

第6章 駆動ガイド設計の一般化

6.1 緒言

第4章においてクローラ型移動機構の円盤を壁面と平行にし、試作機によって動作を確認した、第5章において螺旋階段に対応するため円盤を傾斜させた。第4、5章で述べてきた方式によって、軌道が数式で表現されていればどのような3次元軌道の駆動ガイドの設計も原理的には可能である。幾何学的にはジェットコースターのような軌道の設計も可能であるが、本機構は高速を必要としない移動機構への適用を考えているので、ここでは建造物への設置を意識して議論を進める。本章ではこれまでの議論で考慮してこなかった螺旋角¹が小さくなった場合について解析する。数学では螺旋角が正しい用語であるが、接線と水平線との角度（90度－螺旋角）をもって階段の傾斜を表したほうが直感的に理解しやすいので、今後は螺旋角のかわりに傾斜角を用いる。すなわち螺旋角が小さいとは傾斜角が大きいことである。

傾斜角が大きくなると、常螺旋の斜線（走行ガイドに相当）の長さは急速に長くなり、直線階段対応駆動ガイドの設計で見たようにサイクロイド曲線（滑り係数 $k_1=1$ ）がトロコイド曲線（滑り係数 $k_1 \neq 1$ ）になり、駆動ガイドの干渉、ローラ軸にかかる力が大きくなるなどの問題が発生する。それら为了避免するためには螺旋部においても斜線長さを考慮して駆動ガイドの数を決めなければならない。駆動ガイドを設計するとき斜線長さを考慮することを今後斜線考慮と一般名詞を使用する。

本章では、傾斜角が大きくなったときの螺旋部の駆動ガイド構成に関して、円盤傾斜角、斜線考慮に重点を置いて考察する。

6.2節では駆動ガイド設計に影響を及ぼすパラメータの説明を行い、平行円盤と傾斜円盤の選択は製造コストを含めた総合的観点から決定されるべきことを述べる。6.3節では斜線考慮した駆動ガイド間の距離に関して述べる。すなわち、隣り合う駆動ガイドの終端と先端間の距離が階段傾斜角が大きくなるにつれて負になるのを防ぐため斜線考慮する。6.4節では、斜線考慮したときの円盤と駆動ガイドの接近距離に関して述べる。5章では円盤を傾斜させて対応したが、斜線考慮によって平行円盤で

¹ 円柱上の螺旋の接線とその円柱の母線とのなす角。螺旋のピッチが大きくなるとこの角度は小さくなる。

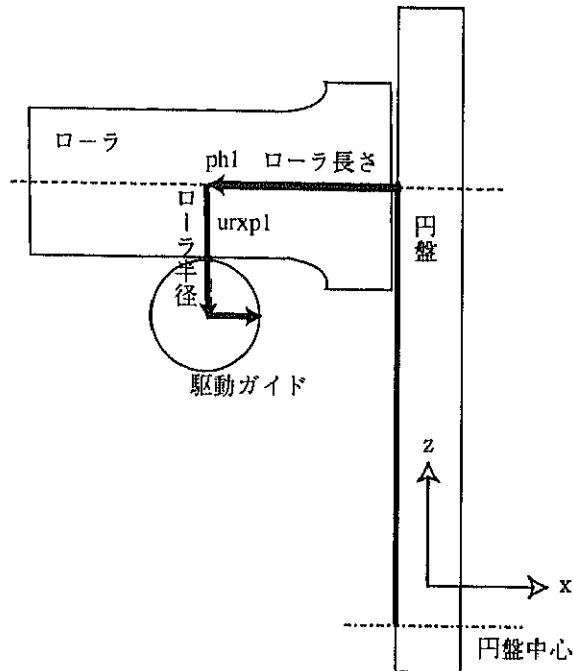


図 6.1 円盤とローラに関するパラメータの定義

も対応可能となる。6.5 節ではローラ軸圧力角について述べる。ローラ軸にかかる力はローラ軸圧力角余弦の逆数に比例するため、ローラ軸圧力角は小さいほうがローラ軸にかかる力が小さく安全である。ローラ軸圧力角は斜線考慮なくして小さくならない。6.6 節では駆動ガイドの曲率変化が斜線考慮しても改善が困難であることを述べる。しかし、実用化、普及を考慮すると駆動ガイドはパイプ以外で製作したほうがよい。パイプ以外では小さな曲率半径は問題を発生しないからである。

6.2 平行円盤方式と傾斜円盤方式

日本における建築物の階段の傾斜角は、30 度近辺と 45 度近辺の 2 種類に大別される。駅など公共性の高い建築物の階段は高齢者等の安全性を考慮して 30 度前後である。折返し階段の折返し部においても面積に余裕があるために 30 度は維持されている。第 5 章で示した螺旋階段対応階段昇降機において螺旋部の傾斜角は 30 度であり、公共建築物に適したものであった。

一方、個人住宅においては安全性よりも経済性が優先されるために階段傾斜角は 45 度前後である。建築面積を有効に利用するために多くの階段は折返し方式となっており、また折返し部の面積が狭いために階段内側を走行する場合、曲線部の半径が小さくなり、その結果傾斜角度は 70 度にもなる。この角度になると駆動ガイド設計

において斜線考慮しなければならない。

第5章の始めに述べたように、駆動ガイドを設計する基準は、①移動が物理的に妨げられないこと、②ローラ軸圧力角が小さいこと、③駆動ガイドが容易に製作できること、である。評価パラメータは、階段傾斜角、円盤傾斜角、ローラ数、半径比、ローラ長さ、ローラ半径、である。パラメータの一部を図6.1に図示する。駆動ガイドはこれまでパイプで構成してきたため、解析を容易にするためローラ半径はローラ中心からパイプ中心までで代表している。そのため、6.4節で述べる円盤と駆動ガイドの最接近距離はパイプの表面のうち円盤にもっとも近づいた点を求めている。ローラに接する駆動ガイドの断面形状は円であるが、円の上部の接する位置だけが重要であり、それ以外の形状は移動を妨げないのであればどのような形状でも構わない。しかし、議論を簡単にするため駆動ガイドはパイプとし、半径は円盤半径の0.11倍の市販されているものを利用することにする。

駆動ガイドの形状は、この評価パラメータの非線形関数となっている。駆動ガイド形状にもっと大きな影響を与えるパラメータは円盤傾斜角である。駆動ガイドの形状は螺旋部においては平面では構成できないが、直線部において円盤傾斜角を0度にとすると2次元平面で構成できた。2次元平面は製造上容易であり、システム全体の実用性にもっとも影響を与えるので、クローラ型移動機構においては円盤傾斜角はできるだけ0度にしたい。ここでは斜線考慮することによって、階段傾斜角の大きな螺旋部では円盤傾斜角を0度にできることを示す。しかし、駆動ガイドの安価な製造方法が今後開発されれば、傾斜円盤方式でもよい。適用場所によってその都度平行円盤方式と傾斜円盤方式のどちらが最適か、コストまで含めて総合的に考慮すればよいことである。

