

8. リバースエンジニアリングー機構解析(後半グループ向け)

改訂 2014.10

1. 実験目的

機械を分解して動作のメカニズムを確認し 3DCAD を用いて動作を再生することはリバースエンジニアリングの重要な技術のひとつである。ここではエンジンのクランク機構を例に 3DCAD の機構解析機能を学ぶ。この作業を通して現代の 3DCAD によるデザインとシミュレーションの概要を理解することを本実験の目的とする。

2. エンジンのクランク機構

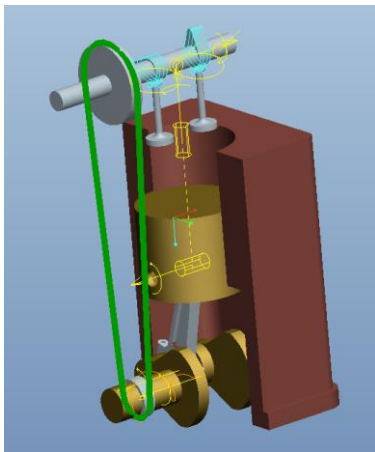


図1 完成図

図1に今回作成するクランク機構の完成図を示す。クランク機構は上下運動を回転運動に変換する機構である。シリンダブロック、クランク、コネクティングロッド、ピストン、エンドキャップの5つの部品からなる。見やすくするためにシリンダブロックは中央部で分割してある。本実験ではこれらの部品は既に用意されたものをウェブよりダウンロードし、組み立て(この作業をアSEMBル(assembly)と呼ぶ)と機構解析を実施する。

3. 準備

機構解析を実施する前に以下の準備をする。

3.1 部品のダウンロード

計算力学研究室のホームページにアクセスする。

<http://www.cml-seikei.com>

「授業関連」のタグをクリックし、「システムデザイン実験 I」を再びクリックする。

「PROE_ENGINE2.zip」をクリックし、ファイル(すべての部品が圧縮されている)を自分のフォルダーに一度保存する。保存されたファイルをダブルクリックすると解凍される。

3.2 PRO/E の立ち上げ



以下の手順で pro/E を立ち上げ環境を整える。

- ・ PC のスタートメニューより PRO/E を選びクリックして立ち上げる。
- ・ メニューよりファイル→ワーキングディレクトリを設定を選び、ダウンロードした部品があるフォルダを指定する。

4. アセンブリ作業

「ファイル」メニューより「新規」を選びクリックする。メニュー（図 2）が出るのでアセンブリをクリックし名前に「Engine」と入力した後、「OK」をクリックする。

4.1 Base Block の読み込み

画面右側にあるアセンブリアイコン をクリックし、メニューより **base_block.prt** を選び「開く」をクリックする。ウィンドウには読み込まれた base block が表示される（図 3）。最初の部品は空間に固定する必要があるので、画面上側の拘束の指定ウィンドウで**固定**を選ぶ（デフォルトは自動）。部品は十分に拘束されたことを示す黄色になる。確認したら画面右上の緑色の**終了**ボタン をクリックする。

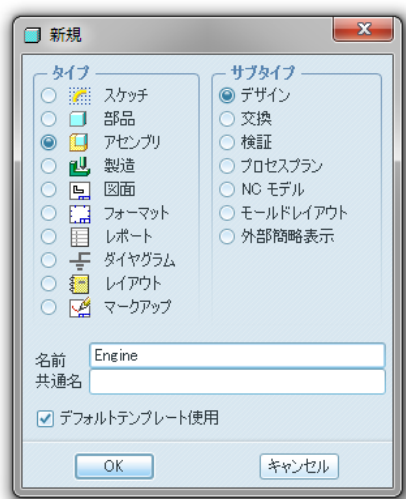


図 2 新規メニュー

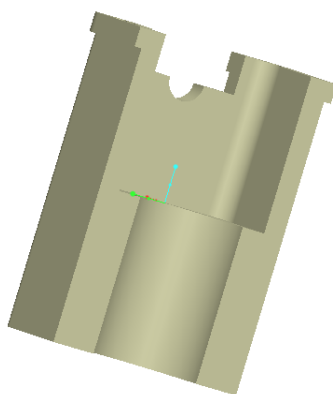


図 3 base_block

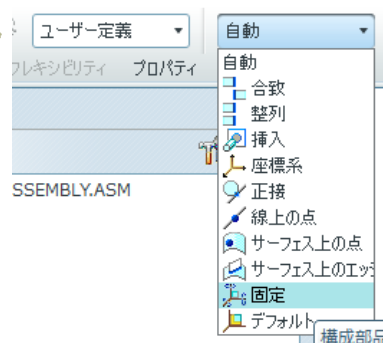



図 4 拘束（固定）の指定

4.2 crank_shaft の組み込み

画面右側にあるアセンブリアイコン を再びクリックし、メニューより **crank_shaft.prt** を選び「開く」をクリックする。マウスの中ボタン（またはホイール）を押しながらマウスをドラッグすると部品を回転させることができる。Base block と並んで base block が表示されていることを確認する（図 5）。

クランクシャフトのように回転する部品は pro/E では「ピン」として拘束する。画面左上の拘束定義ウィンドウより「ピン」を選ぶ（図 6）。続いてクランクシャフトの回転軸(A-6)とシリンダブロックのクランクシャフトのための半円の軸(A-4)をクリックするとこれらの軸が一致するよう部品が移動する（図 7）。次にクランクシャフトの **FRONT** 平面とア

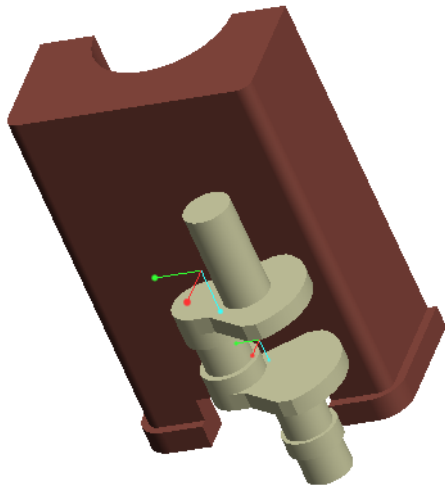


図 5 クランクシャフト(手前)

