

気温と貯留定数を用いた自分流解析のための K Tモデルの提案と長良川流域への適用

K T Model for Daily Natural Runoff Analysis by Using Air Temperature and a Storage Constant K
The Proposal and the Application for Nagara River

小寺隆夫 *
By Takao KODERA

KT Model is a daily natural runoff model. I propose it and show it's good results in NAGARAGAWA so called natural river. It's very simple model with only one constant K relating to basin recharge and recession in low-water. The daily natural runoff is determined by the daily precipitation and the daily air temperature. Loss in natural runoff is evaporation. It refers to air temperature. In this basin I obtained $K=30$ and a relation of evaporation and air temperature $E=1.03+0.083T$.

Keywords: natural runoff, runoff model, air temperature, basin recharge, evaporation

1. まえがき

河川本来の自然の流れ, すなわち, 自分流を知ることは, 環境保全・水資源の計画を立案するために重要である。自分流を形成する要因は, 外部要因として降水, 蒸発そして内部要因として流域要因すなわち地質・地被・緯度・地形である。すなわち, 自分流は, 「外部要因として降水と蒸発のみが作用している流域における流出」ということができる。K Tモデルは, 流域要因をただ一つの定数Kで表す。Kは自分流河川の無降雨・低水流出時の減衰曲線から推定する。蒸発は降水や流出に比較して信頼のできるデータ直接得ることは極めて困難である。気温と蒸発の間にはエネルギー保存の法則から考えると1次の関係がある。K Tモデルでは, 外部要因としての蒸発Eを流域近傍の地点の日平均気温Tに関する1次式で表す。具体的には次の手順となる。まず, 月別に一定の日蒸発を仮定してK Tモデルによって月流出を求め, 観測月流出と比較する。両者が等しくなったときの仮定日蒸発をその月の平均蒸発とする。この蒸発と近傍地点の月平均気温の関係を1次式として最小二乗法により求める。K Tモデルの検証は実際に観測される自分流によって行われる。上流に自然の流況を大きく変化させるようなダム, 流域外分水が無い河川の流出は「自然に近い」流況, すなわち, 自分流を示すといえよう。しかし, 自分流を直接観測できる河川はまれである。著者は, このような河川として長良川をとりあげ, 墨俣地点(流域面積 1914k m²)について 1992-1994 の3年間の冬期を除く3月から12月について, K Tモデルによる流出解析を行った。その結果, $K=30$ とし, 日々の蒸発Eと近傍に位置す

*正会員 工博 建設技術研究所顧問

(〒509-01 岐阜県各務原市緑苑南2-61)

名古屋地点の日平均気温 T との関係式を $E=1.03+0.083T$ で表すことにより、 K T モデルは、極めてよい結果を得ることと示した。

K の単位は日で、貯留定数 K 、貯留定数あるいは単に K と呼ぶことにする。

2. K T モデルの構造と水理

1. 1 構造

- ①直列多層構造である。
- ②ある時点におけるモデル内の全貯留量は、その時点の流出高で求められる。
- ③ある時点における流出高は最上層 i の流出高 Q_i に等しい。
- ④各層毎に、最低流出高=最高流出高/2 である。(最下層を除く)
- ⑤各層の最高流出高は、直上層の最低流出高である。
- ⑥各層の容量は全て等しい(最下層は2倍の容量とする)
- ⑦モデルの層数 i は流出高によって変化する。
- ⑧流出が行われている層の下位の層は、常に全て満たされている。

