

輪厚川における流出特性の変化

開発土木研究所環境水工部河川研究室 正会員 佐々木靖博
 (財)北海道河川防災研究センター 正会員 平澤 陽一
 開発土木研究所環境水工部河川研究室 正会員 馬場 仁志

1. はじめに

都市化の進展などのような地被状況の変化による流出特性への影響を的確に表現できる流出モデルを作成することは、水文学上の大きなテーマの一つである。そのためには実流域における都市化と流出形態との応答を観測したデータの入手が不可欠である。

本論は、北広島市輪厚川流域において都市化が進んできた昭和 45 年以降の水文観測データを用い、損失機構を導入した貯留関数モデルによる流出解析を行って、土地利用と流出形態の経年的な変化を比較し、都市化に伴う地被状態と流出形態の関係を把握しようとするものである。

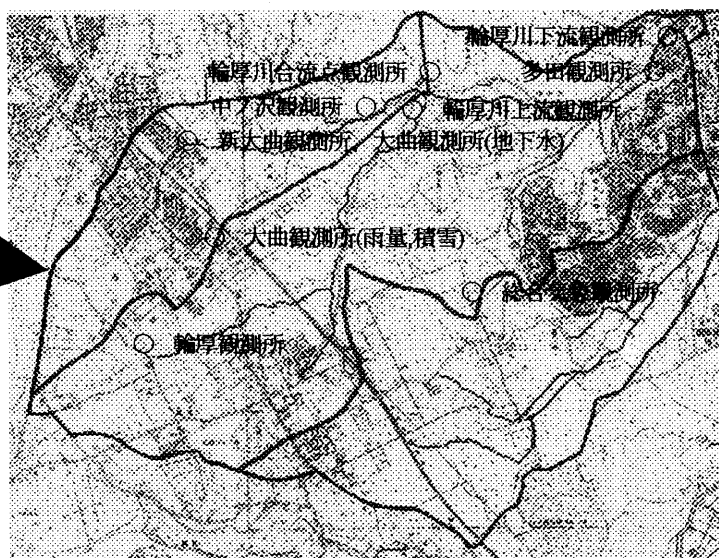
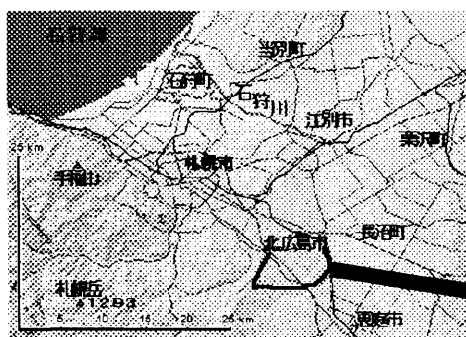


表-1 流域諸元

水系名	石狩川
河川名	輪厚川 (中の沢川含む)
流域面積 (km ²)	輪厚川全流域: 25. 8 (中の沢川流域: 6. 7)
流域平均高度 (m)	72. 46
流路長 (km)	9. 9
主流路長 (km)	9. 2
平均河道勾配	1/100
平均斜面幅 (km)	1. 21

図-1 北広島流出試験地

表-2 対象水文観測所

観測所名	観測種別					河川名	開局年月 (閉鎖)
	雨量	河川水位・流量	地下水位	積雪密度	総合気象観測		
輪厚川下流観測所	1	2				輪厚川	S45. 8
新大曲観測所	1					中の沢川	H8. 12
大曲観測所	1		2	○		輪厚川	雨: S51. 8 (H8. 12) 地下水位: H8. 12
輪厚川上流観測所		2				輪厚川	H8. 10
中の沢川観測所		2				中の沢川	H8. 9
多田観測所			2			輪厚川	S48. 6(H8. 9)
輪厚川合流点観測所				○		輪厚川	
輪厚観測所				○		輪厚川	
総合気象観測所				○	3	輪厚川	S46. 4

1 : 自記・転倒桁型 2 : 自記・水圧式

3 : 観測項目 : 雨量・風向・風速・積雪深・融雪流量・日射量・蒸発散量・気温・地温・気圧・地下水位・土壌水分

Change of Runoff Characteristics in Wattsu River
 Yasuhiro Sasaki, Youichi Hirasawa, Hitoshi Baba

