

地盤・建物振動特性の現地簡易評価のための常時微動計測分析システムの開発

DEVELOPMENT OF MICROTREMOR MEASUREMENT AND ANALYSIS SYSTEM FOR ON-SITE EVALUATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF BUILDINGS AND GROUND

飛田 潤 -----*1 福和伸夫 -----*2 佐武直紀 -----*3
太田賢治 -----*4 小出栄治 -----*5

Jun TOBITA ---*1, Nobuo FUKUWA ---*2, Naoki SATAKE ---*3,
Kenji OHTA ---*4 Eiji KOIDE ---*5

キーワード

常時微動, 地盤卓越周期, 固有周期, 減衰, 共振, H/V スペクトル, RD 法

Keywords

Microtremor, Predominant period of ground, Natural period, Damping,

Resonance, H/V spectrum, Random Decrement Method

A portable microtremor observation and analysis system has developed for on-site evaluation of dynamic properties of buildings and ground. The system can evaluate the soil period from the H/V spectrum and the building period and damping using the Random Decrement (RD) method. The software is designed with real-time data processing and easy operation using a graphical user interface (GUI). All of the system components such as sensors, a touch-panel PC, batteries and cables are packed in a carry case. The system is useful especially for easy evaluation of existing buildings with possible resonance which are important for structural design of seismic retrofit.

1. はじめに

近年の強震記録の充実や地盤調査結果と強震動予測手法の進展などにより、堆積平野の深部地盤構造による大規模地震時の長周期地震動の特性が明らかになり、高層建物など長周期構造物との共振の可能性が改めて重要視されている。比較的初期の高層建物では、設計時にサイト地震動特性を十分考慮していないこと、一方で建物応答を左右する固有周期や減衰については、設計時の計算値・設定値と建設後の特性が必ずしも一致せず、特にS造高層建物の減衰は実際にはかなり小さい場合があることなどが知られている¹⁾²⁾。従って長周期地震動に対する継続時間の長い応答の特性を正確に評価できていない可能性があり、実在建物の応答予測や耐震性能評価、さらには耐震・制震改修の検討を行う場合には、地盤と建物の振動特性を計測により確認することが極めて重要となる。もちろん、高層建物のみならず、表層地盤に起因する地盤卓越周期は中低層建物の応答評価に重要であるし、設計時の資料としてサイトの地盤の周期特性を迅速に評価できる技術の有効性は高い。

地盤の卓越周期や建物の固有周期・減衰定数を実測により評価するために、常時微動計測、振動実験、強震観測などが行われている。常時微動による方法は、振動実験に比べて機材が少なく、地震観測より短期間で結果が得られるなどの利点があり、多用されている。記録の分析法も進展しており、地盤の計測記録の水平・上下スペクトル比^{3),4)} (H/V スペクトル)により地盤卓越周期を、建物上部の計測記録を重ね合わせて自由振動波形を生成する Random Decrement (RD) 法^{5),6)}により建物の減衰定数や固有周期を、それぞれ高い精度で推定できることが知られている。

一方、これらを適切に評価するためには計測機材や計測方法、分析方法などに関しては種々の配慮が必要である⁷⁾。一般に常時微動計等の計測機材は扱いが難しく、技術や経験の豊富な計測担当者が必要で、分析もデータを持ち帰って時間をかけて行うことになる。しかし、今後、多数の建物に対して共振の有無を確認していくことを考えると、人数の限られた計測技術者や研究者が余裕を持って実施できるケースは少なく、設計者や振動計測が専門でない技術者が扱える計測機器で、短時間のうちに計測を実施して、その場である程度正確な結果が得られることが要求される。例えば、設計時のサイトの周期特性の簡易把握、建物竣工時の振動特性の確認、既存建物の応答特性と耐震改修の必要性の検討資料、さらには強震による被災建物の状況把握などがあり得る。もちろん、計測に慣れた技術者や研究者にとっても、地震被害調査のように多数の対象を短期間で調査する場合や悪条件下での利用、さらには計測・分析をしながら設計者や建物所有者に結果の説明を行う場合など、扱いに気を使わない機材で簡易な測定が可能になるメリットは大きい。

