

氷河性河川， アラスカ・タナナ川における水・土砂流出機構： モニターリングとモデリング

Discharge and Sediment Load in the Glacial Tanana River, Alaska: Monitoring and Modeling

知北 和久¹・和田 知之²・工藤 勲³・城戸 大作⁴・成田 悠一²
Kazuhisa A. CHIKITA, Tomoyuki WADA, Isao KUDO, Daisaku KIDO and Yu-ichi NARITA

¹ 北海道大学 大学院理学研究院 助教授

² 北海道大学 大学院理学院 大学院生（修士課程）

³ 北海道大学 大学院環境科学研究所 助教授

⁴ 北海道大学 大学院理学院 大学院生（博士課程）

要 旨

本研究は、亜寒帯の氷河性河川、アラスカ・タナナ川流域を対象として、現地観測によって水・土砂の流出特性を調べ、流出モデルによって流量と土砂流出量の時系列に対する再現を試みている。タナナ川の水位観測点より上流の流域面積は $6.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ で、流域の南側源頭部のアラスカ山脈には氷河被覆域（流域面積の約 4%）、北側・東側源頭部から下流部にかけては不連続永久凍土帯（同 96%）が存在する。観測期間は 2002～2005 年の 6 月～9 月であり、永久凍土と氷河の融解期にあたる。データセットは、著者らの現地観測による河川水濁度・気象データ、USGS による流量データ、および流域内 15 地点での気温・降水量データである。ここでは、2002～2005 年について、タナナ川流域全体の水収支をもとにタンク・モデルによるハイドログラフの再現を行い、さらに sediment rating 式を適用して再現された流量に対応する浮遊物質濃度時系列の再現（土砂流出解析）を試みた。水収支については、ティーセン法に基づいて流域を 15 領域に分割し、高度による気温減率を考慮した可能蒸発散量および氷河融解量をそれぞれ Hamon 法と PDD 法で求めた。また、流域全体の雨量は、高度効果を考慮した各領域ごとの雨量を積算することで得られた。タンク・モデルによる流出解析では、流域を 3 分割して氷河被覆域と永久凍土帯に対応したタンク構成で計算し、ハイドログラフを氷河被覆域からの成分と永久凍土域からの成分に分離した。結果として、再現流量と観測流量との関係は、2004 年に対し相関係数 $r = 0.970$ 、2005 年に対し $r = 0.845$ で高い相関を得た。この解析から、氷河被覆面積は全流域面積の約 4 %にも係わらず、氷河被覆域から

流出が河川流出の63～83%を占めることがわかった。また、浮遊物質濃度については、計算～実測間で2004年で $r = 0.834$ 、2005年で $r = 0.327$ であり、2005年の相関がかなり低かった。これは森林火災の煙霧が氷河域を覆った期間での融解量が過大評価され、流出解析に基づく流出分離の再現性が悪かったことが原因と考えられる。

《キーワード：氷河；永久凍土；流域水収支；タンク・モデル；土砂流出解析》

1. はじめに

亜寒帯～寒帯地域の河川流域には、流域内に2000mを超える高山帯が存在する場合、高位源頭部に氷河被覆域、上流～下流部の森林帯に永久凍土帯が存在する^{1),2),3)}。こうした流域における夏期の河川流出は、氷河と永久凍土の融解および降雨による流出からなる。アラスカの永久凍土は不連続に分布し、主に流域の北向き斜面に存在する⁴⁾。永久凍土帯の層構造は、透水性の高い上部有機層と透水性の低い下部無機層からなり、永久凍土は主に下部無機層に存在する。永久凍土帯を持つ河川の流出は、上部有機層での雨水の速やかな降下浸透と永久凍土の不透水性から、降雨に対する応答が早い⁵⁾。他方、こうした河川では、永久凍土の存在によって降雨による土壌浸食が抑えられ、土砂流出は低いという特徴をもつ。

亜寒帯～寒帯における面積 10^4 km^2 オーダー以上の河川流域について、カナダ・マッケンジー河²⁾やロシアのオビ河、エニセイ河⁶⁾で北極海への流出機構が論じられてきた。しかし、流出解析による降雨流出や融解流出の寄与に関する評価は依然行われていない。また、これらの河川の土砂流出について、定期観測による浮遊物質濃度データは数多くあるが⁷⁾、流域からの土砂流出機構に関する議論はほとんどなされていない。

本論文の目的は氷河性河川、アラスカ・タナナ川の水・土砂の流出機構を明らかにし、これによって亜寒帯複合流域（氷河と永久凍土が共存する流域）での洪水予測、および森林火災など急激な環境変化による流出特性への影響を評価・予測することにある。ここでは、タナナ川の源頭部と下流部での観測結果を基に、タンク・モデルとsediment rating式による水・土砂流出に対する解析結果を報告する。

2. 観測流域の概要と方法

観測流域は、アメリカ・アラスカ州とカナダにまたがるユーコン川の支流タナナ川の流域である（図-1）^{8),9)}。タナナ川流域は、北極圏（北緯66度33分）の南にある亜寒帯流域で、流域の南側分水界にはマッキンレー山（標高6194m）をはじめとする標高2000m以上のアラスカ山脈とランゲル山地があり、氷河被覆域となっている。なお、これらの氷河は、冬季にアラスカ湾沖で発達する低気圧による降雪によって涵養され、このことから温暖氷河(temperate glaciers)の中の海洋性氷河(oceanic glaciers)に分類される。タナナ川への土砂供給は、アラスカ山脈とランゲル山地での氷河流動に伴う基岩侵食に基づいており、基本的には、生産された氷河底土砂(subglacial till)が融解期の氷河融解流出によりwashoutされることで下流域での土砂流出が継続的に発生する。

