

「おもしろ機構」 工作室Ⅳ

－サイクロイド系歯車装置の製作－

岐阜職業訓練支援センター 幾瀬 康史

1. はじめに

訓練大学校（現職業能力開発総合大学校）の機械実習場には、前回（Ⅲ報）で紹介した少数歯インボリュートはすば歯車装置のほかにも学生によって製作されたおもしろい機構が数多く展示されていた。その中でも動きや形状がおもしろく興味を持ったものの1つにサイクロ減速機がある。サイクロ減速機は、約30年前に同大学校の故佐藤晃平先生（機械科助教授）らによって実施されていた機械科3年次の応用実習の課題（歯車減速機的设计製作）で作られ、その後佐藤晃平先生の卒業制作でも作られていた。その減速機の内部に使用されているサイクロイド歯車の製作には、実習場に導入されていた初期のNCフライス盤を駆使されたとのこと。そのNC工作機は、径補正機能を持たないため、非常にNCプログラムに苦労されたことが推測される。サイクロ減速機は、サイクロイド歯車とピン歯車および偏心軸の回転を伝達する平行クランク機構から構成される。遊星歯車の装置と同様な動きをするため、当時大変ふしぎに感じ興味深かった。私自身も平成19年に専門課程の総合製作実習の課題として取り組み、学生と共にものづくりの楽しさを体験した。

歯車は機械を構成する重要な機械要素であることから、職業訓練関係の機械系の応用訓練課題にも歯車を取り入れた装置が多く取り上げられ、歯車の設計や加工について学習が行われている。歯車としては、インボリュート歯車とサイクロイド歯車は代表

的なものである。インボリュート歯車は、ホブ盤やギヤシューパで簡単に製作できることから、多くの訓練課題として取り上げられてきた。代表的な訓練課題として、油圧ポンプ、減速機、巻き上げ式ウインチなどがあげられる。一方、サイクロイド歯車は、時計などの精密機械や高粘度の歯車ポンプに使用されるが、軸間距離が厳しく、形状加工にはNC加工機が使用されるため、あまり訓練課題としては、採用がされてこなかった。しかし、サイクロイド歯車を使用した装置は、機構的にも非常におもしろいものが多く受講生や専門課程の学生にもものづくりの興味を持たせ、訓練の動機づけに良い教材になると思われる。また、CAD/CAMの進歩によりサイクロイド歯車は簡単に制作できるようになってきている。

そこで、サイクロイド歯車を用いた装置のおもしろさを知ってもらうため、サイクロイド系内接式歯車ポンプとサイクロ減速機の製作事例について紹介する。

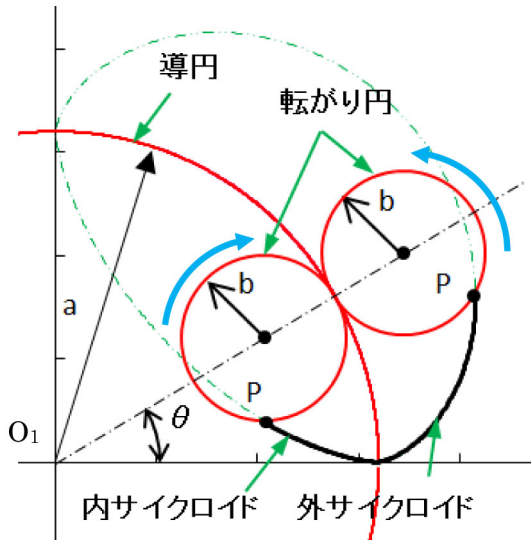
2. サイクロイド歯車

2.1 サイクロイド曲線

サイクロイド歯車の歯形は、外サイクロイドと内サイクロイドで構成される。図1のように、 O_1 を中心とする半径 a の円1（導円）上を半径 b の円2が外側を転がるとき、転がり円上の点 P が描く曲線を外サイクロイドと呼び、内側を転がるとき、描く曲線を内サイクロイドと呼ばれる。両サイクロイド

