

太陽電池アレイ支持物設計の概要

◇本チュートリアル背景

「C A D T O O L フレーム構造解析」は1999年発売の2次元のはりの計算・トラス構造解析・ラーメン構造解析・断面性能計算がセットになった「C A D T O O L 構造解析」でスタートし、当初は機械設計をターゲットとしたものでした。2002年には立体構造解析がリリースされ、徐々に建築・土木ユーザーが増えていき汎用性は保ちつつも建築・土木関係の機能が強化されてきています。2007年からは骨組構造の解析ということが分かるように名称に「フレーム」の文字を加え「C A D T O O L フレーム構造解析」となり、その後もほぼ毎年バージョンアップを重ね、現在は「C A D T O O L フレーム構造解析10」となっています。

一方、ここ2～3年で太陽電池アレイ（太陽光発電）の陸屋根形支持物の設計に関するデモンストレーションの依頼や問い合わせが増えてきており、また既存のユーザーにおいてもこの用途に使っている例が多く見受けられるようになっていきます。

前述のように本来は汎用の骨組構造解析ソフトではありますが太陽電池アレイの支持物という特定の設計に対するニーズが高いようなので弊社としてもその設計方法について調査をしました。その結果、解析対象となる陸屋根形支持物の構造としてはそれほど複雑なものではなく、また「C A D T O O L フレーム構造解析」の「フレーム構造－立体」コマンドで解析するのに適したものであることが分かりましたが、一方で荷重の計算がかなり面倒というか分かりにくい規格になっていることも分かりました。

この規格とは「太陽電池アレイ用支持物設計標準 J I S C 8 9 5 5 : 2004」（以下、J I S と表記）で、荷重を計算する際の係数や計算式等が細かく規定されていますが、具体的な荷重の計算例は出ていないので、ここの計算式だけで荷重を求めるのは単位間違いなどがなければ不安が残ります。

さらに荷重を求めてからの支持物の強度を検討する部分が全く記載されておりませんのでどのように支持物の強度を評価すればよいかが分かりません。

また「太陽光発電システムの設計と施工 太陽光発電協会編」という書籍（以下、文献1と表記）も出ております。こちらは支持物の設計だけでなく太陽光発電システムに関して全般の解説が出ており、支持物の設計についてもほぼ前述のJ I S に準じた解説と具体的な設計条件を決めて荷重計算を行っています。しかしながらこの文献1でも荷重が求められた後の支持物の強度の検討は全く触れられておりません。

これでは新規に太陽電池アレイの支持物の設計を始めようとして上記の資料を集め、荷重計算まで進んだとしても、その後は途方に暮れてしまうことでしょう。またこのような状況にあるため「C A D T O O L フレーム構造解析」で支持物の強度計算をしたいという要望も増えているものと思われます。そこでこれから新規に太陽電池アレイの支持物の設計を始めようという人向けに本チュートリアルが企画されました。

◇本チュートリアルを進め方

本チュートリアルは前述のように新規に太陽電池アレイの支持物の設計を始めようと考えている人向けのものになり、陸屋根形の支持物を対象とします。

まず設計する太陽電池アレイの支持物仕様を決めて、「CAD TOOL フレーム構造解析 10」の「フレーム構造－立体」コマンド（以下、コマンドの表記を省略）を使って、最初は簡単な溶接構造（ラーメン構造）として支持物の構造モデルを作成します。その構造モデルに手計算による荷重計算で求めた荷重条件を適用して解析を行い強度の評価をしてみます。次に構造モデルを実際の支持物に多く使われているボルト組立構造に変更してみて、再度強度の評価を行うところまでを手順をおって説明していきます。

荷重計算の手計算部分においては J I S で規定されている係数や計算式を用いますが文献 1 でも同じものが掲載されていますので、どちらかの資料を入手しておいてください。

また手計算による荷重計算では指数を使った計算があり三角関数も使いますので関数電卓も用意しておいてください。さらに地域に特有な係数などはインターネットで検索した例を示しますのでインターネットに接続された P C で作業されることが望ましいです。

本チュートリアルでは支持物の強度の評価には「CAD TOOL フレーム構造解析 10」の「フレーム構造－立体」を使う前提で話を進めていきますので「CAD TOOL フレーム構造解析 10 / 3 D」の製品版か、全機能試用可能な期間制限体験版（弊社ホームページよりダウンロード）をインストールしておいてください。期間制限体験版は初回起動後 15 日を過ぎると計算可能な最大節点数が 16 点までとなる機能制限体験版となり本チュートリアルの計算例を試すことができなくなりますので注意してください。

「CAD TOOL フレーム構造解析 10」には操作方法を解説したチュートリアルが付いています。コマンド選択メニューにある「チュートリアル P D F」ボタンをクリックして、そこから「CAD TOOL フレーム構造解析 10 3 D チュートリアル」（以下「3 D チュートリアル」と表記）をクリックすると「フレーム構造－立体」のチュートリアルが開きますので、実際に操作しながら「フレーム構造－立体」の使い方や“節点”“要素”などの用語、どのように構造物をモデル化するかや荷重条件の設定方法など、「フレーム構造－立体」の基本操作を事前に把握しておいてください。

◇免責事項

弊社はソフトウェア会社であり太陽電池アレイの支持物の設計・施工に関しては実績がありません。あくまで机上の検討結果として本チュートリアルを作成しています。したがって本チュートリアルを参考にして太陽電池アレイの支持物を設計したことによって、万一利用者に何らかの損害が生じても一切の責任を負わないものとさせていただきます。あくまで利用者個人の責任においてご活用ください。

太陽電池アレイ支持物仕様

◇設置条件

まずは支持物を設置する場所を決めておきます。どこでもかまわないのですが、ここでは群馬県高崎市とします。Wikipedia で高崎市の標高を調べると市役所で97.1mとなっていますのでざっと標高は100m（垂直積雪量を計算するときに使います）とします。支持物の設置高さは10m（風圧荷重の係数を求めるときに使います）とします。

続いて群馬県のホームページを開き、[雇用・産業] をクリックし、次に土木・建築欄から [建築・住宅] をクリック、次に [建築行政トップページ] をクリック、最後に建築基準法関係のところから [地表面粗度区分・基準風速、垂直積雪量について] をクリックします。

分かりにくい場合は Google で [群馬県 地表面粗度] で検索するといきなり目的のページが見つかります。ここでは風圧荷重に関係する地表面粗度区分や基準風速、積雪荷重のための垂直積雪量を求める係数が分かります。

群馬県の地表面粗度区分はⅡかⅢですが支持物の高さを10mとしたのでⅢが適用されます。なお地表面粗度区分のもつ意味についてはJISや文献1で説明されているのでそちらを参照してください。

群馬県のホームページには基準風速は30m/sと出ており、垂直積雪量を求める係数も出ていますが、これらについてはJISにも文献1の付表にも同じものが出ていますので特に自治体のホームページで調べる必要はありません。

ただし地表面粗度区分は自治体毎に決めているので設置場所の自治体でどう設定されているか調べておく必要があります。通常は群馬県と同様に自治体のホームページのどこかに出ているようなのでネットで検索すれば見つかると思います。

以上の設置条件をまとめておきます。

- ①施工地：群馬県高崎市（標高100m）
- ②太陽電池アレイの配置高さ：地上高10m
- ③地表面粗度区分：Ⅲ
- ④基準風速：30m/s
- ⑤垂直積雪量算出係数： $\alpha = 0.0005$ $\beta = -0.06$ $\gamma = 0.28$ $R = 40$
- ⑥積雪条件：一般の地方（多雪区域ではない）

◇太陽電池モジュール仕様

太陽電池モジュール（以下、モジュールという）はメーカー各社で大きさや重量が異なっています。支持物を設計する段階ではどのメーカーにするか決まっているはずですのでその仕様となりますが、ここでは比較的広く使われているシャープのND-Q7L5Hとします。

この型番でネット検索すれば外形寸法や重量などの仕様が分かります。

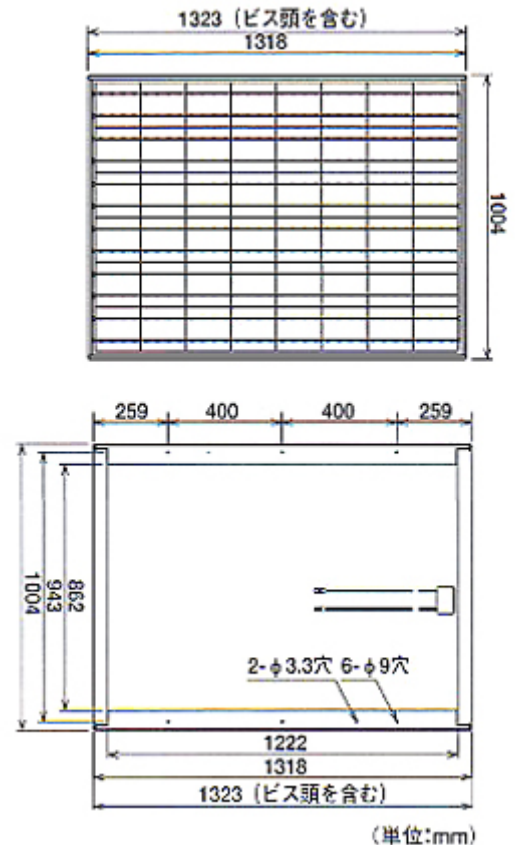
支持物設計に必要なモジュールの仕様としては

- ①幅×高さ（外寸）：1323×1004
- ②受風幅寸法：1318
- ③質量：16.5kg
- ④積雪：0.5m
- ⑤静荷重：2410Pa（N/m²）

受風面積はビス頭を含まない1318×1004=1323272mm²
=1.323m²
とします。

支持物には横置き（右図の向き）で、取付穴4ヶ所（横800×縦943のピッチ）で取り付けるものとします。

■外形図（ND-Q7L5H）

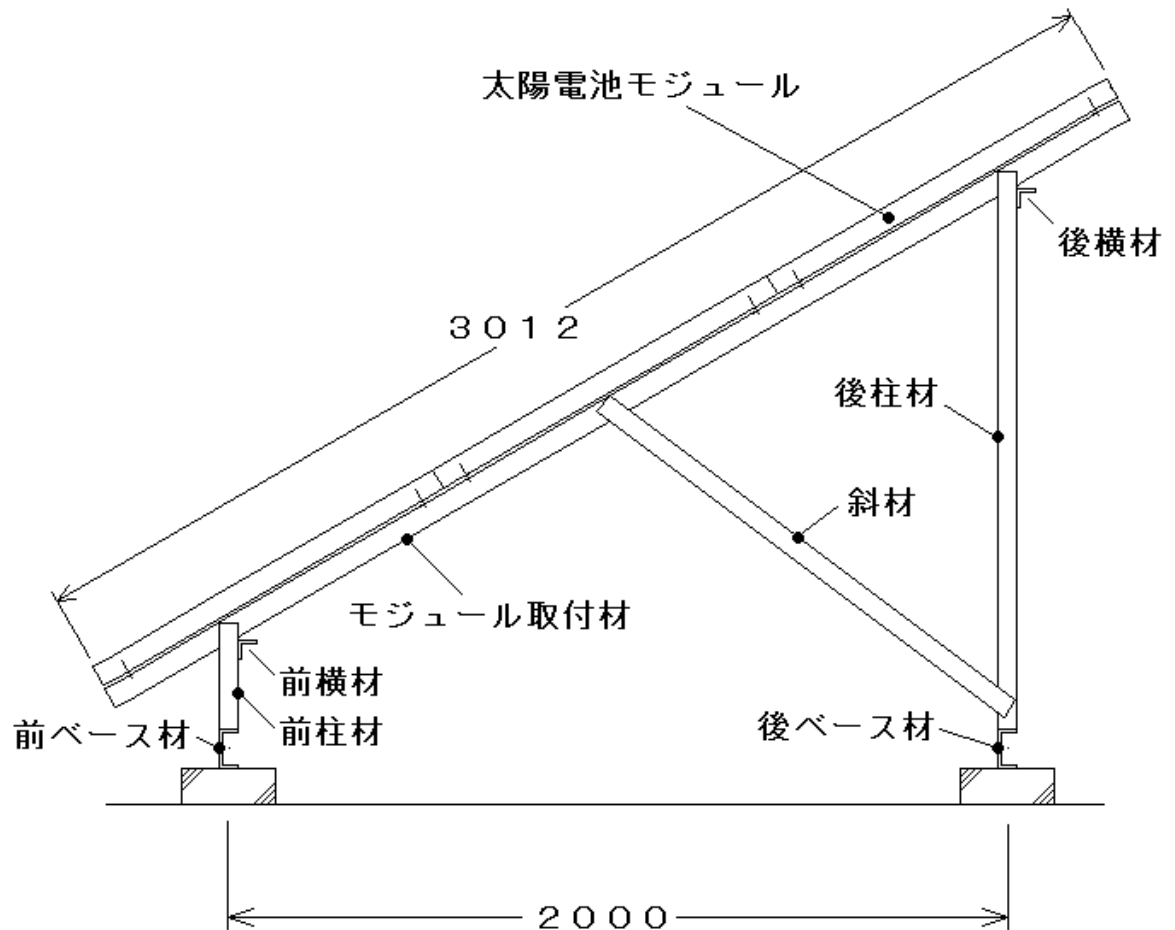


◇陸屋根形支持物仕様

ここで設計する太陽電池アレイの支持物の仕様を示します。

- ①アレイ配置分類：陸屋根形
- ②モジュール配置：横置き3段2連（モジュールは全6枚）
- ③アレイ傾斜角度：30°（これは手計算の分かりやすさで決めたもので、本来は設置場所の日照条件で決める必要があります）
- ④概略図

次に支持物の側面図の概略図を示します。



幅方向の寸法については後で説明する構造モデル寸法図を参照してください。

支持物の溶接構造モデル作成

◇概要

ここでは「CADTOOLフレーム構造解析10」の「フレーム構造－立体」を使って支持物の構造モデルを作成します。

「フレーム構造－立体」の構造モデルでは節点を介して要素をつなげていくと、要素同士の接合は剛接合として扱われますので特別な設定をしなければ溶接構造（ラーメン構造）になります。

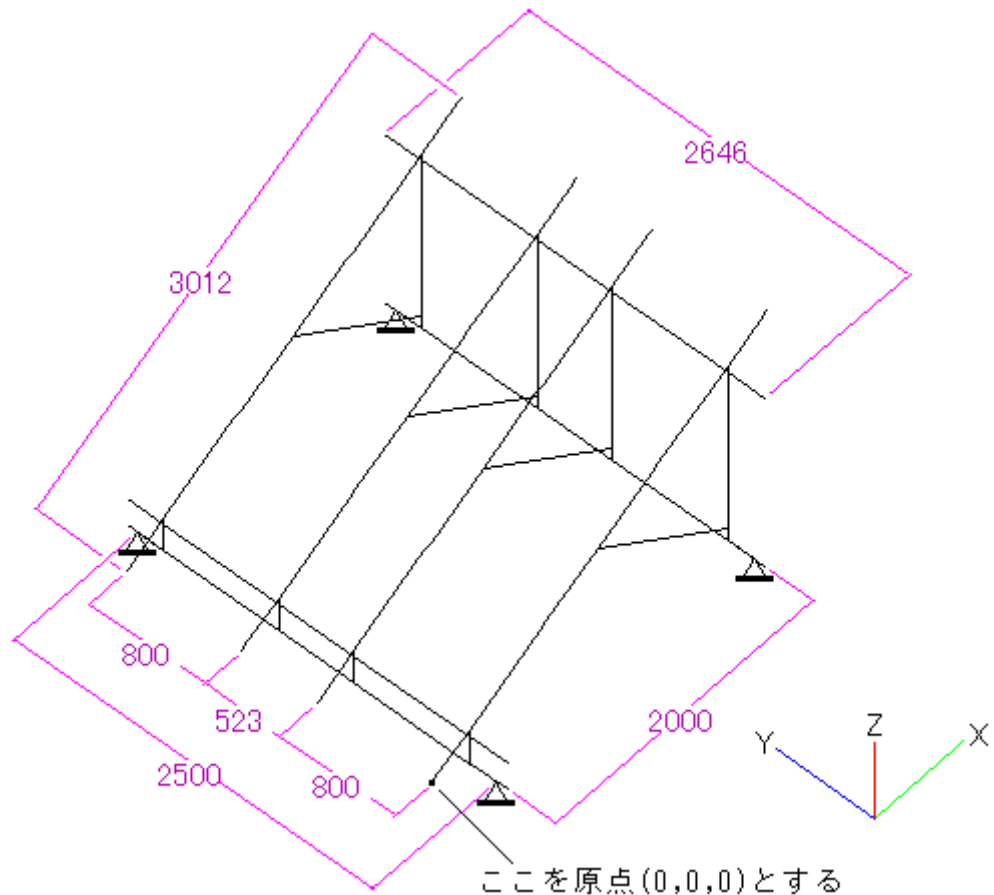
実際にはボルト組立構造（ボルト接合部をピン接合とする）の方が多いと思いますが、そのためにはトラス部材の設定や接合設定などの設定が必要になってきて、最初からボルト組立構造でモデルを作るのはちょっと分かりにくいです。

ボルト組立構造についてはここで作る溶接構造のモデルをベースにボルト組立構造に変更する手順を後で説明しますので、まずは簡単な溶接構造として支持物の構造モデルを作ってみましょう。

◇構造モデル寸法図

次に構造モデルの線画に寸法を入れたものを示します。主な寸法として

- ①モジュール取付材の間隔はモジュールを4点で取り付けるとして800mm
- ②横の連とのモジュール取付材の間隔は $(1323 - 800) \div 2 \times 2 = 523\text{mm}$
- ③全体の幅は2連なのでビス頭を含めて $1323 \times 2 = 2646\text{mm}$
- ④横材の長さも全体の幅と同じ2646mm
- ⑤基礎のピッチは横2500mm×縦2000mm



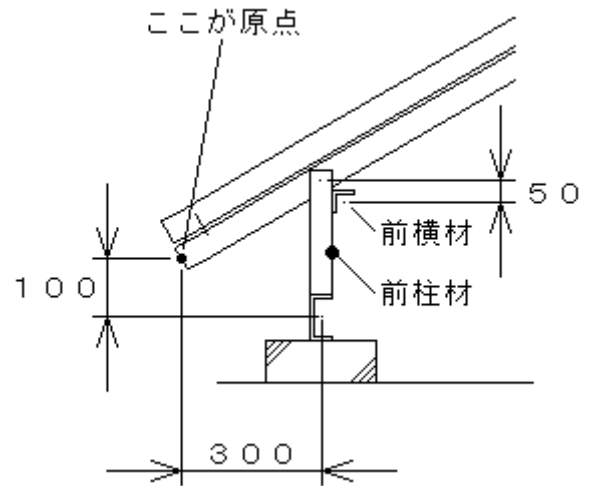
原点はどこでも良いのですが節点座標を求めるのが最も面倒なのは斜めになったモジュール取付材になりますのでモジュール取付材の端点を原点にしておくとい良いでしょう。

また座標系は正面から奥行き方向をX軸、横方向をY軸、高さ方向をZ軸としておきます。上の寸法図右下にもその座標軸イメージを表示していますが「フレーム構造－立体」ではこれを「全体座標」と称してそれぞれプラス方向の軸をイメージ表示するようになっています。

後で説明する荷重や加速度もこの全体座標で設定するのですがここで注意が必要なのは、高さ方向は上向きがZ軸のプラス方向なので下向きの荷重や重力加速度はマイナスの値になることです。詳しくは荷重や加速度の設定のところで再度説明します。

右には原点周辺の詳細図を示しますが基本的には鋼材の中心線に要素を作成していきますので節点座標も鋼材の断面中心で設定していきます。

ただしアングル材やチャンネル材などの非対称断面の断面中心（図心）はいわゆる鋼材中心よりずれがありますが僅かな差なので鋼材中心で設定していけば良いでしょう。

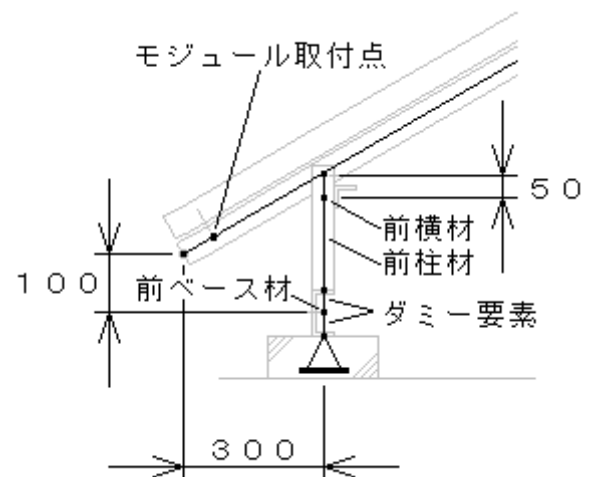


また横材はモジュール取付材と柱材の接合点より 50 mm 下としますが、実際の構造としては鋼材の中心線が水平方向（上図右方向）に離れていますので正確には構造モデルでも柱材の要素と横材の要素は離すべきなのですが、その場合は新たに柱材と横材をつなぐ要素も必要になって構造モデルが複雑になるわりには全体への影響は少ないと考えられます。多くの場合この程度の距離であれば直接要素をつないでいますのでここでも横材の取付用の節点は柱材の中心線上に設定することとします。

ベース材と柱材のつなぎはベース材を溝形鋼とするとこの例のように溝形鋼の側面から柱材が出るのでベース材の中心から側面までダミーの要素を設定します。同様にベース材中心から基礎（支持点）と接する側面までダミーの要素を設定しておきます。これらのダミーの要素にどのくらいの強度を持たせるかは議論の余地があると思いますが経験的には母材（ここではベース材）と同じ強度とすれば良さそうです。

以上のような考え方でモデル化したものを右に示しますが、小さな●のところに節点を設定していきます。

モジュール取付点にも節点を設けておき、節点間を結んだ黒い線のところを構造要素として設定していくことになります。



◇モジュール取付材の座標計算

モジュール取付材は傾斜角 30° になっていますので節点座標は端点からの距離を L として X 座標は $L \times \cos 30$ 、 Z 座標は $L \times \sin 30$ で求めていく必要があります。電卓を叩きながら入力していても良いのですが、まずは先に必要な節点の位置をモジュール取付材の端点からの距離 L でまとめておきましょう。ここでモジュール番号は下から 1, 2, 3 とします。

下側端点（原点）の位置：0

モジュール1下側取付点までの距離： $(1004 - 943) \div 2 = 30.5$

モジュール1上側取付点までの距離： $30.5 + 943 = 973.5$

モジュール2下側取付点までの距離： $1004 + 30.5 = 1034.5$

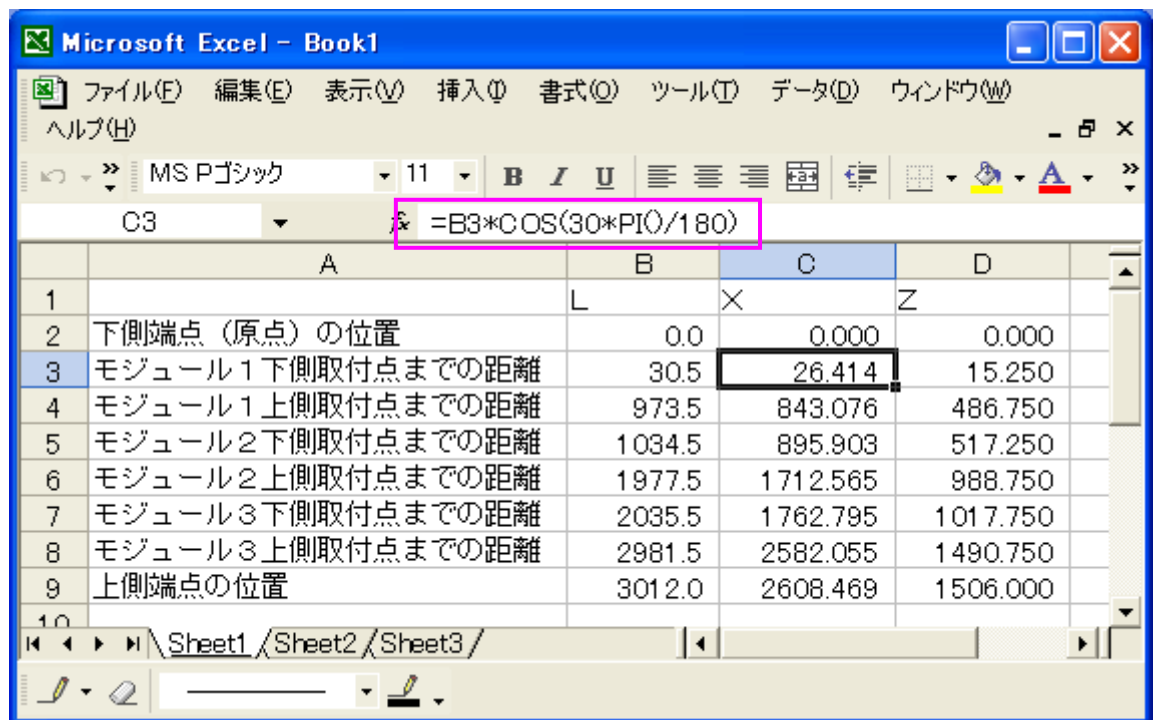
モジュール2上側取付点までの距離： $1034.5 + 943 = 1977.5$

モジュール3下側取付点までの距離： $1004 \times 2 + 30.5 = 2038.5$

モジュール3上側取付点までの距離： $2038.5 + 943 = 2981.5$

上側端点の位置： $1004 \times 3 = 3012$

エクセルの関数ができるなら次に示すように端点からの距離Lを入力しておいて、それを使って三角関数でX座標やZ座標が簡単に求められます。ただしエクセルの三角関数は単位がラジアンなので 30° をラジアンに変換（ここでは $\pi/180$ をかけている。なおエクセルで π はPI()と入力する）してやる必要があります。また座標値の入力も斜めの部材の場合は小数点以下3桁位まで入力しておいた方が良いでしょう。エクセルを使っている場合はセルの書式で小数点以下を3桁にして表示させておきましょう。



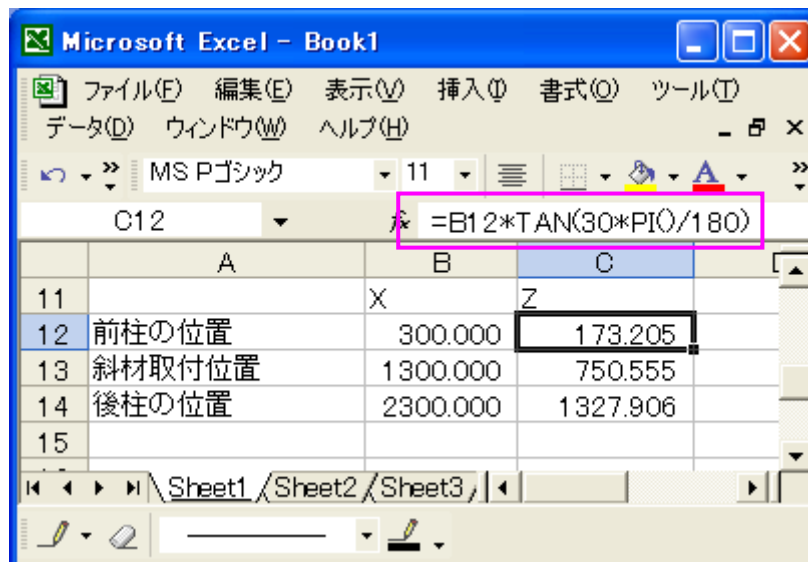
The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D
		L	X	Z
1	下側端点（原点）の位置	0.0	0.000	0.000
2	モジュール1下側取付点までの距離	30.5	26.414	15.250
3	モジュール1上側取付点までの距離	973.5	843.076	486.750
4	モジュール2下側取付点までの距離	1034.5	895.903	517.250
5	モジュール2上側取付点までの距離	1977.5	1712.565	988.750
6	モジュール3下側取付点までの距離	2035.5	1762.795	1017.750
7	モジュール3上側取付点までの距離	2981.5	2582.055	1490.750
8	上側端点の位置	3012.0	2608.469	1506.000

The formula bar for cell C3 shows: $=B3 * \cos(30 * \pi / 180)$

前後の柱の取付点は水平距離（X座標）が決まっていますので、それからZ座標を求めます。斜材の取付位置も前後の柱の間としてX座標からZ座標を求めます。

Z座標は水平距離（X座標）に $\tan 30$ をかけて求めますがこれもエクセルで計算させても良いでしょう。



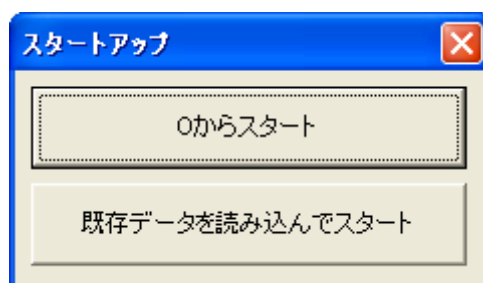
もちろん座標の計算にエクセルを使わずに電卓で計算してもかまいません。ただ「フレーム構造－立体」では節点座標の入力や編集にエクセルを使って作業することもできますので、慣れてくればエクセルで座標を計算した方が楽に設定できるようになります。