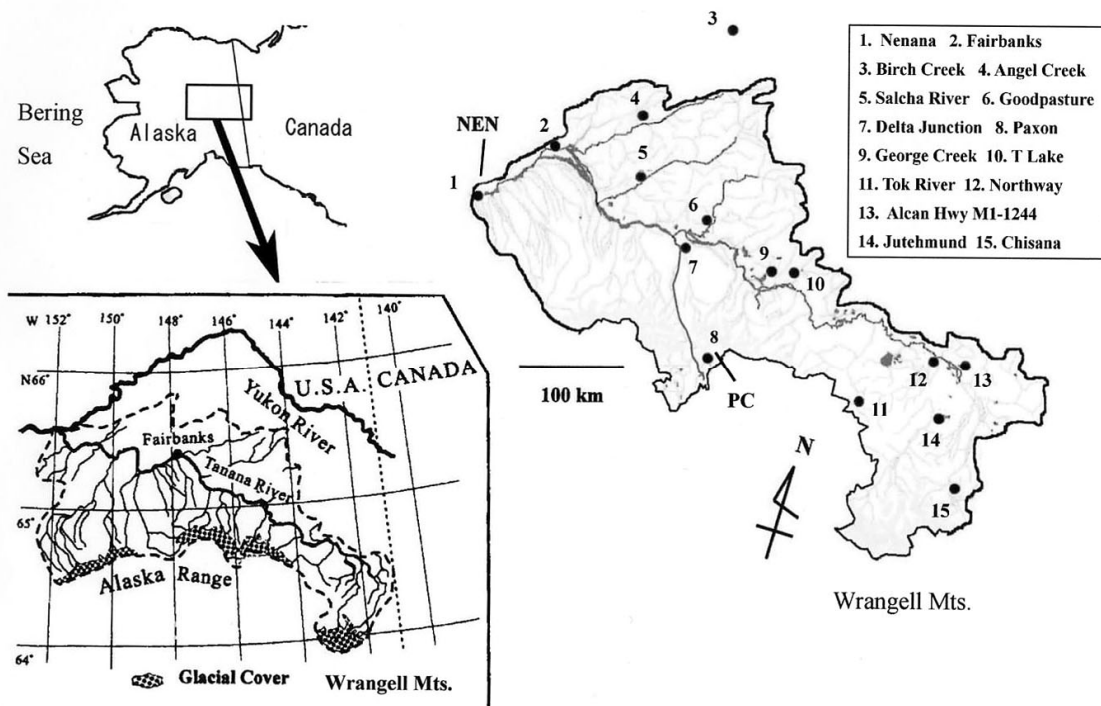


図-1 アラスカ・タナナ川流域（左図）の位置と流域内の水位観測点NEN地点とPC地点、および気象観測点の位置

図-1の最下流部にあるNEN地点は米国地質調査所(USGS)の水位観測点であり、これより上流の流域面積は $6.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ である。NEN地点の約500 m下流にはタナナ川の支流ネナナ川が流入しているが、本研究はこれより上流の流域を対象としている。流域は北緯65度24分～61度46分、西経149度5分～141度28分の範囲にあり、流域内にはUSGS、海洋気象局（NOAA）、西部地域気象センター（WRCC）所属の気象観測点が15ヶ所にある。一方、USGSの流量観測点PC地点はタナナ川源頭部にあり、NEN地点より361km上流に位置する。また、PC地点の1.1 km上流にはガルカナ氷河(Gulkana Glacier)があり、同地点は氷河からの流出河川、フェラン・クリーク(Phelan Creek)の流量観測点となっている¹⁰⁾。NEN～PC地点間の標高差は、1003 mである。NEN地点上流の氷河被覆面積は全体の約4%で、他の多くは不連続永久凍土帯からなる。現地観測は河川の濁度・水温について、図-1のNEN地点とPC地点で行われた。観測期間は氷河と永久凍土の融解期で、ここで報告する2004年と2005年については、2004年6月30日～9月8日と2005年6月13日～9月6日である。PC地点とNEN地点に水中濁度計（アレック電子KK製、MTB-16K型、測定範囲0～2000ppm、測定精度； $\pm 40\text{ppm}$ ）と水温計を設置し、1時間毎の濁度・水温データを得た。濁度計は記録されたデジタル信号（N値）を、変換式を用いて河川水の浮遊物質濃度（suspended sediment concentration: SSC）(mg/l)に変換した（N値～SSC値間の相関係数 $r = 0.997$ ）。また、PC地点、NEN地点では観測期間中の1時間流量データがUSGSから提供された。以上から、河川の浮遊土砂流出量 Q_s (kg/s) は、流量 Q (m^3/s)と浮遊物質濃度 C (g/l)を用いて、 $Q_s = C \cdot Q$ から計算された。

気象データ（気温・降水量）は、流域内15地点（図-1）についてUSGS、NOAA、WRCCから1時間データの提供を受けた。また、それぞれの気象観測点における、観測期間中の視赤緯と可能日照時間の値をURLの<http://star.gs/> から得た。なお、2004年と2005年は、PC地点の南東約500mの南向き斜面で全天日射計（プリード社製全天日射計ソーラーミニ PCM-01型：波長領域、305～2800 nm；精度±3 %）を設置し、1時間ごとの日射量(W/m²)を測定した。高度効果を考慮した流域全体の日雨量を、次のような手順で求めた。まず、図-1の気象観測点に対しティーセン法に従って図-2のように15の領域に分けた。次に、雨量の高度効果を考えるため、アラスカ州全土に対する高度補正された1961-90年間平均の6月総雨量データマップをURLの<http://www.climatesource.com/> から取得し、15領域の高度効果の程度をそれぞれ求めて、これを2002～2005年の各点日雨量データに当てはめ、図-2の領域ごとの日雨量を求めた。なお、高度補正された雨量は補正前に比べ流域全体で約30%増加した。

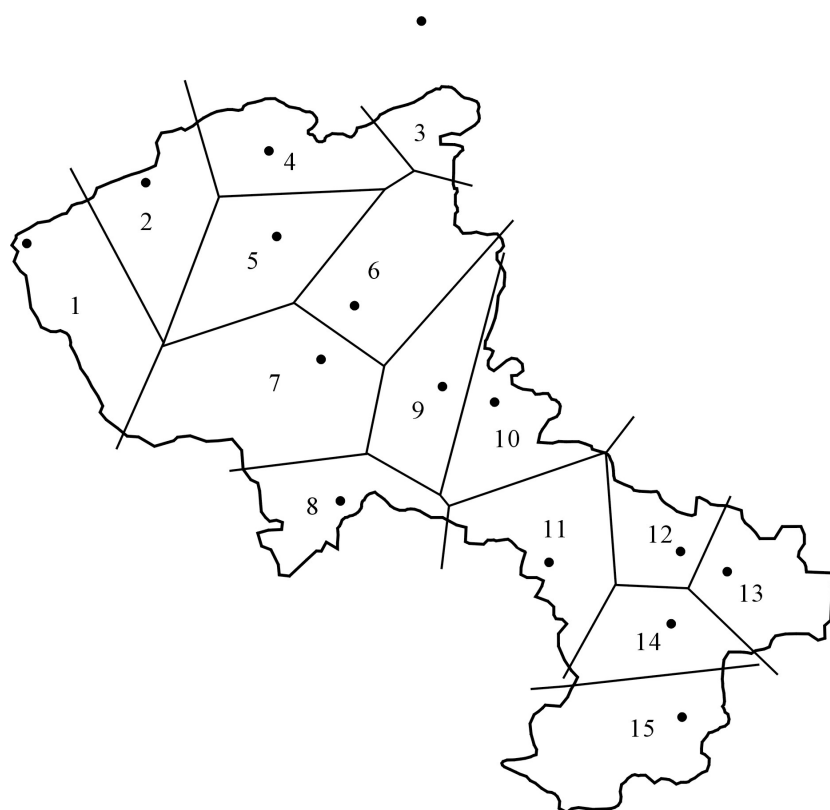


図-2. 気象観測点の位置から区分された流域¹¹⁾

流域内の全氷河融解量と永久凍土域からの全蒸発散量を得るため、15領域における氷河被覆域と永久凍土域のそれぞれで日平均気温についての高度補正を行った。これには、GISソフトを用いて、流域にNational Elevation Datasetの等高線図を重ね合わせ、図-1各点の気温データに対して気温減率 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ を用いた¹²⁾。日平均気温を用いてHamon法¹³⁾で求めた日可能蒸発散量PETを積算し、これから次式によって、観測期間中の実蒸発散量ETを計算した¹⁴⁾：