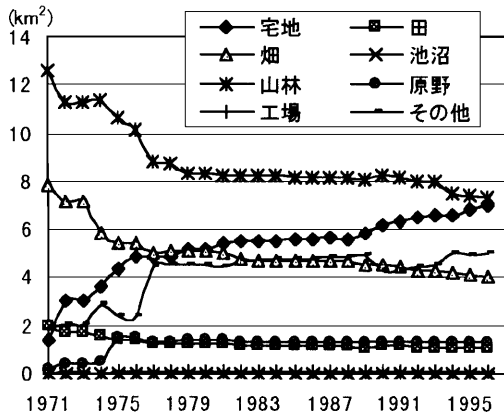


図-2 土地利用区分別面積の変遷¹⁾²⁾³⁾

2. 北広島流出試験地の概要

北広島市の地質は大部分が洪積層からなり、南西部にある島松山(492.9m)を除いては標高100m前後の丘陵が各所に起伏している。北広島市は団地造成前から札幌の近郊都市として人口は増加傾向を示していたが、北広島団地の宅地分譲が本格化した昭和47～48年には急激な人口増加率を示し、昭和50年には10,000人を超え、昭和55年には17,000人を越える団地となっている。

対象となる試験地は、北広島団地が含まれる輪厚川及び中の沢川(輪厚川支流)の流域であり(図-1、表-1)、昭和45年から開発土木研究所が表-2に示す観測を実施している。

3. 土地利用状況の変遷

輪厚川流域は、北広島団地を含む7つの町(北進町・栄町・広葉町・輝美町・松葉町・緑陽町・山手町)と団地以外(中の沢・大曲・輪厚)を含んでいる。

昭和46年から平成8年にかけての土地利用状況の変化を、地形図および北広島市の土地利用基本計画図などをもとに調査した(図-2)。これによると、自然域が減少し都市域が増加していく都市化の様子が顕著に現れており、昭和52年頃を境に自然域・都市域の増減が緩やかになったことが分かる。宅地については、緩やかな増加の傾向を保ち続け

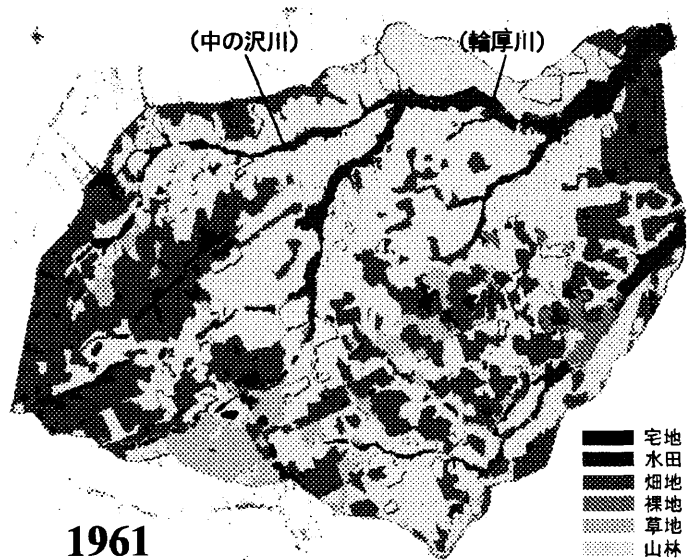


図-3 土地利用状況 1961(昭和36年)

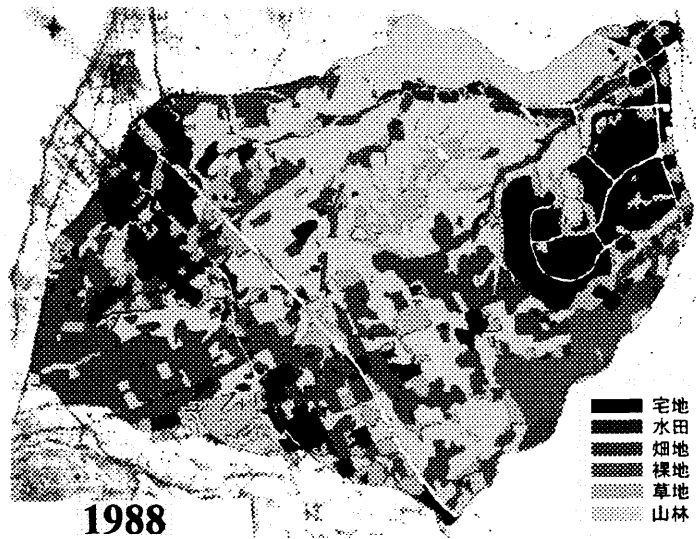


図-4 土地利用状況 1988(昭和63年)

