# 人工股関節スパイラルステムのデザイン

（横浜旭中央総合病院整形外科）　秋田浩，山野賢一，上里元，小俣貴弘，立野慶，大石芳郎，佐々木孝
（昭和大学医学部第二解剖学教室）　白石尚基，鈴木雅隆，後藤昇
（静岡県立大学看護学部機能形態学教室）　木村忠直

## 1．　はじめに

人工股関節ステムデザインの方法論は，セメント使用，非使用のいずれのタイプにおいても，常にヒト大腿骨近位髄腔形状の認識の問題と強く関連している．大腿骨のような長管骨の髄腔形状は，その軸と断面の形によって認識され得るが，単に計測という方法のみでは軸及び断面形状の両者を同時に決定することは極めて困難であり，大腿骨近位髄腔形状をよりよく反映した幾何形状の決定には至らない．そこで今回我々は，生物，特に動物の硬組織と形状親和性が高いと考えられる「円錐面上の測地線」を軸として，同様に「トーラスの断面」を断面としてあらかじめ設定しておいた上で，計測によって，それぞれの幾何形状及び，その3次元空間上への配置のしかたを示すパラメータの値を決定するという方法を考案した．

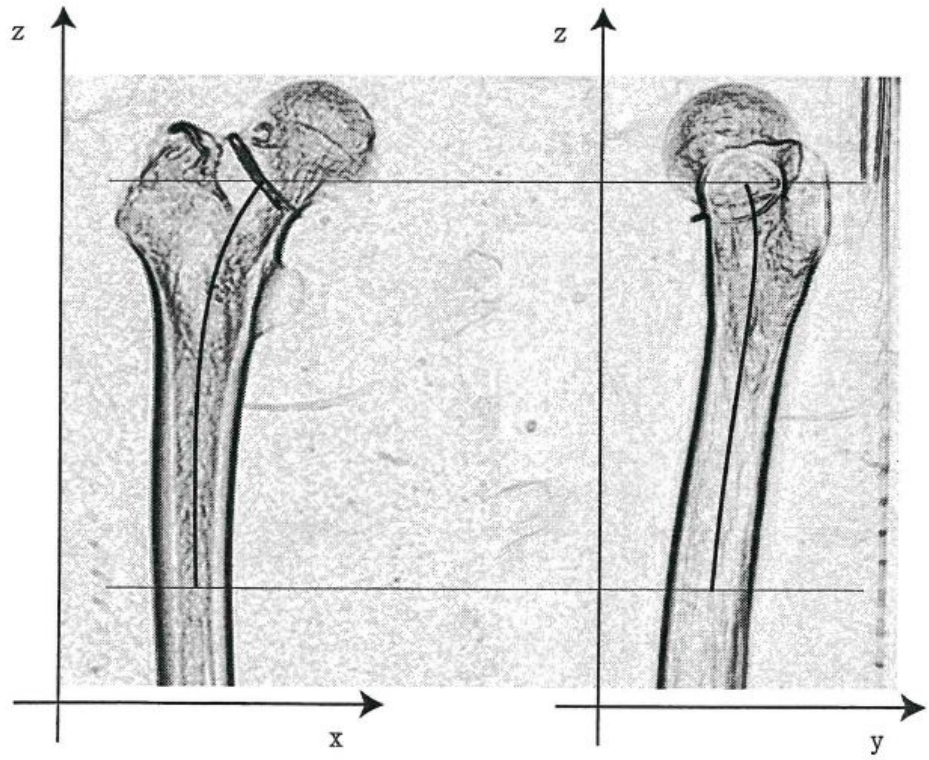


図1　大腿骨近位の軸

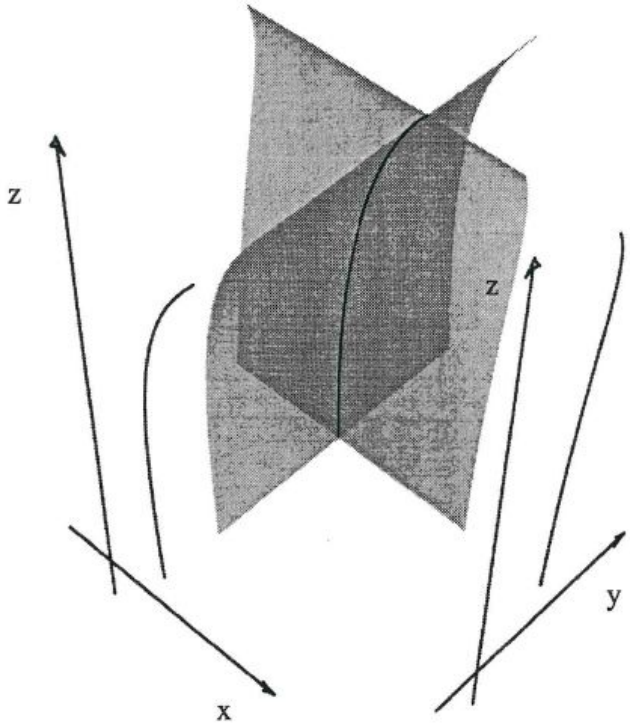


図２-A　大腿骨近位の正面，側面X線像上の軸カーブより，軸の三次元形状を求める

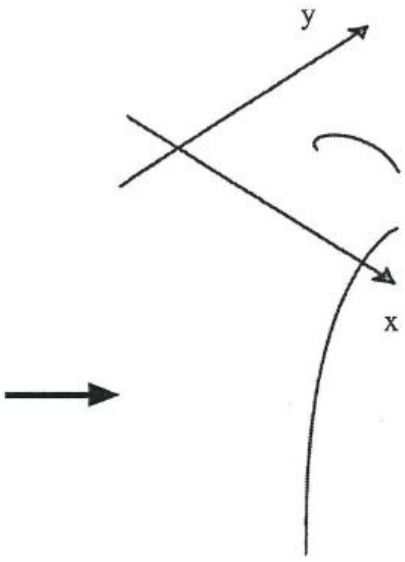


図２-B　三次元軸よりxy平面における軸カーブを求める

