加速度応答を用いた締固め度管理手法の研究

西澤　修一

Keywords : soil compaction management, acceleration response, turbulence factor, computer-based construction
締固め管理、加速度応答、乱れ率、情報化施工

1. はじめに

本研究は、土の締固めにおける新たな管理手法として、加速度計を締固め機械に装着して、施工中の締固め度をリアルタイムに管理しようとする方法である。

この手法は、特にヨーロッパにてＣＭＶ値などの指標を用いて実利用されており、また、日本では乱れ率の指標が研究されている。

そこで、本手法の締固め度管理への適用の可能性について、室内大型土槽設備を使用した実験と、現場転圧試験を通して検証を行った。以下に、室内及び現場における転圧試験の目的、方法結果等について報告する。

2. 加速度応答の概要

加速度波形は軟らかい地盤上では正弦波形を示すが、やや硬い地盤では図-1（参考文献 1)）に見られるように波形がスパイク状に変化してくる。これは転圧輪が跳ね上がり、地表面衝突時に上向きの加速度が生じて正弦波形が乱された結果と考えられる。また、波形データを周波数分析すると、地盤の締固めが進んで硬くなると、転圧輪の基本振動数が20Hzの場合、図-2で示すように高調波といわれる整数倍（例えば,40Hz, 60Hz）に対する振幅値S0, S1, S2…、さらには1/2分数調波といわれる基本振動数の1/2振動数とその整数倍（例えば10Hz, 30Hz, 50Hz）に対する振幅値S’0, S’1, S’2…が卓越してくる。

ＣＭＶ＝　Ｓ1 ÷ Ｓ0

乱れ率＝（ΣＳi ＋ ΣＳ’i）÷（Ｓ0 ＋ Ｓ’0）
ただし、i＝1～3

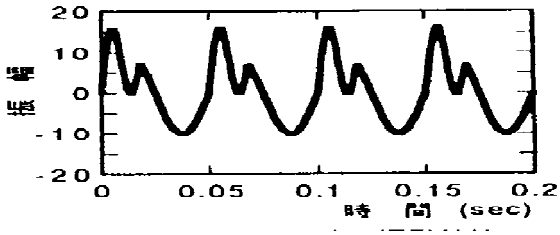

図-1　スパイク状の波形例
Wave of Vibrations

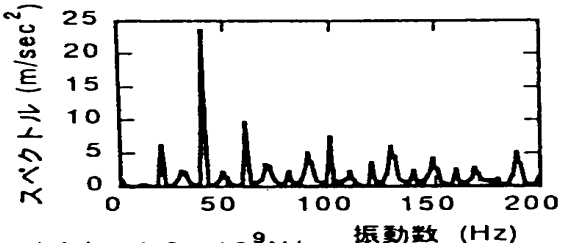

図-2　スペクトル例
Spectrum

3. 転圧試験

3. 1　室内・現場転圧試験の目的

室内転圧試験では、粘性土系の材料を使用し、表-3で示すような振動機構の異なる２種類の締固め機械を使用して、振動タイプの違いと加速度応答との関係を調べた。また、現場及び室内にて礫質系の材料を使用して転圧試験を行い、基盤面の違いと加速度応答との関係を調べた。

転圧試験は、加速度計を図-3、写真-1に示すように、締固め機械の振動転圧輪の回転軸付近に、上下及び左右の２方向の振動波形検出用として２個の加速度計を設置し、転圧回数0，2，4，6，8，10回（室内試

験は16回まで）ごとに波形データを記録した。同時に、ＲＩ計器を用いて乾燥密度や空気間隙率、レベルによる表面沈下量などの締固め特性を回数ごとに測定し、両データの比較を通じて加速度応答を用いた締固め度管理手法の適用性を検証した。

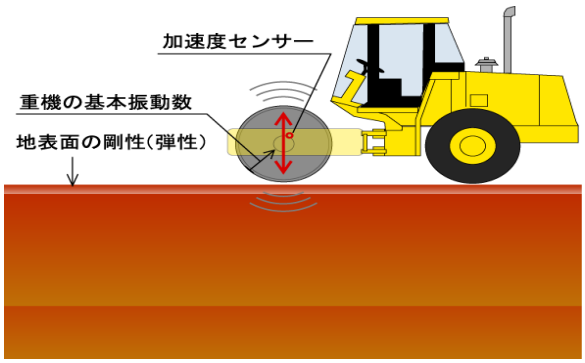

図-3　加速度計を用いた管理手法概念図
Management Method Using Acceleration

写真-1　転圧輪に設置した加速度計
Acceleration Gauge

3．2　試験ヤードと計測方法

室内試験は、図-4、図-5に示すような室内土槽設備（酒井重工業（株）技術研究所）を使用して行い、厚さ約38cmの基盤を締固め、その上に試験材料を厚さ約43cmで敷き均した。