本論では以上の背景から、建物・地盤の振動特性を現地で簡易に評価するために新たに開発した常時微動計測・分析システムについて述べる。具体的にはセンサー1台で建物または地盤で計測を行い、地盤ではH/Vスペクトルから卓越周期を、建物ではスペクトルとRD法から固有周期と減衰定数を推定できるシステムである。

常時微動を計測して現場で簡易に建物特性等を評価するシステムは、既往の報告例や製品も存在する。本論で述べるシステムの特徴は、比較的安価かつ丈夫な機材を用いてオールインワンで持ち運びできる形にまとめ、機材運搬・扱いの負担を減じたこと、そして、

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*3 応用地震計測株式会社 地震防災部・工博

*4 応用地震計測株式会社 開発部

*5 応用地震計測株式会社 地震防災部・工修

*1 Associate Professor, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*2 Professor, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*3 OYO Seismic Instrumentation Corp., Dr. Eng.

*4 OYO Seismic Instrumentation Corp.

*5 OYO Seismic Instrumentation Corp., M. Eng.

データ収集と分析を同時並列で行い、簡易な操作により振動特性評価結果をリアルタイムで確認しつつ、現場で最短の時間であるレベルの結果を提示できるソフトウェアを開発した点にある。

2. システムの概要

2.1 システムの構成

本システムの外観を写真1に示す。保護能力のある金属製キャリーケースの中にタッチパネルPC、3成分センサー1台、アンプ、バッテリー、ケーブル等の必要機材をすべて収納しており、寸法は51×33×22cm、質量は約10.5kgである。一人でも公共交通機関などで運搬でき、バッテリーの性能向上により軽量化できる可能性も高い。

計測現場では、ケースを開いてセンサーの設置とケーブルの接続を行い、電源投入して計測可能になるまでに4~5分あれば十分である。あるいは地盤計測において自動車で移動する場合には、助手席にケースを開き、センサーケーブルも接続したまま、電源をシガーソケットから供給してPCを起動したままとすると、車を止めてから1分程度で計測可能になり、一人で多数点の計測ができる。



写真1 システムの外観

2.2 センサーの周波数特性補正

センサーはコンパクトで丈夫であることを重視してジオフォンHS-1 LTを用い、3成分をまとめてケースに収めている。このセンサーは固有振動数が2Hzで、おおむね1Hz以下で振幅が低下し、特性の個体差も多少ある。そこでセンサーごとに振動台で周波数特性を計測し、その結果からセンサーの基本パラメータ（固有振動数、減衰定数、振幅変換値）を推定して理論周波数特性を求め、その逆数に乗じることで補正を行っている。図1に実測した3成分の周波数特性を示す。これより、3成分のセンサーに差はあるが、センサーパラメータを最適化することでフラットな周波数特性をほぼ近似でき、約0.2~10Hzで安定した特性を示すことが確認できる。センサーパラメータは固有振動数が2.1~2.8 (2.0) Hz、減衰定数が0.68~0.9 (0.7)、振幅変換値は0.5~0.57 (0.632) のばらつきがあった（カッコ内はカタログ公称値）。

図2に周波数特性補正前後の計測記録のパワースペクトル及び動コイル型常時微動計（固有周期5秒の速度計）との比較、図3に周波数特性補正後の波形と常時微動計による波形の比較を示す。これより周波数特性はほぼ補正されているが、長周期側の補正係数は100倍程度になることから、センサー間のばらつき補正の影響が大きい点に注意が必要である。このように、1台ごとに検定が必要ではあるが、本センサーは十分な性能を有することがわかる。