ここでは電卓でもエクセルでもかまいませんので先に座標値を計算しておき、間違いのないように一つ一つ入力していきましょう。

◇「フレーム構造－立体」の起動

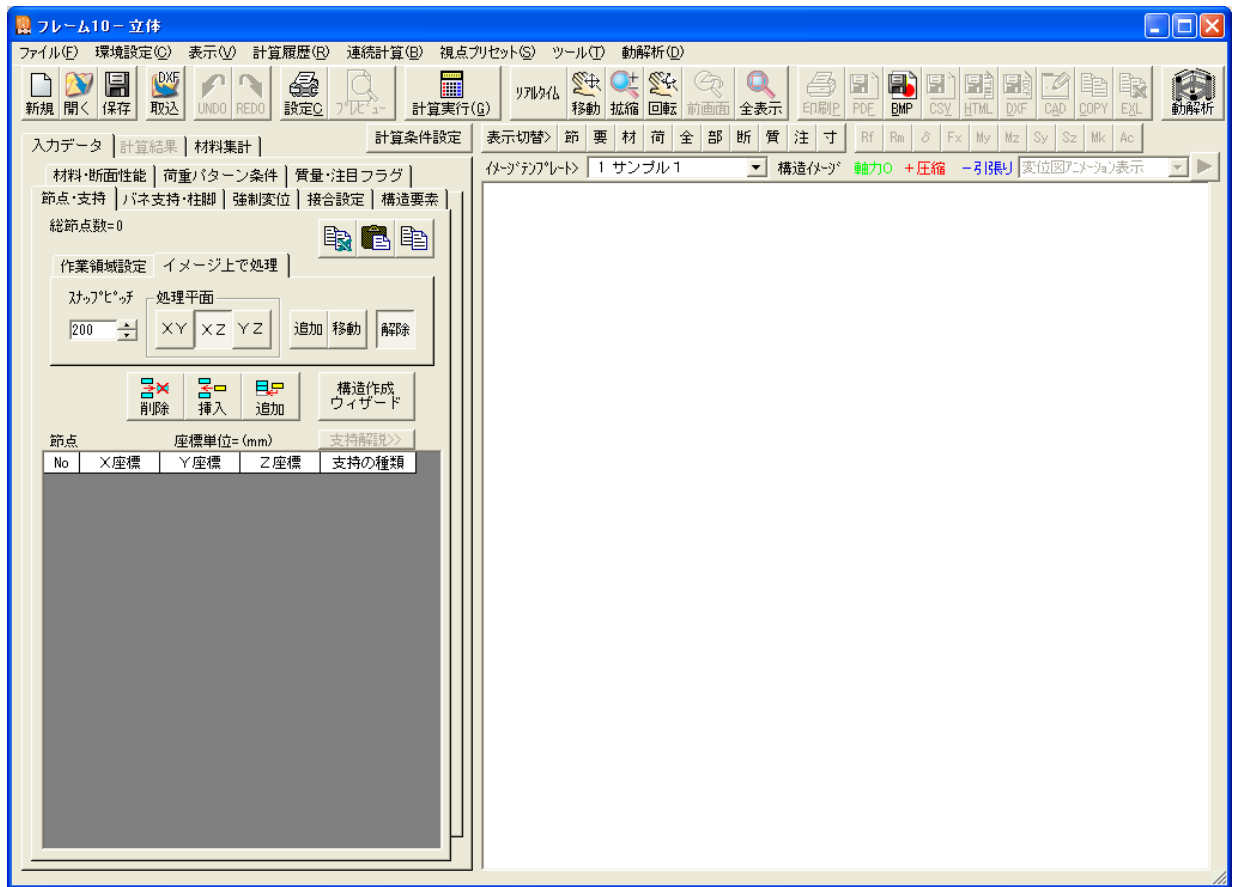
ではいよいよ「フレーム構造－立体」を起動してみます。スタートメニューより「すべてのプログラム」＞「CAD TOOLシリーズ」＞「フレーム構造解析10」をクリックします。インストール時に「フレーム構造解析10」のアイコンを作成していればアイコンをダブルクリックしても良いです。これでコマンド選択メニューが起動しますので「フレーム構造－立体」と表記されている大きなボタンをクリックして「フレーム構造－立体」を起動します。

起動時は次に示すスタートアップが表示されるので「0からスタート」をクリックします。



なおコマンド選択メニューにある「チュートリアルPDF」ボタンをクリックして、そこから「CAD TOOLフレーム構造解析10 3Dチュートリアル」をクリックすると「フレーム構造－立体」のチュートリアルが開きますので、「フレーム構造－立体」を使うのが初めての場合はそちらを先に試して「フレーム構造－立体」の基本的な操作を把握しておいてください。

次に「0からスタート」した「フレーム構造－立体」を示します。



座標単位は（mm）、荷重単位は（N）がデフォルトになっています。とりあえず本チュートリアルではこのまま進めますが、単位は環境設定の計算条件単位設定で変更できますので慣れてきたら良く使う単位系に変更しておくとい良いでしょう。

また起動時はこのように「入力データ」タブの「節点・支持」タブが開いていますのでここで節点の座標を入力していきます。

◇モジュール取付材節点座標入力

では先に求めておいたモジュール取付材の節点座標を入力していきましょう。「節点・支持」タブにある「追加」ボタンをクリックするとデータ入力ボックスが表示されますのでここで座標値を入力していきます。



最初の節点1の座標は0, 0, 0の原点となっているので、前に説明したようにこれをモジュール取付材の下端とします。このまま再度「追加」ボタンをクリックすると次の行が追加され節点2へデータ入力ボックスが移動しますので、モジュール1下側取付点の座標（X＝26.414, Y＝0, Z＝15.25）を入力します。

このように「追加」ボタンをクリックして新しく節点を追加して座標を入力していきますがデータ入力ボックスが最下行にあるときは「Enter キー」を押しても「追加」と同じ動作になります。また「Tab キー」や「Shift+Tab キー」で座標入力欄のフォーカスを左右に移動できるので、慣れてくればキーボードの操作だけで節点を入力していくことができます。

次にモジュール取付材の節点を全て入力した例を示します。

<div> <div>削除</div> <div>挿入</div> <div>追加</div> <div>構造作成ウィザード</div> </div>				
節点		座標単位=(mm)		
No	X座標	Y座標	Z座標	支持の種類
1	0	0	0	自由
2	26.414	0	15.25	自由
3	300	0	173.205	自由
4	843.076	0	486.75	自由
5	895.903	0	517.25	自由
6	1300	0	750.555	自由
7	1712.565	0	988.75	自由
8	1762.795	0	1017.75	自由
9	2300	0	1327.906	自由
10	2582.055	0	1490.75	自由
11	2608.469	0	1506	自由

ここでは前後柱材取付点や斜材取付点も途中に入れてモジュール取付材上で節点が順番に並ぶように入力しています。節点の並びはバラバラでもかまわないのですが後で構造要素を設定するときに節点番号がバラバラだと分かりにくくなりますのでなるべく関連した節点番号が並ぶように入力していくと良いでしょう。

データ入力ボックスでは支持の種類も選択できますが支持条件は後で設定しますので、ここでは「自由」のまま節点座標を入力していきます。

なお支持条件について少し説明すると、支持とは構造物が外部からどのように“支持”されているかということで、例えばアンカーで基礎と固定している節点にだけ支持の種類を設定します。支持の種類が「自由」の節点を介して要素をつなげていくとその要素同士は剛接合になります。剛接合だから支持の種類に「全固定」とかピン接合にしたいから支持の種類に「ピン支持」を選択するわけではありません。これらの設定をしてしまうとその節点は外部から“支持”されたことになり変位することができずにおかしな結果になってしまいますので注意してください。

◇前後柱材節点座標入力

柱材はまだ座標を計算していませんがX座標は固定、Y座標も0なのでZ座標だけ決めれば良いことになります。またモジュール取付材との接合点は既に入力済みなのでそこからベース材中心までの節点座標を入力していきます。構造モデル寸法図のところで原点から前柱材の位置関係が出ていますのでそれを元に前柱材の座標を求めてみます。

前柱材の節点座標はX=300、Y=0で

- ①モジュール取付材との接合点 Z=173.205（既に設定済み）
- ②前横材との接合点 Z=123（①から50mm下で小数点以下を丸める）
- ③後で筋交いをつける場合の接合点 Z=-20
- ④前ベース材側面ダミーとの接合点 Z=-50（構造モデル寸法図より）
- ⑤前ベース材中心 Z=-100（構造モデル寸法図より）

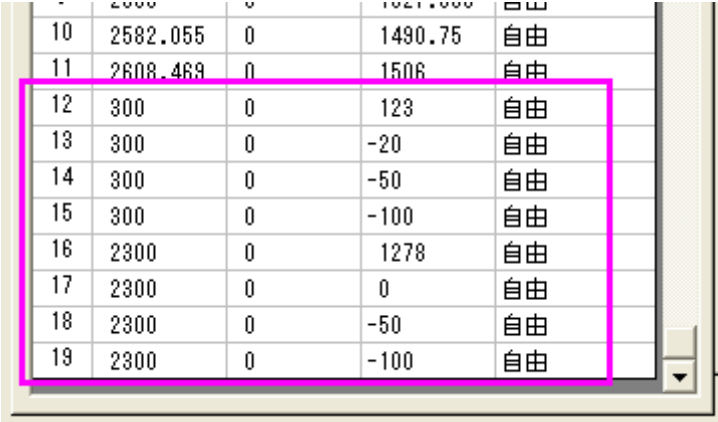
実際には②～⑤の節点座標を入力します。ここで③は溶接構造（ラーメン構造）モデルでは不要ですが、後でボルト組立構造に変更したときに筋交いをつけますのであらかじめ設定しておきます。

後柱材の節点座標はX=2300、Y=0で

- ①モジュール取付材との接合点 Z=1327.906（既に設定済み）
- ②後横材との接合点 Z=1278（①から50mm下で小数点以下を丸める）
- ③斜材および後で筋交いをつける場合の接合点 Z=0（前柱材よりちょっと高め）
- ④後ベース材側面ダミーとの接合点 Z=-50（構造モデル寸法図より）
- ⑤後ベース材中心 Z=-100（構造モデル寸法図より）

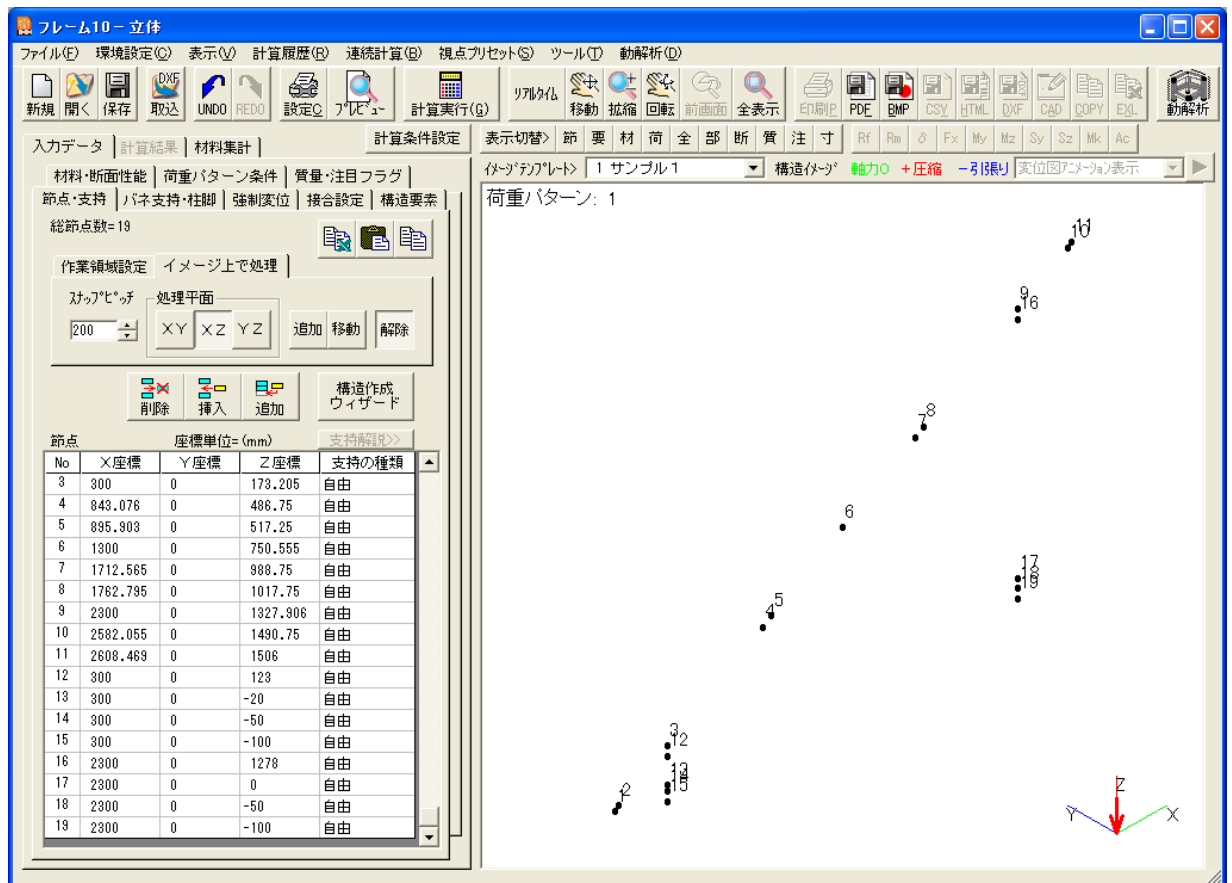
後柱材も実際には②～⑤の節点座標を入力します。

これら前後柱材の座標も「追加」ボタンをクリックしてデータ入力ボックスを表示して入力していきます。



	2000	0	1327.906	自由
10	2582.055	0	1490.75	自由
11	2608.469	0	1506	自由
12	300	0	123	自由
13	300	0	-20	自由
14	300	0	-50	自由
15	300	0	-100	自由
16	2300	0	1278	自由
17	2300	0	0	自由
18	2300	0	-50	自由
19	2300	0	-100	自由

これでモジュール取付材と前後柱材関係の一通りの節点座標が入力されました。右側には節点の位置が節点番号と共にイメージ表示されますので入力間違いがないか確認してください。



座標値を修正する場合は座標値のデータ表示欄で修正したい行をクリックするとそこにデータ入力ボックスが表示されるのでそこで修正します。またイメージ上で修正したい節点の位置にマウスを持っていき、節点の●がハイライト表示されたときにマウス左クリックするとデータ表示欄のクリックした節点の行にデータ入力ボックスが表示されるようになっています。

データ入力ボックスは表示されたまま次の作業に進んでもかまいませんが、上図のようにデータ入力ボックスを非表示にしたい場合はイメージ上でマウス右クリックしてください。

残りのモジュール取付材と前後柱材の節点座標も同様に設定していてもかまわないのですが、このようにY座標が異なるだけで通り毎に同じ形状のものは「通りコピー」という機能で、通り単位に簡単にコピーしていくことができます。

なお「通りコピー」の機能は節点だけでなく要素もコピーできますので先にコピー元になるこの通りの構造要素を設定しておきましょう。

◇モジュール取付材構造要素設定

構造要素を設定するには「構造要素」タブを開きます。節点座標の入力と同様に「追加」ボタンをクリックすると次に示すデータ入力ボックスが表示されます。

要素		節点番号		単位(deg)	
No	始点	終点	材料No	回転角	
1	1	1	1	0	

ここで始点節点、終点節点を▼ボタンをクリックしてリストから選択するか節点番号を入力していきます。モジュール取付材の節点は1から11まで順番に設定していますので、要素番号1は始点節点1—終点節点2、要素番号2は始点節点2—終点節点3・・・というように「追加」ボタンをクリックして新しい要素を追加しながら設定していきます。

またデータ入力ボックスの動作は節点座標とほぼ同じなので「追加」ボタンをクリックする代わりに「Enter キー」を押しても良いですし、始点節点にフォーカスがあれば「Tab キー」で終点節点に移動できますので、慣れてくれば構造要素もキーボードで設定することができます。次にモジュール取付材の要素を設定した例を示します。

要素		節点番号		単位(deg)	
No	始点	終点	材料No	回転角	
1	1	2	1	0	
2	2	3	1	0	
3	3	4	1	0	
4	4	5	1	0	
5	5	6	1	0	
6	6	7	1	0	
7	7	8	1	0	
8	8	9	1	0	
9	9	10	1	0	
10	10	11	1	0	

また節点と同様に右側に構造要素のイメージも表示されていきますのでつなぎ間違いがないか確認してください。

構造要素の設定で注意しなければならない点は節点を飛ばしてしまうことで、極端な例として上記の10個の要素設定ではなく要素1で始点節点1—終点節点11としてしまってもイメージ上は全く同じ構造イメージになってしまいます。しかしながらこの場合は途中の節点2～節点10は計算上、要素1とは全く無関係の節点となり、通常はエラーが発生して計算できません。

「フレーム構造－立体」ではこのようにイメージ上では要素上にあるように見えてもその要素とは計算上無関係の節点を「浮き節点」と呼んで、チェックボタンでチェックおよび自動修正ができるようになっています。これらの機能については「3Dチュートリアル」を参照してもらうとして、ここでは節点を飛ばさないよう注意して構造要素を設定してください。

◇柱材・斜材要素設定

続いて前後の柱材と斜材の要素を設定していきます。ここでモジュール取付材の材料番号はデフォルトの1のまま構造要素を設定していましたが前後の柱材や斜材、後で設定する横材やベース材は異なる鋼材を使うことを考えて材料番号を変えておきます。

材料番号は最大200まで使えますがここでは次のように決めておきます。

モジュール取付材：1（デフォルト値で適用済み）

前柱材：2

後柱材：3

斜材：4

前横材：5

後横材：6

前ベース材：7（側面ダミー要素含む）

後ベース材：8（側面ダミー要素含む）

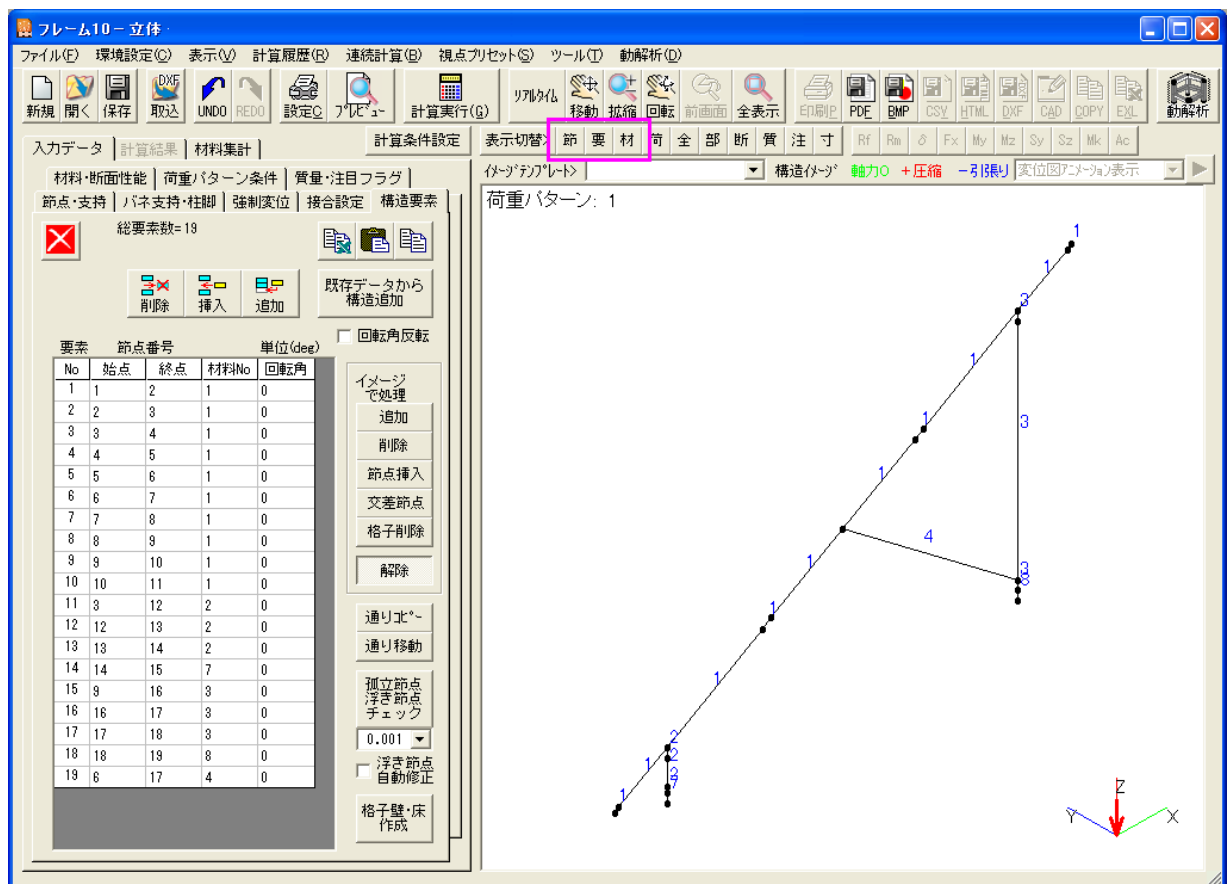
これらの材料番号にどのような鋼材（材質や断面性能）を設定するかは後で説明します。

では前柱材から構造要素を設定していきましょう。モジュール取付材のときと同様に「追加」ボタンをクリックしてデータ入力ボックスを表示させます。始点節点にはモジュール取付材と前柱材の接合点である節点3、終点節点には横材との接合点の節点12を選択します。続いて材料番号が1になっているので前柱材用の2に変更しておきます。

要素 No	始点	終点	材料No	単位(deg)
1	1	2	1	0
2	2	3	1	0
3	3	4	1	0
4	4	5	1	0
5	5	6	1	0
6	6	7	1	0
7	7	8	1	0
8	8	9	1	0
9	9	10	1	0
10	10	11	1	0
11	3	12	2	0

材料番号は後から変更してもかまわないのですが「追加」ボタンをクリックしたときに直前の材料番号が次からのデフォルトとなるので先に変えておいた方が効率よく設定ができます。

前柱材は同様にして始点節点 1 2－終点節点 1 3、始点節点 1 3－終点節点 1 4 というようにベース材側面ダミー要素との接合点の節点 1 4 までを材料番号 2 で要素を設定し、側面ダミー要素の節点 1 4 とベース材中心の節点 1 5 は前ベース材の材料番号 7 とします。同様にして後柱材を材料番号 3 で要素を設定し、後ベース材側面ダミー要素を材料番号 8 で設定し、斜材を材料番号 4 で要素を設定していったものを次に示します。



前後横材およびベース材は後で設定しますので、とりあえずこのようにモジュール取付材・前後柱材・斜材、前後ベース材側面ダミー要素の一通りの構造要素を設定したら、材料番号などに間違いがないか確認してください。

上の例では節点番号を非表示にして材料番号を表示していますが要素番号を含めてこれらの番号の表示・非表示はイメージ表示枠上の「節」「要」「材」ボタンで簡単に切り替えができますのでイメージ上で確認すると分かりやすいです。イメージ表示全体の設定はイメージ表示条件設定ダイアログで行います。イメージ表示条件の詳細については「3Dチュートリアル」を参照してください。

またここまで進んだら一旦、設定データを保存しておきましょう。左上の「保存」ボタンをクリックすると「現データを保存する」のダイアログが表示されますので保存先を選択してファイル名を入力して保存します。

これは一般の Windows のソフトと同様の操作になります。ここではファイル名は“PAT1_通りコピー前”としておきます。拡張子は自動で“KS10”が付きますので入力する必要はありません。またファイル名も後で分かれば何でも良いのですが、ちなみにここで使っているファイルヘッダーの PAT とは太陽電池アレイの“Photovoltaic Array”とチュートリアル of “Tutorial” の頭文字を使っています。

◇通りコピー

では「通りコピー」機能を使って残りの通りを作成していきましょう。

「構造要素」タブにある「通りコピー」ボタンをクリックすると右に示すダイアログが表示されます。

基準節点とはコピー元の通りに含まれる節点を選択しますがここではデフォルトの 1 でかまいません。

コピー面は基準節点を含む通りの面を選択しますが、これがコピーの作成方向にもなります。ここでもデフォルトの「X-Z 面（Y 軸方向に作成）」にしておきます。

作成スパンは基準節点から作成方向にどれくらい離してコピーするかになります。ここでは隣のモジュール取付材の通りまでの距離 800 を入力します。

支持条件・荷重条件はまだ設定していないのでその下のチェックは無効となり、“作成軸方向に要素を作成”をチェックすると全ての節点から Y 軸方向の要素が作られてしまうのでこれもチェックは外したままとします。

この条件で「コピー実行」ボタンをクリックして「通りコピー」を実行します。

通りコピー機能設定

基準節点 1

コピー面

X-Z面(Y軸方向に作成)

Y-Z面(X軸方向に作成)

X-Y面(Z軸方向に作成)

作成スパン 800 (mm)

☐ 支持条件はコピーしない

☐ 荷重条件はコピーしない

☐ 作成軸方向に要素を作成

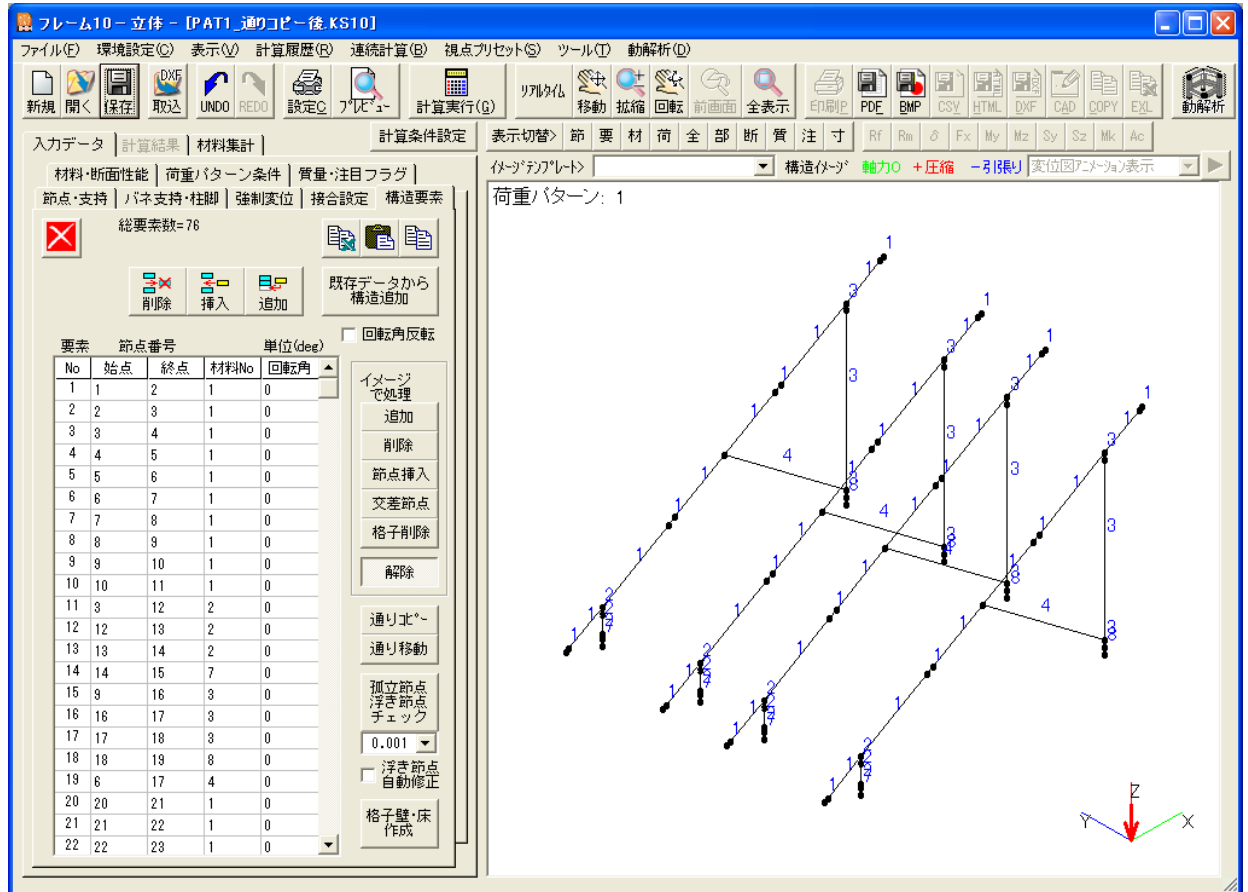
コピー実行 キャンセル

通りがコピーされたことを確認したら再度「通りコピー」ボタンをクリックして今度は作成スパンのみ隣の連の手前側モジュール取付材の通りの 1 3 2 3（800+523）として通りコピーを実行し、最後にもう一度、作成スパンを 2 1 2 3（800+523+800）として通りコピーを実行します。

なお基準節点をコピーして新しくできた通りの節点番号から選択していけば2回目の通りコピーの作成スパンは523、最後の通りコピーの作成スパンは800にしても同じことになります。

設定を間違えて「通りコピー」を実行してしまった場合はUNDOボタンで通りコピー前の状態に戻せますので、元に戻してからやりなおしてください。

次に全ての「通りコピー」を実行したものを示します。



この例でも材料番号をイメージ表示していますが材料番号もそのままコピーされているのが分かります。

なお慣れないうちはまめに設定データを保存しながら作業した方が何かあったときにダメージが少ないのでここで再度設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PAT1_通りコピー後”としておきます。