また、現場転圧試験は、中部国際空港埋立工事の施工ヤードを使用して行った。

3．3　使用材料

室内試験では、表-1で示す粘性土系と礫質土系の２種類の材料を使用した。また、現場試験では礫質系を使用した。

礫質土系の材料は室内及び現場試験で使用し、両者は最大粒径がそれぞれ53mmと120mmと違いはあるが、粒

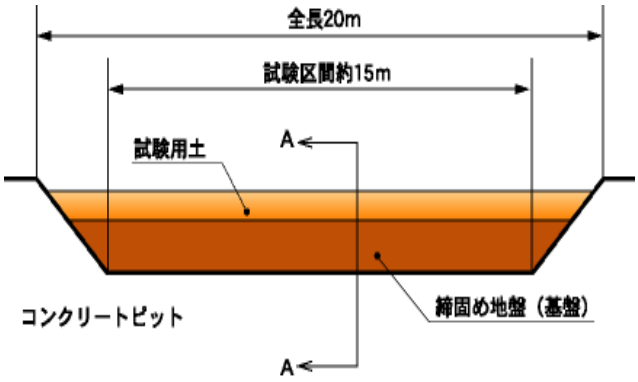

図-4　土槽設備の縦断図
Test EquipmentRolling

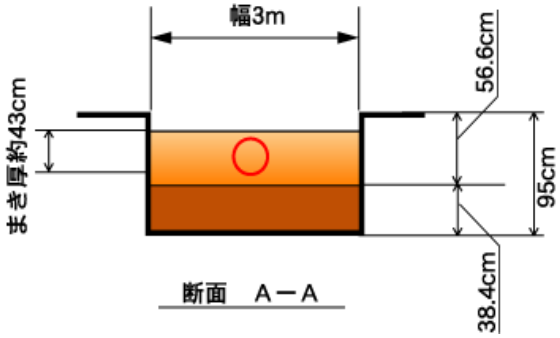

図-5　土槽設備の横断図
Test Equipment Rolling

度分布に関しては両者間に顕著な差異はない。また、最適・施工含水比に関しても、両者間での顕著な差異は見られない。

3．4　加速度データの解析方法

振動波形データは解析精度を高めるため、４秒間蓄積したデータ数を使用した。そして、振動ローラーの走行に伴い、１秒ごとに最新波形データと４秒前の古いデータとを絶えず交換しながら、蓄積した４秒間のデータを用いて、１秒間隔で解析結果を出力した。

締固め度管理で使用する指標には、振動ローラーの基本振動数および基本振動数の1/2振動数に関係する振幅値を解析して取り出した。

4．室内および現場試験結果

4．1　振動機構タイプと加速度応答との関係

振動タイプの異なる締固め機械を用いた場合の加速度波形への影響について、表-1に示す粘性土系の材料

表-1　室内及び現場での使用材料物性一覧
Materials of Laboratory and Field Tests

試験場所	材料分類	土粒子の比重（g/cm³）	最大乾燥密度（%）	最適含水比（%）	礫分（%）	細粒分含有率（%）	最大粒径（mm）	施工含水比（%）
室内試験	礫まじり細粒分質砂	2.758	1.952	12.2	7.4	40.5	9.5	9.8
室内試験	細粒分まじり砂質礫	2.704	2.195	7.6	68.2	6.4	53	5.3
現場試験	粘性土まじり砂質礫	2.750	2.257	7.5	65.7	8.9	120	4.4

表-2　室内及び現場で用いた振動ローラの諸元
Ability of Rolling Machine

試験場所	使用機種(酒井重工業)と振動タイプ	自重(tf)	起振力(tf)	転圧力(tf)	動線圧(tf/m)
室 内	全遠心方向：SV510D(20tf 級)	10.30	21.00	26.00	12.10
室 内	垂直方法：SV510DV(20tf 級)	10.30	21.00	26.00	12.10
現 場	垂直方向：SV160DV(30tf 級)	17.60	30.00	40.20	18.70