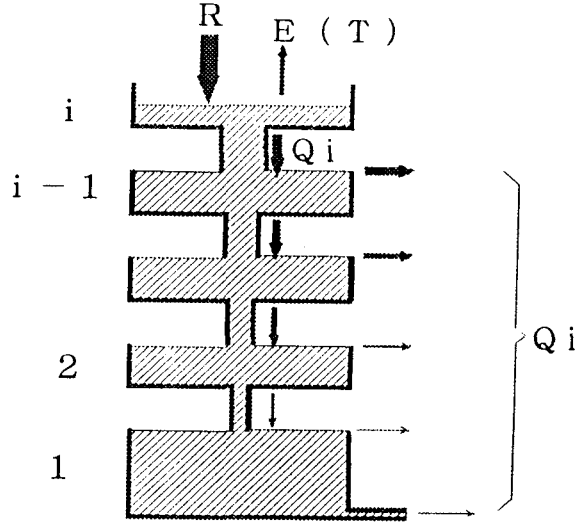


図-1 K T モデル

1. 2 水理

(a) 貯留定数

各層の流出定数 α_i は、貯留定数 K から (1) 式によって求められる。貯留定数の単位は日である。

$$\alpha_i = 2^{i-2} / K \quad (1)$$

(b) 流出高

流出高 Q_i は、(2) あるいは (3) 式で求められる。ここに、 S_i は、 i 層の貯留量である

$$i \geq 2 \quad Q_i = \alpha_i (S_i + K \times 1 \text{ mm/day}) \quad (2^{i-2} \leq Q_i \leq 2^{i-1}) \quad (2)$$

$$i = 1 \quad Q_i = \alpha_i S_i \quad (0 < Q_i \leq 1) \quad (3)$$

(c) 流出継続時間(半減期)

上層からの供給が途絶えた時点からの各層の最大流出継続時間(半減期) D_i は (4) 式で求められる。

$$D_i = K / 2^{i-2} \text{ LOG}(2) \quad (4)$$

(d) 流域貯留量

流域貯留量(図-1の影線部)は、(5)式で求められる。

$$SG = K (Q_i / 2^{i-2} - 1 + i) \quad (5)$$

(e) 連続の式

翌日の流出高 Q_2 は連続の式 (6) によって求められる。

$$Q_2 = SG_1 - SG_2 + R_1 - E_1 \quad (6)$$

ここに、 SG_1 は当日の、 SG_2 は翌日のモデル内の流域貯留量で、 R_1 は当日の雨量、 E_1 は当日の蒸

発量を示す。(6)式は陰関数であるから、 Q_2 を仮定しながら繰り返し計算となる。

(f) 期間流出高

ある対象期間（ N 日間）におけるモデルの累加流出高 ΣQ_c は、(7)式で示される。

$$\Sigma Q_c = \Sigma R + (\Sigma S_{G_B} - \Sigma S_{G_E}) - \Sigma E \quad (7)$$

ここに、 ΣS_{G_B} 、 ΣS_{G_E} は、ある期間（ N 日）の始めと終わりにおける流域内総貯留量、 ΣR 、 ΣE は当該期間内の累加雨量、累加蒸発量とする。

3. K

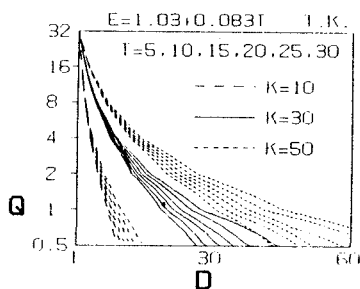
3. 1 流域の地被・地質とK

KはKTモデルの物理的骨格を決める。すなわち、第1層の容量は $2K \times 1 \text{ mm/day}$ 、第2層から上の各層の容量は全て $K \times 1 \text{ mm/day}$ である。

Kは流域の地被・地質（地形を含む）に関係する定数である。

モデルの半減期が1日以上層が日単位の流出に関係しているとして、現実の地層の厚さを計算してみる。 $K=30$ とすると、(4)式より $i=6$ すなわち6層の半減期が1.3日となる。6層以下の全容量は $7K=210$ である。表層近くの地層の、流出に関係のある土壤水分の容積比率を0.1とすると、モデルの6層以下は、表層地層の約2mに相当する。地表から2mまでの層は一般に土壤（岩石の風化物と有機物の集合）で植物の根のはいる範囲である。また、地表から2mの深さの地温は気温から2月間も遅れて変動し、変動幅も小さい。図-2に示すようにEが 1mm/day のときの最低の流出高（長良川の場合 0.5mm/day ）に達するまでの時間は50日程度である。これらの諸点から、Kは30を中心とし、流域の地被、地質および地形によって変化すると考えられる。

