

# 数値解析に基づく木造建物被害と 相関の高い地震動指標の検討

星 幸江<sup>1</sup>・丸山 喜久<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

- <sup>1</sup>千葉大学大学院生 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: hoshi.210s@gmail.com
- <sup>2</sup>千葉大学大学院助教 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp
- <sup>3</sup>千葉大学大学院教授 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

地震による被害のうち家屋の倒壊といった建物被害は、生命を脅かす危険性が高いものである。実際これまでの地震で、建物被害が原因となり多数の犠牲者が発生している。また近年、建物被害と地震動強度指標との相関性の低さが指摘されている。被害の程度を迅速かつ正確に把握するためには、地震動指標と被害の相関性を高めることは不可欠である。そこで本研究では、木造建物を対象とした建物モデルを構築し、地震応答解析により応答塑性率を算出し、被害と地震動指標との相関性を検討する。その結果からSI値に関して検討を加え修正SI値を提案し、応答塑性率と実際の被害率との相関性を評価する。

**Key Words :** earthquake motion indices, numerical analysis, wooden house damage, spectrum intensity

## 1. はじめに

地震での建物への被害は、私達の生命を脅かす危険性がある。実際に 1995 年に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)では、死者の約 8 割以上が圧死、窒息死といった建物の被害によって命を落とし、全半壊した建物は約 24 万棟に及んだ。地震発生時刻が早朝であり、ほとんどの人が就寝中であったこと、激しい震動により避難する間もなく建物が倒壊したことから、その大半は自宅の木造住宅の倒壊が主因であると考えられる<sup>1)</sup>。

近年、このような建物被害と地震動指標との相関性の低さが指摘され、多くの研究がなされている<sup>2)</sup>。地震動の特徴を表す指標の中でも、地震動強度指標が重要とされ、計測震度・地動最大速度(PGV)・地動最大加速度(PGA)・SI 値など多様な形で表されている。また、地震発生直後に被害を迅速かつ的確に推定するためには、地震動指標と建物被害との相関性を向上させることが重要である。

そこで本研究では、木造建物モデルを構築し、幅広い地震記録を入力した地震応答解析を行う。算出した応答塑性率と地震動指標との相関を調べ、建物被害と相関の高い指標の検討を行う。

## 2. 解析方法

### (1) 地震記録

本研究では、地震の多様性に対応し、結果に一貫性・普遍性を持たせるために、表-1 に示す地震記録を使用した。1993 年釧路沖地震から、2008 年岩手県沿岸北部を震源とする地震までの 14 地震による 50 の強震観測点の波形記録を使用した。強震ネットワーク K-NET を中心に、気象庁 JMA や各自治体の計測震度計などによる地盤加速度の観測記録を使用した。

### (2) 建物モデルを用いた地震応答解析

建物モデルは、木造建物を対象とした基礎固定の 1 質点系モデルを用いた。固有周期は 0.1~1.0 秒(0.1 秒刻み)に設定し、減衰定数は 5%とした。建物の初期剛性の固有周期  $T_1$  と降伏震度  $Y_1$  の関係は、図-1 に示すような神奈川県<sup>3)</sup>に基づき、式(1)で表わされるものとした。ただし  $Y_1$  の最大値は 0.8 と定められている。

