

上腕義手における肘継手屈曲機構の力学的解析

Mechanical analysis of elbow flexion in trans-humeral prostheses

敦賀 健志* 松原 裕幸* 小林 俊樹* 昆 恵介*
清水 新悟* 野村 知広* 秋山 正晴* 野坂 利也*

**Takeshi Tsuruga, Hiroyuki Matsubara, Toshiki Kobayashi,
Keisuke Kon, Shingo Shimizu, Tomohiro Nomura,
Masaharu Akiyama and Toshiya Nosaka**

Abstract

In trans-humeral prosthesis, there is an issue that opening and closing operation of the utility hook becomes difficult as the flexion angle of the elbow increases. The elbow pulley unit was designed to resolve this problem. Although previous studies have suggested that the operation of the utility hook becomes easier when using the elbow pulley unit, little effort has been done, so far, to perform realistic investigation using dynamic or quantitative evaluation for the effect of using the pulley unit. The purpose of this study was to evaluate the effect of the elbow pulley unit quantitatively. The traction length, force of the control cable and the transfer efficiency were selected as the dynamic evaluation parameters. The results of this study have demonstrated that the traction length of the control cable decreases when using the pulley unit, as has been suggested by the previous studies. It has been also found that high transfer efficiency is maintained when using the pulley unit. In addition, the present study has demonstrated that the traction force of control cable is increased when using the pulley unit, on the contrary to the prediction of the previous studies. In conclusion, the present study has demonstrated that the use of the elbow pulley unit can assist easier operation of the trans-humeral prosthesis. It also suggests that the use of the elbow pulley unit may not be effective for individuals with upper limb muscle weakness.

1. はじめに

切断とは、四肢の一部が切離された場合を指し、上肢切断者は全国で9.8万人にのぼる(厚生労働省、平成16年度)。上肢切断者が失われた上肢機能の獲得を目指すために用いられる補装具として義手があり、その一つに上腕能動義手がある。これは上腕の切断部にソケットを介して義手を取り付け、切断側肩甲帯及び肩の動き、さらには体幹の動きを力源としてハーネスやケーブルを通じて肘継手の屈曲や手先具の開閉などを行う義手である^(1,2)。この上腕能動義手を使用する際の問題点として、肘継手の屈曲角度が増加するに伴い、手先具の開きが減少し、肘継手最大屈曲位では完全に開くこ

とができないこともあるという点が挙げられる。この原因としては、肘継手が屈曲するにつれて手先具を開閉するケーブルの走路が徐々に肘継手の回転軸から遠ざかる。そのため、肘継手屈曲時は、屈曲に要するケーブルの牽引量に加えて、走路変更に必要な牽引量が必要となり、肘継手固定時にはハーネスとケーブルの間にゆるみが生じてしまう。そして肘継手最大屈曲位ではゆるみが最大となるため、能動手先具を開くために必要な牽引量が増加し、操作がしにくくなると言われている。この現象は特に、上腕短断端者や肩離断者において、関節可動域の減少や筋力低下等の要因から顕著となり上腕能動義手の実用性を損なう欠陥のひ

* 北海道科学大学保健医療学部義肢装具学科

とつとされている。

この問題に対して考案されたのが肘プリーユニットである。これは肘継手軸の外側にプリーを装着し、そこにケーブルを巻き掛けて、肘継手と能動手先具の操作を行うシステムである。これにより、ケーブルの走路が固定化され、ゆるみが改善されることで、肘継手最大屈曲位でも能動手先具の操作が容易になるとともに、肘継手の屈曲動作が肘継手角度によらず、ほぼ変わらない力具合で操作できる、もしくは従来の方式と比較して減少する場合もあると言われている^(2,3)。

しかし、多数の文献にそのような肘プリーユニットの特徴が記されているが、力学的な証明は研究事例が少なく、具体的な数値は明らかにされていない。そこで本研究では、力学的観点から上腕能動義手使用時において、肘プリーユニットによる効率等の違いについて定量的な検証を行った。