3. 2 Kとモデルの逓減特性



流出モデルの特性は、無降雨時の逓減特性によって表される。図-2は、無降雨時の貯留定数 K ：10～30、日平均気温 T ：5度～30度の逓減曲線を示したものである。 K が小さくなるほど、また、 T が大きくなるほど減衰が早くなる。 $K=30$ として、 2mm/day （低水流量相当）から 0.5mm/day （既往最低流量相当）にまで逓減する日数は、期間中の日平均気温が10度の場合は24日、30度の場合は14日で10日間も早い。日蒸発量（日損失） E と日平均気温 T の関係は、次式を用いている。

$$E = 1.03 + 0.083T$$

図-2 KTモデル減衰曲線

3. 3 Kの検証

Kを適当に定めることにより、モデルの特性を実際の流出に自由に適合させることができる。妥当なKの値は、次の3点によって検証される。

- ①モデルと観測データの累加流出高 ΣQ_D と ΣQ_C が等しい。
- ②観測流出高が 2mm/day 以下の時の両者の累加流出高 ΣQ_{C2} 、 ΣQ_{D2} が等しい。
- ③両者の流出波形が近似している。

4. TとEの関係

図-3は、長良川墨俣地点（流域面積 1914km^2 ）の1992-1994の3年間について、 $K=30$ として、各月

ごとに(7)式が成立するEを求め、名古屋地点の月平均気温Tとともに示したものである。

図-3(1)は、時系列で、水平な断続する実線がE、連続する実線がTである。1月間より期間を長くとして計算したEについても参考までに図中に示してある。

図-3の(2)は、(1)と同じ1月単位のTとEの散布図である(1月より長い期間の(T,E)は黒丸で示す)。ばらつきは大きいが正の相関が読みとれる。TとEの関係を(8)式であらわす。

$$E = a + bT \quad (8)$$

1月単位の3年間36個のデータによって、(9)式が得られ、図-3の破線で示した。

$$E = 1.04 + 0.083T \quad (9)$$

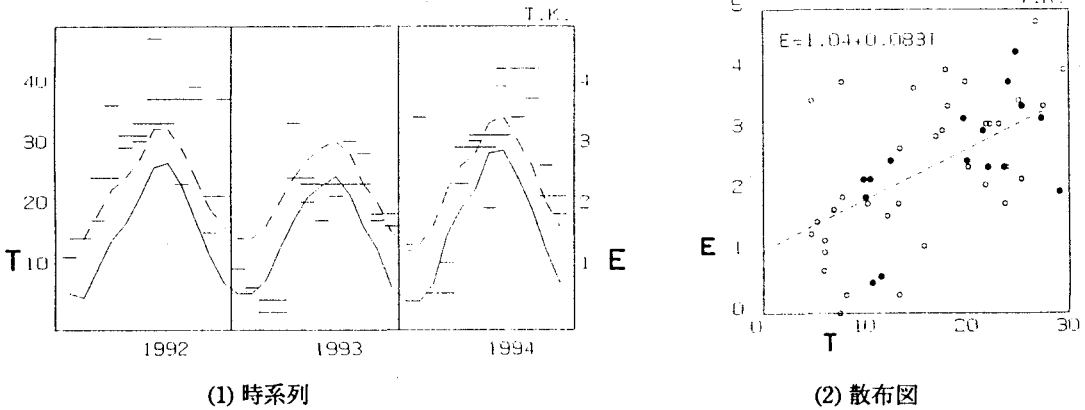


図-3 名古屋地点月別平均気温Tと長良川墨俣地点K TモデルEの関係(1992-1994)

5. K Tモデルの適用例

5. 1 結果

図-4は長良川墨俣地点について $K=30$ 、 $E=1.04+0.083T$ として、1992-1994の3年間について、K Tモデルを適用した結果を示したものである。各年3月1日の流出高を初期値として(6)式により10月間にわたり連続計算してある。流出高Qは低流出の適合度をよく検証できるように対数で示す。