$$ET_i = W_i / [1 + (W_i / PET_i)^2]^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 W_i は i 番目の分割域(ここでは、 $i = 1 \sim 15$)での観測期間の総雨量である。以上から、各領域の蒸発散比 $\gamma_i = ET_i / PET_i$ を求め、観測期間中の日蒸発散量は、この γ_i 値を一定としてHamon法からの日可能蒸発散量を乗じることで計算された。なお、氷河被覆域では、氷河表面からの昇華や融解水の蒸発は無視した。



写真-1 森林火災の煙霧で覆われたガルカナ氷河（左：2004年7月1日撮影）と快晴時の同氷河（右：2004年9月8日撮影）。同地点から撮影

氷河被覆域における氷河融解量は、図-2の15領域毎の気温から算出した。USGSの流域植生図([URL agdc.usgs.gov/data/usgs/erosafo/veg/veg.html](http://url.agdc.usgs.gov/data/usgs/erosafo/veg/veg.html))¹⁾によると、流域内の氷河分布は大きく2つに分かれ、PC地点周辺のアラスカ山脈の氷河域とChisana (Fig. 1のNo. 15地点)の周辺(主にランゲル山地)の氷河域である。この氷河域は、氷河被覆域と森林帯に分かれる。そこで、この2つの氷河域それぞれについて氷河被覆域での融解量を求めた。なお、図-2の15領域のうち、No. 11の上部, No. 10, No. 9, No. 8, No. 7の領域内の氷河域をアラスカ山脈の氷河域、No. 11の下部, No. 15, No. 14の領域内の氷河域をChisana周辺の氷河域として、各々の氷河被覆域の面積を求めた(図-1参照)。氷河融解量は、PDD法(Positive Degree Day Approach)によって以下の式で求められる：

$$M = T \times f \quad (2)$$

ここで、 M ：融解量(mm/day)、 T ：日平均気温($^{\circ}\text{C}$)、 f ：degree day factor (mm/day \cdot $^{\circ}\text{C}$)である。March¹²⁾によると、ガルカナ氷河の雪面上では $f = 3.5 \sim 5.0$ mm/day \cdot $^{\circ}\text{C}$ の値をとる。氷河被覆域の氷面上の f は、雪面上の2倍の値をとるとされ、 $f = 7.0 \sim 10.0$ mm/day \cdot $^{\circ}\text{C}$ と考えられる。ここでは、Kido et al.¹⁰⁾の結果を参考に、雪面上で $f = 3.5$ mm/day \cdot $^{\circ}\text{C}$ 、氷上で $f = 7.0$ mm/day \cdot $^{\circ}\text{C}$ の値を採用した。なお、日

平均気温 T については気温減率 $-0.6 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ を用いて高度補正を行った¹¹⁾。融解期では、氷河上の積雪域と裸氷域の境界（雪線）は融解期進行と共に高所に移動する。これを考慮するため、2001年のガルカナ氷河での雪線観測をもとに、雪線高度を段階的に引き上げて氷河全体融解量を計算した¹⁰⁾。なお、氷河域内の森林帯からの実蒸発散量は、永久凍土域と同様にHamon法と(1)式に基づいて求めた。

2004年と2005年の観測期間中に大規模な森林火災が発生し、その煙霧が氷河域を覆う状態が観測された(写真-1)。このため、アラスカ大学 Geographic Information Network of Alaska (GINA) の web page から得た MODIS 衛星画像と URL の Wunderground.com から得た Paxson (図-1 の No.8 気象観測点) の視程・気象データ とを比較して、観測期間におけるガルカナ氷河流域の煙霧状態を調べた。また、同時に煙霧状態と PC 地点の気象・流量変動との関係を探った。

3. 結果と討論

(1) 流出、水温、浮遊物質濃度、気象の時間変化

2004年と2005年のPC地点における流量、土砂流出量、水温、浮遊物質濃度(SSC)、日射量、気温、雨量の1時間ごとの変化を図-3に示す。流量、土砂流出量、SSCは、降雨によらず気温に約1~3時間遅れで日変動している^{10), 15)}。観測期間全体として、2004年は2005年に比べ高温であり、これに対応して流量、