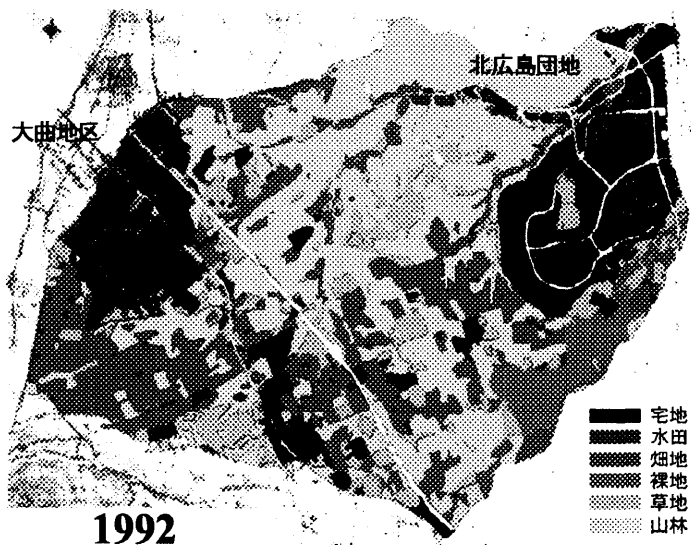


図-5 土地利用状況 1992(平成4年)

ている。

1961(昭和 36 年)、1988(昭和 63 年)、1992(平成 4 年)について土地利用の状況を表したものが図-3～5である。

1961(昭和 36 年)にはまだ宅地の占める割合はわずかであり、流域は畑地・山林等の自然域がほとんどであったが、約 30 年後の 1992(平成 4 年)には東部(輪厚川下流部・北広島団地) および西部(輪厚川上流部・大曲地区)を中心に集中的に住宅が建てられてきた様子が分かる。

4. 流出解析

解析に用いる流出モデルは、次式に示す損失機構を考慮に入れた総合貯留関数モデル⁴⁾である。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad \dots (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q - p \quad \dots (2)$$

$$p = \alpha q \quad \dots (3)$$

ここに、 s : 貯留高(mm)、 q : 流出高(mm/h)、 p : 損失高(mm/h)、 $k_1, k_2, p_1, p_2, \alpha$: モデルパラメータ。

モデルパラメータについて、星ら⁵⁾の研究によれば表面流にマニング則を用いた場合、流域によらず p_1, p_2 はそれぞれ 0.6, 0.465 を用いることが適当とされている。したがって k_1, k_2, α の計 3 個を未知パラメータとして同定することとする。

土地利用調査と同じ期間内(昭和 46 年～平成 8 年)の実測雨量・流量データを用いて、輪厚川流域における流出解析を行い、モデルパラメータ(k_1, k_2, α)の最適値を求めた。最適化手法はニュートン法による。

観測期間のうち、1987 年から 1993 年の期間は欠測などにより、データが得られていない。また、該当期間内のハイドログラフ(データ数 188)のうち、流出解析に用いるデータ(データ数 35)を次のように選定した。

- ①総降雨量が 20mm 以上かつ、直前の流出現象の影響を受けていないデータを用いた。これは、小規模降雨の場合や、流出現象に重なりがあると、最適化の安定性が悪くなり、パラメータの信頼度が低下するからである。
- ②積雪や融雪の影響を受けないよう、降雨時期が 7～9 月のデータを使用した。
- ③損失係数 α については、解析の結果 $\alpha < 0$ となる場合に、そのデータを使用しないこととした。これは、損失項がマイナスとなることが理論的には考えられないが、実際の観測データの中にはこうした数値解を出すケース

