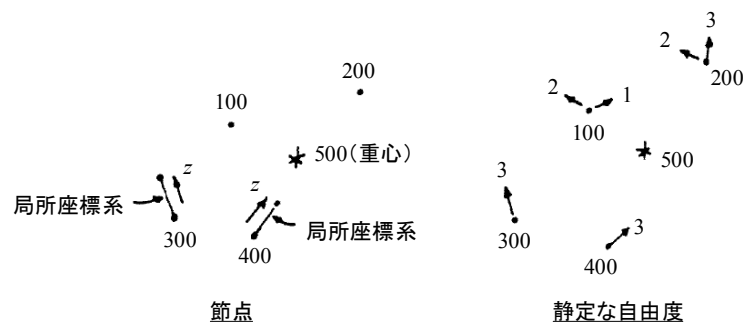
NASTRAN はその計算のなかで剛性マトリックスを作成し、その逆マトリックスを計算しているので、剛性マトリックスの性質が悪化する(特異になる)ようなモデル化を避ける必要がある。非常に剛性の高い要素をモデルに含むことは剛性マトリックスの性質を悪くするもののひとつである。これは、剛性マトリックスの成分の値の範囲が大きくなるからである。

非常に剛性の高い構造は、エンジン、脚、分厚い金具等である。これらはモデル化すると剛性マトリックスの性質を悪くし、ありそうもない解析結果が得られる(ふつう「Epsilon」と「Diagonal Ratio」の値が高くなる)。

これらの構造は剛体要素を使ってモデル化するのがよい。エンジンの場合には、ひとつの RBE1 要素を使って重心位置の節点を主構造側の結合点につなぐことにより、エンジンと主構造の静定的な結合をモデル化できる(図 4.3-1)。



このような構造をモデル化しないこと → 剛体要素を使うこと。



RROD	ID	100	12	200	23	300	3
+		400	3				
+	UM	500	123456				

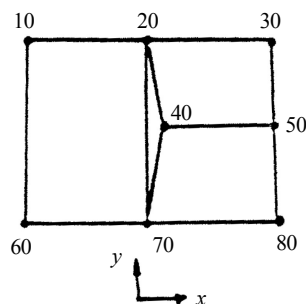
図 4.3-1 エンジンの結合

4.4 メッシュサイズの変更と異なる種類の要素の結合

メッシュサイズの変更は通常のモデル作成の方法で行うこともできるが、場合によっては通常の方法では不便であったり、既存の要素の辺の中間に節点を直接作成することが必要になることがある。このために高次の要素を使うことは推奨できない。この中間節点に平均変位を与える剛体要素を使うべきである(図 4.4-1)。ただし、この手法を荷重が急激に変化する場所には用いるべきではない。

荷重経路の連続性を保ちながら種類の異なる要素を結合する必要がある場合に剛体要素を用いる。よくあるのは曲げ板要素をソリッド要素に結合することである(図 4.4-2)。曲げ板要素(CQUAD4)が CHEXA 要素のひとつの面と一致していれば、RBE1 要素を使って CHEXA 要素のコーナーの荷重の差として曲げモーメントを CQUAD4 に伝えることができる。

曲げ板要素を CHEXA 要素の中央に結合するには、MPC を使って CHEXA 要素のコーナー荷重の平均をせん断荷重として伝え、2つの RBE1 要素を使ってコーナー荷重による曲げモーメントを伝える。



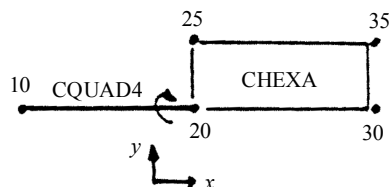
メッシュサイズを変更するために節点 40 を作成する。

y 方向の剛性は許容できる。

x 方向の剛性は節点 20 と節点 70 の平均から出る。

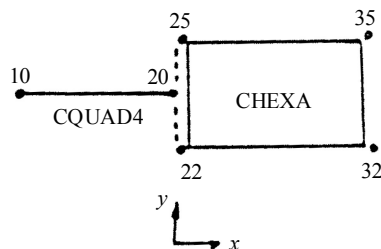
RBE1	ID	20	123	70	13	60	3
+	UM	40	1				

図 4.4-1 メッシュサイズの変更



CQUAD4 要素の節点 20 位置での曲げの回転は CHEXA 要素に RBE1 要素を使って伝える。

RBE1	ID	20	123	25	13	35	3
+	UM	20	6				



MPC を使って節点 20 の y 方向変位と節点 22 と節点 25 の y 方向変位の平均を結合する。

2つの RBAR 要素を使って CQUAD4 要素の曲げの成分を節点 22 と節点 25 に伝える。

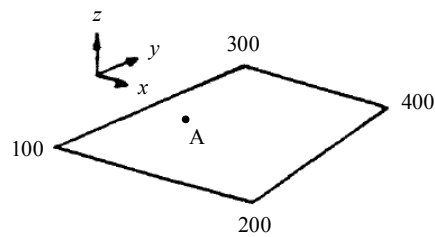
MPC	ID	20	2	1.0	25	2	-0.5
+		22	2	-0.5			
RBAR	ID	20	25	123456			13
RBAR	ID	20	22	123456			13

図 4.4-2 異なる種類の要素の結合

4.5 平均的な動きの取得

選択した節点と自由度の静定的な動きに従属した点の動きを RBE1 要素を使って決めることができる。この方法の使い方のひとつは、モデルの節点とは一致していない空力弾性計算用の点の動きを取り出すことである(図 4.5-1)。その他の RBE1 要素の用法は、構造間のインターフェース点として部分モデルにない点を定義することである(図 4.5-2)。この使い方をするときには注意すべきことは、RBE1 要素の節点として柔らかい点を選ばないようにすることである。そうでないと不適切なインターフェース荷重が計算される。

RBE3 要素は、任意の数の節点の平均的な動きをあるひとつの節点に付与する機能を持つ。この要素のふつうの使い方は、胴体フレームの平均の動きを計算することで(図 4.5-3)、まず「固い」点のグループを選び、次に胴体の中心位置に新しい節点を定義する。RBE3 要素をすべての「固い」節点の動きに結合する。選択した節点に重み係数を与えることにより、柔らかい点の寄与を小さくすることができる。

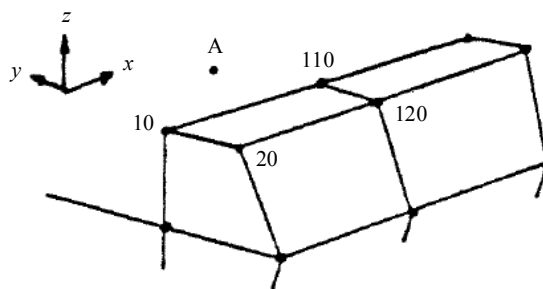


点 A の z 方向変位は節点 100, 節点 300, 節点 400 の z 方向変位の平均である。

節点 100 と節点 300 が一直線上にあると、節点 400 の変位は点 A の変位に影響を与えない。

RBE1	ID	100	123	300	13	400	3
+	UM	A	3				

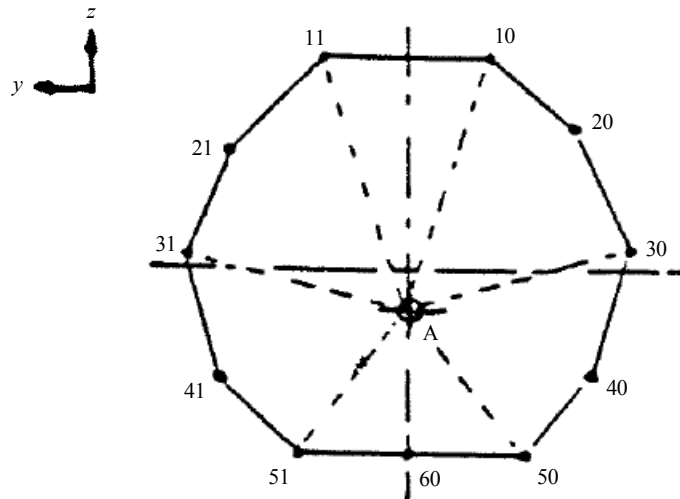
図 4.5-1 任意位置の点の変位



点 A の内挿に使う点(節点 20, 節点 10, 節点 120)は「固い」節点であることを確かめること。

RBE1	ID	20	123	10	13	120	3
+	UM	A	123				

図 4.5-2 結合点



点 A の位置でフレームの6つの節点の平均変位を取得する。

注意: 点 A が従属点であることが許されるならば, 「UM」に関するデータは削除できる。

RBE3	ID	A	123456	1.0	123	10	11
+	30	31	50	51			
+	UM	10	123	31	13	50	2

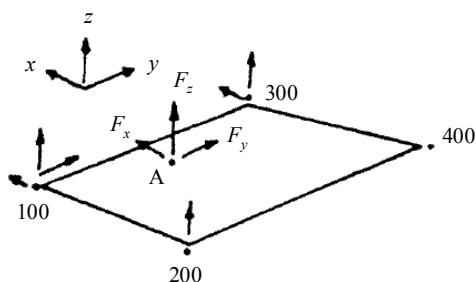
図 4.5-3 フレームの動きの平均

4.6 負荷荷重の分配

どの節点とも異なる点へ荷重を負荷するには, 荷重点に新たに節点を作成し, 剛体要素を使ってその点から既存の節点に荷重を分配する。

RBE1 要素を使えば静定的に3つの点への荷重の分配ができる(図 4.6-1)。

胴体の一般的な点からフレーム上の選んだ点へ荷重を分配するには RBE3 要素を使う(図 4.6-2)。この荷重分配はボルトのグループ解析と同様に行われる。この方法は粗い分布荷重の胴体への荷重負荷に用いられる。



