

予測誤差修正機能を付加したファジィ推論による融雪流出予測

Snowmelt runoff forecasting based on the fuzzy reasoning method with error correction algorithm

八田茂実*・藤田睦博**・嵯峨 浩***

By Shigemi HATTA, Mutsuhiro FUJITA and Hiroshi SAGA

Abstract.

The snowmelt runoff prediction using the fuzzy reasoning method has been developed. However, to improve the prediction accuracy, it is necessary to adjust the predicted hydrograph based on the level of prediction error.

In this paper, the fuzzy reasoning method with a function of predicted error correction is presented for the snowmelt runoff prediction. The applicability of the model is assessed and compared by making 3-hr lead time prediction of runoff in experimental basins. It is concluded forecast results by the use of proposed method have higher degree of accuracy in comparison with the snowmelt prediction model using only fuzzy reasoning method.

Key words: fuzzy reasoning, error correction, snowmelt runoff prediction

1. はじめに

融雪流出過程は非常に複雑な現象であり、その物理的な機構は必ずしも明らかにされているわけではなく、更に流出予測を行う場合には予測誤差を含んだ情報の利用も考えられる。Zadeh¹⁾によって提案されたファジィ集合の理論は、曖昧な情報を有効に扱うことができ、システムが複雑で数式による記述が困難である場合でも、入出力のファジィ関係からこれらのシステムを記述できるという特徴を持つ。このようなファジィ理論を融雪流出予測に利用すると、融雪流出に関わる気象要素と流出量の関係からシステムをブラックボックス的に扱えることとなり、流出予測等の実用的なシステムの構築に有用と考えられる。

著者ら²⁾はMamdaniによって提案されているファジィ推論手法³⁾を融雪流出に適用し、気温資料のみを用いた数時間先程度までの融雪流出量の予測手法を提案している。しかしながら、これらの予測手法では予測を順次進めるだけで、予測誤差をフィードバックして推論の知識部を修正する機構がないため、リードタイムの長い予測ではこの誤差が累積されていくという問題を有していた。このことは、ファジィ推論を用いた予測手法の重大な欠点であり、予測誤差の修正機構の開発は実用的なシステムの構築に必要不可欠と考えられる。

* 正会員 苫小牧工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒059-12 苫小牧市錦岡443番地)
** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
*** 正会員 工博 北海学園大学助教授 工学部土木工学科 (〒064 札幌市中央区南26条西11丁目)

しかし、 n 入力1出力系のファジィ推論では推論の知識部が $(n+1)$ の次元を有するため、予測誤差をフィードバックして推論の知識部を最適化することは容易ではない。このため、本研究では、ファジィ推論による融雪流出予測に誤差修正機能を持たせる試みとして、融雪期特有の周期性の強い流出特性を利用し、過去に計算された予測値の予測誤差から次の予測値を修正する様な誤差の修正機構を検討する。

尚、本研究では、豊平川流域に内包される観音沢川流域（流域面積1.0km²）の92年融雪期を対象として誤差の修正機構を検討し、同流域の93年融雪期及び藤舞川流域（流域面積9.6km²）・百松沢川流域（流域面積14.6km²）に適用して予測誤差の修正効果を確認することとした。流域の概要を図-1に示す。