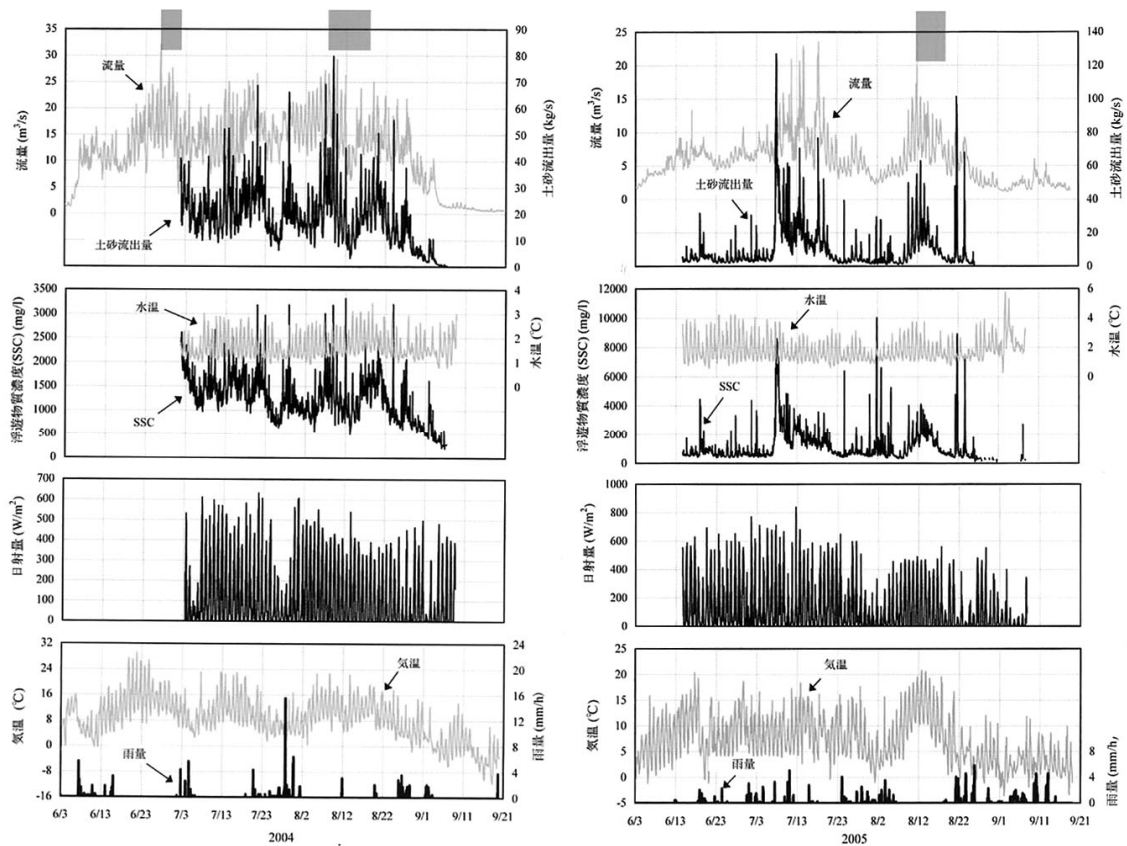


図-3 2004年（左）と2005年（右）の融解期におけるPC地点観測結果。流量の上を示す灰色の期間はガルカナ氷河流域が森林火災からの煙霧に覆われた期間。

土砂流出量は2004年が相対的に高かった。実際、同じ測定期間（7月2日 00:00～8月31日 17:00）での平均気温、総雨量、平均流量、平均土砂流出量は、2004年でそれぞれ9.6 °C、140.5 mm、15.0 m³/s、19.8 kg/s、2005年でそれぞれ7.9 °C、179.8 mm、6.9 m³/s、11.4 kg/sであった。これから、2004年の流量と土砂流出量は2005年のそれぞれ2.2倍、1.7倍であり、氷河域からの流出増大は下流NEN地点での流量、土砂流出量も増大させたことが予想される。なお、同測定期間の浮遊物質濃度(SSC)については、2004年で1280 mg/l、2005年で1320 mg/lで、むしろ2004年の方がやや小さかった。表1に、PC地点における2002年～2005年での6月～8月の月雨量、月平均気温および月平均流量を示す¹¹⁾。これから、2004年は全月で例年になく気温が高く、氷河融解流出が大きかったことがわかる。特に、フェアバンクス近郊で大規模森林火災が発生した同年6月は異常高温で、月平均流量は他の年の2～4倍であった。

表-1 PC地点における2002年～2005年の6月～8月での月雨量、月平均気温、月平均流量

| 年 | 2002 | | | 2003 | | | 2004 | | | 2005 | | |
|------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|
| | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 |
| 雨量 (mm/月) | 8.4 | 89.7 | 403.1 | 49.8 | 151.1 | 121.2 | 55.6 | 92.0 | 48.8 | 20.3 | 121.4 | 22.4 |
| 気温 (°C) | 6.3 | 8.0 | 5.2 | 5.8 | 8.3 | 5.7 | 10.9 | 9.4 | 9.8 | 7.6 | 8.3 | 7.5 |
| 流量 (m ³ /s) | 4.3 | 8.8 | 5.8 | 3.0 | 10.3 | 7.2 | 11.7 | 15.2 | 14.6 | 5.4 | 7.9 | 5.9 |

図-3の灰色で示す3つの期間は、永久凍土域での大規模森林火災からの煙霧がガルカナ氷河流域を覆った期間である（写真-1）。2004年の森林火災は6月中旬～9月中旬の3ヶ月間燃え続け、6月26日～7月1日、8月10～13日、8月15日～19日の三期間が煙霧で覆われた。6月26日～7月1日の期間は、煙霧に覆われてから4日遅れで日平均気温が15.1°Cから11.7°Cまで、日平均流量が20.0 m³/sから12.1 m³/sまでそれぞれ減少した。また、8月10～13日の煙霧の場合は日平均日射量が159 W/m²から104 W/m²まで減少し、これに1日遅れて、日平均気温が13.4°Cから8.5°Cまで、日平均流量が16.5 m³/sから9.9 m³/sまでそれぞれ減少した。2005年については、8月12日～17日の期間に煙霧と雲で覆われ、日平均日射量は157 W/m²から99 W/m²まで減少した。また、これに2日遅れて日平均気温が15.2°Cから10.8°Cまで、さらに1日遅れて日平均流量が10.0 m³/sから5.2 m³/sまでそれぞれ減少した。このように、森林火災による煙霧は、氷河融解に対する日射と顕熱の効果に時間的なずれをもって影響している可能性があり、今後は氷河に対する熱収支・水収支を詳細に検討する必要がある。また、降雨時でも日射量と気温の両方が低下するため、熱収支の際には“煙霧のみの場合”、“煙霧に雲が加わる場合”、“降雨時の場合”の三条件でどう違うのかを議論する必要がある。

図-4は、NEN地点における2004年と2005年の流量、土砂流出量、浮遊物質濃度(SSC)、水温の1時間時系列、およびNEN地点上流の日雨量（流域雨量）、NEN地点日平均気温(T_{NEN})、氷河被覆域全体の日平均気温(T_g)の変化を示す。図のほぼ全期間（6月3日～9月19日）での流域雨量は、2004年で141mm/day、2005年で257mm/dayであり、2005年が2倍近い値を示した。これに対応して、同期間の平均流量は1521 m³/s（2004年）、1775 m³/s（2005年）であり、流量は2005年の方が大きかった。しかし、その差は小さく、この

