

高山氷河域を水源に持つ乾燥地河川の流域水循環モデル

宇治橋 康 行^{*}・小 寺 敏^{**}・伊 藤 龍 也^{***}

Water cycle model for the river basin with glaciers in the arid region

Ujihashi Yasuyuki, Koderu Satoshi and Ito Tatsuya

More than 30 percents of the Earth's land surface are arid and semiarid regions, and a great part of them are located in developing countries. Moreover desert area is expanding due to climate change, especially global warming, and human activities such as over cultivation. It is indispensable for sustainable development in the region to manage and develop the water resources. For this purposes, it is important to know how the water environment changes in these two millenniums. We have developed the water cycle model to reconstruct the palaeo-hydrological environment of the rivers with glaciers in the arid region. We applied the model to the Yurungkax River Xinjian, China. The model shows the possibility to reconstruct the palaeo-hydrological environment.

1. はじめに

ユーラシア大陸中央乾燥地域のオアシスにおいては、地球規模の気候変動に連動した水資源の変動に対応して、人々の生活の場や生業の形態が歴史的に大きく変化してきた。例えば、遊牧業と農耕業が共存した時代、両者が競合した時代、さらに農耕業が優勢となり遊牧の衰退した時代を経て、最近では砂漠化の進行などにより農耕業を基本とする生活基盤も危機にさらされているとともに地球規模の環境問題の原因の一つとなっている。この地域の人間生活を強く規制しているのは水循環過程の変動とそれに伴う水資源の変動である。この地域に成立する生態系や人間社会、文化、生活形態などの水循環過程の変動に対する適応性について、人間と自然との相互作用を歴史的検証をも含めて評価することは、この地域の水資源の利用体系や未来のあるべき人間社会や文化を探る上できわめて重要である。そのためには、過去の水循環過程および水資源変動の歴史的変遷過程を明らかにすること、すなわち古水文環境を復原することが必要不可欠であり、この目的を達成可能とする水循環モデルの構築が必要である。

古環境の復原には、氷河のアイスコア、年輪、同位体、湖沼堆積物、地温分布等の解析あるいは古文書の解読、遺跡の調査など種々の方法が用いられている。しかしながら、水循環モデルの入力と出来るような精度、と時空間分解能、連続性を有する定量的な復原値が得られる可能性は現状では降水量と気温のみであると言える。そこで、本研究では、現状で復原可能な水文気象データとその時間分解能を考慮し、月降水量、月平均気温のみを入力データとした高山域の氷河の融解水や季節積雪の融解水を水源とする中央アジア乾燥地域のオアシス地域の水循環解析モデルについて検討する。

2. モデル構造

すでに述べたように本研究で対象とするオアシス地域では、氷河および季節積雪の融解、蒸発現象が水循環

* 建設工学科地球環境工学専攻 ** 元大学院生 *** 応用理化学専攻大学院生

過程における主要な素過程の一つと考えられるので、これらを含めた水循環過程における主要な現象をサブも
 出るとして組み込んだモデルを構成することとした。しかしながら、古環境の復原を最終目的とする場合、詳
 細な水文気象および流域情報を得ることは現状では容易ではないので、モデルは流域内の高度分布による地帯
 分割のみを考慮した集中型モデルとした。モデルの基本構造を Fig.1 に模式的に示す。Fig.1 に示されるよ
 うに、モデルは、降水サブモデル、氷河および季
 節積雪の融解サブモデル、蒸発サブモデル、直接
 流出サブモデルおよび地下水流出サブモデルか
 ら構成されている。さらに、水循環過程に関する
 ものではないが、通常、気温および降水データは
 流域内の限られた地点、後述の適用例では下流端
 の一地点のみ、でしか得られないため、降水量お
 よび気温の空間分布の推定モデルが必要となる。
 以下に各サブモデルの概略を述べる。