6.3 駆動ガイド間隔に関する考察

直線軌道用駆動ガイド上を昇降するには、図4.13で示したように正の歯先厚さが必要であった。駆動ガイドが平板では構成できない一般軌道においても、駆動ガイドの終端と進行方向の駆動ガイドの先端との間には間隔が必要である。駆動ガイドの終端が進行方向の駆動ガイドの先端の手前にある状態では、ローラは前進を邪魔されないので駆動ガイド間隔は正と定義する。逆に交差した状態、すなわちローラが駆動ガイドの終端に達する前に次の駆動ガイドが前進を邪魔する状態の駆動ガイド間隔は負とする。

図6.2の上段、中段、下段の各図は、ローラ個数をパラメータとし、螺旋部の円

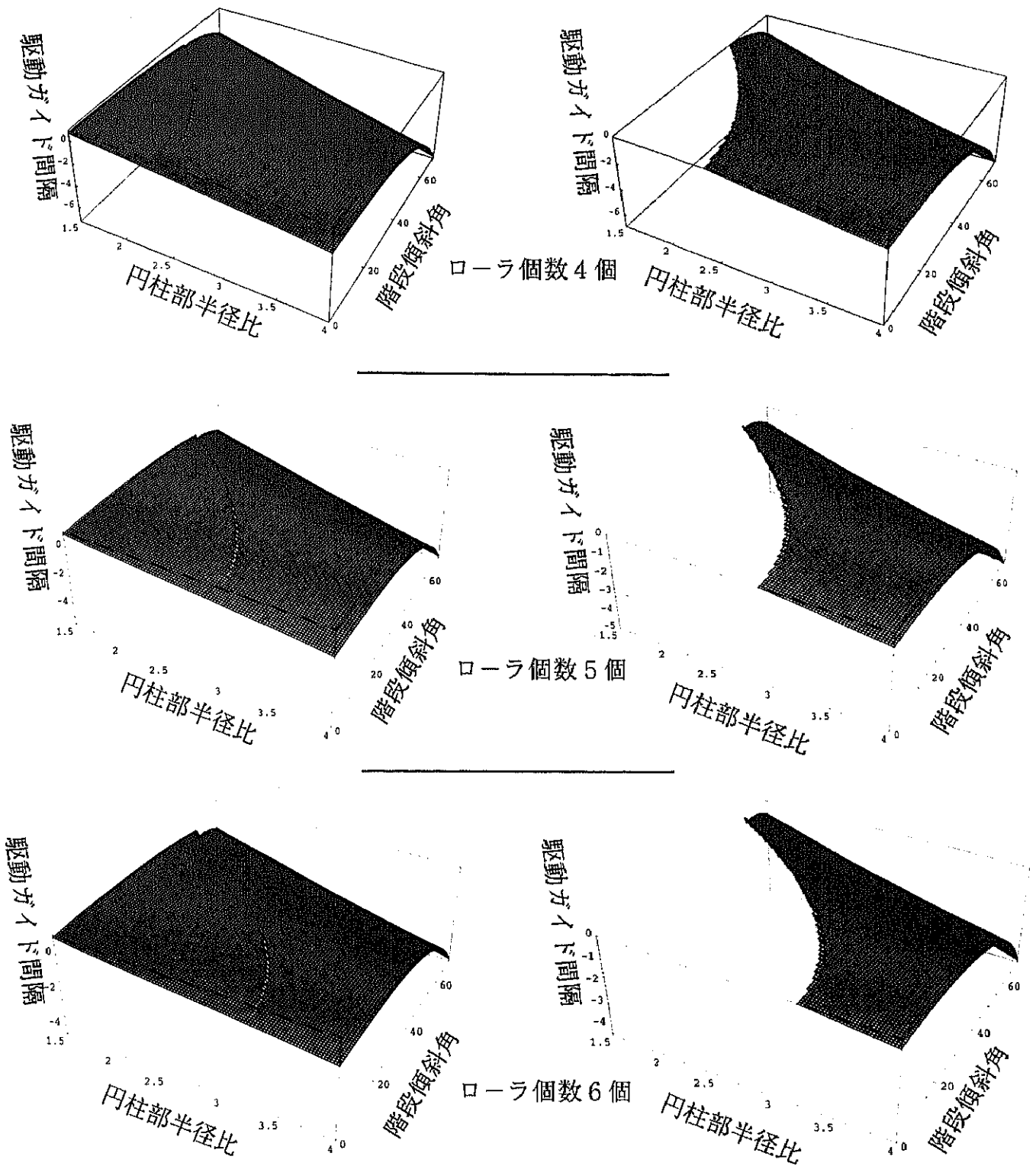


図6.2 斜線考慮なしの場合のローラ個数4, 5, 6個に対応した駆動ガイド間隔
(縦軸は回転円盤半径で単位化されている)