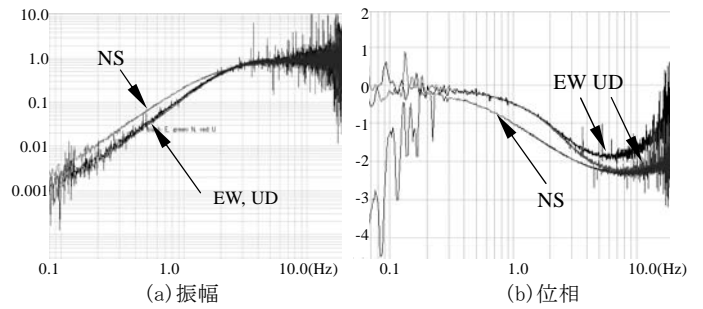


図1 振動台によるセンサーの周波数特性の検定（3成分）

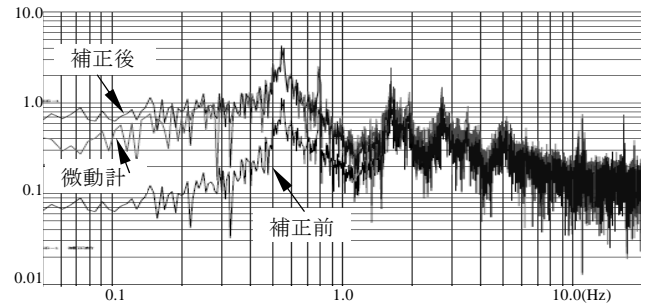


図2 センサー特性の補正（動コイル型微動計との周波数特性比較）

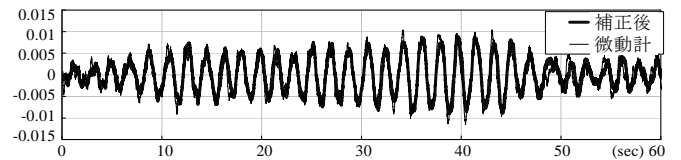


図3 センサー特性の補正結果（動コイル型微動計との波形の比較）

3. 計測と分析ソフトウェアの概要

3.1 分析手法

H/Vスペクトルは、地盤上での1点3成分の計測から、水平（2成分合成）と上下成分のフーリエスペクトル比を求めるものであり、地震基盤や工学的基盤の境界が明確な場合には、それより浅い地盤の卓越周期に対応した明確なピークが現れることが知られている⁴⁾。一方、RD法は、建物で計測された波形に対して、固有周期周辺のバンドパスフィルタをかけ、波形の極大値から始まる多数の区間を重ね合わせることで自由振動波形を生成する方法である。これより地盤-建物連成系の減衰定数と固有周期が得られ、特に低減衰建物の減衰定数の推定精度が高い点が重要である⁵⁾。

3.2 計測と分析の流れ

H/VスペクトルやRD波形の推定に当たり、一定時間（例えば30分）の記録を収録した後にデータ処理を行い、結果を得るのが一般的な手順である（オフライン処理）。この場合には、計測後に分析を行うまでは、計測時に表示される波形やスペクトル程度の情報しか得られず、観測経験の豊富な技術者ならともかく、一般的な利用者では観測に問題があっても分析するまでわからない可能性が高い。このような場合には計測のやり直し、あるいは問題がある計測結果を気づかず利用することもあり得る。それに対して本システムでは、計測と並行して得られたデータから順次分析して結果を表示し、時間経過とともに更新するリアルタイム処理を導入している。

これは、スペクトル推定においては区間データのアンサンブル平均を順次行うことに相当し、スペクトルアナライザなどで実現され

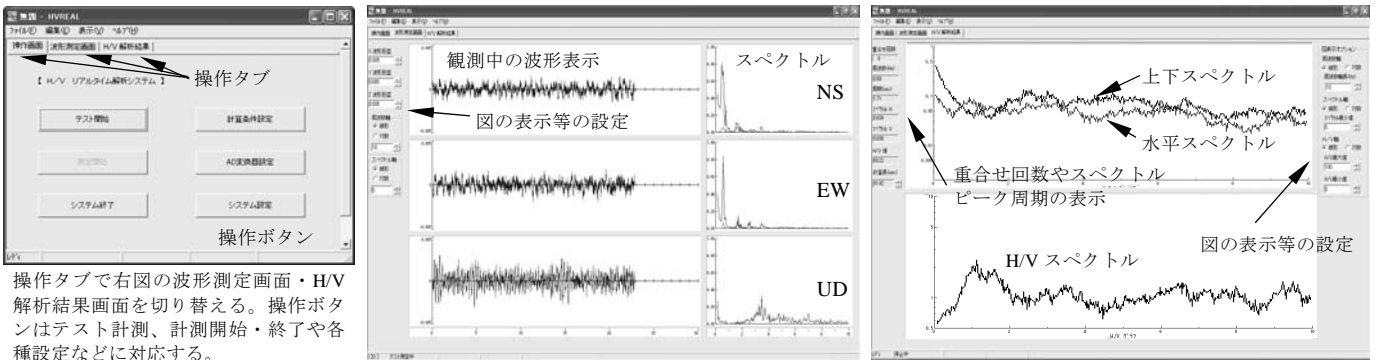
ている機能である。しかし、H/V スペクトルにおいては一般的に利用されている例は多くないと考えられ、さらにデータ収録と同時に実行できる点に大きな特徴がある。具体的に本プログラムでは、水平2成分の合成スペクトルと上下スペクトルに対してそれぞれアンサンブル平均を行い、その比を逐次更新しながら表示する。