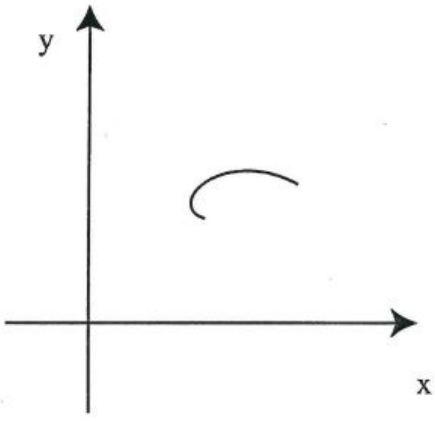


図２-C　xy平面における軸カーブ

## ２．　軸

### ２．１　大腿骨軸

大腿骨近位の正面，側面X線像をみると，その軸はおおむね図1のようになる．正面像をxz平面，側面像をyz平面とし，正面の軸カーブをy方向へ，側面の軸カーブをx方向へ掃引してできた二つの曲面（線織曲面）の交わる曲線が大腿骨軸の三次元形状（三次元空間内に埋め込まれた一次元形状）である（図２-A)．このようにしてできた大腿骨軸をxy平面に投射すると（図２-B)，図２-Cのような曲線になる．このことから，図１の右大腿骨の軸は，中枢から末梢に向かって左回りに回転する「らせん」であることがわかる．

### ２．２　仮説の応用

「ヒト前腕骨の形態と機能」の中で私は，動物の硬組織の持つ「らせん」を表現する最適なカーブが「円錐面上の測地線」であろうという仮説について述べた．今回人工股関節ステムをデザインするにあたって，この仮説を応用し，大腿骨近位髄腔の軸を「円錐面上の測地線」で表すことを試みた．(大腿骨全体に対するこの仮説の適用はまた別の機会に行うつもりである）「円錐面上の測地線」

は以下の式で表される．

$$\begin{cases} x = t\dfrac{\sin\theta}{\cos t\theta} \\ y = t\dfrac{\cos\theta}{\cos t\theta} \\ z = \dfrac{-\sqrt{1-t^2}}{\cos t\theta} \end{cases} \quad (1)$$

