

II-33

豊平川上流域における流出解析

北海学園大学工学部 正員 嵯峨 浩
 北海道電力(株) 正員 坂本 容
 北海道電力(株) 正員 西村 哲治
 北海道大学工学部 正員 藤田 睦博

1. はじめに

人口170万人を擁する大都市札幌を貫通する豊平川の通年の出水状況を的確に把握することは、利水・治水の両面にわたり非常に重要である。ダム操作の確実な安全性の確保が今まで以上に要求されている現状の下、豊平川にダムを有する北海道電力(株)、開発局と大学による協同研究が一昨年より開始されている。この主旨は、「豊平川を徹底的に調べ、出水予測の精度向上を図る。」と言う点にあり、協同研究発足年度より種々の水文観測とその解析が行われ、現在も継続中である。

具体的な水文観測と融雪関連は、同時発表の研究報告を参照してもらうこととし、本研究では豊平川支流簾舞川流域での降雨-流出現象について検討した結果を報告する。前回の報告¹⁾では、降雨規模によって標高ごとの降雨分布が大きく異なることを明らかにし、250mメッシュによる疑似河道網モデルでの流出解析を行った。ここで問題となったのは河道を流下する洪水の流速をどの様に評価するかであった。本研究では最も簡単な疑似河道網モデルによる洪水流速の評価と流出解析について検討を行った。

2. 簾舞川流域の概要

簾舞川流域は、豊平川流域(流域面積約520km²)に内抱される支流であり、藻岩ダム直上流右岸側の北向き斜面である。解析の対象とした流域は二本の支流が合流する地点から上流側の流域面積9.79km²の小流域である。流域の概略図と雨量計設置場所(5カ所)を図-1に示す。また、1989年、1990年に観測された出水の流出率・総雨量・損失雨量を表-1に、直接流出量の規模を比較したものを図-2に示す。なお、本研究において、直接流出量はハイドログラフ立ち上がり点と減水部第二折曲点を直線で結ぶ分離法で算出し、有効降雨は、ハイドログラフ立ち上がり点以前の降雨を損失とし、以後の降雨に一律に流出率を乗じたものである。

表-1

出水生起年月日	流出率	総雨量(mm)	損失雨量(mm)
1989/10/16	0.081	48.84	44.88
10/19	0.149	33.85	28.81
10/22	0.127	25.40	22.17
1990/7/18	0.046	49.48	47.20
8/10	0.055	89.92	84.97
8/23	0.076	35.90	33.17
9/15	0.080	57.92	53.29

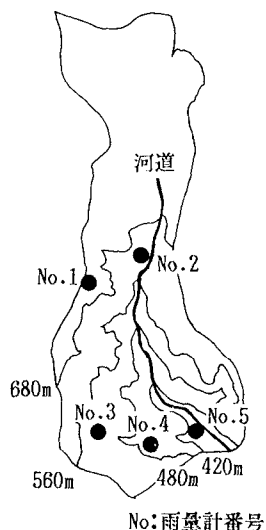


図-1 簾舞川流域概要図

3. 流出モデル

疑似河道網モデルによる流出解析では、洪水流下速度を場所的・時間的に一定とすると大規模な流出ではその再現計算の精度が良くないという点がこれまでの研究で明らかにされた。また、疑似河道網モデルは、その閾値をいくらにするかという大きな検討事項もあり、本研究では最も簡単な一本の河道からなる疑似河道網モデルにより洪水時の流下速度を求めた。モデルの基礎式は(1)式である。

$$q(L, t) = \int_0^L a(x) \cdot r(t - \frac{x}{v}) dx \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $q(L, t)$:流域末端流量、 L :全河道長

$a(x)$:河道単位長さ当りの流域面積、 v :流下速度

(1)式のモデルは、流域に降った雨がその降雨波形を保持

して、河道長 x を流速 v で流下するのに要する時間だけ遅れて河道末端で合成されることを意味している。したがって、流速 v は場所的に一定であって「見かけの流速」となる。また、簾舞川における $a(x)$ の分布を図-3に示す。

