

関節音の解析に基づく関節疾患の病態推定

長坂 保典*, 舟橋 典克**, 鈴木 宣夫*

Estimation of Knee Joint Diseases Based on The Analysis of The Sounds Recorded from a Joint

Yasunori NAGASAKA*, Norikatsu FUNAHASHI** and Nobuo SUZUMURA*

(Received May 31, 1995)

It is widely known in the field of plastic surgery that some distinctive sounds frequently arise from a joint when the joint moves. Hereafter we call this sound CW (Characteristic Waveform). In this paper we describe the results of analysis of CW and the angle of the knee joint according to both a normal knee and a knee with osteoarthritis, a kind of knee joint disease.

Applying frequency analysis to CW, several characteristics were found. In case of CW which has larger amplitude than $2V (=2m/s^2)$, the including ratio of high frequency was different between the normal knee and the one with osteoarthritis. In the case of average CW, the group which includes unbending the joint only showed the difference of the ratio. Thus we realized that the case of unbending is only useful for the average CW.

Analyzing the angle of the joint regarding the time that CW was detected, some different characteristics were seen depending on the recording conditions. In some conditions, most CWs were detected at start of movement. In other conditions, the acceleration of movement is considerably smaller than others.

Utilizing the current results for clinical medicine is still hard, but with continuous study they may be good indicators in distinguishing normal knees and those with osteoarthritis.

Keywords : Signal Processing, Fourier Transform, Diagnosis Support, Joint Disease

1. はじめに

人間の荷重関節においては年齢と共に関節にかかる負担が大きくなっていくが、特に股関節や膝関節においてその影響が大きい。そのため経年性の関節障害は主とし

て老人において観察される。また若年層であっても体重管理が十分でなく肥満している場合や、関節を酷使する様な労働、スポーツをしている者ではその負担は許容範囲を越えて大きくなる場合があり、膝関節疾患にかかる確率が高くなる。

関節疾患の病状を把握するための一手段として、X線画像による診断が用いられているが、最近ではX線画像

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

**電気工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electric Engineering)

をリアルタイムに CRT 画面へ出力可能なシステムも利用されている。しかしこれらのシステムをもってしても疾患を完全に同定することは容易ではない。

関節音の解析は、関節を動かして発生する音を収録利用するため、X 線診断とは異なり人体への影響がなく何度も反復可能であり、しかも再現性を有する。関節疾患にかかっている場合の関節音は特異的な波形成分を含んでおり、健常者のものとは異なる。このことから、関節音の解析は疾患の程度の推定、今後の治療方法の決定、及び疾患の予知等に対して関節の状態を判断する有効な手段になるものと予想される。また無侵襲の簡単な検査法であるという利点がある。

本研究では膝などから伸曲時に発生する関節音や、関節音と膝関節角度の関係を解析することによって、関節音と関節疾患との因果関係を調べる。最終的には、関節音の解析結果に基づいて関節疾患の病状に関する関節面の変性状態を推定することを目指す。

2. 変形性膝関節症と関節音

変形性膝関節症 (osteoarthritis of the knee, arthritis deformans genu) は中年以降 50 歳代に最も多い代表的な変性疾患である (1)。変形性膝関節症は関節軟骨の破壊から始まる。関節の軟骨は 2mm から 5mm 程度の厚さで、表層は薄い軟骨膜におおわれ、その下に表層軟骨層および成長軟骨層と骨端軟骨層が続き軟骨下組織に移行する。軟骨が摩擦破損すると膨化軟化がみられ、さらに進行すると最終的には骨髄が摩擦破損する。これらの膝の変化が進んでも、一生を過ごして多くは無症状である。痛みや運動障害を生じたときに、はじめて変形性膝関節症として臨床的な治療の対象となる。

屈伸から伸展など一連の関節運動を行った場合、関節からは振動音 (関節音) が検出される。これらは変形性膝関節症となんらかの関係があるとおもわれる波形 (特質波形) と、服との摩擦音等による無関係波形とに分類される。この特質波形の発生原因として、膝関節中で大腿骨と脛骨の間にある関節間隔の減少が考えられる。関節間隔の減少によって大腿骨下部の内側顆、膝蓋骨、脛骨上部の内側顆等の摩擦が増し、その結果として振動が発生する。

