

# 身体知の解明を目指して

## Towards Elucidation of Physical Skills

古川 康一\*<sup>1</sup> 植野 研\*<sup>2</sup> 五十嵐 創\*<sup>1</sup> 森田 想平\*<sup>1</sup> 尾崎 知伸\*<sup>1</sup> 玉川 直世\*<sup>1</sup>  
 Koichi Furukawa Ken Ueno So Igarashi Souhei Morita Tomonobu Ozaki Naoyo Tamagawa

\*<sup>1</sup>慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科 Graduate School of Media and Governance, Keio University  
 \*<sup>2</sup>慶應義塾大学 SFC 研究所 Keio Research Institute at SFC

In this paper, we propose a research area which aims at elucidating physical skills. We include such skills as playing instruments, dancing and playing sports in our target domain. We describe human movements in terms of kinematics and kinetics for modeling physical skills and measure motions and muscle activities with a motion capturing system and an electromyogram, respectively. We present several rules for playing the cello which we discovered by carefully observing performance data and considering human kinematics and kinetics. Then, we represent probabilistic relationships between motions and muscle activities by Bayesian networks to infer muscle activities from motion data only. Since muscle activities determine motions together with gravity and posture, such inference corresponds to solve an inverse problem of extracting skillful movements from motion data. Then we define related research topics in cognitive science, brain science, sports medicine and bio-mechanics. We finally suggest possible future work to be done.

### 1. はじめに

筆者らは、人間の知的活動の一表現としての身体知に注目して、とくにチェロの演奏技法の解明を進めてきた。それは、著者の一人がチェロを演奏し、その技術レベルの向上を如何にして図ればよいのかを模索していただけでなく、Virtuoso と呼ばれる名手たちによる驚くべき技巧を目にする度に、その秘密を解き明かしたい、と考えたからである。

そのような高度なスキルは、演奏ばかりでなく、スポーツ、囲碁や将棋などのゲーム、学問など、あらゆる知的活動に見ることが出来る。脳科学の発展により、それらのスキルが訓練によって脳内にプログラム化された結果であることが分かってきている。とくに、大脳と小脳の連携によって、スキルの学習および発現がなされていることは、いまや自明である。すなわち、そのような訓練を受けた人と、受けていない人は、脳の構造および働きが異なっているわけである。

我々は、脳科学の側面ではなく、筋骨格系の力学および制御の観点から、スキルの解明を試みることにした。我々が取り上げたのは、筋電図およびモーションキャプチャリングである。また、取り上げた課題は、チェロの右手による運弓動作である。それは、運弓動作が弦楽器の演奏において直接音を出すことに関与し、高度な技術を必要とするからである。中でも、弓の返し、および弦移動の二つの課題に着目した。

これまでの研究の結果、姿勢、および筋肉の使い方に関するいくつかの規則を発見した。その詳細は次々節で述べるが、これらの研究から、我々はスキルレベルが姿勢、および筋肉の使い方によって決まることを経験的に学んだ [13, 16]。それは、力学に照らして考えれば妥当な結論である。ここで姿勢は二重の意味で重要である。第 1 に、重力が筋力と同様、運動に対する力の源泉となるが、重力の影響は姿勢によって左右される。第 2 に、筋力を運動に利用する際に、姿勢によって筋力の利用効率が左右される。スキルレベルを考える際にもう一つの重要な軸は、時間軸である。すなわち、時間的に変化する課題に

じて、最適な姿勢および筋肉の活動パターンを生成していくことが、高度なスキルの実現につながると考えてよい。

このことは、見まねによるスキルの獲得の限界を示唆している。見まねによるスキルの獲得は、川人らの研究 [5] によってその重要性が認識されているが、我々はそのアプローチを超えた目標を狙っていると考えている。