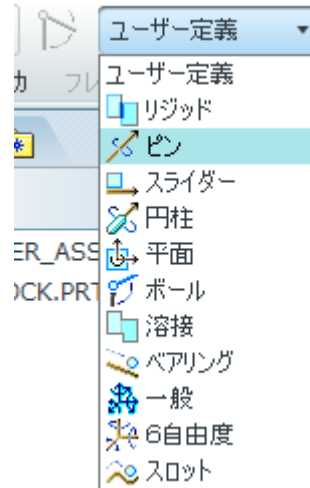


図 6 ピン拘束の指定

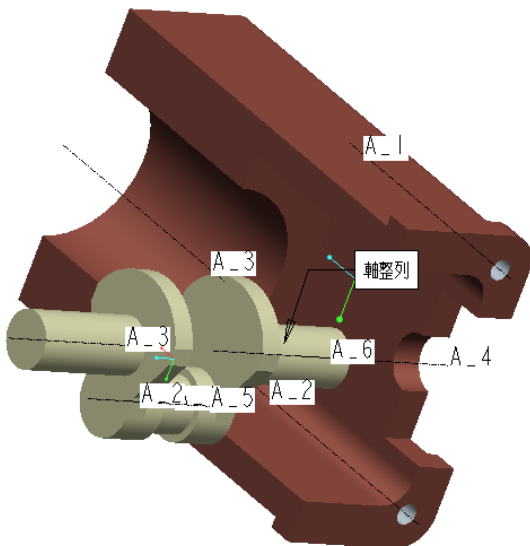


図 7 軸位置の指定

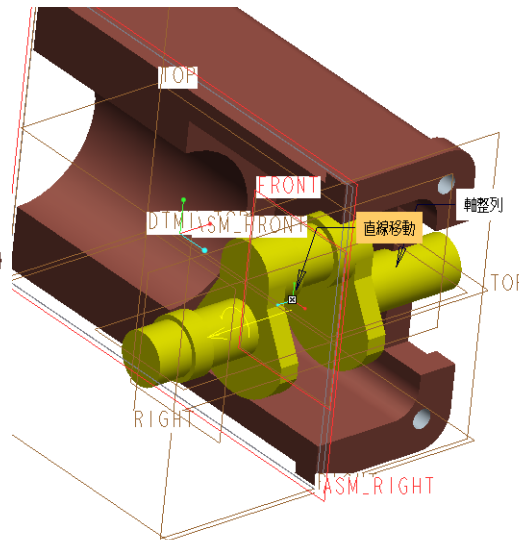



図 8 面位置を指定

センプリの **ASM_RIGHT** 平面をクリックすると二つの平面は一致する(図 8)。このとき図 9 に示すようにクランクシャフトについての プーリー (円板) がケース内側に向いていることに注意する。もしケース外側にあるときは画面上部に見える反転ボタン  を押し、クランクシャフトを反転させる。以上でピン支持の拘束は終了である。部品は拘束が終了したことを示す黄色となるのを確認して画面右上の緑色の

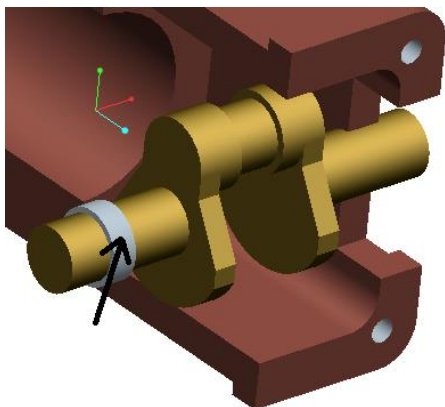





図 9 歯車位置 (矢印)

「終了」ボタン  をクリックする。


正しくピン拘束されている場合は次の手順で

クランクを回転させることができる。画面上部の「構成部品をドラッグ」ボタンをクリックする。続いてクランクの適当な位置をクリックしドラッグ位置を指定する。そのままマウスを動かすとクランクは回転する。「閉じる」ボタンをクリックするとドラッグは終了する。回転しない場合は拘束がピン支持になっているか確認する。

4.3 connecting rod の組み込み

画面右側にあるアセンブリアイコンをクリックし、 **connecting_rod.prt** を選び「開く」をクリックする。Connecting rod はクランクとピストンを結ぶ部品であり、ここでは **crank shaft** にピン支持で取り付ける。

拘束定義ウィンドウより「ピン支持」を選ぶ。次に読み込んだ **connecting rod** の **A-7 軸** と **crank shaft** の **A-1 軸** をクリックすると二つの軸が一致するように部品が移動する。続いて **connecting rod** の **TOP** 平面と **crank shaft** の **FRONT** 面をクリックする。

二つの面が一致して **connecting rod** はピン拘束が終了したことを示す黄色になるので画面右上の緑色の「終了」ボタンをクリックする。**connecting rod** がシリンダー内になくても現時点では気にする必要はない（図 10）。

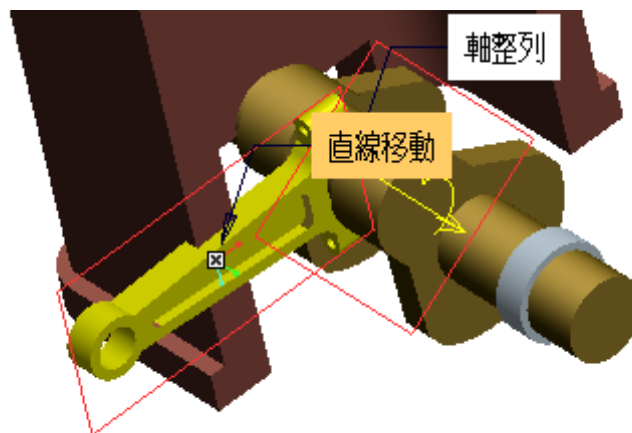


図 10 connecting rod の軸位置の指定

なお、二つの面が一致しなかった場合は、画面左上の「配置」タブをクリックし、面と面の距離を指定する「オフセット」が一致となっているか確認する（図 11）。

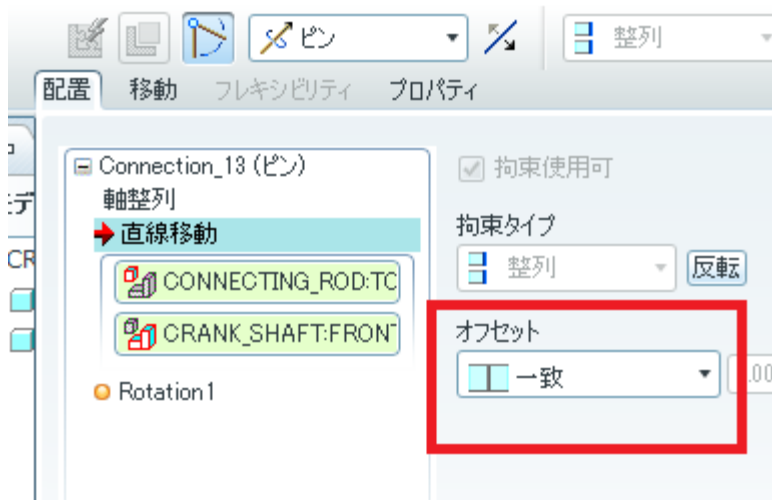





図 11 クランク軸の面位置を指定

ここでも「構成部品をドラッグ」ボタン  をクリックし、組み込んだ部品が動くことを確認する。

4.4 piston の組み込み

画面右側にあるアセンブリアイコン  を再びクリックし、メニューより **piston.prt** を選び「開く」をクリックする。ピストンはシリンダー内部を上下に移動する。このような運動には pro/E では円柱拘束を適用する。拘束定義ウィンドウより「円柱」を選び（図 12）、ピストン外側の曲面とシリンダー内側の曲面をクリックする（図 13）。ピストンはシリンダーと円柱の軸が一致するように移動する（図 13）。ここで、ピストンの上下が逆向きに配置された場合には「挿入拘束を反転」  をクリックして上下を反転させる。

➡他の部品で整列軸またはエッジを選択します。



図 12 円柱拘束の指定

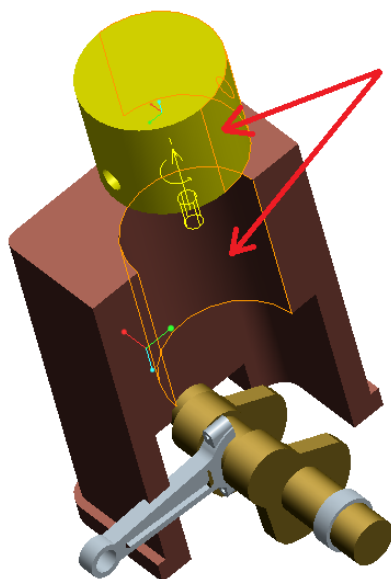




図 13 「円柱拘束」の面を指定

円柱拘束はこの操作で確定するのでピストンは黄色で表示される。ここでさらに **connecting rod** のピン穴とピストンのピン穴を揃えるため次のように拘束を加える。