を用いて行った。本材料は、ダム堤体盛立工事におけるコア材を想定したもので、含水比をほぼ9.8%に調整したものを使用した。

粘性土を締固めた場合、土中の水分が分離して地表面付近に上がってくる現象が発生しやすく、締固め密度が増加しても、地表面の剛性変化がこれと比例しない場合があることは、以前より知られている。

そこで本試験では、粘性土系の材料に対して加速度応答を用いた手法の適用性の面も検証を行った。

その結果、まず締固め度と表面沈下量に関しては、振動機構タイプの違いによる大きな差異は見られなかった。締固め度と表面沈下量の変化傾向は図-6、図-7に示す。

一方、上下・水平振動波形のスペクトルへの影響について、特に基本振動数の振幅値の変化傾向において、図-8～図-11に示すとおり２つの異なる振動タイプの差異の影響が明確に現われた。

すなわち、転圧回数に伴う上下波形の変化傾向は、全遠心タイプでは上昇と下降を繰り返すのに対し、垂直タイプでは16回までほぼ一貫した上昇傾向を示す。

また水平波形の変化傾向は、全遠心タイプでは５回まで上昇した後、ほぼ横這いとなるのに対し、垂直タイプでは9回まで下降し、それ以降はやや上昇を見せる。

全遠心タイプの場合、図-12で示すように1／2分数調波が転圧回数１回目より発生するのに対し、垂直タイプを使用した場合は図-13で示すように基本振動数とその高調波のみ現われ、1／2分数調波は確認できなかった。

したがって、締固め機械の振動機構タイプの違いにより、振動波形に違いが見られることから、加速度応答を用いた管理手法を適用する場合、機械の振動タイプに応じて、スペクトル解析方法を替える必要がある。特に、垂直方向振動タイプを使用した場合、1／2分数調波を利用する乱れ率の指標は適用が難しいと思われる。