3. 収録方法及び前処理

データの収録に際しては図 1 に示すように各装置を接続して行った。

振動ピックアップは加速度型ピックアップを使用した。この振動ピックアップは 20Hz~15KHz の範囲で測定可能で、超小口径かつ軽量である。また膝関節角度を検出するためにゴニオメータを使用した。振動波形および

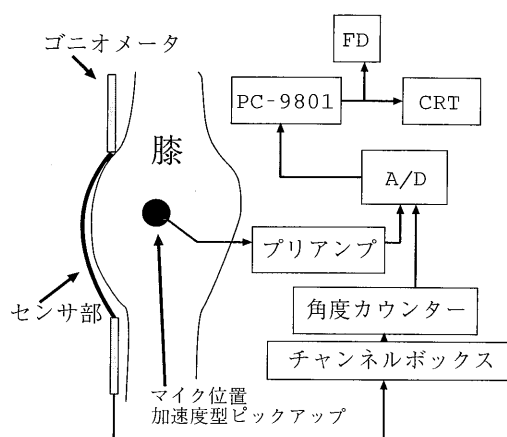


図 1 収録装置構成図

表 1 収録条件

対象		位置		負荷		屈伸	
右足	r	膝蓋骨	p	無負荷	n	能動	a
左足	l	脛骨結節	t	負荷	w	受動	p
		関節内側	m				
		関節外側	l				

角度波形を収録するにあたって、まず被験者を立たせ、膝にゴニオメータと加速度ピックアップを取り付ける。そして、被験者を座らせるか立ったままの状態でも足を屈伸してもらう。このとき、被験者の曲げることのできる範囲で約 3 秒間屈伸してもらう。振動波形の収録は下記の 3 種類の条件で行っている。

- ・被験者が椅子に座り自分で膝関節を曲げられる範囲で屈伸を行う方法
- ・被験者が立った姿勢で自分で屈伸を行う方法
- ・被験者が座った姿勢で他人によって被験者の膝関節を屈伸させる方法

今後、この収録条件を表 1 のように記号の組合せで表示する。この記法に従うと前述の 3 条件の負荷と屈伸の状態は na, wa, np と表すことができる。

収録時間を約 3 秒間に設定したのは、各々の収録データの比較のためにサンプリング周波数 2000Hz で、データ数 6000 個程度が適当であると判断したためである。振動波形データは正常膝については 7 人分、関節症については 11 人分が収録されている。

収録した関節音を振動波形として表示したものを図 2 に示す。振動波形の中には、図 2 中の (a) のように、振幅が大きく周波数の高い波形が時々存在する。この波形を特質波形と定義して、今後この波形を抽出して比較、検討を行う。特質波形を抽出する時に、一人の被験者から収録した 1 回分のデータの中に特質波形がいくつも含

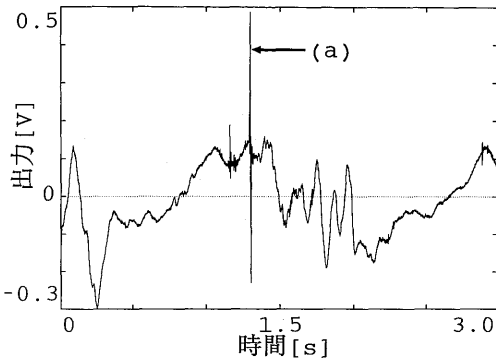


図2 振動波形

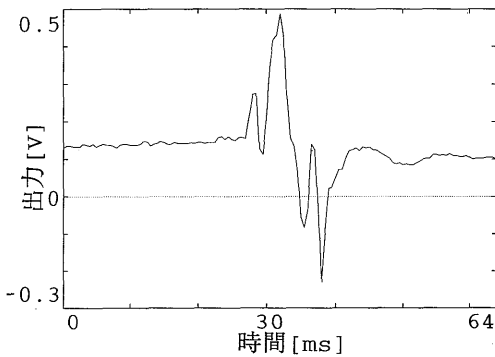


図3 特質波形

まれる場合がある。そのような場合には振動波形の中で一番振幅の大きな特質波形を中心に前後 64point, 合計 128point を抽出する。図 2 の波形から特質波形を抽出した結果を図 3 に示す。抽出した特質波形に対しては以下の 2 種類の操作を施す。