$$Y_1 = \frac{0.073}{(T_1 + 0.054)^2} \quad (1)$$

表-1 使用した地震記録一覧

発生日時	地震名	M <sub>JMA</sub>	強震観測点
1993.1.15	釧路沖地震	7.5	釧路地方気象台
1995.1.17	兵庫県南部地震	7.3	JR鷹取駅
			大阪ガス葺合供給所
			神戸海洋気象台
			NTT神戸
			JR宝塚
			尼崎高架橋
			尼崎竹谷小
			尼崎港
1997.3.26	鹿児島県薩摩地方地震	6.6	K-NET宮之城 K-NET阿久根
1997.5.13	鹿児島県薩摩地方地震	6.4	K-NET宮之城
2000.10.6	鳥取県西部地震	7.3	JMA境港 K-NET米子
2001.3.24	芸予地震	6.7	K-NET大野
			K-NET東予
2003.5.26	宮城県沖(三陸南)地震	7.1	JMA涌谷
			JMA石巻
			JMA大船渡
2003.7.26	宮城県北部地震	6.4	JMA涌谷
2003.9.26	十勝沖地震	8.0	K-NET広尾
			K-NET標津
			K-NET池田
			K-NET釧路
			KiK-net本別
2004.10.23	新潟県中越地震	6.8	川口町震度計
			K-NET小千谷
			JMA小千谷
			K-NET長岡
			JMA長岡
			KiK-net加茂
			K-NET小出
			K-NET穴水
2007.3.25	能登半島地震	6.9	JMA輪島(鳳至町)
			K-NET輪島
			JMA能登町(宇出津)
			K-NET能都
			K-NET七尾
2007.7.16	新潟県中越沖地震	6.8	K-NET柏崎
			上越市柿崎区震度計
			長岡市中之島震度計
			長岡市上岩井震度計
			柏崎市高柳町震度計
2008.6.14	岩手・宮城内陸地震	7.2	K-NET古川 K-NET一関
2008.7.24	岩手県沿岸北部地震	6.8	K-NET八戸
			K-NET種市 K-NET岩泉

神奈川県が使用している復元力特性は、図-2 に示すように、2段階のバイリニア型である。本研究では実線で描かれた第2ループのみを描く、1重バイリニアモデルを用いた。初期剛性  $K_1$  と第2ループ時の剛性  $K_2$  の関係は、 $K_2=0.467K_1$  であり、固有周期の関係に直すと、 $T_2=1.46T_1$  である。この建物モデルに50強震観測点のEW, NS波形それぞれを入力する。

応答解析後、式(2)にあるように建物モデルの最大応答変位  $\delta_u$  を降伏変位  $\delta_{Y2}$  で除した塑性率  $\mu$  を算出し、地震応答解析で算出した地震動指標との関係を検討する。図-2 に示すように、塑性率が  $\mu \geq 2$  となった場合に大破と仮定する。

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_{Y2}} \quad (2)$$

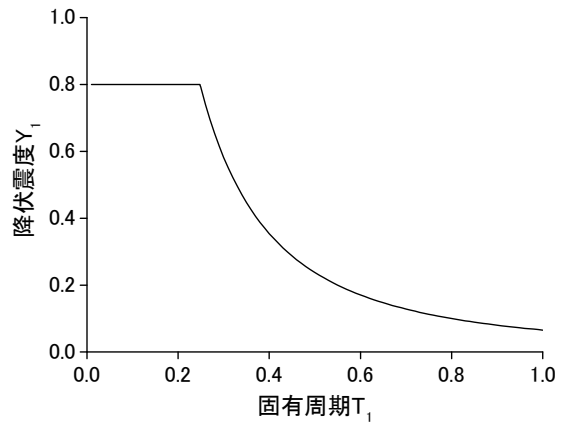


図-1 初期剛性時の降伏震度-固有周期の関係<sup>3)</sup>

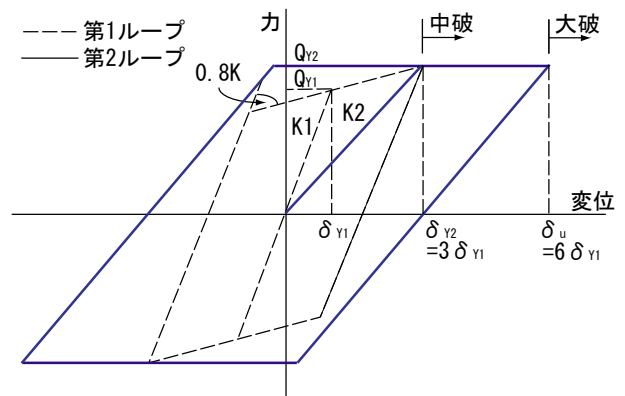


図-2 建物モデルの復元力特性<sup>3)</sup>

### 3. 解析結果

一例として、2007年3月に発生した能登半島地震時のK-NET穴水の解析結果(EW波形)を示す。この観測点周辺は、多くの建物が被害を受け、全壊率は18.8%にも及んだ<sup>4)</sup>。図-3にK-NET穴水の加速度応答スペクトル(5%減衰)を示す。図-4にEW波形を入力した際の応答履歴曲線を示す。短周期では弾性域で応答がおさまっているが、 $T_1=0.3s$ 以上のときは降伏しており、多くの建物で被害が生じたことが伺える。