### 2. 運動学と運動力学

前節で述べたように、スキルレベルを決めるのは、課題に即して如何に迅速に最適な姿勢を取り、如何に合理的に各筋肉を活動させるかであると考えられる。そのため、時間軸に沿った姿勢および各筋肉の活動状況を把握することがモデル化にとって本質的である。ところで、技巧的な運動を阻害する要因としては、筋肉間の相互干渉が挙げられる。相互干渉は、具体的には「力が入っている」という現象となって現れる。しかしながら、もし全身の力を抜いてしまうと、くらげのように立っていることも出来なくなってしまう。重要な点は、不必要な力を抜くことである。そのため、ある時点で相互干渉を起こしている筋肉群があるか否かを把握することが重要となる。また、どのようにして、時間的に変化する課題に合った姿勢および筋肉群の活動パターンを瞬時に選ぶかが問題となる。これらは、厳密な力学的考察よりも、むしろ定性的にある力学状態になっているかどうかを調べればよい。そのような考察のための運動力学をここでは定性運動力学と名付ける。たとえば、体の軸の並進運動と軸の周りの回転運動を例にとると、もし作用点が軸よりも後方にあれば、軸の並進運動は作用点を引き寄せ、その結果、回転運動を引き起こす力となるが、軸より前方にあればそうはならない。この考察も、必ずしも厳密解を必要とするわけではないので、定性運動力学の問題と考えられる。これは、素朴物理学の一種と考えて良い。もう一つの例は、振り子運動の周期である。腕の振りを振り子運動として捉え、その周期を支点からの距離として考えるのは意味がある。微少な振幅の場合、単振り子の周期は、 $2\pi\sqrt{l/g}$  となるが、これを計算すると、 $l \approx 0.25\text{m}$  のとき周期は約 1 秒となり、 $l \approx 0.06\text{m}$  のときそれは約 0.5 秒となる。このことは、速い曲を演奏するときは振り子長を極端に短くしなければならないことを意味する。後

連絡先: 古川康一 (email: furukawa@sfc.keio.ac.jp), 慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科, 〒252-0816 藤沢市遠藤 5322, Tel:0466-47-5000 ext.53235, Fax:0466-47-5350

者は、手首から人指し指の付け根程度の距離である。ここでの「定性」性は、腕のインピーダンスの調節や、手と肩を近づける姿勢を取ることによる実効的な振り子長の短縮手段と、それによる感覚的な説明に現れる。他にも、体全体の回転軸と重心の位置の相対関係、およびそれから派生する偏芯コマのような動きも、定性運動力学のテーマと考えられる。

これに関連して、複合運動での相互干渉の回避問題を考察しよう。たとえば、弓の横方向の動きと同時に移弦などによる縦方向の動きが必要となった場合、もしそれらを実現するのに同じ箇所にある筋肉群を使っていた場合、その二つの動きは相互干渉を起こす可能性がある。たとえば、横方向の動きが上腕三頭筋を主動筋として使っていて、同時に発生している縦方向の動きがそれと拮抗する上腕二頭筋を主動筋とする場合、その二つの運動は完全に相互干渉を起こしてしまう。我々が必要としているのは、如何にそのような相互干渉を防ぐかである。我々が得た発見的な知識は、「横方向の動きは上腕筋で行うが、縦方向の動きは背筋で行う」、というものである。このようなノウハウが、相互干渉問題の解と考えられる。考慮すべき複合運動としては、上の例のようなある時刻での二つ以上の基本動作の組み合わせだけでなく、時間軸上で連続して起こる課題間での相互干渉もありうる。すなわち、相互干渉は、時空間上で考えなければならない。著者等は、複合運動の相互干渉問題が制約充足問題として形式化できることを示した [14]。すなわち、ある筋肉群に対して、それらの活動状態に制約条件を導入する。その例としては、上に述べたような拮抗筋対の同時活性化が挙げられる。制約条件としては、関節可動域もその一つと考えられる。問題は、与えられた課題を、制約条件を満たしつつ達成することである。そのためには、各基本運動を実現するのに複数の方法を習得しておく必要がある。そうすれば、制約条件を満たす演奏法を見出す可能性が生まれてくる。これらの制約条件の形式化には、soft constraint のような制約の強さの導入が有効であろう。