直流分の除去

抽出された波形は直流成分（ドリフト雑音）を含んでいるので、その雑音を除去することにより、解析時の直流成分の影響を取り除くことができる。測定波形を $x(i)$ 、直流成分を除去した後の波形を $y(i)$ とすると、直流成分は次の式による操作で除去することができる。

$$y(i) = x(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) \quad (1)$$

窓関数による雑音の除去

抽出した波形の雑音を除去する際に、特徴のある波形だけを残し、その周りの雑音成分を除去することを考える。このような場合には、フーリエ変換を行った場合に周波数特性上不連続点の付近で突起や振れが生じるギブス現象の影響を減少させるような窓関数の使用が適当で

あると考える(2)。単純な方形窓ではフーリエ級数が急激に打ち切られることになり、上記のギブス現象が生じてしまう。そこで、本研究では、一般化ハミング窓を使用している。一般化ハミング窓は次式で表される。

$$w_H(nT) = \begin{cases} \alpha + (1-\alpha) \cos \frac{2\pi n}{N-1} |n| \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & |n| > \frac{N-1}{2} \end{cases} \quad (2)$$

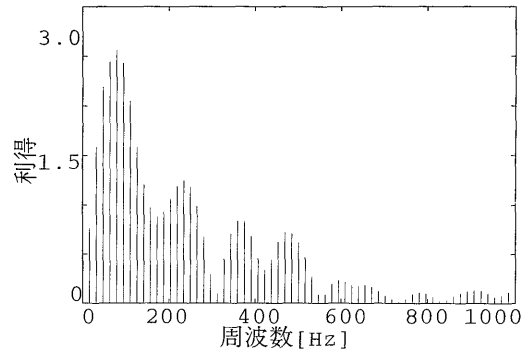


図4 フーリエ変換スペクトル

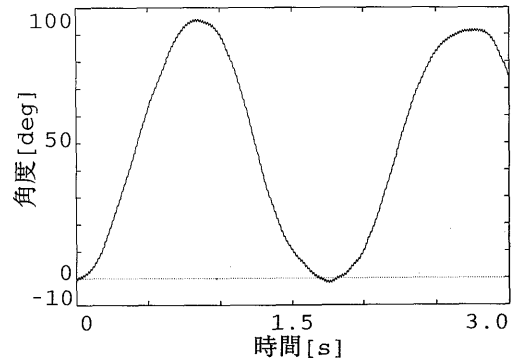


図5 膝角度波形

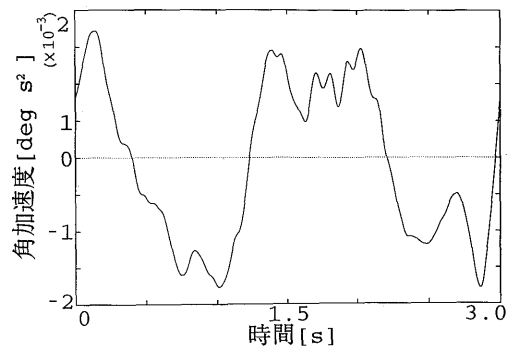


図6 角加速度波形

ただし, $0 < \alpha < 1$ である。 $\alpha = 0.54$ のときハミング窓, $\alpha = 0.50$ のときハニング窓と呼ばれる。

切り出した特質波形に上記の直流分除去と雑音除去の処理を行った後に, フーリエ変換を行った結果を図 4 に示す。

膝関節角度波形を図 5 に示す。図 5 では角度が大きくなると膝を曲げていくことを意味する。膝関節角度波形に対して微分などの処理を施すことにより図 6 の角加速度波形が得られる。

4. 解析結果

前述の処理を施した振動波形, 角度波形について以下の内容で解析を行った。

4.1 振幅の大きな特質波形

特質波形の振幅の大きさが平均的な振幅よりも特に大きなものがまれにある。ここでは振幅の大きさの閾値を $2V (=2m/s^2)$ として, それ以上の大きさの振幅を持つ特質波形を集めて解析を行った。このような特質波形は, 関節症と正常膝とを比較した限りでは波形形状の明確な違いは見られないが, 周波数分析を行うことによって微妙な違いが強調されるのではないかと考えた。比較方法は DFT スペクトルの全体の面積に対する $500 \sim 1000\text{Hz}$ 部分の面積の割合を面積比 r として求め, この値を用いて関節症と正常膝を比較した。面積比 r は特質波形に高周波成分がどの程度含まれているかを示す指標となる。この値が大きければ高周波成分が多く, 小さければ高周波成分が少ないことがわかる。