は次式で示される。

$$\begin{aligned} x &= (a \pm b) \cos \theta \mp b \cdot \cos \left(\frac{a \pm b}{b} \theta \right) \\ y &= (a \pm b) \sin \theta \pm b \cdot \sin \left(\frac{a \pm b}{b} \theta \right) \end{aligned} \quad (1)$$



a: 導円半径 b: 転がり円半径

図1 サイクロイド曲線

サイクロイド歯車の歯形曲線には、一般的に図2のように内サイクロイドと外サイクロイド曲線の一部を用いて歯形が形成され、転がり円は両曲線共に同じ半径の円が用いられる。図3に転がり円を変化させた場合の歯形形状を示す。転がり円の大きさによって歯形曲線は大きく異なることがわかる。転がり円の半径が大きくなると、歯元の歯幅は狭くなり、歯先はとがってくる。機械の歯車としてよく用いられるインボリュート曲線の歯形はこの転がり円を無限大にして描いた外サイクロイド曲線である。つまり、インボリュート歯車は、サイクロイド歯車の1つと見なせ、導円がインボリュート曲線の基礎円となる。

また、チェーンやピン歯車と噛み合うスプロケットの歯形は、外サイクロイド曲線のみで構成されるサイクロイド歯車の1つである。ただし、実際には、ピン歯車のピンの半径をオフセットした形状となる。特異なおもしろい例として、図3の図中を見ると転がり円の半径を導円半径Rの0.5Rとして、内

サイクロイド曲線を描くと、導円の中心を通る直線となるのがわかる。つまり、外サイクロイドの転がり円の半径を0、内サイクロイドの転がり円の半径を導円の0.5Rとして歯車を作ると、図4のように放射状の直線の歯車となり、直線のみで構成される歯数8枚の歯車となる。この歯車を噛み合わせて、そのとき、成法できる形状を求めると、図4のように外サイクロイド曲線のみで構成されるサイクロイド歯車となる。ただし、この場合、ピンの半径は0であることから、実際歯形は、ピン半径分オフセットした形状となる。