(1)式の流速 v を種々変えて流出計算を行い、(2)式の条件を満足したものを最適流速とした。

$$|q_{OB} - q_{CAL}| = q_{PEAK} \times 2\% \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 q_{OB} :観測値、 q_{CAL} :ある流速 v による計算値

q_{PEAK} :最大流出量

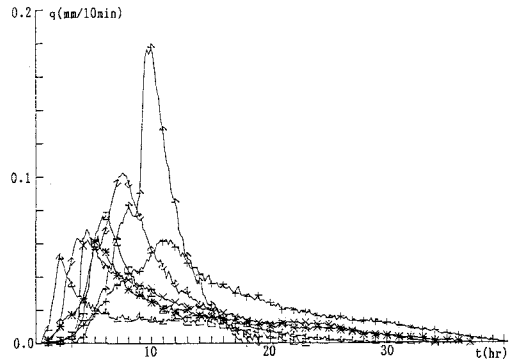


図-2 直接流出量の比較

4. 計算結果

解析に用いた実測資料は、図-2に示される7例の出水である。

計算結果を図-4～図-9に示す。図-4・6・8は、(2)式を満足した流速 v による流出を再現しており、実線は観測値を、記号による表示は計算値を示している。観測されたハイドログラフの小さな部分まで良好に再現しており、疑似河道網モデルでは、流速の適切な推定が重要な要素であることがわかる。

図-5・7・9は、流速 v (m/s)と流量 q (mm/10min)の関係を示しており、ハイドログラフ上昇部と減水部でループを形成している。ループの進行方向は、解析の対象とした7例が全て同じで時計回りとなっている。

ハイドログラフ上昇部と減水部をそれぞれまとめて図示したのが図-10と図-11である。図中の点線は回帰曲線を示しており、次のように表される。なお、 q は(m^3/sec)に換算した値である。

$$\text{上昇部} \quad v = 0.350 \cdot q^{0.4} \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{減水部} \quad v = 0.329 \cdot q^{1.3} \quad \dots\dots(4)$$

流速と流量の関係を河道に適用したKINEMATIC WAVE法で求めると次のようになる。

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = a(x) \cdot r(t) \quad \dots\dots(5)$$

$$W = \alpha \cdot Q^m \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 W :河道断面積、 α 、 m :定数