解析結果を図 7 に示す。関節症と正常膝のそれぞれの場合について個々の結果の分布を縦の並びで表し, そ

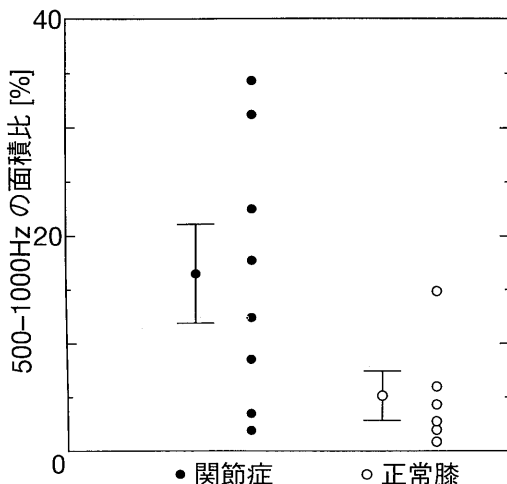


図 7 振幅の大きな特質波形の解析結果

の左に平均値と標準偏差を表示している。この結果から面積比 r の平均値が正常膝と関節症との間である程度違いがあることがわかる。症例が少ないため断定はできないが, 正常膝については値が極めて小さい一方, 関節症では 30% 程度まで広く分布しているという特徴が見られる。ここでの結論として振幅の大きさが $2V$ 以上の特質波形については, 面積比の値が正常膝と関節症とを区別する有効な指標になる可能性があるといえる。

4.2 平均的な振幅の特質波形

平均的な振幅の特質波形についても前述の面積比 r を用いて比較を行ったが, 振幅の大きな特質波形のような違いは見られなかった。それでさらに細かく条件を設定して分類し, それぞれのグループ内で特徴が現れないか調べた。ここでは, 膝を曲げていく時と伸ばしていく時に注目し, 特質波形を二つのグループに分けた。正常膝と関節症の同数のデータから, 一つの振動波形データにおいて特質波形を最大 3 波形抽出した。それらのデータについて 4.1 節と同じように面積比 r を用いて比較, 検討を行った。表 2 は収録条件別の特質波形データ数を表す。振動波形の収録位置は膝蓋骨上部 (記号 p) で統一されている。

結果を図 8, 図 9 に示す。図 7 と同様に結果の分布と平均値, 標準偏差を表示している。なお, pna の結果は

表 2 収録条件別の特質波形のデータ数

pna		pwa		pnp	
正常膝	関節症	正常膝	関節症	正常膝	関節症
12	13	10	13	10	15

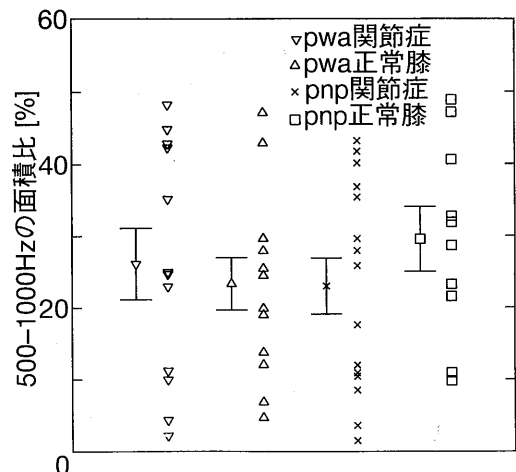


図 8 平均的な振幅の特質波形の解析結果(膝を曲げる時)

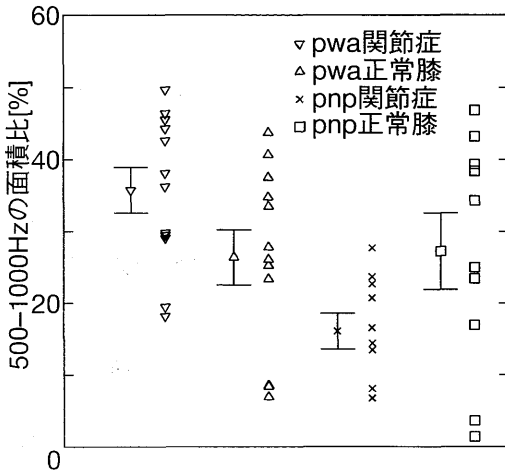


図9 平均的な振幅の特質波形の解析結果 (膝を伸ばす時)