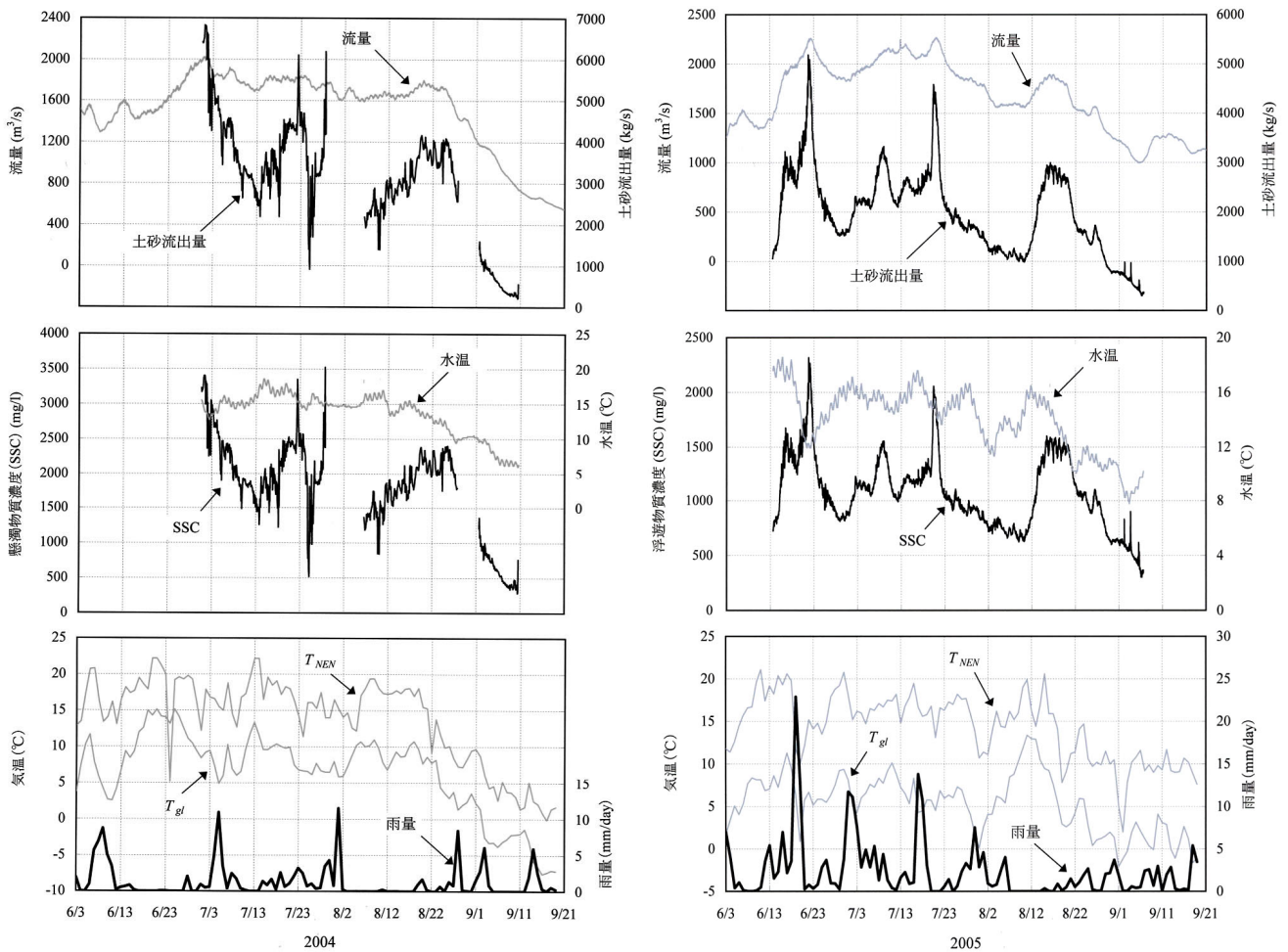


図-4 2004年（左）と2005年（右）の融解期におけるNEN地点観測結果。 T_{NEN} , T_{gl} : それぞれNEN地点と氷河被覆域の日平均気温。日雨量は流域全体の平均値。

原因は氷河被覆域の気温が同期間で6.4 °C(2004年)、5.3 °C(2005年)で2004年が1 °C以上高く、氷河融解量が2004年で大きかったことが上げられる。つまり、NEN地点流量に占める氷河融解流出の割合は、2004年でかなり大きいことが予想される。実際、6～8月の月平均気温と月雨量を2002～2005年間で比べると、

表-2 2002年～2005年における6月～8月の流域月雨量，NEN地点月平均気温，氷河被覆域月平均気温，NEN地点月平均流量

| 年 | 2002 | | | 2003 | | | 2004 | | | 2005 | | |
|-----------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|
| | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 |
| 雨量(mm/月) | 71.9 | 108.7 | 107.6 | 31.3 | 105.4 | 62.0 | 47.7 | 53.9 | 26.8 | 99.4 | 109.1 | 31.4 |
| 気温 (°C) | | | | | | | | | | | | |
| NEN 地点 | 11.3 | 12.4 | 9.1 | 12.3 | 13.4 | 10.2 | 17.1 | 16.7 | 14.4 | 16.0 | 16.4 | 13.6 |
| 氷河被覆域 | 5.0 | 6.2 | 3.7 | 5.5 | 8.0 | 4.4 | 9.4 | 8.4 | 7.3 | 6.3 | 6.2 | 5.9 |
| 流量 (m³/s) | 1325 | 1719 | 1814 | 993 | 1851 | 1592 | 1572 | 1794 | 1626 | 1705 | 2018 | 1603 |

2004年は他の年に比べNEN地点と氷河被覆域の両方で気温が高く、また雨量も小さめで、森林火災の発生・継続が生じやすい気象条件にあったことがわかる（表-2）。流量については、2004年は降雨が少なかったことを反映し他の年と余り変わらないが、氷河融解流出量の寄与は、他の年よりどの月も大きかったことが考えられる。なお、氷河域が森林火災からの煙霧で覆われた時期に対応して（図-3）、約4日遅れで流量とSSCが低下しており、特にSSCの低下が著しいことがわかる。

(2) 流域水収支の変化

高度補正された雨量と気温から得られる流域全体の日雨量と日平均蒸発散量、氷河域全体の日平均融解量、NEN地点の日平均比流量、及びこれらの値から水収支によって得られる流域積算貯留量の変化を図-5に示す。2004年は、2005年に比べ流域全体の気温が高く雨量はかなり小さかった(表-2)。このため、