RD 法については、波形の重ね合わせになるため、工夫が必要である。まず、ある時間区間（例えば1分）ごとに計測記録にFFTによるバンドパスフィルタを掛け、時間領域に戻してから波形極大値から始まる区間を抽出して、それらを重ね合わせ、得られたRD波形（自由振動波形）を振動モデルでフィッティングしてその時点の振動パラメータの暫定推定値を表示する。従って、例えば1分ごとに逐次更新して表示することで、時間経過に従って重ね合わせ区間が増大して推定精度が向上していく様子を観察できる。

以上のリアルタイム処理では、計測開始後から暫定的な結果が表示されるため、計測の状況を比較的容易に知ることができ、計測をやり直す必要があれば早い時点で決断できるし、十分な結果が得られたと判断できれば終了することもできる。さらに、計測中も結果を見ながら説明や考察ができるため、計測終了時に直ちに撤収できるなど、時間の節約につながる。終了時にはすべての観測記録がタッチパネル PC に保存されているため、次の地点への移動中などに改めてオフラインで従来と同様の詳細な分析を行うことも可能である。この場合に、内蔵のタッチパネル PC でも実行できるが、バッテリーの節約とインターフェイスや処理速度の面で不利であるため、データを一般のノート PC にコピーして利用すれば、データバックアップも含めてすべて現場で完了する。