2. 上腕能動義手について

2-1. 概要

上腕能動義手とは、上腕切断者が使用する義手であり、義手を構成する各要素には使用者の身体状況に合わせた選択肢があるが、代表的な構成例を図1に示す⁽⁴⁾。まず、使用者に義手を懸垂・支持し身体の動きをとらえるハーネスを装着する。次に、ハーネスの端に取り付けられたハンガーにコントロールケーブルを接続し、上腕部に取り付けたリテーナーおよび、前腕部に取り付けたリフトレバーを経由して、手先具とケーブルをつなぐ。これにより切断側肩甲帯などの動きを力源として、ヒトの肘関節に相当する肘継手の屈曲伸展、および手先具の開閉を行うことが可能となる。また、図1に示すように肘継手の屈曲伸展と手先具の開閉を一本のケーブルで行うものを複式コントロールケーブルシステムと呼ぶ。このような方式においては肘継手が屈曲するにつれてリフトレバーが上腕側に移動し、ケーブルの走路が肘継手の回転軸から遠ざかる(図2、左)。このため本来、肘継手を屈曲するために必要なケーブルの牽引量以上にケーブルを引っ張ることが強いられ、関節可動域の減少や筋力低下等が見られる利用者においては、肘継手の屈曲自体や肘継手屈曲後の手先具の開閉がしにくくなるということが問題とされている。

2-2. 肘プリーユニットについて

従来の上腕能動義手の操作性の改善を目的として開発されたものが肘プリーユニットである。肘継手の軸にプリーを装着し、ケーブルをこのプリーに一巡りさせて手先具に接続する方式である。この方式ではケーブルの走路がプリーによって規定されるため、肘継手の回転軸から遠ざかることが解消される(図2、右)。したがって、肘継手の屈曲に必要なケーブルの牽引量が減少するに伴い肘継手最大屈曲位での手先具の操作が容易となり、また従来の方式と変わらない力具合で肘継手の屈曲動作が可能であるということが義肢装具関連の書籍等に記載されている^(2,3)。

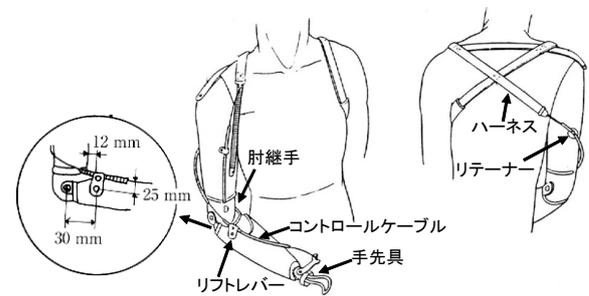


図1. 上腕能動義手の構成図

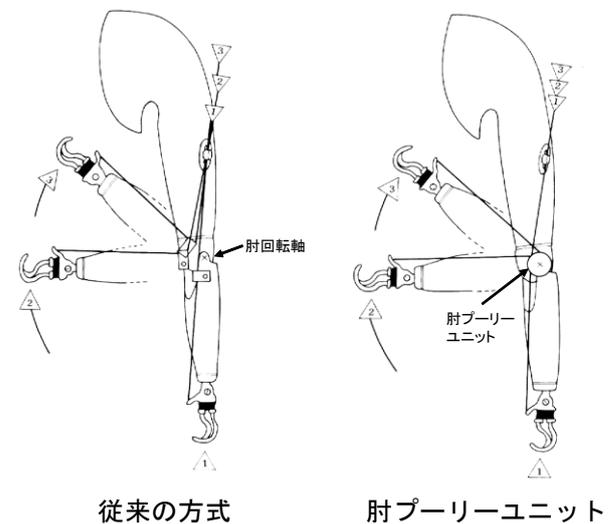


図2. 肘屈曲角度とケーブルの牽引量⁽²⁾

3. 肘プリーユニットの検証実験

3-1. 実験目的

従来のリフトレバーのみを用いた方式と肘プリーユニットとの操作時における定量的比較を行っている文献は見られない。そこで、両者の違いを力学的観点で比較検討することを目的として実験を行った。具体的には、肘継手屈曲に要するケ

ープルの「牽引量」と「牽引力」、さらに上腕能動義手を適合する際にチェックを行う「伝達効率」において比較検討を行った。

3-2. 実験方法

3-2-1. 使用した上腕能動義手について

現在、市販されている肘プーリーユニットは 2 種類あるので、本実験では両者を用いることとした。一つ目は株式会社小原工業製（以下、小原工業製）、二つ目は株式会社近畿義肢製作所製（以下、近畿義肢製）である。小原工業製は従来の方式と同様にリフトレバーと併用するように設計されているが、近畿義肢製はリフトレバーを用いないといった違いがある。