(5)式、(6)式はそれぞれ連続の式と運動の式でありこれらの式から、特性曲線は次式で表される。

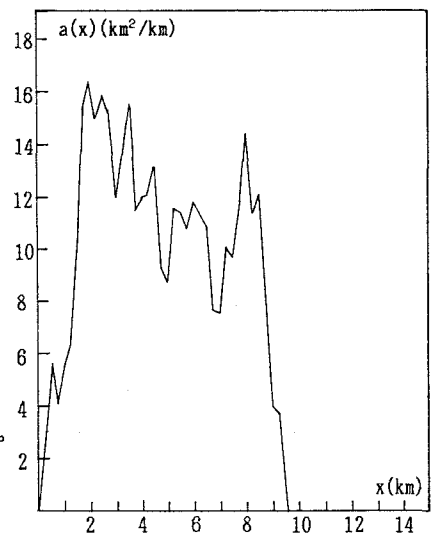


図-3 河道単位長さ当りの流域面積

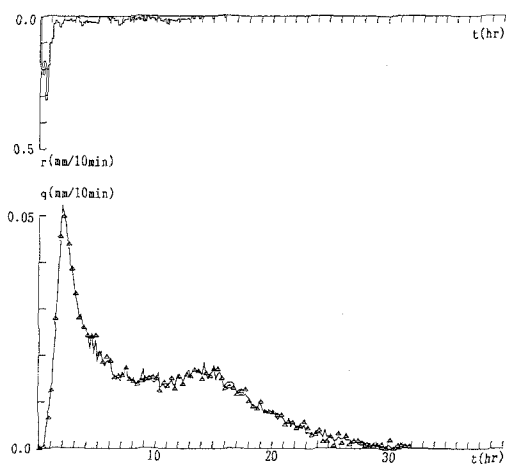


図-4:1990,7/18の出水と計算結果

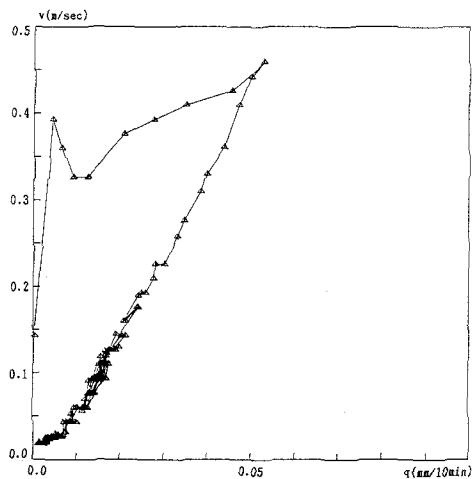


図-5:1990,7/18の流速と流量

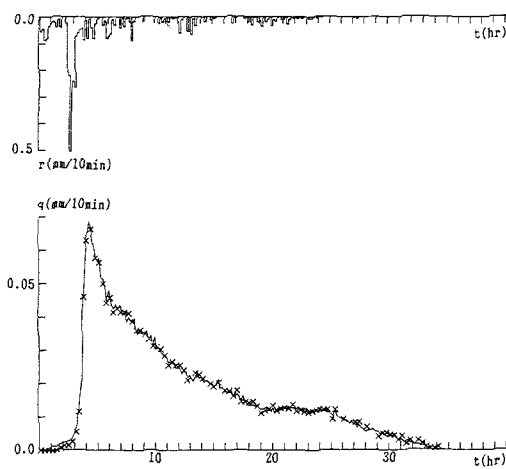


図-6:1989,10/10の出水と計算結果

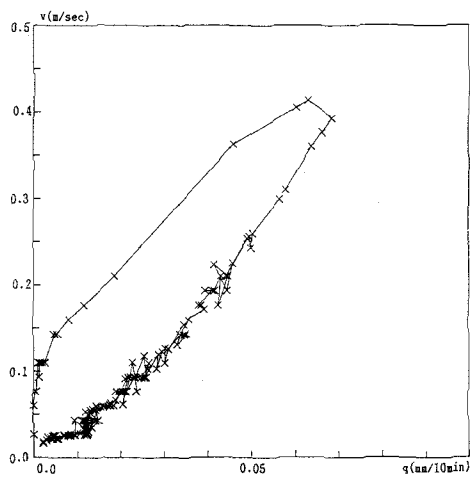


図-7:1989,10/10の流速と流量

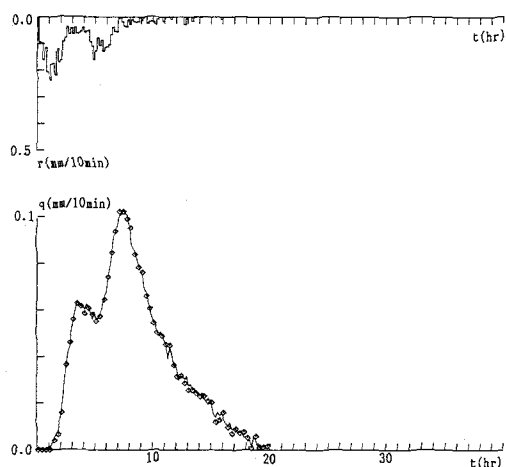


図-8:1990,9/15の出水と計算結果

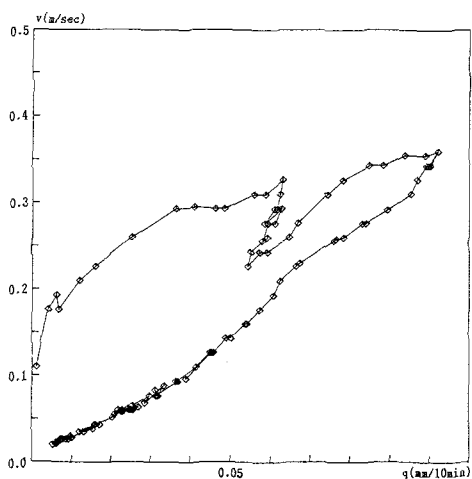


図-9:1990,9/15の流速と流量

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\alpha m} Q^{1-m} \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{dQ}{dx} = a(x) \cdot r(t) \quad \dots\dots(8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{a(x)r(t)}{\alpha m} Q^{1-m} \quad \dots\dots(9)$$