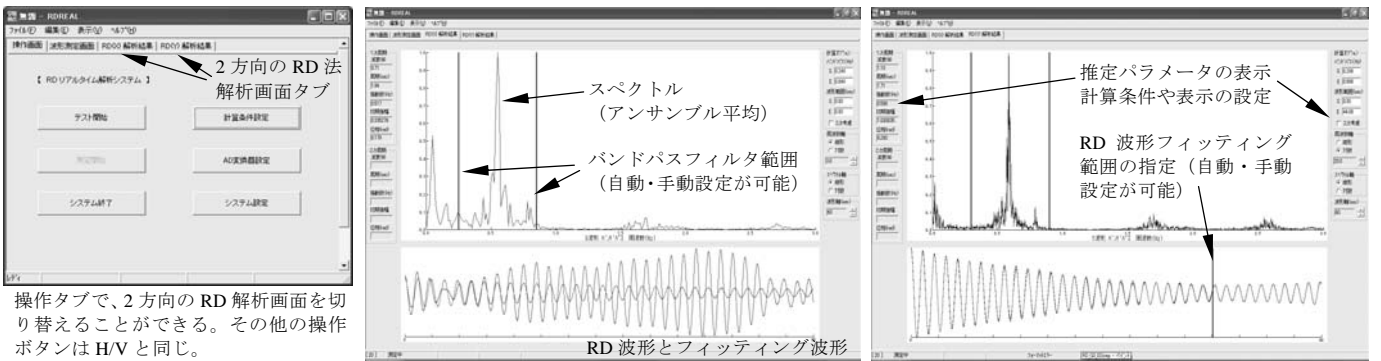
3.3 H/V スペクトル推定の詳細

地盤計測におけるH/Vスペクトル推定のプログラムの画面表示例



(a) 操作画面 (b) 波形測定画面 (c) H/V 解析結果画面

図4 地盤計測におけるH/Vスペクトル推定のためのリアルタイムプログラムの画面例



(a) 操作画面 (b) RD 法解析結果画面（計測開始直後の例） (c) RD 法解析結果画面（収束時の画面）

図5 建物計測におけるRD法による固有周期・減衰定数推定のためのリアルタイムプログラムの画面例

を図4に示す。タブにより「操作画面」「波形測定画面」「H/V 解析結果」を選択でき、計測中でも随時切り替えて利用できる。「操作画面」は、計測・データ処理条件やシステムの設定、校正記録・計測の開始などを操作する。設定条件は計測中でも参照でき、一部は変更することもできる。「波形測定画面」では、センサー補正済みの波形がリアルタイムで監視でき、波形の状況や経過時間を確認できる。まずセンサー感度の設定など校正計測を行い、波形振幅やスペクトルを確認した後、本計測を開始する。途中で収録の一時停止、あるいは終了することもできる。「H/V 解析画面」では、水平2成分合成と上下動のスペクトル、およびその比のH/Vスペクトルが表示されており、計測の進行に従ってアンサンブル平均の区間数を増やししながら、随時更新された結果を表示する。同時に、重ね合わせ回数、H/Vスペクトルがピークとなる周期と周波数、その際のH/Vスペクトルの値なども常時表示され、さらにグラフ上の任意の点をクリックすればその周期の値とH/Vスペクトルの値も表示される。交通振動などノイズの多い環境で計測する場合には、突発的な振幅の大きい区間を除いて平均化できるように、利用する波形区間のRMS値の最大値の設定も可能である。

3.4 RD法による推定の詳細

建物計測におけるRD法による固有周期と減衰定数の推定プログラムの画面表示例を図5に示す。タブにより選択できる「操作画面」「波形測定画面」「RD (X) 解析結果」「RD (Y) 解析結果」の各画面がある。「操作画面」「波形測定画面」については、RD法に関する設定を除き、H/Vスペクトルの場合とほぼ同様である。「RD解析画面」は、X方向とY方向で別々に最適化ようになっている。図5(b)、(c)の比較から、計測が進むに従って徐々にRD波形が整った形状になり、フィッティングも良好になっていく様子が見られる。

バンドパスフィルタ範囲はスペクトル形状（ピーク位置と幅など）を判断して自動設定されるが、画面上の縦線をドラッグすることで任意の範囲を設定することもできる。この例では1自由度RD法により1次モードのみ推定しているが、次章で述べるように2自由度RD法⁹⁾により2モードを同時に推定することも可能である。

4. 建物実測による検証例

名古屋市に建つ地上21階、軒高90mの建物において、最上階で本システムと動コイル型常時微動計（周期5秒の速度計）を並べて約30分間計測した。図6に本システムと常時微動計のフーリエスペクトルの比較を示す。振動数によって多少の差はあるが、センサーの周波数補正が有効であることが確認できる。次に、RD法による推定結果を表1に示す。(a)は各方向の1次モードを1自由度RD法で推定した結果、(b)は各方向の記録にそれぞれ2自由度RD法を適用して、2方向の1次固有振動を同時に推定した結果である。推定パラメータは各自由度について、固有振動数と減衰定数に加え、自由振動波形の初期変位と初期位相である。高層建物などでは水平2方向の固有周期が接近している場合が多く、近接固有値の影響を考慮して2自由度RD法を適用することが適切と考えられるが、本建物については固有周期・減衰ともに、1自由度でもほとんど同じ推定値になっている。また、本システムと常時微動計の比較では、十分な精度の推定が行えることがわかる。

5. まとめ

本論では、建物・地盤の振動特性を現地で評価するために、扱いやすい常時微動計測・分析システムの開発を行い、結果として十分な精度を確保しながら、手早く確実かつ簡易に計測を行うことを示した。特に、データ収録を行いながら、同時に逐次更新される推定値を検討できるリアルタイム性を重視したことにより、現場計測における有用性が高まっているといえる。

本システムを十分に使いこなすためにはある程度の実験と知識が必要ではあるが、計測の原理や留意点をオンラインドキュメントにし、フィルタやフィッティング初期値などの重要なパラメータは状況に応じたデフォルトセットを複数用意することなどにより、振動計測を専門としない技術者や研究者による利用も十分可能と考えられる。さらに、振動計測の教育にも有効であり、計測のプロセスを逐次表示できることを活かして、さまざまな分析パラメータを変えながら計測を繰り返すことにより、地盤や建物の振動特性評価プロセスをブラックボックス化することなく学ぶことができる。