ただし，

$$t = \frac{1}{\sqrt{(2n)^2+1}} \quad (2)$$

式中nは，円錐の底面と直径と高さの比であり，パラメータ$\theta$は，測地線の長さsと次のような関係がある．

$$\theta = \frac{\arctan s}{t} \quad (3)$$

円錐面上の測地線は，nに対して，一種類の無限の長さを持った形状が決定され，その形状の部分は，両端の点の，円錐の頂点から最短距離の点からの回転角　$\theta$ 1，$\theta$ 2，または，円錐面上の測地線と円錐の頂点との間の距離を1としたときの円錐の頂点から最短距離の点からの円錐面上の測地線に沿った距離s1，s2によって限定される．したがって現実の生物の形に適用したい円錐面上の測地線は (n，$\theta$ 1，$\theta$ 2) または，(n，s1，s2) いずれかの三つのパラメータによって決まる．本論文中では，(n，s1，s2) に統一する．

## 2．3　大腿骨軸のベクトル計測

例えば，図1の大腿骨軸に適用することのできる (n，s1，s2) はどのような値であろうか．それを知る為には様々な方法が考えられるが，今回我々は大腿骨の正側レントゲン像より，知りたい骨軸の両端のベクトルを計測し，それらがなす角度を保持するような (n，s1，s2) の性質を調べ，その値を推定するという方法を用いた．図3は，大腿骨頭中心から大腿骨頚部中央に向かうベクトルv1と，大腿骨近位三分の一の点から遠位に向かう骨