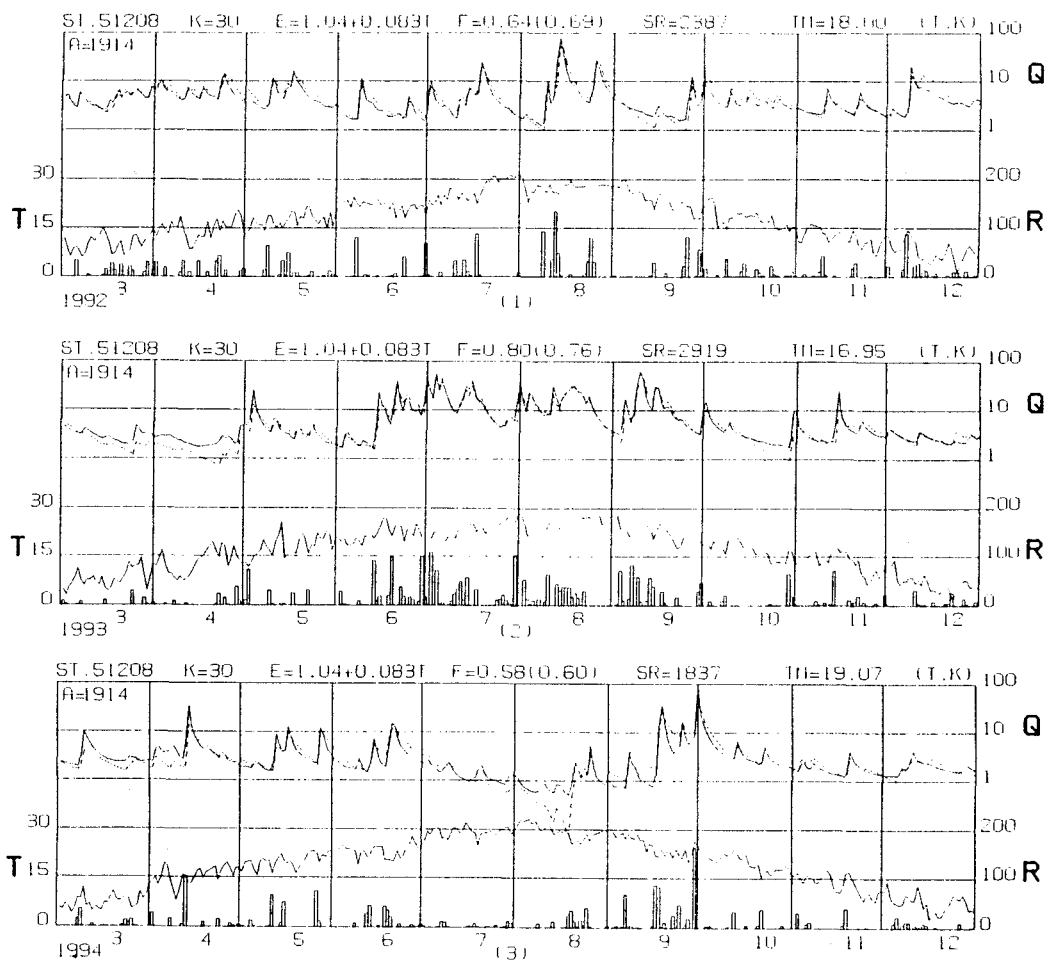
図から、次の諸点が読みとれる。

- ①全体的にかなりよい適合を示している。
- ②流出率Fも ± 0.05 の誤差に収まっている。
- ③1993年の3月～4月中旬、1994年の3月～4月は計算値が低めになっている。(1992年は適合)
- ④1994年の7月中旬から8月中旬までは計算値が低めになっている。(1992年、1993年は適合)

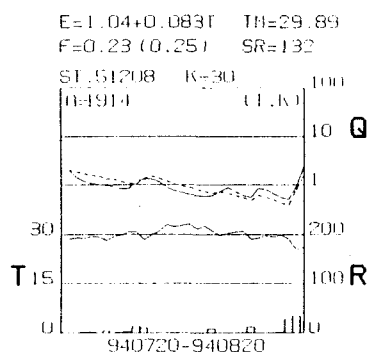
5. 2 考察

- ①および②：長良川墨俣地点の流量が自然の流況に近いことの証左と考えられる。
- ③：各年の3月1日から4月10日の間の降水量SR・流出率Fは、次のとおりである。(): 計算値
 '92 : SR=306 F=0.66(0.6) '93 : SR=100 F=1.19(0.90) '94 : SR=149 F=0.90(0.62)
 '93、'94は'92に比べ降水量が極端に少ない。融雪に基づくわずかな流出が加算されても流出率は大きく増加する。すなわち、融雪の影響の大きい4月初旬まではK Tモデルは、そのまま適用できない。
- ④：これは初期値すなわち計算開始時点の流出高(流域貯留高)の問題である。3月1日を初期値として計算してきた7月20日の計算流出高は0.82mm/day(対応流域貯留高：49mm)である。これに対して同日7月20日の観測値は2.02mm/day(対応流域貯留高は91mm)である。7月20日の観測流出高2.02mm/dayを初期値としてK Tモデルによって8月20日まで計算した結果を図-5に示す。極めてよく適合している。