◇横材構造要素設定

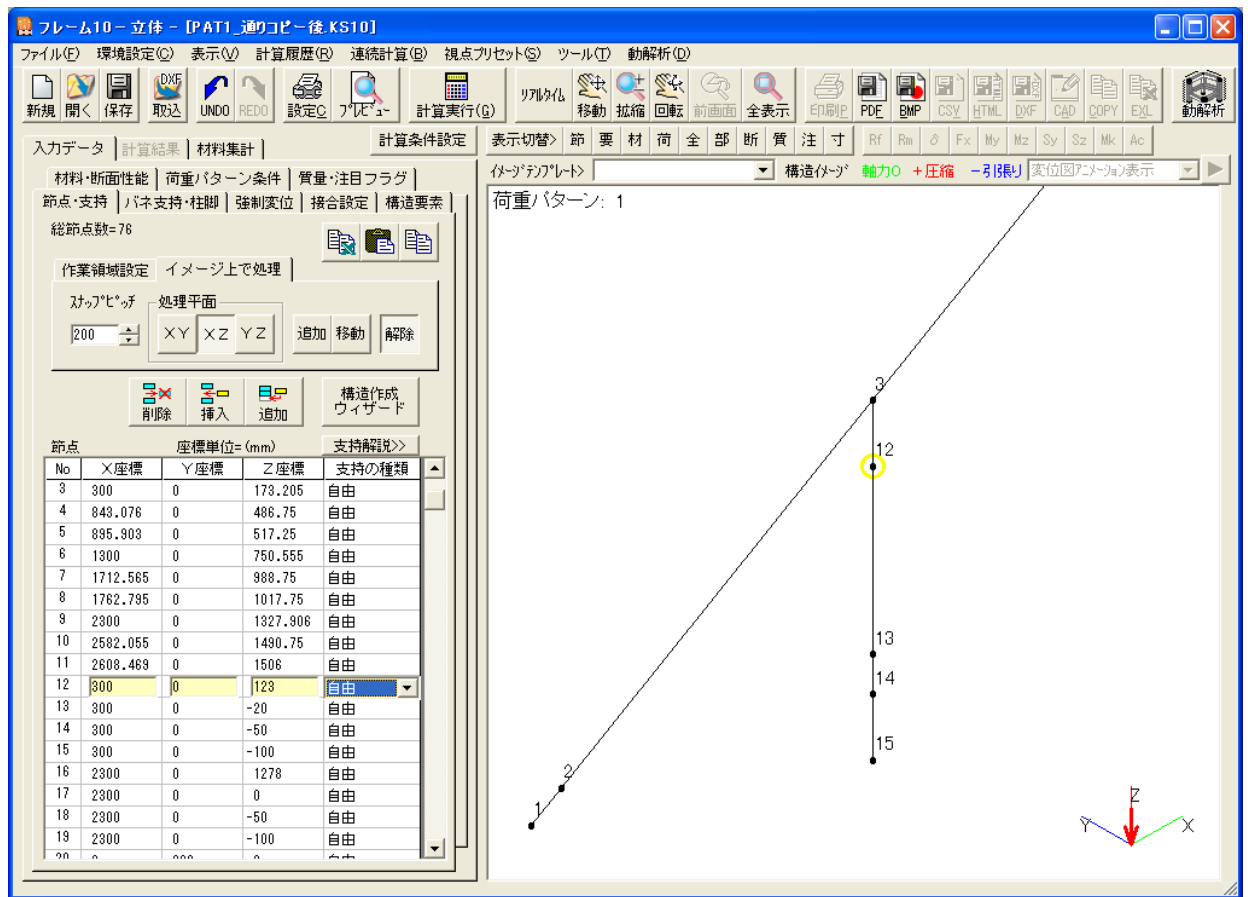
横材については既に前後柱材との接合点に節点があるのでそれらをつなげて要素を設定すれば強度部材としての横材の設定はできますが、横材をモジュールの幅に合わせて伸ばしている支持物も見られます。これはモジュール保護の役割があるのではないかと考えられますので、ここでもモジュール側面まで伸ばしておきましょう。

横材を伸ばす距離はモジュール取付穴からモジュール側面までの距離なので前に説明しているモジュールの仕様から261.5mm（ビス頭を含む）ということが分かります。

ここで要素を伸ばすということはそこに節点が必要ということになりますので[節点・支持]タブに戻って先に横材端点の位置に節点を作成しておく必要があります。

では[節点・支持]のタブを開きます。ここで今までと同様に[追加]ボタンを押して新規に節点座標を入力していても良いのですが、ちょっと便利な方法を紹介します。

まず前横材の手前側端点を追加するとしてこの周辺のイメージを拡大しておきます。イメージを拡大する方法はいろいろあるのですが、ホイール付きのマウスであればマウスを拡大したいところに持っていきホイールを回すとイメージを簡単に拡張できるようになっています。次にイメージ上で前柱材と前横材の接合点である節点12の位置にマウスを持っていきハイライト表示されたらマウス左クリックします。これで左のデータ表示欄の節点12の位置にデータ入力ボックスが表示されます。



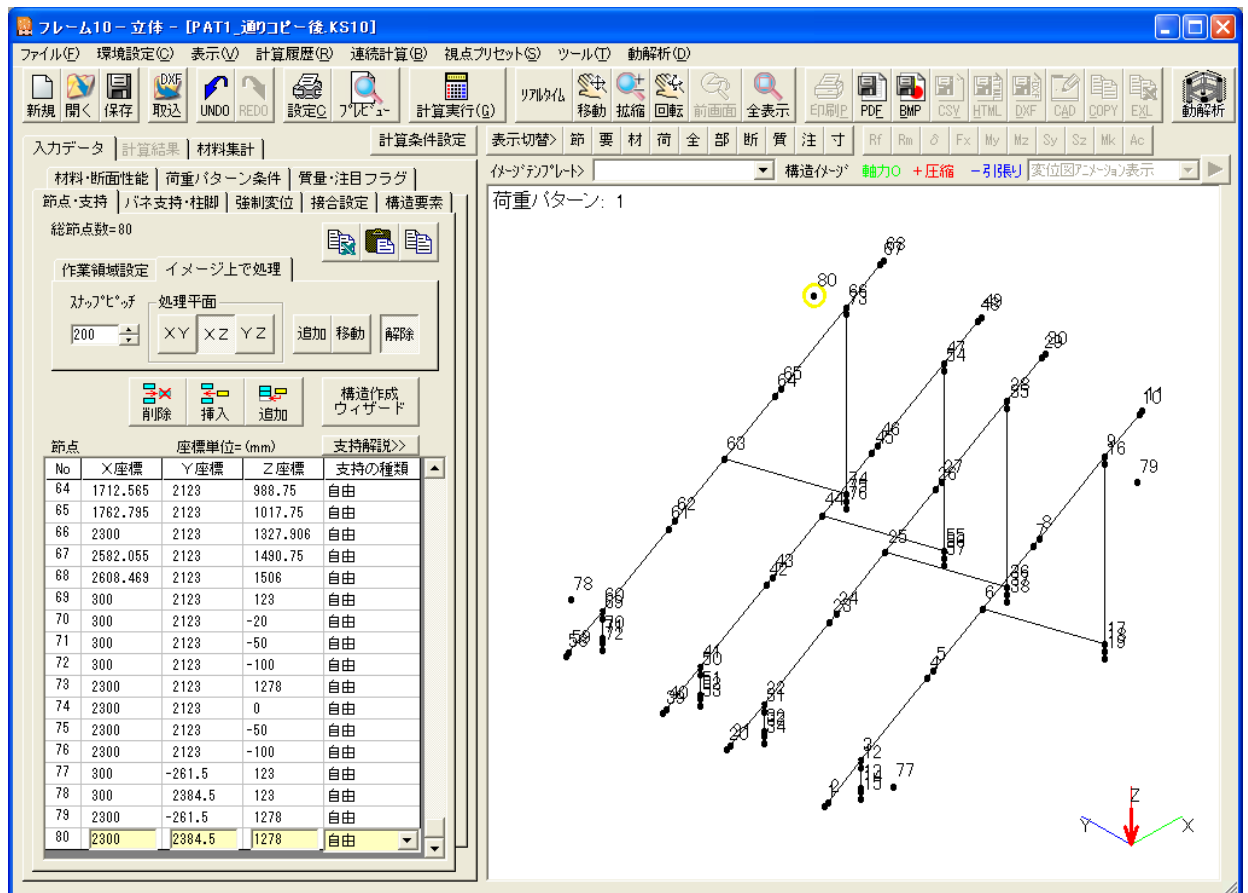
このように節点12にデータ入力ボックスが表示されてから[追加]ボタンをクリックすると同じ座標値の節点が追加されますのでY座標に-261.5（横材の端点はYマイナス方向）と入力します。

76	2300	2123	-100	自由
77	300	-261.5	123	自由

この方法を使うとX座標やZ座標を入力する手間が省けますし入力間違いも少なくなると
 と思いますが、普通に「追加」ボタンをクリックして座標入力してもかまいませんのでやりや
 すい方法を使えば良いでしょう。

横材の反対側端点をこの方法で設定する場合は一旦「全表示」ボタンをクリックして拡大を
 解除してから反対側の横材取付点を中心に拡大して作業すると良いでしょう。反対側の端点
 のY座標は2384.5（800+523+800+261.5）となります。

同様にして後横材の両端点も入力したものを次に示します。



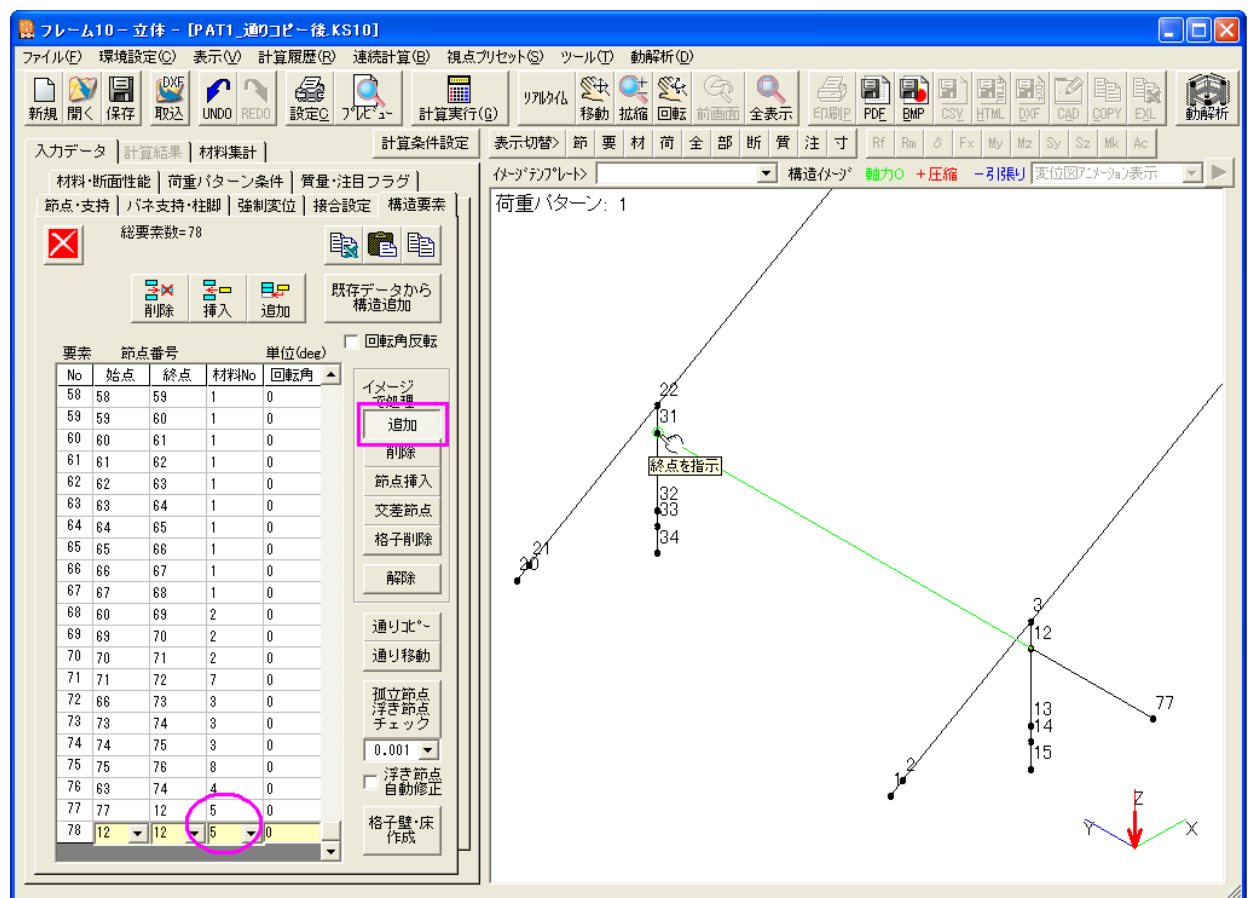
続いて「構造要素」タブを開いて横材の構造要素を設定していきます。構造要素の設定はい
 ままで通りデータ表示欄の上にある「追加」ボタンをクリックしてデータ入力ボックスで始
 終点の節点を選択していても良いのですが、横材の節点番号は飛び飛びになっているので
 モジュール取付材や前後柱材のようにつながるべき節点番号が分かりにくくなっています。そ
 こでここでもちょっと便利な方法を紹介します。

では「構造要素」タブを開いて要素を追加したい場所の節点番号がはっきり分かるくらいに
 イメージを拡大しておきます。次にイメージで処理の枠にある「追加」ボタンを押した状態
 にしてマウスを要素の始点となる節点に持っていきハイライト表示されたらマウス左クリ
 ックします。上手く節点を認識すると赤いラバーバンドが表示されますので今度は要素の終
 点となる節点に持っていき緑色に表示されたらマウス左クリックします。

このようなイメージ上でのマウス操作で要素を追加していくことができます。慣れると便利な機能ですので試してみてください。

最初は新しく追加した前横材の端点である節点番号 77 から前柱材の接合点の節点番号 12 に要素を作成します。マウスで作成しない場合はデータ表示欄の上にある「追加」ボタンをクリックして始点節点に 77、終点節点に 12 を選択あるいは入力します。

ここで材料番号を前横材の 5 に変更しておくことで次から追加する要素の材料番号に 5 がデフォルトで選択されるようになります。



イメージ上で要素を追加していく場合は節点が見えなくなったら一旦「全表示」ボタンをクリックするかホイールでイメージを小さくしてから目的の節点あたりにマウスを持っていきホイールで拡大して作業を続けると良いでしょう。

次に後横材は材料番号を 6 として前後横材の構造要素を設定した例を示します。

74	74	75	3	0
75	75	76	8	0
76	63	74	4	0
77	77	12	5	0
78	12	31	5	0
79	31	50	5	0
80	50	69	5	0
81	69	78	5	0
82	79	16	6	0
83	16	35	6	0
84	35	54	6	0
85	54	73	6	0
86	73	80	6	0

解除

通り北へ

通り移動

孤立節点
浮き節点
チェック

0.001 ▼

☐ 浮き節点
自動修正

格子壁・床
作成

なおイメージ上で追加をしていた場合は作業が終了したら「解除」ボタンを押しておいてください。

ここで再度設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PAT1_横材追加”としておきます。

◇ベース材構造要素および支持条件設定

ベース材の構造要素の設定も横材とほぼ同様ですがベース材中央から基礎と固定するアンカーボルトの位置に側面ダミー要素を設定するのでそこにも節点を設けておく必要があります。またアンカーボルトの位置にも節点を設けて側面ダミー要素でつなぎます。

基礎の幅は前に説明した寸法図で2500mmとしています。この基礎の幅は特に意味のあるものではないのですが安定感がありそうなので広めの寸法にしてみました。支持物の全幅は前に寸法図で説明した2646mmで横材の長さも同じですので $(2646 - 2500) \div 2 = 73$ で、横材端点から73mm内側となり、柱材とベース材の接合点からは188.5mm外側の位置となります。またベース材の長さは横材と同じ2646mmとし柱材とベース材の接合点より261.5mm伸ばすことになります。

では「節点・支持」タブを開いて前後ベース材に必要な節点座標を設定していきます。また支持点の位置はベース材中心より50mm下に設定しておきます。

ここで支持とは構造物が外部からどのように“支持”されているかということで、今回の例ではみぞ形鋼の側面を基礎のコンクリートに乗せてアンカーボルトで固定すると考えてベース材中心から支持点まで側面ダミー要素を設定しており、ベース材中心で考えると側面ダミー要素が回転バネに近い働きをするので側面ダミー要素の支持点側は「全固定」としておきます。

80	2300	2384.5	1278	自由
81	300	-188.5	-100	自由
82	300	-261.5	-100	自由
83	300	2311.5	-100	自由
84	300	2384.5	-100	自由
85	2300	-188.5	-100	自由
86	2300	-261.5	-100	自由
87	2300	2311.5	-100	自由
88	2300	2384.5	-100	自由
89	300	-188.5	-150	全固定
90	300	2311.5	-150	全固定
91	2300	-188.5	-150	全固定
92	2300	2311.5	-150	全固定

「フレーム構造－立体」ではその他にさまざまな支持の種類がありますが太陽電池アレイの支持物としては「ピン支持」か「全固定」のどちらかになると思います。今回のように側面ダミー要素を使わずにベース材中心に支持点を配置するような場合は「全固定」では強度が高すぎると考えられるので「ピン支持」を選択した方が良いでしょう。

では「構造要素」タブを開いて前後ベース材の要素と側面ダミー要素を設定していきます。材料番号は前ベース材を7、後ベース材は8とします。構造設定の設定方法はもう説明する必要もないと思いますが節点を飛ばさないように注意してください。次にベース材の構造要素を設定したものを示します。

フレーム10－立体－[PAT1_ベース材追加KS10]

ファイル(F) 環境設定(C) 表示(V) 計算履歴(H) 連続計算(B) 視点プリセット(S) ツール(T) 動解析(D)

新規 開く 保存 取込 UNDO REDO 設定(C) プレビュー 計算実行(G) リアルタイム 移動 拡張 回転 前面面 全表示 印刷(P) PDF BMP CSV HTML DXF CAD COPY EXL 動解析

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定 表示切替> 節 要 材 荷 全 部 断 質 注 寸 Rf Ra δ Fx My Mz Sy Sz Mk Ac

材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ |

節点・支持 | パネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素

総要素数=104

削除 挿入 追加 既存データから構造追加

要素 節点番号 単位(deg) 回転角反転

No	始点	終点	材料No	回転角
84	35	54	6	0
85	54	73	6	0
86	73	80	6	0
87	82	81	7	0
88	81	15	7	0
89	15	34	7	0
90	34	53	7	0
91	53	72	7	0
92	72	83	7	0
93	83	84	7	0
94	81	89	7	0
95	83	90	7	0
96	86	85	8	0
97	85	19	8	0
98	19	38	8	0
99	38	57	8	0
100	57	76	8	0
101	76	87	8	0
102	87	88	8	0
103	85	91	8	0
104	87	92	8	0

イメージで処理 追加 削除 節点挿入 交差節点 格子削除 解除 通りコ~ 通り移動 孤立節点 浮き節点 チェック 0.001 浮き節点 自動修正 格子壁・床 作成

イメージプレビュー 構造要素: 軸力O +圧縮 -引張り 変位図アニメーション表示

荷重パターン: 1

Y Z X

ここで再度設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PAT1_ベース材追加”としておきます。

◇材料・断面性能設定

これで構造自体はほぼ完成しました。後は使用する鋼材に合わせて材料番号毎に材料条件を設定していきます。

では[材料・断面性能] タブを開きます。最初に材質を決めておきますがデフォルトで材質グループ名称が[構造解析一般]となっており機械設計用の材質グループとなっていますので、材質グループ名称をリストボックスから[鉄骨構造(長期)]に変更しておきます。このときに確認メッセージが出ますがそのまま[OK]しておきます。

材質グループに[鉄骨構造(長期)]を選択すると材質のリストボックスには鉄骨構造用の材質が表示されるようになります。ここには板厚区分を含め鉄骨構造用の多くの材質がありますが太陽電池アレイの支持物としては[SS400 t≤40 一般構造用圧延鋼]を選択しておけば良いと思います。

材料条件はこの材質と断面形状による断面性能の組み合わせで設定していきます。断面形状の選択では一般的な鋼材の断面形状が入っていますが、引き抜き材など特殊な断面形状のものであっても「C A D T O O Lフレーム構造解析10」の[断面性能計算] コマンドによって断面性能を計算して断面形状データに登録して使用することができます。[断面性能計算] や材質・断面データについての詳細は[C A D T O O Lフレーム構造解析10 2Dチュートリアル](2Dの方なので注意)を参照してください。

ここで断面形状を選択する前に材料番号と使用する予定の鋼材をリストアップしておきます。ただし断面形状は後から簡単に変更できますのでここで深く考える必要はありません。

モジュール取付材	材料番号1	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 6
前柱材	材料番号2	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 6
後柱材	材料番号3	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 6
斜材	材料番号4	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 6
前横材	材料番号5	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 4
後横材	材料番号6	: 等辺山形鋼	50 x 50 x 4
前ベース材	材料番号7	: みぞ形鋼	100 x 50 x 5 x 7.5
後ベース材	材料番号8	: みぞ形鋼	100 x 50 x 5 x 7.5

また同じ鋼材を使っている場合は同じ材料番号にしても良いのですが後から個別にサイズを変えるなどの検討が容易にでき、材料番号に名称を付けて管理できますのでこの程度の種類であれば個別に設定しておくのがよいでしょう。

材料番号は1になっていると思いますので材料名称に“モジュール取付材”と入力して[形状選択] ボタンをクリックします。断面形状1選択ダイアログが表示されますので形状名称に[等辺山形鋼]を選択し、サイズに[50 x 50 x 6]を選択します。

断面形状 1 選択

サイズ $A \times B \times t$

断面形状フォルダ名称
標準(ローカルマシン)

形状名称
等辺山形鋼

サイズ
50x50x6

断面積 (mm²)
564.4

Y方向せん断有効断面積(mm²)
264

Z方向せん断有効断面積(mm²)
264

断面2次モーメント I_y (mm⁴)
126000

断面2次モーメント I_z (mm⁴)
126000

有効断面2次極モーメント $I_{x'}$ (mm⁴)
6768

最小断面2次半径 i_e (mm)
9.63

断面係数 Z_y (mm³)
3550

断面係数 Z_z (mm³)
3550

有効極断面係数 $Z_{x'}$ (mm³)
1128

断面性能設定

単位 mm 有効数字 4 ☐ 指数表示

☐ セン断応力算出にせん断有効断面積を使用する

形状名称、サイズを選択したら「確定」ボタンをクリックすると次に示すように選択した断面形状の断面性能が表示されます。

材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ

テンプレート 読込

材料名称 (1/200) 1 モジュール取付材

材質

材質フルパス名称 標準(ローカルマシン)

材質グループ名称 鉄骨構造(長期)

材質 SS400 t ≤ 40mm 一般構造用圧延鋼

縦弾性係数(N/mm²) ポアソン比 密度(g/cm³) 付加質量(kg/m)

206000 0.3 7.86 0

長期許容応力度 (N/mm²)

引張り	圧縮	曲げ	せん断	ねじり
156	156	156	90.4	90.4

材料No	1
断面形状	等辺山形鋼
サイズ	50x50x6
断面積(mm ²)	564.4
断面2次モーメント I_y (mm ⁴)	126000
断面2次モーメント I_z (mm ⁴)	126000
有効断面2次極モーメント $I_{x'}$ (mm ⁴)	6768
最小断面2次半径 i_e (mm)	9.63
断面係数 Z_y (mm ³)	3550
断面係数 Z_z (mm ³)	3550
有効極断面係数 $Z_{x'}$ (mm ³)	1128
トラス部材	適用はここをクリック

形状選択

全てトラス部材

使用部材強調表示

個別材料データ削除

次に材料番号2の設定を行います。材料番号を進めるには材料名称の上の[>] ボタンをクリックして進めるか材料名称右の▼ボタンで選択します。

材料番号2の材料名称には“前柱材”と入力して[形状選択] ボタンをクリックして同じ等辺山形鋼を選択して[確定] します。同様にして材料番号3～8も設定していきます。

断面形状選択ダイアログでは直前に選択した形状名称、サイズがデフォルトで選択されていますので変更の必要がない場合は[確定] ボタンをクリックするだけで良いようになっています。

横材も等辺山形鋼ですが板厚を薄くしていますのでサイズを再選択します。ベース材は形状名称に[みぞ形鋼] を選択し、サイズに[100x50x5x7.5] を選択します。

次に材料番号7のみぞ形鋼を選択している断面形状7選択ダイアログを示します。

断面形状フォルダ名称	断面積 (mm ²)
標準(ローカルマシン)	1192

形状名称	Y方向せん断有効断面積 (mm ²)	Z方向せん断有効断面積 (mm ²)
みぞ形鋼	675	425

サイズ	断面2次モーメントIyB (mm ⁴)	断面2次モーメントIzB (mm ⁴)	有効断面2次極モーメントWpB' (mm ³)	最小断面2次半径Ie (mm)	断面係数ZyB (mm ³)	断面係数ZzB (mm ³)	有効極断面係数Zx'B' (mm ³)
100x50x5x7.5	1880000	260000	17210	14.8	37600	7520	2295

等辺山形鋼は90°単位であればどの向きに使っても断面性能は変わりませんがみぞ形鋼は使う向きによって断面性能が大きく異なるので注意が必要です。このダイアログ左の図には断面形状と共にYB、ZBの矢印が表示されています。これが「C A D T O O L フレーム構造解析」で「部材座標」と呼んでいるものでXBは鋼材の長手方向（この図では奥行き方向）になり、それぞれB（B U Z A I のB）が付いて表示されます。

「フレーム構造－立体」では鋼材を自由な向きに設定できるようになっていますがそれは構造要素の設定で要素毎に回転角が設定でき鋼材を回転して配置することで実現しています。

回転角が0の場合は垂直に配置している要素以外は部材座標のZBと全体座標のZ軸が同じ方向になるように決められていますので、ベース材については回転角0のままこの図で表示しているのと同じ向きで配置されることになり回転角の変更の必要はありません。

ただしベース材中心から側面に設定した側面ダミー要素はベース材と同じみぞ形鋼を使っていますが垂直の部材なのでデフォルトのZB方向が全体座標のXマイナス方向となり、配置したい方向と90°ずれてしまうので回転角に-90を入れておきます。

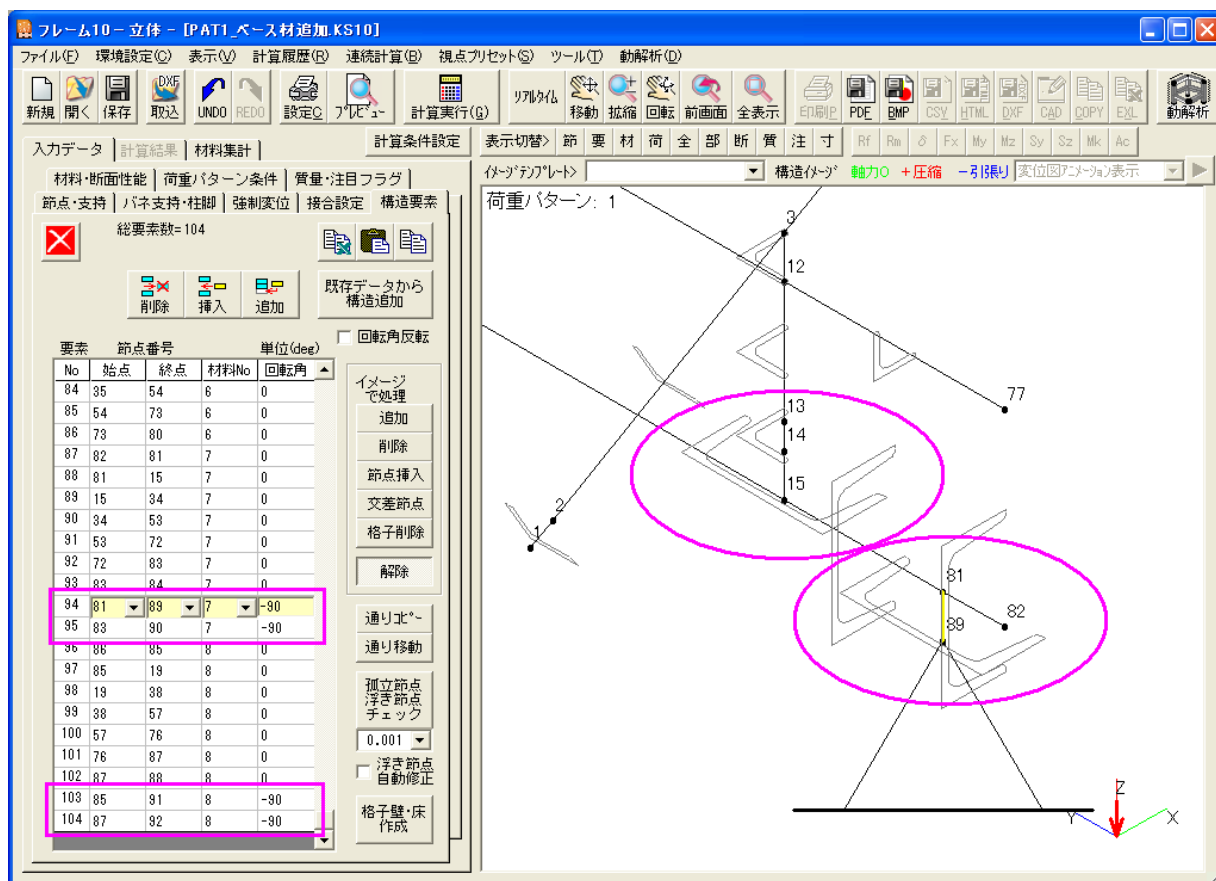
太陽電池アレイの陸屋根形支持物では回転角はあまり変な向きに鋼材を使うことはないと思いますが、鋼材を回転させて配置したい場合は「3Dチュートリアル」を参照して部材座標と回転角の関係を良く理解して使う必要があります。

また「フレーム構造-立体」では設定してある断面形状をイメージ表示する機能もあり、断面形状を表示させるとどのような向きで鋼材が使われているのかよく分かります。これはイメージ表示枠上の「断」ボタンで簡単に表示を切り替えることができるので試してみてください。