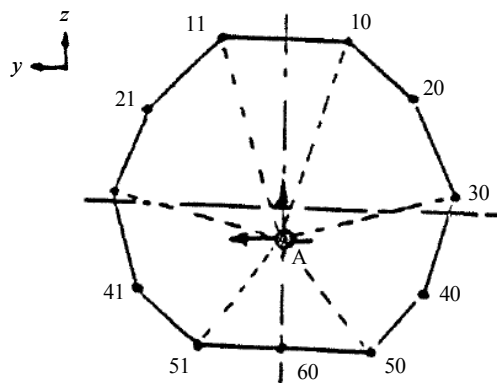
垂直荷重 F_z を節点 100, 節点 200, 節点 300 に負荷する。

水平荷重 F_x を節点 100 に負荷し, z 軸周りのモーメントは節点 100 と節点 300 の $\pm x$ 荷重でとる。

横方向荷重 F_y を節点 100 に負荷し, z 軸まわりのモーメントは節点 100 と節点 300 の $\pm x$ 荷重でとる。

RBE1	ID	100	123	200	3	300	12
+	UM	A	123				

図 4.6-1 RBE1 要素を使った荷重の分配



点 A に負荷される荷重が選ばれた節点に「ボルトのグループ解析」の要領で分配される。

注意: 点 A が従属点であることが許されるならば, 「UM」に関するデータは削除できる。

RBE3	ID	A	123456	1.0	123	10	11
+	30	31	50	51			
+	UM	10	123	31	13	50	2

図 4.6-2 RBE3 要素を使った荷重の分配

4.7 節点における自由度の向きの変更

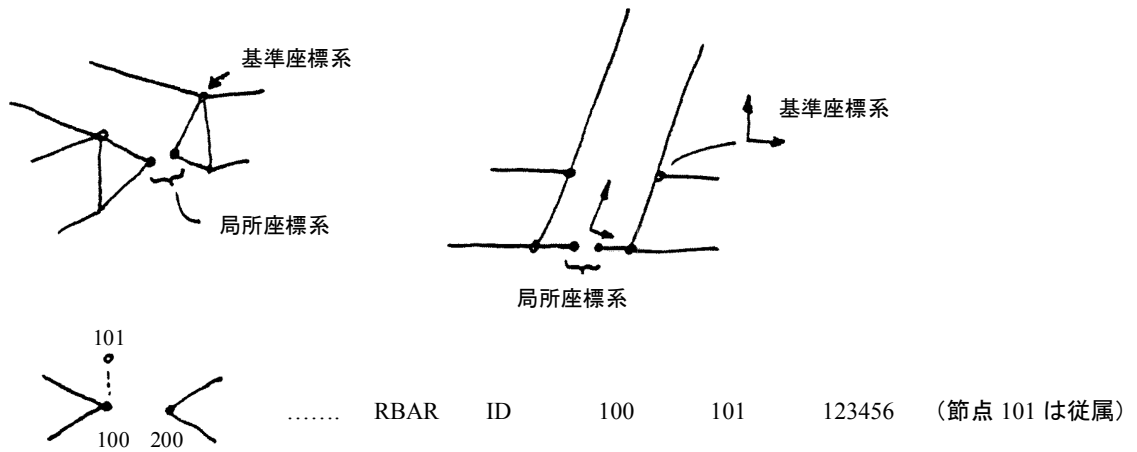
「グローバル自由度」は GRID カードの第 7 欄で定義され, この欄に定義された座標系がどれであれ, 変位に関連するデータはすべてこの座標系で扱われる。傾いたフレーム等の節点は局所座標系で定義され, グローバル自由度もこの座標系となる。

グローバル自由度の座標系でない座標系に関する変位が必要なことがあるが, 同時にグローバル座標系を変えたくない他の理由がある場合がある。たとえば, ヒンジ点がヒンジラインの座標系の方向, すなわちグローバル自由度の方向にばね要素で結合されているが, 変位は主構造の座標系で出力したいということがある(図 4.7-1)。

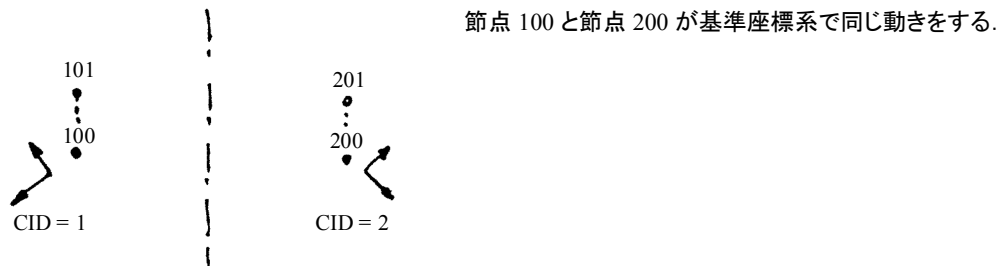
同じ位置に必要なグローバル自由度を定義した新しいダミー節点を作成し, もとの節点とこのダミー節点を RBAR 要素でつなぐと, ダミー節点で必要な変位が得られる。このように, RRBAR 要素は同一位置の節点の組の座標変換に使える。

その他の RBAR 要素の用途には, MPC データの設定のための使用がある。MPC データは幾何学的な理由で同一の座標系でなければならない。既存の節点と同じ位置に新しい節点を作成し, RBAR 要素でつなぐ。そして, 新しい節点に MPC を適用する。ばね要素にも共通な問題であるが, ユーザーはこの節点の組が同じグローバル座標系であることを確かめる必要がある。

GRID	ID	CID	X	Y	Z	CD	PS
		↑				↑	
		位置を定義する座標系				グローバル自由度の座標系	



新しい節点のグローバル自由度は基準座標系の方角にとる.
 節点 101 の変位と主構造の変位を比較できる.



① 新しい節点 101 と 201 を基準座標系で作成する.

② RBAR でつなぐ.

RBAR	ID	101	100	123456	(節点 101 は独立)
RBAR	ID	201	200	123456	(節点 201 は独立)

③ MPC を作成する.

MPC	ID	101	1	1.0	201	1	-1.0
-----	----	-----	---	-----	-----	---	------

図 4.7-1 RBAR 要素によるグローバル自由度の変更

4.8 独立自由度と従属自由度について

上で説明したように、剛性要素の使用においては常に独立自由度と従属自由度を明示的または非明示的に区別することが必要である。

すべての従属自由度は「M セット」に区分され、特別に扱わないといけない。そうでないと、Fatal Error が起こる。したがって、これらはすべての剛体要素と拘束条件からは1回だけ参照されることを確かめなければならない。

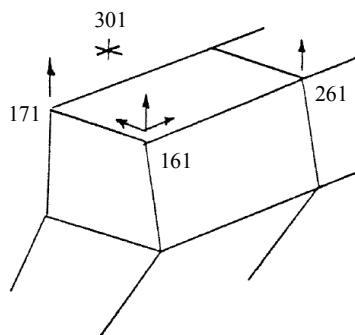
一般的に従属自由度は独立自由度の剛性を計算するのに使われ、静定的な自由度の関係を形成している。これらの自由度が特異であったり、代わりの自由度がその要素、自由度を変更する RBE1 要素、に見つからなかったりするとエラーが起こる。

特異な自由度が RBE3 要素で参照されると、わかりにくいエラーが起こる。

要素から剛性が生成されると NASTRAN が判断するので、「S セット」(AUTOSPC)はセットから除外される。したがって特異な自由度が知らず知らずのうちに間違って使用される。

4.9 RBE1 要素の従属自由度と独立自由度の入れ替え

RBE1 要素の従属自由度がスーパーエレメントの境界にある場合にその点が従属のままであると、Fatal Error が起こる。しかし、その境界の点が独立な点に変更されれば解は影響を受けない(図 4.9-1)。



RBE1 要素で節点 301 の自由度 1, 2, 3 方向に剛性を与える。

RBE1	ID	161	123	171	13	261	3
+		UM	301	123			

RBE1 要素で従属自由度と独立自由度を反転する。

RBE1	ID	301	123	171	13	261	3
+		UM	161	123			

図 4.9-1 RBE1 要素の従属自由度と独立自由度の入れ替え

5 拘束と支持

この拘束と支持は密接に関連している。構造の剛体としての動きを抑える簡単な拘束は、荷重が釣り合っていない場合には支持荷重(反力)を発生するからである。拘束と支持のために使用される要素は、「SPC」と「MPC」であり、それぞれ Single Point Constraint と Multi-Point Constraint を表す。その他の剛体要素を使うこともある。

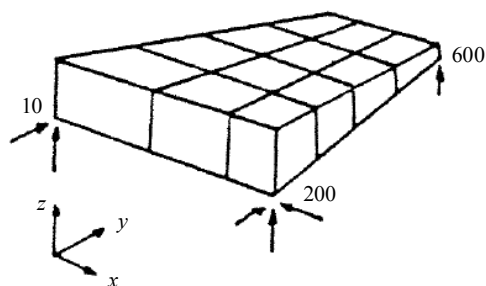
Case Control デッキで SPC=i と SPCFORCE=ALL と指定すると SPC を定義した節点の支持荷重 SPC Force が出力される。MPC や RBE 剛体要素で発生する他の荷重は関係する節点の GPFORCE Balance 出力の不釣り合い荷重でしか見ることができない。

拘束と支持の適用を以下に示す。

- 静定な支持
- 境界の拘束
- 変形した形状の付与
- 断面を平面に保つ
- MPC を使った拘束関係式

5.1 静定な支持

解析モデルの支持に対する最小限の要求はモデルが剛体運動を起こさないように支持されていることである。これは静定的な支持または拘束を意味する(図 5.1-1)。モデルに荷重が負荷されると、これらの支持点に反力が発生し、SPC FORCE が計算され、この値を釣り合い式でチェックできる。負荷荷重がそれ自身で釣り合っていれば、支持点の反力(SPC FORCE)はゼロか非常に小さい値となる。この場合には支持点の選び方は内部の応力分布に影響を与えず、支持点は変位の基準位置であるに過ぎない。