以上のようにサイクロイド曲線は、インボリュート歯車、スプロケットの母なる曲線ともいえる。

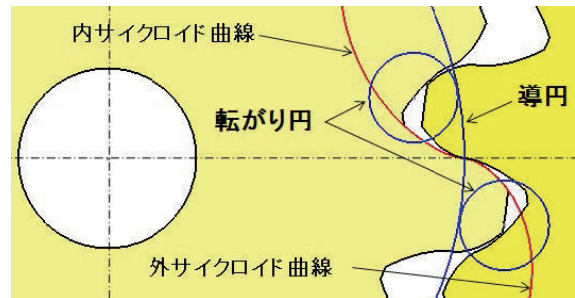


図2 サイクロイド歯形

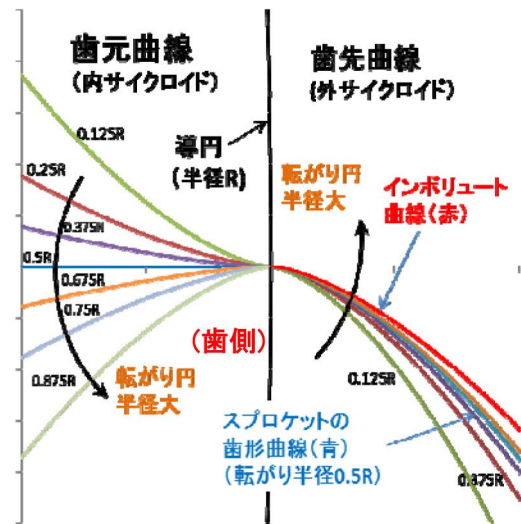


図3 サイクロイド歯形と転がり円

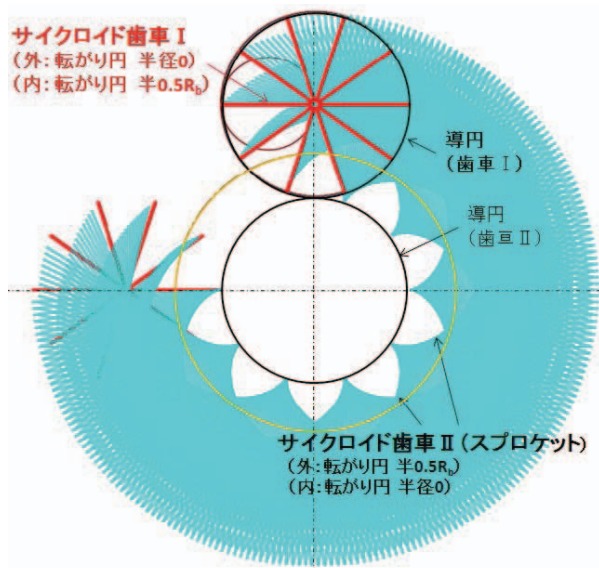


図4 スプロケットの歯形

2.2 サイクロイド歯車の製作

ここではサイクロイド歯車の製作は、(1)式からサイクロイド曲線の数値データを求め、そのデータからNCプログラムを作成し、NC加工機で試作している。具体的には、表計算ソフトを用いてサイクロイド曲線の数値データ群を計算し、そのデータ群を3次元CAD/CAMにスプライン曲線として取り込み、CAD上で歯車を製作して、CAMでNCデータを作成し、NCワイヤー放電加工機やマシニングセンタで加工している。表計算データのCADへの取り込みは、CADメーカーによって用意されているソフトにて行っている。

3. サイクロイド系の内接式歯車ポンプ製作

一般に歯数が1枚差の内歯車と外歯車の噛み合わせることはできないが、図5に示すように転がり円の1サイクルのサイクロイド曲線を歯形として用いると、1枚差の内歯車と外歯車を噛み合わせることができる。図は内歯車5枚と外歯車4枚を噛み合わせた場合を示す。歯車と外歯車の偏心量 δ は、サイクロイド曲線の転がり円の直径に相当する。図5の歯車を用いて歯車ポンプを製作してもポンプとして使用できるが、一般的には、図6のように歯形を改善したトロコイドの歯形が用いられる。内トロコイ

ド曲線は図のように内サイクロイド曲線のみを用いて作った曲線を外側にオフセットして求められる曲線を歯形として用いている。歯元の幅が大きくなり強度的に優れている。図7はトロコイド曲線を用いてポンプを描いたものを示す。この曲線をもとに実