この期間の平均気温 $TM=29.89$ 度、降水量 $SR=132\text{mm}$ 、観測流出高 $SQ=30\text{mm}$ （流出率 $F=0.23$ ）である。
 K Tモデルによって計算したこの期間の流出高 SC は 33mm （流出率 0.25 ）で量的にも観測値と符合して
 いる。



図－４ K Tモデルによる長良川墨俣地点における日流出解析 1992-1994の各年3-12月 (K = 3 0)



Q（実線）：墨俣地点日平均流出高
 Q（点線）：図－４は各年3月1日の流出高を、図－５は1994年7月
 20日の高を初期値としてK Tモデルにより計算した流出高
 T（実線）：名古屋地点日平均気温
 R（棒グラフ）：流域内6地点（大鷲、那比、中切、洞戸、大之田
 および葛原）の日雨量の単純平均値
 ST:観測地点番号
 TM:期間平均気温
 F:流出率、()はK Tモデルによる計算値
 SR:期間累加降水量

図－５ 1994.7.20-8.20 K Tモデル計算

6. まとめ

6. 1 得られた結論

K Tモデルは、ただひとつの貯留定数Kと日平均気温Tによって、日降水量から自流水を求めるものである。長良川墨俣地点1992～1994の非降雪期において、 $K=30$ 、日蒸発 $E=1.03+0.083T$ として実用的な適合を得た。

①Kは流域に固有の定数と考えてよいこと。

②日蒸発すなわち日々の損失が流域に近い任意の地点の日平均気温の1次式であらわされること。

6. 2 実用性

①モデルの構造が単純で設定が容易であること。すなわち、ただ一つの定数Kのみ定めればよい。

②蒸発損失が流域の近傍地点の日平均気温であらわせる。

6. 3 今後の課題

①解析地点数、解析年数を増やし、K、T-E関係の普遍的な決定法を確立する

②水利用（地下水・伏流水量を含む）・排水の実態調査をすすめK Tモデルの自流水の検証を行う。

7. おわりに

水文解析には正確で信頼のできる長期にわたって欠測のない気温、降水量、流量、水位、水温、海水温、水質、地形、地質、地被等の膨大なデータが必要である。そして、膨大な水文データの処理が必要である。最近のパソコンの進歩はめざましく、研究者所有のパソコンで、これらの解析は容易に行われるようになっている。しかし、膨大な雨量、流量データをどのようにして収集し、パソコンで直接処理できる媒体にするかが問題である。気象庁は、研究用に無料で詳細な気象データをコンピュータで直ちに利用できる媒体MTで提供している。海上保安庁は海水温、国土地理院は地形、地被のデータを磁気媒体で有料ではあるが提供している。建設省は、全国で396地点の降水量、366地点の流量を定常的に観測している。著者は、建設省所管の水文データが、気象庁所管の気象データのようにコンピュータで直接解析可能な媒体で提供されることを当局に要望していた。最近ようやく日雨量、日流量についてFDで提供されようになった。本論文はそのFDを用いて行ったものである。もし、過去の年表のデータ、さらに進んで、時間水位、時間雨量のデータもCDやMOなどパソコンで利用できる媒体で提供されるならば、本分野の研究は、飛躍的に発展するであろう。このような情報公開が進むことを期待する。

（1992年の長良川流域日雨量については著者が自ら雨量年表からキーボードからたたき込んだものである。わづか6地点であるが約半日を費やした。全国で同じことが繰り返されるとすれば極めて不合理である）

参考文献

小寺隆夫：低水予測のために 水利科学 第10巻4号, pp56-70, 1966

小寺隆夫：一提案としての<多重層流出モデル> 土木学会誌, 第51巻4号, pp38-41, 1966

小寺隆夫：低水流量の解析についての一方法, 土木学会誌, 第51巻11号, pp51-53, 1966

小寺隆夫：魚野川流域における水文季と降雪分布, 長岡高専紀要, 第19巻1号, pp15-23, 1983

小寺隆夫：傾斜層モデルによる流出解析, 第27回水理講演会論文集, pp463-466, 1983

小寺隆夫・水瀬正夫：気温と浅層地温の関係について, 長岡高専紀要, 第26巻3号, PP95-104

使用データ

建設省河川局編(1992-1994)：雨量年表, 流量年表

気象庁：地域気象観測資料 時・日別値ファイル(略称 AMeDAS)

気象庁：世界気象資料 時・日別値ファイル(略称 WMO)