最後に材料番号8の材料名称に“後ベース材”入力し断面形状に材料番号7と同じみぞ形鋼を選択して材料条件の設定を完了します。

ここで再度設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PAT1_材料条件設定”としておきます。

次に原点周辺を拡大して材料番号と断面形状を表示している例を示しますが、ここでは側面ダミー要素に回転角-90を入力して断面方向を回転させているのが分かります。



このようにして使っている材料番号や選択した断面形状に間違いがないか確認します。ただし強度計算に必要なのは断面性能の値なので等辺山形鋼などは 90° 単位で向きが違っていても計算上は問題ありませんので、わざわざ実際の支持物の鋼材の向きに合わせる必要はありません。

これで支持物の構造モデルは完成しました。一度[計算実行] ボタンをクリックしてエラーにならないか確認しておきましょう。計算が正常に通れば[計算結果] タブが開きさらに[変位・反力] タブが開いて総変位などが確認できます。

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定

変位・反力 | モーメント・応力・座屈 | 個別要素・通り別 | 材料別詳細

最大総変位 (mm) 0.3016 計算時間= 2 秒

発生X座標 (mm) 1300 総重量(kg) 175.437

発生Y座標 (mm) 1323

発生Z座標 (mm) 750.6

コラム幅リセット ☐ イメージと連動して強調表示

節点	総変位 δ (mm)	変位 δ_x (mm)	変位 δ_y (mm)	変位 δ_z (mm)
1	0.0561	-0.0551	-0.0096	-0.0051
2	0.056	-0.0551	-0.0085	-0.0051
3	0.0551	-0.0547	0.0025	-0.0051
4	0.0633	-0.0272	0.0184	-0.054

また構造物の総重量（質量）も自動で求められこのタブの総重量表示欄に表示されます。ここから支持物の質量は175.437 kgということが分かります。これには側面ダミー要素（合計600 mm分）も含まれますが質量にして4 kg弱なのでこのまま進めます。なおこのようなダミー要素が多用されてその質量も問題になるような場合は材質で密度のみ0とした材質を作ってそれを適用することでダミー要素の質量を0とすることができます。

この時点ではまだ荷重条件は設定していませんが加速度条件がデフォルトで $G_z = -1$ （下向きZ方向なので重力加速度に相当する）となっているので支持物の質量と重力加速度による自重のみかかっている条件での計算になり最大総変位は約0.3 mmとなっています。

ここで正常に計算が通らずにエラーメッセージが表示される場合はそのメッセージの内容を確認して設定等をチェックしてください。“FEM計算エラー”と表示される場合の多くは節点を飛ばして要素を設定して[浮き節点]ができていると考えられますので構造要素の設定を確認してみてください。また[浮き節点]についての詳細は[3Dチュートリアル]を参照してください。

次からはこの構造モデルに設定する荷重条件を手計算で求めていきますのでJISか文献1および関数電卓を用意して進めてください。また荷重条件が求められたら「フレーム構造－立体」に適用して計算してみますので、作業中の「フレーム構造－立体」は起動したままにしておいてください。

手計算による荷重計算と溶接構造モデルでの強度の評価

◇固定荷重の設定と評価

JISでは固定荷重はモジュール、支持物などの質量を含め恒久的に加わる荷重と説明されています。文献1では全てのモジュール質量や支持物の質量を求めています。ここでは強度の評価には「フレーム構造－立体」で行う前提で話を進めており、既に構造モデルもできていますので荷重条件も「フレーム構造－立体」用に計算して適用していく形で説明していきます。

「フレーム構造－立体」では支持物の質量は前に説明したように自動的に計算されるので求めておく必要はありません。支持物の構造モデルができたときに一度計算を実行していますが、そこで支持物の質量は175.437kgと求められています。ではモジュールの質量についてどうするかというと、「フレーム構造－立体」には節点質量という機能があり節点単位で質量を設定することができ、節点質量と加速度条件に応じた荷重が発生するようになりますのでこの機能を使って設定します。また総重量（質量）も節点質量を含めて自動で算出されるので便利です。

先に作成した構造モデルのモジュールの取付点には節点が設けています。モジュール1枚あたり取付点は4点なのでモジュール質量16.5kg ÷ 4 = 4.125kgの質量を取付点の節点に節点質量として設定します。

節点質量は[入力データ]タブの[質量・注目フラグ]のタブを開いて設定したい節点番号の行をクリックしてデータ入力ボックスを表示して質量の入力欄に入力します。

ここでもイメージ上で節点をクリックするとその節点の行にデータ入力ボックスが表示されますのでイメージを拡大しながら取付点の節点を選択して質量を入力すると良いでしょう。次にモジュールの取付点である節点2に節点質量を設定している例を示します。

フレーム10-立体 - [PAT1 材料条件設定 KS10]

ファイル(F) 環境設定(O) 表示(V) 計算履歴(H) 連続計算(C) 視点プリセット(S) ツール(T) 動解析(D)

新規 開く 保存 取込 UNDO REDO 設定 計算実行(G) リアルタイム 移動 拡大 回転 前面面 全表示 印刷(P) PDF BMP CSV HTML DXF CAD COPY EXL 動解析

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定 | 表示切替 | 節 要 材 荷 全 部 断 質 注 寸 Rf Rm δ Fx My Mz Sy Sz Mk Ac

タブ: 節点・支持 | パネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素 | 材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ

節点

No	X座標	Y座標	Z座標	質量(kg)	フラグ
1	0	0	0	0	
2	26.414	0	15.25	4.125	
3	300	0	173.205	0	
4	849.076	0	486.75	0	
5	895.903	0	517.25	0	
6	1300	0	750.555	0	
7	1712.56E	0	988.75	0	
8	1762.79E	0	1017.75	0	
9	2300	0	1327.90E	0	
10	2582.05E	0	1430.75	0	
11	2608.46E	0	1506	0	
12	300	0	123	0	
13	300	0	-20	0	
14	300	0	-50	0	

イメージプレビュー: 荷重パターン: 1

デフォルトのイメージ表示条件では質量と加速度に応じた矢印を表示するようになってい
ますのでこのようにイメージの節点2から下向きの加速度に応じた矢印が表示されていま
す。節点質量の設定時にはちょっと鬱陶しいかも知れませんがイメージ表示枠上の「質」
ボタンで矢印は消してマゼンタ色の●のみ表示させておきましょう。

またデータ入力ボックスでは[Ctrl+C]で値のコピー、[Ctrl+V]で貼り付けができますの
で節点2の入力欄に4.125を入力したら[Ctrl+C]でコピーしておき、イメージを拡縮
して次のモジュール取付点の節点をクリックして[Ctrl+V]で質量の値を貼り付けていくと
効率よく作業ができます。

節点質量を入れ間違えたらその節点の行をクリックするとデータ入力ボックスが表示され
るので節点質量に0を入力して設定を取り消しますが、節点質量は固定荷重として全ての荷
重条件に影響しますので、イメージを拡縮しながら確認して間違いのないように設定してい
ってください。

次に全てのモジュール取付点の節点に節点質量を設定したものを示します。

フレーム10-立休-[PAT1_材料条件設定.KS10]

ファイル(F) 環境設定(C) 表示(V) 計算履歴(R) 連続計算(B) 視点プリセット(S) ツール(T) 動解析(D)

新規 開く 保存 取込 UNDO REDO 設定(C) プレビュー 計算実行(G) リアルタイム 移動 拡縮 回転 前画面 全表示 印刷(P) PDF BMP CSV HTML DXF CAD COPY EXL 動解析

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定 | 表示切替 | 節 要 材 荷 全 部 断 質 注 寸 Rf Rm o Fx My Mz Sy Sz Mk Ac

節点・支持 | バネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素 | ターゲットアラート | 構造タグ | 軸力O +圧縮 -引張り | 変位図アニメーション表示

材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ | 荷重パターン: 1

No.	X座標	Y座標	Z座標	質量(kg)	フラグ
44	1300	1323	750.555	0	
45	1712.56E	1323	988.75	4.125	
46	1762.79E	1323	1017.75	4.125	
47	2300	1323	1327.90E	0	
48	2582.05E	1323	1490.75	4.125	
49	2608.46E	1323	1506	0	
50	300	1323	123	0	
51	300	1323	-20	0	
52	300	1323	-50	0	
53	300	1323	-100	0	
54	2300	1323	1278	0	
55	2300	1323	0	0	
56	2300	1323	-50	0	
57	2300	1323	-100	0	
58	0	2123	0	0	
59	26.414	2123	15.25	4.125	
60	300	2123	173.205	0	
61	843.076	2123	486.75	4.125	
62	895.903	2123	517.25	4.125	
63	1300	2123	750.555	0	
64	1712.56E	2123	988.75	4.125	
65	1762.79E	2123	1017.75	4.125	
66	2300	2123	1327.90E	0	
67	2582.05E	2123	1490.75	4.125	
68	2608.46E	2123	1506	0	

これで固定荷重の設定ができたことになります。

「フレーム構造－立体」の荷重条件は最大50パターンの荷重パターン条件で設定していきます。固定荷重も荷重パターンの一つとして設定しておきますので「荷重パターン条件」タブを開いて荷重パターン番号1の荷重パターン名称に“固定荷重”と入力しておきます。

またデフォルトで重力加速度に相当する $G_z = -1$ になっていると思いますがこの加速度条件も荷重パターン毎に設定ができるようになっていますので、ここで G_z のみ -1 で G_x 、 G_y が0になっているか確認しておいてください。

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定

節点・支持 | パネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素

材料・断面性能 | **荷重パターン条件** | 質量・注目フラグ

デフォルト読み込み

荷重パターン名称 (1/50) | 荷重パターン 北東・合成

1 | 固定荷重

加速度条件 (単位はG) | Gx | 0 | Gy | 0 | Gz | -1

☐ 許容応力度を短期(長期の1.5倍)として安全率を算出

上記の設定ができれば一旦、設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PAT1_固定荷重”としておきます。

ではこの荷重条件で計算を実行してみましょう。

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定

変位・反力 | モーメント・応力・座屈 | 個別要素・通り別 | 材料別詳細

最大総変位 (mm) | 0.5874 | 計算時間= 1 秒

発生X座標 (mm) | 1199 | **総重量(kg)**

発生Y座標 (mm) | 1323 | 274.437

発生Z座標 (mm) | 692.2

コラム幅リセット | ☐ イメージと連動して強調表示

節点	総変位δ (mm)	変位δx (mm)	変位δy (mm)	変位δz (mm)
1	0.1129	-0.1072	-0.0195	-0.0291
2	0.1133	-0.1086	-0.0175	-0.0277
3	0.1119	-0.1186	0.0042	-0.0091
4	0.1385	-0.0543	0.0348	-0.1221
5	0.1469	-0.0477	0.0363	-0.1341

最大総変位は0.5874 mm、総重量は274.437 kgとなっています。節点質量を設定する前の支持物のみの質量は175.437 kgでしたので99 kg増えたことが分かります。

モジュールの質量は16.5kgですので $16.5 \times 6 = 99$ と6枚分の質量と一致します。これで節点質量の数値や設定数に間違いがないことが分かりますが、間違った節点に節点質量を設定している可能性も残りますのでこれはイメージ等で良く確認しておいてください。

固定荷重は支持物の強度評価の条件の一つですので強度の評価をしておく必要があります。そこで「計算結果」タブにある「モーメント・応力・座屈」タブを開きます。

入力データ		計算結果	材料集計	計算条件設定	
変位・反力		モーメント・応力・座屈	個別要素・通り別	材料別詳細	
最大曲げモーメント(N・mm)	251800	97	発生要素 No		
最大曲げ応力(N/mm ²)	9.883	60			
最小曲げ応力安全率	15.78	60			
最大せん断力(N)	741.4	97	発生要素 No		
最大せん断応力(N/mm ²)	0.622	97			
最小せん断応力安全率	145.3	97			

ここには最小曲げ応力安全率と最小せん断応力安全率が表示されていますが共に十分大きい値なので固定荷重ではとりあえず強度の問題はなさそうです。この安全率は材質グループに「鉄骨構造（長期）」を選択していますので選択した材質（SS400）の長期許容応力度を応力で割ったものになり1以上であれば安全という評価ができます。

このタブの下には個別の計算結果が一覧表示されていますが、この安全率のところに“*****”と表示されているのは安全率の値が100万以上になっていることを示し、全く問題はないと考えられるところとなります。

計算結果表示欄をスクロールしていくと各種の計算結果が確認できますが、ここで相当ねじり応力の安全率で1以下の厳しい値が出ていますが、相当曲げや相当ねじりは機械設計のプロペラシャフト等で曲げとねじりがかったときの応力の合成方法の一つで円形断面に適用され、鋼材のような断面形状では応力が過大（安全率が過小）に出るので今回の支持物の強度評価としては無視してください。

またその後に合成応力関係も表示されています。これは各軸の応力がかかる四角断面の角部を考えて3軸の応力を合成していますので単独の応力より大きくなりますが、こちらも従来は計算されていなかったものであり強度の評価方法も確立されていませんので設計者のための参考値として考えてください。

なお印刷設定の出力テンプレート設定で相当曲げ、相当ねじりや合成応力関係を出力しないようにもできますので、客先に見せる書類はこれらを出力しないようにしておき、計算方法や背景を知らない人が安全率の値だけみてビックリされないようにしておくといいでしょう。印刷設定や出力テンプレートの設定については「3Dチュートリアル」を参照してください。

基本的な強度の評価は従来通り部材座標軸単位の応力（ $\sigma_y B$ など B がつく項目）やその安全率で評価すれば良いと考えられます。前述の最小曲げ応力安全率も $\sigma_y B$ と $\sigma_z B$ の安全率から最も小さいものが表示されています。

なおモジュールの固定荷重の設定に節点質量を使わない方法もあります。その場合はモジュール取付点の節点に取付点あたりのモジュール質量と重力加速度で発生する荷重 40.5 N （ 4.125×9.80665 ）の下向きの集中荷重をかけます。

集中荷重のかけ方は次の風圧荷重で説明しますが、モジュールの質量を節点質量で設定しておくとして後で説明する地震荷重の時も水平加速度を設定するだけでそれに応じた水平荷重が自動的に発生し地震荷重値を計算する必要はありませんので、モジュールの固定荷重については集中荷重で設定するより節点質量で設定しておく方が効率的と考えられます。

また今回、強度の検討に使ったモーメントや曲げ応力は部材座標の軸周りの値になり、せん断力やせん断応力は部材座標の軸方向の値となります。このように曲げ関係とせん断関係では軸周りと軸方向という違いがありますので部材座標の B の付く項目を評価する場合は注意してください。なお変位や反力などは全体座標での基準軸方向の値となります。

では次に風圧荷重に進みます。風圧荷重の計算は細かい取り決めが多く計算も面倒ですが、支持物の設計の上で通常は風圧荷重による応力が最大となり、荷重条件の中では最重要条件なので確実に間違いのないように進めてください。

◇風圧荷重の手計算

まずモジュールの風圧荷重を求めますが、文献 1 の計算例では全てのモジュールの面積を合計して受風面積 A_w を算出しそれを基に風圧荷重を求めています。しかしながらここでは「フレーム構造－立体」の構造モデルの荷重設定方法を考えて、固定荷重と同様にモジュール取付点の節点にかかる荷重として、モジュール一枚の受風面積から風圧荷重を求めていきます。

風圧荷重 W は次の式で求められます。

$$W = C_w \times q \times A_w$$

ここで C_w : 風力係数

q : 設計用速度圧 (N/m^2)

A_w : 受風面積 (m^2)

モジュールの風力係数 C_w は J I S あるいは文献 1 に計算式が出ており

陸屋根形 順風（正圧）の場合 $C_w = 0.65 + 0.009 \times \theta$

陸屋根形 逆風（負圧）の場合 $C_w' = 0.71 + 0.016 \times \theta$

ただし、 $15^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ θ : アレイ面の傾斜角度

となっています。

ここでは順風と逆風を区別するため逆風の風力係数にダッシュをつけて表示します。またここで順風というのはアレイ面の正面に向かう風となりますが、順風と逆風の風の向きや風圧荷重の発生する方向などはJ I Sあるいは文献1で図解されていますのでそちらを参照すると分かりやすいです。

傾斜角度 θ は支持物仕様で 30° に決めていますので求めた風力係数は、

$$C_w = 0.92 \text{ (順風)}$$

$$C_w' = 1.19 \text{ (逆風)}$$

となります。

設計用速度圧 q は次の式で求められます。

$$q = 0.6 \times V_o^2 \times E \times I$$

ここで V_o ：設計用基準風速（前述のように高崎市は 30 m/s ）

E ：環境係数（これが面倒！）

I ：用途係数

既に V_o は分かっています。また用途係数 I はJ I Sあるいは文献1を見てもらえば分かりますが通常の太陽光発電システムでは1となります。（極めて重要な太陽光システムの場合に $I = 1.32$ となる）

環境変数 E はさらに次の式で求められます。

$$E = E_r^2 \times G_f$$

ここで E_r ：アレイ面の平均地上高 H によって選択される計算式によって算出される平均風速の高さ方向の分布を示す係数

G_f ：ガスト影響係数（J I Sあるいは文献1の表から算出）

アレイ面の平均地上高 H は前述のように設置高さを 10 m としていますのでアレイ面の平均高さを 1 m として $H = 11\text{ m}$ とします。

次に出てくるのが先に調べた地表面粗度区分でこれと Z_b 、 Z_g 、 α の係数がJ I Sあるいは文献1の表で設定されています。今回の地表面粗度区分は前述のようにⅢとしていましたので $Z_b = 5$ 、 $Z_g = 450$ 、 $\alpha = 0.20$ というのが表から分かります。

さらに平均地上高 H により計算式が2つありますが、平均地上高 H が Z_b を超える条件となりますので

$$\begin{aligned} E_r &= 1.7 \cdot (H/Z_g)^\alpha = 1.7 \cdot (11/450)^{0.20} \\ &= 0.8093 \end{aligned}$$

となります。

ガスト影響係数 G_f も J I S あるいは文献 1 の表から地表面粗度区分とアレイ面の平均地上高 H から求められます。平均地上高が 10m と 40m の値が設定されておりその間は直線補間となるので

$$G_f = 2.5 - (2.5 - 2.1) / 30 \times 1 = 2.487$$

これでやっと環境係数 E が求められ

$$E = E_r^2 \times G_f = 0.8093^2 \times 2.487 = 1.629$$

となります。

もう忘れていたかも知れませんが風圧荷重の算出に必要なのは設計用速度圧 q なので、

$$\begin{aligned} q &= 0.6 \times V_o^2 \times E \times I = 0.6 \times 30^2 \times 1.629 \times 1 \\ &= 879.7 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

となります。

これは文献 1 の計算例の速度圧 $q = 1366.1 \text{ N/m}^2$ に比べて低い値になっていますが、文献 1 では地上高 $H = 20\text{m}$ で環境係数 E が 1.969 と大きな値になっており、設計用基準風速 V_o も文献 1 の東京都 23 区は 34m/s と高崎市の 30m/s に比べ大きいからです。

特に設計用速度圧 q を求める式を見てもらうと分かりますが基準風速は二乗で効いてきますので 4m/s の違いでも大きな差となります。

ではモジュール仕様で求めたモジュール 1 枚の受風面積 $A_w = 1.323 \text{ m}^2$ から風圧荷重 W を求めてみます。

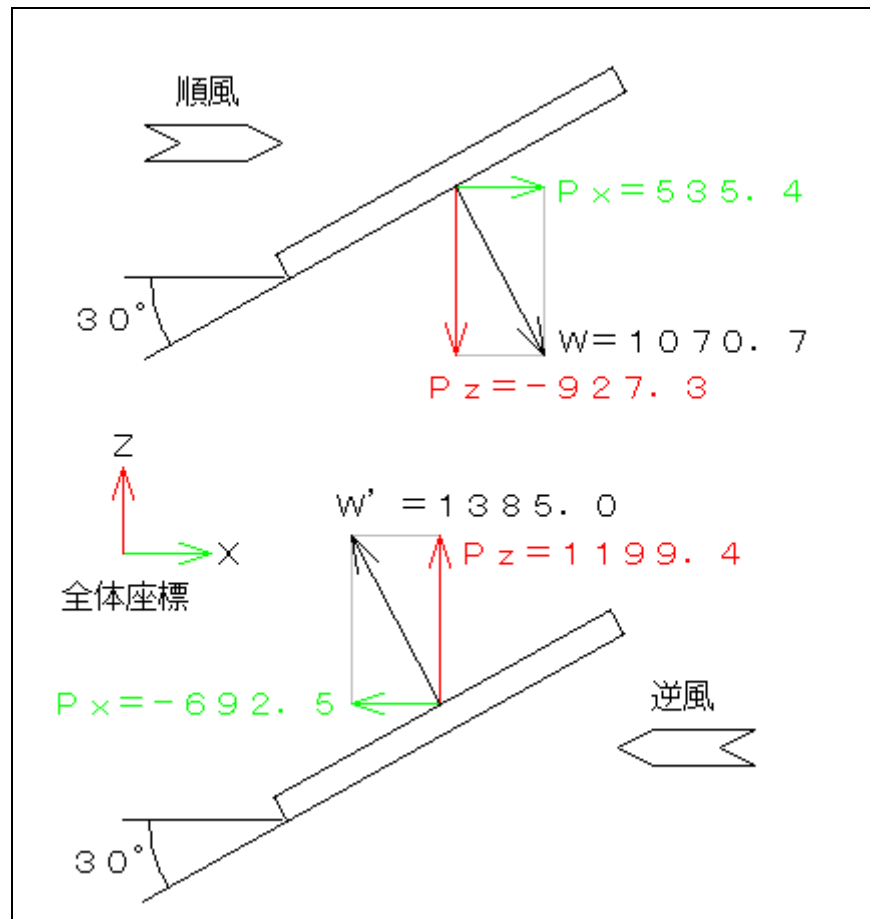
$$\begin{aligned} W &= C_w \times q \times A_w = 0.92 \times 879.7 \times 1.323 \\ &= 1070.7 \text{ N (順風、モジュール 1 枚あたり)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W' &= C_w' \times q \times A_w = 1.19 \times 879.7 \times 1.323 \\ &= 1385.0 \text{ N (逆風、モジュール 1 枚あたり)} \end{aligned}$$

となります。

この荷重はアレイ面に垂直の荷重となりますが「フレーム構造—立体」では全体座標の基準軸方向の集中荷重で入力する必要がありますので各軸方向の分力を求めておく必要があります。

順風方向は全体座標の X プラス方向、逆風方向は全体座標の X マイナス方向となり X 方向と Z 方向の分力となります。次に分力計算の図を示します。



上図の分力は $P_x = W \times \sin 30^\circ$ 、 $P_z = W \times \cos 30^\circ$ で求められますが全体座標の基準軸方向に合わせて符号を決めています。これらの値はモジュール1枚あたりの値になり、モジュール取付穴は4点なので上記の荷重の $1/4$ がモジュール取付点の節点にかかります。まとめると

$$\begin{aligned} \text{順風} \quad P_x &= 535.4 \div 4 = 133.85 \text{ N} \\ P_z &= -927.3 \div 4 = -231.83 \text{ N} \\ \text{逆風} \quad P_x &= -692.5 \div 4 = -173.13 \text{ N} \\ P_z &= 1199.4 \div 4 = 299.85 \text{ N} \end{aligned}$$

となります。

支持物の構造物にも風圧荷重がかかりモジュールと同じ次の式で求められます。

$$W_b = C_b \times q \times A_b$$

ここで C_b : 部材の風力係数

q : 設計用速度圧 (N/m^2)

A_b : 部材の受風面積 (m^2)

なお添字の b は J I S および文献 1 では表記されていませんがモジュールの係数と区別が付くようにここでは b (BUZAI) を付けています。

部材の風力係数は J I S および文献 1 で風洞実験によって定めるとありますが、これは通常は無理なので J I S および文献 1 では便宜的に 2 種類の求め方が出ています。

一つはラチス構造物の風力係数というものでJISでは表8、文献1では表5・13に出ているものですが、これには充実率など分かりにくい係数も出てきて、さらにそれらも計算して求める必要もあり面倒なので通常は使わないのではないかと思います。

もう一つは断面形状と風力係数が一覧になっているものでJISでは表9、文献1では表5・12に出ています。これは断面形状毎に風力係数が出ていて分かりやすいですが、等辺山形鋼でも風の当たる向きによって2.0や1.8という異なる値になっていて、これを正確に適用しようとすると結構面倒です。

ここでモジュールの風圧荷重に対して部材の風圧荷重の影響度を把握するため「フレーム構造－立体」の材料集計機能を使って支持物の部材の全ての受風面積を求めてみましょう。

「材料集計」タブを開いて「材料・部材長さ別小計付き」のボタンを押したものを次に示します。

材料番号	材料名称	記号	材質	断面名称	サイズ
1	モジュール	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x6
小計	"				
2	前柱材	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x6
小計	"				
3	後柱材	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x6
小計	"				
4	斜材	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x6
小計	"				
5	前横材	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x4
小計	"				
6	後横材	SS400	t ≤ 40mm	等辺山形鋼	50x50x4
小計	"				
7	前ベース材	SS400	t ≤ 40mm	みぞ形鋼	100x50x5x7.5
小計	"				
8	後ベース材	SS400	t ≤ 40mm	みぞ形鋼	100x50x5x7.5
小計	"				

このように「フレーム構造－立体」には材料集計機能もありますが表示欄が小さいのでちょっと分かりにくいです。そこで「エクセル貼り付け」ボタンをクリックするとエクセルが起動してこの結果が貼り付けられて表示されます。

そのエクセルの画像を次に示します。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	材料番号	材料名称	記号	材質	断面名称	サイズ	長さ(m)	数量	重量(kg)
2		1 モジュール	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x6	3.012	4	53.45
3	小計	"	"	"	"	"	12.05	[4]	53.45
4		2 前柱材	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x6	0.2232	4	3.961
5	小計	"	"	"	"	"	0.8928	[4]	3.961
6		3 後柱材	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x6	1.378	4	24.45
7	小計	"	"	"	"	"	5.512	[4]	24.45
8		4 斜材	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x6	1.25	4	22.18
9	小計	"	"	"	"	"	5	[4]	22.18
10		5 前横材	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x4	2.646	1	8.094
11	小計	"	"	"	"	"	2.646	[1]	8.094
12		6 後横材	SS400	t≤40mm	等辺山形鋼	50x50x4	2.646	1	8.094
13	小計	"	"	"	"	"	2.646	[1]	8.094
14		7 前ベース材	SS400	t≤40mm	みぞ形鋼	100x50x5x	2.646	1	24.79
15	"	"	"	"	"	"	0.05	6	2.811
16	小計	"	"	"	"	"	2.946	[7]	27.6
17		8 後ベース材	SS400	t≤40mm	みぞ形鋼	100x50x5x	0.05	6	2.811
18	"	"	"	"	"	"	2.646	1	24.79
19	小計	"	"	"	"	"	2.946	[7]	27.6
20									

ここの長さの小計を利用して等辺山形鋼の全長を求めると29.147mとなり、みぞ形鋼は側面ダミー要素を除いて5.292mとなります。等辺山形鋼は板厚が異なるものがありますが50×50なので幅を50mmとして受風面積は1.457㎡となりみぞ形鋼は風の当たる向きの幅は100mmとなりますので受風面積は0.529㎡で、これらから支持物の部材の総受風面積を計算すると1.986㎡となり約2㎡というのが分かります。

モジュールの総受風面積は1枚あたり1.323㎡で、これが6枚なので7.938㎡となり約8㎡になりますので、支持物の部材の受風面積はモジュールの約1/4ということが分かり影響度もそれほど大きくないことが分かります。このことからあまりムキになって厳密に部材の風圧荷重を求めなくても良いと考えられます。

ここで再度、断面形状と風力係数の一覧を見てみましょう。ザッと見ていくと特殊な断面形状でなければ概ね2±0.2あたりの風力係数となっているのが分かります。また風力係数を2に固定してもそれほど厳しいわけでもなく、かといって甘くもないと考えられますので、ここでは計算も楽な2を支持物の部材の風力係数として採用することとします。

設計用速度圧 q はモジュールの風圧荷重と同じものを使いますので受風面積 A_b も求めていますので次のように支持物の部材にかかる総風圧荷重が求められます。

$$\text{等辺山形鋼} \quad W_a = 2 \times 879.7 \times 1.457 = 2563.4 \text{ N}$$

$$\text{みぞ形鋼} \quad W_c = 2 \times 879.7 \times 0.529 = 930.7 \text{ N}$$

ただし支持物の部材にかかる風圧荷重はモジュールの風圧荷重のように節点にかかるのではなく部材全体にかかりますので、「フレーム構造－立体」ではこれを分布荷重にして設定します。

分布荷重にするには総風圧荷重を全長で割ってやれば良いですので、等辺山形鋼の場合は $2563.4 \text{ N} \div 29.147 \text{ m} = 87.95 \text{ N/m}$ となり、分布荷重の長さの単位を mm に変換して 0.08795 N/mm となります。これを風の向きに応じて「フレーム構造－立体」の分布荷重で等辺山形鋼の要素に設定してやれば良いです。

ただしこのように支持物の部材の全長、全受風面積を求めて風圧荷重を求めるのはサイズが変わったときなどに対応が面倒です。そこで単純に部材の幅から分布荷重を求める方法を説明します。

支持物の部材の風圧荷重を求める式の受風面積 A_b を部材の受風幅 H_b と受風長さ L_b に分けます。

$$W_b = C_b \times q \times A_b = C_b \times q \times H_b / 1000 \times L_b / 1000$$

ここで H_b : 部材の受風幅

L_b : 部材の受風長さ

なお H_b 、 L_b の単位は mm とするので上式では 1000 で割っています。

必要な分布荷重は長さ当たりの荷重ですので L_b を左辺に持ってきて、さらに C_b と q は既知ですからそれらの値を入れると分布荷重は次の式で求められます。

$$\begin{aligned} W_b / L_b &= C_b \times q \times H_b = 2 \times 879.7 \times H_b / 1000 / 1000 \\ &= 0.001759 \times H_b \end{aligned}$$