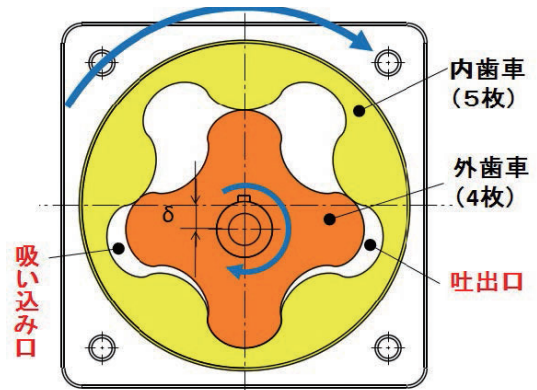


図5 サイクロイドポンプ

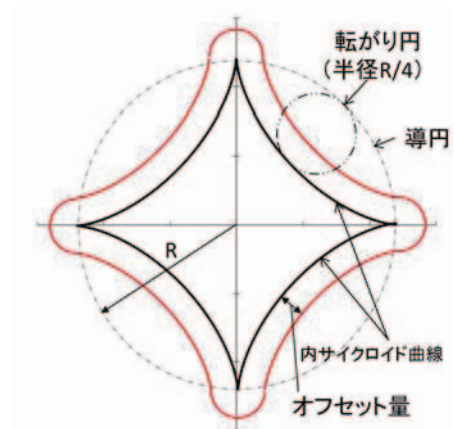


図6 トロコイド曲線

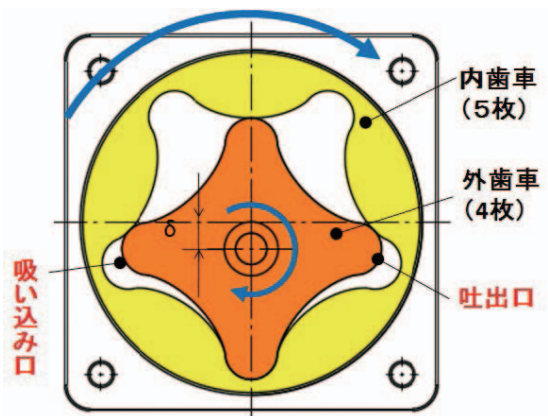


図7 トロコイドポンプ

際に回転ができるかどうか検証するためにワイヤー放電加工機で製作したものを図8に示す。滑らかに回転できること確認した。

さらに図9に実際にサイクロイドポンプを製作した事例を示す。内歯車の歯数15枚、外歯車の歯数14枚、転がり円の半径5mm。したがって偏心量は10mm。サイクロイド歯車の製作は、表計算ソフトとCAD/CAMを用いて、NCプログラムを作成し、NCワイヤー放電加工機により加工している。



図8 トロコイド歯車
(資料：京都職業訓練支援センターの飯塚真次氏提供)

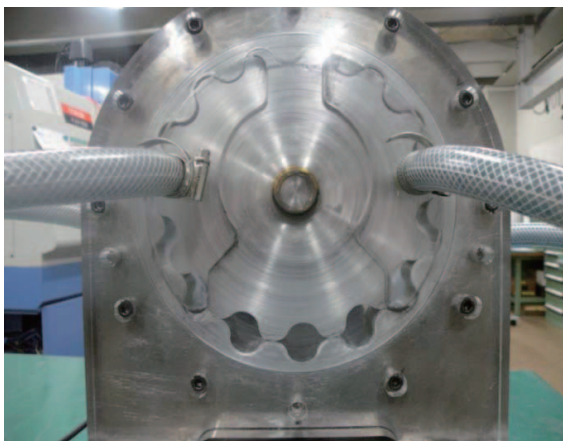


図9 サイクロイドポンプの製作事例
(資料：京都職業訓練支援センターの飯塚真次氏提供)

このポンプは、教材として使えるようにポンプのハウジングカバーをアクリルで製作し、歯車の動きと流体の流れが観察できるようにしている。そのため、カバーは撓みやすいので、ポンプとして機能させるためには、ハウジングのシールドが重要でシール用のパッキンと締め付けボルトの本数が重要となる。

4. サイクロイド減速機の製作

4.1 サイクロ減速機の原理

サイクロ減速機は、遊星歯車減速機と同様な動きをすることから、はじめに図10に内歯車を用いた遊星歯車減速機の原理図を示す。図のように内歯車(歯数 Z_1 枚)は固定され、腕を回転すると遊星歯車(歯数 Z_2 枚)が回転しながら内歯車と噛み合いながら転がる構造である。遊星歯車の回転数と腕の回転数の関係をのり付け法で求めると、表1のように求められる。表から腕の回転数を N_1 rpm、遊星歯車の回転数 N_2 rpmとすると、次式で関係が示される。

$$N_2 = \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2}\right) N_1 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2}\right) N_1 \quad (2)$$