運動のメンタルモデルを考慮に入れると、複雑なルールでは実際の演奏時にその採用が困難になってくる。そのため、一纏まりの運動をできるだけ単一の原理で行うことが重要になる。たとえば、重心が運動中に移動する場合、それを計算できなければ運動を予測できなくなり、筋肉による運動制御が困難になる。具体的には、回転軸と重心が離れた姿勢で演奏を行うと、偏芯コマのように重心が変動してしまい、演奏を阻害することがよく見られる。これを回避するためには、重心の変動を伴わない演奏法を採用しなければならない。もう一つの例としては、左手のポジション移動がある。初心者の場合、ポジション移動は 4 度音程程度の狭い範囲で練習する。それは、それ以上のハイポジションの演奏が極端に難しくなるからである。ところが、それに慣れてしまうと、ポジション移動の動きが狭い範囲に最適化してしまい、より大きな動きに適さなくなってしまう。大きな動きは大きな筋肉を使わなければならない。それは、背中の筋肉である。もし、このことが分かると、狭い範囲のポジション移動も、背中の筋肉を使って行うことができる。そうすると、同じ原理でポジション移動が可能になる。

最後に、体格や力などの個人差の問題を考慮しなければならない、という問題が残っている。体格や力の違いによって、場合によっては、最適なモデルが異なることもあり得る。この問題は困難であるが、定性運動力学によるアプローチは、そのモデル化に体格パラメータを導入することにより、その扱いが可能となると予想される。また、帰納論理プログラミングなどの関係学習の枠組みを使うことにより、体格別の最適なスキルを抽出する可能性が残されている。

### 3. 重要な発見

これまでの研究成果として、幾つかの重要な発見を行った。本節では、それらの発見について報告する。

(1) 関節のしなやかな動きは、その関節の一つ以上手前の関節を動かすことによって実現する。すなわち、二つ以上手前の筋肉群を用いる。具体例は、手首のスナップ運動である。それは、チェロの弓の返しや、ボール投げなどに見られる運動であるが、上の規則は、その運動を行うのに前腕にある手首を動かすための筋肉を使わずに、それより体幹に近い部位、すなわち上腕、あるいは背中の筋肉を使うべきであることを主張している。その中で、とくにどの筋肉を使えばよいのかは、それぞれの課題によって異なると考えられる。たとえば弓の返しの場合、意識的に上腕を使うことにより、艶のある、しっかりした音を出すことが出来る。場合によっては、鞭のように、力を背中から始まって、肩、肘、手首、指に至るまで順次伝達することによって、よりしなやかな運動が実現できるものと思われる。これは、ここで述べた規則を体幹から指先に順次適用して実現されると考えられる。すなわち、この規則は鞭運動の原理を与えていると考えられる。そのとき、運動の位相のずれも重要である。すなわち、腰、肩、肘、手首、指の各関節の運動は、その加速度のピークの位相が順次ずれていくと考えられる。実際、この現象は、これまでの観測データによって裏づけられている。より詳細に見ると、テンポの違いによって、どこから先が鞭運動になるのかが異なってくる。それは、振り子運動での周期とも関係しているが、前節で述べたように周期が  $1/2$  秒の振り子長は 6cm なので、実際の鞭運動は、肘 - 手首 - 指の間でのみ観測される。

(2) 足を引いて背筋を伸ばし、身体の前後の静的バランスを取る。体の前後方向の静的バランスは、腰を中心とした回転運動を円滑にするために不可欠である。もし重心がその回転軸から大きく外れていると、偏芯コマのように、大きくぶれながら回転することになる。チェロの運弓動作は、移弦やスタッカートなどに見られる腕の前後方向の動きと、同一弦上のロングトーンなどに見られる腕の左右方向の動きを組み合わせでなされるが、その動きにより体幹の回転運動を引き起こし、この問題が発生する。もし回転軸上に重心があれば、その回転はぶれを伴わないスムーズなものとなる。そのためには、足を体に引き付けて背筋を伸ばした姿勢をとればよい。さらに、腕の振りは出来るだけ体の近くで行う。

(3) 腕の左右方向の運動と前後方向の運動を異なった筋肉群により駆動する。腕の左右方向の運動は、主として上腕二頭筋、三頭筋の拮抗筋を使って調節しながら行うが、前後方向の運動は、その動きを阻害しないように、背中の筋肉を用いて行えばよい。これは、前節で述べた、複合運動の制約充足問題の解の例である。

もちろん、この規則はデフォルト規則であり、より厳しい条件では使えない。それは、高速に二つの弦を往復しながら、弓を返すような課題の場合である。このときには、上腕によって弓の運動面を固定し、手首を上下に振らせることが必要となる。そうすると、弓の返しに必要な手首の左右方向のスナップ運動が阻害される。このときには、指を使って弓の返しを行わなければならない。