この計算式なら部材のサイズが変わっても簡単に対応できますので便利だと思います。またこの式の受風幅 H_b に等辺山形鋼の 50 mm を入れて計算すると先ほど求めた分布荷重と同じ値になることが分かります。

みぞ形鋼も全長と全受風荷重から分布荷重を求めても良いですがこの式の受風幅 H_b に 100 を入れて計算した方が簡単です。このようにして支持物の部材にかかる風圧荷重の分布荷重は記号を D として

$$\text{等辺山形鋼} \quad D_a = 0.08795 \text{ N/mm}$$

$$\text{みぞ形鋼} \quad D_c = 0.1759 \text{ N/mm}$$

なお添字の a はアングル、 c はチャンネルを示しているもので本チュートリアル上の便宜上の表記となります。また集中荷重は P (Point Load)、分布荷重は D (Distribution Load) の記号を使っています。

では「フレーム構造－立体」にここで求めた風圧荷重を設定していきましょう。

◇風圧荷重（順風）の設定と評価

まず順風のときの風圧荷重の荷重条件を設定していきます。

〔入力データ〕タブの〔荷重パターン条件〕タブを開き、荷重パターン1の固定荷重はそのまま残しますので荷重パターン番号を2に進めておきます。荷重パターンの番号は材料番号と同様に〔>〕ボタンで進めるか、荷重パターン名称の入力欄右にある▼でリストを開いて選択します。

荷重パターン2には固定荷重と順風の風圧荷重の荷重条件を設定していきますの荷重パターン名称に“固定荷重＋風圧荷重（順風）”を入力します。

節点・支持 | バネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素
材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ |

テンプレート 読み込み |< << < > >> >|

荷重パターン名称 (2/50) | 荷重パターン番号・合成

2 | 固定荷重＋風圧荷重（順風）（短期） | ▼

加速度条件 (単位はG) Gx 0 Gy 0 Gz -1

☒ 許容応力度を短期(長期の1.5倍)として安全率を算出

集中荷重 | 分布荷重 | モーメント荷重 | 台形分布荷重

前述のように固定荷重も含めますのでG_zは－1のままとします。風圧荷重は短期荷重となりますので短期許容応力度で評価する必要があります。ここで短期の許容応力度は長期許容応力度の1.5倍と決まっており、また許容応力度は安全率の計算のみ使っていますので材質データで長期と短期を切り替えるのではなく短期の場合は長期許容応力度で求めた安全率を1.5倍して求めるようにしています。

その設定が〔許容応力度を短期（長期の1.5倍）として安全率を算出〕のチェックボックスとなり、これをチェックすると短期に相当する安全率が求められるようになり、さらに荷重パターン名称には“（短期）”の文字が自動で付加されるようになっています。

ではモジュールの順風時の風圧荷重を取付点の節点に集中荷重として設定していきます。間違えないように次に荷重値を再掲しておきましょう。

$$\begin{aligned}\text{順風 } P_x &= 133.85 \text{ N} \\ P_z &= -231.83 \text{ N}\end{aligned}$$

集中荷重の設定方法も節点質量などと同じでデータ表示欄の設定したい節点番号の行をクリックしてデータ入力ボックスを表示させて入力していきます。ただし取付点の節点番号を拾っていくのもちょっと面倒です。

ここで取付点には既に節点質量が設定してあるのでイメージ上にはその節点にマゼンタ色の●が表示されていますので、これを目印にイメージ上で節点質量の設定されている節点をマウス左クリックして、その節点に集中荷重のデータ入力ボックスを表示させて入力していくのが便利です。

なおデータ表示欄で取付点の節点番号をクリックして入力していく場合はあらかじめ取付点の節点番号を一覧表にしておくといいでしょう。

モジュールの風圧荷重は分力になっているのでX軸方向とZ軸方向の荷重値を入力していく必要があります、取付点の節点毎にX軸方向とZ軸方向の荷重値を入力していてもかまいませんが、節点質量のところで説明したようにデータ入力ボックスでは[Ctrl+C]で値のコピー、[Ctrl+V]で貼り付けができますので、次の方法で設定していくと効率的ではないかと思います。良かったら試してみてください。

最初のX軸方向の荷重値を入力したらその入力値をコピーしておいて、後はイメージ上で節点質量の設定してある節点をクリックして、X軸方向の値だけを連続して貼り付けしていきます。

X軸方向の値が全て入力できたら今度はイメージを使わないでデータ表示欄でX軸方向の入力されている節点を目印にその行をクリックしてデータ入力ボックスを表示させます。

そのデータ入力ボックスで最初のZ軸方向の値を入力したらその値をコピーして、後はX軸方向の荷重値が入力してある行を目印にデータ表示欄をクリックしながらZ軸方向の値を連続して貼り付けしていきます。

モジュールの風圧荷重（順風）の集中荷重を全て設定したらイメージで拡縮するなどして間違いがないかどうか確認しておいてください。

まだ支持物の風圧荷重が未入力ですが一旦この条件で計算を実行してみて反力値からモジュールの風圧荷重が正確に設定できているか確認してみます。計算が終了したら「変位・反力」の計算結果表示欄を下と右にスクロールして支持点の反力を表示させます。

なお支持点反力は当然ながら支持点（支持の種類が自由以外の設定）しか表示されていませんので支持の種類が“自由”の節点は空欄になっています。

入力データ | 計算結果 | 材料集計 | 計算条件設定

変位・反力 | モーメント・応力・座屈 | 個別要素・通り別 | 材料別詳細

最大総変位 (mm) 4.447 計算時間= 2 秒

発生X座標 (mm) 2300 総重量(kg) 274.437

発生Y座標 (mm) 1062

発生Z座標 (mm) -100

カラム幅リセット ☐ イメージと連動して強調表示

節点	反力 F _x (N)	反力 F _y (N)	反力 F _z (N)	反モーメント
86				
87				
88				
89	-478.5	966.5	1301	32390
90	-478.5	-966.5	1301	-32390
91	-1128.0	654.5	2826	86770
92	-1128.0	-654.5	2826	-86770

これからX方向の反力の合計を求めると-3213 NとなりXマイナス方向に発生しているのが分かります。X方向の荷重はモジュールの風圧荷重の分力のみですので順風のときのモジュール一枚あたりのX方向荷重535.4 N×6枚=3212.4 Nでしたのでほぼ同じ荷重が反対方向に働いているのが分かります。

なお0.6 Nの違いは反力値を有効数字4桁に丸めているための誤差と考えられます。有効数字は環境設定の計算条件・単位設定で設定されておりデフォルトは4になっていますがこれらの設定の詳細については「3Dチュートリアル」を参照してください。

同様にZ方向の反力の合計も求めてみると8254 NとなりZプラス方向（上向き）に発生していることが分かります。Z方向の荷重はモジュールの風圧荷重の分力と重力加速度により発生する固定荷重の合計となります。モジュール一枚あたりのZ方向荷重-927.3 N×6枚=-5563.8 Nと総重量274.437 kg×9.80665=2691.3 Nを荷重の方向に合わせて合計すると-8255.1 Nとこちらもほぼ同じ荷重が反対方向に働いていることが分かります。また微妙な差はX方向と同様の丸め誤差と考えられます。

節点質量の説明でも節点質量と設定する前後で総重量を比較して設定値に問題が無かったかをチェックしていますが、今回の反力によるチェックも含めて最初のうちはまめにチェックしながら確実に設定していくのが望ましいです。

では次に支持物の部材にかかる風圧荷重を設定していきましょう。支持物の部材にかかる風圧荷重の分布荷重は既に求めています。次に再掲しておきます。

等辺山形鋼 $D a = 0.08795 \text{ N/mm}$ （受風幅は50 mmとする）

みぞ形鋼 $D c = 0.1759 \text{ N/mm}$ （受風幅は100 mm幅とする）

「フレーム構造－立体」で分布荷重を設定するには[荷重パターン条件]タブの[分布荷重]タブを開きます。設定方法は集中荷重とほぼ同じですが分布荷重は要素単位に設定していきます。なおモジュール取付材に対する風圧荷重はモジュールの直下の部材ですので設定する必要はないと考えられます。横材も正面から見るとモジュールに隠れていますので風圧荷重をかけるべきかは微妙なところですが、逆風のときは横材にも風圧荷重をかけた方が良いでしょう。

分布荷重の入力方法もデータ表示欄で分布荷重を設定したい要素番号の行をクリックするとデータ入力ボックスが表示されますのでそこで分布荷重値を入力します。またイメージ上で分布荷重を設定したい要素をマウス左クリックすればその要素の行にデータ入力ボックスが表示されるようになっています。

通常は上記の方法で分布荷重を設定していきますが支持物の部材の風圧荷重はモジュール取付材以外の要素には全て設定することになりますので、上記のような要素番号による設定ではなく材料番号を基準に材料番号2～6には等辺山形鋼の分布荷重、材料番号7と8にはみぞ形鋼の分布荷重というような設定方法の方が効率良くできそうです。

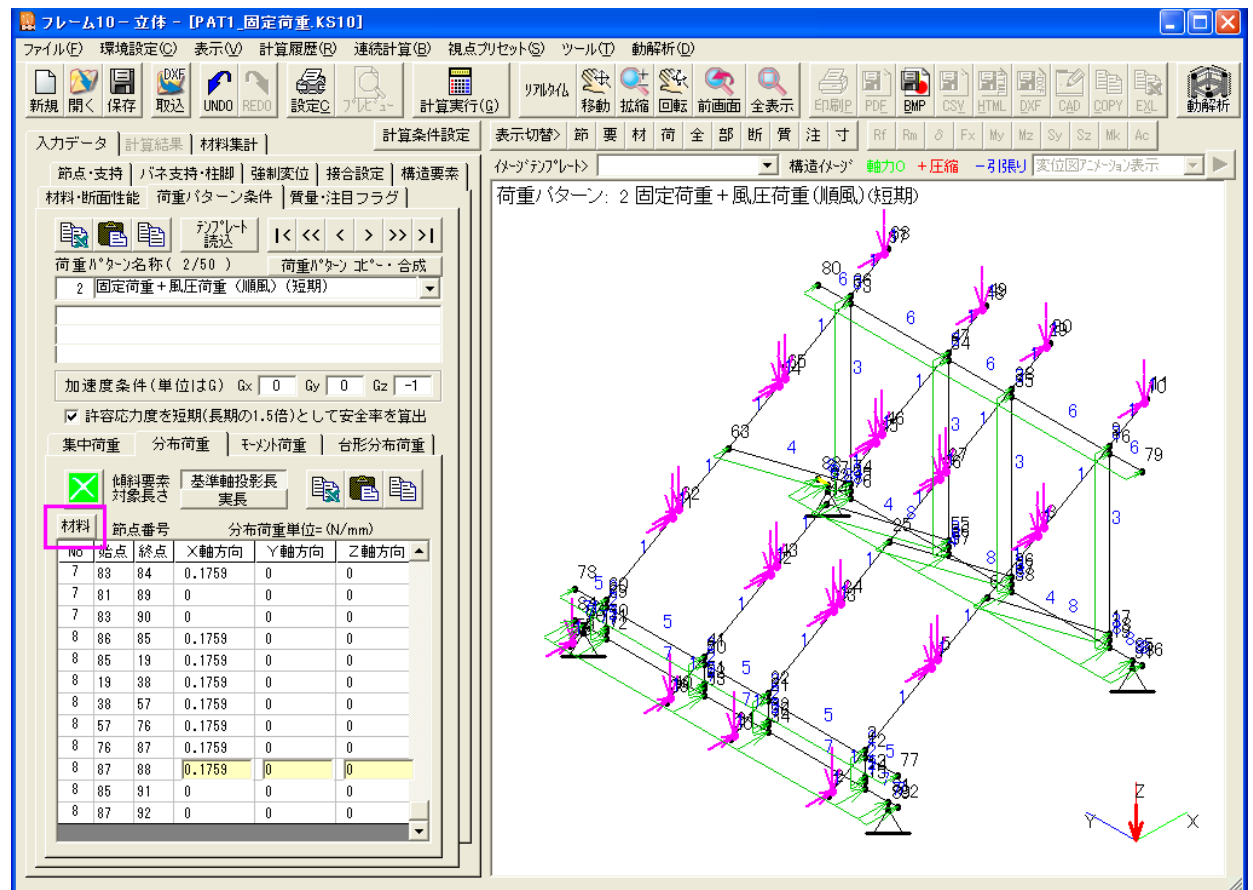
実はデータ表示欄の左上にある[要素]という表示はボタンになっていてクリックする毎に[材料]と切り替わり、その下の番号も要素番号の替わりに材料番号が表示されるようになっています。これを使えば要素番号を意識することなく左側のデータ表示欄だけで材料番号を目印に分布荷重が設定できます。

ではこの方法で分布荷重を設定していきましょう。データ表示欄左上の[要素]ボタンを1回クリックして[材料]に切り替えて材料番号を表示させます。その材料番号を目印に材料番号2～6が表示されている行をクリックしてデータ入力ボックスを表示して等辺山形鋼の分布荷重0.08795をX軸方向の入力欄に入力します。ここでもコピー・貼り付けを使うと簡単に入力ができます。

同様にしてみぞ形鋼の分布荷重0.1759を材料番号7と8の要素のX軸方向の入力欄に入力していきます。ただし側面ダミー要素には分布荷重をかけませんので注意して入力してください。

なお分布荷重の設定には[台形分布荷重]という機能もあり、要素毎の設定と異なり両端の節点を選択して始終点の分布荷重値を入力することにより名称にある台形分布荷重や三角分布荷重の設定も可能になっています。今回は使用しませんが状況によってはこちらの方が便利な場合がありますので[3Dチュートリアル]を参考にして機会があったら試してみてください。

次に支持物の部材の風圧荷重（順風）として分布荷重を入力した例を示します。分布荷重もイメージ表示されるので設定した方向や要素が間違っていないか確認しておいてください。



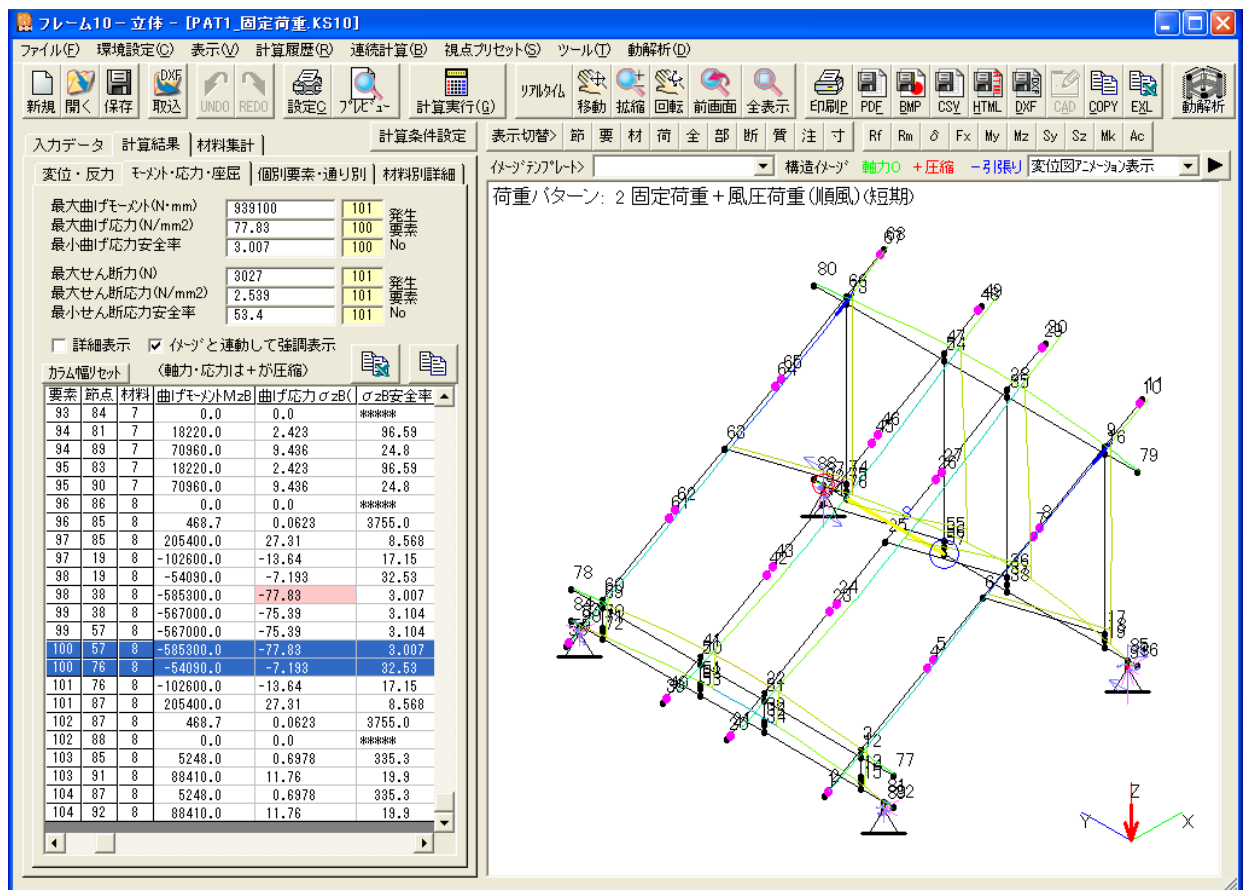
なお「分布荷重」タブには傾斜要素対象長さの設定がありデフォルトは「基準軸投影長」が選択されています。これは基本的には材料番号4の斜材のような傾斜している要素が対象となり、今回のようにX方向の分布荷重がかかっている場合に基準軸投影長（正面から見たときの長さ）を使って荷重値を計算するのか、実長を使って計算するのかの設定になります。

極端な例として傾斜要素ではないですが垂直の柱材にZ方向の分布荷重をかけた場合、基準軸投影長（真上から見たときの長さ）は0なので傾斜要素対象長さに「基準軸投影長」を選択している場合は実際にかかる荷重は分布荷重値×長さ0で荷重も0となり、一方、傾斜要素対象長さに「実長」を選択している場合は分布荷重値×実長の荷重が発生します。

傾斜要素対象長さに「実長」を使うのは特殊な場合と考えられますので通常はデフォルトの「基準軸投影長」のままとしておきます。

分布荷重の設定ができれば、これで順風の風圧荷重の設定が完了したことになりますので、一旦、設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PA チュートリアル_風圧荷重（順風）”としておきます。ただし加速度条件は $G_z = -1$ としていますので荷重条件としては固定荷重も含まれています。

ではこの“固定荷重+風圧荷重（順風）（短期）”の荷重条件で計算を実行してみましょう。次に計算を実行して「モーメント・応力・座屈」タブを開いた例を示します。



最小曲げ応力安全率は3.007なので強度上の問題はないと考えられます。上図は最小曲げ応力安全率の発生要素No.の「100」と表示されているところをクリックした例で、発生要素No.をクリックすると自動的に“イメージと連動して強調表示”のチェックボックスがチェックされその要素のイメージや計算結果の行がハイライト表示されます。

また上図では発生要素が見やすくなるように荷重イメージを非表示にしたものですが、要素100（節点57-節点76）は後ベース材の中央部近くの要素となりこの要素の節点57側（中央寄り）で最大曲げモーメントや最大曲げ応力、最小曲げ応力安全率が発生しています。

この要素で最大曲げモーメントや最大曲げ応力が発生しているのは中央部のモジュールにかかる風圧荷重が斜材を伝わってさらに後柱材を介して主に後ベース材にかかっているためと考えられます。ちなみに前ベース材の同じ位置を見てみると曲げ応力は約半分になっています。

その他の計算結果を見ても不自然に過大であったり過小であったりするものも無いようなので妥当な計算結果ではないかと考えられます。よって“固定荷重+風圧荷重（順風）”の荷重条件では強度上の問題はないと判断できます。

では次に逆風の風圧荷重を設定して計算してみましょう。

◇風圧荷重（逆風）の設定と評価

続いて逆風のときの風圧荷重の荷重条件を設定していきます。

では[入力データ]タブを開き[荷重パターン条件]タブを開きます。ここで荷重パターン2の“固定荷重+風圧荷重（順風）”は残しますので荷重パターン番号を3に進めておきます。荷重パターンの番号は[>]ボタンで進めるか、荷重パターン名称の入力欄右にある▼でリストを開いて選択します。

ここで順風のときの風圧荷重と同様に設定していても良いのですが、順風と逆風ではモジュールの風圧荷重は集中荷重の荷重値が異なるだけで同じ取付点の節点に設定しますし、部材の風圧荷重では符号が異なるだけで順風と同じ要素に設定しますので、順風の荷重条件をコピーしてからそれを修正していった方が効率的です。そこで次に荷重条件のコピー方法を説明しますがあらかじめコピー先の荷重パターン番号を選択しておく必要があるので前述のように荷重パターン番号は3になっているか確認してください。

次に荷重パターン名称の上にある[荷重パターン コピー・合成]ボタンをクリックすると「荷重パターンのコピー・合成」ダイアログが開きますので、コピー・合成元のリストボックスから荷重パターン番号2の“2 固定荷重+風圧荷重（順風）（短期）”を選択します。

荷重パターンのコピー・合成

コピー・合成元の荷重パターン名称を選択

2 固定荷重+風圧荷重（順風）（短期）

コピー実行

キャンセル

注) 加速度条件、分布荷重の傾斜要素対象長さの設定および台形分布荷重は先頭の荷重パターンの設定が使われます。

コピー先の荷重パターン名称を入力・編集

3 固定荷重+風圧荷重（逆風）（短期）

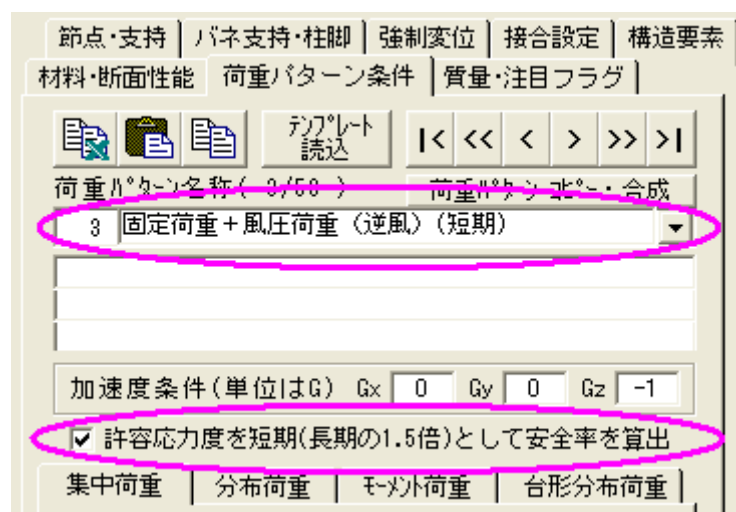
☐ パターン名称の後にコピー元の番号を付ける(コピー*)

注) コピー先の荷重パターンは更新されますので注意してください。

このダイアログ下部のコピー先の荷重パターン名称にも荷重パターン2の“固定荷重+風圧荷重（順風）（短期）”がコピーされますので“順風”を“逆風”に変えておきます。なお加重パターン名称は後からでも変更は可能です。

この機能では最大5つの荷重パターンを加減して合成することも可能ですが今回は荷重パターン2をコピーするだけなのでこれで[コピー実行] ボタンをクリックします。

荷重パターン3の荷重パターン名称には先に編集した“固定荷重+風圧荷重（逆風）（短期）”が表示されますので順風のと看と同様に[許容応力度を短期（長期の1.5倍）として安全率を算出]をチェックして短期の扱いとします。さらに固定荷重も含めますのでGzは-1になっているか確認しておいてください



これで順風の風圧荷重の荷重条件がコピーされましたので、まずはモジュールの取付点の節点に集中荷重として設定されている風圧荷重を逆風の値に変更していきます。間違えないように次に荷重値を再掲しておきましょう。

$$\text{逆風 } P_x = -173.13 \text{ N}$$

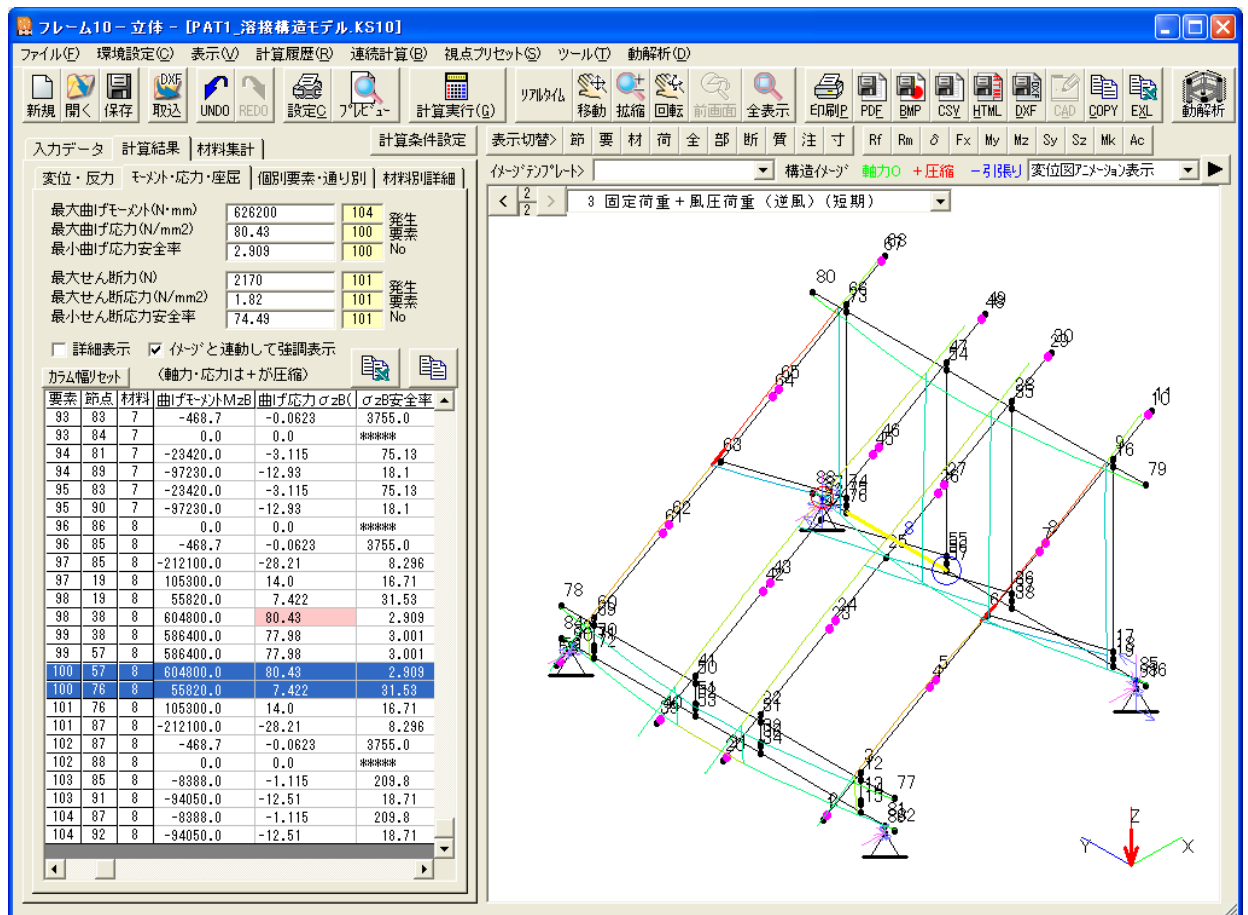
$$P_z = 299.85 \text{ N}$$

操作方法はもう説明する必要もないと思いますが、集中荷重のデータ表示欄で集中荷重の設定されている節点の行を選択してデータ入力ボックスを表示させ、上記の荷重値に置き換えていきます。このときもコピー・貼り付けを活用してX方向を全て置き換えてからZ方向を置き換えていくと効率的に作業できると思います。

分布荷重も同様に部材の風圧荷重が設定されている要素の行をクリックしてこちらは符号が変わるだけなので“-”をつけます。ただしデータ入力ボックスではフォーカスのある入力欄の数値が全選択されるのでマウスで数値の先頭にカーソルを移動して“-”を入力する必要がありますので、こちらも一つ修正したらコピー・貼り付けを使った方が楽でしょう。

逆風の風圧荷重の設定が完了したら、一旦、設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PA チュートリアル_風圧荷重（逆風）”としておきます。ただし順風と同様に加速度条件は $G_z = -1$ としていますので荷重条件としては固定荷重も含まれています。

ではこの“固定荷重＋風圧荷重（逆風）（短期）”の荷重条件で計算を実行してみましょう。次に計算を実行して「モーメント・応力・座屈」タブを開いた例を示します。



最小曲げ応力安全率は2.909と順風のときの3.007より若干小さくなりましたが強度上の問題はないと考えられます。最小曲げ応力安全率が下がったのはモジュールの風圧荷重が順風より逆風の方が大きいためと考えられます。

上図は順風のときと同様に最小曲げ応力安全率の発生要素Noの「100」と表示されているところをクリックした例で発生要素が見やすくなるように荷重イメージを非表示にしたものですが、順風と同じ要素100（節点57－節点76）の節点57側（中央寄り）で最大曲げモーメントや最大曲げ応力、最小曲げ応力安全率が発生しています。

風圧荷重は順風とは向きが逆転しており変形方向は逆になっていますが応力値の絶対値については向きの影響はほとんどなさそうです。

◇積雪荷重の手計算

積雪荷重はモジュールに積もった雪の荷重で“一般の地方”と“多雪区域”では若干計算方法や扱いが違っていています。ここでは設置場所を高崎市としていますので“一般の地方”として積雪荷重を計算していきます。“多雪区域”の計算例はありませんので必要な場合はJISあるいは文献1を参考にして計算してください。