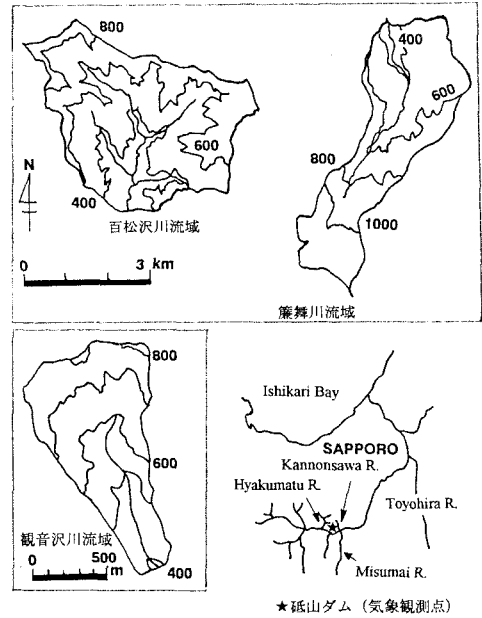


図-1 対象流域の概要

2. ファジィ推論による融雪流出予測

2.1 ファジィ推論による流出予測

時刻 t における流域への流入量を $I(t)$ 、流出量を $O(t)$ とすると、流出系の一般的なシステム方程式は次式のように考えられる。

$$O(t) = f\{I(t-1), \dots, I(t-n), O(t-1), \dots, O(t-m)\} \quad (1)$$

融雪流出では、流入量（融雪量）は他の気象要素から推定されるため、式(1)の流入量を融雪に関わる気象要素で置き換える。本研究では、 $O(t)$ に流出量 $Q(t)$ ・流出変化量 $\Delta Q(t)(=Q(t)-Q(t-1))$ を、 $I(t)$ には一般的に観測されている気温 $T(t)$ を考え、融雪流出予測のシステム方程式として次式を採用した。

$$\Delta Q(t) = f\{Q(t-1), T(t-1), \Delta Q(t-1)\} \quad (2)$$

$\Delta Q(t), Q(t), T(t)$ のメンバーシップ関数をそれぞれ図-2に示すような $M_{\Delta Q(t)}$, $M_{Q(t)}$, $M_{T(t)}$ によって表せば、式(2)は以下のような条件つき命題に書き直すことができる。

$$\text{If } M_{Q(t-1)} \text{ and } M_{T(t-1)} \text{ and } M_{\Delta Q(t-1)} \text{ then } M_{\Delta Q(t)} \quad (3)$$

式(3)の条件つき命題は時刻毎に変動し、これを $P(t)$ と書くと、時刻 t までには、 $P(1), P(2), \dots, P(t)$ の条件つき命題が得られるので、時刻 t における全体のファジィ関係 $\Pi(t)$ は次式のように表すことができる。

$$\Pi(t) = P(1) \cup P(2) \cup \dots \cup P(t) = \Pi(t-1) \cup P(t) \quad (4)$$

このようにして合成されたファジィ関係は、時刻 t までの出水経験に対応している。

1ステップ先の流出量増分の予測値 $\Delta Q'(t+1)$ のメンバーシップ関数 $M_{\Delta Q'(t+1)}$ は、次式によって計算できる。

$$M_{\Delta Q'(t+1)} = M_{Q(t)} \diamond M_{T(t)} \diamond M_{\Delta Q(t)} \diamond \Pi(t) \quad (5)$$

ここに、記号 $\diamond$ はファジィ合成演算を意味する。

更に、2ステップ・3ステップ先の流出量は、予測されたメンバーシップ関数を式(5)に順次代入して計算される。即ち、2ステップ先の流出量増分 $\Delta Q'(t+2)$ のメンバーシップ関数は次式によって計算される。

$$M_{\Delta Q'(t+2)} = M_{Q'(t+1)} \diamond M_{T'(t+1)} \diamond M_{\Delta Q'(t+1)} \diamond \Pi(t) \quad (6)$$

式(6)では、時刻 $t+1$ における気温の予測値が必要となるが、本研究では天気予報から得られる気温の予測値を用いる（詳細は文献4, 5）。

一方、融雪末期の積雪面積率の減少による融雪流出特性の変化は、 n ステップ前のファジィ関係 $P(t-n)$ を全体のファジィ関係 $\Pi(t)$ から削除することにより考慮される。