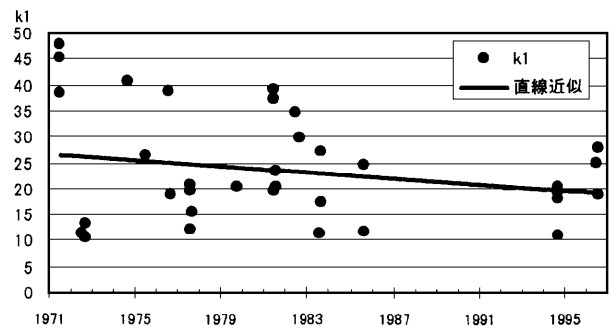


図-6 k_1 の経年変化

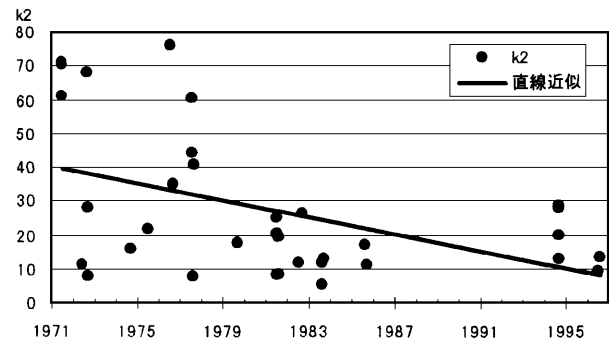


図-7 k_2 の経年変化

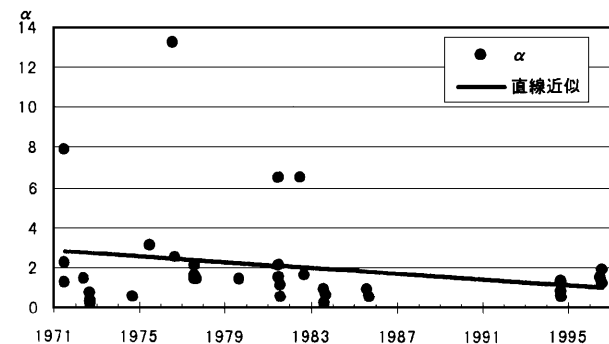


図-8 α の経年変化

があり、こうした場合を誤差の大きい観測値と見なしたためである。

以上の水文資料を用いて流出解析を行った結果、計算値が実績値に最も近くなるモデルパラメータの最適値が求められた。図-6~8は、各パラメータの経年変化を示したものである。

これらの図から見られるモデルパラメータ k_1, k_2, α の経年変化の傾向は、全体的に散らばり具合は大きいものの、各年ごとのとりうる値の範囲および全体的な数値は減少傾向を示しているといえる。

5. 考察

貯留関数における各パラメータの性質から、最適化パラメータの経年的な変化の意味を考察する。

k_1 については、貯留関数の第1項を支配する係数であり、降雨に対するハイドログラフ全体の反応の早さとピーク流出高の大きさに影響する。この値が大きいほど、流出の遅れが大きく、ピークがつぶれる。従って、最適化された k_1 値が経年的に減少していることは、洪水流出の立ち上がりが早くなり、ピーク流出高が増大していることを意味している。

k_2 については、貯留関数上の性質からは洪水の立ち上がり部および減衰部のカーブの突鋭度に影響し、値が高いほど緩やかなカーブとなる。最適化された k_2 値が経年的に減少していることは、ハイドログラフの形状が鋭敏になっていることを意味し、降雨に対する反応が鋭敏になっているとも言える。

α については、損失項を支配する係数であり、この値が高いほど浸透・蒸発散などの効果が高いことを意味し、降雨に対する流出の割合が減少する。経年的にこの値が低下していることは、損失が少なくなっていることを意味している。

次に、最適化パラメータの経年変化と、輪厚川流域の土地利用状況の変遷とを比較し、その関係を考察する。

流域内の土地利用区分のうち、山林、畑、田を雨水貯留効果の高い区域と考え、これらの面積変化を図-9に示した。1970年代にはこれらの区域面積が急激に減少したことが分かり、なかでも山林の減少が著しい。1980年代以降は減少速度が緩くなっている。同図に、最適化パラメータ k_1, k_2, α をプロットした。これによると、各パラメータの分布範囲の経年変化は、山林、畑、田の面積の減少と一致した傾向を有していることがわかる。

また、図-10は、観測地から求めた洪水到達時間（降雨のピーク時刻と流出ピーク時刻の差）と自然域（山林、原野、池沼、畑、田の合計面積）および都市域（宅地、工場、その他）の面積の経年変化を示したものである。洪水到達時間は、ばらつきが多いながらも全体的には減少傾向にあり、土地利用状況における自然域合計面積の変化に対応している。このことは、貯留