2.1 降水サブモデル

このモデルは、降水量が与えられたとき、それ
 が降雨か降雪であるかを判定するものであり、こ
 こでは限界気温による判定を用いた。すなわち、
 $T_z \geq T_c$ then precipitation is rain fall
 $T_z < T_c$ then precipitation is snowfall (1)
 ここに、 T_z : 標高 Z の気温、 T_c : 雨雪の限界気
 温。後述の適用例では 0°C を用いた。

2.2 氷河および季節積雪の融解サブモデル

氷河や積雪の融解は、氷河あるいは積雪表面の熱収支の結果として生じる。しかしながら、放射収支量、
 顕熱および潜熱伝達量などの熱収支の各項を復原することは現状では出来ないので、ここでは、単純な気温指
 標を用いたモデルとする。氷河あるいは積雪の融解量は、

$$MS = M(T_z - T_b) \quad (2)$$

により求められる。ここに、 MS : 融解量 (mm)、 M : 融雪係数 ($\text{mm}^\circ\text{C}^{-1} \text{ month}^{-1}$)、 T_b : 融雪開始気温 ($^\circ\text{C}$)
 である。

2.3 蒸発サブモデル

流域、主に土壌面からの蒸発量も氷河あるいは積雪の融解現象と同様、地表面での熱収支の結果として生じ
 るが、ここでも単純に気温のみから推定する方法を用いる。Fig.2 は月平均気温と月蒸発量の関係を示したも
 のであり、一般に、時間単位が長いほど両者の間により相関が得られることが多く、蒸発量は気温から推定す
 ることが可能である。本研究での対象流域である、中国新疆ウイグル自治区和田地区 Yurungkax 河 Tonggzlug
 観測所では

$$E_p = 11.8T_z + 100.7 \quad (3)$$

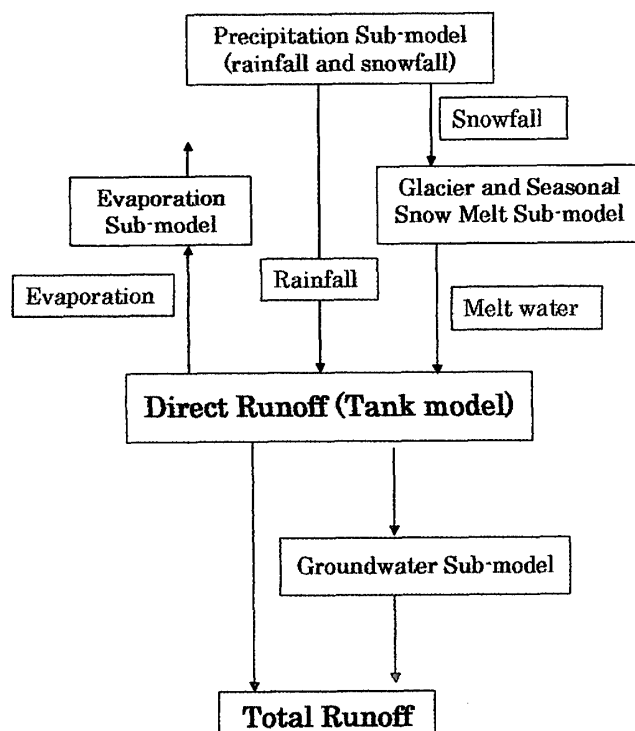


Fig.1 Schematic diagram of the model

なる関係が得られた。ここに、 E_p ：パン蒸発量(mm)である。パン蒸発量は水面からの蒸発量であり、土壌面からの蒸発量はパン蒸発量に係数を乗じて求める。すなわち、土壌面からの実蒸発量 E は

$$E = \alpha E_p \quad (4)$$

により求められ、ここでは、係数 $\alpha = 0.4$ を用いた。

2.4 直接流出サブモデル

本モデルでは、直接流出サブモデルとしては Fig.3 に示すような三段直列貯留型タンクモデルを用いた。

季節積雪の融解量は 1 段目タンクへの入力とし、氷河の融解量は 2 段目タンクへの入力とした。また、蒸発量は 1 段目タンクおよび 2 段目タンクのみで考慮した。これは、土壌面がある深さまで乾燥すると、蒸発抑制が起こることに対応している。