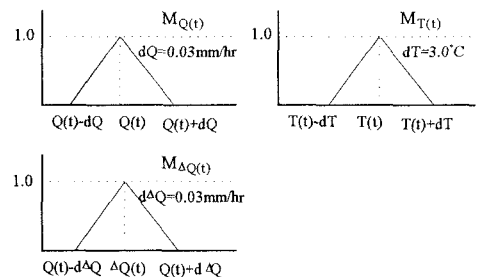


図-2 採用したメンバーシップ関数

時刻 t における全体のファジィ関係 $\Pi(t)$ から時刻 t のファジィ関係 $P(t)$ の削除は次式による。

$$\Pi(t) \text{ and } \sim P(t) \rightarrow \Pi(t) \quad (7)$$

ここで、記号 $\sim$ は NOT 演算を示す。

2.2 ファジィ推論による予測結果

以上のファジィ推論手法を観音沢川流域の92年の融雪期に適用して、融雪流出量の予測を行う。流域への適用に当たっては、予測時点より5日以前のファジィ関係を全体のファジィ関係から削除して、ファジィ推論の知識部の更新を行うこととし、計算時間間隔は1時間とした。図-3は観音沢川流域について5時間先までの融雪流出予測を行った結果を示したものである。リードタイムの増加に伴い予測誤差は増大し、予測流量と実測流量の位相差はリードタイムとほぼ一致している。

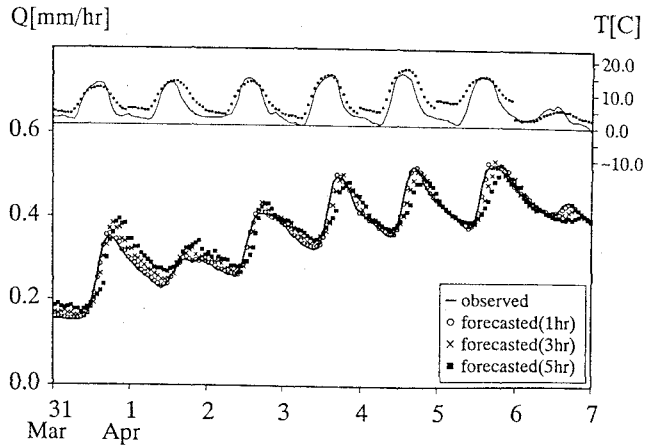


図-3 ファジィ推論による融雪流出予測結果(92年, 観音沢川流域)

図-3は観音沢川流域について5時間先までの融雪流出予測を行った結果を示したものである。リードタイムの増加に伴い予測誤差は増大し、予測流量と実測流量の位相差はリードタイムとほぼ一致している。

3. 予測誤差の修正

3.1 1時間前の予測結果に基づく流出予測誤差の修正†

時刻 t において、ファジィ推論により予測した n 時間後の時刻 $t+n$ の流量予測値を Q_t^n 、実測値を $Q_{t+n,obs}$ とすると、時刻 t における n 時間先の流出予測の予測誤差は

$$\hat{E}_t^n = Q_t^n - \hat{Q}_{t+n,obs} \quad (8)$$

により表すことができる。上式において時刻 $t+n$ における流量の実測値、 n 時間先予測の予測誤差に記号「 $\hat{}$ 」がついているのは、時刻 t において未知の値或いは計算値が得られていないことを意味している。

図-4は、図-3に示した観音沢川流域の92年融雪期の予測結果を用いて、時刻 t と $t-1$ における1, 3, 5時間先流出量の予測誤差の関係を示したものである。図を見ると両時刻における n 時間先流出予測の誤差はほぼ1:1の関係にあることが分かる。本節では、この関係を用いて予測流出量の修正を試みる。

t 時刻における修正後の1時間先流出予測値 $Q_{t,new}^1$ は、式(8)を用いて、

$$\hat{Q}_{t,new}^1 = Q_t^1 - \hat{E}_t^1 \quad (9)$$

で表す。図-4の関係から $\hat{E}_t^1 = E_{t-1}^1$ を仮定すると、時刻 $t-1$ における1時間後の予測誤差 $E_{t-1}^1 (= Q_{t-1}^1 - Q_{t,obs}^1)$ は既知であるので、これを式(9)に代入し、1時間後の予測流出量を次式により修正する。