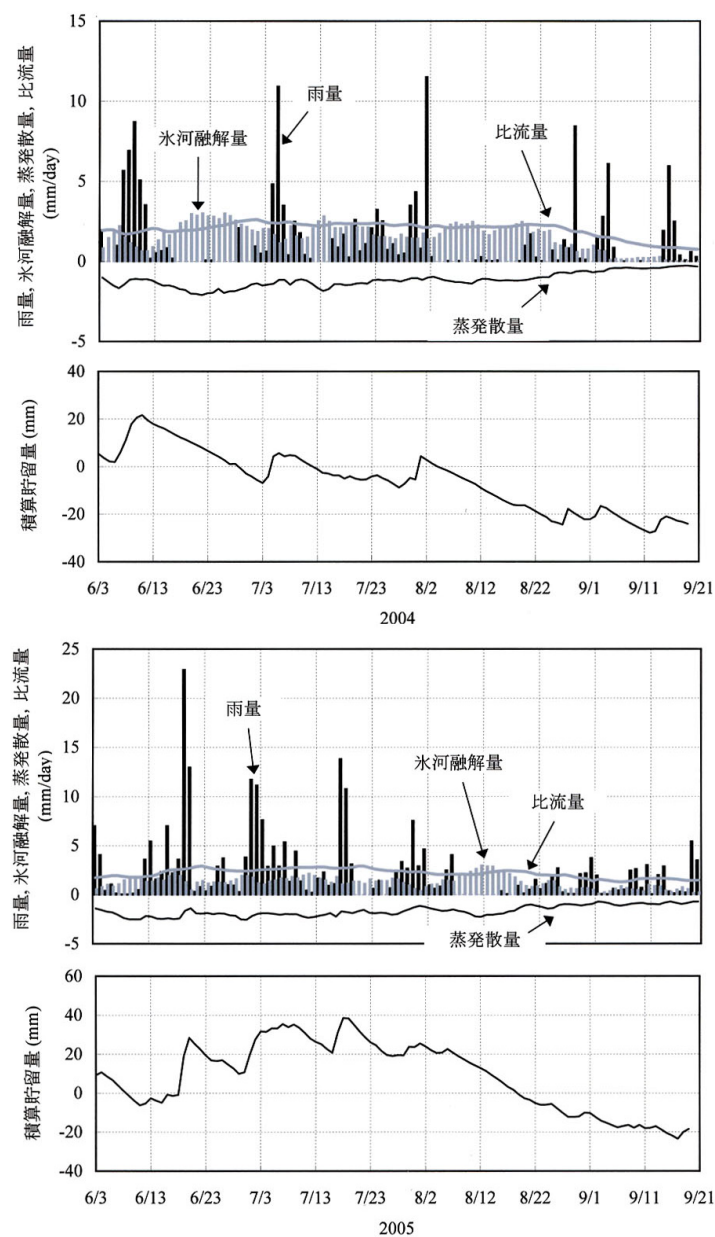


図-5 2004年と2005年の融解期における流域水収支

蒸発散による消費で、ほとんどの期間(6月中旬～9月下旬)で2004年の流域貯留量は2005年に比べ小さく、また無降雨期間の長い2004年はその間流域貯留量が急激に低下していることがわかる。2004年と2005年との比較から、流域貯留量の増加は氷河融解よりも降雨によって引き起こされていることがわかる。

4. 流出解析

NEN地点で得られた流量(図-4)に対する氷河融解と降雨の寄与を量的に明らかにするため、そのハイドログラフをタンク・モデルによって再現することを考える。さらに、これによる流出分離をふまえて氷河被覆域からの流出に対しsediment rating式を適用し、観測されたNEN地点浮遊物質濃度(SSC)時系列の再現を試みる。なお、土砂流出に対するタンク・モデルの適用は、大澤・酒井¹⁶⁾やKido et al.¹⁰⁾の例がある。

(1) 流出の分離

ここでは、流域内の氷河の分布を考慮して、図-2の分割に基づき図-6のように流域を三分割し、それぞれについてタンクの構成を考えた(図-7)。その理由は、タナナ川のような大規模流域では、流域内に局所的な降雨がある場合、流域全体に対するタンク構成ではハイドログラフの再現性が悪くなるためである^{8),11)}。セクション1は図-2のNo. 1～No. 5領域、セクション2は同じくNo. 6～No. 10領域、セクション3は同じくNo. 11～15領域からなり、セクション1とセクション2には氷河が存在する。タンクの構成は知北ほか^{8),11)}と同様で、氷河被覆域からの流出は一段タンク、永久凍土域からのそれは三段タンクを用いた。このため、氷河の存在するセクション2とセクション3のタンク構成は、図-7のように一段タンク

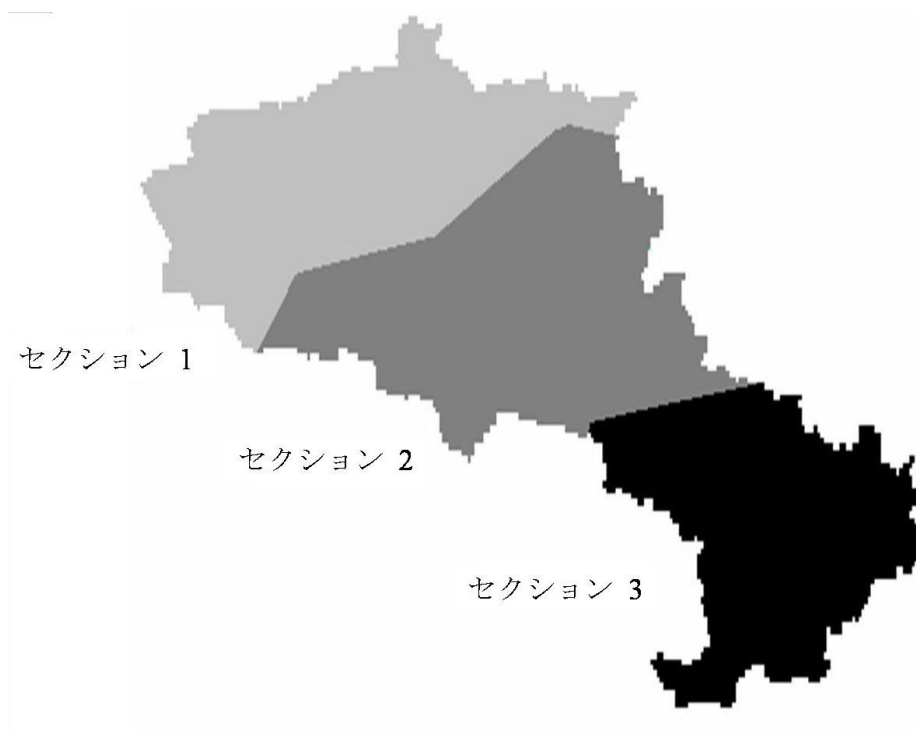


図-6 流出解析に用いた流域の分割方法

(それぞれタンク・シリーズ No.2とNo.4) と三段タンク (それぞれタンク・シリーズNo.3とNo.5) から成る。氷河の存在しないセクション1は、三段タンクのみである。それぞれのシリーズの上段タンクに、高度補正された日雨量と気温減率に従って計算された日平均蒸発散量と日平均氷河融解量を与えた。また、NEN地点流量に対するタンク・シリーズNo.1～No.5の遅れ時間として、それぞれ1日、4日、2日、5日、3日の一定値を与えた。ここでは、2002年のハイドログラフにベスト・フィットするよう表-3のようなパラメータ値を与え、2003～2005年についてもこれを固定して計算した。2004年と2005年の計算結果を図-8に示す。