2.5 地下水流出サブモデル

地下水流出は、地下水が被圧地下水であるか不被圧地下水であるかによりその流出特性が異なる。高木によれば、地下水流出の低減特性は被圧、不被圧それぞれに対し、以下のように表される。

$$Q_G(t) = Q_0(t) \exp(A_c t) \quad (5)$$

$$Q_G(t) = \frac{Q_0(t)}{(1 + A_u \sqrt{Q_0(t)})^{1/2}} \quad (6)$$

ここに、 $Q_G(t)$ ：地下水流出量、 $Q_0(t)$ ：初期流出量、 A_c ：被圧地下水の低減係数、 A_u ：不被圧地下水の低減係数である。式(5)、(6)から地下水流出量と地下水帯の貯留量 $S_G(t)$ との関係は被圧、不被圧地下水それぞれに対し次式のように求められる。

$$Q_G(t) = A_c S_G(t) \quad (7)$$

$$Q_G(t) = A_u^2 S_G^2(t) \quad (8)$$

本研究で対象とした Yurungkax 河の流出量の低減部へ両曲線の当てはめを行ったところ、適合度にほとんど差が見られなかったため、タンクモデルによる直接流出計算における流出量と貯留量の関係を同型とするために被圧型の地下水を採用した。

2.6 降水の空間分布推定モデル

Fig.4 は、本モデルの適用流域の位置する中国新疆ウイグル自治区和田地区、西崑崙山脈、タクラマ

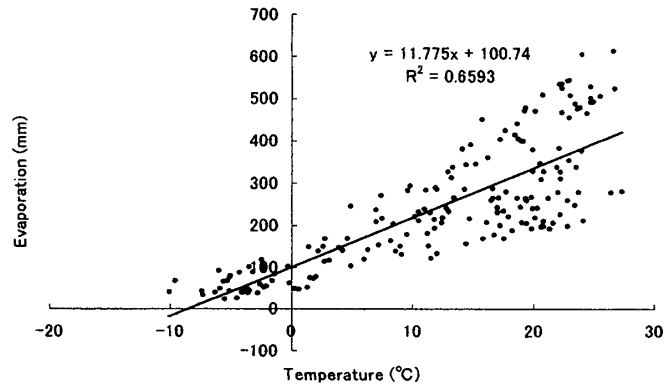


Fig.2 Relationship between air temperature and evaporation rate.

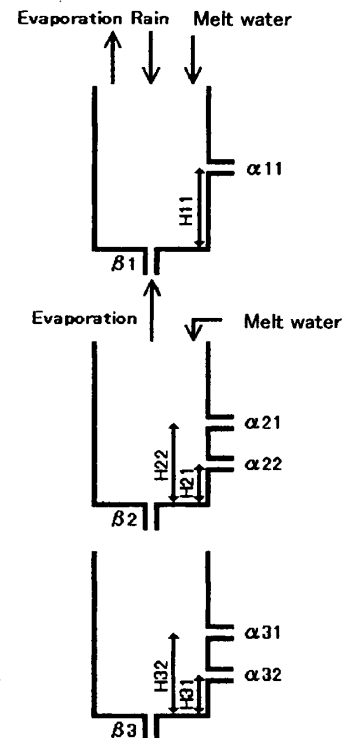


Fig.3 The basic Structure of Tank Model

カン砂漠周辺の年平均降水量と高度の関係を示したものである。図には、Chongce 氷帽で採取されたアイスコアの解析結果も含めてある。図からわかるように両者には極めて高い相関があり、任意高度の降水量は、基準点をもとに式 (9) で推定できる。

$$P_z = 0.09(Z - 1300) + 28 \quad (9)$$

ここに、 P_z : 標高 $Z(\text{m})$ の年平均降水量 (mm), Z : 標高 (m) である。各月の降水量は、次式で推定する

$$P_{z,m} = \beta_z P_{0,m}, \quad \beta_z = P_z / P_0 \quad (10)$$

ここに、 $P_{z,m}$: 標高 Z の地点の m 月の降水量, $P_{0,m}$: 基準点 (本研究例では和田 (標高 1360m)) の m 月降水量, P_0 : 基準点の年平均降水量 である。