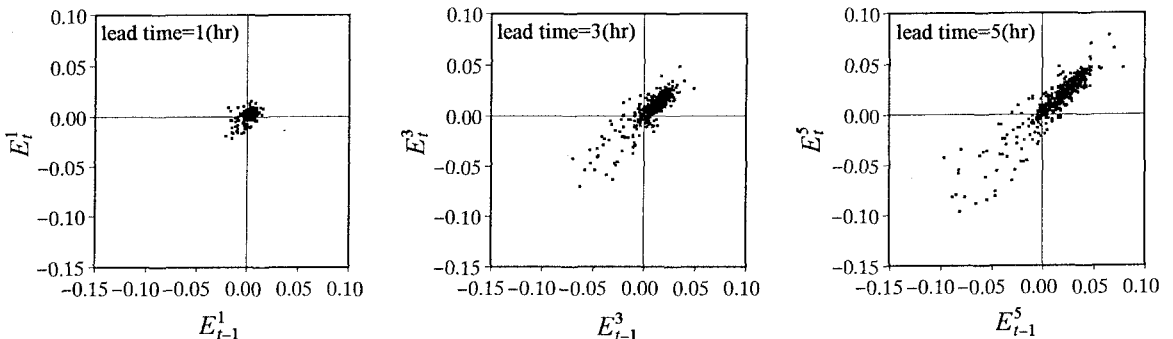


図-4 1ステップ前の予測誤差との関係

†本研究では計算時間単位を1時間として取り扱う。このため、 n 時間先の予測では n ステップ先までの予測計算を行うことになる。

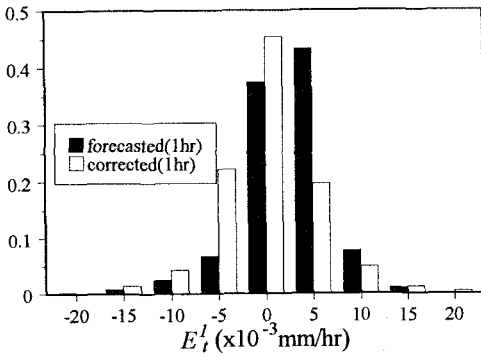


図-5 予測誤差の出現頻度

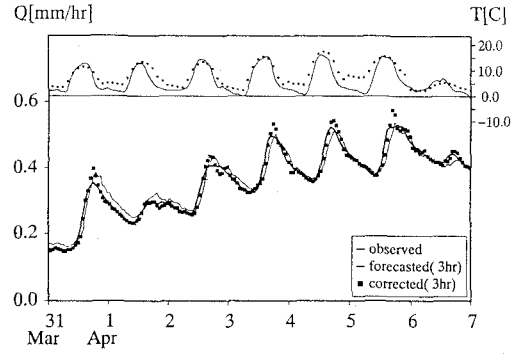


図-6 1時間前の予測結果に基づき予測誤差を修正した3時間先予測(1992年, 観音沢川流域)

$$Q_{t,new}^1 = Q_t^1 - E_{t-1}^1 = (Q_t^1 - Q_{t-1}^1) + Q_{t,obs}^1 \quad (10)$$

図-5は修正前の1時間先予測誤差と、式(10)による修正を加えた場合の予測誤差の出現頻度を比較したものである。図-5の横軸の数値は生じる予測誤差の範囲の代表値を示しており、式(10)の操作により発生する予測誤差は0付近に集まってくるのが分かる。 n 時間後の予測流量の修正値は、 $\hat{E}_t^n = \hat{E}_{t-1}^n$ の関係を用いて1時間後の予測値同様に修正を行うものとする、

$$\hat{Q}_{t,new}^n = Q_t^n - \hat{E}_{t-1}^n = (Q_t^n - Q_{t-1}^n) + \hat{Q}_{t+n-1,obs}^n \quad (11)$$

により計算される。ここで、 $\hat{Q}_{t+n-1,obs}^n$ は時刻 t では未知であるため、先に修正した $n-1$ 時間先の予測値を用いて、 $\hat{Q}_{t+n-1,obs}^n = Q_{t,new}^{n-1}$ を仮定すると、式(11)は次のように書き換えられる。

$$Q_{t,new}^n = (Q_t^n - Q_{t-1}^n) + Q_{t,new}^{n-1} \quad (12)$$

式(12)では、予測誤差修正時に含まれる誤差がリードタイムの増大に伴い増幅されるため、修正予測値は振動する傾向を持つ。このため、 t 時刻の予測値の修正を行った時点で、 $t-1$ 時刻の修正予測値を

$$Q_{t-1,new}^n = \frac{Q_{t-2,new}^n + Q_{t-1,new}^n + Q_{t,new}^n}{3} \quad (13)$$