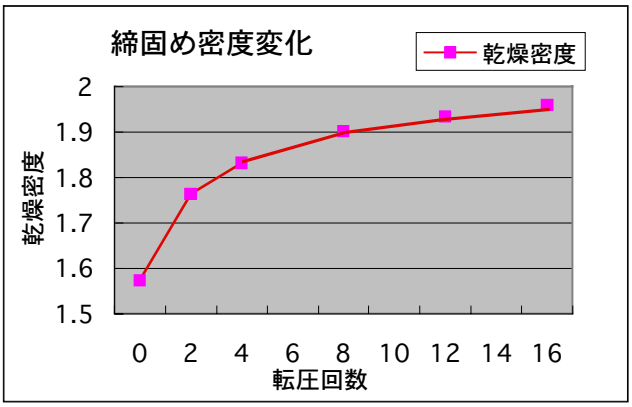

図-6　粘性土の室内試験結果（６点のＲＩ測定）
Compaction Density

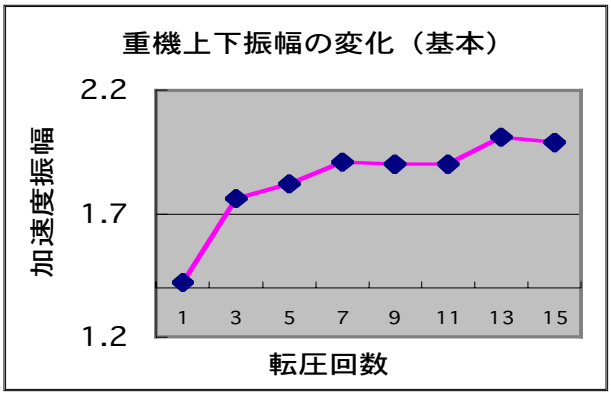

図-9　垂直タイプの上下加速度(室内、粘性土)
Vertical Acceleration Respons

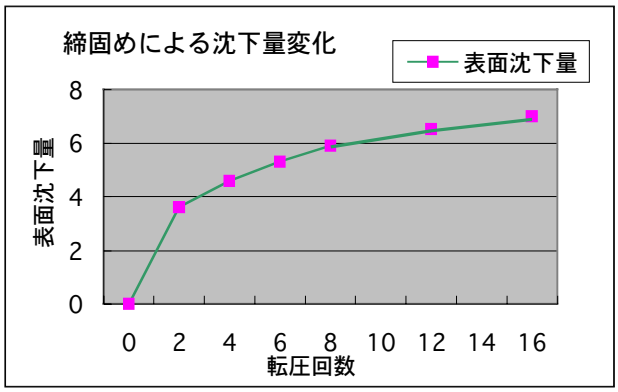

図-7　粘性土の室内試験結果（６点のレベル測定）
Leveling

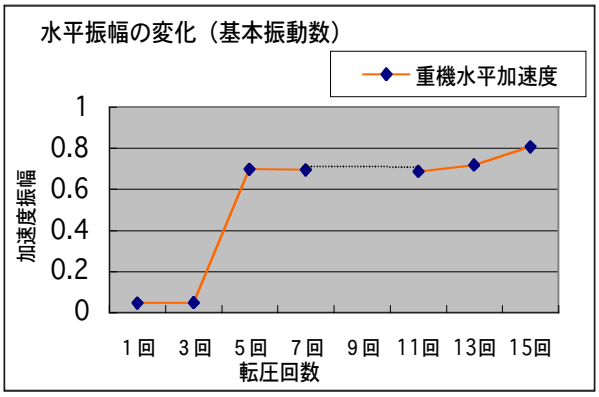

図-10　全遠心タイプの水平加速度(室内、粘性土)
Horizontal Acceleration Respons

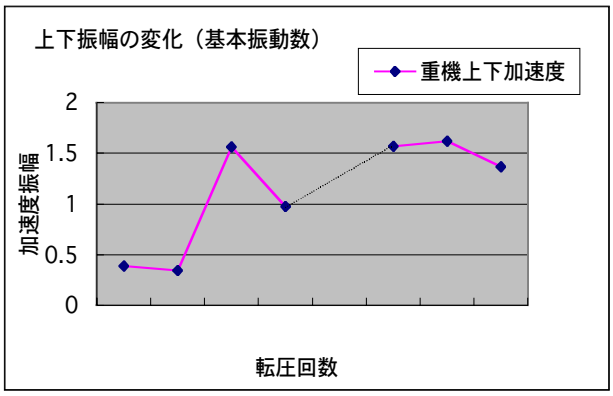

図-8　全遠心タイプの上下加速度(室内、粘性土)
Vertical Acceleration Response

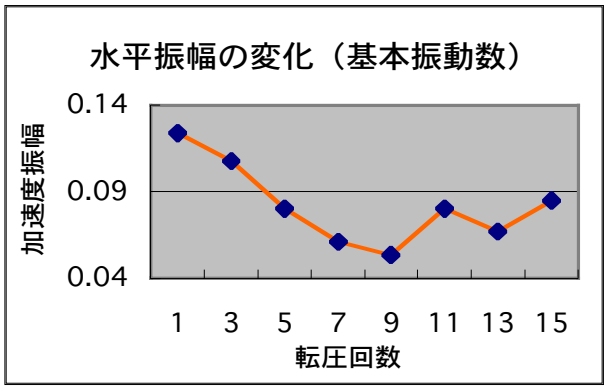

図-11　垂直タイプの水平加速度(室内、粘性土)
HorizontAcceleration Respons

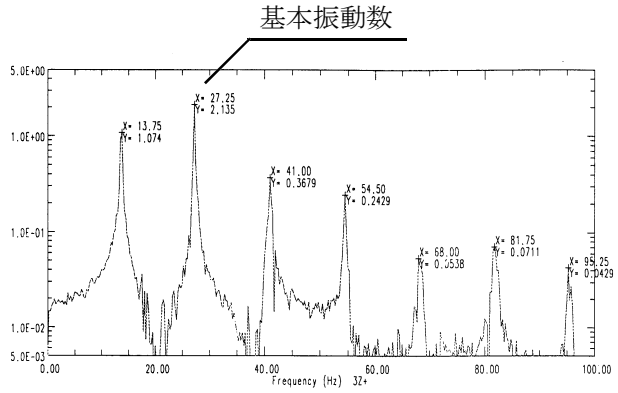

図-12　全遠心方向振動タイプのスペクトル例
Spectrum

写真-2　土槽設備を用いた室内転圧試験風景
Test Laboratory Rolling

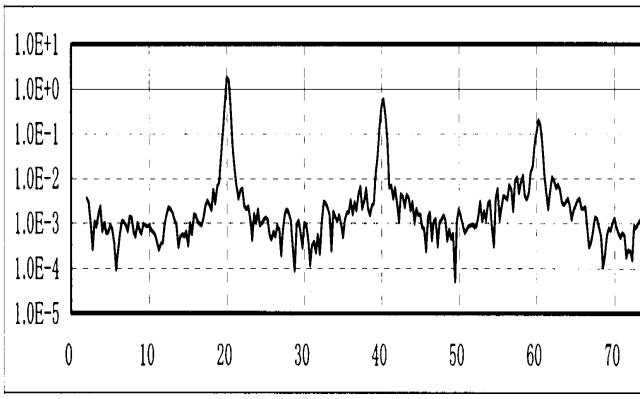

図-13　垂直方向振動タイプのスペクトル例
Spectrum

写真-3　海上空港工事での現場転圧試験風景