さらに、流域平均降水量は流域を高度別地帯分割し、各高度の降水量の和として求める。

2.7 気温の空間分布推定モデル

気温の空間分布は、気温の高度減率を用いて推定する。Fig.5 は、和田地区の気温の関係の 3 月の例を示したもので極めて高い相関が見られる。他の月でも同様に高い相関が得られた。乾燥空気の断熱減率は $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ であるが、和田地区では、Table-1 に示すように季節によりかなり異なった値を示す。すなわち、気温の高度減率は冬に小さく夏に大きい。本研究では、観測データから得られた Table-1 の値を用いて次式で各高度の気温を推定した。

$$T_z = T_0 - \gamma(Z - Z_0)/100 \quad (11)$$

ここに、 T_z, T_0 : それぞれ標高 Z および観測点の観測気温, γ : 気温の高度減率 ($^\circ\text{C}/100\text{m}$), Z_0 : 気温観測地点の標高である。

Table-1 Seasonal variation of the laps ratios

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
γ	0.22	0.30	0.49	0.61	0.67	0.66	0.59	0.54	0.55	0.51	0.41	0.25

unit: $^\circ\text{C}/100\text{m}$

3. 対象流域の概要

対象流域は、中国新疆ウイグル自治区西崑崙山脈からタクラマカン砂漠に流入する Yurungkax 河 Tonggzlug 地点上流域 (流域面積 14575km^2) である。流域の 70% が標高 4,000m 以上であり平均標高は 5,317m, 流域内の標高 4,500m を超える領域には多数の氷河が存在し、その面積は $3,000\text{km}^2$, 全流域の約 20% に達する。水文観測点は流域出口の Tonggzlug 水

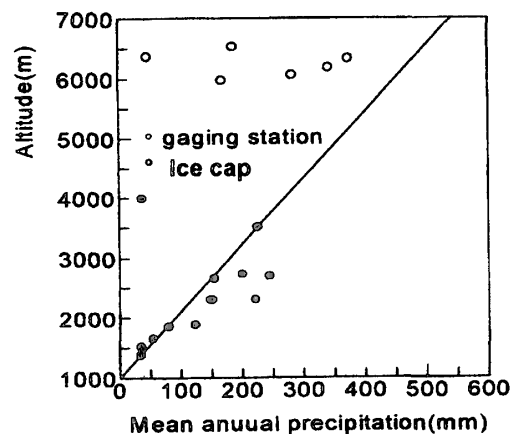


Fig.4 Relationship between altitude and annual precipitation

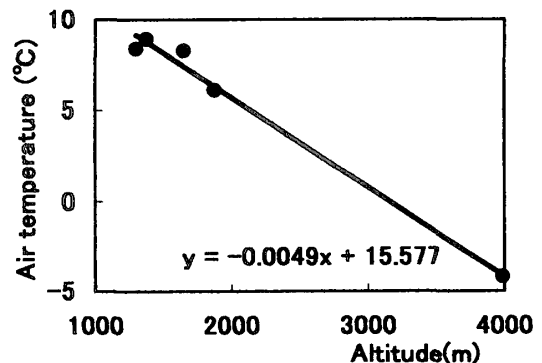


Fig.5 Relationship between air temperature and altitude in Hotan District Xinjian, China

文観測所においてのみ行なわれており、気温、降水量および流量が観測されている。年平均流出高は 149mm, Tonggzlug での平均年降水量は 57mm, 年平均気温は 12℃である。解析には、1957 年～1990 年までの 34 年間のデータを用いた。気温データの欠測値については、Hotan 気象観測点のデータを用いて線形回帰により補間した。