によって平滑化して修正予測値とすることとした。これによれば、 n 時刻先の修正流出量を得るためには $n+1$ 時刻先までの計算が必要となる。図-6はこの様にして得られた3時間先の融雪流出量を示している。ピーク流量付近で流量を過大に予測する傾向があるものの、全体としては予測値の修正の効果がみられる。

3. 2 24時間前の予測結果に基づく流出予測誤差の修正

融雪流出は24時間の周期を持つ周期性の強い現象であることを考慮し、24時間前の予測誤差を考慮して現時刻における流出予測量の修正を行う。図-7は、時刻 t と $t-24$ における n 時間先流出量の予測誤差の関係を示したものである。図-4の1時刻前の予測誤差との関係に比べてばらつきは大きいものの、 $t-24$ 時刻で行った予測の予測誤差と t 時刻における n 時間先流出予測の誤差はほぼ1:1の関係にあることが分かる。この関係を用いて、3.1の修正方法と同様に予測流出量の修正を行うものとする、 n 時間先の修正流出量は、

$$Q_{t,new}^n = (Q_t^n - Q_{t-24}^n) + Q_{t-24+n,obs}^n \quad (n \leq 24) \quad (14)$$

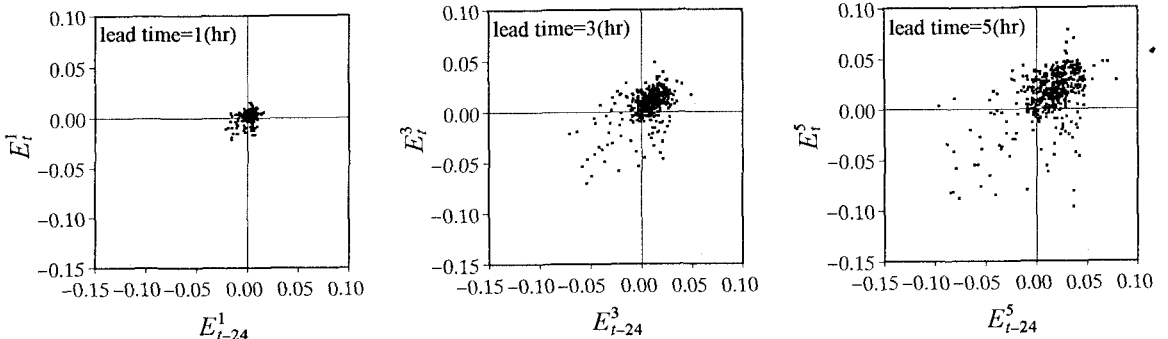


図-7 24時間前の予測誤差との関係

によって計算される。尚、式(14)により繰り返し修正を行うと、リードタイムの増加に伴い振動が起きるため、式(13)による平滑化を行っている。
 図-8はこの様にして得られた3時間先の融雪流出量を示している。修正結果は前日の流出特性に依存しているが、3.1の方法に比べ、ピーク流量付近での予測誤差を改善できる。

3.3 流出予測誤差の修正

流出予測値はこれまでに検討した2つの方法である程度改善できることが示された。2つの修正予測結果を見ると、1時間前の予測誤差に基づいて次のステップの予測値を修正する場合には、流出量の立ち上がりの部分で予測値はよく修正されているが、ピーク流量を過大に評価する傾向が見られる。一方、24時間前の予測誤差に基づく場合には、前日の流出波形に大きく依存するものの、流出波形全体を予測する形となり、ピーク流量付近の予測値を改善することができる。これらの修正予測値から最良の修正予測値を求める簡単な方法として、2つの予測値の重み付き平均値を考える。1時間前の予測誤差に基づく修正結果を Q_1 、24時間前の予測誤差に基づく修正結果を Q_2 として、最終的な修正予測値 Q_c は、