画面左上の「配置」タブをクリックし、「新しいセット」をクリックする(図 14)。これで新しい拘束が追加できるようになるので **connecting rod** の A_1 軸と **piston** の穴の A-2 軸をクリックする。**Piston** は二つの軸がそろうように移動する(図 15)移動を確認したら画

面右上の緑色の「終了」ボタン  をクリックする。

「構成部品をドラッグ」ボタン  をクリックし、組み込んだ部品が動くことをここでも確認しておこう。確認したらメニューの「ファイル」から「保存」を選び保存する。

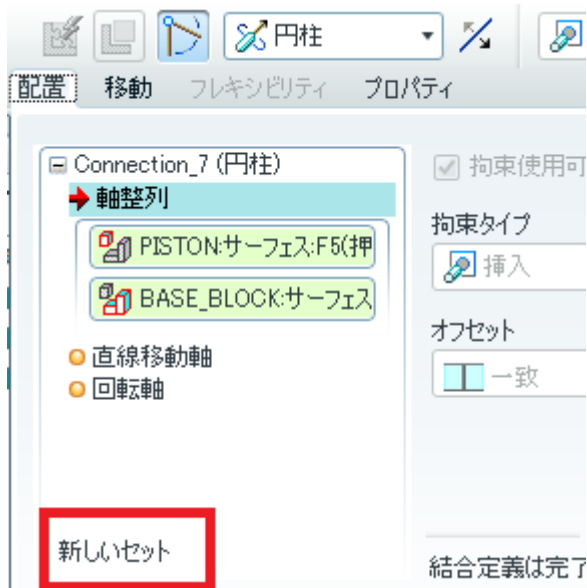


図 14 クランク軸の面位置を指定

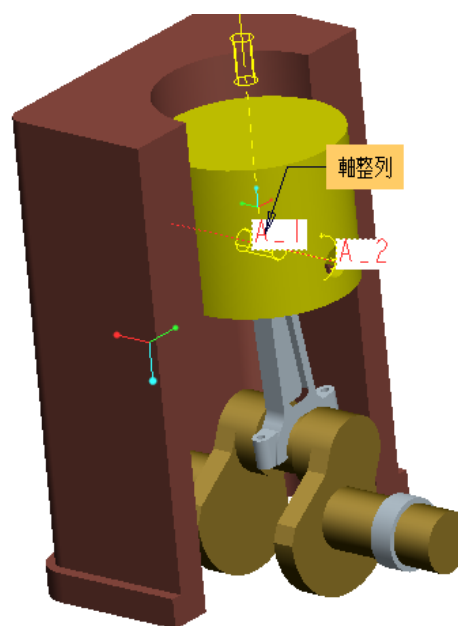




図 15 クランク軸の面位置を指定

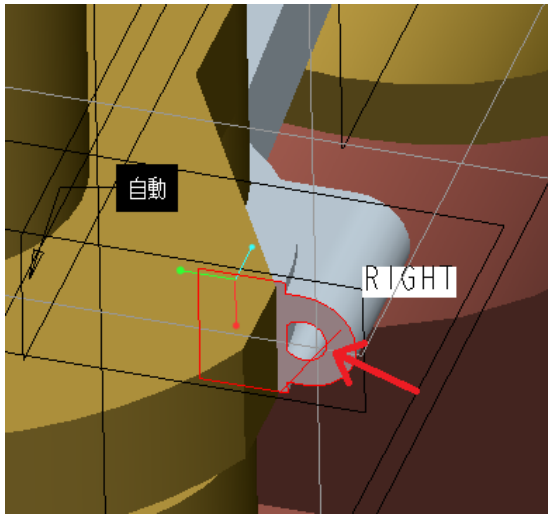
4.5 end cap の組み込み

画面右側にあるアセンブリアイコン  を再びクリックし、メニューより **end_cap.prt** を選び「開く」をクリックする。

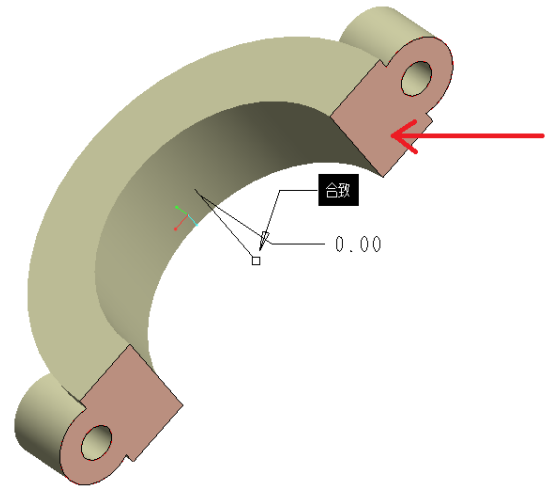
はじめに connecting rod の底面 (図 16(a))と end cap の底面 (図 16(b)) をクリックすると二つの面が一致するように end cap が移動する。

次に、画面左上の「配置」タブをクリックし、「新規拘束」(図 17) を選び connecting rod の TOP 面と end cap の FRONT 面をクリックする。二つの面は一致する。もし自動的に一致しなければ配置タブの中のオフセットが「一致」または「0」になっていることを確認する (図 18)。

再び、画面画面左上の「配置」タブをクリックし、「新規拘束」を選び、connecting rod の FRONT 面と end cap の RIGHT 面をクリックする。ふたつの面が一致したのを確認したら画面右上の緑色の「終了」ボタン  をクリックする。