気温、降水量の空間分布は流域を 500m ごとの 11 の地帯に分割して求めた。流域の各地帯の全流域に対する面積率および各地帯の氷河の面積率を Table-2 に示す。

4. 解析結果と考察

34 年間のデータのうちはじめの 24 年間のデータをモデルパラメータの同定に用い、残りの 10 年間のデータをモデルの検証に用いた。また、計算結果の適合度の判定には式 (12) ～ (15) を用いた。

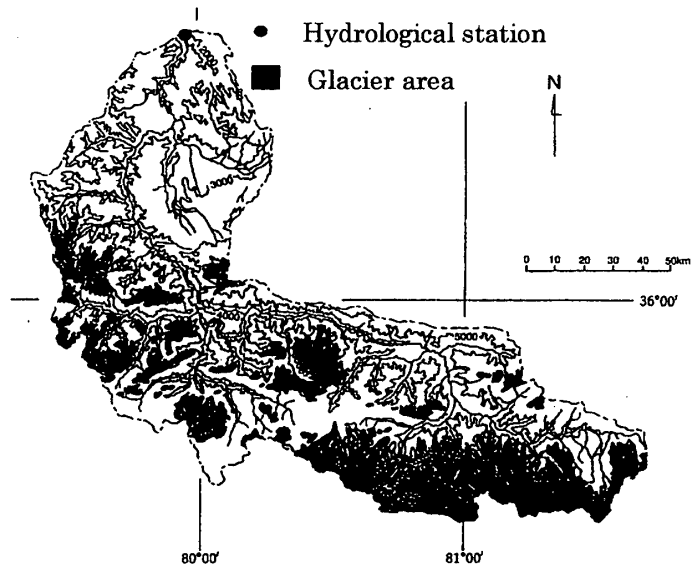


Fig.6 Map of the Yurungkax river basin Xinjiang, China

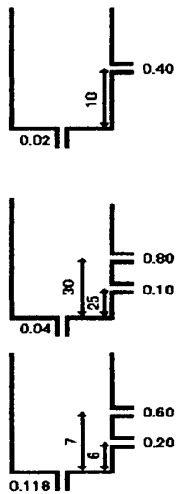


Fig.7 Obtained tank model

Table-2 Summary of geographical characteristics of the basin

The altitude range of each zone(m)	The ratio of zone area to basin area (%)	The ratio of glacier area to zone area (%)	The ratio of glacier area to basin area (%)
1,500-2,000	0.184	0.0	0.0
2,000-2,500	3.512	0.0	0.0
2,500-3,000	6.207	0.0	0.0
3,000-3,500	9.831	0.0	0.0
3,500-4,000	7.156	0.0	0.0
4,000-4,500	6.378	2.9	0.2
4,500-5,000	12.58	8.27	1.0
5,000-5,500	24.163	18.18	4.4
5,500-6,000	20.131	44.18	8.9
6,000-6,500	9.686	59.92	5.8
6,500-7,000	0.072	61.11	0.0
Total	100.0		20.4
Total area (km ²)	14,575		2968.5
Average height (m)	4,750		5,722

$$J_M = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{12} \left(|Q_{C,j} - Q_{O,j}| / Q_{O,j} \right) \right)}{12N} \quad (12),$$

$$J_{AM} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{12} \left(|Q_{C,j} - Q_{O,j}| \right) \right)}{12N} \quad (14)$$

$$J_Y = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{12} \left(|Q_{C,j} - Q_{O,j}| / Q_{O,j} \right) \right)}{N} \quad (13)$$

$$J_{AY} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{12} \left(|Q_{C,j} - Q_{O,j}| \right) \right)}{N} \quad (15)$$