$$Q_c = k_1 \cdot Q_1 + k_2 \cdot Q_2 \tag{15}$$

ただし、 k_1 、 k_2 は重み係数

によって表される。式(15)中の重み係数をいかに決定するかが問題となるが、ここでは、前回の各修正値の誤差によって重みづけすることとした。ただし、重み係数は修正予測値が予測する時刻によって精度が大きく変わることを考慮し、各時刻 τ ごとに定めることとする。即ち、重み係数は、

$$s_1(\tau) = \sum 1/|Q_1(t-1) - Q_{obs}(t-1)|, \quad s_2(\tau) = \sum 1/|Q_2(t-1) - Q_{obs}(t-1)| \tag{16}$$

$$k_1(\tau) = s_1(\tau)/(s_1(\tau) + s_2(\tau)) \tag{17}$$

$$k_2(\tau) = 1 - k_1(\tau) \tag{18}$$

によって計算される。図-9は各予測時刻ごとに2つの修正予測値の重み付き平均をとって予測値を再度修正した結果を示している。単純な操作ではあるが、予測流出量の修正に有効であることが分かる。

4. 予測誤差を考慮した融雪流出量の予測結果

観音沢川流域の92年融雪期のデータを用いて検討した予測値の修正機構を、観音沢川流域・簾舞川流域・百松沢川流域の93年の融雪期に適用して、予測値の修正機構の妥当性を検討する。各流域とも予測計算は、92年の観測資料を学習データとして与え、この学習結果を利用して93年の融雪流出量の予測を行った。また、積雪面積率の効果は、5日以前のファジィ関係を削除することにより考慮している。それぞれの流域について予測値を修正した結果を図-10, 11, 12に示す。

各流域とも修正予測値は修正前の予測値に比べ実測流量によく一致しており、本研究で検討した予測値の修正方法がファジィ推論による融雪流出予測の精度向上に有効であることが示された。

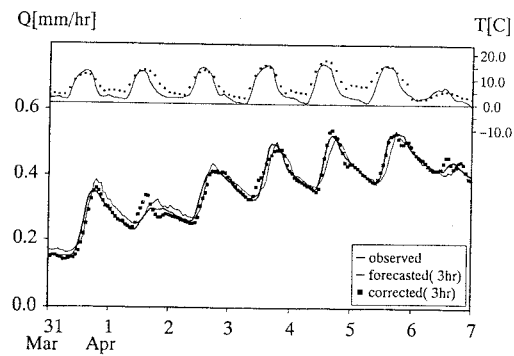


図-8 24時間前の予測結果に基き予測誤差を修正した3時間先予測(1992年, 観音沢川流域)

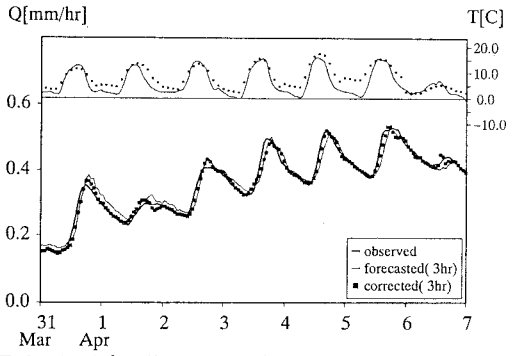


図-9 1・24時間前の予測誤差の重付平均により誤差を修正した3時間先予測(1992年, 観音沢川流域)

5. おわりに

本研究ではファジィ推論における予測誤差の修正方法として、融雪流出特性を考慮した方法を検討した。

現在のところ、ファジィ推論のシステム方程式が予測結果を入力する形となっているため、修正後の予測誤差が累積され、3時間先程度までの修正効果しか得られていない。しかし、3時間先までの予測値の修正効果はこれ以降の予測において影響するため、3時間までで予測の修正を打ち切ってもこれ以降の予測値は改善されるものと考えられる。また、システム方程式によっては更に長いリードタイムの修正が可能とも考えられる。

本研究で検討したファジィ推論による流出予測は流量情報が逐次得られることを前提としており、現在のところ、ダム流域など観測体勢の整備された条件の下で適用することができる。より多くの流域への適用には流量情報を必要としないものが必要となる。このようなシステムを実現するためには、ファジィ推論とこれまでに得られている融雪流出モデルの併用が必要と考えられる。