実験では上腕能動義手の機械的特性を計測することから、義手を被験者に装着するのでは無く、アルミ製の部材（misumi 製：HFS8 など）を用いて製作したフレームに固定して実験を行った⁽⁵⁾（図 3）。

実験に用いた上腕能動義手において、上腕部は直径 80mm の塩化ビニールパイプで代用し、アルミフレームに固定した。リテーナーは義手製作法に基づき、成人男性の腋窩部分に近い位置（肘軸から近位 190mm、後方 30mm）に設定し、肘継手には能動単軸ブロック式肘継手 Hosmer 製 E-400 を使用した。

前腕部は本学にある小原工業製サドルと手継手を用いて、一般的な樹脂注型によって作成したものを使用したが、肘継手との接続部であるサドルの四角形の穴が Hosmer 製肘継手の軸より小さかったため、切削し大きくした。

手先具は能動フックを使用し、閉時に用いる力源ゴムは牽引力への影響を考え未使用のものを用いた。

複式コントロールケーブルシステムには、Hosmer 製上腕用ケーブルセット 2250 を使用した。

また、伝達効率の計測の関係上、一般的な樹脂注型によって作成した前腕部を手継手から 50mm の箇所まで切断したものを用意した。

リフトレバーは本来、革製であるが、裂けや折れ、シワなどによる計測値の誤差を減らすため、アルミ製のリフトレバー（厚み 2mm、幅 20mm、アルミ製）を自作して、従来の方式と小原工業製の実験時に用いた（図 4、左、中央）。リフトレバーの位置は、従来の方式では図 1 に示すように肘軸から 30mm とした。また小原工業製においては、肘プーリーユニットとリフトレバーの干渉を避けるため、肘軸

から 50mm とした。

3-2-2. 計測方法

上腕能動義手の操作には再現性を考慮して電動モータ（ORIENTAL MOTOR 製：LM4F10SA-3）を用いてケーブルを牽引した。このモータはラックとピニオンの機構を有し、一定方向に一定速度（10mm/sec）での直動運動が可能である。このモータを手動スイッチにより上下動させた。このモータのラックの一端にフォースゲージ（SHIMPO 製：デジタルフォースゲージ FGP-5）を固定し、フォースゲージの計測部にフックを取り付けてケーブルに接続した。フォースゲージの計測値はアナログ出力を A/D 変換器（株式会社 CONTEC 製：ADA16-8/2(CB)L）を介して、サンプリング周波数 100Hz で計測用 PC に取り込んだ。

計測項目である牽引量、牽引力、伝達効率の具体的な計測方法は以下のとおりである。

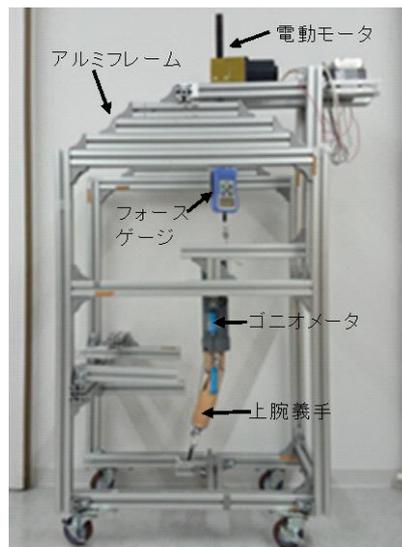
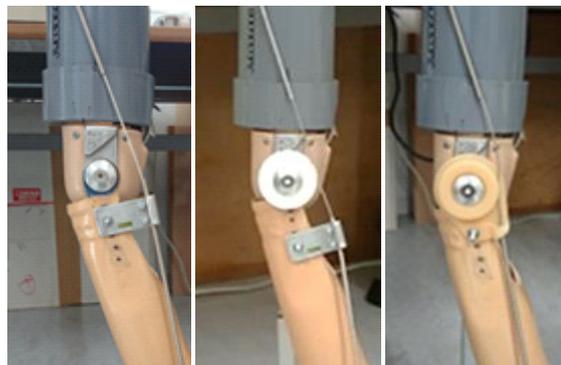