ここに、 $Q_{O,j}$: 観測流量、 $Q_{C,j}$: 計算流量、 N : データ年数であり、式 (12) ～ (15) はそれぞれ月平均お

よび年平均相対誤差, 月平均および年平均誤差である。Fig.7 に 1957 年～80 年のデータを用いて同定されたタンクモデルのパラメータを示す。また, 同定期間の計算結果を降水, 気温データとともに Fig.8 に, 検証期間の計算結果を Fig.9 にそれぞれ示す。また, 両期間の適合度の目安となる J_M, J_Y, J_{AM}, J_{AY} の同定期間および検証期間での値を Table-3 に示す。Fig.8, 9 および Table-3 から分かるように同定期間, 検証期間で適合度にほとんど差が見られず, 同定期間で決定されたパラメータを用いてすべての期間でほぼ同程度の再現性が得ら

Table-3 Summary of simulation results

	J_M	J_Y	J_{AM}	J_{AY}
Calibration period:1957-1980	0.59	0.24	5.8	35.6
Validation period :1981-1990	0.58	0.29	5.6	37.2

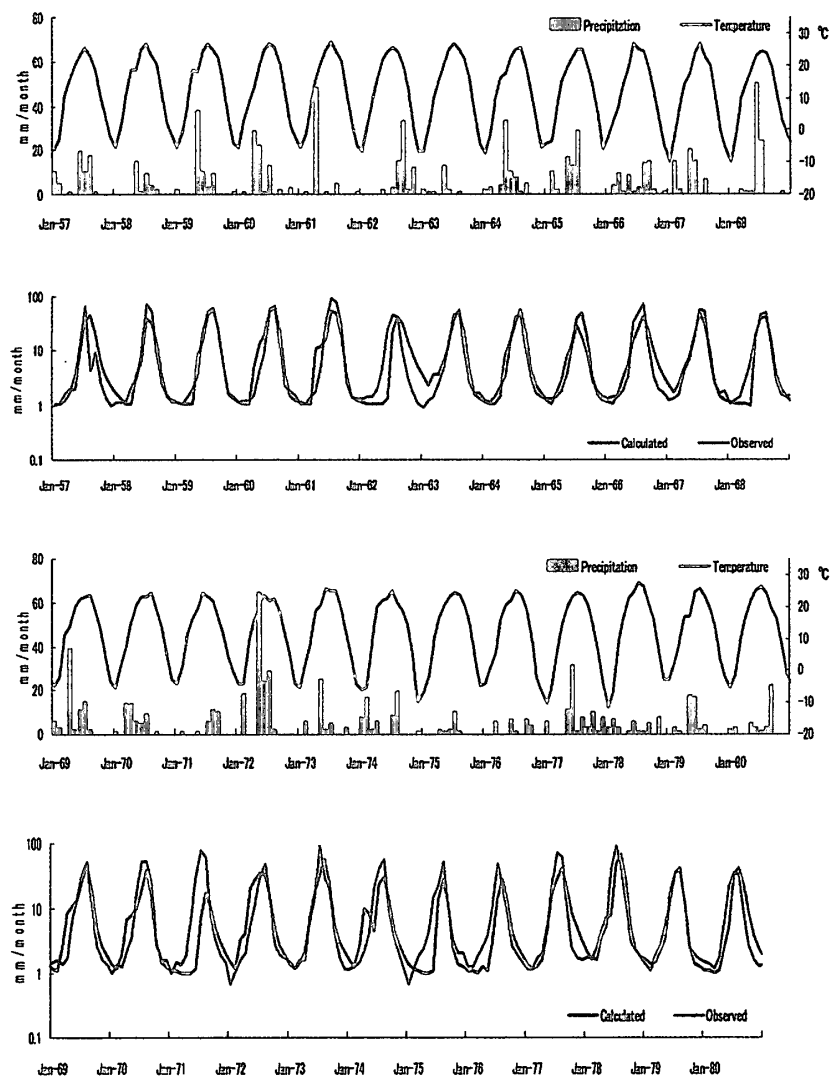


Fig.8 Monthly simulated and observed runoff, precipitation and air temperature in the Yurugak River for the period 1957-1980(calibration period).