今後の改良点は、より長周期の計測を可能にするセンサーの検討があげられる。現状では周期5秒程度までは利用可能と考えられるが、関東平野の地盤周期や250mクラスの超高層建物の評価には十分とは言えない。また、バッテリーに関して、持続時間や重量の改善は観測の容易さに直結する。現状では連続で4～5時間使用できるが、一日計測し続けるにはやや不足である。ソフトウェアの操作性なども含めて、現場計測を繰り返して改良を進めていく予定である。

謝辞

システムの開発にあたり、株式会社コラムの岡田雄二氏のご協力を得た。記して謝意を表す。

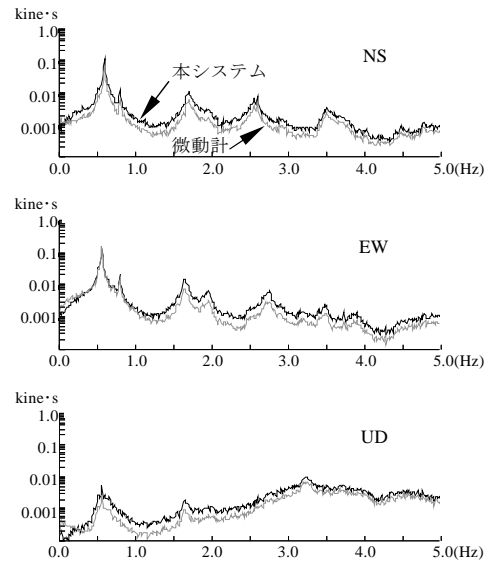


図6 21階建物における実測結果のスペクトル（微動計との比較）

表1 RD法による振動特性の推定結果

(a) 1自由度RD法

本システム	EW	NS
固有振動数(Hz)	0.584	
		0.551
減衰定数(%)	0.669	
		0.617
初期変位	0.0021	
		0.0047
初期位相	-0.0381	
		0.0510
残差(%)	4.86	4.63

(b) 2自由度RD法

本システム	EW	NS
固有振動数(Hz)	0.584	0.571
	0.544	0.551
減衰定数(%)	0.649	0.956
	4.908	0.685
初期変位	0.0021	0.0001
	0.0001	0.0050
初期位相	-0.0414	-1.8444
	-1.4675	0.0790
残差(%)	4.79	4.47

微動計	EW	NS
固有振動数(Hz)	0.584	
		0.551
減衰定数(%)	0.667	
		0.594
初期変位	0.0036	
		0.0051
初期位相	-0.0330	
		0.0441
残差(%)	3.65	3.18

微動計	EW	NS
固有振動数(Hz)	0.584	0.571
	0.545	0.552
減衰定数(%)	0.642	1.066
	7.079	0.658
初期変位	0.0035	0.0001
	0.0002	0.0053
初期位相	-0.0286	-1.9414
	1.6468	0.0804
残差(%)	5.13	4.64

参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築物の減衰，265p.，2000.
- 2) 飛田潤，福和伸夫，松井政樹，小島宏章：建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性，日本建築学会構造系論文集，第625号，pp.391-398，2008.3
- 3) 中村豊，上野眞：地表面振動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み，第7回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.265-270，1986.
- 4) 中村仁，福和伸夫，高橋広人，飛田潤，堀啓輔：常時微動計測に基づく名古屋市域の地盤震動特性と地盤構造推定に関する研究，構造工学論文集，pp.413-421，2000.3
- 5) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文集報告集，pp.29-38，1993.12
- 6) 吉田昭仁，田村幸雄，舛田健次，伊藤隆文：超高鋼製煙突の動特性評価（その2 2自由度RD法とFDDによる動特性評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.B-2，pp.887-888，2002.
- 7) 飛田潤，福和伸夫，小島宏章，浜田栄太：地盤・建物系の高密度強震観測の展開と建物動的挙動の検討，日本地震工学学会論文集，第7巻，第2号，pp.37-56，2007.3