(4) 左手のポジション移動は、背筋によって駆動する。左手の

動作には、指による弦の押さえ、ピブラート、およびポジション移動がある。このうち前二者は前腕筋および上腕筋によってなされるが、ポジション移動は動きが大きいので、より大きな筋肉を使った方がよい。また、制約充足問題を考える上でも、腕以外の筋肉、すなわち背筋を使うことが推奨される。

#### 4. 身体知のモデル化および自動抽出

身体知はエキスパートシステムにおける専門知識 (expertise) のように暗黙知であり、その抽出は困難である。エキスパートシステムの開発において、expertise の抽出は、当初はインタビュー法と呼ばれる手法によって行われた。それは、専門家にインタビューして、専門的知識に基づく判断の根拠を問いただし、ルール化する、という手法である。そのような方法により、特定領域における医療診断システムの開発などが行われた。しかしながら、生産性の低さ、品質の良いルールを抽出することの困難性などから、そのアプローチは実用性を失い、エキスパートシステムの開発自身が先細りとなっていった。それに代わって登場したのが、データからのルールの抽出手法である。そして、その流れが、今日のデータマイニングの流れにつながっていったと言えるであろう。

一方、楽器の練習においては、教師は、生徒の演奏を見て、その都度適切な指示を与えて、生徒の欠点を修正して、より良い演奏技術の獲得を支援している。身体知を expertise と見なせば、身体知の獲得は、インタビュー法、およびデータマイニング法の二通りが考えられる。我々は、より科学的なアプローチを目指して、データマイニング法を追求している。

これまでも、前節で述べたように、幾つかの重要なルールを発見してきたが、その発見は、主として力学的考察に基づくものである。それらのルールについての信頼性の検証は、筋電図およびモーションキャプチャリングデータの分析を通して、現在進めており、それらのルールの妥当性を示す結果を得ている。

我々が狙っている身体知の自動抽出のための枠組みとしてとくに注目しているのは、関係学習が可能な帰納論理プログラミング [2, 1] および多くの誤差を含むデータからの知識抽出手法であるベイジアンネットワーク [7] の二つの技法である。

ベイジアンネットワークによる身体知のモデル化の目的は、二通り考えられる。第1は、ある水準に達した熟練者の演奏モデルとアマチュアのそれを別々に構築し、その相違を明らかにすることである。あるいは、熟練者の通常時の演奏モデルと、時たま陥るスランプ時の演奏モデルとを比較して、スランプの原因を特定するのにも使いたい。そのためには、ベイジアンネットワークの構築問題に取り組みなければならない。また、モデル間の相違を主張するためには、モデル自身の信頼性、およびモデル間の差の有意差検定などを論じるための方法論を必要とする。

データマイニングによる身体知のモデル化の一手法に、「行動のクローン化」(behavioral cloning) が知られている [9, 11] が、そのターゲットは、熟練者の行動を真似るクローンプログラムの生成である。それは、ルールの形で得られる。もし、そのルールが適切なロボットの制御プログラムとして組み込まれば、まさに行動を真似るロボットが実現できることになる。実際には、熟練者の行動パターンを示す定性モデルの構築を行う。これらのモデルの構築の際に、2. で述べた定性運動力学を利用することが可能である。

本研究の狙いの一つは、このような定性モデルと、ここで展開しているベイジアンネットワークによる確率モデルを統合して、

定性確率モデルを構築することである。定性モデルは、物理システムの定性的な変化を記述するモデルであり、物理システム内の構成要素間の物理的因果関係に基づいて、その変化の可能なパターンを記述する。一方、ベイジアンネットワークが表現する結合確率分布は、必ずしも物理的因果関係に基づく関連だけを扱うものではないが、ヒトの四肢のような物理系の各構成要素間の事象は、物理的因果関係としても解釈できる。この両面を同時にモデル化する手法を目指したい。

ベイジアンネットワークによる身体知のモデル化の第2の目的は、運動学的データからの運動力学的モデルの推定である。すなわち、動きのデータから、実際にどこどここの筋肉を使っているのか、また、重力がどのように利用されているのかを推定するわけである。もし、あらかじめ演奏の際の運動学的データと、重力を含む運動力学的データから、精度の良いベイジアンネットワークを構築できれば、そのような推定は原理的に可能であると考えられる。