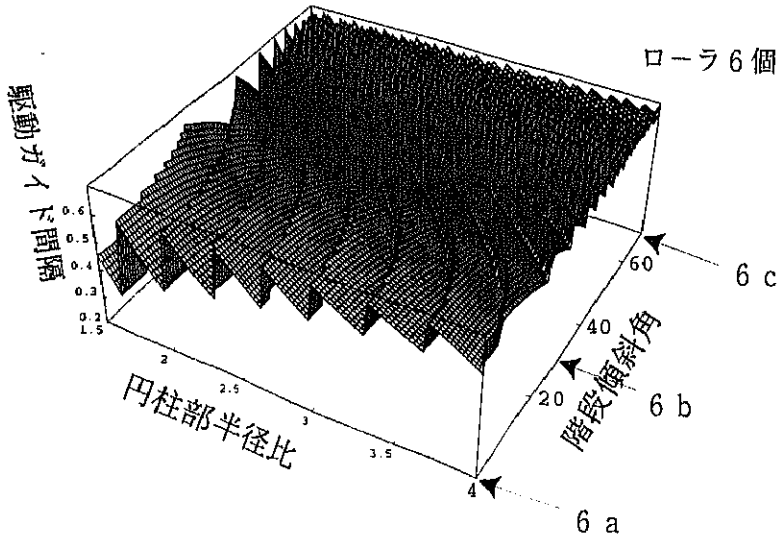
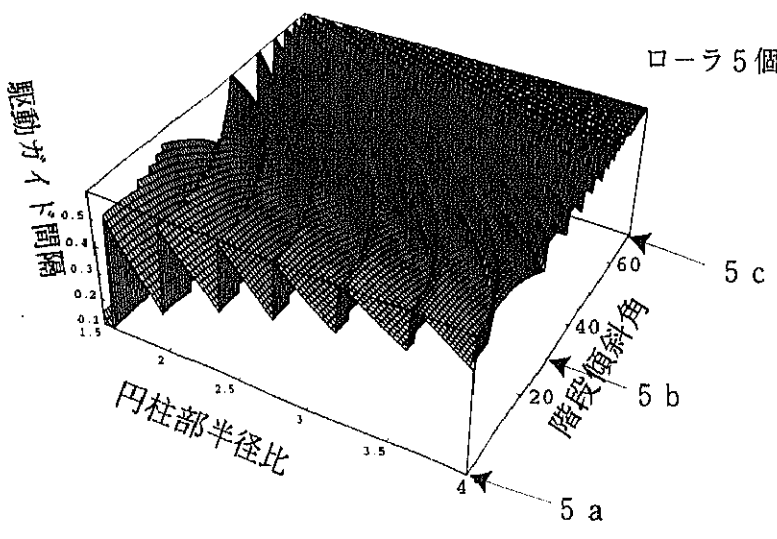
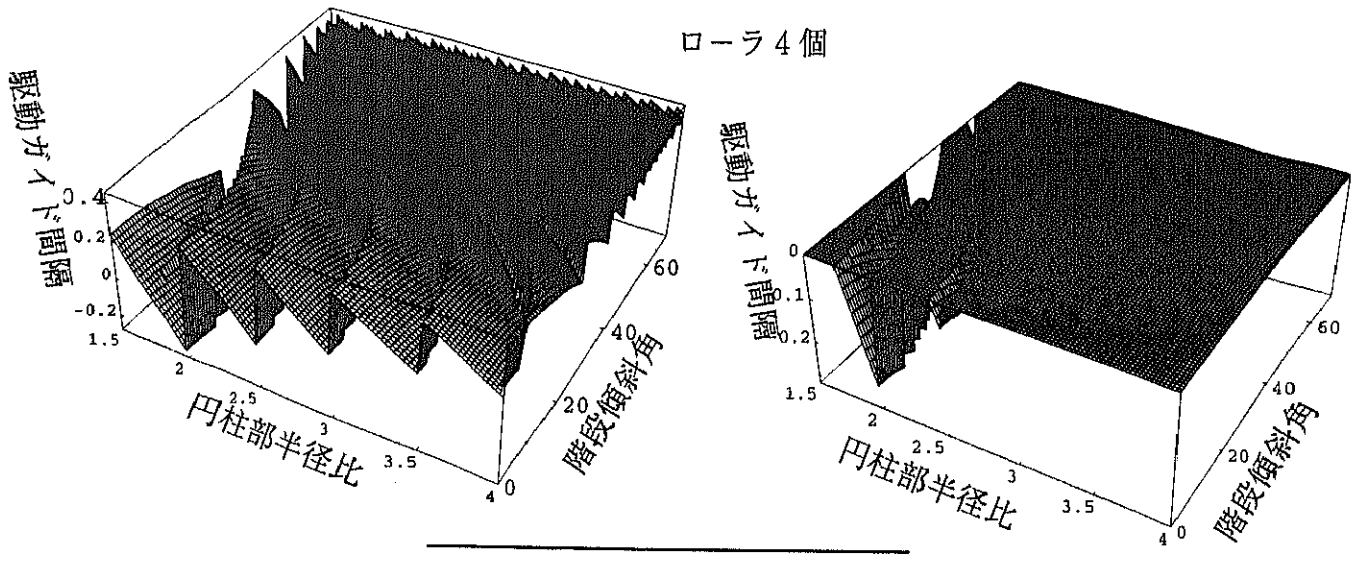


図6.3 斜線考慮した場合のローラ個数4, 5, 6個に対応した駆動ガイド間隔 (縦軸は回転円盤半径で単位化されている)

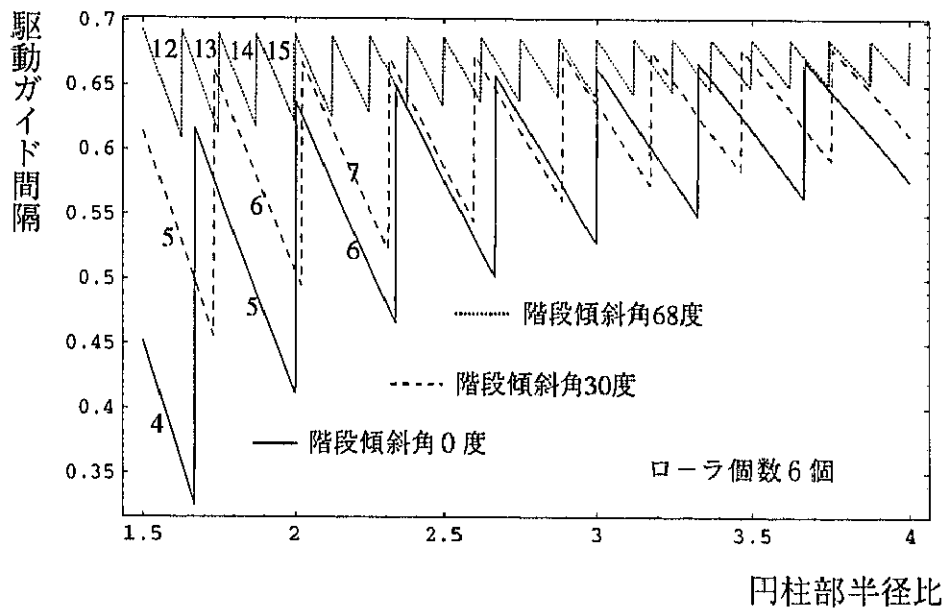
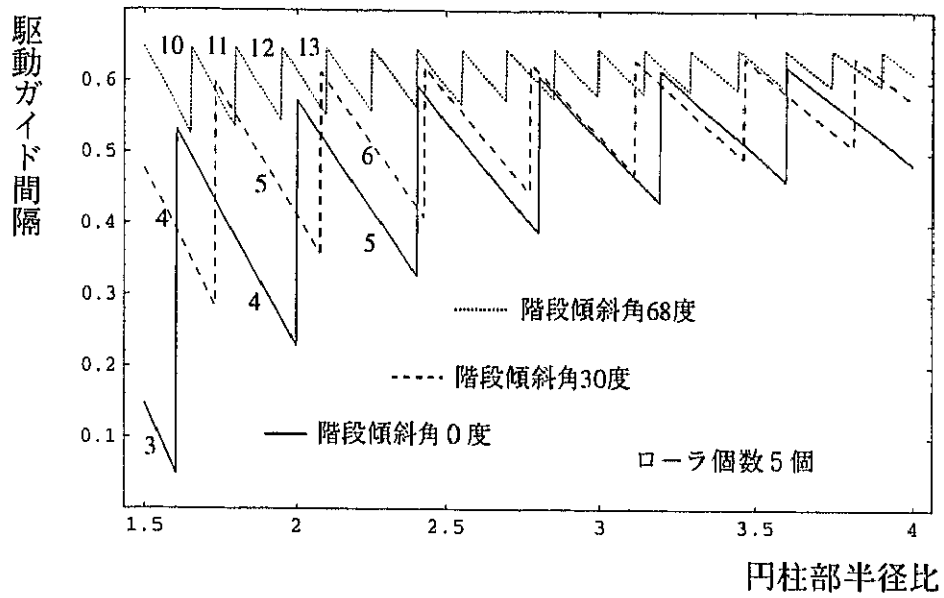


図6.4 図6.3において矢視5 (a~c), 6 (a~c) で切断した形状を側面から見た図

柱部半径比と階段傾斜角を変数とした駆動ガイド間隔である。円柱半周上の駆動ガイドの個数はローラ個数と同じとした。図 6.2 の上段，中段，下段は，ローラ個数 4，5，6 個に対応する。右は間隔 0 の等高線を示したもので，黒の部分は間隔が負になり駆動ガイドが構成できないことを示している。駆動ガイドの数がローラ個数と同一と制限されている条件下では，階段傾斜角が増大すれば斜線が長くなり，滑り係数が大きくなるため駆動ガイド間隔は負になる。また，円柱部の半径が増大すると同じ理由で駆動ガイド間隔は負になる。