これがどのモデルにも適用される最小限の要求である。

支持または拘束は 6 自由度の動きを制限できなければならない。

負荷荷重が釣り合っていなければ反力が SPC Force に出てくる。

SPC1	ID	1	200		
SPC1	ID	2	10	200	
SPC1	ID	3	10	200	600

図 5.1-1 静定的な支持

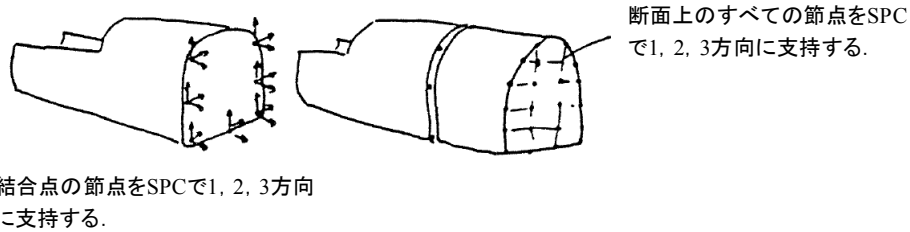
5.2 境界の拘束

通常は支持や拘束は冗長性がある。たとえば、前部胴体のモデルを考えてみると、分解可能な結合点で自由度1から3までを拘束するか、中部胴体のプラグに結合されプラグの端で自由度1から6までを拘束する(図 5.2-1)。

主翼は胴体のピックアップ・ラグで荷重をとれる方向の自由度を拘束される(図 5.2-2)。

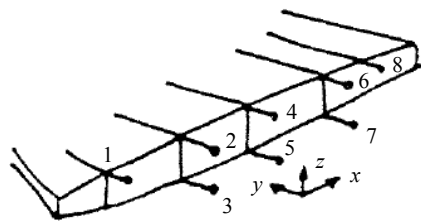
同様に、試験片のモデルは、解析対象の範囲から離れた断面で完全に固定されているとみなす(図 5.2-3)。

結合点の位置または断面のすべての節点でモデルを拘束する。



SPC1	ID	123	100	110	120	121	130
------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----------

図 5.2-1 胴体の結合部の拘束



SPC1	ID	3	1	8	 上下せん断	
SPC1	ID	23	2	3	5	6 7
					 上下せん断と曲げ	
SPC1	ID	123	4		 上下せん断と曲げと前後力	

図 5.2-2 主翼の根元の拘束

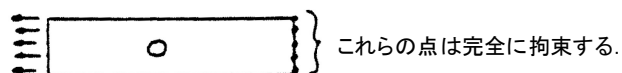


図 5.2-3 試験片の拘束

5.3 変形した形状の付与

SPC カードには節点やグローバル自由度に変位を指定する機能がある。この機能を使えば、構造の一部分の詳細モデルに全体構造の解析で得られた境界の形状を強制変位として与えることができる(図 5.3-1)。しかし、この方法は危険であり、境界の荷重を付与する方法のほうがよい。

もっとふつうの使い方は配管の解析への適用である。配管が取り付けられた構造の最大変形ケースから得られた取付点の変位を配管モデルに負荷する。たとえば、主翼の燃料配管モデルに取付点の最大変位を与える場合である(図 5.3-2)。

他の荷重ケースとともに強制変位をサブケースのレベルで与えるには SPCD カードを使う。したがって、複数の強制変位のケースを荷重ケースとして与えることができる。

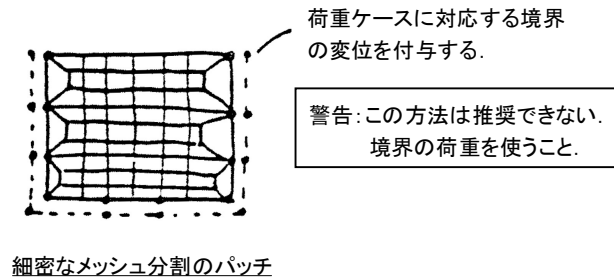
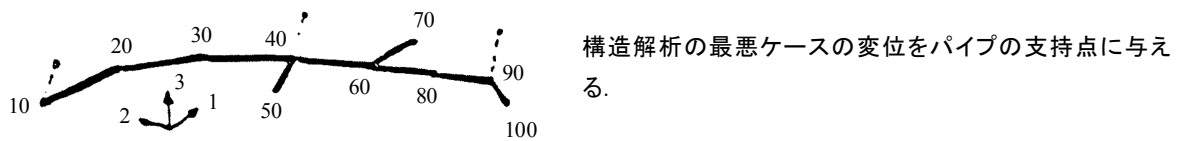


図 5.3-1 境界への強制変位の付与



SPC	ID	10	3	8.0	10	1	2.0
SPC	ID	40	2	25.0	4	1	8.0
SPC	ID	90	3	83.0	90	1	12.0

他の方法としてサブケースのレベルで SPCD カードを使って変形を与える。

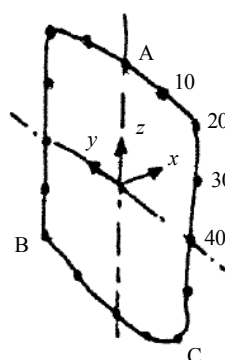
SUBCASE 1					
LOAD = 100					
SUBCASE 2					
LOAD = 200					
:					
SPCD	100	10	3	8.0	} 荷重ケースとして変形を与える.
SPCD	100	10	1	2.0	
:					
SPCD	200	10	2	12.5	
:					

図 5.3-2 配管のモデル

5.4 断面を平面に保つ

構造の一部が分離されてモデル化された場合にこの方法が必要となる。梁理論の条件が境界に付与される。この条件は、変形前に平面だった断面が変形後も平面を保つというものである。RBE1 要素を使って、断面の節点の変位を3つの基準点に結びつけることにより、この条件を実現できる(図 5.4-1)。2次元モデルの場合にはこの方法はモデルの面を変形後も直線に保つことに使える。

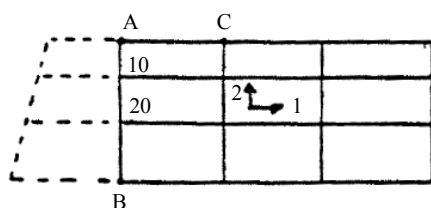
この方法は平面を強制するので、自己平衡系の節点荷重を生じ、この荷重状態は断面の GP FORCE Balance で確認できる。



梁理論の条件を満たすために断面の平面を保持する。

RBE1 要素で、断面上の節点における面外の自由度を基準点 A, B, C に関連づける。

RBE1	ID	A	123	B	12	C	1
+	UM	10	1	20	1	30	1
+		40	1	等			
+							



フレーム断面が一平面を保つが、必ずしも yz 面に平行ではない。
2次元モデルの場合、端面 AB は直線を保つ。

RBE1	ID	A	123	B	13	C	3
+	UM	10	1	20	1		

図 5.4-1 断面を平面に保つ

5.5 MPC を使った拘束関係式

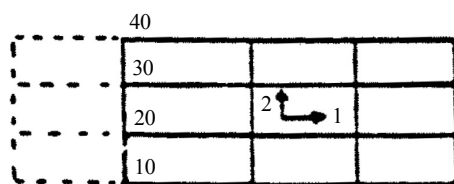
複数の節点の変位を関連づける方程式を解くことによりそれらの節点の挙動を定義するのが「MPC」である。通常はこれらの方程式は釣り合っていないからではない。そうでないと、モデルは釣り合いを保てず、荷重状態が影響を受ける。

MPC の一般的な式は次のとおりである。

$$u_{xa} + u_{xb} + u_{xc} + \dots = 0.0 \quad \text{すなわち、すべての変位の合計がゼロ。}$$

MPC のひとつの使用例は、複数の節点の変位を等しくすることである。簡単な4節点の断面を考え、節点に同じ x 方向の変位を与える(図 5.5-1)。2つの外側の節点に同じ変位を与え($u_{xa} = u_{xb}$)、内側の2節点は外側の節点の変位にともなって線形に変化する変位となる。

2つの構造間のヒンジのように、同じ位置にある節点間の指定した方向の荷重を伝達するのに MPC を使う(図 5.5-2)。この場合でも方程式は、 $u_{xa} = u_{xb}$ または、 $u_{xa} - u_{xb} = 0.0$ である。



同じ変位を複数の節点に与える.

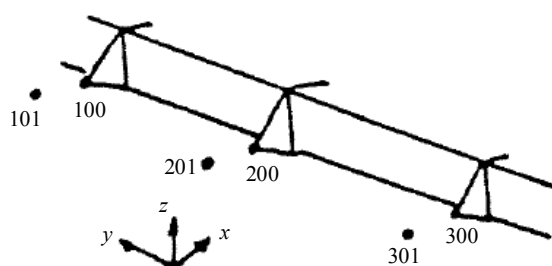
$$\Delta x_{10} = \Delta x_{40} \quad \text{または,} \quad \Delta x_{10} - \Delta x_{40} = 0.0$$

MPC	ID	10	1	1.0	40	-1.0
-----	----	----	---	-----	----	------

節点 20 と 30 は MPC を使って節点 10 と 40 の変位を内挿する.

MPC	ID	20	1	1.0	10	-0.6667
+		40	1	-0.3333		
MPC	ID	30	1	1.0	10	-0.3333
+		40	1	-0.6667		

図 5.5-1 同じ変位を複数の節点に与える



同じ位置の節点の組, 100, 101 等

節点 100 と 101 は x, z 方向の荷重をとる.

節点 200 と 201 は z 方向の荷重をとる.

節点 300 と 301 は x, y, z 方向の荷重をとる.

MPC カードは次のようになる.