謝辞

本研究で使用しました水文資料の一部は北海道電力(株)から提供されました。また、本研究の一部は平成6年度河川情報センター研究開発助成によりました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Zadeh, L. A.: Fuzzy sets, Information and control, vol. 8, pp.338-353, 1965.
- 2) 八田・藤田・嵯峨: ファジィ推論を用いた気温資料のみによる融雪流出予測, 水文・水資源学会誌, vol. 7, No4, pp. 296-304, 1994.
- 3) E.M.Mamdani : Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEEE, 121-12, 1585-1588, 1974.
- 4) 八田・西村・嵯峨・藤田: 融雪流出予測における週間気象予報の利用について, 水工学論文集, 37, pp. 141-146, 1993.
- 5) 八田・西村・嵯峨・藤田: 観音沢川流域における融雪流出解析, 北海道支部論文報告集, 49, pp. 515-518, 1993.

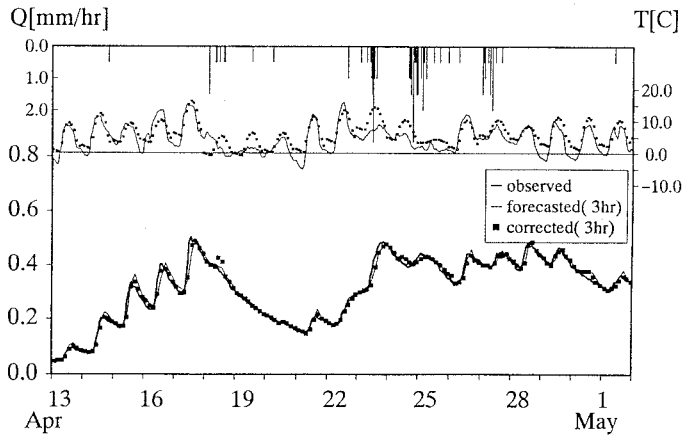


図-10 融雪流出予測の修正結果(93年, 観音沢川流域)

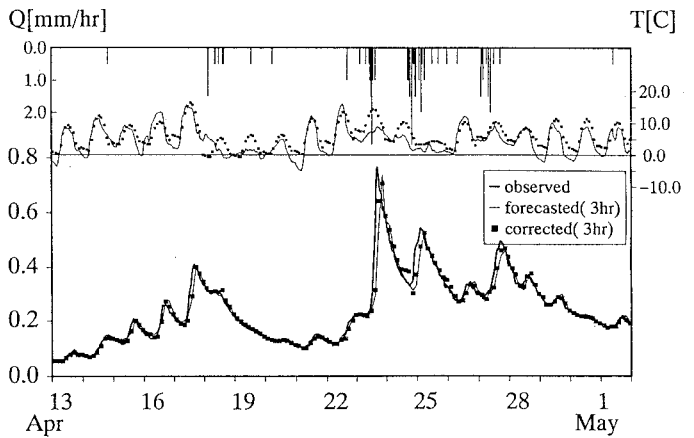


図-11 融雪流出予測の修正結果(93年, 簾舞川流域)

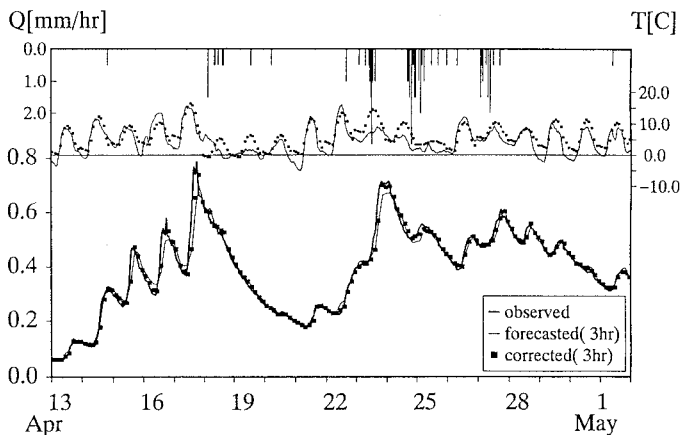


図-12 融雪流出予測の修正結果(93年, 百松沢川流域)