(a) connecting rod 側の面



(b) end cap 側の面

図 16 合致する面の指定

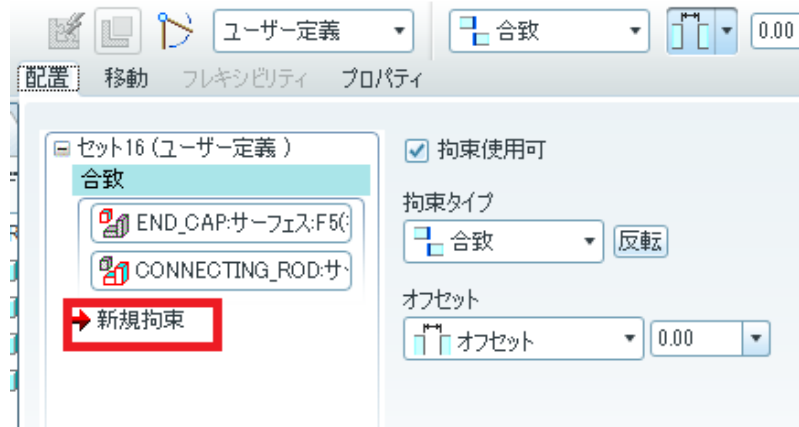


図 17 拘束の追加



図 18 オフセットの「一致」

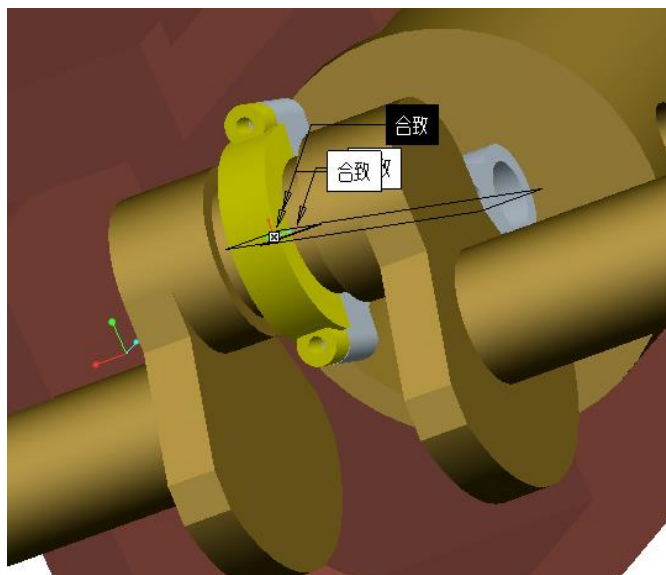





図 19 connecting rod に固定された end cap

以上でアセンブリは終了である。メニューの「ファイル」から「保存」を選び保存する。

4.6 カムシャフトの組み込み

ピストン上部にカムシャフトを組み込む。画面右側にあるアセンブリアイコン  をクリックし、メニューより camshaft.prt を選び「開く」をクリックする。

結合の種類として「ピン」   を指定する。次に ベースブロックの A_9 軸とカムシャフトの A_1 軸をクリックするとこれらが揃う（図 20）。

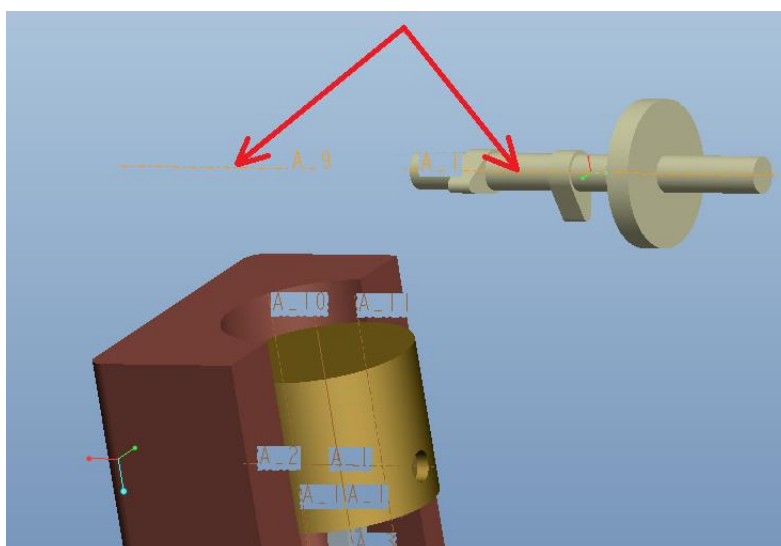



図 20 カムシャフトとベースブロックの軸の一致指定

このときカムシャフトについているプーリー（円板）がケース内側に位置するように必

要に応じて反転ボタンを押す。

次にカムシャフトの DTM1 面と ASM_RIGHT をクリックして両者を一致させる (図 21)

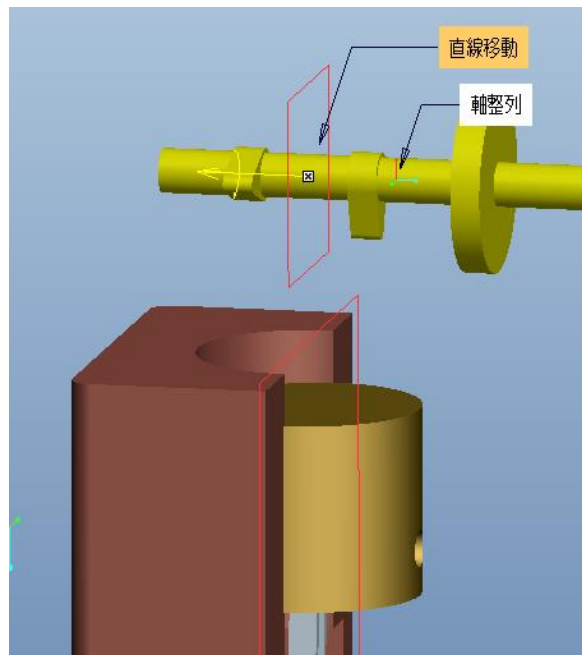





図 21 カムシャフトの面一致指定


カムシャフトが黄色になりピン拘束が終了したことを確認したら「終了」ボタンをクリックする。「構成部品をドラッグ」ボタンをクリックし、組み込んだ部品が動くことを確認しよう。

4.6 バルブの組み込み

ここでは燃料と空気が混合された気体をシリンダー内に入れるための吸気バルブと燃焼し終わった気体をシリンダーの外に出す排気用の二つのバルブを組み込む。

画面右側にあるアセンブリアイコンをクリックし、メニューより valve.prt を選び「開く」をクリックする。

拘束は特に指定しなくて良い (「自動」のまま)。バルブの中心軸 A_2 とベースブロックの A_10 軸をクリックするとふたつの軸が一致する (図 22)。「配置」タブの横にある「移動」タブをクリックし、タブ内に表示される「運動タイプ」が「直線移動」になっていることを確認する。バルブが軸に沿って上下にドラッグできるので図 23 のようにピストン上部に配置する。

さらに必要に応じて、反転ボタンを押して弁を下側に配置する。

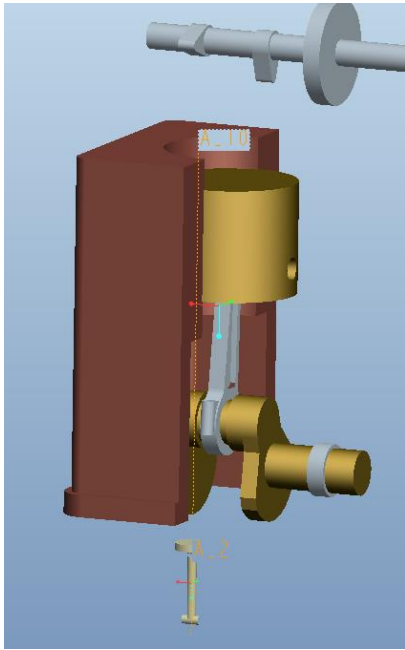


図 22 バルブ軸の一致指定

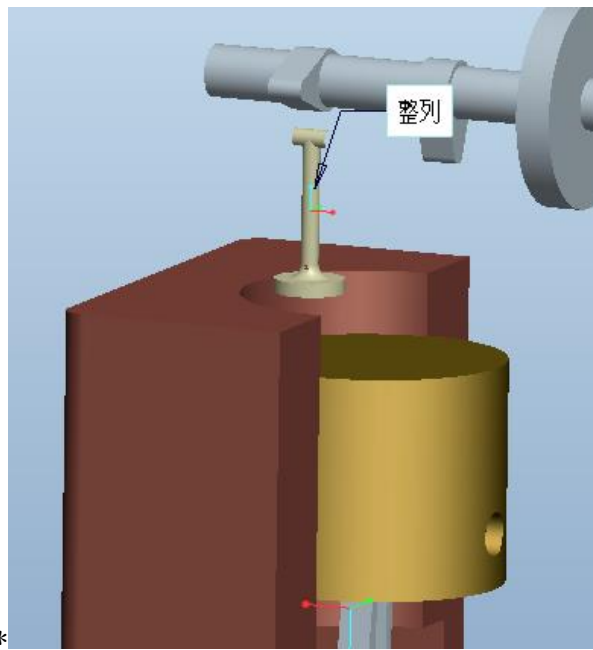




図 23 バルブの平行移動と反転

次にバルブの RIGHT 面とカムシャフトの DTM4 面をクリックして両者を一致させる (図 24)。以上でひとつめのバルブの組み込みは終了であるから、画面右上の緑色の「終了」ボタン  をクリックする。