MPC	ID	100	1	1.0	101	1	-1.0
MPC	ID	100	3	1.0	101	3	-1.0
MPC	ID	200	3	1.0	201	3	-1.0
MPC	ID	300	1	1.0	301	1	-1.0
MPC	ID	300	2	1.0	301	2	-1.0
MPC	ID	300	3	1.0	301	3	-1.0

図 5.5-2 構造間の荷重伝達

6 誤差を小さくするには

NASTRAN は変位法に基づく有限要素法のプログラムであり、すべての計算結果は剛性マトリックスと節点の変位の解から得られる。したがって、いろいろな荷重条件下での各要素の剛性をできるかぎり正確に表現する必要がある。不適切な剛性を持つ要素を使うと解の精度が低下し、最終的に得られる応力分布の精度も落ちる。

最近の空力弾性の要求に基づく構造最適化の発展により、特にフラップ等の重要な構造の変形を正確に求めることの必要性が明らかになってきた。

要素の形状が不規則でなく、ねじれていない場合、たとえば長方形で平面である場合には、要素の剛性の導出は簡単である。しかし残念なことに、NASTRAN は考えられるあらゆる形状を取り扱わなければならない、要素の形が不規則な場合には、許容できる剛性マトリックスを導出するのは困難である。あらゆる要素は純引張や純圧縮の荷重状態では形によらず正確な剛性を持つ。

1984 年 3 月の NASTRAN Application Note は要素の精度を取り扱っており、大きな誤差が発生する特別な状況について説明している。誤差を検出する方法は、理論的な剛性がわかっている規則的な形状を持った構造を、規則的な要素、および不規則的な要素で細かく分割して解析するものである。単純な荷重ケースに対する変位を比較することにより、要素種や要素形状による剛性の精度を評価することができる。

NASTRAN Application Note の結論は、すべての要素種はロッキングまたはある特別な状況におけるメカニズムにより精度が落ち、すべてのテストに合格する要素種はないということである。これらの精度の悪い状況を知っていれば安心して使える。

6.1 片持ち梁のテスト

片持ち梁を使った評価を図 6.3-1 に示す。規則的な要素分割を使うと、すべての要素種はすべての荷重条件でよい結果を示す。台形と平行四辺形の要素を使うと、せん断変形が理論値の 5%にしかならない場合がある。CQUAD4 要素は面内せん断の場合にのみ精度が劣る。CHEXA 要素は面内せん断と面外せん断の両方のケースで精度が悪い。期待するとおり、高さ方向の要素分割を増すと精度が向上する。

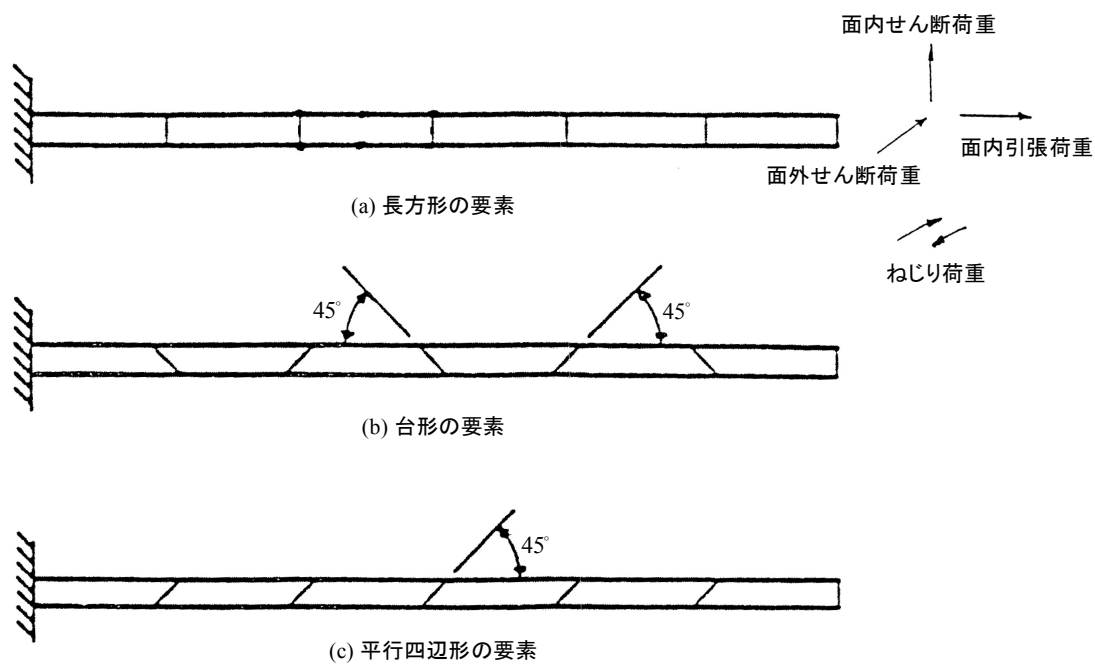
6.2 長方形板のテスト

長方形の板に一樣荷重または点荷重を負荷する場合の評価を図 6.3-2 に示す。CHEX20 要素を除いてすべてのケースで中央点での変位の誤差は小さい。CQUAD4 要素では、メッシュサイズが粗い場合と細長い形状の場合に精度が悪くなる。

6.3 誤差を小さくするモデル化の方法

長い期間にわたって British Aerospace 社 Warton で要素種のテストを行ってきたが、上の結果と同様の結論を得ている。実際のモデルの比較から以下の勧告を導き出した(図 6.3-3)。

- 大きい荷重が入力される場所に不規則な形状の要素を使うことを避けること。細長比の小さい長方形要素を使うこと。剛性の精度劣化を生じる原因は大きな歪勾配である。端の荷重が一樣であれば正確に扱われる。
- フラップのような変形が重要な構造では、メッシュサイズはコード方向に少なくとも4つはとるべきである。メッシュサイズが2であると、ねじり剛性が 100%大きく(2倍に)算出される。
- 大きい荷重が入力される場所ではメッシュサイズを小さくして、少なくとも2要素はなれた場所からメッシュサイズを粗くすること。
- 面外方向の変位が重要である場所では、不均等なソリッド要素を使わないこと。CQUAD4 曲げ要素を使うこと。



理論値でノーマライズした荷重方向の変位

荷重の種類 CQUAD4 CQUAD8 CHEXA(8) CHEX20 CHEX20(R)

(a) 長方形要素

引張	0.995	0.999	0.988	0.994	0.999
面内せん断	0.904	0.987	0.981	0.970	0.984
面外せん断	0.986	0.991	0.981	0.961	0.972
ねじり	0.941	0.950	0.910	0.904	0.911

(b) 台形要素

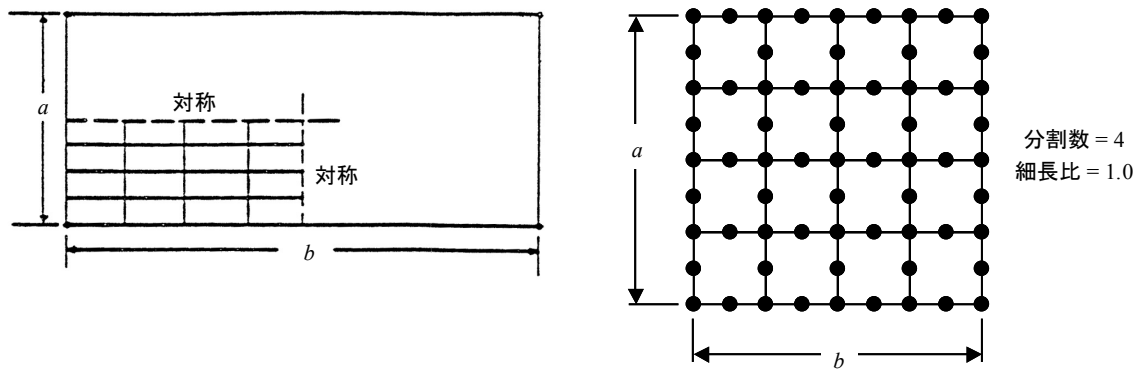
引張	0.996	0.999	0.989	0.994	0.999
面内せん断	<u>0.071</u>	0.946	<u>0.069</u>	0.886	0.964
面外せん断	0.968	0.998	<u>0.051</u>	0.920	0.964
ねじり	0.951	0.943	0.906	0.904	0.918

(c) 平行四辺形要素

引張	0.996	0.999	0.989	0.994	0.999
面内せん断	<u>0.080</u>	0.995	<u>0.080</u>	0.967	0.994
面外せん断	0.977	0.985	<u>0.055</u>	0.941	0.961
ねじり	0.945	0.965	0.910	0.904	0.913

注: CHEX20(R)要素では梁の剛性マトリックスが特異となったにも関わらずよい精度がよい結果が得られた。

図 6.3-1 片持ち梁のテスト



(a) 単純支持の長方形平板に均等圧力を負荷した場合

辺の分割数*		理論値でノーマライズした中心での面外変位				
		CQUAD4	CQUAD8	CHEXA(8)	CHEX20	CHEX20(R)
細長比 = 1.0	2	0.981	0.927	0.989	0.023	1.073
	↑	4	1.004	0.996	0.998	0.738
	↑	6	1.003	0.999	0.999	0.967
	↑	8	1.002	1.000	1.000	0.991
細長比 = 5.0	2	1.052	1.223	0.955	0.028	1.139
	↑	4	0.991	1.003	0.978	0.693
	↑	6	0.997	1.000	0.990	1.055
	↑	8	0.998	1.000	0.995	1.026

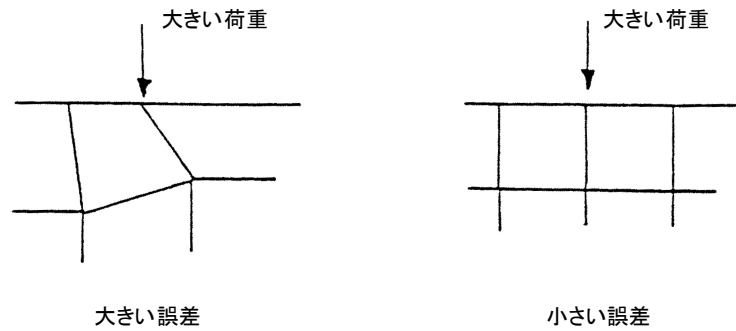
(b) 単純支持の長方形平板の中心に集中荷重を負荷した場合

辺の分割数		理論値でノーマライズした中心での面外変位				
		CQUAD4	CQUAD8	CHEXA(8)	CHEX20	CHEX20(R)
細長比 = 1.0	2	0.994	1.076	0.885	0.002	0.983
	↑	4	1.010	0.969	0.972	0.072
	↑	6	1.012	0.992	0.988	0.552
	↑	8	1.010	0.997	0.994	0.821
細長比 = 5.0	2	0.519	0.542	0.321	0.001	0.363
	↑	4	0.863	0.754	0.850	0.041
	↑	6	0.940	0.932	0.927	0.220
	↑	8	0.972	0.975	0.957	0.374