Test Field Rolling

4．2　基盤面の特性と加速度応答との関係

締固めに伴う基盤面の特性が加速度応答に及ぼす影響について、礫質系の材料を用いて、写真-2に示す室内土槽試験と、写真-3に示す海上空港の現場にて行った。

室内と現場では表-1で示すほぼ同じ物性の材料と、表-2で示す同じ垂直振動タイプの締固め機械を使用した。ただし、最大粒径は室内試験が53mmであるのに対し、現場試験では120mmの粗粒材を使用している。

しかし、室内と現場での基盤面の剛性には大きな差異がある。すなわち、室内試験はコンクリート・ピットの上に厚さ約38cmの基盤を締固め、その上に試験材料を厚さ43cmで撒き出して行った。これに対して、現場試験では、深さ6mの海をブルドーザで均しながら埋め立てた後、撒出し厚55cm、8回転圧で約3mの基盤を構築している。そして、この基盤面上で厚さ45cmで材料を撒き出して行った。

その結果、図-14で示すように、硬い基盤上で行う室内試験の場合、10回転圧後の締固め度が108%であるのに対して、海上を埋め立てて締固めた基盤上で行う現場試験の場合、締固め度は93%にとどまっている。

同様に、乱れ率の値も図-15で示すように、現場試験結果は相対的にかなり感度が弱く、定性的な傾向は認められたものの、定量的な指標にはなりにくい。

したがって、加速度応答を用いた締固め度管理指標は、基盤の剛性の違いによっては、重機を走行させながらのリアルタイム管理への適用は難しいと思われる。

4．3　表面沈下量と加速度応答との関係

転圧走行では、振動転圧輪は地表面の沈下に伴い、土砂を排土しながら走行する。このとき、走行抵抗の影響によって転圧輪に発生した振動のうち、特に水平方向の振動を捉えた結果が水平加速度データである。