同様に二つ目のバルブの設定を行う。画面右側にあるアセンブリアイコン  をクリックし、メニューより再び valve.prt を選び「開く」をクリックする。

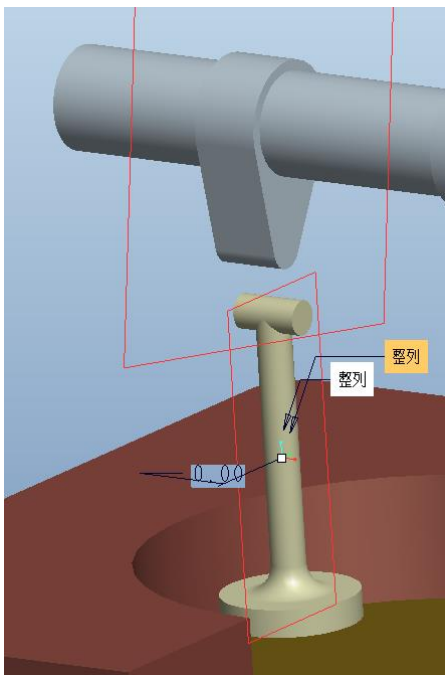


図 24 バルブの面一致指定

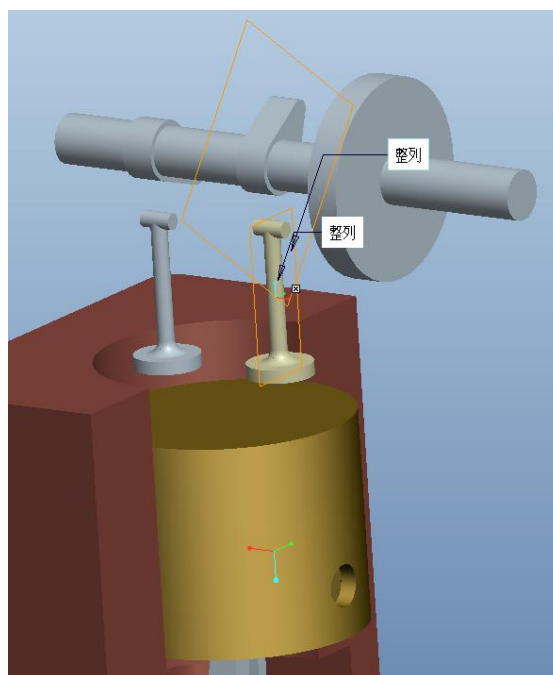




図 25 2 番目のバルブの面一致指定

拘束は「自動」のまま、バルブの中心軸 A_2 とベースブロックの A_11 軸をクリックするとふたつの軸が一致する。「移動」タブでバルブをカムシャフト直下に移動させ、必要に応じて反転ボタンで弁を下側に配置する。次にバルブの RIGHT 面とカムシャフトの DTM3 面をクリックして両者を一致させたら（図 25）画面右上の緑色の「終了」ボタンをクリックする。

5. 機構解析

メニューの「アプリケーション」を選び、「メカニズム」をクリックする。Pro/E のアイコン等はメカニズムシミュレーション用に変更される。

5.1 カム機構の設定

バルブとカムシャフトの間にカム機構を設定する。画面右側の「カム」ボタンをクリックする。「カムフォロワー結合定義」ボックスが表示される。「カム 1」設定タブが選択されていることを確認し、「自動選択」にチェックを入れる。カムの表面をクリックしハイライト状態にする。CNTL キーを押してクリックすると複数の面を選択できるので、カムの摺動面全部を選択する（図 26）。「1 つまたは複数のアイテムを選択してください」と表示された選択ボックスの「OK」ボタンをクリックすると、選択されたカム表面が「カム 1」の面として認識されて図 27 のように表示される。

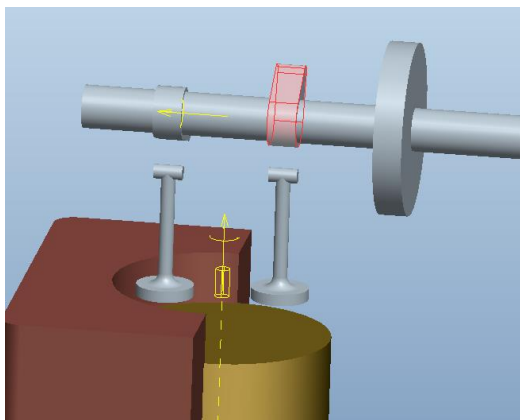


図 26 「カム 1」の選択

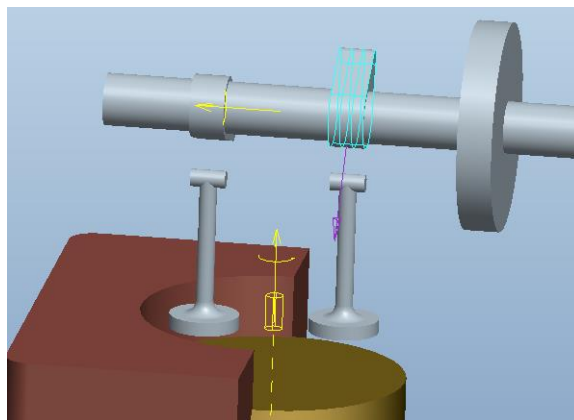


図 27 設定された「カム 1」

続いて「カムフォロワー結合定義」ボックスの「カム 2」をクリックし、「自動選択」にチェックを入れる。バルブ上面の円柱表面をクリックしハイライト状態にした後（図 28）、選択ボックスの「OK」ボタンをクリックすると「カム 2」の面が認識される（図 29）。