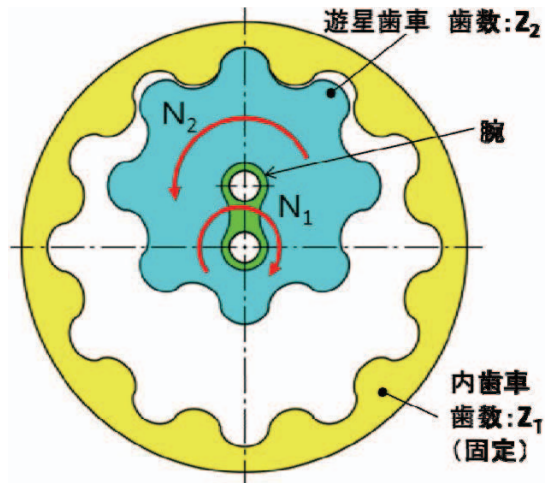


図10 遊星歯車の原理

表1 遊星歯車の回転数の算出 (のり付け法)

	太陽歯車 (歯数 Z_1)	腕	遊星歯車 (歯数 Z_2)
全体固定	N_1	N_1	N_1
腕固定	$-N_1$	0	$-N_1 \times \frac{Z_1}{Z_2}$
合成回転数	0(固定)	N_1	$(1 - \frac{Z_1}{Z_2}) N_1$

(2)式から内歯車の歯数 Z_1 と遊星歯車の歯数 Z_2 との歯数差を小さくし、遊星歯車の歯数 Z_2 を多くすることで大きな減速比を得ることができる。サイクロイド歯車では、歯車ポンプと同様に歯数差1枚内歯車と外歯車を噛み合わせることができる。さらに

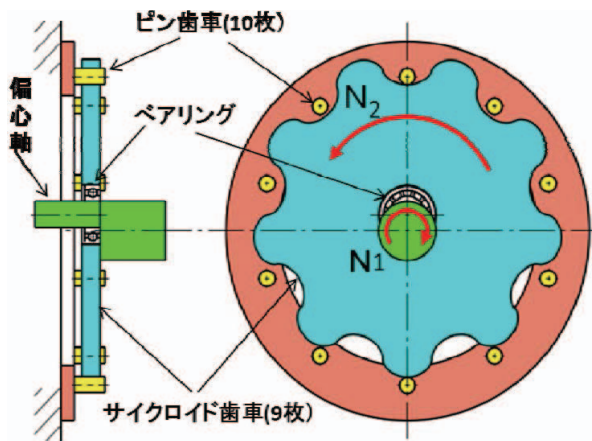


図11 遊星歯車機構
(ピン歯車とサイクロイド歯車)

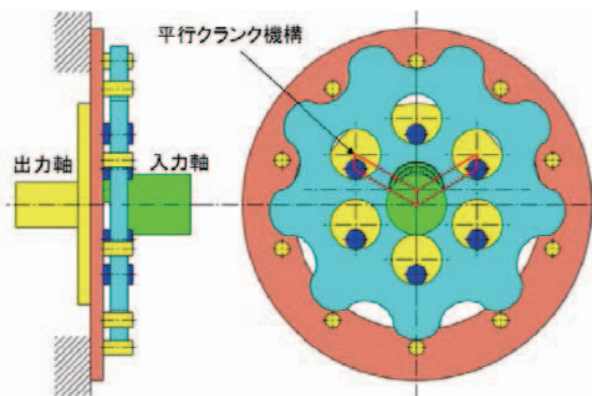


図12 平行クランク機構

図11のようにサイクロ減速機用いられているピン歯車とサイクロイド歯車でも噛み合わせることができる。図はピン歯車(歯数10枚)とサイクロイド歯車(歯数9枚)を組み合わせて減速比は9となる。この機構では腕の代わりに偏心軸とベアリングを組み合わせて内歯車内を遊星歯車が転がるようにしている。この機構から実際に大きな減速比を得るためには、軸の周りを回転しながら移動する遊星歯車の回転数 N_2 を出力軸としなければならない。つまり、軸心が平行に食い違っている軸に回転を伝える機構が必要となる。そのため、サイクロ減速機では、平行クランク機構を用いて、遊星歯車回転数を出力している。平行クランク機構を図12に示す。平行クランク機構としては、平行四辺形の形成するリンク機構が一般的であるが、ここでは、円形上に配置された穴とピンで構成し、サイクロイド歯車の回転を出力軸に伝えている。