(7)式は洪水波の伝播速度を表している。一方、河道内流速は、 $v=Q/W=1/\alpha \cdot Q^{1-m}$ で与えられ、いずれにしても流速は流量の $(1-m)$ 乗に比例している。Manning則を適用すると $m=3/5$ であり、流速は流量の0.4乗に比例する。本手法で求めた流速は「みかけの流速」であるが、上昇部において流量の0.4乗に比例しており、その妥当性を確認できる。

等価粗度 n についても検討を行う。(6)式の $\alpha=B^{3/5} \cdot (n/I^{1/2})^{3/5}$ 、 $m=3/5$ において、河幅 $B=10m$ 、地形図の等高線より $I=0.226$ と仮定すると、 $n=0.59(m\cdot sec)$ となる。

一般に等価粗度^{2), 3)}は

自然流路 (山地、大玉石交じり) $\dots\dots 0.04 \sim 0.07$

斜面 (山地) $\dots\dots 1.0 \sim 2.0$

丘陵林地 $\dots\dots 0.6 \sim 1.2$

であり、斜面の効果を河道に含めた本手法の等価粗度の値はほぼ妥当な値となっている。

5. 流速観測

実際の洪水時の流速を知るために、現地において流速観測を行った。場所は水位計設置地点の直上流であり、方法は塩水投入法を採用した。この方法は、一定の区間で上流側より微量の塩水を投入し、下流で電気伝導度のピークが現れるまでの時間を測定するもので、その区間の平均流速が比較的精度良く求まる方法である。観測は2回行い、無降雨の日が続いた基底流出時と洪水時である。結果を以下に示す。

1 回目 基底流出時

91' 8/10 $V=0.3(m/sec)$

2 回目 洪水時 (測定区間43.0m、ハイドログラフ上昇時)

91' 10/15, 12:10 $V=0.77(m/sec)$ 14:10 $V=0.82(m/sec)$

13:10 $V=0.78(m/sec)$ 14:40 $V=0.75(m/sec)$

13:45 $V=0.80(m/sec)$ 15:10 $V=0.83(m/sec)$

上記の値はいずれも3回測定した値の平均値である。水温は $9^{\circ} \pm 0.5^{\circ}C$ であり、観測中雨が降り続いていたが降雨の強弱がすぐ流出に影響し、レスポンスが非常に早い流域である。これより上流域では流路の分岐が激しく測定困難であった。なお、この時の河川横断測量による流量は約 $1.7(m^3/sec)$ であり、(3)式から流速を計算すると $v=0.43(m/sec)$ となって、観測流速から基底流速を差引いた値とほぼ一致する。