図 3. 実験装置の外観



従来方式 小原工業製 近畿義肢製
図 4. リフトレバーと肘プーリーユニットの取付状況

1) 牽引量

上腕部のリテーナーに固定されているケーブルハウジングの上端を基準とし、そこから牽引によってケーブルがどれだけ移動するのかを牽引量として計測した。肘継手が設定した屈曲角度になるまでケーブルを牽引し、その時の牽引量をノギス（Mitutoyo 製：M 形標準ノギス）により計測した。設定した屈曲角度は 30 度、60 度、90 度、110 度、135 度（最大屈曲位）である。屈曲角度はゴニオメータ（株式会社ディケイエイチ製：2 軸ゴニオメータ M180 型）を用いて計測した。電動モータにより機械的に牽引し、設定角度毎に 5 回ずつの計測とした。肘継手最大伸展位から 30 度になるまで屈曲させ牽引量を計測した後、逐一、最大伸展位には戻さずに次の設定角度まで屈曲させ計測を行い、135 度（最大屈曲位）まで計測した段階で最大伸展位に戻した。

2) 牽引力

肘継手が最大伸展位から最大屈曲位になるまでワイヤーを牽引し、1 回の計測とした。一連の牽引力をフォースゲージにより計測し、同時にゴニオメータにより肘継手屈曲角度も同期計測した。モータにより機械的に牽引し、1 対象 5 回の計測とした。

3) 伝達効率

伝達効率とはコントロールケーブルを介して手先具を操作する際の動力の損失を評価する指標である。手先具を開く際、ケーブルに加えた牽引力を $F1$ [N]、ケーブルを介さずに手先具単体に加えた牽引力を $F2$ [N] とした場合、伝達効率は（式 1）のように表される⁽⁶⁾。

$$\text{伝達効率 (\%)} = F1 \div F2 \times 100 \dots (\text{式 1})$$

まずケーブルに加えた牽引力 $F1$ の計測は、肘継手屈曲角度 0 度、90 度、135 度（最大屈曲位）で行った。肘継手ロック・コントロールケーブルにより肘継手をそれぞれの角度で固定し、さらにアルミフレームを用いて前腕部を固定し前後左右の揺れを抑えた。手先具の開き始めは目視により確認し、計測回数は設定角度毎に 5 回とした。

次に手先具単体に加えた牽引力 $F2$ を計測するため、手継手から 50mm で切断した前腕部をフレームに固定し、手先具の制御レバー先端の穴に 31mm の金属製のリングを掛け、フォースゲージのフック

により牽引し計測した。 $F1$ の計測同様に手先具の開き始めは目視により確認し、計測回数は設定角度毎に 5 回とした。

4. 結果と考察

4-1. 牽引量

図 5 は、肘継手屈曲に要する牽引量を示したグラフである。横軸は肘継手屈曲角度、縦軸は牽引量を表している。近畿義肢製と小原工業製はほぼ同様の推移を示した。肘継手屈曲角度 30 度の時点では 3 種類ともほぼ同様の推移だが、30 度以降からはリフトレバーと肘プリーユニット 2 種類との差が肘継手屈曲角度の増大とともに広がり、肘継手最大屈曲位では、リフトレバーが肘プリーユニット 2 種類の約 2 倍の牽引量となった。

結果より、従来から言われているように、肘プリーユニットを用いることでリフトレバーより牽引量を少なくすることが可能であることが確認された。これは肘プリーユニットによりケーブルの走路が固定化されるため、ケーブルの走路変更による余剰な牽引量が削減されるためと考えられる。そして、肘継手最大屈曲位において、肘プリーユニットはリフトレバーの約半分の牽引量であるので、最大屈曲位での能動手先具の操作が容易になることも特徴として挙げることができると言える。

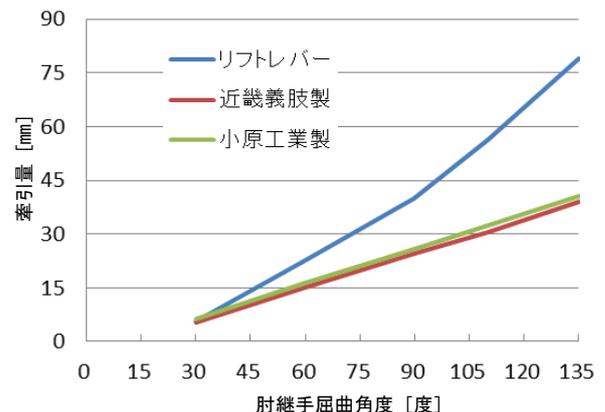


図 5. 肘継手屈曲角度と牽引量の関係

4-2. 牽引力

図 6 は、3 種類の計測対象の肘継手を最大伸展位から最大屈曲位にした際の牽引力を示したグラフである。横軸は肘継手屈曲角度、縦軸は牽引力を表す。近畿義肢製と小原工業製はほぼ同様の推移を示した。肘継手最大伸展位から屈曲角度 30 度ま