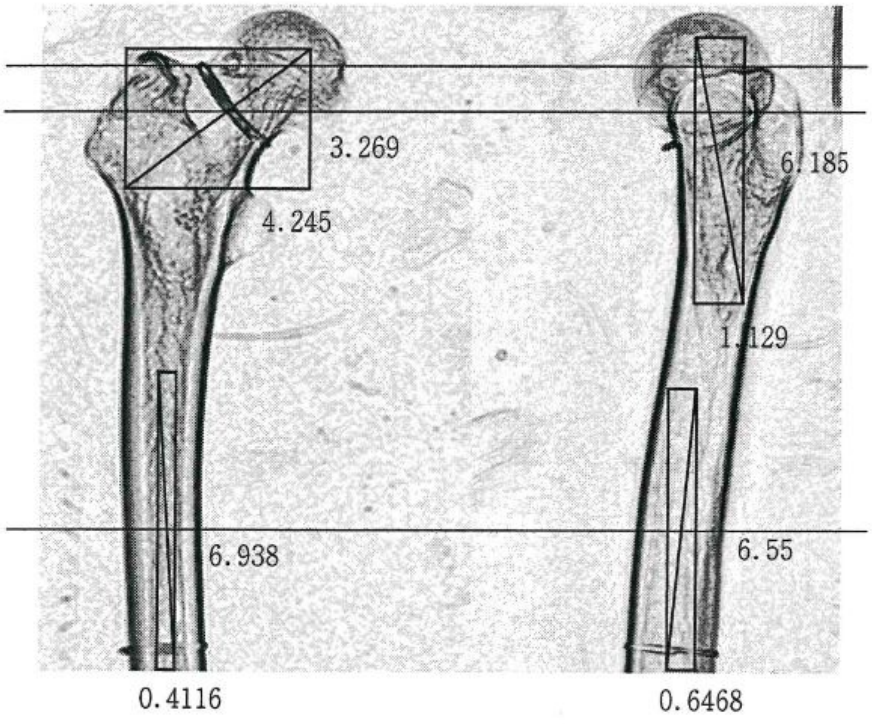


図3　大腿骨軸のベクトル計測

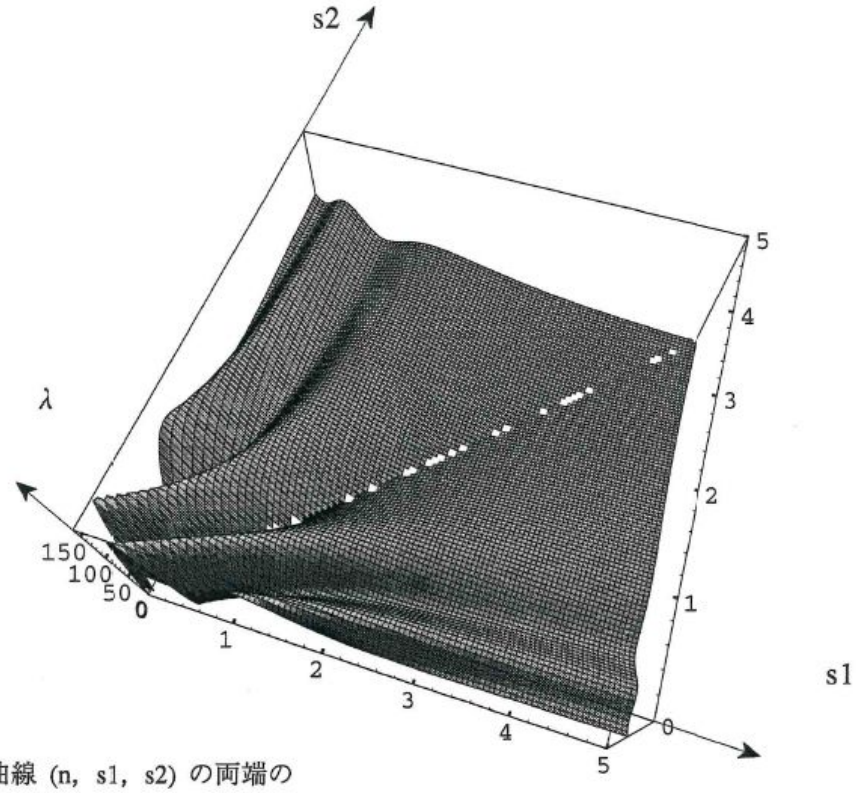


図４ -A　n=5 のとき，曲線 (n, s1, s2) の両端の
ベクトルのなす角 λ と s1，s2 の関係

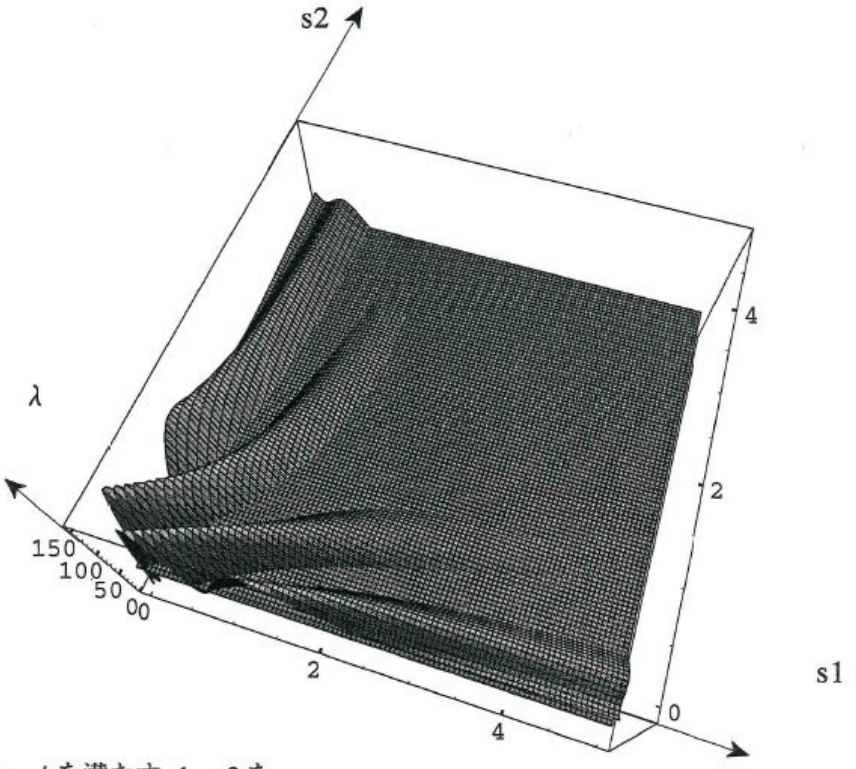


図４ -B　n=5 のとき，$\lambda = \phi$ を満たす s1，s2 を，
曲面と平面の交線で示した

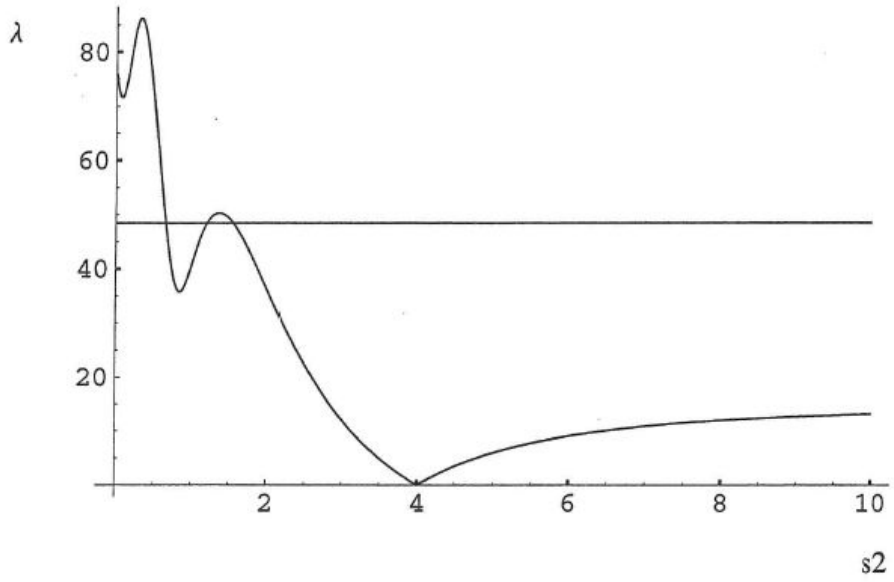


図５　n=5，s1=4 のときの s2 と λ の関係；$\lambda = \phi$ となる s2 は，3 点ある
（図５は，図４ -B の垂直断面）

軸に沿ったベクトル v2 を求めたものである．図のような計測より，

$$v1 = \{4.245, -1.129 \times \frac{3.269}{6.185}, 3.269\}$$

$$v2 = \{-0.4116, 0.6468 \times \frac{6.938}{6.55}, 6.938\}$$

数値には必要以上の精度があるが，コンピュータ上の計測なのでそのままにしておいた．
v1 と v2 のなす角 $\phi$ は，

$$\phi = \arccos\left(\frac{v1 . v2}{|v1||v2|}\right) \qquad (4)$$