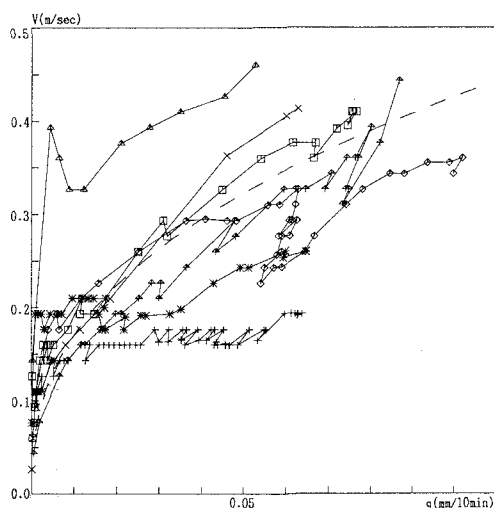


図-1 0・ハイドログラフ上昇部の流速と流量

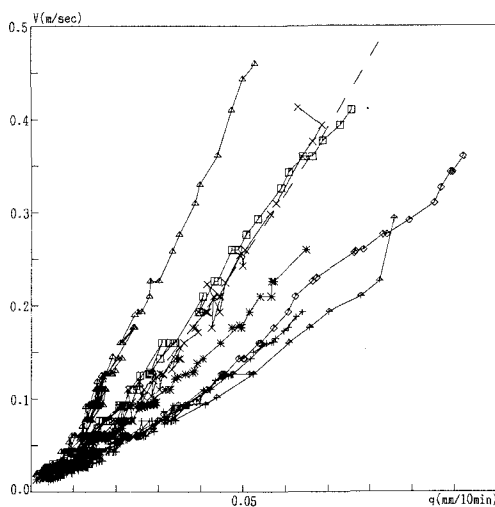


図-1 1・ハイドログラフ減水部の流速と流量

6. 流出解析

これまで流速と流量の関係を明らかにしてきた。しかし、流出解析に应用する場合、ある降雨に対する流量を求めるのに、流量の関数である流速を試行錯誤的に決めなければならない、実用上不便である。実際にはある流量を仮定して流速を決め、それから流量を計算する繰り返し計算となる。したがって、入力である降雨と流速の関係が明らかにされれば、実用上非常に便利で取扱いが簡単になる。

(6)式の特特性曲線から、降雨が時間的に変動する場合(10)式が得られ、これまでの結果より(11)式が成立する。

$$Q(t) \propto \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \quad \dots\dots(10)$$

$$v(t) \propto Q^p \quad \dots\dots(11)$$

(10)式と(11)式より、一般的な関係として次式が得られる。

$$v(t) \propto \left[\frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \right]^p \quad \dots\dots(12)$$

すなわち、ある時刻における流速 $v(t)$ は、その時刻までに降った降雨の平均値の p 乗に比例している。この関係を実測資料を用いて図示したのが、図-12・図-13である。図-12はハイドログラフ・ピーク時までの関係を示しており、右側に外れる3つの線はいずれも初期強度が強い降雨である。図-13は、ハイドログラフ・ピーク時以降の関係を示しており、図-12よりもばらつきが少なくなっている。図中の点線は(13)式で示される回帰曲線（降雨も(3)、(4)式と同様に換算した値）であり、同じ曲線を図-12にも示している。

$$v(t) = 0.183 \cdot \left[\frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \right]^{2.15} \quad \dots\dots(13)$$

降雨と流速の関係が、ハイドログラフ上昇部・減水部とも(14)式にあるとして流出計算を行った。

$$v(t) = 0.183 \cdot \left[\frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \right]^p \quad \dots\dots(14)$$

ここで問題となるのは、 p の値であるが図-12に示されるように、ハイドログラフ上昇時には p の変動が大きく、ここでは試行錯誤的に p を決定して行った。計算結果を図-14～図-16に示す。図-14は $p=1.35$ 、図-15は $p=2.5$ 、図-16は $p=8.5$ の値を採用した。これらの p 値は、ピーク流量の大きさに応じて大きくなっており、降雨強度および降雨波形の違いにより差異が生じていると思われるが、データの数が少ないこともあり、定量的な判断は現時点では困難である。また、いずれの図においても計算値のピークが観測値のピークよりも若干早く出現している。これは、(14)式で $[(1/T) \int r(t) dt]^p$ が最大値をとる時点で $v(t)$ は最大となるが、実際には図-12の△記号の線等が示すように、その後遅れて最大流速が生じているためと思われる。