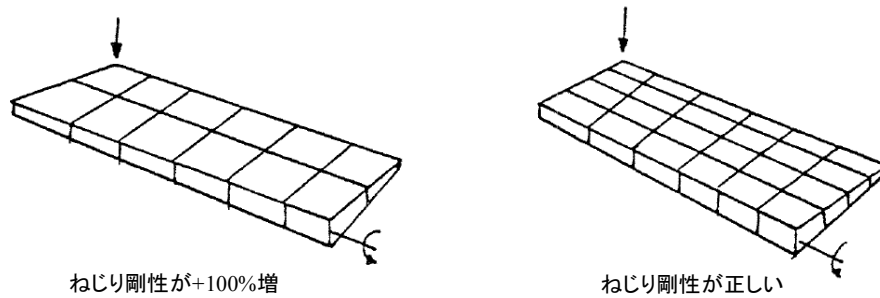
*注: 辺の中間点に節点がある要素では,「辺の分割数」はモデルの節点間隔数の半分である。

図 6.3-2 長方形板のテスト

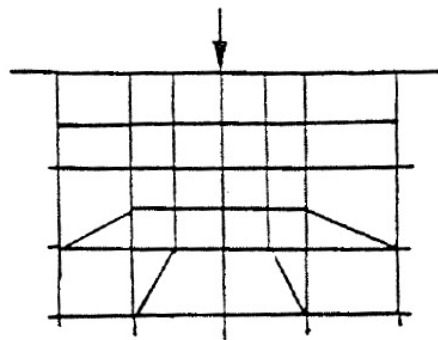
(a) 大きい荷重が入る場所には不規則な形状の要素を使わない。



(b) 薄い構造に粗いメッシュ分割を使わない。



(c) 大きい荷重が入る場所ではメッシュ分割を細かくする。



(d) 平行でない面を持つソリッド要素を面外曲げのかかる構造に使わない。

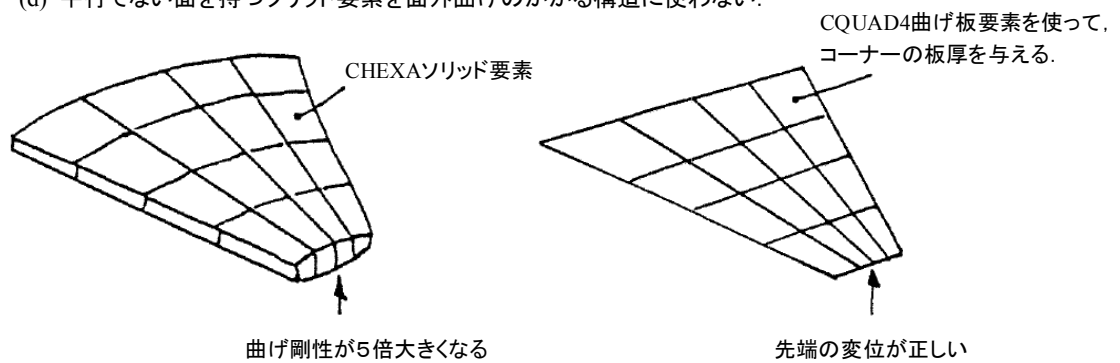


図 6.3-3 誤差を小さくする方法

7 荷重の負荷

荷重の負荷は構造解析の重要な一部である。荷重負荷がなければモデルは使いものにならないと言ってもよい。

モデルの作成の初めから負荷される荷重の種類を知っておくことが非常に重要であり、これはモデル作成に影響をおよぼす。間違った仮定にしたがうと、使えないモデルを作成することになったり、解析結果が意味のないものになってしまう。

荷重はいくつかの種類に分類できる。

- 対称成分と反対称成分
- 単位荷重ケース
- 分布荷重
- 圧力
- 慣性力
- 完全に釣り合ったケース

これらの荷重種類はNASTRANの荷重カードを使ってモデルに負荷できる。ふつうに使われる荷重カードは、「FORCE」、「MOMENT」、「PLOAD」カードである。荷重を組み合わせるには「LOAD」カードを用いる。ケース・コントロール・デッキでサブケースを線形に組み合わせる。

7.1 荷重カードの説明

荷重カードの説明を以下に示す。

(1) FORCE カード

FORCE	ID	G	CID	F	N1	N2	N3
-------	----	---	-----	---	----	----	----

FORCE カードは節点 G に大きさ F、座標系 CID の荷重の向きのベクトルが N1, N2, N3 の力を直接負荷するときに使う。たとえば、基準座標系の z 方向に 2.8kN の力を節点 200 に負荷する場合の FORCE カードは次のようになる。

FORCE	ID	200		2800.0	0.0	0.0	1.0
-------	----	-----	--	--------	-----	-----	-----

または、

FORCE	ID	200		1000.0	0.0	0.0	2.8
-------	----	-----	--	--------	-----	-----	-----

(2) MOMENT カード

MOMENT	ID	G	CID	M	N1	N2	N3
--------	----	---	-----	---	----	----	----

MOMENT カードは節点 G に大きさ F、座標系 CID の荷重の向きのベクトルが N1, N2, N3 のモーメントを直接負荷するときに使う。たとえば、基準座標系の M_x 方向に 5.0kN-m の荷重を節点 200 に負荷する場合の FORCE カードは次のようになる。

MOMENT	ID	200		5.0+6	1.0	0.0	0.0
--------	----	-----	--	-------	-----	-----	-----

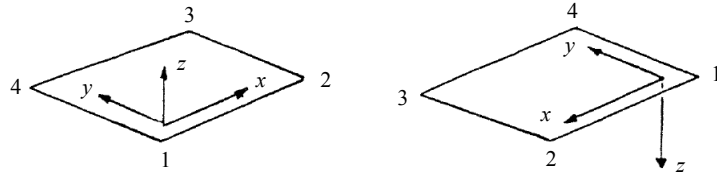
または、

MOMENT	ID	200		1000000.0	5.0	0.0	0.0
--------	----	-----	--	-----------	-----	-----	-----

(3) PLOAD カード

PLOAD	ID	P	G1	G2	G3	G4
-------	----	---	----	----	----	----

PLOAD カードは節点 G1 から G4 で定義される四辺形パネル、または節点 G1 から G3 で定義される三角形パネルに圧力を負荷するのに使われる。結果的に圧力はコーナーの節点に負荷されることになり、その方向は PLOAD カードに入力した節点の順序による。 x 方向は節点 G1 から G2 の方向となり、 y 方向はパネル面内に x 軸と垂直に定義され、 z 方向は右手系に作られる。圧力の向きは z 方向に働く場合を正とする。したがって、PLOAD カードの節点の順序を変えると圧力の向きが変わる(図 7.1-1)。、圧力の向きを変えるには、パネルの節点の順序を変えるのではなく、圧力の値の符号を変えてもよい。



正(+)の圧力の向きは要素座標系の z 方向である。

図 7.1-1 PLOAD カードの荷重の向きの定義

(4) PLOAD2 カード

PLOAD2 ID P E1 E2 E3 E4 等

これは一定圧力をパネル要素 E1, E2, E3 等に負荷するもっとも簡単な入力方法のカードである。正の圧力の向きは要素座標系の z 方向である(図 7.1-1)。荷重が想定したように負荷されていることを確認する必要がある。

(5) PLOAD4 カード

PLOAD4 ID EID P1 P2 P3 P4

この圧力負荷用のカードはパネルの中で圧力が変化している場合に使い、コーナーの節点における圧力値を定義できる。圧力値 P1 は節点 G1 の位置での圧力、圧力値 P2 は節点 G2 の位置での圧力等で、節点 G1 から G4 はパネル要素を定義した結合順序と同じである。三角形要素の場合には P1 から P3 を入力する。正の圧力の向きは要素座標系の z 方向である(図 7.1-1)。

(6) LOAD カード

LOAD ID S S1 ID1 S2 ID2 S3 ID3

LOAD カードはこれまでに説明した荷重カードを組み合わせでひとつの荷重ケースにまとめるために使う。荷重ケース ID は、荷重ケース ID1 にスケール係数 S1 をかけたもの($ID1 \times S1$)と $ID2 \times S2$ と $ID3 \times S3$ 等を加えたものにさらに全体のスケール係数 S をかけたものになる。例を示すと、

空力荷重 ID = 10
慣性力 ID = 20
脚荷重 ID = 30

空力荷重のスケール係数を 2.0, 慣性力のスケール係数を -9.0, 脚荷重のスケールを 1.0, 全体のスケール係数を 1.5 とすると, LOAD カードは次のようになる。

LOAD ID 1.5 2.0 10 -9.0 20 1.0 30

7.2 荷重ケースの定義

モデルをチェックするために使う単純なケース以外のすべての荷重ケースはそのデータとともに、じゅうぶんな説明と定義が必要である。その必要な項目は以下のとおり。

- (1) 荷重ケースの名称： 荷重ケース番号等
- (2) 形態： 飛行パラメータ、重心位置、重量、ストアの有無とその詳細、燃料の状態等
- (3) 荷重の種類： 空力荷重、慣性力等
- (4) 荷重の向きの定義
- (5) 条件：プルーフ、終極（UF=...）
- (6) データセット名とデータの保存場所
- (7) 釣合いの情報： 基準点位置での合計

EFA (European Fighter Aircraft) では、すべての荷重ケースは首尾一貫した方法で、すなわち、荷重の向きの定義と釣合いの情報が機体の基準座標系の簡単に変換できるように、作成するという要求があった。 x 方向は後ろ向き、 y 方向は右向き、 z 方向は上向き、回転は右手系にとる。すべての加速度もこの座標系の向きにとる。左手系の座標系は使わない。

しかし、完全には実行できず、荷重の文書の中に同じコンポーネントに関してさえ座標系の混用が存在した。したがって、使われた座標系の向きをチェックし、座標系がわかっていれば、機体の基準座標系（またはモデルの座標系）に変換してチェックすべきである。