積雪荷重Sは次の式で求められます。

$$S = C_s \times P \times Z_s \times A_s$$

ここでC_s：勾配係数

P：雪の平均単位質量（積雪1cmあたりN/m²）

Z_s：地上垂直積雪量（m）

A_s：積雪面積（アレイ面の水平投影面積 m²）

勾配係数C_sは次の式で求められます。

$$C_s = \sqrt{\cos(1.5\beta)}$$

ここでβ：積雪面の勾配（度）

βはアレイ面傾斜角の30°として電卓で求めると

$$C_s = (\cos(1.5 \times 30))^{\wedge 0.5} = 0.8409$$

雪の平均単位質量Pは一般の地方では20N、多雪区域では30N以上とするとなっているので一般の地方の値を使って、

$$P = 20$$

地上垂直積雪量Z_sの計算がちょっと面倒で次の式で求められます。

$$Z_s = \alpha \times I_s + \beta \times r_s + \gamma$$

ここでI_s：区域の標準的な標高（m）

r_s：区域の標準的な海率

α, β, γ：区域に応じて表（JISでは表10、文献1では付表4）の当該各欄に掲げる数値

ここでずっと前に戻って設置条件を確認する必要がありますが、次に積雪荷重を求めるための設置条件の項目を再掲しておきます。

①施工地：群馬県高崎市（標高100m）

⑤垂直積雪量算出係数：α=0.0005 β=-0.06 γ=0.28 R=40

⑥積雪条件：一般の地方（多雪区域ではない）

これからI_s=100、r_sは近くに海や湖はありませんので0となり

$$\begin{aligned} Z_s &= 0.0005 \times 100 - 0.06 \times 0 + 0.28 = 0.33\text{m} \\ &= 33\text{cm} \end{aligned}$$

と求められます。

前述のように高崎市の近くに海や大きな湖はありませんので海率 r_s が 0 となり比較的簡単に地上垂直積雪量が求められますが、海や大きな湖が近い場合は区域によって設定されている R （群馬県は 40）を半径（km）とした円の面積に対する当該円内の海やその他これに類するものの面積の割合から区域の標準的な海率 r_s を求める必要があります、非常に面倒な計算が必要になってきます。

そこで地上垂直積雪量を求めるのに便利な資料を紹介したいと思います。Google で“垂直積雪量”で検索すると「市町村の区域に応じた垂直積雪量（d）別表 1」というリンクが見つかります。これをクリックすると都道府県ごとに区域別の垂直積雪量がダイレクトに出ている pdf が表示されます。ここから高崎市を探すと 35 cm と決まっているのがわかります。

JIS の式での計算値の 33 cm よりちょっと大きいですが十分使えそうです。この資料の親をたどっていくと「社団法人中央畜産会」（<http://jlja.lin.gr.jp/>）がトップページになっています。ここから畜産施設・機械部会の「畜舎建築設計の告示について」をクリックすると前述の垂直積雪量の pdf がダウンロードできるようになっています。またその上の「告示・解説」を見ると、これは平成 14 年国土交通省告示第 474 号「特定畜舎等建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める告示」のなかで積雪荷重を計算するための別表であることが分かります。国土交通省の告示であれば十分出所の確かな資料と言えますので“一般の地方”であれば出所を記載してこちらの値を使った方が便利でしょう。

なお文献 1 の計算例では地上垂直積雪量は特に説明もなく 50 cm としていますが文献 1 の計算例の施工地は東京都港区なので前の資料から東京都特別区を探すと 30 cm となっています。50 cm は安全を見込んだ汎用的な値なのかも知れませんが何らかの説明がほしかったと思います。ここでは国土交通省告示の別表から高崎市の垂直積雪量の 35 cm を使うこととします。

積雪面積 A_s はモジュール 1 枚あたりの受風面積 $A_w = 1.323 \text{ m}^2$ から求めます。積雪面積は水平投影面積とあるのでアレイ傾斜角 30° の \cos をかけて、

$$A_s = A_w \times \cos 30^\circ = 1.323 \times 0.866 = 1.146 \text{ m}^2$$

これで全ての係数が求められましたので積雪荷重 S は次の値になります。

$$\begin{aligned} S &= C_s \times P \times Z_s \times A_s = 0.8409 \times 20 \times 35 \times 1.146 \\ &= 674.57 \text{ N} \end{aligned}$$

これはモジュール 1 枚あたりの積雪荷重なので取付点にかかる集中荷重としては荷重方向も下向きなので Z マイナスとし

$$P_z = -674.57 \div 4 = -168.6 \text{ N}$$

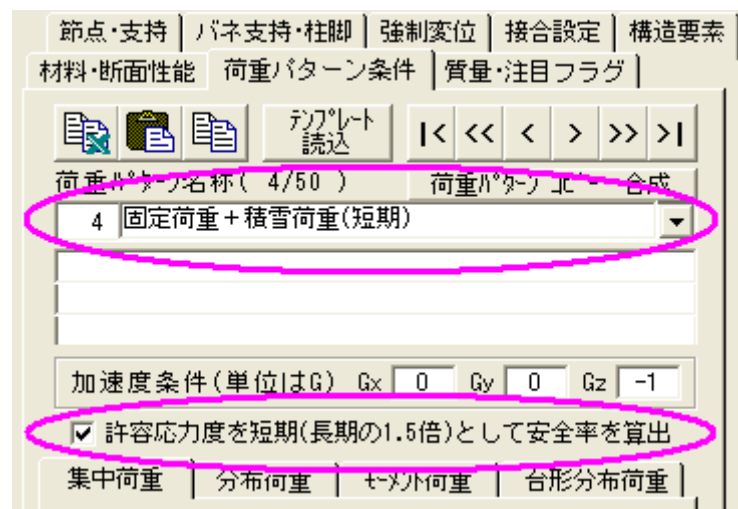
となります。これは順風のときの風圧荷重の Z 分力 $P_z = -231.83 \text{ N}$ より小さく、また“一般の地方”では風圧荷重と同様に短期の扱いになるので、この時点で強度上の問題はないと考えられますが一応「フレーム構造—立体」で計算して評価してみましょう。

◇積雪荷重の設定と評価

前でモジュール取付点の積雪荷重としての集中荷重の荷重値を求めましたのでモジュールの風圧荷重と同様の方法で積雪荷重をモジュール取付点の節点に設定していきます。

では〔入力データ〕タブを開き〔荷重パターン条件〕タブを開きます。ここで荷重パターン3の“固定荷重＋風圧荷重（逆風）”まで進んでいますので、荷重パターン番号は4に進めておきます。荷重パターンの番号は〔>〕ボタンで進めるか、荷重パターン名称の入力欄右にある▼でリストを開いて選択します。

荷重パターン4には固定荷重と積雪荷重の荷重条件を設定していきますの荷重パターン名称に“固定荷重＋積雪荷重”を入力します。



前述のように固定荷重も含めますのでG_zは－1のままとします。積雪荷重は風圧荷重と同様に短期荷重となりますので〔許容応力度を短期（長期の1.5倍）として安全率を算出〕をチェックしておきます。

積雪荷重はモジュールの取付点の節点に集中荷重として設定していきますがモジュールの取付点には既に節点質量が設定してあるのでイメージ上にはその節点にマゼンタ色の●が表示されていますので、風圧荷重の設定と同様にこれを目印にイメージ上で節点質量の設定されている節点をマウス左クリックして、その節点に集中荷重のデータ入力ボックスを表示させて積雪荷重を入力していくのが便利です。

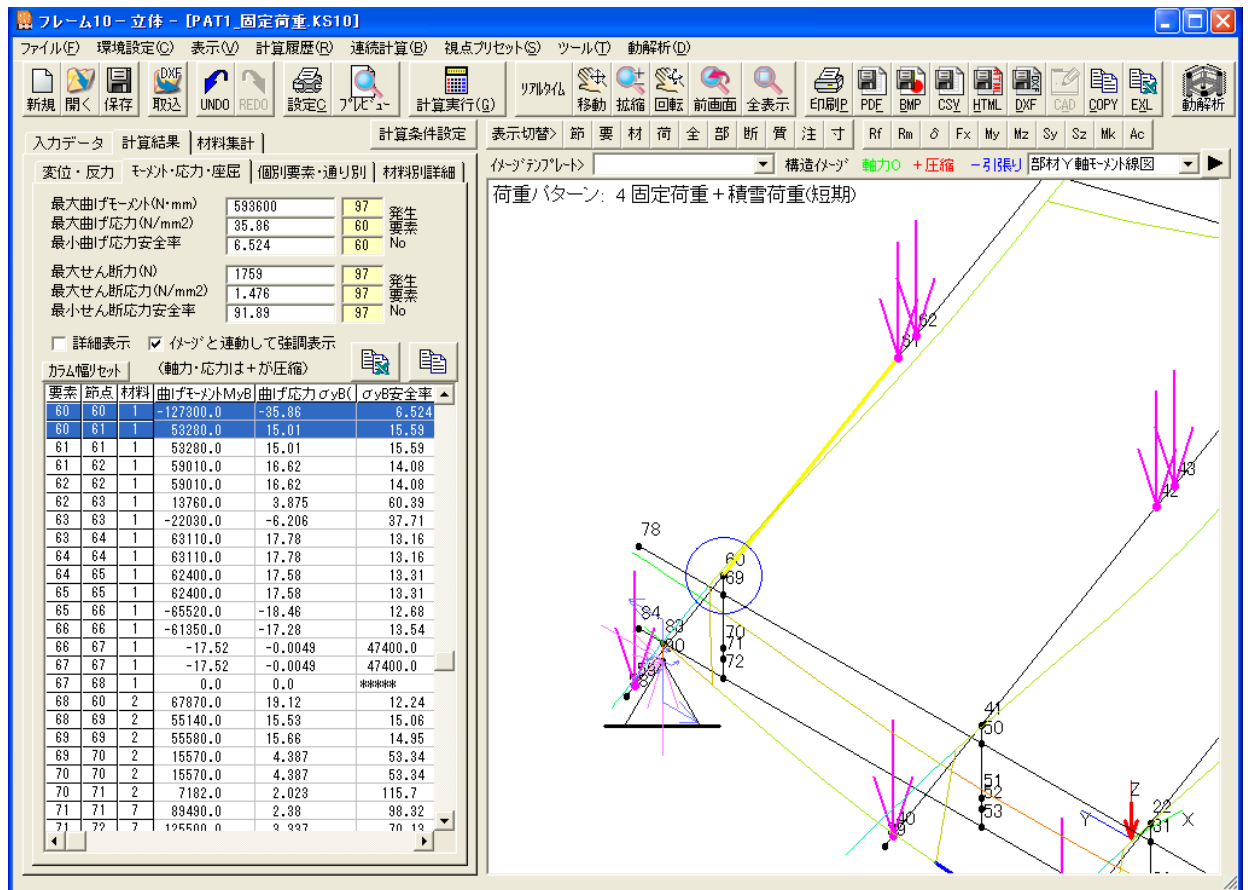
入力する積雪荷重は取付点の節点にかかる集中荷重として前に求めた次の値になります。

$$P_z = -168.6 \text{ N}$$

積雪荷重もZ軸方向の荷重値を入力したらその入力値をコピーしておいて、後はイメージ上で節点質量の設定してある節点をクリックして連続して貼り付けしていきます。

積雪荷重の設定ができれば、一旦、設定データを保存しておきましょう。今度のファイル名は“PA チュートリアル_積雪荷重”としておきます。ただし加速度条件は $G_z = -1$ としていますので荷重条件としては固定荷重も含まれています。

ではこの“固定荷重+積雪荷重（短期）”の荷重条件で計算を実行してみましょう。次に計算を実行して「モーメント・応力・座屈」タブを開いた例を示します。



最小曲げ応力安全率は6.524と風圧荷重の2倍くらいありますので強度上の問題はないと考えられます。

詳細を見ていくと外側のモジュール取付材と前柱材の接合点でモジュール取付材の曲げ応力が高いことが分かりますが問題のあるレベルではありません。

◇地震荷重の設定と評価

地震荷重Kは次の式で求められます。

$$K = k \times G$$

ここでK：地震荷重（N）

k：設計用水平震度

G：固定荷重（N）

なお多雪区域ではこの式に積雪荷重が加味されますがそちらの詳細はJISを参照してください。

設計用水平震度 k は J I S の説明では架構部分について

$$k \geq 1.0 \times Z \times I$$

ここで Z : 地震地域係数 (1.0 ~ 0.7)

I : 用途係数

用途係数は設計用速度圧を計算するときの用途係数と同様に「通常設置する太陽光発電システム」であれば $I = 1$ となります。地震地域係数 Z がよく分かりませんが範囲内の上限としてこちらも $Z = 1$ とすれば良いでしょう。これから電卓を叩くまでもなく $k = 1$ となります。

したがって地震荷重は固定荷重と同じ荷重を水平方向にけることとなりますが「フレーム構造一立体」では固定荷重を節点質量と重力加速度で設定していますので、地震荷重をかける場合も水平方向に地震加速度 1 G をかけてやれば節点質量によって固定荷重と同じ荷重が水平方向に発生することになり地震荷重がかかったこととなります。

水平方向の加速度は G_x と G_y がありますが X Y 表記では支持物のどの方向にかけているのか分かりにくいと思います。通常、太陽電池は南に向けて設置しますので正面の向いている向きを南として X プラス方向を南北、X マイナス方向を北南、Y プラス方向を東西として 3 種類の水平加速度をかけて強度の検討をしてみましょう。

では [入力データ] タブを開き [荷重パターン条件] タブを開きます。ここで荷重パターン番号は 5 に進め、荷重パターン名称に“固定荷重+地震荷重 (南北)”と入力します。

加速度条件の $G_x = 1$ 、 $G_y = 0$ とし固定荷重も含めますので G_z は -1 のままとします。また地震荷重も風圧荷重と同様に短期荷重となりますので [許容応力度を短期 (長期の 1.5 倍) として安全率を算出] をチェックしておきます。

同様に荷重パターン番号 6 には荷重パターン名称を“固定荷重+地震荷重 (北南)”と入力して加速度条件を $G_x = -1$ 、 $G_y = 0$ 、 $G_z = -1$ とし短期荷重の扱いにしておきます。

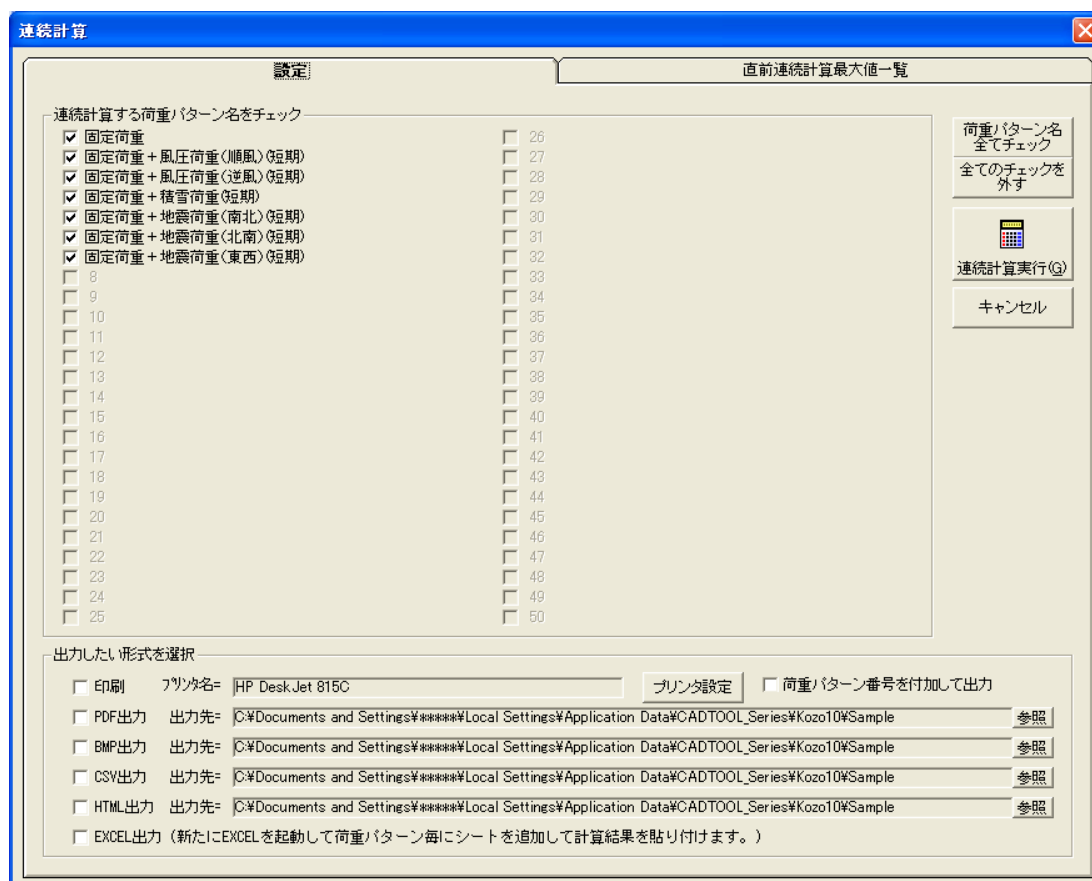
荷重パターン番号 7 には荷重パターン名称を“固定荷重+地震荷重 (東西)”と入力して加速度条件を $G_x = 0$ 、 $G_y = 1$ 、 $G_z = -1$ としこれも短期荷重の扱いにしておきます。

3 方向で地震荷重を設定したのですが設定はこれだけで完了です。固定荷重のところでも説明しましたがモジュールの質量を節点質量で設定しておくこと地震荷重の計算が非常に簡単にできることが分かっていただいたと思います。

地震荷重の設定ができたら荷重条件は全て設定完了となります。いままで設定してきた荷重条件も荷重パターン条件として全て設定されていますので溶接構造モデルの設定データとしてはこれで完成となります。ここでファイル名を“PAT1_溶接構造モデル”として保存しておきましょう。

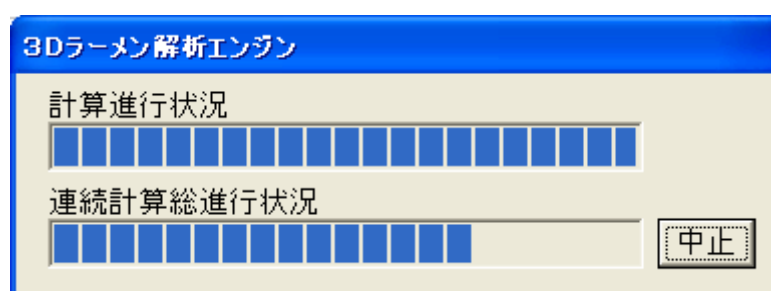
本来はここでまだ計算していない荷重パターン番号5から計算してみるのですが「フレーム構造一立体」には連続計算機能があり設定されている荷重パターンを自動的に切り替えて連続して計算することができますのでこれを試してみましょう。

「計算実行」ボタンの上にあるプルダウンメニューの「連続計算」をクリックすると次のダイアログが開きます。



上段で連続計算する荷重パターン名をチェックし、下段で出力したい形式を選択しますがここでは上段はデフォルトの全てチェックのままとし、下段もデフォルトの全て未チェックのままで「連続計算実行」ボタンをクリックしてみましょう。なお連続計算機能の詳しい使い方については「3Dチュートリアル」を参照してください。

連続計算中は計算の進行状況を示すプログレスバーが表示され、自動的に荷重パターンが切り替わりながら計算していきます。

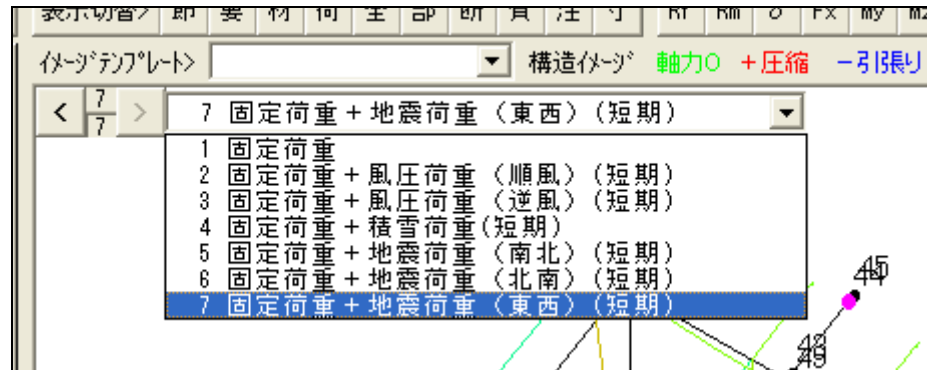


連続計算が終了すると同じ連続計算のダイアログですがタブが「直前連続計算最大値一覧」に切り替わって開きます。

設定		直前連続計算最大値一覧				
		カラム幅リセット		ログファイル出力	閉じる	
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)
1	固定荷重	0.5874	9.883	0.622	752.1	-132.9
2	固定荷重+風圧荷重(順風)(短期)	6.56	77.83	2.539	8038	-723.8
3	固定荷重+風圧荷重(逆風)(短期)	8.78	80.41	1.82	873	-2145
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	1.78	35.86	1.476	1770	-367
5	固定荷重+地震荷重(南北)(短期)	2.881	33.89	0.97	1167	-346.3
6	固定荷重+地震荷重(北南)(短期)	2.855	39.04	1.012	1007	-223.7
7	固定荷重+地震荷重(東西)(短期)	2.571	59.15	1.109	1333	-560
8						
9						

これを見るとやはり荷重パターン番号3の“固定荷重+風圧荷重(逆風)”が一番変位も大きく曲げ応力も高いことが分かります。ザッと確認したらこのダイアログは「閉じる」ボタンをクリックして閉じておきます。

既に前段階で表示されていたかも知れませんが「フレーム構造-立体」では計算済みの荷重パターンの計算結果を保持しておき、複数の計算済みの荷重パターンがあるとイメージ右上に切り替えボタンとリストボックスが表示されて、簡単に荷重パターンの計算結果を切り替えて表示することができるようになっています。



地震荷重の詳細を見ておりませんのでこれを切り替えて最小曲げ応力安全率を見ていくと

地震荷重(南北): 6. 9 0 5

地震荷重(北南): 5. 9 9 4

地震荷重(東西): 3. 9 5 6

となっています。

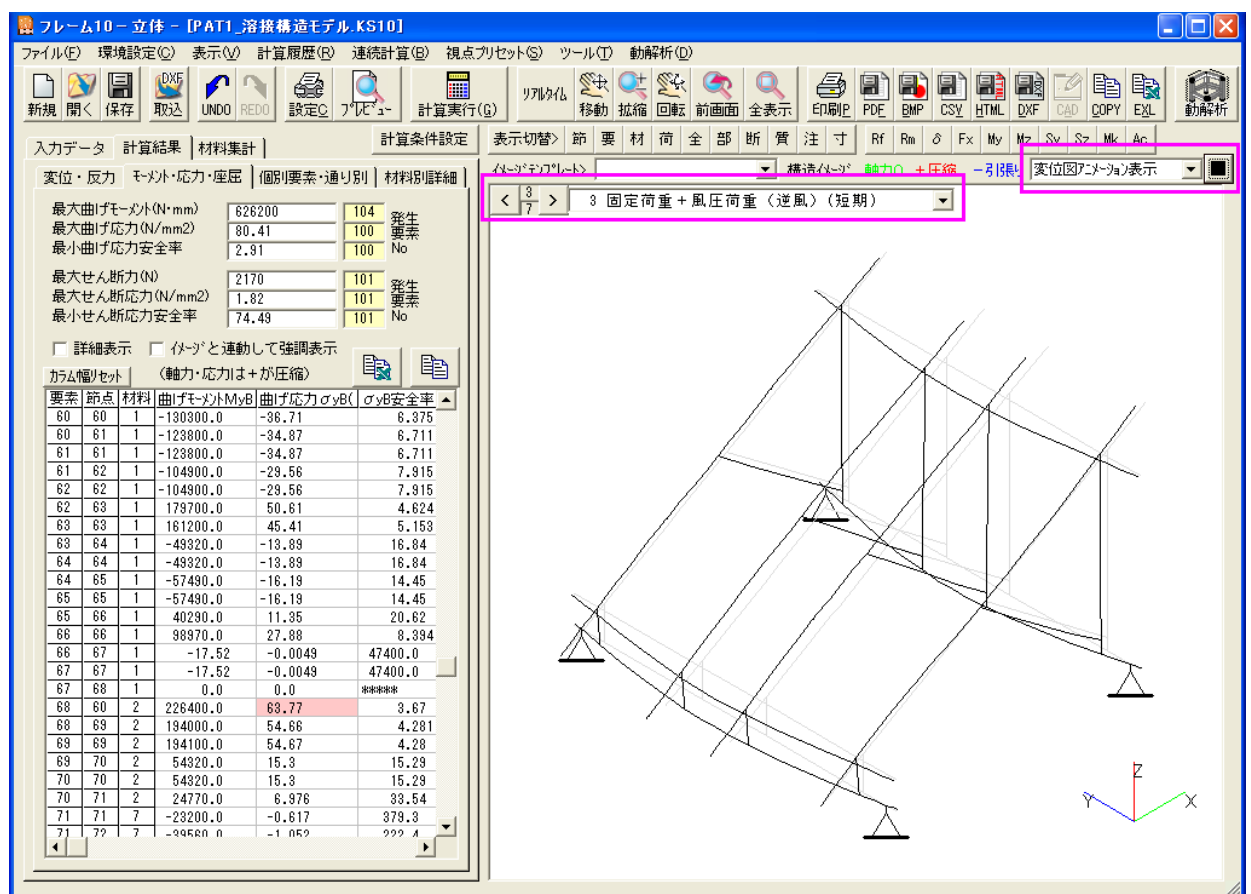
地震荷重の東西についてはこれまで荷重のかかっていなかった方向なのでちょっと心配されましたが最大総変位も2. 5 7 1 mmと他の条件と比べて小さくなく、曲げ応力安全率も地震荷重の中では小さいものの絶対値的には問題の無いレベルになっています。

◇溶接構造モデルの最終評価

最小曲げ応力安全率で判断するとどの荷重条件でも強度上の問題はありませんでした。ここでは支持物の変形の様子から問題がないか検討してみます。

連続計算の「直前連続計算最大値一覧」を見ると荷重パターン番号3の逆風の風圧荷重が最も変位が大きく曲げ応力も高いですので、このときにどのように支持物が変形しているか確認してみます。イメージ左上の矢印ボタンからリストボックスで荷重パターン3の計算結果を表示させます。

変形の様子を見るにはイメージ右上にあるアニメーション表示が分かりやすいですので「変位図アニメーション表示」として右の再生ボタンをクリックします。



アニメーション表示をやめる場合は再生ボタンが停止ボタンになっているのでこれをクリックします。

このアニメーションを見てみると前後ベース材の中央部が前方向に大きくたわみ、内側のモジュール取付材もそれに伴って前方向に大きく変位しています。一方で外側のモジュール取付材は基礎に近いのでそれほど大きな変位は起こしていません。

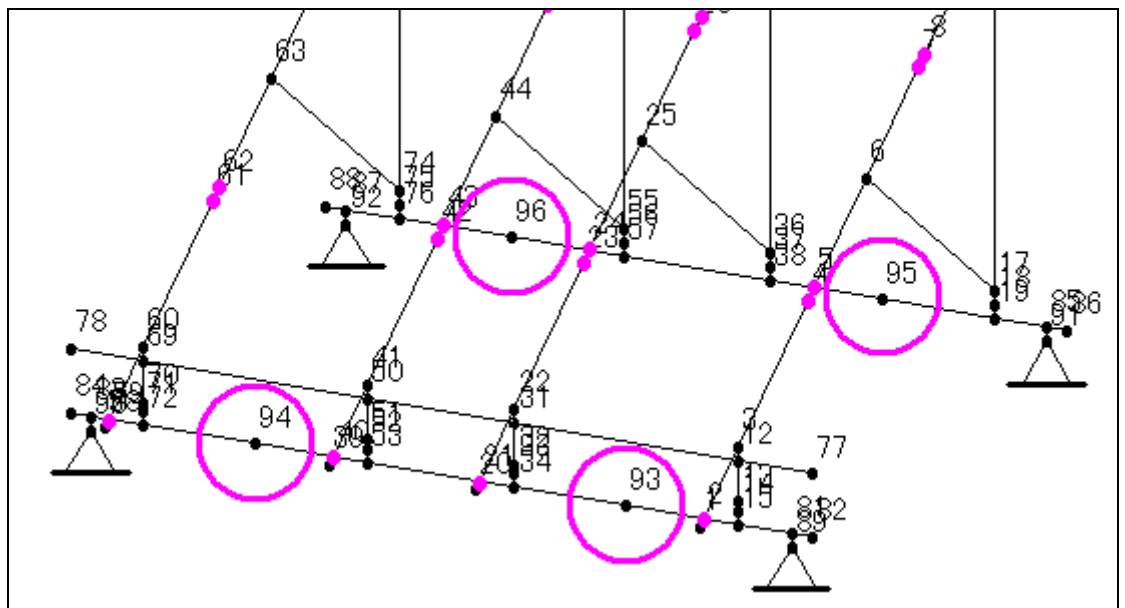
モジュール取付材がこのように変位するとモジュールには“ずれ”のような力が働き、取付ボルトの緩みの要因にもなりかねませんので好ましい状況ではないと考えられます。

今回、基礎の配置は見た目の安定感からベース材の両端近くでモジュール取付材より外側の配置になっています。このためベース材は両端支持はりのようになっていてその内側に荷重がかかっているので大きく変形しています。

そこで基礎の幅を2500mmから1500mmに変更して、外側モジュール取付材の内側に基礎が配置されるようにしてみましょう。これにより荷重が基礎の両側に振り分けられるのでベース材のたわみが小さくなると予想されます。