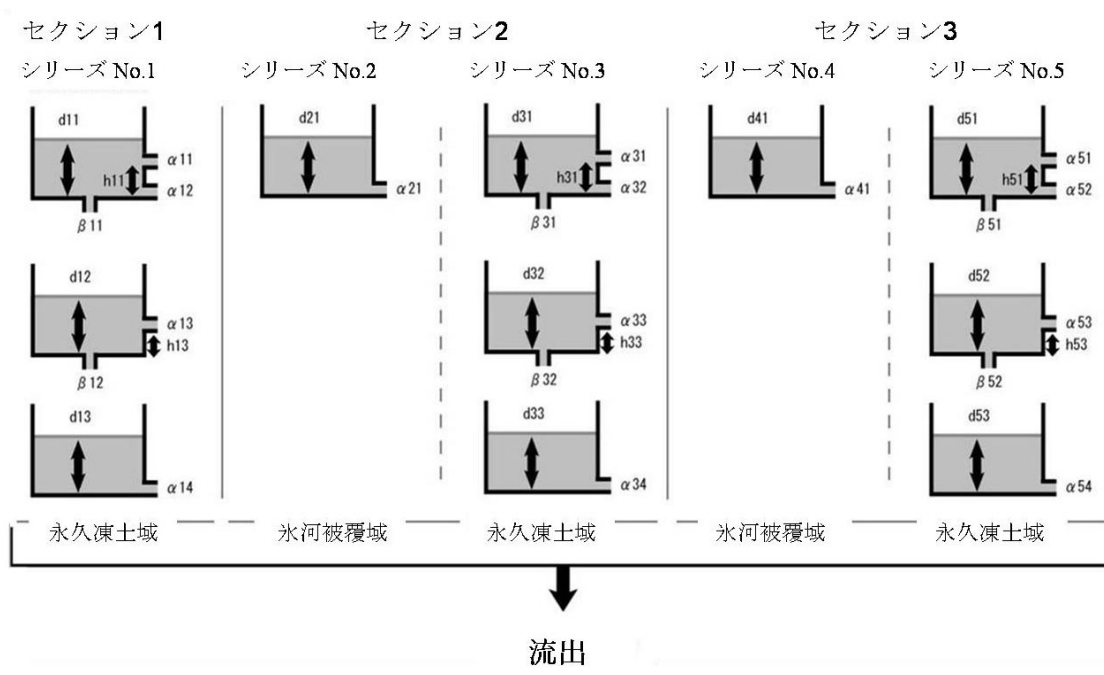


図-7 各セクションごとのタンクの構成

表-3 タンク・モデルに用いた各パラメータ値

| | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $\alpha_{11}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{12}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{13}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{14}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{11}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{12}(\text{h}^{-1})$ | $h_{11}(\text{mm})$ | $h_{13}(\text{mm})$ |
| 2.6×10^{-3} | 3.6×10^{-4} | 4.8×10^{-3} | 7.6×10^{-4} | 2.5×10^{-3} | 6.6×10^{-3} | 14 | 6.8 |
| $d_{11}(\text{mm})$ | $d_{12}(\text{mm})$ | $d_{13}(\text{mm})$ | $\alpha_{21}(\text{h}^{-1})$ | $d_{21}(\text{mm})$ | $\alpha_{31}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{32}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{33}(\text{h}^{-1})$ |
| 0.6 | 10 | 21 | 1.6×10^{-2} | 50 | 8.2×10^{-4} | 0 | 2.7×10^{-4} |
| $\alpha_{34}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{31}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{32}(\text{h}^{-1})$ | $h_{31}(\text{mm})$ | $h_{33}(\text{mm})$ | $d_{31}(\text{mm})$ | $d_{32}(\text{mm})$ | $d_{33}(\text{mm})$ |
| 1.7×10^{-3} | 6.4×10^{-3} | 1.6×10^{-4} | 8.0 | 0 | 0.6 | 10 | 21 |
| $\alpha_{41}(\text{h}^{-1})$ | $d_{41}(\text{mm})$ | $\alpha_{51}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{52}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{53}(\text{h}^{-1})$ | $\alpha_{54}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{51}(\text{h}^{-1})$ | $\beta_{52}(\text{h}^{-1})$ |
| 5.4×10^{-3} | 100 | 8.9×10^{-4} | 0 | 3.4×10^{-4} | 1.1×10^{-3} | 5.6×10^{-3} | 6.2×10^{-4} |
| $h_{51}(\text{mm})$ | $h_{53}(\text{mm})$ | $d_{51}(\text{mm})$ | $d_{52}(\text{mm})$ | $d_{53}(\text{mm})$ | | | |
| 8.2 | 0 | 0.5 | 10 | 21 | | | |