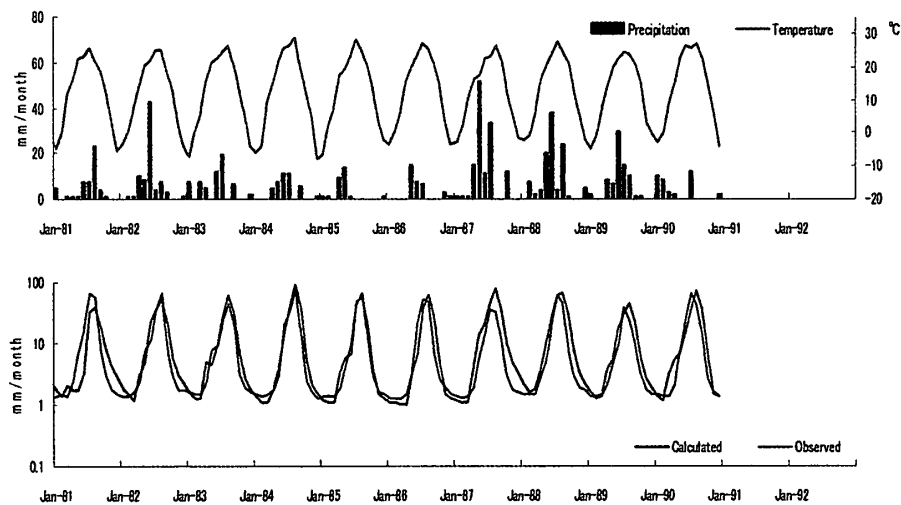


Fig.9 Monthly simulated and observed runoff, precipitation and air temperature in the Yurungkax River for the period 1981-1990(validation period).

れることが分かる。 J_M の値はおよそ0.6とかなり大きいですが、 J_Y は J_M の半分程度である。このことは、毎月の流出量で見ると大きな誤差が見られる月もあるが、年流出で見ると波形および流出量の再現性はかなりよいことを示している。ただ、より精度の高い降水量や気温当のデータが得られる流域での適合度に比べるとやや適合度は悪い。この原因は主に降水の空間分布の推定精度と気温データのみによる土壌面実蒸発量の推定にある。今後はこれらのサブモデルの改良が必要である。しかしながら、極めて限られたデータから広域の流域スケールの水循環を再現できる可能性は高く、古水文環境の復元に十分使用可能なモデルであるといえる。

5. 結語

本研究では、中国の乾燥域などに代表されるユーラシア大陸中央の乾燥域の流域水循環を限られた資料から歴史復元できるモデルの構築を試みた。提案されたモデルは、降水サブモデル、氷河および季節積雪の融解サブモデル、蒸発サブモデル、直接流出サブモデルおよび地下水流出サブモデル、降水量および気温の空間分布の推定モデルから構成されており、モデルを中国西崑崙山からタクラマカン砂漠に流入するYurungkax河に適用した結果、年流出量と流出の年変化を古水文環境の復元レベルでは十分な精度で再現できることが分かった。今後は、サブモデルを改良することによりさらに精度の向上を図っていくとともに、氷河のアイスコア、年輪解析データを元に歴史復元を試みていく予定である。

参考文献

- 1) 高木不折：低水流出の低減特性に関する研究，土木学会論文集，第128号，pp.1-11，1966.
- 2) 菅原正巳，渡辺一郎，中根和郎，尾崎睿子，勝山ヨシコ：「融雪流出の概念モデルの相互比較」の課題となった6流域の流出解析，国立防災科学技術センター研究報告，第30号，pp.85-165，1983.
- 3) 米谷恒春，王良暉，曲耀光：タクラマカン砂漠地域の水文環境，水文・水資源学会誌，第7巻，3号，pp.223-227，1994.
- 4) Y.Ujishashi, Jingshi Liu, M.Nakawo: The Contribution of Glacier Melt to the River Discharge in Arid Region, Proceedings of International Conf. on Ecohydrology of High Mountain Area, pp.413-422,1998.

(平成16年12月6日受理)