本来は「節点・支持」タブで新しい基礎の位置に節点を設けて要素も増やしてつなぎ直す必要があるのですが「構造要素」タブのイメージで処理の枠に「節点挿入」という機能があり指示した要素の間に節点を作成して自動で前後の要素をつなぎ直しますので、これで節点を作っておいてから「節点・支持」タブで座標値を変更した方が楽にできると思います。

では「構造要素」タブを開いて「節点挿入」ボタンを押して前後ベース材をマウス左クリックして設定を挿入していきましょう。



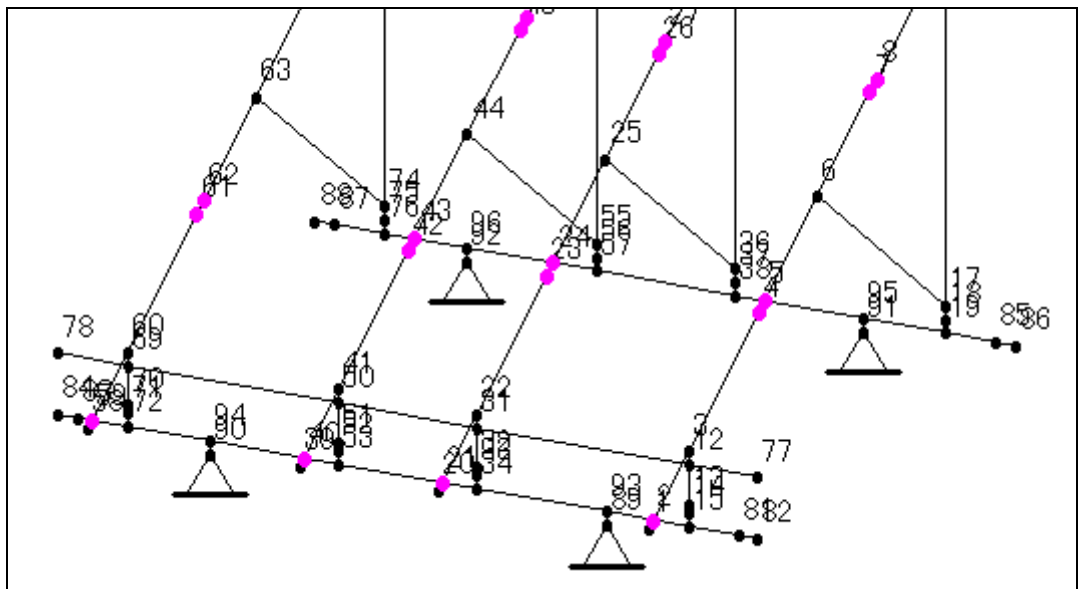
節点が挿入できたら「節点・支持」タブを開いて座標値の修正と支持の種類の変更を行います。

座標値は基礎の幅を1500とするのでY座標は311.5と1811.5になります。挿入した節点と支持点のY座標をこの座標値に変更します。

また支持点からベース材中心に側面ダミー要素を設定していましたが「構造要素」タブでベース材中心側の節点番号を今回挿入した節点番号に変更します。元のベース材中心の節点は自由としておけば剛接合となり一本の鋼材としてつながるので元の節点を削除する必要はありません。

87	2300	2311.5	-100	目田
88	2300	2384.5	-100	自由
89	300	311.5	-150	全固定
90	300	1811.5	-150	全固定
91	2300	311.5	-150	全固定
92	2300	1811.5	-150	全固定
93	300	311.5	-100	自由
94	300	1811.5	-100	自由
95	2300	311.5	-100	自由
96	2300	1811.5	-100	自由

次に側面ダミー要素もつなぎ変えた例を示しますが、このように支持点を外側モジュール取付材の内側に移動してみました。



では最も厳しかった荷重パターン番号3の荷重条件で計算してみましょう。
計算が終わったら「モーメント・応力・座屈」タブを開いて最小曲げ応力安全率を確認してみます。

入力データ		計算結果	材料集計	計算条件設定
変位・反力		モーメント・応力・座屈	個別要素・通り別	材料別詳細
最大曲げモーメント(N・mm)	347900	103	発生	
最大曲げ応力(N/mm ²)	42.88	62	要素	
最小曲げ応力安全率	5.457	62	No	
最大せん断力(N)	1820	108	発生	
最大せん断応力(N/mm ²)	1.527	108	要素	
最小せん断応力安全率	88.81	108	No	

最小曲げ応力安全率は5.457となり基礎移動前の2.909の2倍近くなり、最大総変位も0.9311mmとなり基礎移動前の6.765mmからかなり小さくなっています。

変位図アニメーションを見ても4つのモジュール取付材が同じように変位しているのでモジュールには無理な力はかからず“ずれ”の問題は解決されました。

このように基礎を移動したことにより“ずれ”の問題だけでなく、予想以上に応力や変位が改善されましたのでこの設定データを保存しておきます。ここではファイル名を“PAT1_改良溶接構造モデル”としましょう。

では他の荷重条件でどうなっているかを、連続計算機能を使って全ての荷重条件で計算してみましょう。プルダウンメニューの「連続計算」をクリックすると「直前連続計算最大値一覧」タブが開いていますので「設定」タブを開いて「連続計算実行」ボタンをクリックします。連続計算が終了すると「直前連続計算最大値一覧」の値が更新されて開きます。

設定		直前連続計算最大値一覧				
		カラム幅リセット		ログファイル出力	閉じる	
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)
1	固定荷重	0.1202	10.1	0.3198	752.3	-59.2
2	固定荷重+風圧荷重<順風>(短期)	0.7038	37.28	1.537	3043	-493.5
3	固定荷重+風圧荷重<逆風>(短期)	0.9328	42.98	1.528	590.5	-2151
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	0.388	36.45	0.7457	1770	-168.2
5	固定荷重+地震荷重<南北>(短期)	0.3731	15.68	0.8513	1189	-227.3
6	固定荷重+地震荷重<北南>(短期)	0.5406	29.95	0.7624	1009	-141.2
7	固定荷重+地震荷重<東西>(短期)	2.598	59.23	0.9036	1490	-402.7
8						
9						

荷重パターン番号7の横方向の地震荷重はほとんど変わりませんが他の荷重条件はどれも大きく改善しています。荷重パターン番号7の変位図アニメーションを見ると当然ながら後側上部が大きくY方向に変位しています。この変位を小さくするためには後柱材に筋交いを入れてやるのが有効と考えられますが、変位図アニメーションでは大きく変位しているように見えますが実際の変位量は3mm以下なので実用上は問題の無いレベルと考えられます。

最小曲げ応力安全率もこの荷重パターン番号7が最も小さいですが、それでも3.95あるので鋼材のサイズダウンの可能性も出てきます。これはトライアンドエラー的にサイズを変えて試してみるしかありませんのでこれは各自で試してみてください。また強度面だけを考えて部材毎にまちまちなサイズにしまうと、鋼材の加工や管理等の工数が増えることも考えられますので総合的に判断してサイズを決める必要があります。

また基礎の位置はあらかじめ決まっている場合もあるかと思いますが、今回、基礎の位置が大きく影響するのが分かりましたので、基礎の位置が変更可能であるのであればそれも含めて検討していく必要があると考えられます。

以上で太陽電池アレイ用陸屋根形支持物の溶接構造モデルによる強度の評価は完了とし、基礎の位置を変更した改良溶接構造モデルを最終モデルとします。

次からはこの改良溶接構造モデルをボルト組立構造モデルに変更して同じ荷重条件で強度の評価をしてみたいと思います。

ボルト組立構造モデルへの変更

◇ボルト組立構造について

いままでは節点を介して要素をつなげていくことで要素同士が剛接合となる溶接構造（ラーメン構造）での計算例でした。しかしながら実際にはボルト組立構造が多く使われているようです。

ボルト組立といっても部材同士を、補強板を介してそれぞれ複数のボルトで接合しているような場合は剛接合で良いと考えられますが、太陽電池アレイ用陸屋根形支持物の組立は部材をボルト1本で組み立てていくことが多いようで、1本のボルトでは接合部の回転強度はあまり期待できないのでここをピン接合としてボルト組立構造をモデル化していきます。

したがってピン接合の対象となるところはモジュール取付材と前後柱材の接合点、柱材と横材の接合点、柱材とベース材側面ダミー要素の接合点、斜材の両端となります。

要素の両端をピン接合とする斜材については材料・断面性能の設定で「トラス部材」を適用することで簡単に設定できますが、その他の接合点については「フレーム構造－立体」では「接合設定」という機能を使って設定していきます。接合設定は少し分かりにくいのでこれについて次で説明します。

また「3Dチュートリアル」でも接合設定について説明していますのでそちらも参照してください。

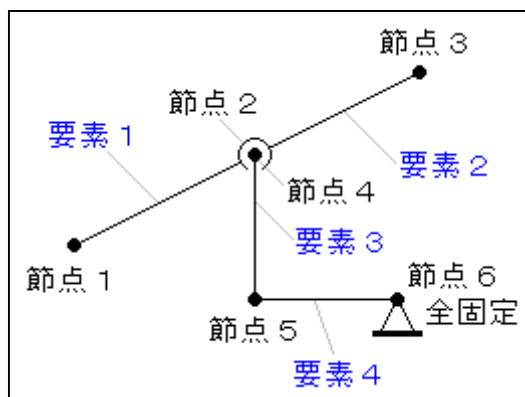
◇接合設定について

「フレーム構造－立体」の接合設定とは同じ座標に節点を複数設定したときに、同じ座標にある節点同士をピン接合にしたり剛接合にしたりあるいは特殊な拘束条件を設定することができる機能です。3つ以上の節点でも設定は可能ですが慣れないと非常に分かりにくくなりますので通常は2つの節点を使うと良いでしょう。

2つの節点を同じ座標に設定し接合設定でピン接合にした場合はボールジョイントや三脚の雲台のようなイメージで節点の位置は変わらず一方の節点の周りを他方の節点がグルグル自由に回転できるようになります。

文面だけでは分かりにくいと思いますので右に簡単な事例を示します。ここで節点2と節点4は同じ座標に設定したものとし、接合設定の対象となります。

要素1は節点1－2、要素2は節点2－3、要素3は節点4－5、要素4は節点5－6で設定しておきます。また節点6は全固定の支持条件を設定しておきます。



また要素 1 と要素 2 は節点 2 を介してつなげているので剛接合となり節点 1 から節点 3 までは一本の鋼材のイメージとなります。また要素 3 と要素 4 も節点 5 を介してつなげているのでこれも剛接合でつながっていることになり節点 6 が全固定なので荷重がかからないとすれば節点 4 の位置はうごきません。

ここで節点 2 と節点 4 の接合設定をピン接合とすると節点 2 の位置は節点 4 が動かないので変わりませんが回転は自由にできるので、要素 1 と要素 2 は一体となって節点 2 を中心として皿回しの皿のようにグルグルと回転できるようになります。

ここで要素 3 について考えると節点 4 側では要素 1 と 2 とはピン接合となり節点 5 側では要素 4 と剛接合となりますので要素 3 はあたかも節点 4 側でピン接合、節点 5 側で剛接合ということになります

これが接合設定の仕組みで基本的には要素は関係なく単に節点同士の拘束条件になり、それぞれの節点にどの要素をつなぐかで要素同士がピン接合になったり剛接合になったりするものです。

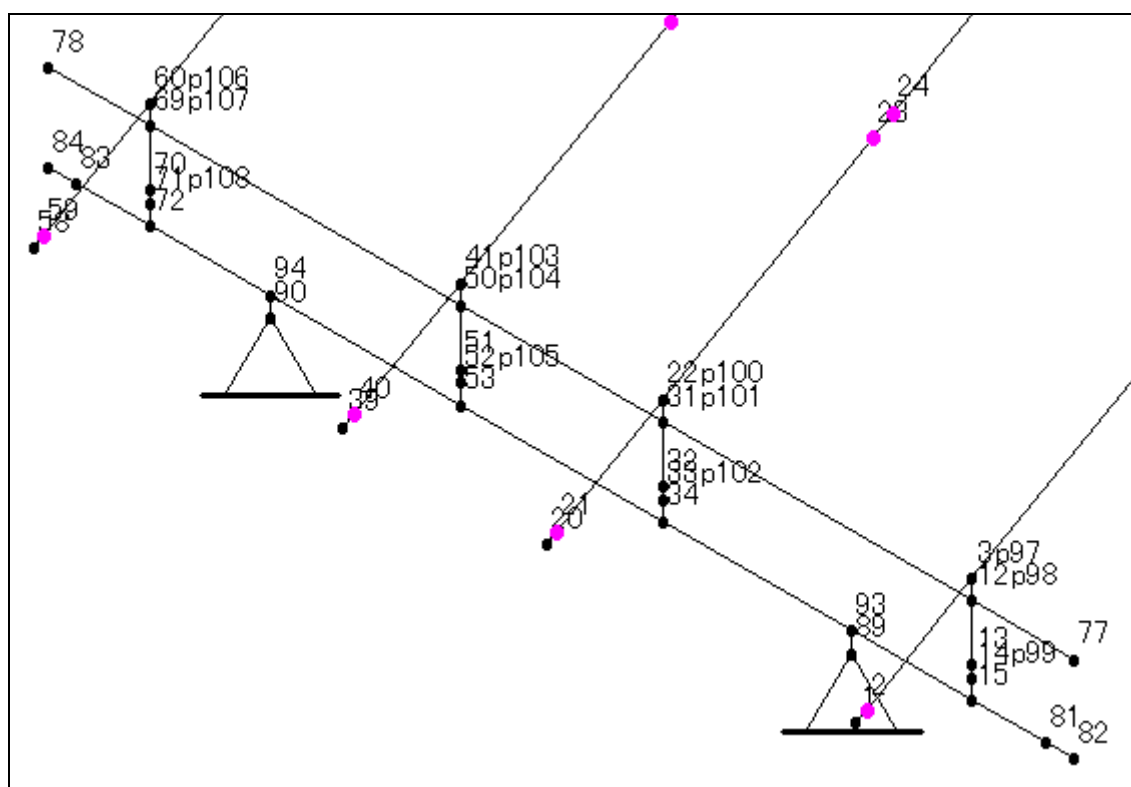
通常は一端をピン接合、他端剛接合としたいような要素でピン接合にしたい側に設定しますが、クロスした鋼材を中央でピン接合するような使い方も可能で、さらに拘束条件もいろいろと細かく選択できるようになっているので応用範囲の広い機能になっています。

◇接合設定の適用

では斜材を除くピン接合の対象となるモジュール取付材と前後柱材の接合点、柱材と横材の接合点、柱材とベース材側面ダミー要素の接合点に接合設定を適用していきましょう。使用モデルは改良溶接構造モデルとします。

接合設定を適用するには同じ座標値に節点を追加する必要があり、通常の「追加」では座標値を入力するのが面倒です。そこで接合節点を適用する節点をイメージ上でマウス左クリックするとデータ表示欄のその節点の行にデータ入力ボックスが表示されますので、それから「追加」ボタンをクリックすると同じ座標値の節点が追加され接合設定の対象となる節点ができます。この方法でもちょっと面倒ではありますがイメージを拡張しながら間違いのないように節点を追加していきましょう。

節点を追加していく順番は後で要素をつなぎ直しやすいように前柱材の上（モジュール取付材との接合点）、中（前横材との接合点）、下（前ベース材側面ダミー要素との接合点）の順で節点を追加していきます。次に節点を追加した前柱材のイメージを示しますが接合設定はピン接合がデフォルトなので節点番号の間に“p”が入って表示されるようになります。



前柱材が終わったら同様にして後柱材の上（モジュール取付材との接合点）、中（後横材との接合点）、下（後ベース材側面ダミー要素との接合点）の順で節点を追加していきます。後柱材と斜材の接合点は斜材をトラス部材とするので接合設定用の節点を追加する必要はありません。

必要な節点が設定できたら「接合設定」タブを開いて設定内容を確認してみます。

材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ |

節点・支持 | バネ支持・柱脚 | 強制変位 | **接合設定** | 構造要素

全てピン接合 | 全て剛接合 | 全て無効

カレントの接合設定を削除

接合節点

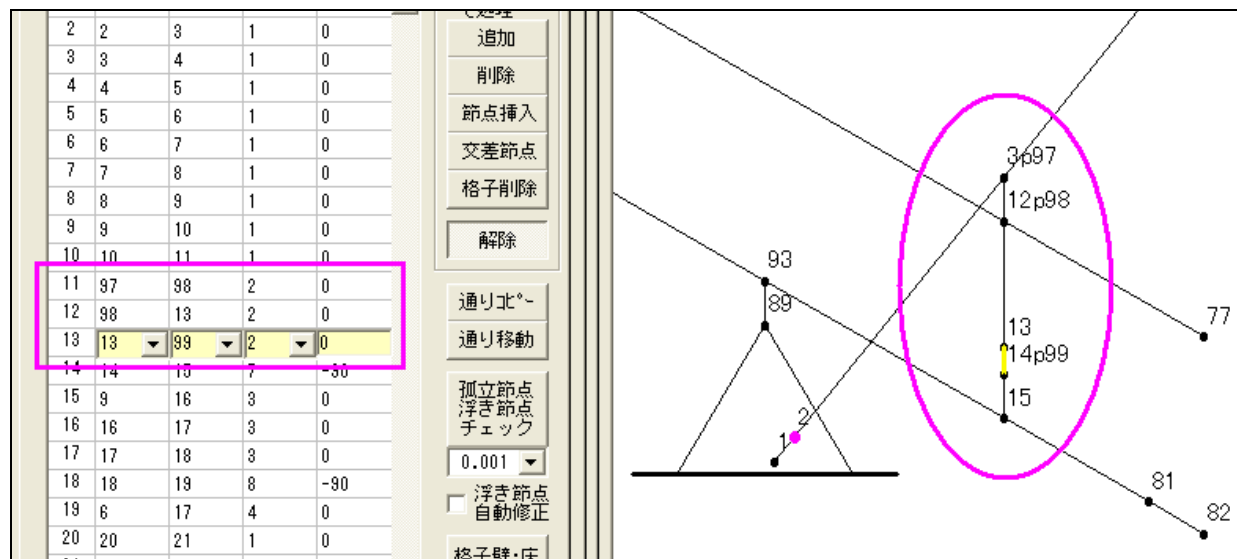
No1	No2	位置拘束	回転拘束	基準座標:要素No
3	97	全拘束	全回転	全体座標
9	109	全拘束	全回転	全体座標
12	98	全拘束	全回転	全体座標
14	99	全拘束	全回転	全体座標
10	100	全拘束	全回転	全体座標
66	118	全拘束	全回転	全体座標
69	107	全拘束	全回転	全体座標
71	108	全拘束	全回転	全体座標
73	119	全拘束	全回転	全体座標
75	120	全拘束	全回転	全体座標

接合設定では同じ座標にある2つの節点番号と位置拘束、回転拘束、基準座標で設定されます。このように位置拘束が全拘束、回転拘束が全回転の設定がピン接合に相当します。今回は特に設定を変更する必要はありませんので確認のみとします。接合設定の機能の詳細については「3Dチュートリアル」を参照してください。

次に「構造要素」タブを開いて節点をつなぎ直していきます。つなぎ直し方はどちらかの要素を新しく追加した節点に置き換えるのですが、例えば前柱材とモジュール取付材の接合点の節点3には新たに節点97が追加されていて接合設定で節点3と節点97がピン接合となっています。

ここでモジュール取付材側をつなぎ直す場合は要素2の節点2-3を節点2-97、要素3の節点3-4を節点97-4と2つの要素を変更する必要があり、モジュール取付材側は変更しないで前柱材の要素11の節点3-12を節点97-12としたほうが1つの要素の変更で済みます。また他の接合設定も前後柱材の節点に関係しているので柱材の節点を変更することとします。

変更方法は「構造要素」タブを開いて変更したい要素をイメージ上でマウス左クリックするとデータ表示欄の変更したい要素の行にデータ入力ボックスが開きますのでつなぎ直す節点を追加した節点に選択し直します。



上図は前柱材をつなぎ直した例ですが同様に前後全ての柱材の節点を接合設定用に追加した節点に変更していきます。


必要な節点全てをつなぎ直したら間違いがないか確認しておいてください。

◇トラス部材の適用

斜材についてはトラス部材を適用します。[材料・断面性能] タブを開いて材料番号を4の斜材にし、下部の断面性能表示欄にあるトラス部材の項目で、[適用はここをクリック]と表示してあるところをクリックします。ここをクリックする毎に[トラス部材とする]>[ブレース材（圧縮無効）]>[適用はここをクリック]>・・・と表示が変わっていきます。

この表示が[トラス部材とする]とするとその材料番号を使っている要素の両端は自動的にピン接合の扱いとなりますので、斜材に使っている材料番号4を[トラス部材とする]としておきます。

材料No	4
断面形状	等辺山形鋼
サイズ	50x50x6
断面積(mm ²)	564.4
断面2次 モーメントI _y (mm ⁴)	126000
断面2次 モーメントI _z (mm ⁴)	126000
有効断面2次極 モーメントI _x B'(mm ⁴)	6768
最小断面2次 半径i _e (mm)	9.63
断面係数 Z _y B'(mm ³)	3550
断面係数 Z _z B'(mm ³)	3550
有効極断面係数 Z _x B'(mm ³)	1128
トラス部材	トラス部材とする


形状選択

全て
トラス部材

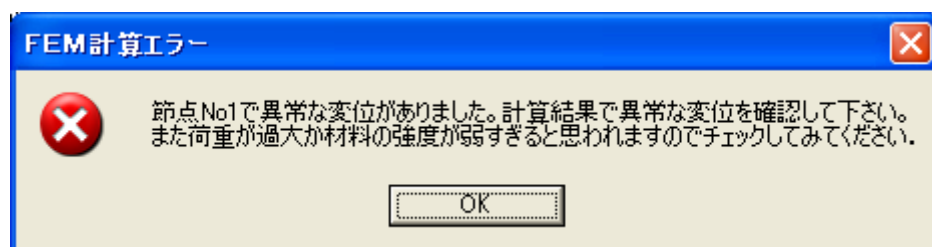
使用部材
強調表示

個別材料
データ削除

なお[ブレース材（圧縮無効）]の設定については後で説明します。

これでとりあえず溶接構造からボルト組立構造に変更できましたので、溶接構造のときの一番厳しい荷重条件である荷重パターン番号3“固定荷重+風圧荷重（逆風）”で計算してみましょう。

計算は正常に終了して最大総変位14.24、最小曲げ応力安全率1.406となったと思います。この結果の評価は後にして次に横からの荷重条件となる荷重パターン番号7“固定荷重+地震荷重（東西）”で計算してみましょう。



今度はこのエラーメッセージが表示されます。これは柱材の上下が全てピン接合となり横材ともピン接合なので左右方向（Y方向）は「四つ棒リンク」のようにグラグラな構造になっています。このため横（Y方向）からの荷重に対して不安定な構造となっていて過大な変位が発生し上記のエラーメッセージが表示されています。

荷重パターン番号3では前後（X方向）と上下（Z方向）の荷重のみでしたので問題なく計算が通りましたが横（Y方向）からの荷重で問題があることが分かりました。このようにピン接合を使った構造では特定の方向に不安定な構造となることがありますので、荷重条件も最低一つずつはX、Y、Zの方向に荷重がかかるようにしておきます。地震荷重の設定であれば加速度条件だけで簡単に方向を変えて荷重をかけることができますのでこれを使うと良いでしょう。

上記の例でボルト組立構造では横方向に不安定な構造になっているのが分かりましたので、溶接構造モデルでは迷ったところですがボルト組立構造では横荷重用の筋交いが必須であることが分かりました。次で筋交いを入れてみましょう。


◇筋交いの設定

ではここで前後の柱材間に筋交いを入れていきましょう。先に「材料・断面性能」タブを開いて筋交い用の材料を設定しておきます。材料番号は8まで使っていますので9を“前筋交い”、10を“後筋交い”とします。

では材料番号を9に進めて材料名称に“前筋交い”と入力し、「形状選択」ボタンをクリックして断面形状選択ダイアログで、ここでは筋交いの一例として形状名称に「平鋼」を選択し、サイズには「25×6」を選択して確定します。

さらに斜材のところで説明したトラス部材の項目をクリックして「ブレース材（圧縮無効）」と表示させておきます。

材料No	9
断面形状	平鋼
サイズ	25×6
断面積(mm ²)	150
断面2次 モーメントI _y B(mm ⁴)	450
断面2次 モーメントI _z B(mm ⁴)	7813
有効断面2次極 モーメントI _x B'(mm ⁴)	1528
最小断面2次 半径i _e (mm)	1.732
断面係数 Z _y B(mm ³)	150
断面係数 Z _z B(mm ³)	625
有効極断面係数 Z _x B'(mm ³)	262.2
トラス部材	ブレース材(圧縮無効)



形状選択

全て
トラス部材

使用部材
強調表示

個別材料
データ削除

この「ブレース材（圧縮無効）」という設定の基本はトラス部材と同じ両端ピン接合扱いの要素になるのですが、1回目の計算で圧縮がかかった場合はその要素を無効にして再度計算を繰り返し、ブレース材が設定してある要素全てで圧縮がかかっている要素が無くなるまで数回計算を繰り返します。

筋交いには今回設定した平鋼や細めの丸棒などが使われることが多く圧縮強度は期待できない（圧縮がかかると直ぐに座屈する）ので引張り強度だけが有効となりますが、これを単にトラス部材として計算すると圧縮強度も有効になってしまうのでこのような「ブレース材」の処理を行うようにしています。

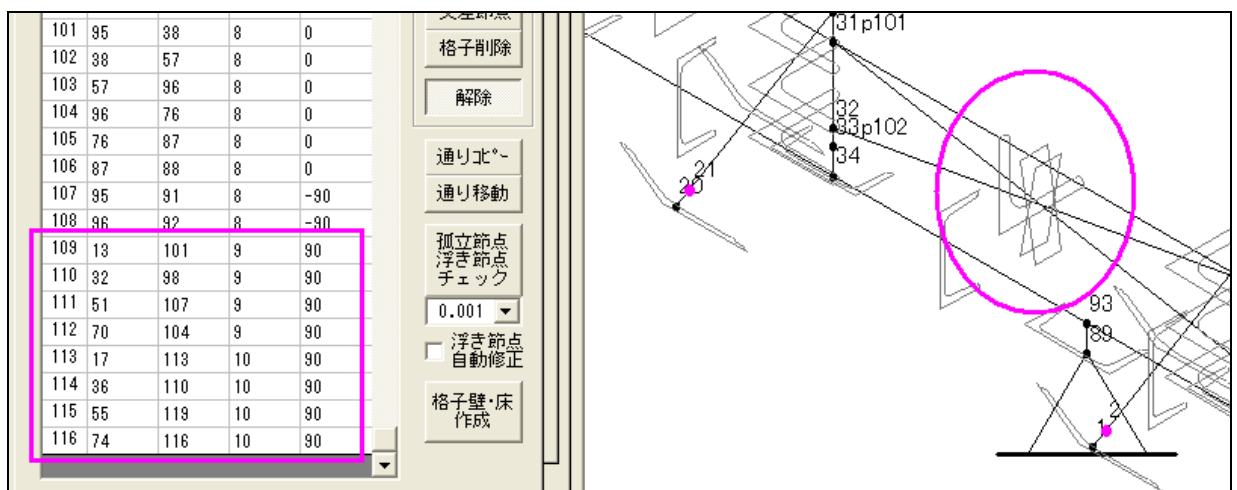
ただし「ブレース材」を使うと前述のように複数回計算を繰り返し計算時間もかかるようになるので本当に必要な部材にのみ適用するようにしてください。

同様に材料番号10も材料名称を「後筋交い」と入力し、後は材料番号9と同じ設定とします。「ブレース材」の設定も忘れないようにしてください。

次に「構造要素」タブを開いて筋交いの要素を追加していきます。前柱材には筋交い用の節点を作っていますので、その節点と横材との接合点の節点にクロスして筋交いを設定します。

横材との接合点は接合設定になっていて2つの節点がありますが「ブレース材」の設定になっていて両端がピン支持扱いなのでどちらの節点を選択してもかまいません。

後柱材は斜材との接合点と横材の接合点に筋交いを設定します。イメージで処理に慣れていければイメージ上でマウスを使って設定していくのが簡単です。次に筋交いを設定した例を示します。



筋交いのような斜めの要素も回転角が0の場合は部材座標のZ軸が上を向くように配置されます。「断」ボタンで断面形状を表示させるとよく分かりますが実際に配置する方向とは90°ずれています。

前述のように「ブレース材」は両端ピン支持扱いなのでわざわざ修正する必要はありませんが見た目を考慮してここでは回転角に90を設定してみました。

ボルト組立構造モデルへの変更はこれで完了ですが、筋交いの要素を新たに追加しましたので僅かな荷重ですが念のため風圧荷重を設定しておきましょう。

◇筋交いの風圧荷重の設定

部材の風圧荷重は次の式で分布荷重として求められますので受風幅Hbに平鋼の25mmを入れて、

$$Df = 0.001759 \times Hb = 0.001759 \times 25 = 0.043975$$

となります。

では「荷重パターン条件」タブを開いて荷重パターン番号2の“固定荷重+風圧荷重（順風）”を選択してから「分布荷重」タブを開いて筋交いの要素に上記の分布荷重値を入力していきます。筋交いの要素は新規に追加した要素なのでデータ表示欄を最後までスクロールしてやれば最後から前8行が筋交いの要素となっていますので簡単に設定できます。

次に荷重パターン番号を3として分布荷重値にマイナスを付けて逆風の風圧荷重を設定していきます。筋交いの自重と加速度により発生する荷重は自動で計算されますので風圧荷重以外の設定変更は必要ありません。