そこで，駆動ガイド間隔を正にするために斜線の長さに応じて駆動ガイドの数を決める方式について以下述べる。直線ラックのとき考察したように，ローラ折返しの位置で尖りが発生しないために滑り係数は 1 以上で考察する。図 6.3 は図 6.2 と同じ変数の範囲で斜線考慮したときの駆動ガイド間隔である。円筒半周に相当する斜線の上を円盤が転がるとき，滑り係数が 1 以上で駆動ガイドの数を決定し，その時の駆動ガイド間隔を計算したものである。ローラ 4 個の場合円柱部の半径が小さい領域で負になっているが，ローラ 5，6 個においては常に正になっており，円柱部半径比，階段傾斜角の増大に対して駆動ガイドの数を上記の方式で増大させれば駆動ガイドが構成できる。

図 6.4 上下は，それぞれ図 6.3 中，図 6.3 下において矢印で示した階段傾斜角で縦に切った面を正面から見た図で，駆動ガイド間隔は円盤半径で単位化されている。図 6.3 中の 5 a，5 b，5 c は図 6.4 上の階段傾斜角 0 度，30 度，68 度に相当する。同

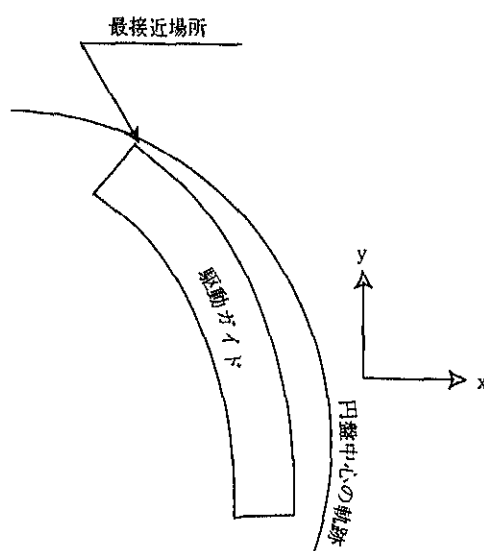


図 6.5 円盤中心軌跡と駆動ガイドを上から見た図

じく図 6.3 下の 6 a, 6 b, 6 c は図 6.4 下の階段傾斜角 0 度, 30 度, 68 度に相当する。三角波の上の数字は円柱部半周に取り付けられる駆動ガイド数である。円柱部半径比と階段傾斜角が増加するにつれて、駆動ガイド数も増加している。

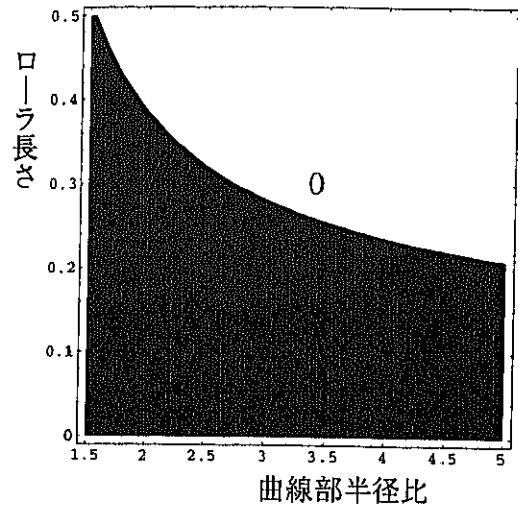
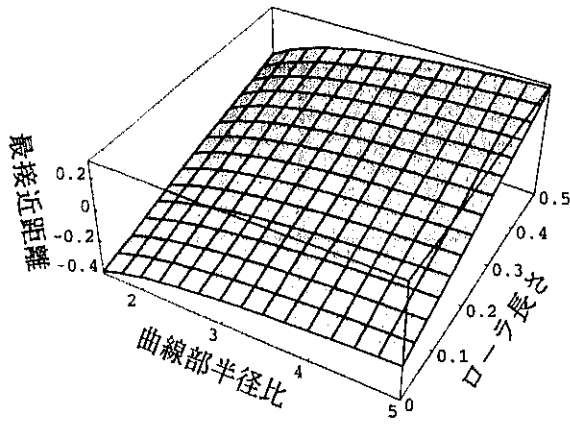
6.4 円盤と駆動ガイドの最接近距離に関する考察

螺旋軌道上の回転円盤の中心は上から見ると図 6.5 に示すように円を描く。上から見た回転円盤面を表す直線は円盤中心軌跡の接線であるから、回転円盤中心が描く円はこの駆動ガイドと干渉してはならない。円盤が駆動ガイドと衝突しないためには図 6.5 において、駆動ガイドは円の内側に存在しなければならない。その度合いを、駆動ガイドと円の最接近距離で評価する。最接近距離が大きいほど製造誤差が許されることになる。図 6.6 はローラ個数を 6 個、円盤傾斜角を 0 度に固定し、パラメータをいろいろ変化させたときの最接近距離の変化である。横軸は、上から曲線部半径比、階段傾斜角、ローラ半径、奥行き軸はローラ長さに固定されている。図の右はそれぞれ左の 3 次元グラフの最接近距離 0 の等高線図である。黒の部分が負である。ここで最接近距離が負とは駆動ガイドの一部が円の外側に存在することを示している。その絶対値は、円と円の外に出た最遠部との距離である。これらの図から、最接近距離は曲線部半径比とローラ長さがもっとも影響し、階段傾斜角、ローラ半径にはあまり影響されないことがわかる。円盤と駆動ガイドが衝突しないためには白のところのパラメータを選ばなければならない。また、製造誤差をみこしてなるべく白黒のボーダーから離れたところのパラメータ値を選んだほうが良い。しかし、実際の設計のときは材料強度、デザインなどの制約から白の範囲でかつボーダーぎりぎりのパラメータ値を選ばざるを得ない。

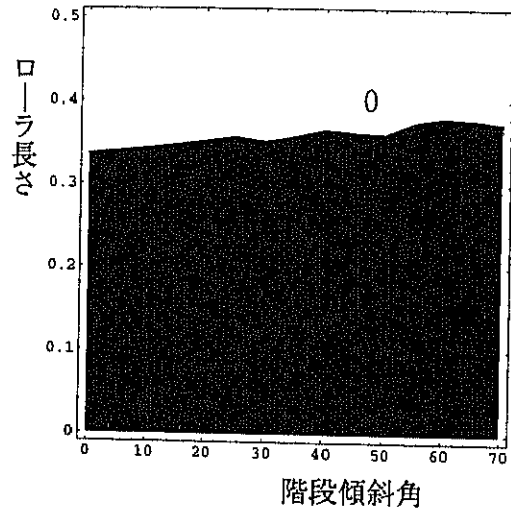
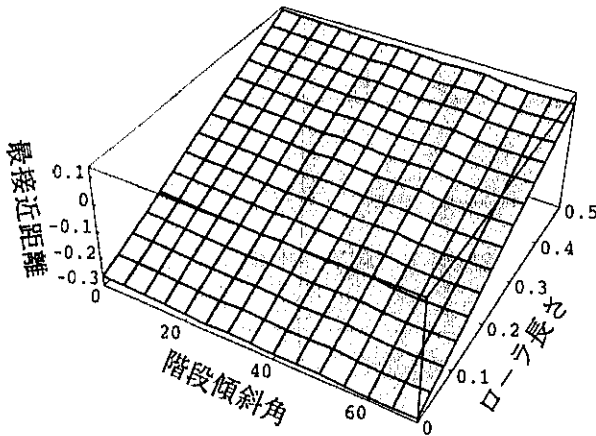
図 6.7 は円盤傾斜角を 15 度に固定したときの最接近距離である。横軸、奥行き軸の変数と範囲、および図の並ぶ順番は図 6.6 と同じである。円盤を傾斜させたことによって、ローラ長さが短くできることを示している。しかし階段傾斜角が 65 度近辺では、急速に最接近距離が小さくなっており、円盤傾斜角 0 度るときと同じ傾向を示している。