4.2 サイクロ減速機的设计・製作

図13に製作したサイクロ減速機の組立図、図14の分解図および図15に内部の写真を示す。設計仕様は、減速比は20、転がり円直径3mmである。したがって、設計仕様から遊星サイクロイド歯車の歯数は20枚、導円直径120mm、ピン歯車の歯数は21枚、ピン径3mmピッチ円126mmと計算される。設計に

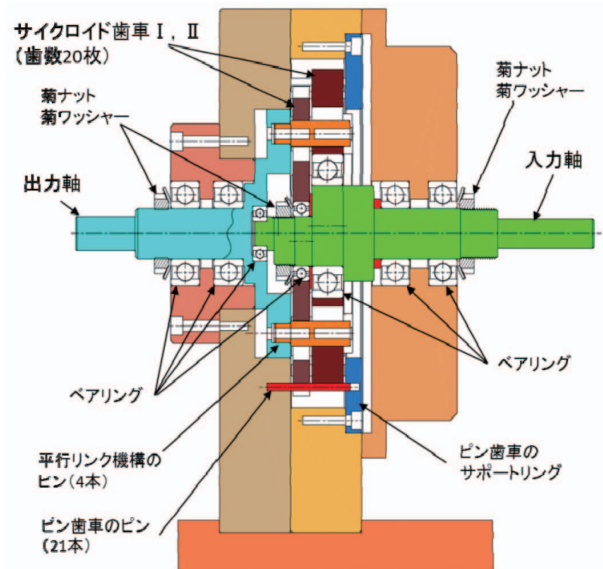


図13 サイクロ減速機の組立図

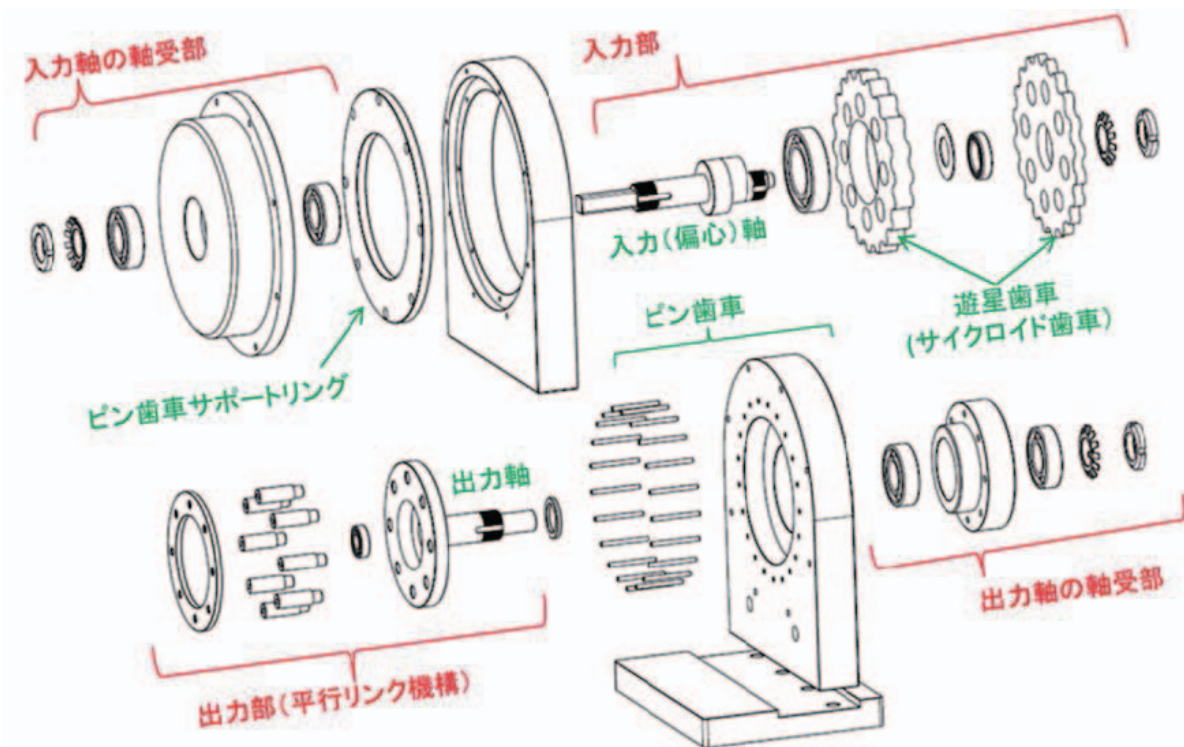


図14 サイクロ減速機の分解図

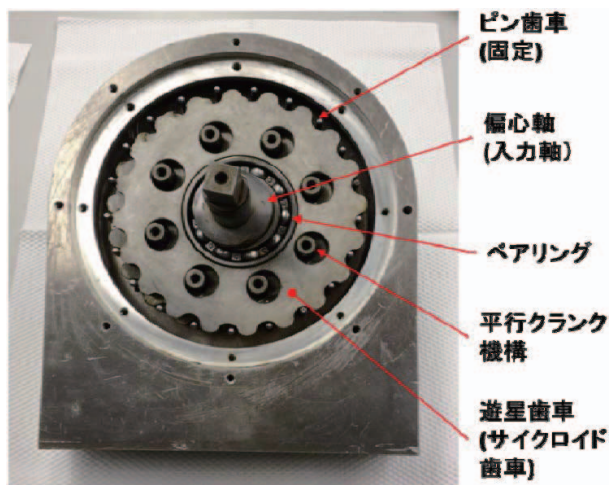


図15 サイクロ減速機の内部

軸の撓みを抑えるようにする。

- ③ ピン歯車のピン，平行クランク機構のピンが両端支持構造になるような構造としている（図17参照）。



図16 入力軸



図17 出力軸

当たっては、次の点について配慮している。

- ① 2枚のサイクロイド歯車を対称（位相差180度）に配置し、できるだけトルクだけが発生し、軸に曲げ力が働かないようにする（図16参照）。