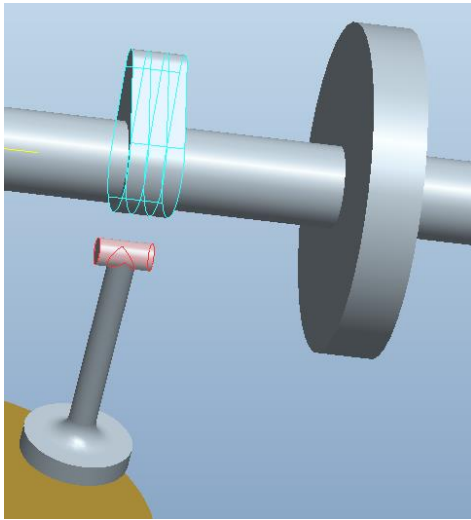


図 28 「カム 2」の選択

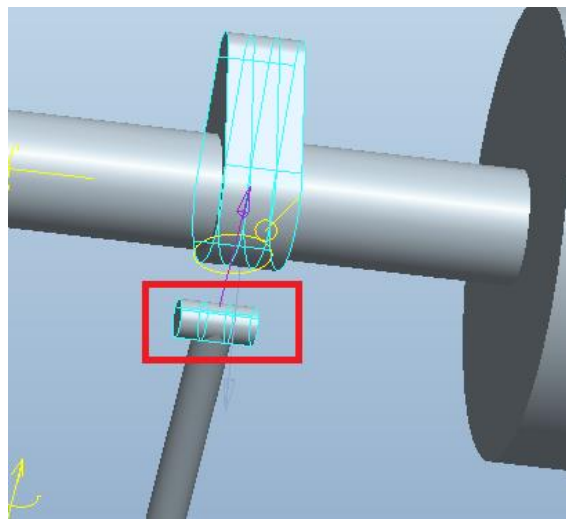



図 29 設定された「カム 2」

「カムフォロワー結合定義」ボックスの「OK」ボタンをクリックすると、一組のカム機構が作成される。


まったく同様の手続きで、もう一組のバルブとカムにもカム機構を設定しよう。


二組のカム機構を作成したら「構成部品をドラッグ」ボタン  をクリックし、組み込んだカム機構が動くことを確認する。



5.2 ベルトの設定

クランクシャフトとカムシャフトをベルトで結合する（現代車の多くは、ベルトに代わり、高精度チェーンを使用する）。

注) 4 サイクルエンジンの仕組みを理解している人は、ここで**構成部品をドラッグ**

グボタン  をクリックして、クランクシャフトとカムシャフトを正しい位置関係に合わせよう。理解していない人はそのまま作業を続け、レポートで正しい位置関係を考察すること。

画面右側の「ベルト」ボタン  をクリックする。画面左上の「参照」タブをクリックした後、はじめにカムシャフトのプーリー表面をクリックする。続けて CNTL キーを押しながらクランクシャフトのプーリー表面をクリックする（図 30）と二つのプーリーの間にはベルトが設置される。ベルトがたすき掛けになった場合は「参照」メニュー内の「反転」ボ

タンを押す。ベルトが設置されたのを確認したら「終了」ボタンをクリックしてベルトの設定を終了する。

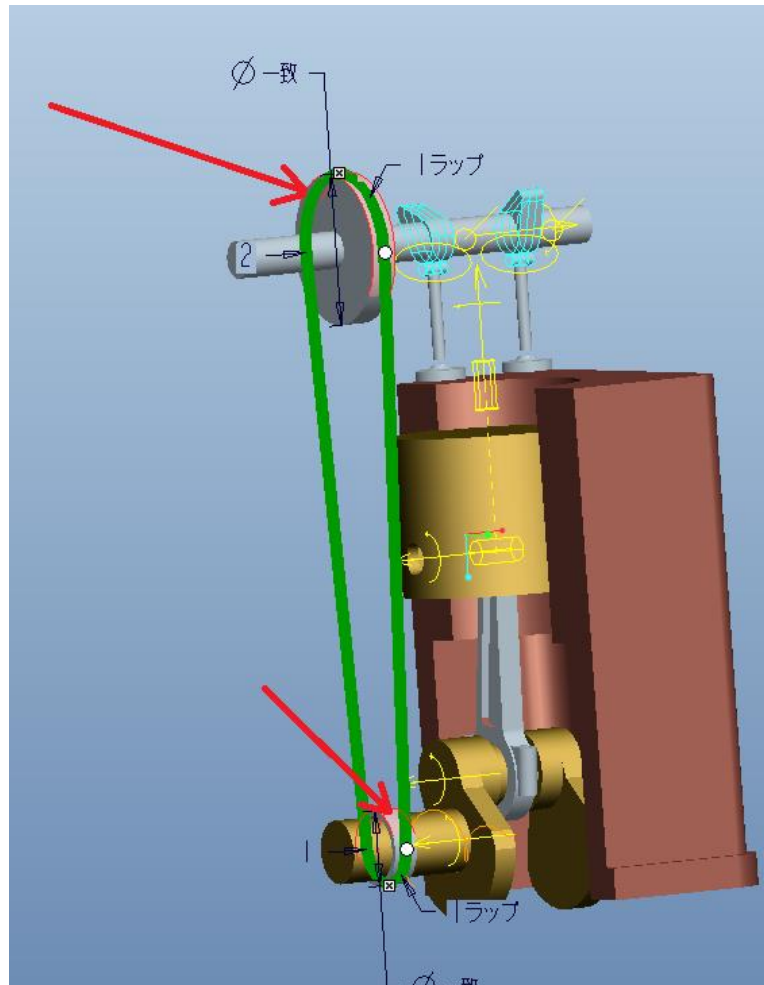





図 30 ベルトのプーリー（赤矢印）指定

5.3 初期位置の設定

「構成部品をドラッグ」ボタンをクリックする。クランクシャフトを回転させピストンがほぼ真上（上死点）にあるように調整する。次にダイアログボックス内の「スナップショット」をクリック（図 31 の①部）するとダイアログボックスが拡張する。に拡張されたダイアログボックスの「拘束」タブをクリックする（図 31 の②部）。現れたアイコンの中より「二つのエンティティを整列」アイコンをクリックする（図 31 の③部）。続けて crank shaft の RIGHT 面と piston の RIGHT 面をクリックする（図 32 の赤で囲まれた平面）。二つの面が一致するように部品が再配置され、ピストンが最上部の位置となる。初

期状態によっては最下部となることがある。これはボタンが押された時の部品の位置関係により、移動が少ない方が選択される。最下部に配置された場合もそのまま作業を続けて良い。

次にカメラのアイコンをクリックすると（図 31 の④部）初期状態としてその位置が記録される。

ダイアログボックスにある「ポイントドラッグ」ボタン  をクリックすると部品を動かすことができる。まず、「平面-平面整列」のチェックをクリックしてチェックを外してからクランクシャフトの適当な点をクリックしてドラッグする点を指定する。そのままマウスをドラッグするとピストンが動くので、ピストンを最上部から少し下ろしてみよう。続けて「スナップショット」タブをクリックした後に snapshot1 という文字をダブルクリックするとピストンは初期位置（最上部）に戻ることがわかる。以上で初期配置の設定と記録が終了したので「閉じる」ボタンを押してダイアログを閉じる。