他の2条件の場合とほぼ同じであったので、結果のグラフでは見やすさのため省略してある。

この場合は収録条件によって異なった結果が得られた。図8では関節症と正常膝の面積比 r にはっきりした違いが見られない。これに対して図9では、pwaとpnpで値の大小は逆になるが、ともに平均値に違いが見られる。pwaとpnpでは負荷として体重がかかるか、また膝を能動的に動かすか受動的に動かされるかという点が全く異なるが、膝を曲げていく時にはともに違いがはっきりせず、膝を伸ばしていく時にはともに違いがあるという点は興味深い。膝を曲げていく時と膝を伸ばしていく時とで関節内部でどのような条件が異なるかという点を調べる必要があると考える。

平均的な振幅の特質波形に対する結論は、膝を曲げる過程と膝を伸ばす過程では解析結果が異なり、現在は膝を伸ばす過程で発生する特質波形を調べるのが有効であるといえる。

4.1節の結果にも言えることだが、今回の結果では関節症と正常膝の収録データ数が少ないので、面積比 r の分散が目立つ。その結果平均値による比較では違いがわかるが、分散が大きいため個々の症例の比較では確定的

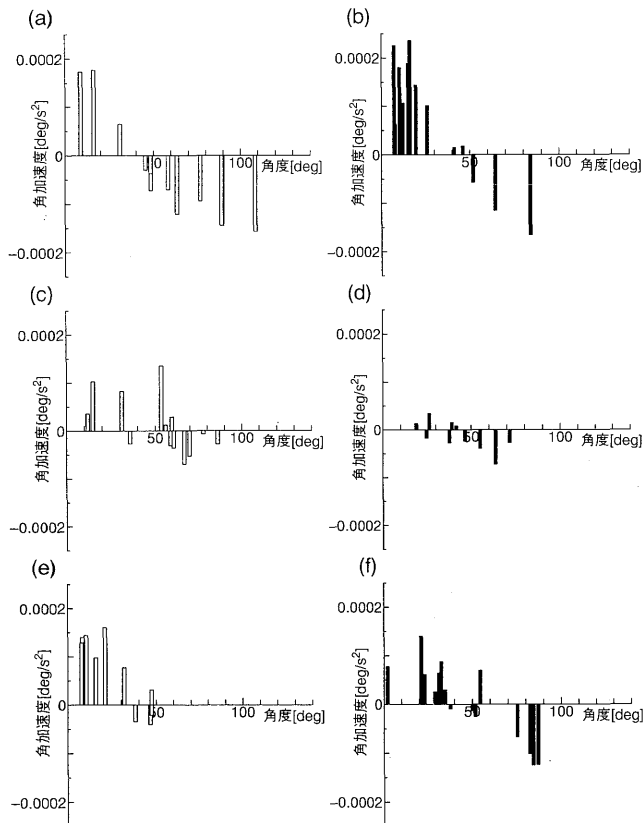


図10 特質波形発生時の角度と角加速度との関係

(a) : pna 正常膝 (b) : pna 関節症 (c) : pwa 正常膝 (d) : pwa 関節症 (e) : pnp 正常膝 (f) : pnp 関節症

な類別ができない。この点に関しては、収録データを増やして解析を行うことにより分散が変化し、関節症と正常膝との面積比 r の違いが今回の結果よりもはっきりすることが考えられる。