これでボルト組立構造モデルの全ての設定が完了しましたのでこの設定データを保存しておきます。ここではファイル名を“PAT1_ボルト組立構造モデル”としましょう。

◇ボルト組立構造モデルの計算と評価

では連続計算機能を使って全ての荷重条件で連続計算してみましょう

連続計算が終了すると同じ連続計算のダイアログですがタブが「直前連続計算最大値一覧」に切り替わって開きます。

設定			直前連続計算最大値一覧			
			コラム幅リセット	ログファイル出力	閉じる	
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)
1	固定荷重	2.151	19.98	0.3512	786	-70.97
2	固定荷重+風圧荷重〈順風〉(短期)	8.987	111.7	2.185	3077	-404.1
3	固定荷重+風圧荷重〈逆風〉(短期)	15.19	178.2	2.582	392	-2108
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	6.754	60.55	0.8115	1801	-240.6
5	固定荷重+地震荷重〈南北〉(短期)	5.684	64.02	1.036	1194	-151.7
6	固定荷重+地震荷重〈北南〉(短期)	9.986	104	1.036	1020	-638.7
7	固定荷重+地震荷重〈東西〉(短期)	2.48	23.07	1.114	1363	-1122
8						
9						

これを見るとやはり全体に溶接構造モデルに比べて変位も大きくなり、曲げ応力も大きくなっていることが分かります。また溶接構造モデルと同様に荷重パターン番号3の“固定荷重＋風圧荷重（逆風）”が一番変位も大きく曲げ応力も高いことが分かります。

ここはザッと確認したらこのダイアログは「閉じる」ボタンをクリックして閉じておき、荷重パターン番号3の計算結果を表示して、「モーメント・応力・座屈」タブを開いて最小曲げ安全率を確認してみます。

入力データ		計算結果	材料集計	計算条件設定
変位・反力		モーメント・応力・座屈	個別要素・通り別	材料別詳細
最大曲げモーメント(N・mm)	625600	62	発生要素 No	
最大曲げ応力(N/mm ²)	176.2	62		
最小曲げ応力安全率	1.328	62		
最大せん断力(N)	3078	108	発生要素 No	
最大せん断応力(N/mm ²)	2.582	108		
最小せん断応力安全率	52.52	108		

荷重パターン番号3の最小曲げ応力安全率は1.328で改良溶接構造モデルの最小曲げ応力安全率5.457に比べてかなり小さくなりましたが、一応安全率は1以上なのでこのボルト組立構造モデルでも強度上はギリギリOKといえるでしょう。

変位図アニメーションを表示させて変位する様子を見ても大きな問題はなさそうですが、前柱材が上下両端でピン接合となっているので前柱材が大きく傾いて変位することが分かります。

ここで「変位・反力」タブを開いて計算結果表示欄をスクロールして支持点の反力を表示させてみます。

入力データ		計算結果	材料集計	計算条件設定
変位・反力		モーメント・応力・座屈	個別要素・通り別	材料別詳細
最大総変位 (mm)	15.19	計算時間= 22 秒		
発生X座標 (mm)	2608	総重量(kg)		
発生Y座標 (mm)	1323	285.3801		
発生Z座標 (mm)	1506			
<input type="button" value="サム幅リセット"/> <input type="checkbox"/> イメージと連動して強調表示				
節点	反力 F _x (N)	反力 F _y (N)	反力 F _z (N)	反モーメント
89	317.5	-10.96	-95.31	-3789
90	317.5	10.96	-95.26	3798
91	3076.0	-4.402	-2104.0	56030
92	3076.0	4.402	-2104.0	-56040

これから分かるように前ベース材の支持点（節点 89・90）と後ベース材の支持点（節点 91・92）で反力 F_x と F_z が大きく異なっているのが分かります。反力 F_z は荷重の掛かり方（逆風）によるものなのではないですが、水平方向の荷重は本来前後のベース材で分担すべきところを主に後ベース材で水平方向の荷重を受けていることが分かります。

この原因はやはり前柱材の上下両端がピン接合になっているため、その対策にはモジュール取付材から前柱材にも斜材を入れるのが良いと考えられます。

では実際に前柱材に斜材を入れて試してみましょう。

◇ボルト組立構造モデルの前柱材に斜材を追加

筋交いを追加したときと同様の操作で前柱材に斜材を追加してみます。材料番号は 11 とし等辺山形鋼の 50 x 50 x 4 をトラス部材として設定します。

節点・支持 | バネ支持・柱脚 | 強制変位 | 接合設定 | 構造要素 | 材料・断面性能 | 荷重パターン条件 | 質量・注目フラグ

テンプレート読み込み | 11 前斜材

材料名称 (11/200)

材質

材質フルパス名称: 標準(ローカルマシン)

材質グループ名称: 鉄骨構造(長期)

材質: SS400 t ≤ 40mm 一般構造用圧延鋼

縦弾性係数(N/mm²): 206000 | ポアソン比: 0.3 | 密度(g/cm³): 7.86 | 付加質量(kg/m): 0

長期許容応力度(N/mm²)

引張り	圧縮	曲げ	せん断	ねじり
156	156	156	90.4	90.4

材料No	11
断面形状	等辺山形鋼
サイズ	50x50x4
断面積(mm ²)	389.2
断面2次モメントIyB(mm ⁴)	90600
断面2次モメントIzB(mm ⁴)	90600
有効断面2次極モメントIxB'(mm ⁴)	2048
最小断面2次半径ie(mm)	9.83
断面係数ZyB(mm ³)	2490
断面係数ZzB(mm ³)	2490
有効極断面係数ZxB'(mm ³)	512
トラス部材	トラス部材とする

形状選択

全てトラス部材

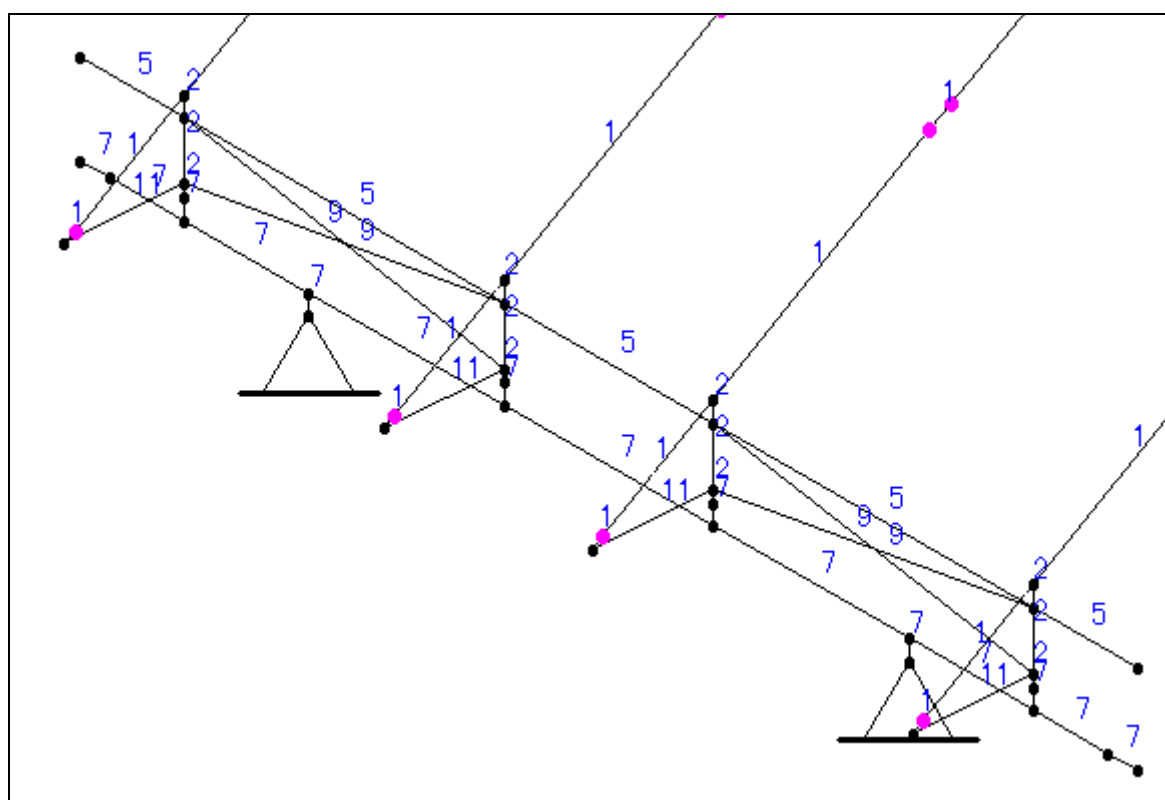
使用部材強調表示

個別材料データ削除

次に「構造要素」タブを開き、前柱材の筋交い用の節点とモジュール取付材の端点の節点で前斜材を材料番号 11 で設定していきます。

116	74	116	10	90
117	13	1	11	0
118	32	20	11	0
119	51	39	11	0
120	70	58	11	0

次に前柱材周辺を拡大した例を示します。



また筋交いと同様に荷重パターン番号 2 と 3 の風圧荷重で前斜材にも風圧荷重を設定しておきましょう。前斜材は 50 x 50 の等辺山形鋼なので風圧荷重は他の等辺山形鋼と同じ分布荷重値になりますのでそれをコピーして設定すれば良いでしょう。

ここで一旦、この設定データを保存しておきます。ここではファイル名を“PAT1_ボルト組立構造モデル_前斜材付き”としましょう。

では連続計算機能を使って全ての荷重条件で連続計算してみましょう

設定			直前連続計算最大値一覧				
			カラム幅リセット	ログファイル出力	閉じる		
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)	
1	固定荷重	0.2112	9.755	0.3531	784.7	-103.5	
2	固定荷重+風圧荷重(順風)(短期)	1.327	38.98	1.582	3076	-537	
3	固定荷重+風圧荷重(逆風)(短期)	1.517	38.4	1.56	617.7	-2109	
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	0.6795	34.94	0.8187	1800	-328	
5	固定荷重+地震荷重(南北)(短期)	0.628	15.87	0.6526	1193	-236.6	
6	固定荷重+地震荷重(北南)(短期)	0.939	28.17	0.8265	1040	-486.5	
7	固定荷重+地震荷重(東西)(短期)	1.836	22.85	1.112	1361	-1119	
8							
9							

この結果を見ると変位も曲げ応力もかなり小さくなっており改良溶接構造モデルとほぼ同等の値になっています。

荷重パターン番号3の“固定荷重+風圧荷重(逆風)”の最小曲げ応力安全率は6.094と改良溶接構造モデルの最小曲げ応力安全率5.457より若干大きくなっています。

支持点の反力F_xを見ても前ベース材で水平方向の荷重を受けるようになったことが分かります。

入力データ

計算結果

材料集計

計算条件設定

変位・反力

モーメント・応力・座屈

個別要素・通り別

材料別詳細

最大総変位 (mm)

1.517

計算時間= 27 秒

発生X座標 (mm)

2300

総重量(kg)

発生Y座標 (mm)

800

289.0591

発生Z座標 (mm)

639

カラム幅リセット

☐ メーゾと連動して強調表示

節点	反力 F _x (N)	反力 F _y (N)	反力 F _z (N)	反モーメント ▲
89	1538	-14.26	-75.82	-5049
90	1538	14.26	-75.82	5050
91	1859	-1.376	-2105.0	70110
92	1859	1.376	-2105.0	-70110
93				

前斜材を入れたことにより最小曲げ応力安全率が改良溶接構造モデルと同等以上になり支持点反力のバランスも良くなりました。今回の前斜材は既に節点が設定されていたモジュール取付材の下端と筋交い用の節点に入れましたが、モジュール取付材・前柱材・前斜材で構成される三角形が極端な鋭角三角形になれば前柱材の後側を含めて適当な位置に前斜材を設ければ同等の効果があるのではないかと思います。

いろいろと前斜材の設ける位置を変えて試してみると興味深い結果が得られるかも知れませんが、いずれにしてもこのように前柱材のあるボルト組立構造であれば前後柱材とも斜材を入れるのが理想的ではないかと考えられます。

このように前斜材を入れたことで安全率がかなり改善されましたが、ここまで安全率が高い必要はないと考えられますので次で鋼材のサイズダウンを検討してみましょう。

◇ボルト組立構造モデルのサイズダウン検討

ここで使用していた鋼材をリストアップしておきます。

モジュール取付材	：材料番号 1	：等辺山形鋼	50 × 50 × 6
前柱材	：材料番号 2	：等辺山形鋼	50 × 50 × 6
後柱材	：材料番号 3	：等辺山形鋼	50 × 50 × 6
斜材	：材料番号 4	：等辺山形鋼	50 × 50 × 6
前横材	：材料番号 5	：等辺山形鋼	50 × 50 × 4
後横材	：材料番号 6	：等辺山形鋼	50 × 50 × 4
前ベース材	：材料番号 7	：みぞ形鋼	100 × 50 × 5 × 7.5
後ベース材	：材料番号 8	：みぞ形鋼	100 × 50 × 5 × 7.5
前筋交い	：材料番号 9	：平鋼	25 × 6
後筋交い	：材料番号 10	：平鋼	25 × 6
前斜材	：材料番号 11	：等辺山形鋼	50 × 50 × 4

ここでは等辺山形鋼のサイズを落としてみましょう。本当はトライアンドエラーでいろいろ試しているのですがこのくらいかなというのが等辺山形鋼を全て40 × 40 × 3にしたものです。

では「材料・断面性能」タブを開いて材料番号を変えて等辺山形鋼を使っているものは全てサイズを40 × 40 × 3にしてみます。また本来は鋼材の受風幅が変わっている所以で風圧荷重も変えないといけませんがこれは面倒なのでそのままにしておきます。

ここで一旦、この設定データを保存しておきます。ここではファイル名を“PA チュートリアル_ボルト組立構造モデル_前斜材付き_サイズダウン”としましょう。では連続計算機能を使って全ての荷重条件で連続計算してみましょう

設定			直前連続計算最大値一覧			
			コラム幅リセット	ログファイル出力	閉じる	
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)
1	固定荷重	0.3406	22.9	0.3673	574.1	-77.29
2	固定荷重+風圧荷重〈順風〉(短期)	2.451	91.38	3.502	2866	-517.3
3	固定荷重+風圧荷重〈逆風〉(短期)	3.056	106.9	3.633	601.5	-2320
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	1.4	98.32	1.55	1590	-311.4
5	固定荷重+地震荷重〈南北〉(短期)	0.8817	26.88	0.9451	870.7	-169.5
6	固定荷重+地震荷重〈北南〉(短期)	1.491	61.48	1.378	800.7	-357.8
7	固定荷重+地震荷重〈東西〉(短期)	4.462	46.95	1.851	985.2	-797
8						
9						

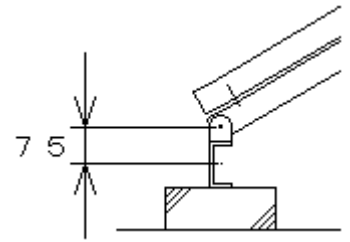
この結果を見ると変位も曲げ応力もだいぶ大きくなっていますが荷重パターン番号3の“固定荷重+風圧荷重（逆風）”の最小曲げ応力安全率は2.189で、前斜材を入れる前の荷重パターン番号3の最小曲げ応力安全率は1.328なのでこちらより良い結果となっていますが、どちらも強度上は問題ないとレベルと考えられます。

部品点数は増えますが前斜材を入れて鋼材のサイズダウンをした方が良いか、前斜材無しで鋼材サイズは当初のままでいくかは材料費や鋼材の加工、管理等の工数などを総合的に判断して決める必要があります。

前柱材のないボルト組立構造モデル

◇概要

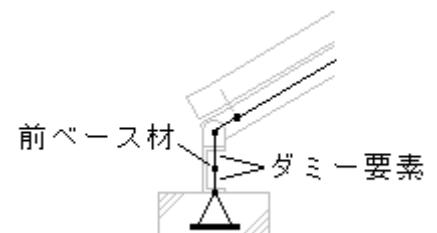
文献 1 にでている計算例の構造は右に示すように前ベース材に取付ステーを付けてモジュール取付材を取り付けるもので、前柱材のない構造となっており、これは実際の支持物の構造にも良く見られる構造です。



この構造は基礎の位置や高さによってモジュール取付材の下端が決まってしまうので、設置の自由度としては前柱材のある構造の方が高いですが、この構造では前柱材以外に前横材、前筋交いも廃止でき部品点数を大幅に少なくできるメリットもありますので、この構造で強度がどうなるか試してみます。ここでは前斜材のないボルト組立構造モデルを基本にこの構造に改造してみましょう。

取付部の構造モデルとしては取付ステーとベース材をボルト接合としても前後方向には強度があるのでこの部分はピン接合にする必要はないと考えられます。また上図の寸法関係とすると長さも 25 mm 程度の要素なので新たに取付ステーの要素は作らないでベース材の側面ダミー要素を上にも伸ばして設定してみます。

また取付ステーとモジュール取付材との接合点も本来は下端より若干ずれますがモデルの変更が面倒なのでモジュール取付材の下端の節点も変更無しとします。



以上の簡略化した考えでモデル化したものを右に示します。

今回は既存モデルの改造なので上記のように簡略化していますが、新規にモデルを作る場合は取付ステーを平鋼でモデル化してダミー要素と剛接合でつなぎ、モジュール取付材との接合点に節点を作って取付ステーとピン接合してやればかなり本格的なモデルになると思います。

なお前の基礎の位置（支持点）が 25 mm 高くなり、本来は後ろもそれに合わせるべきですが強度の評価にはほとんど影響しないと考えられますので後ベース材関係は変更無しとします。

◇不要な要素・接合設定・節点の削除

改造は前斜材のないボルト組立構造モデルから始めますので既存データ読込で“PAT1_ボルト組立構造モデル”を読み込みます。

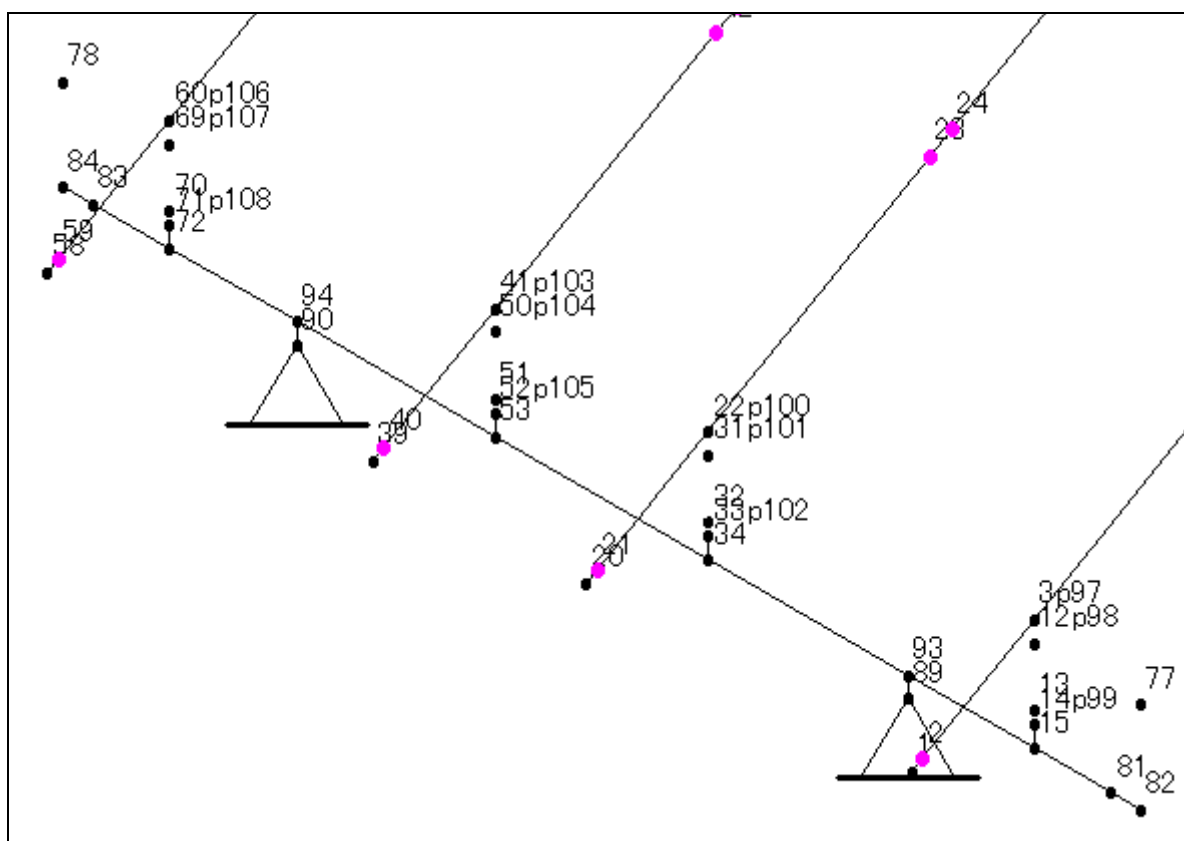
次に[構造要素]タブを開いて不要な要素を削除していきましょう。削除する要素は前柱材、前横材、前筋交いになります。

要素の削除はデータ表示欄で削除したい要素の行をクリックしてデータ入力ボックスを表示してデータ表示欄上の「削除」ボタンをクリックするとその要素が削除できますがイメージ上でマウスを使って削除するのが簡単です。

荷重イメージで要素が見難い場合は「荷」ボタンを何回かクリックして荷重イメージを非表示にしておくとい良いでしょう。

マウスで要素を削除するにはイメージで処理の枠の「削除」ボタンを押しておいて、削除したい要素にマウスを持っていくと認識した要素が赤く表示されますので、その状態でマウス左クリックするとその要素が削除されます。

次に不要な要素を削除したものを示します。



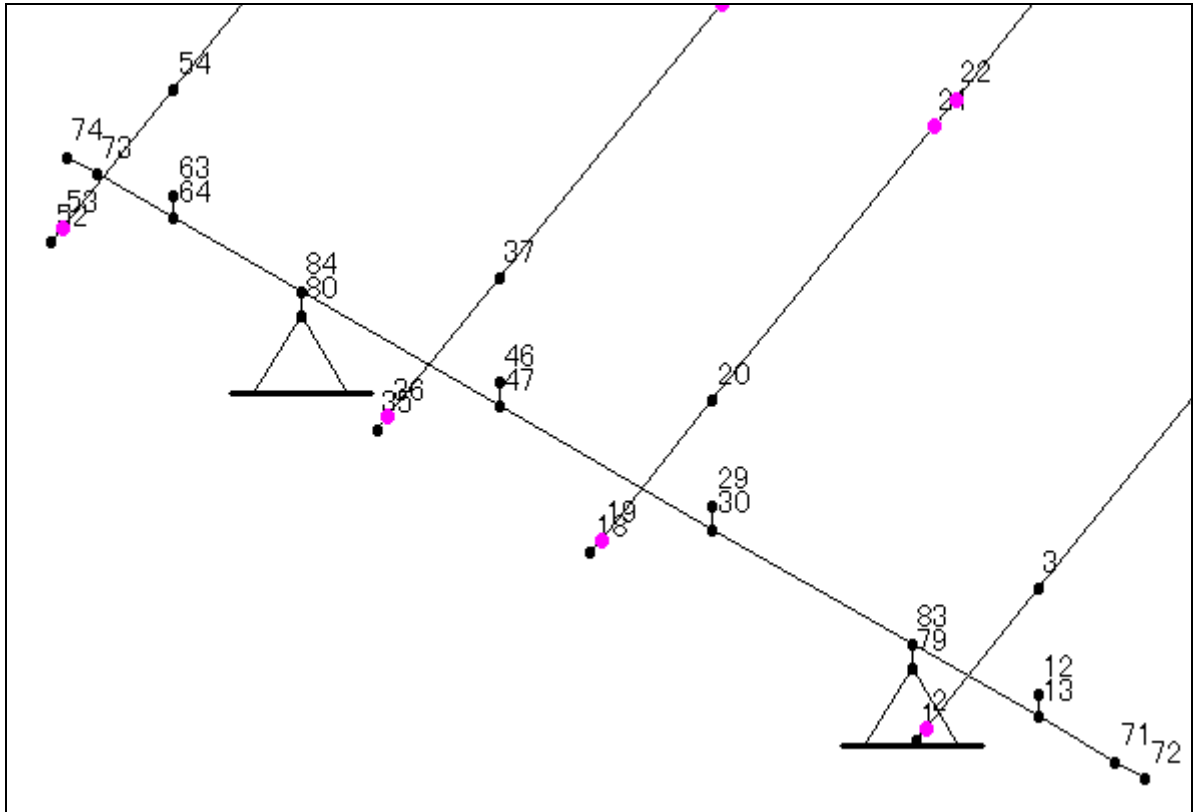
次に「接合設定」タブを開き不要な接合設定を削除します。データ表示欄から削除したい接合設定の行を選択してデータ入力ボックスを表示したら「カレントの接合設定を削除」ボタンをクリックします。削除したい接合設定は節点番号から探しても良いですがイメージ上で接合設定をマウス左クリックするとその設定の行にデータ入力ボックスが表示されるのでそれから「カレントの接合設定を削除」ボタンをクリックする方が分かりやすく削除できると思います。

なおモジュール取付材下端と接合予定の側面ダミー要素の接合設定は節点座標を移動することで新たに設定されますので、上図で見えている接合設定は全て不要となります。

次に「節点・支持」タブを開いて要素や接合設定が削除されて空間上に浮いている節点を削除していきます。この場合もデータ表示欄から削除したい節点番号の行を選択してデータ入力ボックスを表示したら「削除」ボタンをクリックします。

またイメージ上で削除したい節点をマウス左クリックするとその節点の行にデータ入力ボックスが表示されるのでそれから「削除」ボタンをクリックしても良いです。

次に不要な要素・接合設定・節点を削除したものを示します。



ついでに側面ダミー要素も25mm上に伸ばしておきましょう。節点番号は12, 29, 46, 63の4つでZ座標が-50なのでこれを-25に変更します。

◇通り移動

ここで前ベース材の節点と側面ダミー要素の節点のX座標を300から0にしてさらにZ方向に25mm移動させます。これを節点の座標で変更していくとかなり面倒になりますので、ここでは「通り移動」機能を使って移動してみましょう。

「構造要素」タブを開いて「通り移動」ボタンをクリックすると右のダイアログが開きます。

ここでは基準節点を前ベース材の端点の72、移動対象通り面を「Y-Z面」とし、移動距離をX方向-300mmとして「移動実行」ボタンをクリックします。

これで前ベース材周りの節点のX座標が0になります。

次にZ方向に25mm移動させますので、移動距離のみX方向は0にしてZ方向を25mmにして「移動実行」ボタンをクリックします。

これでモジュール取付材の下端の節点と側面ダミー要素の節点座標が一致しますので、自動的にピン接合の接合設定が設定されます。

これで前柱材のないボルト組立構造モデルへの改造は完了ですのでこの設定データを保存しておきます。

ここではファイル名を「PA チュートリアル_ボルト組立構造モデル_前柱材なし」としましょう。

◇前柱材を使わないボルト組立構造モデルの強度の評価

荷重条件は一切変更の必要はありませんので、連続計算機能を使って全ての荷重条件で連続計算してみましょう

設定			直前連続計算最大値一覧			
			カラム幅リセット	ログファイル出力	閉じる	
No	荷重パターン名	変位(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	せん断応力(N/mm ²)	圧縮軸力(N)	引張軸力(N)
1	固定荷重	0.4307	8.161	0.381	844	-52.41
2	固定荷重+風圧荷重<順風>(短期)	1.641	42.56	1.727	8171	-528.5
3	固定荷重+風圧荷重<逆風>(短期)	1.687	38.86	1.583	820.9	-2111
4	固定荷重+積雪荷重(短期)	1.436	30.78	0.9148	2004	-152.1
5	固定荷重+地震荷重<南北>(短期)	0.6378	15.48	0.6394	1179	-239.4
6	固定荷重+地震荷重<北南>(短期)	1.335	23.24	0.9269	816	-37.31
7	固定荷重+地震荷重<東西>(短期)	3.332	32.08	1.214	1478	-1235
8						

この結果を見るとボルト組立構造モデルで前斜材を入れたときとほぼ同等の値になっているのが分かります。

荷重パターン番号3の“固定荷重+風圧荷重（逆風）”の最小曲げ応力安全率も6.022と、前斜材を入れたときの6.094と同等の値になっています。

ここでは試みませんがこれだけの安全率があれば前斜材を入れたときと同様にサイズダウンも可能になるでしょう。

このように前柱材を廃止して前ベース材とモジュール取付材をつなぐ構造は基礎の位置に制約が出てきますが部品点数も減り強度も高いので、太陽電池アレイ用支持物の構造としては有利な構造になっており多く使われているのも納得できます。

まとめ

ここでは設計する太陽電池アレイの支持物仕様を決めて「フレーム構造－立体」を使って、最初は簡単な溶接構造モデルを作成し、その構造モデルに手計算による荷重計算で求めた荷重条件を適用して解析を行い強度の評価をしてみました。

次にその構造モデルを実際の支持物に多く使われているボルト組立構造に変更してみて、再度強度の評価を行い、さらにボルト組立構造モデルに前斜材を入れてみたり、サイズダウンしたり、最後に前柱材のない構造モデルを試しています。

これらの結果からボルト組立構造モデルでは前柱材のある場合は前斜材も入れた方が良く、基礎の配置に制限が無ければ前柱材を廃止して前ベース材にモジュール取付材を取り付ける構造が良いことが分かりました。

またこのチュートリアルを通して太陽電池アレイ用支持物をどのように「フレーム構造－立体」でモデル化し、強度を評価するのもも分かっていただけたと思います。

なお免責事項にも記載しているように本チュートリアルは机上で検討したもので利用者個人の責任において活用いただくものになりますが、これを参考にして実際に太陽電池アレイ用支持物を設計している技術者に「CAD TOOL フレーム構造解析10」を活用していただければ、より良い設計や作業の効率アップが可能になるのではないかと期待しております。