本研究を推進するためには、ベイジアンネットワークによる身体知のモデル化手法や、そこでの推論手法の開発が必要となる。ベイジアンネットワークによる身体知のモデル化は、いろいろ考えられ、未だ決定的なモデルは出ていない。我々はこれまでの考察で、運動学、および運動力学に沿ったベイジアンネットワークを提案してきた [3]。そこでは、関節の位置、角速度などの運動学的データを表現するノードと、筋肉の活動レベルや重心の位置などの運動力学的データを表現するノードによって、ベイジアンネットワークが作られるのが基本である。その詳細については、論文 [3] を参照されたい。

#### 5. 本研究の広がり

本研究が直接波及効果を及ぼすと考えられるのは、スキルの自動獲得のためのデータマイニング技術そのものである。我々は前節で述べたように、ベイジアンネットワークによるスキルの自動獲得を目論んでいるが、既存の手法だけでその目的が達成されるとは考えていない。本研究を推進する過程で、より強力なモデル化・解析手法が必要となるであろう。我々のドメインは時系列データの解析が必要となり、データの前処理として、segmentation が重要になる [6, 15]。また、モデル化の側面では、ダイナミックベイジアンネットワークを使う必要がある [8]。しかし、佐藤らによって提案された PRISM [10] などの、さらに強力な確率論理プログラミングの枠組みを使うことになるかと予想している。また、アクション言語などの利用も必要となるであろうと予想される。この分野は現在も研究が進行中であるが、本課題は、それらの研究に対する適切な動機付けを提供するものと考えている。

一方、スキルの獲得過程を考えると、認知科学での主要テーマである「熟達」に密接に関連する。何人かのプレーヤーを追跡調査することにより、スキルの定性運動力学モデルの理解が熟達過程にどのような影響を及ぼすかを調べることが可能であろう。

脳科学の分野では、運動プログラムの脳内表現を特定する問題は、大変興味深い。とくに、反射運動の随意運動への組み込みや、時系列的な運動プログラムの実行メカニズムの解明は、脳情報処理の解明に多大な貢献をするであろう。ただし、これがここ数年で明らかになるとは思われない。運動の脳内モデルとしては、川人らの研究 [5] が知られているが、本研究はその延長上に位置づけることが可能であろう。

スポーツ科学との関連は、ほぼ自明である。とくに、テニスやゴルフなどの腕を使う球技は、その姿勢や腕の動かし方に

多くの共通点があるからである．とくに、鞭運動および回転運動に関する知見は、多くのスポーツに直接応用が可能である．また、スキルの自動獲得のアプローチも、応用が可能であると思われる．ダンスなどのパフォーマンスアートへの応用も同様である．

運動に伴う疲労の分析やその回避方法の追及なども、関連テーマと考えられる．スポーツ医学では、この点についての研究が盛んであるが、不適切な姿勢、あるいは拮抗筋の多用による疲労などのアプローチが考えられる．Thiemらは、左手の運動に着目した疲労回避の練習法についての解析を行っている[12]．この研究は、示唆に富んでおり、我々の今後の研究に重要な指針を与えるものと思われる．

新たな演奏技法や練習方法の提案など、演奏家の育成にも貢献できると考えている．この方向での展開には、職業演奏家との共同研究が不可欠である．近い将来、音楽学校が、センサーを使った科学的な訓練方法を取り入れることになるであろう．

人工知能の分野では、ロボットの柔軟な制御を行う新たな手法の提案に結びつくかもしれない．また、チェロを演奏するロボットも、出現するかもしれない．

## 6. 今後の課題

我々は、スキルレベルが姿勢、および筋肉の使い方によって決まることを経験的に学んだが、その科学的な立証を行うのが、身体知の解明の主な目的である．そのためには、運動学、運動力学に基づく考察をさらに深めなければならない．とくに、定性運動力学は、スキルのモデル化にとって、最も重要な役割を果たすものと考えられる．また、身体知の自動獲得のためには、データマイニング、とくにベイジアンネットワークによる問題の表現、シミュレーション、および動きからの筋肉活動パターンの推定の技術を確立しなければならない．この技術は、筋肉の活動パターンから動きを導く問題の逆問題を解くことになり、その波及効果は計り知れない．