では3種類ともほぼ同様の推移だが、30度以降からは肘プリーユニット2種類の牽引力が増大し、リフトレバーの牽引力はほぼ一定となった。

前腕部を屈曲させるのに要する力のモーメントは肘継手最大伸展位から肘継手が屈曲するにつれて増加し、上腕部が水平となる屈曲角度90度で最大となり、再び減少していく(図7)。このとき、肘プリーユニットではワイヤーの走路が一定なので、モーメントアームも一定である。力のモーメントはモーメントアームと力の大きさとの積で表される。よって、前腕部の屈曲に必要な力のモーメントが増加するのに伴い、モーメントアームが一定であれば必要な牽引力も増大すると考えた。

これに対し、リフトレバーではモーメントアームが肘継手最大伸展位から肘継手が屈曲するにつれて増加し、上腕部が水平となる屈曲角度90度あたりで最大となり、再び減少していく(図8)。よって、前腕部を屈曲させるのに要する力のモーメントとモーメントアームの変化が同様の変化傾向であったため牽引力がほぼ一定となったと考えた。

今回の結果から、肘プリーユニットを用いた場合、リフトレバーよりも牽引力が必要だと言える。これは従来から言われていたように肘プリーユニットは肘継手屈曲動作をリフトレバーとほぼ変わらない力具合で操作することはできないということがわかった。

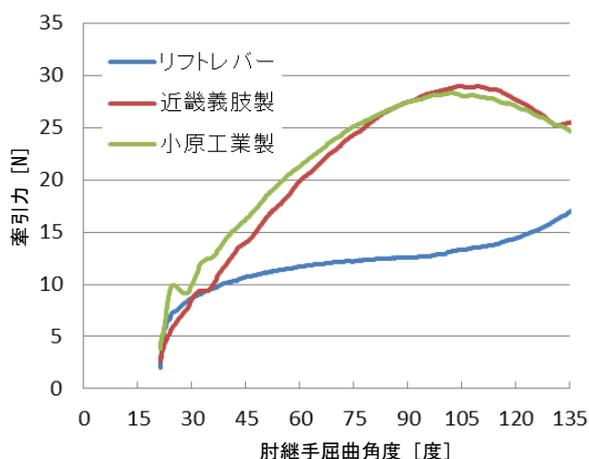


図 6. 肘継手屈曲角度と牽引力の関係

4-3. 伝達効率

図9は、各設定角度における3種類の計測対象の伝達効率を示したグラフである。上腕能動義手における伝達効率の基準は50%以上であることとされており、今回の結果ではその基準を下回るこ