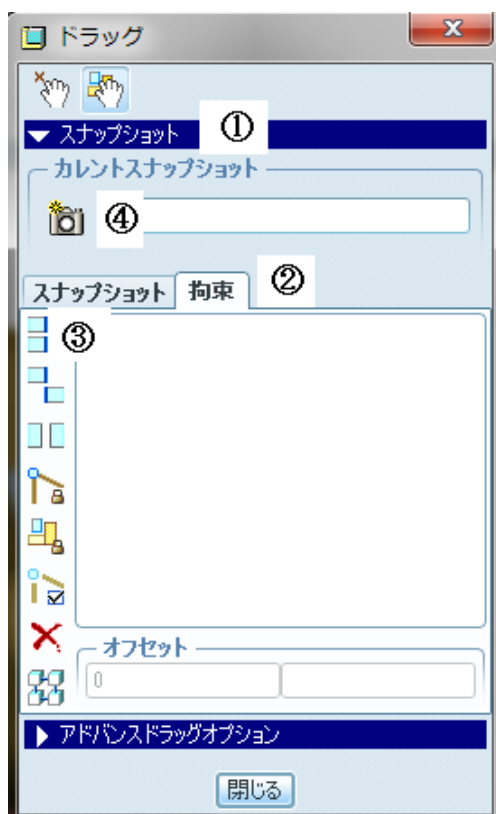


図 31 初期位置の設定

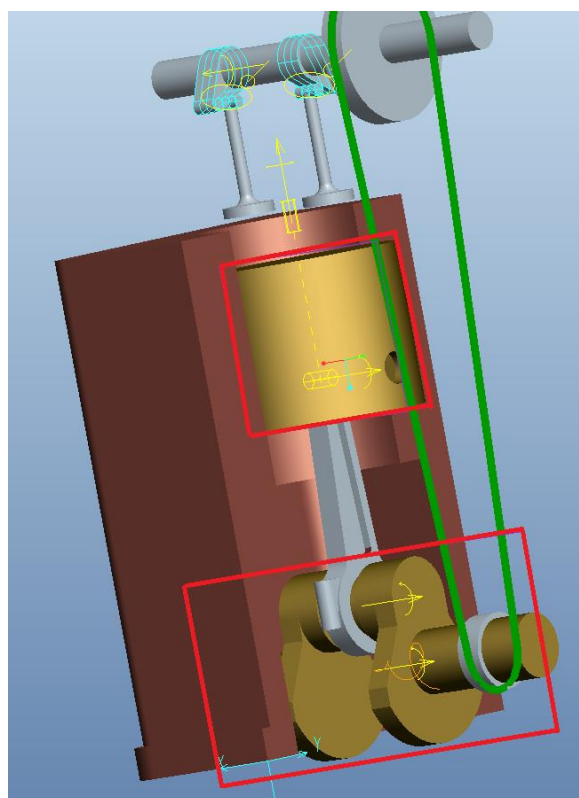



図 32 一致指定された二つの平面

5.4 サーボモータの設定

クランク軸を回すためのサーボモータを設置する。画面右側の「サーボモータ」アイ

コン  をクリックするとモータ設定のためのダイアログボックスが現れる。また、部品にはモータを設置できる機構部が黄色い矢印で示されるのでクランクシャフトの回転軸上にある矢印 (Connecton3axis_1) をクリックする (図 33)。次にダイアログボックスの「プロファイル」タブをクリックする。「仕様」は「速度」、マグニチュードは「一定」を選び A には「360」と入力する。この指定によってモータは一定速度 360 deg/s で回転する。これらの設定ができたら「OK」ボタンを押してダイアログボックスを閉じる。

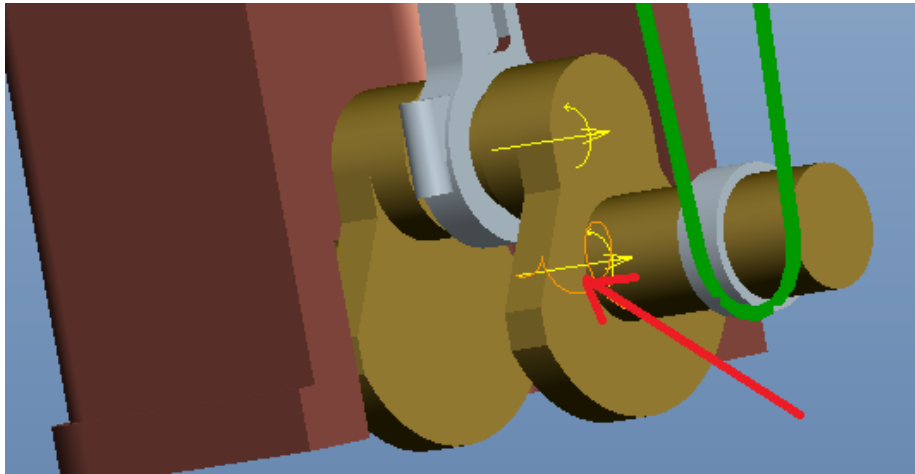



図 33 サーボモーターを設置する軸



5.5 解析の実行


画面右側の「メカニズム解析」アイコン  をクリックするとダイアログボックスが現れる。「タイプ」をデフォルトの「位置」から「ダイナミック」に変更する。「解析時間」は「4」とする(4 秒を指定)。フレーム率は「30」とする(大きい値にするとアニメーション再生が重くなる)。

次に「モーター」タブをクリックし、設定したモーター (デフォルト名 ServoMotor1) が組み込まれていることを確認する。最後に「実行」ボタンを押すと解析が実行されクランク軸が二回転して止まる。

「OK」ボタンをクリックしてダイアログボックスを閉じる。



5.6 動画の再生



「プレイバック」アイコン  をクリックする。ダイアログボックスが現れるので再びダイアログボックスにあるアイコン  をクリックする。

アニメーションダイアログボックスが現れるので「再生」アイコン  をクリックする。速度スライダーを動かすことにより再生速度を調整することができる。また、「イメージ取り込み」ボタンをクリックするとファイルにアニメーションを保存できる。保存ファイル名や解像度、フレームレートも設定できる。

アニメーションを再生したら「閉じる」ボタンを押してダイアログボックスを閉じる。

5.7 グラフの作成

画面右側の「メジャー」アイコンをクリックする。メジャー結果ダイアログボックスが現れるので「新規メジャーの作成」アイコンをクリックする（図 34）。メジャーの定義ダイアログボックスが現れるのでメジャー（グラフにする測定値）にする対象をクリックする。ここではクランクの回転軸（Connection_1.axis_1）をクリックして「ポイントまたは運動軸」ボックスに Connection_1.axis_1 と記入されるのを確認する（図 35）。確認したら「OK」ボタンを押すと再びメジャー結果ダイアログボックスに戻る。

ダイアログボックスの中により。メジャーとして measure1（図 36 ①部）、結果セットとして AnalysisDefinition1（図 36 ②部）をクリックしハイライト状態にする。続いてボックス内左上にあるグラフ化アイコン（図 36 ③部）をクリックすると図 37 のようなグラフが作成される。グラフ内にある「グラフダイアログをフォーマット」アイコンをクリックするとデータの曲線やマーカーの色、大きさ、座標軸のスケール間隔や軸のタイトルなどを編集できるので試してみよう。また、グラフをエクセルのイメージで出力したい場合はグラフの左上にある「ファイル」をクリックし指定に従う。