- ② 入力軸と出力軸は共に片持ち構造となるため、両軸を同一軸上に配置し、ベアリングをかえて連結し相互に補強する構造にする。また入出力軸をおのおの2個のベアリングで支える構造として

5. おわりに

サイクロイド歯車系の歯車ポンプの製作事例としてサイクロドポンプの製作事例のみを紹介したが、トロコイドポンプについても実際に製作し、動くことを確かめている。ポンプの歯車はCAD/CAMを用いて製作すると簡単にできることから、NCワイ

ヤー放電加工機などの訓練課題として利用していた
だきたいと思う。またCAD空間で創成法による加工
が容易にできることから、ロータリー形などいろ
いろなおもしろい歯形の歯車ポンプも可能となるの
でぜひ挑戦をしてはいかがかと思う。

サイクロ減速機は、機構学におもしろいだけで
なく、旋盤、フライス盤、NC工作機械など機械加
工の要素作業も多く含んでいるので、総合製作の課
題として取り組まれることを期待する。

最後に、ポンプの製作の指導と資料を提供してい
ただいた京都職業訓練支援センターの飯塚真次先
生、ならびに歯車ポンプとサイクロ減速機の製作に
協力を頂いた職業能力開発総合大学校生産技術科の
卒業生の石岡君と岩間君に厚く御礼申し上げます。