人工関節のバイオメカニクス

立 石 哲 也*

1. はじめに

動物の運動機能は大部分、筋・骨格系の働きに依存している。歩行機能で特に重要な役割をはたしている大腿骨々頭部の形状や内部構造が、股関節から大腿骨々幹部へと伝達される荷重やひずみに影響されて、その形状が機能的に適応していることは良く知られている。骨格系は単なる荷重支持にとどまらず、関節に作用する衝撃力を緩和して運動を円滑にするとともに、造血、栄養補給、内分泌の調節などの役割を果たしており、生活過程を持った一種の多機能複合対科とみなすことができる。

生体の機械機能模倣、すなわちメカニカルバイオミメティクスは生体機能のシミュレーションにはじまり、医学、工学への応用技術に展望を与えるものであるが、動物の骨格系が持っている a) 最適構造、b) 機能的適応、c) 自己修復性、d) 自己潤滑性、e) 運動安定性等の機械機能を十分に代替するデバイスを実現することは現在の技術では不可能であろうが、とりあえず、これらの機能を解明し、生体の妙に学んで生体模倣材料・デバイスを開発するというのが正攻法である。

2. 関節の機構

関節の重要な機能の1つは、荷重支持能力である。筋力や重力、慣性力などによって生ずる荷重やモーメントを効率の良い機構で支持するのが関節であるが、その複雑な構造と機能の関係は十分に解明されていない。関節の形態は部位によって異なるため、単純な力学モデルに置換することは困難である。解剖学的には、関節は複数の骨を互いに軟骨や結合組織によって連結したものである。

関節には不動関節と可動関節があり、後者には形態の差により、球関節、螺旋関節、螺旋関節、鞍関節、車軸関節、顆状関節などがあり、また運動の自由度から1～3度の関節に分類される。関節の荷重支持に関与する組織は、海綿骨、半月板などであるが、そのほかの構成体は関

節液、関節包、滑膜、靱帯などがあり、これらの協働作用として関節の荷重支持機能が発揮される（図1参照）。

その際、関節合力の大きさと方向、および荷重面積が問題となる。関節合力は股関節、膝関節、足関節では体重の数倍程度と大きな値をとる。

このように、荷重関節では大きな荷重を支持し、伝達するのであるが、しかもこれがきわめて短時間に衝撃的に加わる場合が多い。たとえば、歩行時における荷重時間は、踵接地から足尖離床まで、わずか0.5秒程度である。

関節に作用する荷重パターンは歩行、走行、跳躍、起立などの日常生活動作において、衝撃や繰返しなどの動的荷重がほとんどである。

(1) 関節の運動安定性

関節の運動性は、荷重支持機能とともに関節の重要な機能の1つであるが、これは関節の安定性と相矛盾するものである。それにもかかわらず、生体関節においては、その要請に応じて合目的に機能を分離しているのである。つまり上肢などいわゆる非荷重関節では、ある程度の安定性を犠牲にしても運動性を得ることが重要であるのに対し、下肢などの荷重関節では、運動性とともに安定性をも満たすような関節構造をしている。これは、人工関節の開発にあたって最も留意すべき点である。

関節の運動安定性に影響を与える要素としては、関節の形態、靱帯、筋肉などが重要であり、そのほかにアライメント、半月板、関節包などの因子が加わる。股関節の安定性は、大腿骨頭が深い寛骨臼に包まれて行なわれるが、肩関節では臼蓋は浅く適合性が悪いので、筋肉組織（腱板）が安定性に貢献している。また、関節では主として靱帯に負うところが多い。

関節の形態は平面であることはなく、一定の曲率を有しており、荷重支持と運動性に好都合な構造になっている。膝関節では、内側と外側の関節面の形と大きさが異なるため、屈伸、内・外転、回旋などの運動のほかに、関節面の転がりやすさが問題になる。膝の屈曲時に限っては一定の見解がなく、最初の20°屈曲までは単なるころがりと考えている人が多いが、Lindahl (1967)¹⁾に

原稿受付 1990年9月4日

Biomechanics of Artificial Joint

* 機械技術研究所

図1 膝・股関節の構成体とその機械的モデル

よれば、屈曲角 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ までは転がりとすべりの両方が共存するという。

機構学でよく知られているように、2つのリンクが転がり接触するためには、両リンクの瞬間中心を結ぶ線上に接触点がないといけない。生体関節で、このような条件が満たされることはきわめて稀で、関節面は互いに離れたり、食い込んだりするものと思われるが、それは軟骨の変形性と靱帯の抗力でカバーしているのであろう。