これを計算すると，$\phi$ は 48．445° である．(n，s1，s2) の両端のベクトルのなす角を λ とすると，$\lambda = \phi$ となるような (n，s1，s2) を探せばいい．例えば前腕骨に適用した n=5 の円錐について考えると，どのような (5，s1，s2) において，両端のベクトルのなす角が 48．445 度になるのだろうか．図４ -A は，n=5 のとき，x 軸に s1，y 軸に s2，z 軸に λ をとったものである．さらに，平面 $\lambda = \phi$ をこれに重ね合わせると図４ -B のようになる．このふたつの曲面の交わる曲線が，$\lambda = \phi$ となるような (5，s1，s2) である．ここで s1=4 のとき，$\lambda = \phi$ となるような (5，4，s2) を求めたものが図５である．図５は図４ -B の垂直断面であり，$\lambda = \phi$ となるような (5，4，s2) は直線と曲線の交点であるから，条件を満たす s2 は 3 点ある．このような検索から図１の大腿骨軸に相当する (n，s1，s2) の候補を捜し出したが，その詳細な方法についてはまた別の機会に述べたい．そして多くの大腿骨に適用することのできる (n，s1，s2)，すなわち人工骨頭のデザインに実際に使用することのできる (n，s1，s2)，及びもともと１としてある円錐面上の測地線と円錐の頂点との間の距離の決定に関しては，さらに系統的で精度のある検索，計測方法の開発が必要であろう．

## ３．　断面

### ３．１　連続的に変化する断面形状

我々整形外科医が，日常，実際にしばしば見ることのできる大腿骨の断面は，小転子より近位一横指から外側近位に向かって約４５度の角度での切断面であり，この形は，見える範囲で，卵形の部