釣合いの情報は不可欠である。圧力や荷重を負荷することとこれらの荷重が正しいことをチェックすることは別のことである。荷重計算書から基準点に関する荷重の合計がわかっていれば、チェックは簡単である。もしそれが文書に載っていないならば、それを要求すべきである。

7.3 荷重のチェック

NASTRAN は負荷された荷重の合計を計算して出力するが、各荷重ケースの荷重を解析の前にチェックすることが重要である。

「PPS」荷重チェックプログラム（訳者注：PPS は British Aerospace 社の社内のソフトウェアと思われる。）はそのためにあり、Vax システムでオンラインで実行することができる。ある座標系に関する荷重の合計、せん断、モーメント、トルクが計算される。メインフレームの計算機で NASTRAN を実行するよりも、PPS を使うほうが早い。

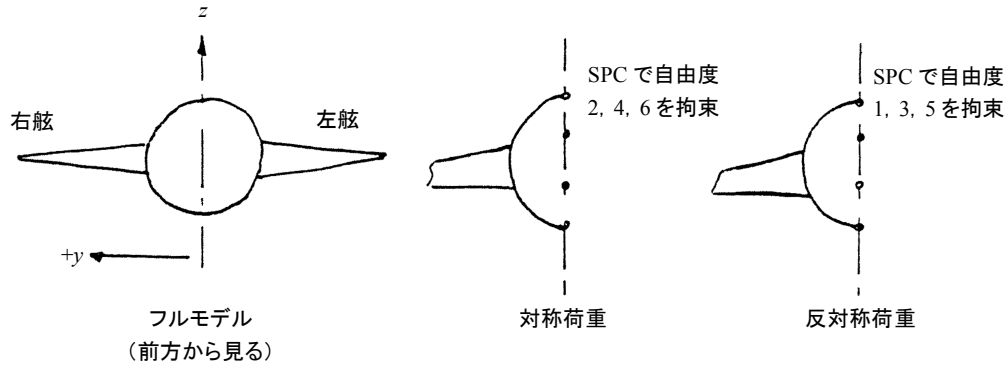
解析を実行する前にすべての荷重ケースを文書の値とチェックすべきである。

7.4 対称荷重成分と反対称荷重成分

特に胴体と主翼に荷重を負荷する場合には、荷重を対称荷重と反対称荷重のサブケースに分解することができる。胴体の半分だけしかモデル化しない場合にはこの方法が不可欠である。適切に支持した半載モデルにこの2つの荷重ケースを負荷する。対称に支持したモデルに対称荷重を負荷し、反対称に支持したモデルに反対称荷重を負荷する。

2つのサブケースを組み合わせることによって、対象ではない左舷と右舷の出力を得ることができる。この方法はどのような胴体と主翼の組立てや面対象の構造にも適用できる。

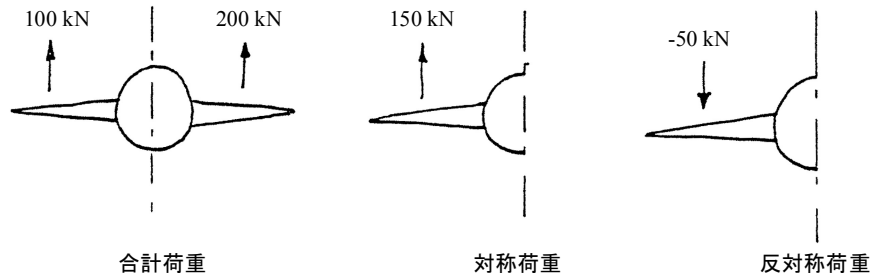
荷重ケースを分解する方法を図 7.4-1 に示す。



フルモデルの荷重を次の式を使って2つの成分に分解する.

$$\text{対称成分} = 1/2 \times (\text{左舷の荷重} + \text{右舷の荷重})$$

$$\text{反対称成分} = 1/2 \times (\text{左舷の荷重} - \text{右舷の荷重})$$



$$\text{実際の左舷の荷重} = \text{対称成分} + \text{反対称成分}$$

$$\text{実際の右舷の荷重} = \text{対称成分} - \text{反対称成分}$$

図 7.4-1 荷重の対称成分と反対称成分

7.5 単位荷重ケース

単位荷重ケースの定義は、単独で使用するため、またはスケール係数をかけて実際の荷重ケースを作るための荷重ケースである。単位荷重ケースの種類を以下に示す。

(1) チェック用のケース

単位せん断, モーメント, トルク等, 主翼やフラップの先端に負荷する単位荷重等。

(2) 実単位荷重ケース

1g 慣性力, 1.0N/mm² 内圧, 外装品取付荷重ケース, 脚荷重ケース等。

(3) バランス用ケース

座標系の原点で単位荷重となる分布荷重(粗い分布)の荷重ケース。モデルで実際の荷重ケースが完全に釣り合わない場合にこの荷重を使って釣り合わせるために使う。全機モデルの解析や荷重の合計がわかっているクリティカルで

はない荷重ケースを設定する場合に有用である。

(4) 構造のフレキシビリティを計算するための単位荷重ケース

フレキシビリティはふつう $[KAA]$ マトリックスの逆行列を計算して得る。しかし、この方法が使えない場合には、必要な各自由度に対する単位荷重を作成し、その結果として計算された変位をフレキシビリティとして使う。

(5) 剛体運動ケース

モデルに単位荷重を負荷するチェックには、6つの自由度に対応する剛体運動を与えるケースも含めるべきである。

構造を静的に支持しておき、SPCDカードを使って支持点の自由度に6自由度の剛体運動を付与する。そうすると、3つの方向への10mmの平行と3つの軸まわりの0.1ラジアン回転の合計6つのサブケースが必要である。

このモデルの解析を実行した結果、SPC荷重は発生してはならない。すなわち、剛体運動をモデルに与えても構造には応力が発生しないはずである。

このチェックはふつうに行われるチェックよりも厳格なので、モデルを外部に出すときにはこのチェックは特に重要である。

これらの荷重ケースを使う理由は以下のとおりである。

- (a) 構造の中で剛性の低い場所を支持している場合には発生する SPC 荷重が小さい。剛体運動ケースによるチェックでは、このような場合でも大きな SPC 荷重が発生するので、モデルの間違いを発見でき、モデルの修正ができる。

- (b) モデルがスーパーエレメントの合体の一部である場合、局所的な剛な支持のチェックでは大きな SPC 荷重を発見できない。しかし、合体されたときにその構造部分に大きな動きを与えると(たとえば、後部胴体についている尾翼は大きな剛体運動をする)、SPC 荷重が大きくなる可能性がある。

- (c) モデルを外に出すとき、または正式に発行・保存するときには、自由-自由(支持なしモデル)の剛性マトリックス $[KAA]$ は剛体運動チェックをするべきである。

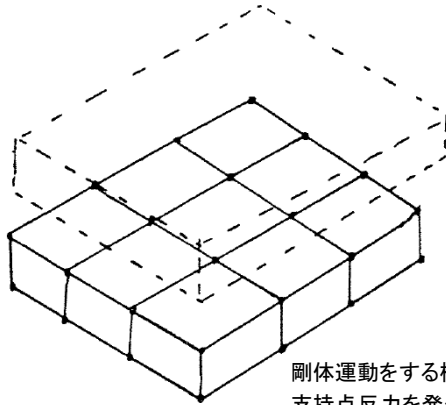
- (d) 上と同様に、自由-自由剛性マトリックスを受け取ったときには、使用前に必ず剛体運動チェックを行う必要がある。

チェックを行うために使う NASTRAN デッキには以下の項目が含まれていなければならない。

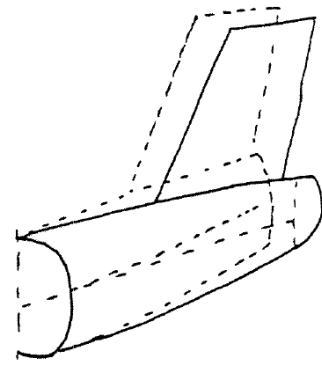
- ① 静定的な支持を SPC データで作成し、それをサブケースレベルで呼び出す。
- ② $LOAD = n$ ($n = 1 \sim 6$) を使って、6つの強制変位のサブケースを呼び出す。
- ③ ①で決めた自由度に対応する6つの荷重ケース(ID = 1~6)の SPCD データ。
- ④ サブケース(ID = 1~6)に対応するダミー荷重データ。

NASTRAN の実行時にすべての変位と SPC FORCE の出力を要求すること。各ケースの変位が与えた剛体運動と矛盾しないことと SPC FORCE が大きくないことを確認すること。

図 7.5-1 に剛体運動によるチェックの方法を示す。

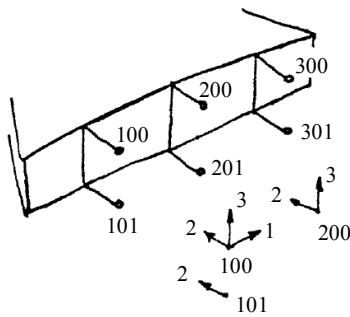


剛体運動をする構造は内部応力と支持点反力を発生しない。



尾翼は後部胴体について動く。

剛体運動チェックの方法



静定的な支持

SPC1	ID	1	100		
SPC1	ID	2	100	101	200
SPC1	ID	3	100	200	

SPCD データ

SPCD	1	100	1	100.0	} x 方向に 100mm
SPCD	2	100	2	100.0	
SPCD	2	101	2	100.0	
SPCD	2	200	2	100.0	
		:			
SPCD	4	100	2	20.0	} M_x 方向に 0.1 radian
SPCD	4	200	2	20.0	
SPCD	4	101	2	-20.0	
		:			
SPCD	6				

ダミー荷重のデータ

FORCE	1	100	0.0	1.0	0.0	0.0
FORCE	2					
:						

NASTRAN デッキの例

SPC = ID

DISPLACEMENT = ALL

SPCFPRCE = ALL

SUBCASE 1

LOAD = 1

.... SPCD = 1 の負荷

LABEL = 100mm X MOVEMENT

SUBCASE 2

LOAD = 2

.... SPCD = 2 の負荷

:

図 7.5-1 剛体運動によるチェック

7.6 点荷重

点荷重にはいろいろなものがある。

(1) 局部的に計算された荷重

モデル化されていない装備品の慣性力、脚荷重、エンジン荷重、取り付けられた構造からの荷重、たとえば、前翼のベアリングとジャッキ点と荷重負荷基準点が RBE1 要素で結ばれている場合には前翼荷重をこの基準点に直接負荷する。

(2) 計算された単純な荷重

試験片等に働く一様荷重から形状に基づいて簡単に節点荷重を計算できる場合。

(3) 直接負荷される荷重

荷重計算書で与えられる集中荷重

7.7 分布荷重

空力荷重と慣性力は別々にせん断荷重ダイアグラム、モーメント・ダイアグラム、トルク・ダイアグラムの形で与えられることが多い。有限要素解析技術者はこの荷重を節点に分配する必要がある。胴体場合には、ダイアグラムをブロックに分割して、このブロックの荷重をフレーム位置の負荷用節点に負荷する(図 7.7-1)。このフレーム荷重は必要に応じてそのフレームのすべての節点に負荷したり、負荷用節点を通して選択した「固い」節点に分配する(4.6 項参照)。最終的な分配した荷重が与えられた荷重の合計と一致していることを確認する必要がある。もし差があったなら、修正する。

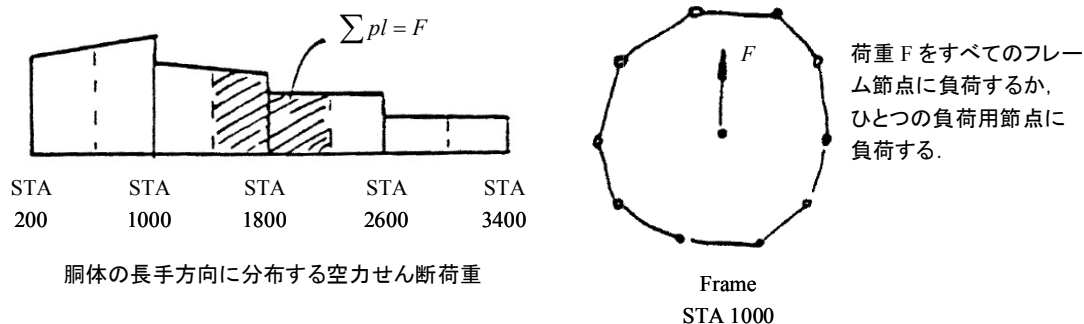


図 7.7-1 分布荷重の負荷

7.8 圧力

次のような場合にモデルに圧力を負荷する。

- 揚力を発生する翼面の圧力
- 内圧:キャビンの与圧, インテーク内圧, 燃料の圧力等
- 外圧:キャノピーの側面の圧力, レドームの圧力等

PLOAD カードを使って手でデータを入力するか,「PPS」プログラムを使って圧力データや燃料による内圧データを計算して入力データを作成する。

手入力による圧力の負荷はパネルの局所座標の問題があるので,ひとつの面ごとに段階的に負荷を行って釣り合うまで行うべきである。疑問が生じたらケースコントロールカードで OLOAD = ALL を指定して PLOAD を入力した節点荷重を出力し,力の向きをチェックすれば,間違いを見つけることができる。チェックのためには一定圧力ケースを実行するとよい。

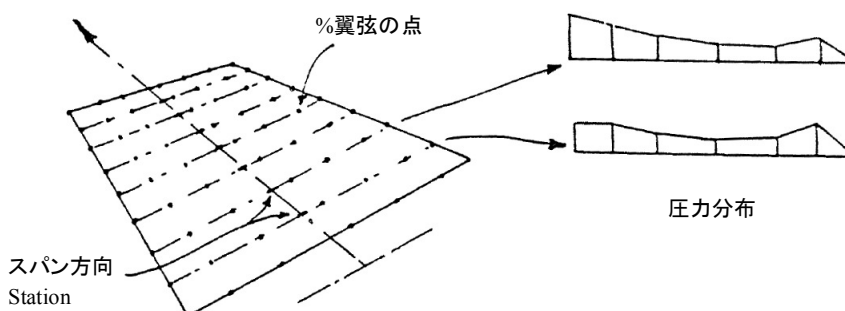
(1) PPS 圧力負荷プログラム

PPS プログラムを使うときには,メインフレーム上のファイルから元のデータを得る。そのデータは,翼幅方向の位置と翼弦方向の%位置のデータと,その位置における圧力データの表からなる(図 7.8-1)。PPS はこの圧力データを複数の面要素に負荷して荷重ケースに対応した一組の PLOAD カードまたは FORCE カードを生成する。

ユーザーは,圧力が負荷される面要素を指定し,もし舵面との間にすき間があれば,そのすき間を埋めなければならない。解析モデルの平面形状が荷重計算書の荷重が負荷される形状と異なる場合には,モデルを形成しているパネル要素の形状を修正するか,節点とパネル要素を追加して荷重計算書とまったく同じ形状になるようにする必要がある(訳者注:図 7.8-2 の中の記述でわかるように,このモデルの修正はあくまでも荷重のチェックを目的としている。モデルの荷重の合計が荷重計算書の合計荷重と一致していることを確認したあとで,モデルの形状を元にもどす。これが最後の段落の記述につながっている。)。両者の形状の差が非常に大きいときには,荷重計算書の出所にまでさかのぼって調べること。

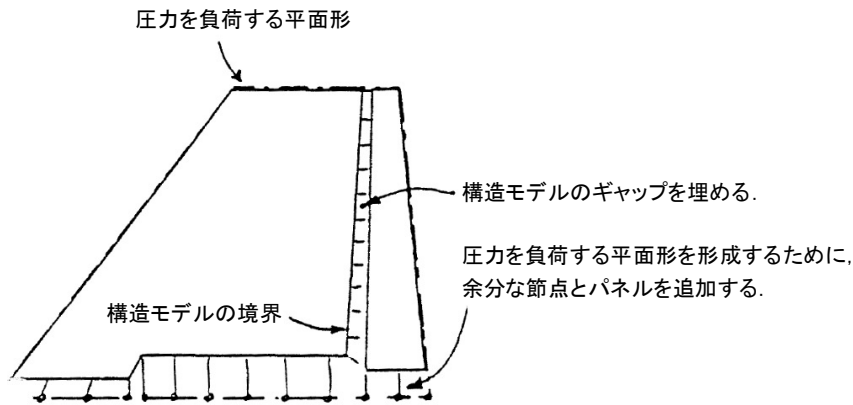
このようにして負荷した圧力荷重の合計は荷重計算書の合計値と一致しているはずである。

荷重負荷のための平面形状を修正した場合には,可能ならば解析条件を修正して荷重データを再作成するか,追加した節点への荷重負荷をやめるかのどちらかをとる。この修正を行うと,釣り合いケースに対しては解析用の荷重はもはや正しくないかもしれないので,修正を行ったことを特記するべきである(図 7.8-2)。



圧力データは,各%翼弦と各翼幅位置で設定されている。

図 7.8-1 圧力データ



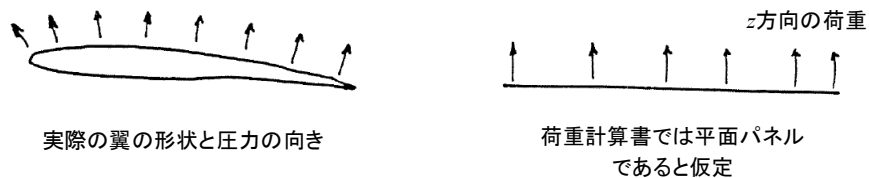
チェックを目的として、荷重負荷用のパネルを荷重計算書の平面形状と同じにする。
PPS プログラムを使って合計荷重を算出し、荷重計算書の合計値と比較する。両者は一致するはず。
追加した余分な節点への荷重を削除する。釣合いケースにおける荷重の減少には注意が必要である。

図 7.8-2 圧力を負荷する面の形状

(2) 圧力が負荷されるパネルの形状

空力面の荷重を計算する空力理論では空力面を平面の板であると仮定しており、荷重はこの平面に垂直に働くとしている。さらに、空力面が小さな上反角を持っていたとしても、荷重は機体座標の z 方向に働くとしている(図 7.8-3)。したがって、ユーザーは荷重の計算にどういう仮定が用いられているかを知って、モデルへの荷重負荷データ(一定の z 位置に、または局所座標系を使って平面に負荷する)を作成する必要がある。

しかし、実際の構造が曲面であることによって生じる抵抗や推力は上の圧力荷重データからは生成されないで、これらの影響は別途負荷しなければならない。



荷重計算書では平面の板であると仮定している。

正しい負荷荷重は、パネルの形状を $z = 0.0$ として計算したものである。

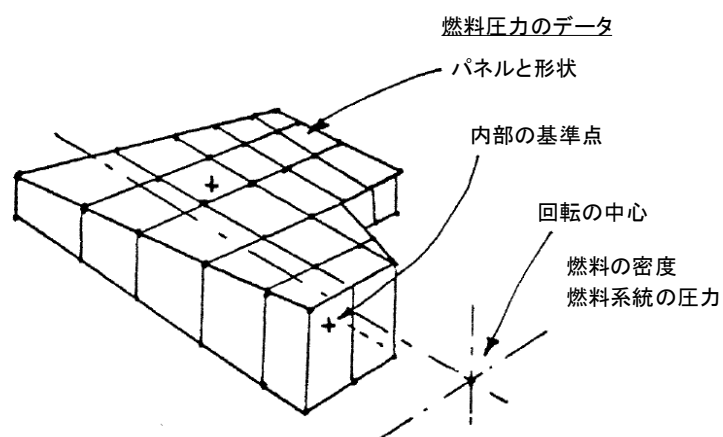
図 7.8-3 圧力の方

7.9 燃料圧力

PPS 燃料タンク圧力プログラムで燃料の内圧と、加速度と角加速度によって生じる燃料の慣性力の影響を計算できる。燃料タンクは、タンクの形状をあらわす一組のパネル要素とパネル要素のどちらの面がタンクの内側であるかを示すための複数の内部の点で定義される。慣性力の荷重ケースを示すコントロールデータ、回転の中心、燃料の密度、燃料システムの圧力も必要である(図 7.9-1)。