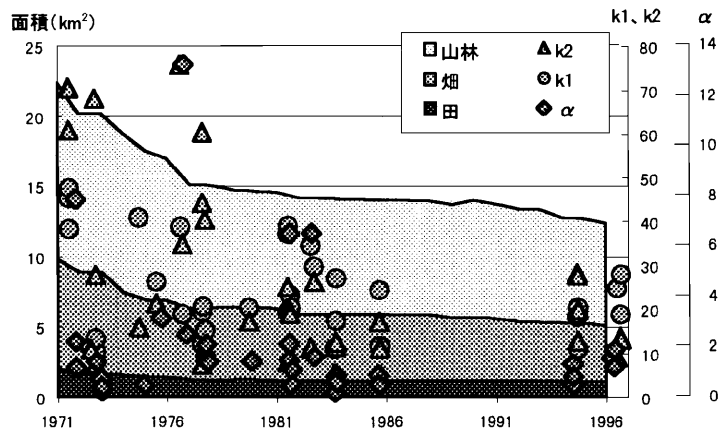


図-9 自然域(山林+畑+田)の面積とパラメータの変化

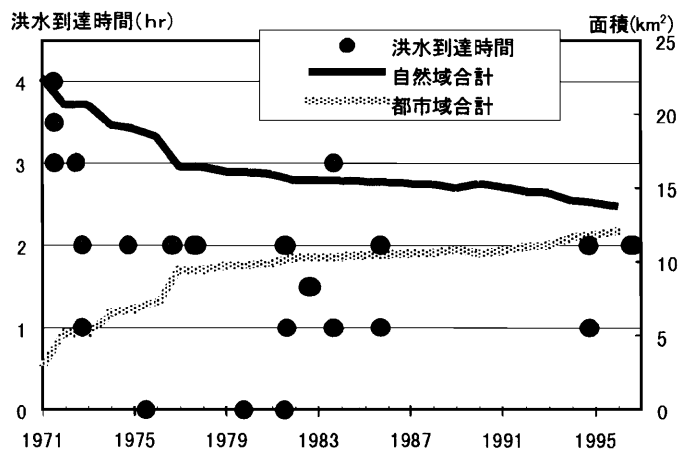


図-10 洪水到達時間、自然域・都市域面積の経年変化

関数の最適化パラメータの経年変化が意味することとも符合している。

6. パラメータの変化による流出シミュレーション

貯留関数の各パラメータは洪水ごとにばらつきが大きく、流域に特定な最適値を設定することはできなかった。しかし、経年的な傾向を線形近似した平均値を用いた場合に、過去と現在の流出特性にどれだけの違いがあるのかを確かめることは、都市化の影響度合いをある程度表現する上で有意義と考えられる。

そこで、近似直線に近接するパラメータ値となった1975年7月11日(7/11, 0:00 am~7/12, 7:00 am)と1996年8月22日(8/22, 6:00 am~8/25, 5:00 am)の2つのデータを用いて、パラメータ k_1, k_2 をそれぞれ入れ替えた場合のハイドログラフを計算し、検討を行った。なお、 α については変更しなかった。

計算の結果、1975年のケースについては、近年のパラメータを適用した場合に洪水の立ち上がりが早まり、ピーク流出高は最適化パラメータによる計算値に対して約25%増加した。また洪水の減衰は早まり、ハイドログラフの立ち上がりから14時間目以降は同計算値より小さくなっており、24時間目で約50%となっている(図-11)。

一方、1996年のケースについては、1975年の最適化パラメータを用いることで、ピーク流出高が約25%低減した。減衰部については前記とは逆に45時間目以降で約2倍の流出高を算出している(図-12)。

上記のシミュレーションは、平均的なデータを用いて仮想的に過去と現在の流出特性を比較したものであり、定量的な評価は限定された範囲内で用いなければならない。実際の流出現象は流域の湿潤・乾燥状態や植生の活性度や季節などによって影響を受けていると考えられるため、一概に過去と現在の流出特性を最適化パラメータのみを用いることで言い表すことはできない。しかし、上記のような流域の様々な条件を総合した平均的な傾向として判断すると、以下のように表現できよう。