最接近距離の考察では円盤傾斜角 0 度, 15 度るときともに斜線考慮されている。斜線考慮されないと駆動ガイドが延びることになり最接近距離はさらに厳しくなるため、考察する意味がないからである。

(1) ローラ半径=0.1, 階段傾斜角=68



(2) ローラ半径=0.1, 曲線部半径比=1.5



(3) 階段傾斜角=68, 曲線部半径比=1.5

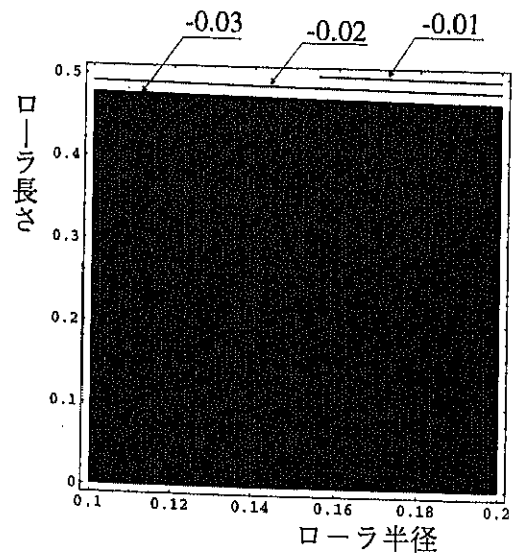
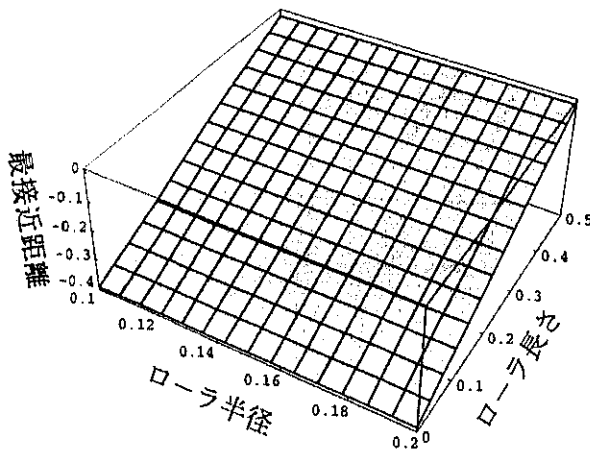
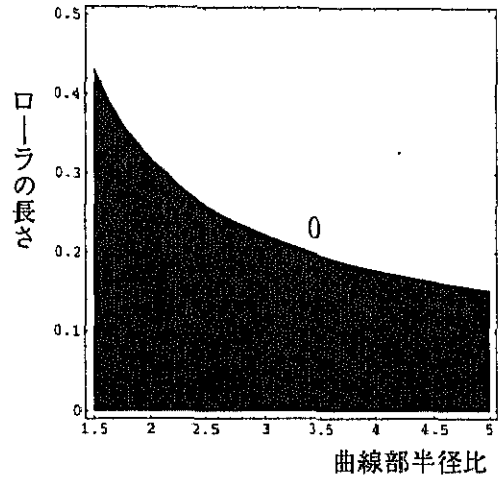
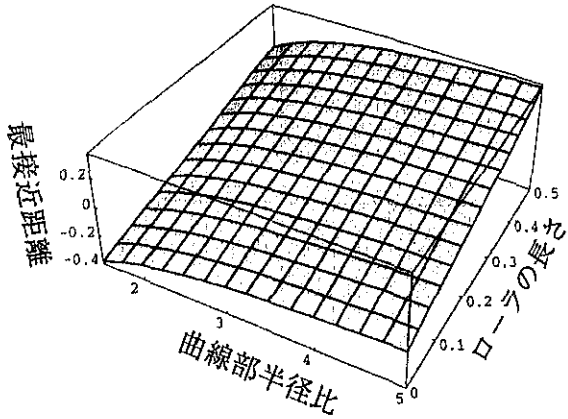
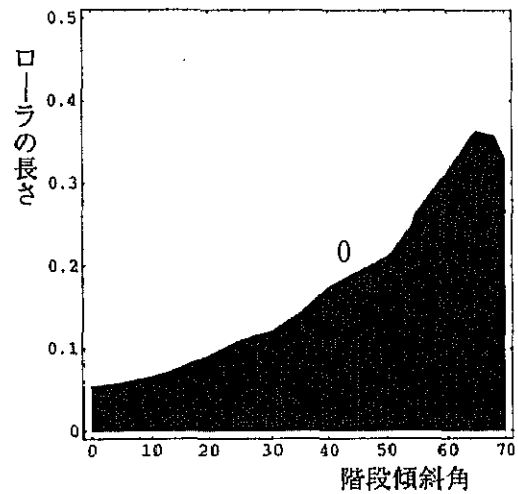
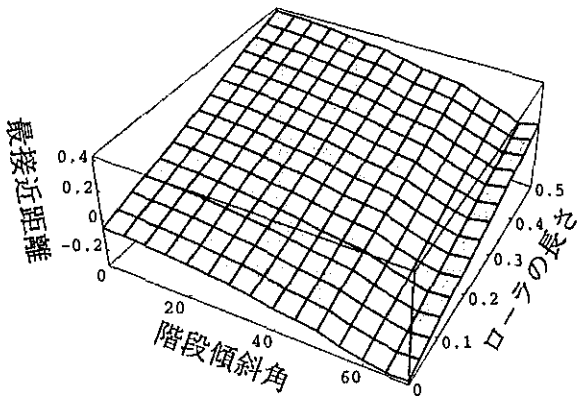


図6.6 円盤傾斜角0度の場合の円盤と駆動ガイドの最近距離
(ローラ個数6個, 斜線考慮, 縦軸は回転円盤半径で単位化されている)