分である．大腿骨骨幹部はほぼ円であるから，仮に大腿骨断面形状は，卵形から円へと連続的に変化していくと単純に認識するとすれば，以下の卵形を表現する式は極めて有用である．

$$\begin{cases} x = \sqrt{(r + \sin\theta)^2 - a^2} - \sqrt{r^2 - a^2} \\ y = \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式上，aという一つのパラメータの変化で，卵形から円への滑らかな形状変化を制御することができ，rによって，卵形から円へ変化する形状グループ全体を制御することができる．詳細は拙著『卵の形の認識』を参照されたい．

### 3．2　軸を持った断面形状の配置と回転

（5）式でできる卵形を，a，rを適当にとって図6に示す．このような円ではない閉曲線を，「らせん」上の各点で，その接線に垂直な面上に配置し，不正なチューブを作ることによって大腿骨近位髄腔形状を表現すること，ないしは，人工股関節ステムのデザインをすることを考えた場合，二つの問題が生じる．一つは，閉曲線を含む平面上のどの点を「らせん」上の点と重ね合わせるかということであり，もうひとつは閉曲線をどのように回転させるかという問題である．一つ目の問題は，「重心」というのがその安易な答えであると思われるが，計測による再考が必要である．（後に示すステムデザインにおいては，計算の煩雑さをさける為に，重心と非常に近い位置にある幾何中心を「らせん」上の点と重ね合わせてある．）二つめの問題は，図6のx軸が，「らせん」が埋め込まれている3次元空間内でどの方向を向くか，その方向を示すベクトルを求めることと等しい．基準となるベクトルは，「らせん」上の各点において「らせん」を二回微分してできるベクトル，すなわち各点においてその曲率中心に向かうベクトルであると考えるのが自然であろう．このような基準ベクトルを設定すれば，2．で求めた軸と合わせて3次元テンプレートを作成することができる．これは，軸，軸に垂直な平面，基準ベクトルの三要素からなり，各平面上で図6つまり式（5）のa，r，及び図6のx軸と基準ベクトルとのなす角を，計測によって求める事ができると考えられる．式（5）に関しては，現在ある，少ないパラメータによる単純な形態制御の様式をできるだけ保持したまま，工学的要素をも含めた，式自体の変形も今後考慮していくべきだろう．

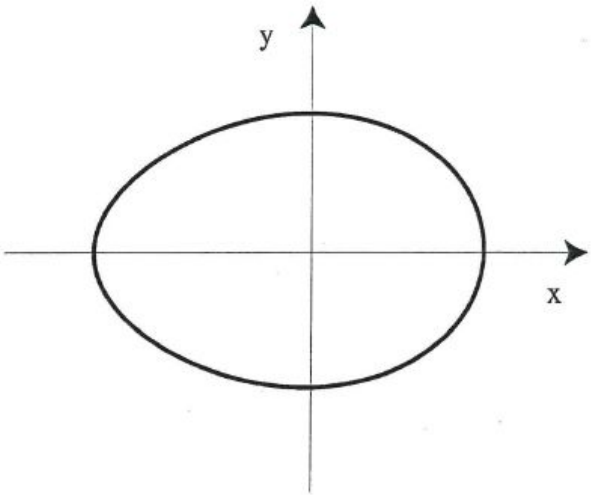


図6　卵形

### 4．　スパイラルステムのデザイン

軸を定め，その軸の各点において接線に垂直な平面上に卵形を配置し，その卵形を滑らかに形状変化させ，回転させる．この方法を用いることによって，計測なしでも，予測されるおおよそのパラメータ値を代入して仮のステムデザインを行うことができる．図7は，軸周りに配置された卵形