地震応答解析により得られた塑性率と、計測震度、地動最大速度(PGV)、地動最大加速度(PGA)、SI値の4つの地震動指標との相関を評価する。図-5に木造建物モデルの初期固有周期  $T_1=0.4s$  の時の塑性率と地震動指標との関係を示す。計測震度以外の指標については、入力地震動との対応性を図るために、EW, NSの2成分別々に値を算出した。塑性率を対数で縦軸にとり、計測震度は線形、それ以外の指標は対数で横軸にとった。これらの図におけるばらつきを定量的に表すために直線回帰を行い、相関係数  $r$  を算出した。図-6に固有周期  $T_1$  ごとの各指標の相関係数の変化を示す。これより、まず計測震度は、他の指標に比べて平均的にあてはまりがよいのが分かる。PGAは、短周期で

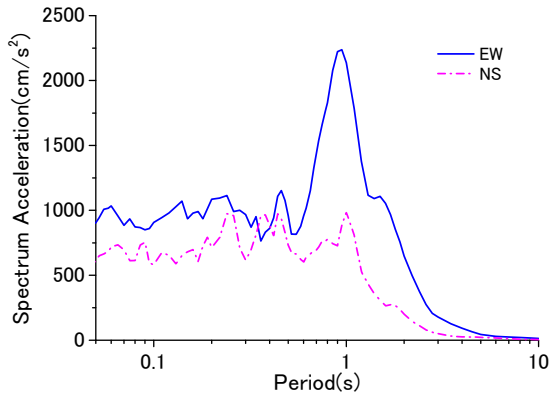


図-3 K-NET穴水EW成分(能登半島地震)の加速度応答スペクトル(5%減衰)