(1) ローラ半径=0.1, 階段傾斜角=68



(2) ローラ半径=0.1, 曲線部半径比=1.5



(3) 曲線部半径比=1.5, 階段傾斜角=68

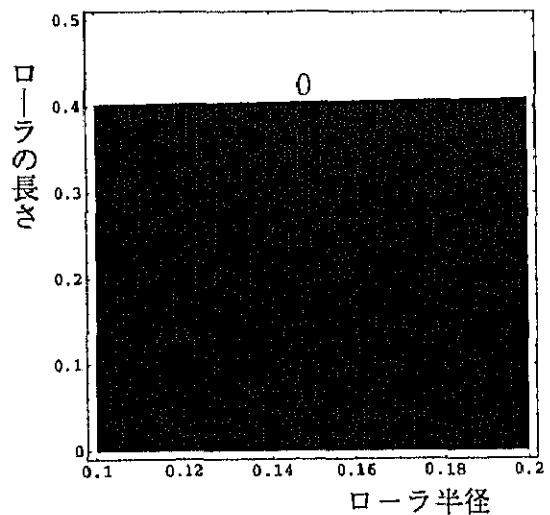
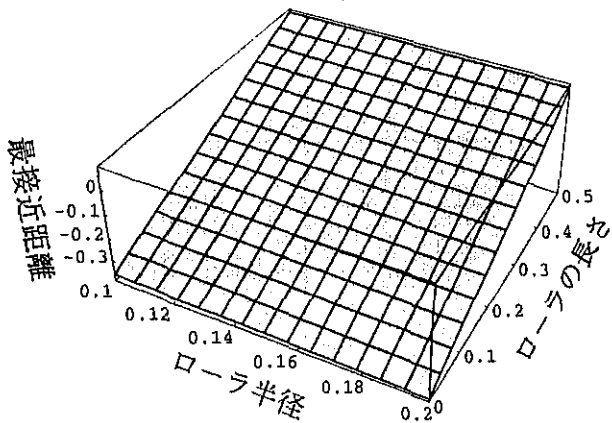
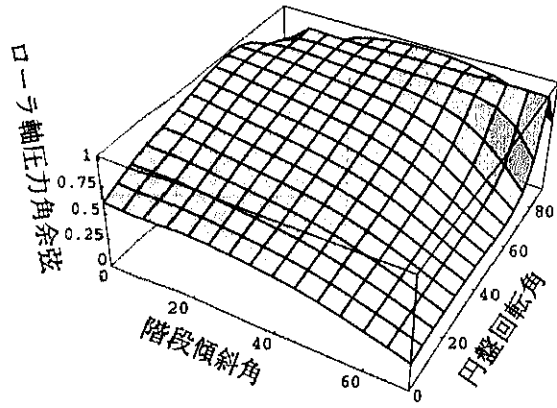


図6.7 円盤傾斜角15度の場合の円盤と駆動ガイドの最近距離
(ローラ個数6個, 斜線考慮, 縦軸は回転円盤半径で単位化されている)

円盤傾斜角0度



円盤傾斜角15度

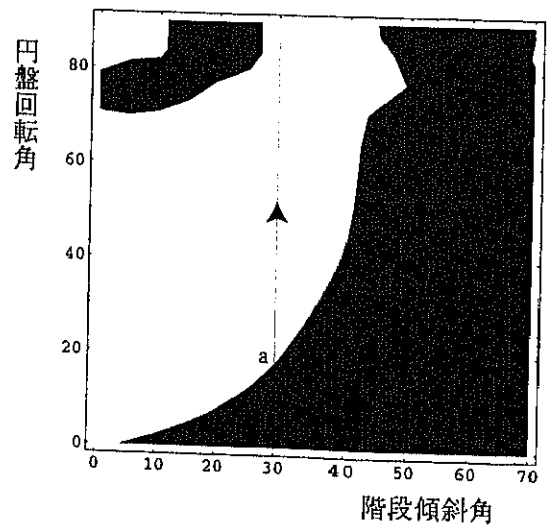
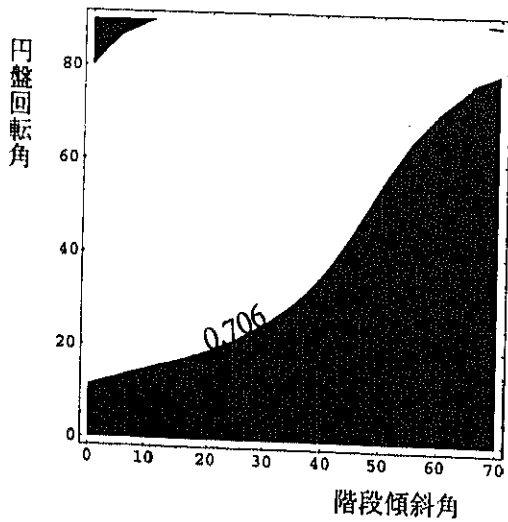
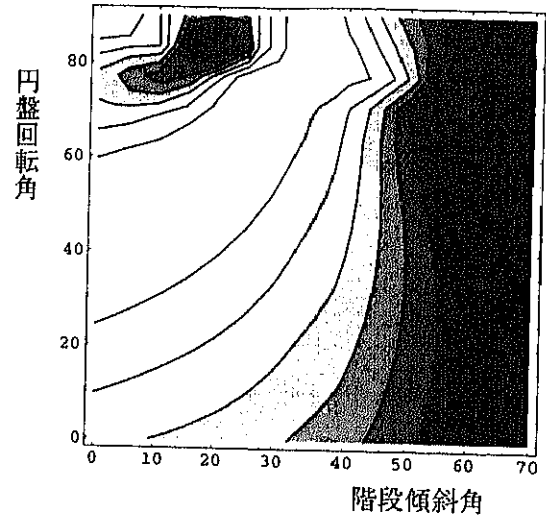
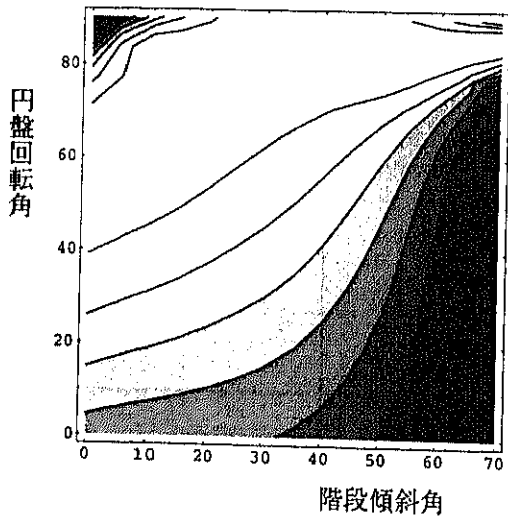
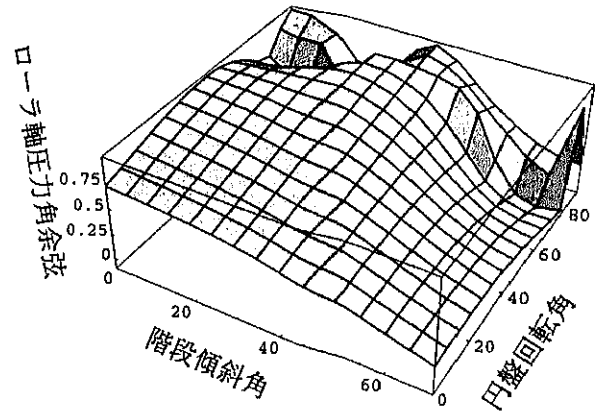
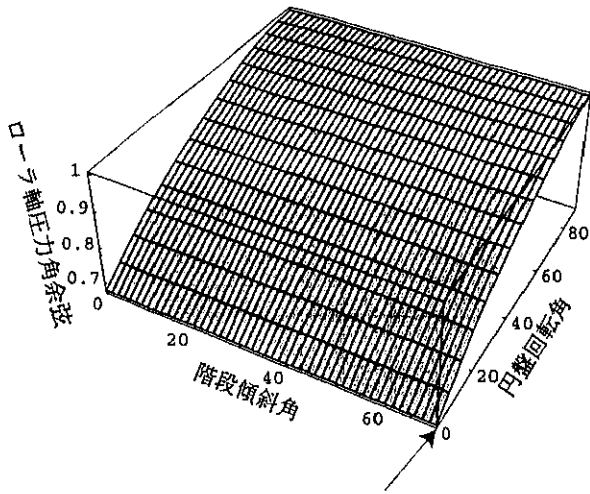