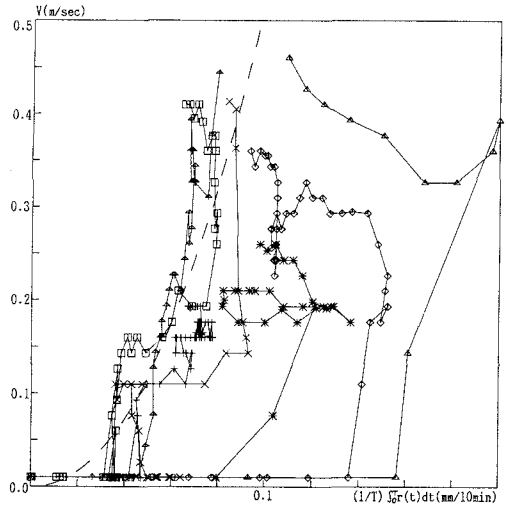


図-12ハイドログラフ上昇部の流速と平均降雨強度

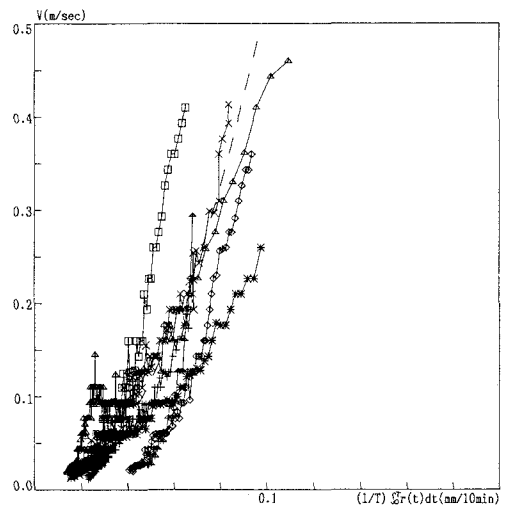


図-13ハイドログラフ減水部の流速と平均降雨強度

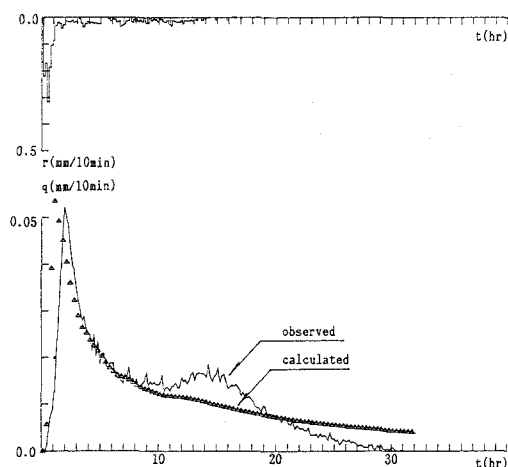


図-14 流出計算結果

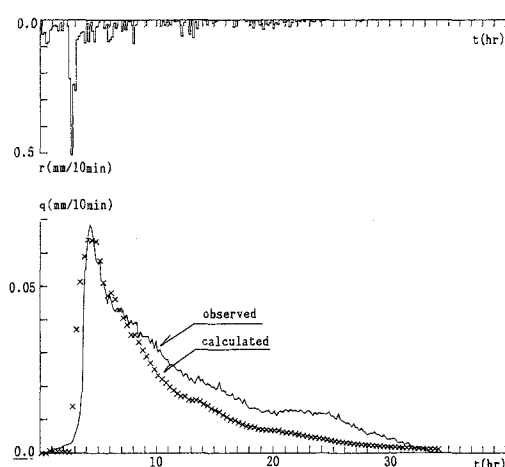


図-15 流出計算結果

7. おわりに

今後の本研究における検討課題を列挙すると次のようになる。

- (1) 降雨の空間分布を考慮したモデルの構築
- (2) 洪水の河道伝播速度を考慮した疑似河道網モデルの発展的開発
- (3) 他の水文観測項目（例えば土壌水分等）による流出現象の解明と流出モデルへの反映
- (4) 現地観測の強化

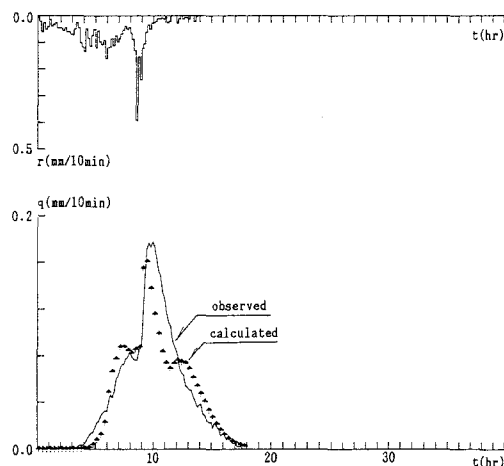


図-16 流出計算結果

参考文献

- 1) 嵯峨・中尾・西村・藤田、『豊平川上流部における通年の水文観測とその解析』、水文・水資源学会研究発表会要旨集、1991、pp114～117
- 2) 水理公式集、土木学会
- 3) 角屋、『流出解析手法（その6）』、農業土木学会誌、1980、第48巻（講座）
- 4) 西村・高橋・藤田、『出水予測のための水文気象観測』、第46回年次講演会概要集Ⅱ、1991、pp64～65
- 5) 藤田・山田・高橋・西村、『豊平川上流部における水文観測システムと観測結果（第一報）』、道支部論文報告集、1991、pp395～400