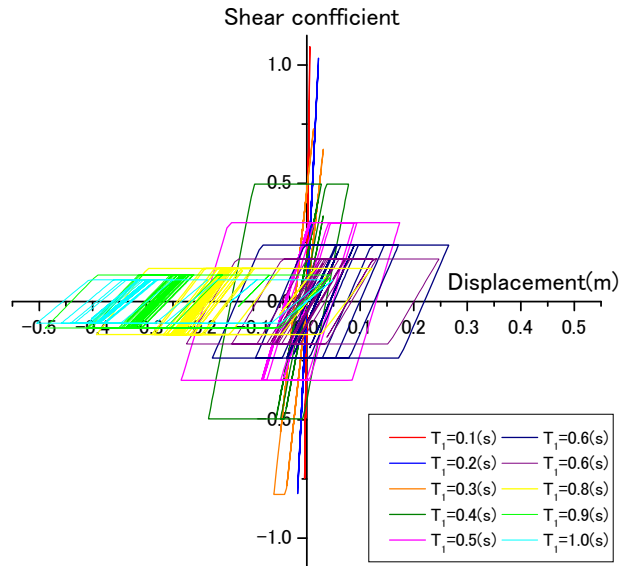


図-4 K-NET穴水EW成分(能登半島地震)の応答履歴曲線

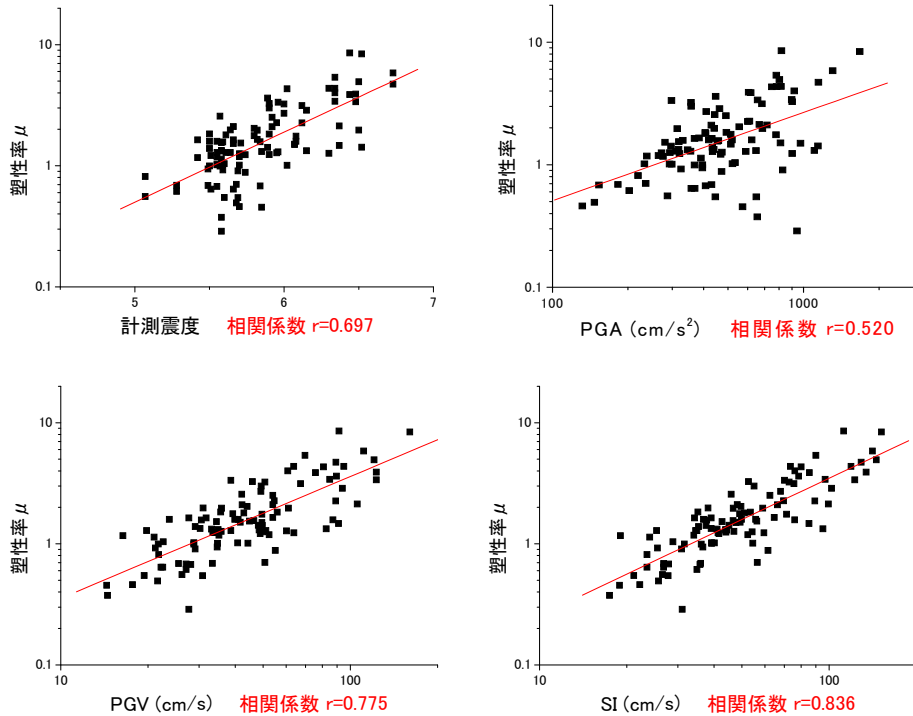


図-5 1質点系モデルの応答塑性率と地震動指標の関係( $T_f=0.4s$ )

の相関は高いが、周期が長くなるにつれて相関は低下する。PGV と SI 値に関しては、短周期では相関は低い、 $T_f=0.3s$  以上では相関が良いのが分かる。とくに SI 値との相関がよく、ほとんどの周期で PGV を上回る結果となった。

本研究では、木造建物を対象としており、木造建物の固有周期は、建築年代によって多少異なるが、 $T_f=0.2s \sim 0.5s$ 程度とされている<sup>3)</sup>。しかし木造建物の被害は、塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期と関係しているとされ、この等価周期は弾性周期 $T_f$ より長周期になるとされている。よって PGV と SI 値が、今回対象となる周期帯で被害と相

関が良いことが分かる。

#### 4. SI 値に関する検討

##### (1) 修正SI値

塑性率と相関が高かったSI値に関して検討を行う。SI値は(3)式で表わされる地表面観測波形の20%減衰の速度応答スペクトル $S_v$ の周期0.1~2.5秒の平均値であり、地震時に構造物がどれくらい大きく揺れたかを数値化したものである。

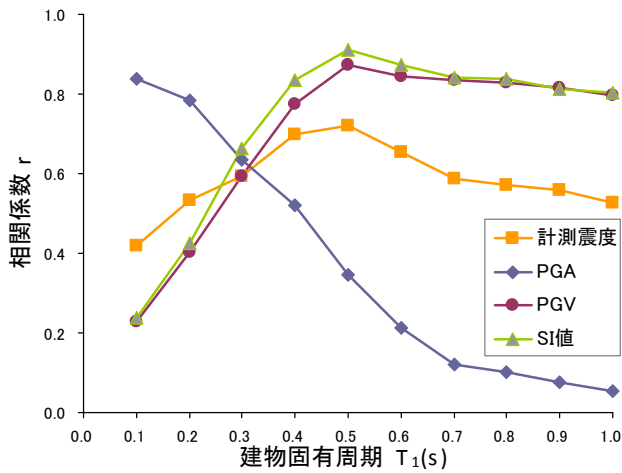


図-6 固有周期T1と各指標の相関係数の関係

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (3)$$

SI値は都市ガスのセンサーや、道路や鉄道の地震検知システムに導入されている指標であり、地震発生直後に被害の程度を判断するために実際に使われているものである。

SI値に関して、建物被害との相関をより高めるために、減衰定数 $h$ と積分周期帯 $T_a \sim T_b$ を変更した修正SI値を算出する。そして地震応答解析で算出した塑性率と実際の木造建物の被害率との関係を検討し、評価を行う。