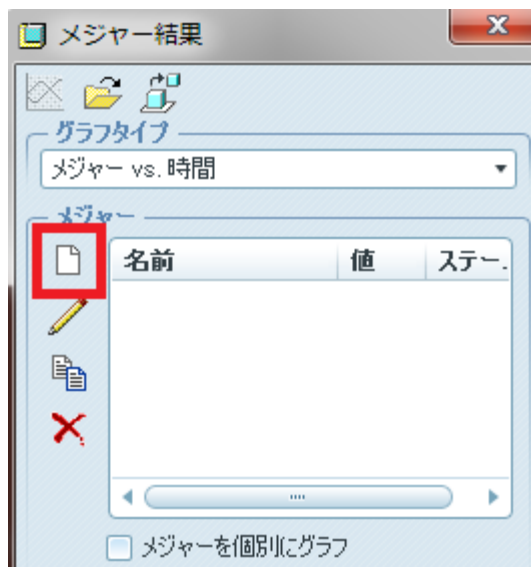


図 34 新規メジャーの作成

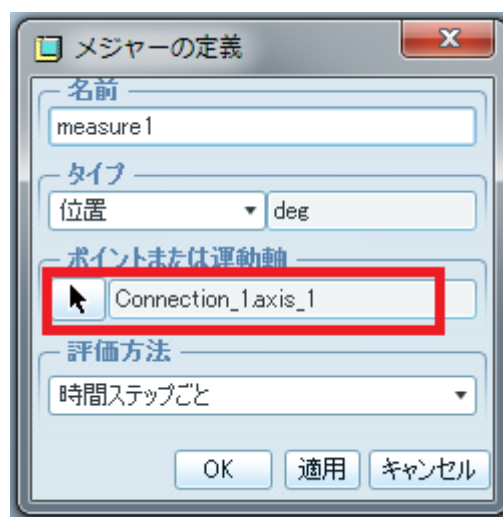


図 35 定義されたメジャーの確認

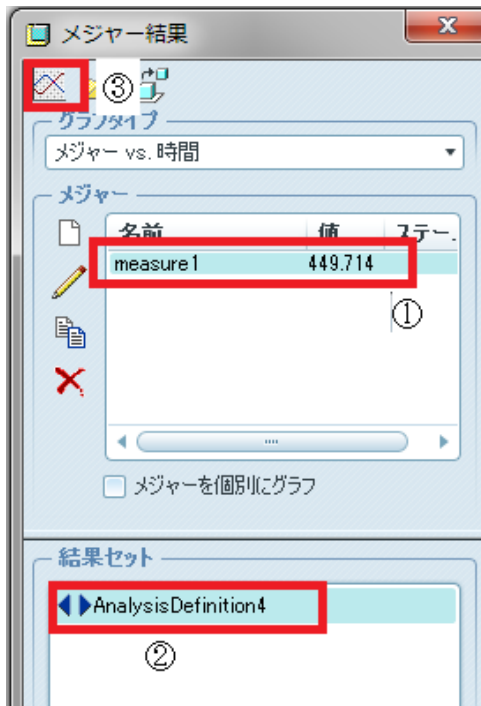


図 36 メジャーと結果セットの指定

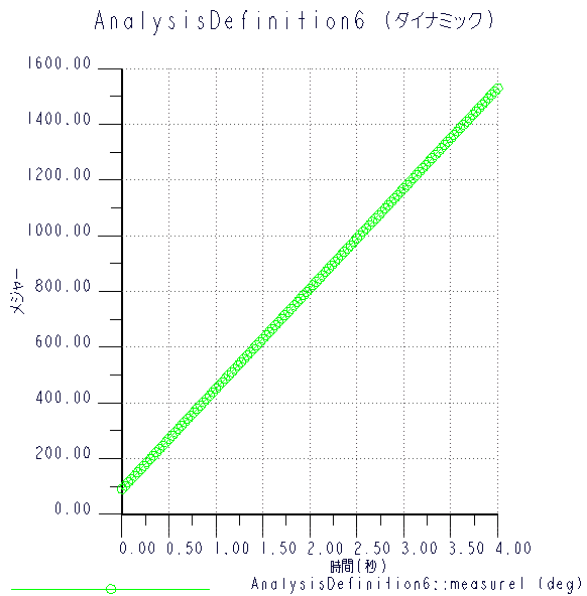




図 37 メジャーと結果セットの指定

5.8 グラフの追加

さらにグラフを追加する。メジャー結果ダイアログボックスで再び「新規メジャーの作成」アイコン  をクリックする (図 34)。次にメジャーとしてピストン頭部中央にある点 (PNT0) をクリックする。タイプは「位置」、座標系は「WCS」(World Coordinate System: 全体座標系の略)、コンポーネントは「マグニチュード」、評価方法は「時間ステップごと」を選び「OK」ボタンをクリックする (図 38)。図 24 のメジャー結果ダイアログボックスに戻るので、メジャーとして新たに追加した「measure2」、結果セットは「Analysis Definition 1」を選択してハイライト状態にした後、ボックス内左上にあるグラフ化アイコン  をクリックすると新たなグラフが作成される (図 39)。

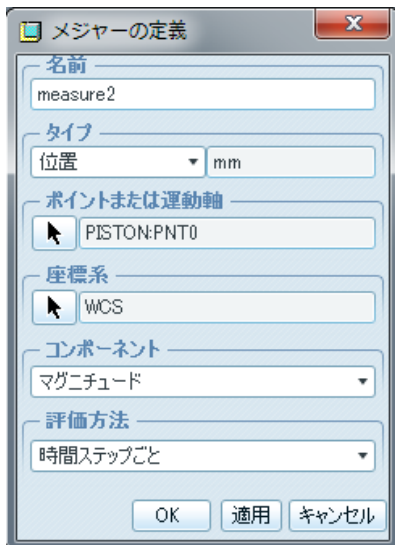


図 38 メジャーの追加

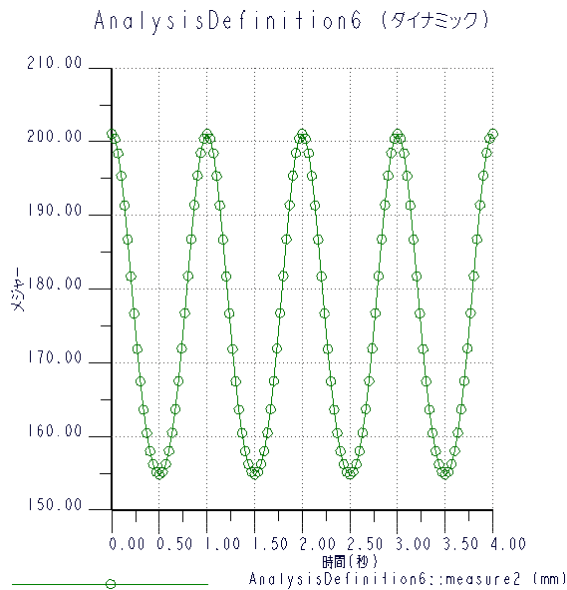


図 39 追加されたグラフ

6. 事前報告書

6-1. 身近な機構として以下のメカニズムからひとつを取り上げ、図などを用いてその機構を分かり易く解説しなさい。

- a) 水道栓（ひねると水が出たり止まったりする機構）
- b) 3色ボールペンのペン色を切り替える機構
- c) 自転車のペダルが正回転時には駆動力を伝え、反対回転では空回りする機構
- d) その他のあなたが興味を持った身近な機構

7. 本報告書

以下の事項を本報告書には書くこと

- 1) ピストン上の点 PNT0 の z 方向の速度と時間の関係をグラフにしなさい。また、z-方向の位置と時間の関係も同一のグラフ上にマークや線の種類を変えて描きなさい（マニュアルにはないので試行すること）。作成した同一グラフはレポートに添付すること。
- 2) 1) で作成したグラフの妥当性について考察しなさい。
- 3) クランク軸のピストンと反対側の一部が大きくなっているのはなぜか説明しなさい（「不均等羽根つきモーターの回転」で経験した振動と関係あり）。
- 4) 4 サイクルエンジンの仕組みを調べて記述しなさい。
- 5) このモデルが 4 サイクルエンジンであるとする、カムシャフトが 1 回転する間にクランクシャフトは何回転するか考えなさい。これより九ランシャフト側プーリーとカムシャフト側プーリーの直径比はいくつになるべきか。
- 6) ピストンが上死点にあるとき吸気側および排気側バルブのカムはどの位置にあるのが正しいか。図示して理由も示しなさい。