図6.8 斜線考慮なしの場合のローラ軸圧力角余弦
 (ローラ個数6個, 曲線部半径比1.5, ローラ位置0.5)

円盤傾斜角 0 度



円盤傾斜角 15 度

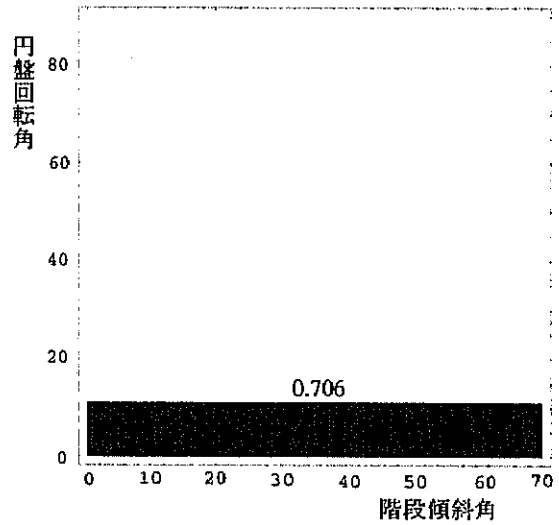
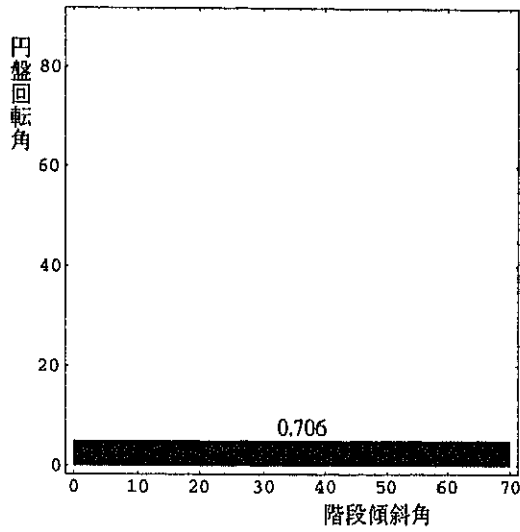
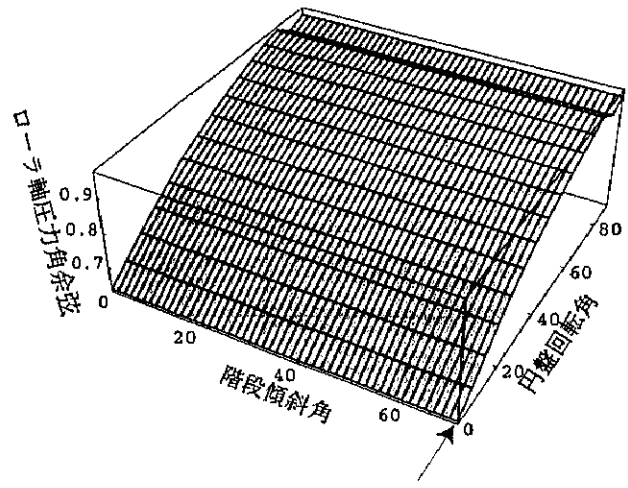


図6.9 斜線考慮した場合のローラ軸圧力角余弦
(ローラ個数6個, 半径比1.5, ロール長さ0.5)

6.5 ローラ軸圧力角余弦と斜線考慮

ここではローラ軸にかかる力を巨大化させない観点から斜線考慮が必要であることを示す。図 6.8 は、斜線考慮していないときの、階段傾斜角を変数（0 度～70 度）とし円盤を 0 度から 90 度まで回転したときのローラ軸圧力角余弦の変化を示している。図左は円盤傾斜角 0 度のとき、図右は円盤傾斜角 15 度のときを示している。図真ん中は等高線図、下はローラ軸圧力角余弦 0.706（ローラ軸圧力角 45 度）で切った境界線図である。ともに階段傾斜角が大きくなると急速にローラ軸圧力角余弦が小さくなっているのがわかる。斜線考慮していない場合、右下の図において点 a から延びる縦線（階段傾斜角 30 度）で示すように、約 20 度から 90 度までの円盤回転角において白の範囲にあるため、ローラ個数を 5 個（駆動ガイド 1 個に対応する円盤回転角が $360/5=72$ 度）にするとローラ軸圧力角が小さな範囲を使用できることがわかる。階段傾斜角が 30 度を越すとローラ軸圧力角余弦は急速に低下する。その度合いは、円盤傾斜角が 15 度の方が急激である。

図 6.9 は同じ条件で斜線考慮した場合である。図左は円盤傾斜角 0 度のとき、図右は円盤傾斜角 15 度のときである。斜線考慮することによってローラ軸圧力角余弦は階段傾斜角に依存しないことが示される。図下はローラ軸圧力角余弦 0.706 の境界線図であるが、使用したソフトウェアの格子精度ではその違いが出ないために直線になっている。図 6.10 は、図 6.9 の矢印で縦に切った切り口を横から見たところである。円盤傾斜角 0 度の方が若干ローラ軸圧力角余弦が大きいのがわかる。

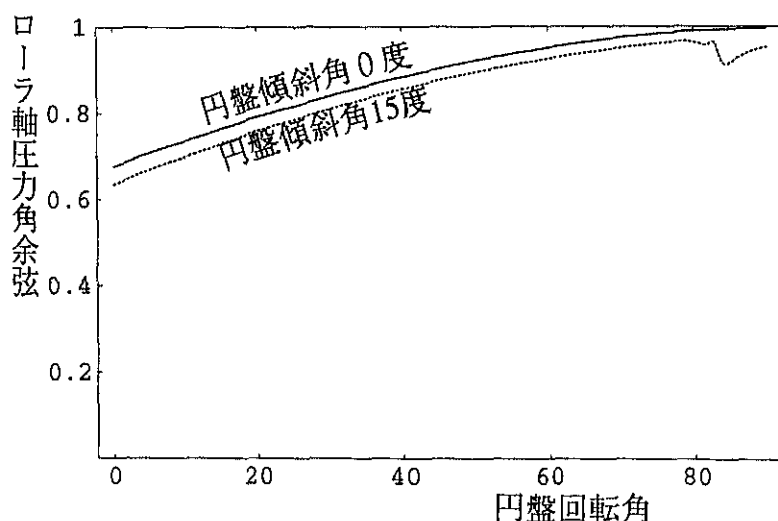


図 6.10 円盤傾斜角 0 度と 15 度の階段傾斜角 68 度でのローラ軸圧力角余弦

6.6 駆動ガイド形状に関する考察

以上駆動ガイド設計において斜線考慮することによって、駆動ガイド間隔、最接近距離、ローラ軸圧力角余弦がそれぞれ改善されることがわかった。最後に駆動ガイド形状について考察する。