減衰定数は0.1と0.05に変更し、積分周期帯に関しては、被害が大きい観測点の速度応答スペクトルが長周期で卓越している点、建物被害が等価周期に関係している点から、短周期帯をカットすることが有効ではないかと考え、0.5~1.0s, 0.5~1.5s, 1.0~2.0s, 1.0~2.5sに変更する。現行のものも含めて、計15の組み合わせの修正SI値を建物固有周期0.1s~1.0s(0.1s刻み)に設定し、これまで同様50の観測点について算出する。

## (2) 応答塑性率との相関

図-7から図-9に固有周期 $T_i$ ごとの修正SI値と塑性率との相関係数の変化を示す。図-7に積分周期帯0.1~2.5s時の減衰定数の変更による相関係数の変化を示す。構築した建物モデルの減衰定数と同じ $h=0.05$ が長周期であてはまりが良いが、大きな違いは見られない。図-8に減衰定数 $h=0.20$ の時の積分周期帯の変更による相関係数の変化を示す。短周期では修正SI値は相関は低いですが、本研究の対象となる長い周期帯では、現行より相関が良い。とくに $T_{a-b}=1.0s \sim 2.0s$ と $T_{a-b}=1.0s \sim 2.5s$ の相関が良い。また減衰定数を変更するより、積分周期帯を変更した方が、相関係数の上昇の幅が大きいことが分かった。

図-9に他の地震動指標と、とくにあてはまりがよかった各減衰定数の $T_{a-b}=1.0s \sim 2.0s$ と $T_{a-b}=1.0s \sim 2.5s$ の比較を示す。短周期では相関は低いですが、 $T=0.5s$ を越えてからの長周期では、他の地震動指標と比べ

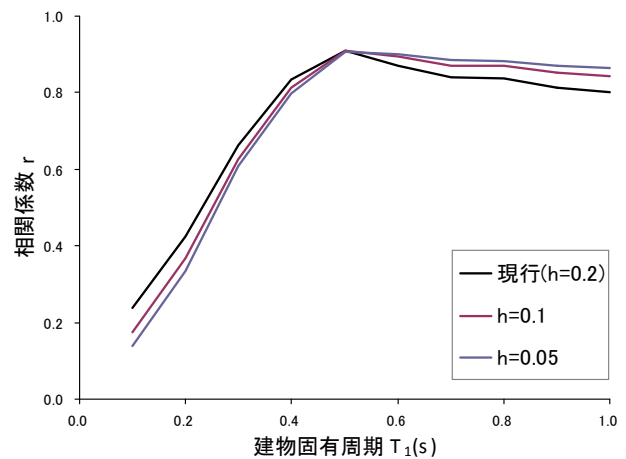


図-7 減衰定数の変更( $T_a \sim T_b=0.1 \sim 2.5s$ )

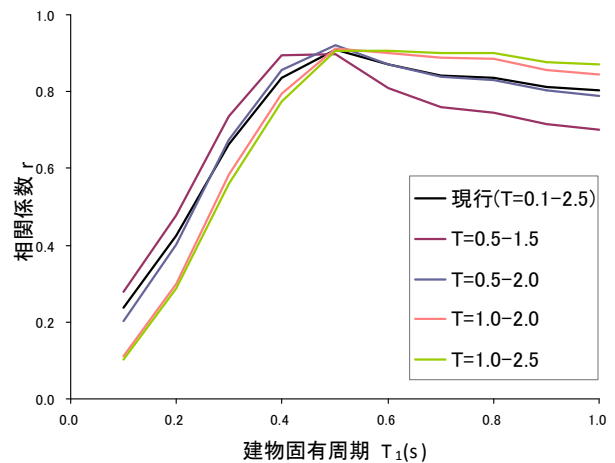


図-8 積分周期帯の変更( $h=0.20$ )