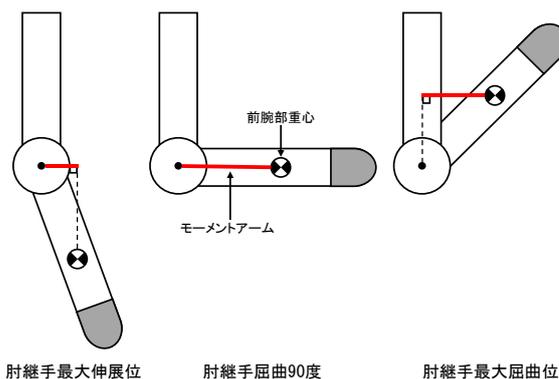


図 7. 肘継手屈曲角度とモーメントアームの関係

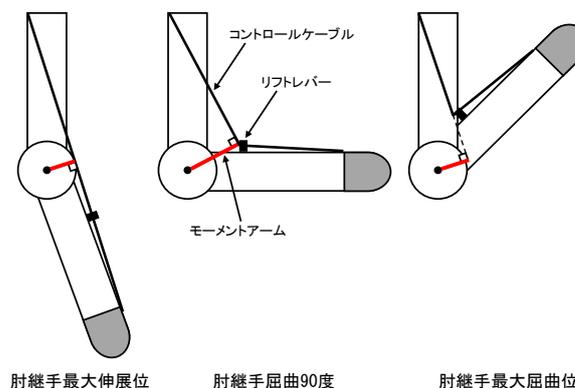


図 8. リフトレバー使用時における肘継手屈曲角度とモーメントアームの関係

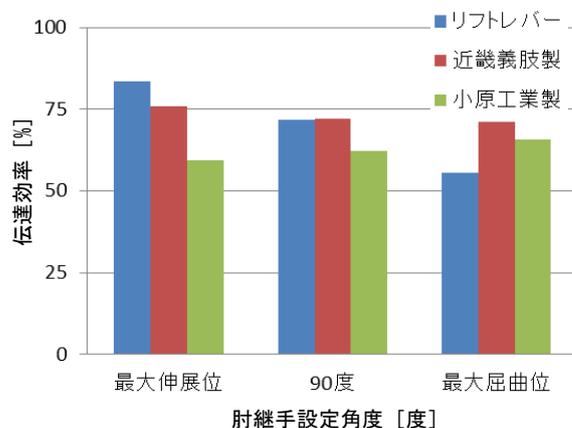


図 9. 各肘継手設定角度における伝達効率

とは全ての条件において無かった。肘継手最大伸展位ではリフトレバーが、屈曲角90度と肘継手最大屈曲位では近畿義肢製が最も伝達効率良かった。また、計測対象毎の推移を見てみると、肘継手屈曲角度が増大するにつれてリフトレバーの伝達効率は下がっていった。反対に小原工業製は上がっていくことが分かった。近畿義肢製は下がってはいるが大きな差は見られなかった。

肘継手最大屈曲位において、肘プーリーユニット 2 種類がリフトレバーよりも伝達効率が高いことから、肘プーリーユニットは肘継手最大屈曲位で、牽引量だけではなく、伝達効率としても操作が容易になったと言える。特に近畿義肢製は、角度変化による伝達効率の変化が少なく、どの角度においても値が高いことから、安定した操作が行え、効率が良いと言える。

5. まとめ

本研究では、複式コントロールケーブルシステムに用いられる肘プーリーユニットがリフトレバーよりも効率が良いのかという点に対し、力学的観点から定量的に検証し、比較することを目的とした。そして、肘プーリーユニットの特徴から牽引量・牽引力・伝達効率の 3 点に着目し、計測を実施した。

計測の結果、肘プーリーユニットを用いることでケーブルの牽引量が低減され、その結果、肘継手最大屈曲位でも能動手先具の操作が容易になることが証明された。しかし、従来、肘継手屈曲動作が肘継手角度によらず、ほぼ変わらない力具合で操作できる、もしくは従来の方式と比較して減少する場合もあるということが特徴として挙げられていたが、牽引力についてはむしろ従来の方式よりも大きな力が必要であることがわかった。そのため、関節可動域が小さい上腕短断端や肩離断の方にとって、上腕能動義手の操作を改善するのに有効な部品と言えるが、筋力低下がみられる場合には有効と言えるか難しいということがわかった。

本研究のように、肘プーリーユニットの特徴を定量的に検証することで、メリット・デメリットを把握し、上腕能動義手製作時に適切な部品選択ができるようになると望ましいと考えている。

参考文献

- (1) 澤村誠志,「切断と義肢」, 医歯薬出版株式会社, 2012, pp.101-189, pp.385-483
- (2) 澤村誠志,「義肢学第 2 版」, 医歯薬出版株式会社, 2010, pp.237-364
- (3) 北山一郎,「適合性および実用性を重視した義足・義手の評価と設計に関する研究」, 神戸大学博士論文, 1998, pp.92-187
- (4) 田澤英二,「義肢製作マニュアル」, 医歯薬出版

株式会社, 2010, pp.135-145

- (5) 堀内広志ら,「能動上腕義手の肘屈曲動作における力学的メカニズムの検討」, 北海道工業大学卒業論文, 2013, pp.21-25
- (6) 日本整形外科学会・他監修,「義肢装具のチェックポイント第 7 版」, 医学書院, 2011, pp.84-119