図 6.11 は階段傾斜角 68 度、半径比 1.5 というもっとも駆動ガイド設計が困難な日本家屋の折返し階段曲線部において、ローラ個数 6 個、ローラ長さ 0.5 のときの円盤が回転したときの駆動ガイドに求められる曲率半径を円盤傾斜角 0 度、15 度、30 度について求めたものである。円盤回転角 60 度で曲率半径最小値は円盤傾斜角 0 度のとき 0.3 である。薄肉パイプの加工可能な最小半径はパイプ半径の 3 倍といわれており、0.3 という値は駆動ガイドパイプ直径は回転円盤半径の 2/10 ということを意味している。円盤半径 15 cm の場合、駆動ガイドパイプ直径は 3 cm である。通常、駆動ガイドはローラ軸圧力角余弦が大きい 90 度近辺まで使用したいので、パイプの半径は極めて小さいものになり、パイプが使用できないことを示している。しかし、曲率半径の小さいところはローラの移動も小さく、パイプの表面を削ることによって曲率半径を小さくできるので、実際の製造において困ることはない。厳密な移動を実現するには、パイプに替る手段が考えられねばならない。

駆動ガイドとして必要な機能は、ローラと接する曲線が提供されればよいので、3次元曲面でもよい。3次元曲面周辺部の一部が駆動ガイドパイプ中心軌跡と平行で、連続した突起状軌道から構成されていてもよい。もちろん3次元曲面の他の部分が走

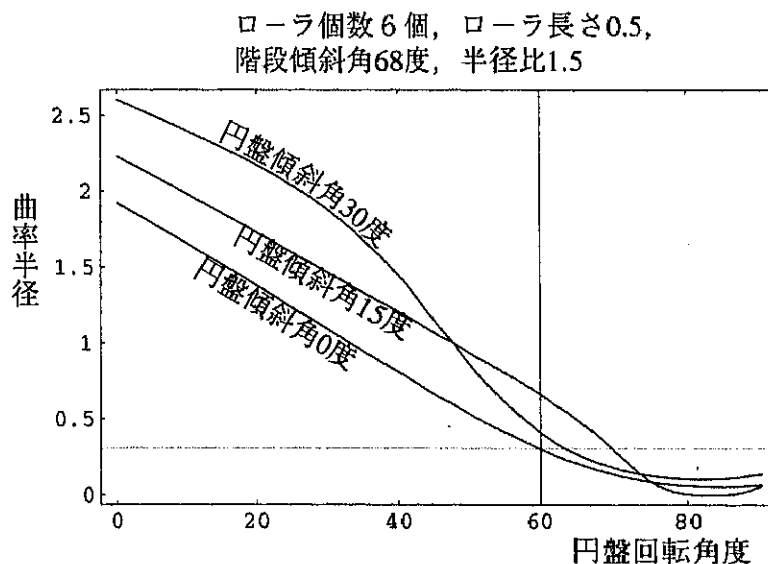


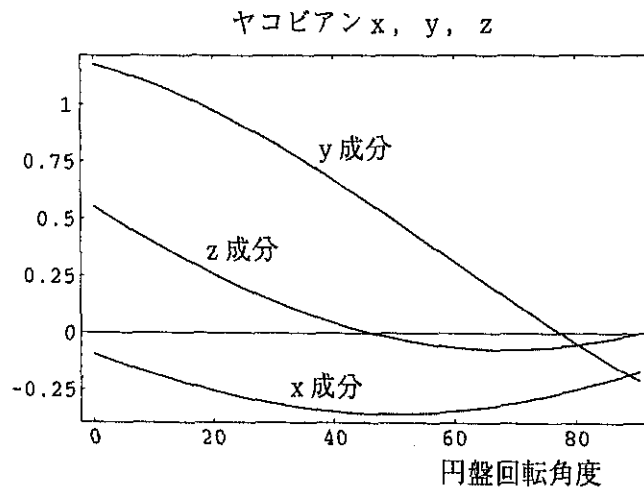
図 6.11 円盤傾斜角の違いによる曲率半径



図 6.12 猿の腰掛形状の駆動ガイド

行を妨げてはならない。このような形状は、多様にあるのでデザインの自由度も高い。たとえば、図 6.12 に示されるような猿の腰掛のような形状も考えられる。

図 6.13 は、図 6.11 と同じ条件下における平行円盤の回転角 0 度から 90 度までのヤコビアンの変化である。重力方向の z 成分は 0 に収束しているが、円周方向成分 x,



ローラ個数 6 個, ローラ長さ 0.5,
 階段傾斜角 68 度, 半径比 1.5,
 円盤傾斜角 0 度,

図 6.13 円盤傾斜角 0 度, 階段傾斜角 68 度でのヤコビアン

y は0には収束していない。曲線部に対応する駆動ガイド曲線はヤコビアン変動の少ないなだらかな曲線であるので、図 6.12 のような形状は金型加工で容易に製造できるものと思われる。

6.7 本章のまとめ

本章では駆動ガイドの構成に必要な条件を幾何学的に求めた。すなわち、駆動ガイド上をローラが転動する条件を維持しつつ、駆動ガイドと回転円盤が衝突しない条件を見いだした。6.2 節では平行円盤と傾斜円盤の得失を述べた。クローラ型移動機構を幾何学的に構成するために、6.3 節で駆動ガイド間隔、6.4 節で円盤と駆動ガイドの最接近距離を考察した。さらにローラ軸にかかる力を巨大化させない観点から斜線考慮が必要であることを6.5 節で述べた。駆動ガイド中心軌跡の曲率半径が小さくなる場合は、パイプ以外の構成要素があることを6.6 節で述べた。

クローラ型移動機構における駆動ガイド設計の基準は、①移動が物理的に妨げられないこと、②ローラ軸圧力角が小さいこと、③駆動ガイドが容易に製作できること、であった。そのための評価パラメータは、階段傾斜角、円盤傾斜角、ローラ数、半径比、ローラ長さ、ローラ半径、であった。駆動ガイド設計に大きな影響を与えるパラメータは前4者、階段傾斜角、円盤傾斜角、ローラ数、半径比、影響が小さいのは後2者、ローラ長さ、ローラ半径、である。このうち、階段傾斜角と半径比は設置される側からの条件であり、与えられる条件である。ローラ数は4章における解析から6個が最適である。円盤傾斜角は大きくなるにつれてローラ軸圧力角余弦が小さくなり、また駆動ガイド形状が複雑になるので、傾斜円盤においては15度に固定された。円盤傾斜角を微妙に変化させての解析は労多くして益が少ないが、将来の課題になるかもしれない。ローラ長さ、ローラ半径は、材料強度や見た目のデザインの制約から実際に変化できる範囲は狭い。平面移動には平行円盤が適しているが、螺旋階段など3次元移動が必要になるところでは条件によっては傾斜円盤でなければ対応できないことがある。平行円盤、傾斜円盤どちらを採用するかは、与えられた条件下で個別に対応しなければならない。