- ①近年の流出特性の変化として、約20年でピーク流出高が約25%増大した。
- ②特にハイドログラフ低減部より後期の流出高に大きな差が生じている。

7. おわりに

損失機構を導入した貯留関数を用いて、近年の流出特性の変化が、流域の自然域の面積減少と一致した傾向を有していることを確認した。これは、従来の一般的な貯留関数法、すなわち前期無効降雨のカットや、

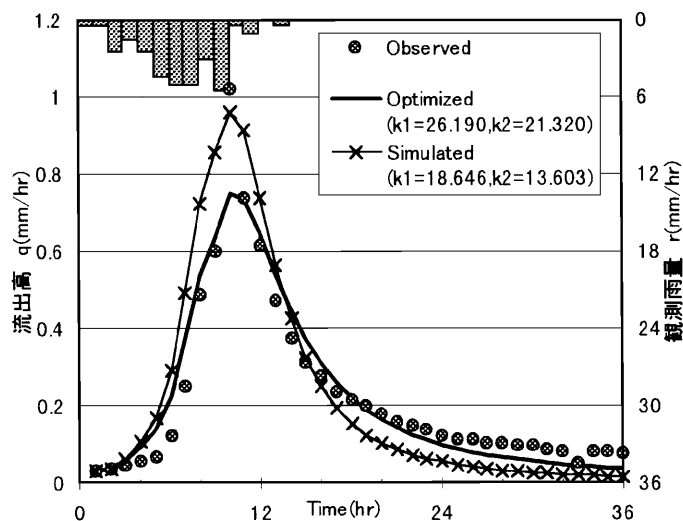


図-11 1975年の出水例に1996年のパラメータを用いた場合

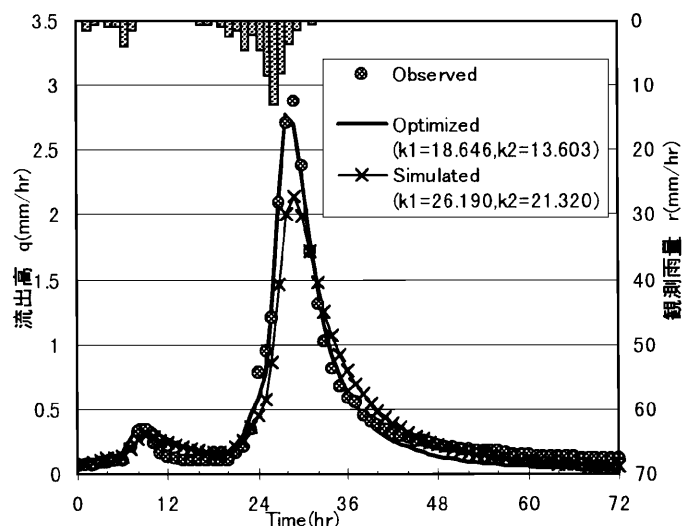


図-12 1996年の出水例に1975年のパラメータを用いた場合

基底流出の分離を行って算出した有効雨量を用いる貯留関数モデルでは、計算できなかったことである。なぜなら、無効降雨や基底流出の中に、流域の状態変化に伴う流出現象の変化が隠されているからである。

損失機構を導入した貯留関数では、損失項を含めたパラメータ同定を同時に行うことができるため、観測雨量および観測流出高を「直接」用いた解析が可能となった。このため、最適化したパラメータの客観的な比較が可能となったものである。

また今回の解析は、長年にわたり流出データの観測を継続してきた努力と、都市化の進展を見越して、適切な流域に試験地を設定して観測ポイントを設けた、当時の研究者の判断がなければ出来なかったことでもある。

今後は、損失高に含まれる蒸発散・林内貯留や浸透について、流域特性との関連を説明できるモデルを作成することが課題であり、またモデルパラメータの物理的意味を明らかにする必要がある。

¹⁾ 北海道：北海道統計書，第98回～第104回,1991～1997

²⁾ 北海道統計協会：北海道市町村勢要覧，第15回～第23回,1979～1995

³⁾ 広島町：広島町統計書，S50版～H8版，1976～1996

⁴⁾ 馬場仁志、星 清：損失機構を取り入れた総合貯留関数法の試み．土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第Ⅱ部，pp316-317，1997

⁵⁾ 星 清、山岡勲：雨水流と貯留関数法との相互関係．土木学会第26回水理講演会論文集,pp.273～278,1982