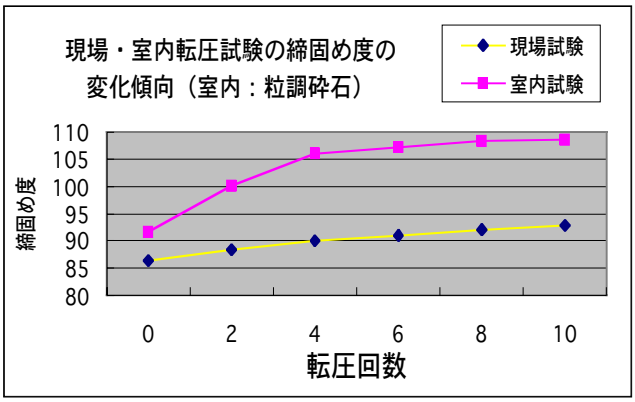

図-14　室内・現場試験の締固め度の変化傾向
Laboratory and Field Compaction Density

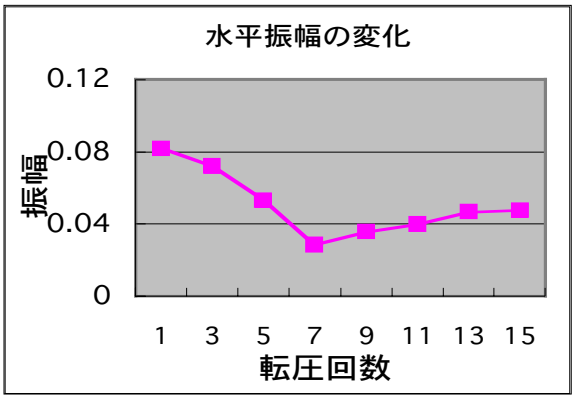

図-16　室内試験での水平加速度の変化（粒調砕石）
Horizontal　Acceleration of Laboratory Test

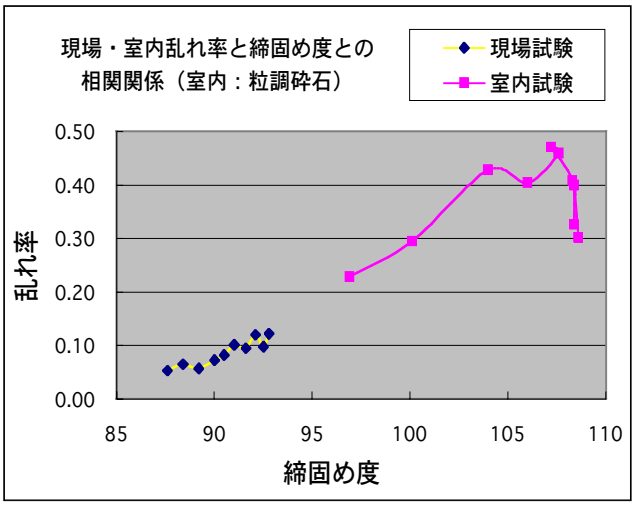

図-15　室内・現場試験の乱れ率の変化傾向
Laboratory and Field Turbulence Factor

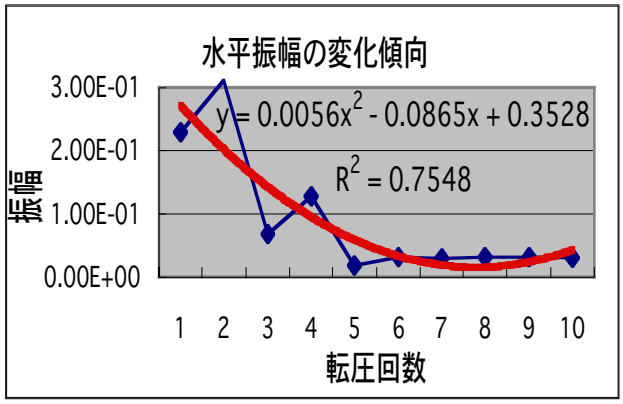

図-17　現場試験での水平加速度の変化（粗粒材）
Horizontal Acceleration of Field　Test

走行抵抗の影響を水平加速度計で捉えるには、図-10、図-11の比較から、締固め機械の振動機構は垂直タイプを使用した場合に限られる。

水平加速度の振幅データは、締固め開始時が最も高く、その後しだいに下降傾向を示す。転圧走行において、振動しながら打ち下ろす転圧輪の１回の沈下量が約2㎜より小さくなった時点で、振幅データの下降傾向は止まり、横ばいを示す。粘性土を用いた室内試験結果では、そのときの転圧回数は9回、締固め度は約98%であった。同様に粒調砕石の結果では、図-16で示すとおり転圧回数が7回、締固め度が約100%になったときに横ばい傾向を示した。

この結果、垂直方向振動タイプの締固め機械を用いた場合に限り、水平加速度応答を用いた沈下量及び締固め度管理手法は、一度の沈下量が約2㎜以下になるまでは指標として適用性があると考える。ただし、適用条件としては、粗粒材への適用は難しく、全体の沈下量が5～6㎝以上あり、一度の転圧時の沈下量が2㎜以下になったときの締固め度が約100%近く確保できるような材料に対しては、水平加速度を用いた管理が可能と思われる。

5. まとめ

本管理手法は、現場での適用事例は本研究で行った１件のみであり、締固め度をリアルタイムで管理できる実用化レベルにまで高めるためには、今後多くの現場試験運用を通じて波形データを取得し、さらに成果を積み上げていくことが必要と考える。

参考文献

１）テラメカニックス研究会ローラ設計指針作成委員会編、転圧ローラ、pp. 167、1999