本テーマは、上に述べた中核技術の周りに、幅広い展開が可能である．その展開を支える中心理念が「スキル」の追及である．これまでの人工知能研究は、思考や言語処理などの、主として大脳が関与している情報処理に焦点が当てられてきたが、筋骨格系が関与するスキルの発現は、それらの活動に劣らず知的であり、複雑であるので、人工知能の研究のターゲットとしてふさわしいと考えられる．脳科学の分野で、伊藤[4]は運動に着目している．それは、脳の情報処理の解明にとって、言語処理などに比べて、可観測性などの観点から、より容易であると考えられるからである．人工知能研究にとっても同様のことが言える．

関連テーマを含む本テーマの全体を設計する作業は始まったばかりである．今後、関連研究者とともに、より整合性のある計画を立案していく必要がある．また、その一環として、ビジネスモデルの展開も考慮に入れたい．さらに、海外研究者との連携も図ってゆきたい．

謝辞: 本研究を進めるにあたり、産業総合研究所の本村陽一氏との議論が大変有効であった．同氏に深く感謝したい．

## 参考文献

[1] K. Furukawa, A Framework for verbalizing unconscious knowledge based on inductive logic programming, In K. Furukawa, D. Michie, and S. Muggleton (eds.), Machine Intelligence, vol.15, Oxford Press, pp.18-24, 1999.

[2] 古川康一, 尾崎知伸, 植野研: 帰納論理プログラミング, 共立出版, 2002 .

[3] 五十嵐創, 植野研, 尾崎知伸, 森田想平, 古川康一: ベイジアンネットワークによるチェロ演奏スキルモデリング, 人工知能学会人工知能基礎論ならびに知識ベースシステム研究会「アクティブマイニング」合同研究会資料, pp.1-6, 2003.

[4] 伊藤 正男: 脳の不思議, 岩波書店, 1998.

[5] 川人 光男: 脳の計算理論, 産業図書, 1996.

[6] 大崎 竜太, 嶋田 光臣, 上原邦昭: 速度に基づく切り出しとクラスタリングによる基本動作の抽出, 人工知能学会誌, Vol.15, No.5, pp.878-886, 2000.

[7] S. Russell, and P. Norvig: Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice Hall, 1995. (古川康一監訳, エージェントアプローチ人工知能, 共立出版, 1997.)

[8] S. Russell, and P. Norvig: Artificial Intelligence: A Modern Approach, Second Edition, Prentice Hall, 2002.

[9] C. Sammut, S. Hurst, D. Kedzier, and D. Michie: Learning to fly, In D. Sleeman, and P. Edwards, eds., Proc. 9th International Workshop on Machine Learning, pp.385-393, Morgan Kaufmann, 1992.

[10] T. Sato and Y. Kameya. PRISM: a language for symbolic-statistical modeling. In Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'97), pp.1330-1335, 1997.

[11] D. Suc, and I. Bratko: Qualitative trees applied to bicycle riding, Linköping Electronic Articles in Computer and Information Science, vol.5, 2000.

[12] B.Thiem, D.Greene, S.Prassas and M.Thaut: Left Arm Muscle Activation and Movement Patterns in Cellists Employing a Playing Technique Using Rhythmic Cuing, Medical Problems of Performing Artists. 9(3):89-96, 1994.

[13] K. Ueno, K. Furukawa, M. Nagano, T. Asami, R. Yoshida, F. Yoshida, and I. Saito: Good posture improve cello performance, Proc. 20th Annual International Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS98), vol.20, pp.2386-2389, 1998.

[14] K. Ueno, K. Furukawa, and M.Bain: Motor skill as dynamic constraint satisfaction, Electric Transaction of Artificial Intelligence (ETAI), Linkoping University Electronic Press, 2000.

[15] 植野研, 五十嵐創, 古川康一: チェロにおけるスケール演奏時の動作分析, 第 21 回日本バイオメカニズム学会学術講演会予稿集, pp.113-114, 2000.

[16] 植野研, 五十嵐創, 古川康一: 楽器演奏における関節間協調動作の役割, 第 22 回バイオメカニズム学会学術講演会予稿集, pp.25-26, 2001 .