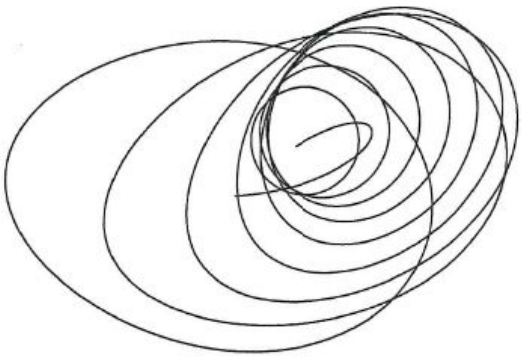

図7　軸，及び断面の卵形の回転と形状変化

図8　デザイン1

を形状変化，回転させ，軸の近位方向から見たものであり，図8，図9は，仮にデザインした2種類のステムデザインである．これらの3次元形状を，紙面で示すことは難しいが（講演時にはコンピュータスクリーン上で回転させ，様々な方向から見ていただけるようにする予定である．），軸が円錐面上の測地線という一種のスパイラルからなり，表面の曲面もスパイラルという性質を反映したものとなっている為，このステムの名前をスパイラルステムとした．スパイラルステムは，表面が滑らかな曲面からなり，スパイラルとテーパーの両特性を備えている．従って，計測を行い，大腿骨近位髄腔形状により適合したパラメータ値を決定することによって，fit & fill，回旋固定性，応力の分散のいずれもが良好であるようなステムデザインとなることが期待できる．また表面の加工状態を変えれば，セメント，非セメントのどちらにとっても有用なデザインであると考えられる．

図９　デザイン２

謝辞

本研究を進めるに当たって，ご協力いただいた山崎信寿先生，Philip C. Noble先生，木内裕二先生，横浜旭中央総合病院放射線科の皆様に，深く感謝いたします．

参考文献

1）秋田浩：ヒト前腕骨の形態と機能―単一の幾何学的概念（円錐面上の測地線）を用いて行った，生物の形態及び機能設計―，バイオメカニズム１３，東京大学出版会，205-215，(1996)

2）秋田浩：卵のかたちの認識１―トーラス（円環面）の断面に関する研究―，バイオメカニズム１４，東京大学出版会，161-171，(1998)

3) 大森弘則ほか：人工股関節のデザイン―セメントレスTHAステムのデザイン―，整形・災害外科41，699-707，(1998)
4) 松田泰正ほか：人工股関節のデザインに関する研究（第2報）―ステムの形態についての検索―，中部日本整形外科災害外科学会誌，30（1），308-312，(1987)
5) Philip C. Noble : Biomechanical Advances in Total Hip Replacement, Biomechanics in Orthopedics, Springer-Verlag, 46-75, (1992)
6) ダーシー・トムソン：生物の形，173-199，東京大学出版会，1992
7) Stephen A.Wainwright : Axis And Circumference — The Cylindrical Shape of Plants and Animals —, Harvard University Press, (1988)
8) 秋田浩：ヒトの形，構造医学，4（4），4-17，(1998)

---

連絡先
〒241-0801
横浜市旭区若葉台4-20-1
横浜旭中央総合病院　整形外科
秋田　浩

# DESIGN OF SPIRAL STEM IN TOTAL HIP ARTHROPLASTY

Hiroshi AKITA *, **, Kennichi YAMANO *, Hajime UESATO *, Takahiro OMATA *,
Kei TATENO *, Yoshiro OISHI *, Takashi SASAKI *
Naoki SHIRAISHI **, Masataka SUZUKI **, Noboru GOTO **
and Tadanao KIMURA ***

** Department of Orthopaedic Surgery, Yokohama Asahi Chuo Hospital*
*** Department of Anatomy, Showa University School of Medicine*
**** Department of Anatomy and physiology, University of Shizuoka, School of Nursing*

Methodology for design of femoral component in total hip arthroplasty is closely related to evaluation of shape of proximal femoral canal. Shape of canal in tubular bone such as femur is defined by shapes of its axis and cross section.In this study we proposed a novel methodology for detarmination of 3 demensional shape and arrangement of axis and cross section, using geodesic curves on a surface of a corn as its axis, cross section of a torus as its cross section, and some mesurments obtained from X-ray photograph.

Geodesic curves on a surface of a corn is expressed as a formula as follows :

$$\begin{cases} x = t\dfrac{\sin\theta}{\cos t\theta} \\ y = t\dfrac{\cos\theta}{\cos t\theta} \\ z = \dfrac{-\sqrt{1-t^2}}{\cos t\theta} \end{cases}$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{(2n)^2+1}}$$

Cross section of a torus is expressed as follows :

$$\begin{cases} x = \sqrt{(r+\sin\theta)^2 - a^2} - \sqrt{r^2 - a^2} \\ y = \cos\theta \end{cases}$$

We named a stem designed according to this method as "Spiral stem". Spiral stem has smooth surface and has properties of both spiral and taper. Therefore,spiral stem, which has excellent fit and fill, torsionally load and dispersion of force is expected to be designed after the novel method.