PPS は負荷荷重を FORCE カード、PLOAD2 カードまたは OPTPRES カードの形で出力する。OPTPRES カードは最適化のために使われる。荷重の合力もタンクの重心位置での燃料の慣性力も出力される。構造の内部の体積を考慮していないので、モデルは実際のタンクと一致しないのがふつうであり、単位圧力ケースを実行して体積と質量を計算するべきである。質量が実際と異なるときには、本番の計算の前に燃料の密度を調節する。

このプログラムは使いやすく、European Fighter Aircraft の燃料タンクの負荷荷重の作成に使用された。



- ・ 加速度／角加速度と速度によって荷重ケースを定義する。
- ・ 出力は、FORCE カード、PLOAD2 カード、OPTPRES カード。
- ・ タンクの慣性力の計算。
- ・ 負荷荷重の合計の計算。

図 7.9-1 燃料圧力データ

7.10 慣性力

多くの荷重ケースで慣性力は重要な項目である。構造の慣性力、燃料の慣性力、集中慣性力（非構造質量）等の種類がある。

- (1) 構造の慣性力の負荷にはいろいろな方法がある。胴体では質量分布がせん断荷重ダイヤグラムの形で定義されることが多い。主翼等の初期の計算では単位面積あたりの質量分布で定義されることもある。

どのような形で与えられるにせよ、慣性力のケースは質量の定義から決めるべきである。

一組のインターフェース節点で質量分布を定義するのが最近の主流である。重量担当がこの仕事を行い、質量分布データを節点上の質量に変換し、CONM2 カードを作成する。胴体に関しては、フレームの前後の半分のベイの質量を合計したものをそのフレームの代表節点に負荷する。この場合には CONM2 データにはこの断面の慣性能率のデータも含める。

CONM2 データは PPS 慣性荷重プログラムで直接扱うことができ、質量と形状の情報を使って慣性パラメータ（角加速度／加速度）に対する等価な FORCE データを計算することができる。European Fighter Aircraft プログラムではこの方法が使われた。

- (2) 燃料タンクのパネルの節点に分配された燃料の質量から、PPS 慣性荷重プログラムを使って CONM2 データ（この場合、燃料圧力は計算されない）か、加速度に対応する単位 FORCE データのどちらかを作成することによって燃料の慣性データを得る。PPS の燃料圧力プログラムを使って、圧力の影響も含めた正しい慣性力の FORCE データを算出することもできる。
- (3) 集中した部品の質量の取り扱い方法にはいくつかのやり方がある。複数の節点に質量を分配して慣性の影響を手計算で求めるやり方がある。重心位置に節点を作成してこの節点に質量を集中させ、この節点を剛体要素または弾性要素で構造の節点とつなぐ。さらに慣性力を手計算で求め、この節点に負荷する。大きな質量はモーメントを発生するため慣性能率を考慮する必要がある。複数の集中質量がある場合には、これらを集合として扱うため、PPS 慣性荷重プログラムを用いて負荷荷重を計算するのがよい。
- (4) チェック：必ず負荷した慣性力の合計を計算して、荷重計算書の値とチェックすること。質量分布データの変更は慣性力データと荷重計算書の矛盾につながる。慣性力の負荷データを本番の解析に使う前にデータの矛盾がないようにすること。

7.11 釣合いケース

荷重ケースのチェックのために、全荷重ケースに対して釣合い情報を作成する必要がある。荷重の不釣合い量が小さい場合は許容できる。翼への空気力の負荷の場合には、モデルの平面形状が荷重計算書の形状と完全に一致することはないので、ある程度の負荷荷重の違いは許容せざるを得ない。

しかし、全機荷重ケースについては、完全に釣り合っていることが要求される。全機モデルは一組の「固い」節点で静定的に支持されなければならない。支持点に小さな反力が生じるかもしれないが、この反力は局所的な応力レベルに比べて十分小さくなければならない($\ll 1.0 \text{ kN}$)。

スーパーエレメントを使って分割された構成要素(部分構造)の合体として全機モデルを作ることもある。この場合には、全部の部分構造に整合性のある荷重ケースを負荷し、各部分構造に負荷される各合計荷重はあらかじめ決まっている合計荷重と等しくなければならない。これらの負荷荷重を用いて全機モデルを解析すると、インターフェース荷重が計算され、部分構造間の相互作用が反映された出力が得られる。

釣り合った負荷荷重を作成する作業に関わる組織は広範囲に渡っており、以下の項目について合意がとれていないといけない。

- 標定荷重ケース
- 質量の標準
- 荷重に関する部分構造の境界:部分構造間で荷重を受け持ちあう。たとえばフェアリング荷重。
- 負荷荷重の標準:すべての荷重ケースのために部分構造に細かく荷重を負荷する必要はない。たとえば、前胴の荷重ケースに尾翼の詳細荷重負荷は不要である。

7.12 全機荷重釣合い表

負荷荷重の種類とすべての釣合い荷重ケースの責任分担を定義したマトリックス表示した表を作成すべきである。

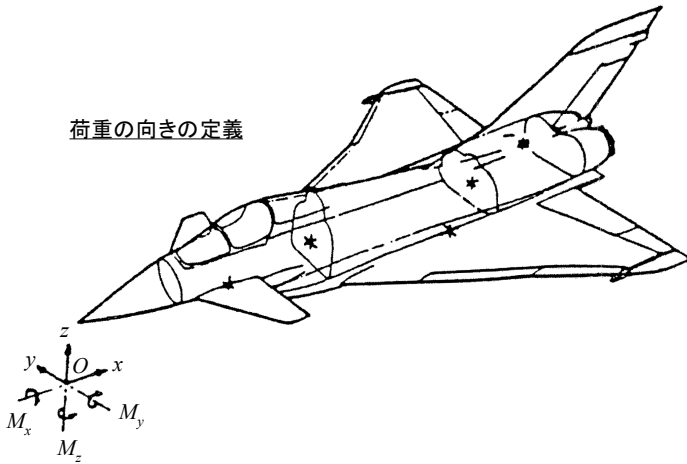
これらの荷重ケースについて、力の釣合いがとれていることを確認し、各荷重ケースに関してそれぞれ「全機荷重釣合い表」が作成されなければならない。この表には、すべての構成要素に完全に正しい荷重が負荷され釣り合っていることが示される。

全機荷重釣合いシートの代表的な例を表 7.12-1 に示す。

表 7.12-1 全機荷重釣合い表

荷重ケース:

ネット制限荷重



LOAD REFERENCE POINTS			
COMPIT	X	Y	Z
F/FUSE			
INTAKE			
C/FUSE			
R/FUSE			
ST. WING			
ST. F/PL			
FIN			

基準点 (Reference Points) で呼ばれているすべての荷重は機体基準座標系で示す。

(荷重: kN, または kN-m)

COMPONENT	LOADING RESULTANTS AT COMPONENT REF. POINTS					
	X	Y	Z	M _x	M _y	M _z
FRONT FUSELAGE						
INTAKE						
CENTRE FUSELAGE						
REAR FUSELAGE						
PORT WING						
STBD. WING						
PORT FOREPLANE						
STBD. FOREPLANE						
FIN						

LOADING RESULTANTS AT A/C ORIGIN 'O'						
FRONT FUSELAGE						
INTAKE						
CENTRE FUSELAGE						
REAR FUSELAGE						
PORT WING						
STBD. WING						
PORT FOREPLANE						
STBD. FOREPLANE						
FIN						
TOTALS						

Inertia Parameters	a_x g	a_y g	a_z g	$\dot{p}$ r/s ²	$\dot{q}$ r/s ²	$\dot{r}$ r/s ²	p r/s	q r/s	r r/s
Flight Parameters	Mach	Alt kft	η	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	$C_{FULL SPAN}$	ζ
Mass State	Mass	X_{cg}	Y_{cg}	Z_{cg}	Config				

8 参考文献

この項は訳者が追加した.

- [1] I. C. Taig, “Stating the Problem: The Step Before F. E. Modelling,” AGARD-LS-147, pp.2-1 – 2-11.
- [2] I. C. Taig, “Modelling for the Finite Element Method,” AGARD-LS-147, pp.3-1 – 3-18.
- [3] ESDU 71004, “Flange Efficiency Factors for Curved Beams Under Bending in the Plane of Curvature.”
- [4] ESDU Structures Sub-Series Vol.16, “Component Idealisation for Finite Element Analysis,” Data Items 84042, 85034, 85035.

訳者あとがき

本書の原本は、Ian Taig, “Rules for Modelling Structures” で、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 1980 年代後半に作成された資料である。著者とされる Ian Taig は当時イギリスの British Aerospace 社のチーフエンジニアであった。Ian Taig は ESDU (Engineering Sciences Data Unit) の航空宇宙構造委員会 (Aerospace Structures Committee) の委員としても活躍していた。資料そのものには Ian Taig が著者であることは明記されていない。Aircraft Engineering Forum でこの資料を紹介した人が「Ian Taig が書いた資料である」と書いていたので、それに基づいている。内容からすると、講習会用の資料のようである。

航空機構造の FEM モデルの作成方法のガイドラインとして公表されている文献はこの資料だけであり、非常に貴重なものである。航空機構造の FEM モデルを作るために必要な具体的なノウハウを詳細に解説している。20 年以上前の資料であるので、FEM の発展による最新の情報は盛り込まれていないが、基本的な考え方は現在でも通用する。

訳者は、「航空機構造解析の基本」の中に航空機構造の FEM モデルの作成方法の解説の章を入れることを計画していたが、たまたまインターネットでこの資料を見つけ、自分が考えていたものと一致する内容であったので、翻訳することにした。本書は航空機開発に従事する構造技術者の役に立つと確信している。

滝 敏美

2010 年 10 月 13 日