4.3 特質波形発生時の角度と角加速度との関係

振動波形を記録する時には同時に膝関節の角度の変化を記録している。このデータをもとにして、特質波形が発生する時の膝関節の角度を調べることによって、特質波形が発生し易い角度の推定や、正常膝と関節症とを比較した場合に角度や角加速度の分布の違いが現れることが考えられる。図 10 に膝関節の角度と角加速度との関係を収録条件別に調べた結果を示す。(a), (b)が pna, (c), (d)が pwa, (e), (f)が pnp の結果で、白い棒グラフは正常膝、黒い棒グラフは関節症を表す。個々の棒グラフは特質波形が発生した時の角度を横軸、角加速度を縦軸にとってプロットされている。膝の可動角度は正常膝では 100 [deg] 程度、関節症では疾患の程度によるが 100 [deg] 以内になる。

pna の結果では、(a), (b)ともに似た傾向を示しており、可動角度のほぼ全域で特質波形が発生している。角加速度についても傾向は似ており、動かし始めと動きが止まる直前は大きな角加速度になっていることがわかる。若干違いが見られるのが動かし始めの角加速度で、(b)では値の大きなものが 2 個ある。これは関節面の変性のために摩擦係数が変化し、動かし始めに大きな力が必要になっている可能性があることを示唆している。また (b)では動かし始めに発生している特質波形が多く、動かし始めの力がかかる時に特質波形が発生し易い可能性がある。

pwa の結果では可動角度の全域で角加速度が小さく、特に (d)ではその傾向が顕著であるという特徴がある。これは負荷として体重がかかっているために、他の収録条件に比べてゆっくりした動きであることが理由と考えられる。広い角度域で特質波形が発生しているのは他の収録条件と同様であるが、動かし始めに特質波形が少ないのが特徴である。

pnp の結果では (e)については全ての特質波形が 50 [deg]以内で発生しているという特徴がある。この点は症例数を増やしてさらに詳しく調べる必要がある。pnp では座った状態で他人が関節を動かすため、関節内の骨への力のかかり方が他の収録条件と異なると考えられる。一方 (f)については pna と似た傾向を示しており、可動角度のほぼ全域で特質波形が発生している。正常膝における特質波形の発生角度の偏りが常に認められるものならば、発生角度が 50 [deg] を越えるかどうかという点が正常膝と関節症を区別する指標になる可能性がある。

5. まとめ

本論文では膝などから伸曲時に発生する関節音や、関節音と膝関節角度との関係を解析することによって、関節音と関節疾患との因果関係を調べた結果を示した。

この方式では、関節を動かした時に発生する音を収録利用するため、X 線診断とは異なり人体への影響がなく何度も反復可能であるという特徴がある。また再現性を有するという利点もある。関節音の解析は疾患の程度の推定、今後の治療方法の決定、及び疾患の予知等において関節の状態を判断する有効な手段になるものと期待される。

解析は 2 種類の方法で行い、正常膝と関節症との間でのどのような違いがあるか調べた。特質波形を周波数分析した結果では、振幅が 2V ($=2\text{m/s}^2$) 以上の特質波形では高周波成分の含まれる割合が異なることがわかった。振幅が 2V 以下の平均的な特質波形では、全ての波形と一緒に解析した場合明確な特徴は現れなかった。それで膝を曲げる場合と伸ばす場合に分けて解析した結果、性質が異なることがわかった。膝を伸ばす場合に特徴が現れたので、現在は膝を伸ばす過程で発生する特質波形を調べるのが有効であると考ええる。

次に特質波形と膝関節の角度との関係を調べた。収録条件別に分類して調べた結果、各々の収録条件で異なった特徴が見られた。pna の結果では、特に関節症で動かし始めに発生している特質波形が多いという特徴が見られた。pwa の結果では可動角度の全域で角加速度が小さく、特に関節症でその傾向が顕著であった。また動かし始めに特質波形が少なかった。pnp の結果では正常膝については全ての特質波形が 50 [deg] 以内で発生しているという特徴があった。これらの特徴は直ちに診断に利用できるとは考えられないが、今後検討を進めていけば関節の変性状態を示すような何らかの指標として利用できるようになる可能性があると考ええる。

現在はまだ関節症と正常膝ともに収録データ数が少ない。その結果平均値による比較では違いがわかるが、分散が大きいため個々の症例の比較では確定的な判断ができないという問題がある。この点に関しては、収録データを増やして解析を行うことによりデータのばらつきが小さくなり、正確な結果が得られると考える。症例数を増やしての更なる解析が必要である。

参考文献

- 1) 泉田重雄, 今井望, 矢部裕:「必修整形外科学」, 南江堂, 1985.
- 2) 樋口龍雄:「ディジタル信号の基礎」, 昭晃堂, 1992.