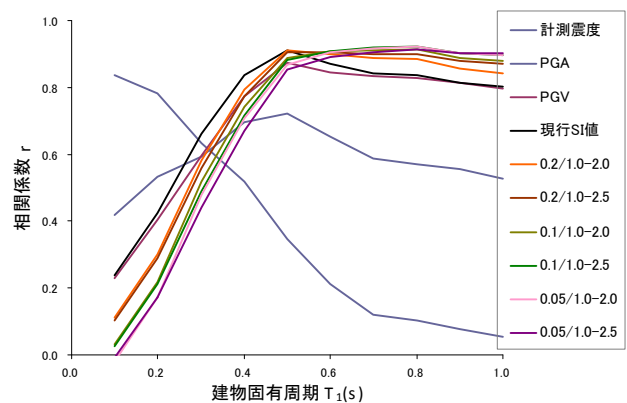


図-9 修正SI値と他指標の比較

てもあてはまりが良いことが言える。

## (3) 実際の被害率との相関

最後に、修正SI値と実際の塑性率との相関を評価する。実際の被害率は、観測点を中心とした半径200mの円内にある、車庫・プレハブを除いた木造建物を対象とした全壊率のうち、0%を除いたものを使用した<sup>5)</sup>。相関性の評価には、被害率が対数正規分布であると仮定し、確率紙上で直線回帰を行った際の決定係数 $R^2$ を用いる。実際の被害率と各

表-2 修正SI値と実際の被害率との相関係数一覧

修正SI値		積分周期帯(s)					他の指標	
		0.1-2.5	0.5-1.5	0.5-2.0	1.0-2.0	1.0-2.5		
減衰定数 (%)	0.2	0.661	0.569	0.675	0.752	0.738	震度	0.543
	0.1	0.627	0.641	0.692	0.754	0.722	PGA	0.265
	0.05	0.630	0.675	0.677	0.730	0.691	PGV	0.694

指標値との相関係数一覧を表-2に示す。

減衰定数の変更では、それほど大きな違いは見られない。しかし積分周期帯の変更では、短周期をカットした $T_{a-b}=1.0s\sim 2.0s$ ,  $1.0s\sim 2.5s$ で比較的高い値が得られた。これは、塑性率との関係と同じ傾向であり、積分周期帯の変更が相関性により影響を及ぼすことが確認された。加えて、他の地震動指標と比較をしても、短周期をカットした修正SI値のあてはまりが良いことが言える。

## 5. まとめ

本研究では、木造建物を対象に建物被害と相関の高い地震動指標の検討を行った。建物モデルを構築し、14地震による50観測点で記録された水平2成分EW, NSの波形記録を用いて地震応答解析を行った。応答解析から塑性率を算出し、地震動指標との相関性を相関係数 $r$ で比較した。その結果、地動最大速度(PGV)とSI値が、短周期では相関は低いが、木造建物被害と関連する周期0.4s以上で相関が高いことが分かった。そこでとくに相関が高かったSI値に関して検討を行った。減衰定数 $h$

と積分周期帯 $T_{a-b}$ を変更した修正SI値を算出し、塑性率との相関を検討した。減衰定数の変更では、大きな違いはみられなかったが、積分周期帯の変更では、短周期帯をカットした $T_{a-b}=1.0s\sim 2.0s$ と $T_{a-b}=1.0s\sim 2.5s$ が今回の木造建物の対象となる長周期でのあてはまりがよく、減衰定数の変更よりも相関係数の上昇の幅が大きいことが分かった。

実際の被害率とも相関性の検討を行ったところ、塑性率と同様の結果を得ることが出来たが、数値解析結果よりも相関係数が低くなってしまった。今後は、地震記録に偏りがある点や建物モデルを改善する点など課題があり、さらに地盤データを組み込むなどしてより詳細な被害データを収集することが必要である。

## 参考文献

- 1) 岡田恒男, 土岐憲三: 地震防災のはなし—都市直下地震に備える—, 朝倉書店, 2006.
- 2) たとえば安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄: 地震動の強さ指標による構造物損傷の評価, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.715-720,1990.
- 3) 神奈川県西部地震被害想定調査〔建物・火災被害調査〕報告書: 神奈川県環境部防災消防課, 国際航業株式会社, 1993.
- 4) 境有紀, 野尻真介, 熊本匠, 田中佑典: 2007年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性, 日本地震学会論文集, 第8巻, 第3号, pp.79-106,2008
- 5) たとえば境有紀: 強震観測点周辺の被害データを用いた地震動の性質と建物被害の関係の検討, 日本地震工学論文集, 第7巻, 第2号, pp180-189,2007.