関節の安定性に寄与する最も重要な支持組織は靱帯である。股関節における大腿靱帯、膝関節における十字靱帯、足関節における外側、内側々副靱帯などはきわめて重要な Stabilizer として機能している。これが損傷を受けると回旋抵抗力などが弱まり、種々の動揺性変形を生じてくる。最も複雑な膝関節の運動にはハムストリング、腓腹筋、大腿四頭筋、十字靱帯、側副靱帯などが関与している。

下肢全体としての矢状面、前額面の安定性を考慮した解析が Kummer によってなされた¹⁾。下肢の安定性は、足・膝・股関節に関するシステムダイナミックスとしてとらえなければならない。

(2) 関節の潤滑

関節はきわめて低摩擦で運動しており、報告されている摩擦係数は $0.0057 \sim 0.02$ であって、氷上スケートですべっているとき (0.03) の約3倍、プラスチック同士の少なくとも10倍はすべりやすい(表1参照)。また、このような低摩擦にもかかわらず、運動域の途中の任意

の角度で自由に停止できる特性もあるが、この機構は不明である。生体関節の潤滑機構を解明するために、biotribology という学問も生まれた。現在まで考えられている各種潤滑様式をつぎに列挙する³⁾。

- ① fluid film lubrication (流体膜潤滑)
 - (a) hydrostatic lubrication (静水圧潤滑)
 - (b) squeeze film (絞り膜) lubrication
 - (c) hydrodynamic lubrication (流体潤滑)
- ② boundary lubrication (境界潤滑)
- ③ elastohydrodynamic lubrication (弾性流体潤滑)
- ④ weeping lubrication (浸出潤滑)
- ⑤ boosted lubrication (押し上げ潤滑)

以上の諸説があるが、動的な荷重を支持する関節において、単一の潤滑理論では不十分で、荷重状態や運動速度、個体差などによりいくつかの潤滑様式を適用した複合理論を採用すべきであろう。Radin ら (1972)¹⁾ は低負荷では境界潤滑を、高負荷では流体潤滑を有力視し、ヒアルロン酸は滑膜同士の潤滑に重要な役割を果たしていると考えている。振子のような、関節の減衰振動実験では、関節の速度が 25 mm/s 以上では主として境界潤滑、 100 mm/s まで上昇すると境界潤滑と流体潤滑が行なわれていることを示している。

今後、生体関節や人工関節の潤滑機構が解明されるにつれて、関節の変性機構や人工関節の材質の決定とデザインに有用な情報が提供されるばかりでなく、バイオニクス的な意味で、新しい発想に基づく軸受と潤滑方法の

開発が期待される。

3. 人工関節

関節形成術の歴史は古く、特に股関節の歴史はそのまま整形外科の発展の歴史を見る思いである。19世紀には股関節ではないが、顎関節硬直に対して中間挿入物質として小片の木材を使用したりしている。また、象牙製の人工股関節を Gluck が 1890 年使用したが、固定にはビスとレジン、軽石の粉末、しっくいからできている骨セメントを用いている。この人工関節は、長期間の耐久性はなかったようであるが、現在の人工関節の原型を見ることができる。

1962 年 Charnly¹⁾ が、現在の形の人工関節 (stainless steel 対 HDP*) を使用し、成功を収めて以来、人工関節置換術は関節外科において大きな位置を占めつつある。しかしながら、人工股関節に関しては、世界的に各種のものが使用されており、その基本的な形はほぼ確立した感があるが、人工関節の摩耗、折損、人工関節・骨インターフェイスの諸問題、ゆるみ (loosening)、沈み込み (sinking)、感染などの症例も増加しつつあり、問題がないわけではない (表 2)。

また、股関節以外の膝関節や足関節、肩、肘関節、指関節などにも人工関節は応用され、多数の種類がある。特に、膝関節では、現在世界的に 800 種以上の人工関節があるといわれるほどの混乱状態で、確立したものはなく、今後の新たな発想に基づく開発が期待されるところである。合わせて、毒性、安全性、材料力学的特性などの点から、良い材質の検討も必要であろう。

以上述べたように、人工関節は金属と HDP の組合せが大多数を占めているが、長期間の使用によるソケット表面の疲労、摩耗、クリープ変形などによる耐久性の低下、および金属イオンの溶出は依然として未解決の問題

である。これらの問題を一挙に解決して、人工関節の信頼性を高めるためには、新材料を用いた人工関節の設計と評価法の確立が待たれている。

筆者らは新人工関節として、セラミック人工骨頭と各種複合材料ソケットからなる人工関節を開発し、関節シミュレータによる評価試験を行なっている。カーボン繊維や有機繊維などで強化したプラスチックや、多孔性のプラスチック (人工軟骨) と金属やセラミックスの組合せ技術を ABC (Advanced Biocomposites=先進医用複合材料技術) と称する⁴⁾。これは材料に高度の生体機能性をもたせるために、単一材料の機能を保持しつつ、複数の材料を複合化することによって、同時にいくつかの条件を満足させる生体複合材料、あるいはハイブリッド材料を目指す材料設計思想である。筆者らは、ABC を人工関節および各種内固定具に適用し、興味深い数々の成果を得ている。

関節形成術には種々のものがあるが、人工関節では関節面の形状や非関節面の形状などが問題となる (図 2 参照)。特に関節面の形状は関節の運動性と、支持性に影響するため重要である。運動の自由度、可動域、運動軸は正常の骨格や筋腱の作用方向を変更しないように、できるだけ生理的に近いものが良いが、これはまた荷重支持性、安定性との関連においても考慮されねばならない。

そもそも、人工関節置換術を要する症例では、正常の運動域は不要であり、ある程度の制限はやむをえない。しかしながら、自由度をあまりに制限する構造、たとえば膝や肘を蝶番関節で置換した場合、回旋、内・外転などの生理的な運動が抑制されて、インターフェイスに無理な応力が生じ、緩みなどの原因になる。膝関節においては、靱帯、腱、筋肉などの軟部組織による支持性も萎縮や弛緩などによる問題があり、運動学的にも複雑であることが、人工膝関節のデザインに決定打がないことの一因である。

表 1 種々の材質の摩擦係数

項 目	係 数
関 節	0.005 (人の股関節 0.003~0.015) 足 関 節 0.014~0.024)
流 体 潤 滑	0.001~0.01
境 界 潤 滑	0.1
steel on HDP	0.05
steel on Teflon	0.05~0.1
metal on metal	0.3 ~0.8
vitallium	0.2 ~0.3
Co-Cr 合金	0.13~0.15
Ti 合金	0.22~0.66
plastic on plastic	0.1 ~0.3
steel on ice	0.03
ボールベアリング	0.01~0.001

表 2 代表的な全人工股関節の形式とその開始年

形 式 名 (考案者名)	ソケット材質	骨 頭 材 質	開始年
McKee-Farrar	Co-Cr-Mo合金	Co-Cr-Mo合金	1956
Charnley	テフロン	SUS 316 L	1956
Charnley	UHMWP	SUS 316 L	1963
Müller	UHMWP	Co-Cr-Mo合金	1965
Boutin	アルミナ	アルミナ	1970
Weber	UHMWP	アルミナ	1972

(注) UHMWP: Ultra High Molecular Weight Polyethylene

- (a) 関節切除 (股関節 Girdlestone, 手 Fowler 式)
 (b) 蝶番関節 (膝関節 Walldius, 手指 Flatt)
 (c) 蝶番の無い人工関節 (股関節 Müller, 膝関節 Geometric 形)
 (d) dynamic spacer (手指 Swanson 形のように flexible のもの)
 (e) space filler (大菱形骨, 月状骨など)
 ((d), (e)では, 人工物の周辺に関節包に類似した組織が形成され, 安定化に役立つ)

図 2 関節形成術の種類

参考文献

- 1) 立石哲也, 宮永豊著: 整形外科バイオメカニクス資料集成, 朝日サイエンス (1978)
- 2) G. Heimke, et al.ed: Clininal Implant Materials, Elsevier (1990)
- 3) 伊丹康人, 西尾篤人編: 人工股関節, 整形外科 MOOK 45, 金原出版 (1986)
- 4) T. Tateishi and T. Fukubayashi: Advanced Biocomposite Material and Application to the Artificial Joint, "Bioceramics vol. 1" Ishiyaku Euro America (1989) p. 48

立石哲也 (Tetsuya TATEISHI)

昭和48年 東京大学大学院工学系研究科 (精密機械工学専攻) 博士課程終了工学博士, 同年工業技術院 機械技術研究所 入所, 同年システム部 バイオメカニクス課 主任研究官
 同年 科学技術庁長官賞第9回研究功績者
 「関節構成体の力学的挙動に関する研究」 同58年 システム部 バイオメカニクス課 課長
 同62年 機械技術研究所所長賞研究業績賞「人工骨・関節に関する研究」平成元年 首席研究官, 平成2年 中国重慶大学顧問教授, 平成2年 通産大臣研究功績賞受賞
 「骨・関節及び人工関節のバイオメカニクス」