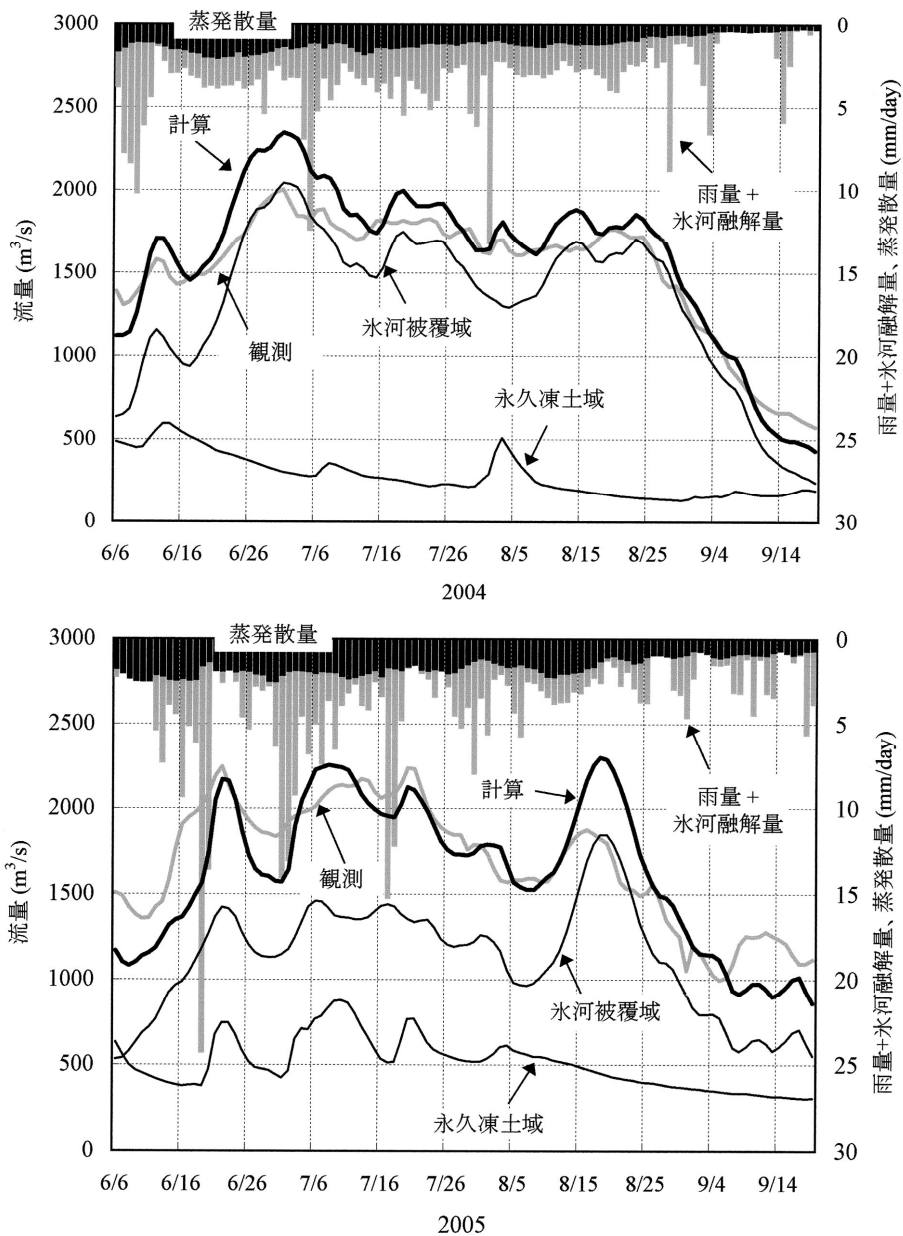


図-8 タンク・モデルによる計算結果と観測結果との比較.

結果として、観測結果と計算結果との間の相関は、2002年で相関係数 $r = 0.966$, 2003年で $r = 0.953$, 2004年で $r = 0.970$, 2005年で $r = 0.845$ であった。2005年で比較的相関が悪いのは、図-8でも示されるように、氷河被覆域が煙霧に覆われた期間(8月12～17日)での氷河融解量の見積もりが大きすぎたため、対応する融解流出量が過大評価されたことが原因と考えられる。つまり、煙霧で覆われた場合、(2)式のPPD法による融解量の見積もりは精度が悪く、日射を考慮した氷河の熱収支に基づく融解量の見積もりが必要と考える。これについては2004年も同様で、煙霧で覆われた6月26日～7月1日に対応する融解流出量が過大評価されている。なお、計算された全期間での流量に対する氷河融解流出量の寄与は、2002年で54%、2003年で62%、2004年で78%、2005年で61%で、高温少雨であった2004年で最も寄与が高いことがわかる。さらに氷河被覆域からの融解流出と降雨流出の合計の寄与は、同様に63%、68%、83%、69%であった。このように、氷河被覆域の面積は全流域面積の約4%にすぎないが、その流出寄与は極めて大きく、

これがタナナ川が“氷河性河川”といわれる所以である。なお、表-3で示すパラメータ値を固定して計算しても $r=0.845\sim 0.970$ の高い相関が得られることは、経年的にも融解期は流出に対する流域の層構造や地下水分量の変化が安定していることを意味する。

(2) 浮遊物質濃度 (SSC) 変化の再現

NEN地点で観測される浮遊土砂は、源頭部での氷河の基盤侵食による土砂生産と流出に基づいて供給され^{10), 15)}、これに2次堆積した河床土砂が河川流量に応じて侵食されることが考えられる。そこで、先ず、前節の計算結果で得られた氷河被覆域からの流出にsediment rating式を適用し、NEN地点で観測された浮遊物質濃度の時間変化が再現できるかを検討した。ここでのsediment rating式は、氷河被覆域の

表-4 sediment rating式における a, b 値

| 年 | 2002 | | 2003 | | 2004 | | 2005 | |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| タンク・シリーズ | No.2 | No.4 | No. 2 | No. 4 | No. 2 | No. 4 | No. 2 | No. 4 |
| a | 33.9 | 10.8 | 14.4 | 6.62 | 9.43 | 7.68 | 9.79 | 9.74 |
| b | 3.58 | 3.58 | 3.58 | 3.58 | 3.58 | 3.58 | 3.58 | 3.58 |

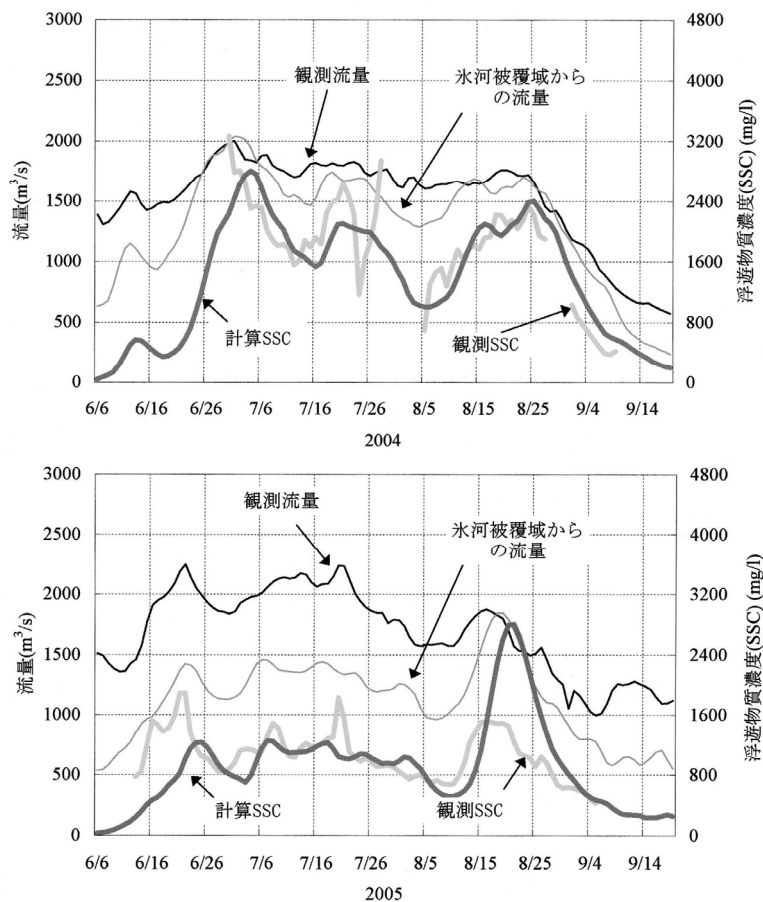


図-9 計算されたSSCと観測SSCとの比較

タンク（図-7のシリーズNo. 2とNo. 4）から流出する比流量 q (m/s)と単位時間単位面積あたりに水と完全混合する土砂量 L ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)との関係として、 $L = aq^b$ (a, b : 経験定数)の形で与えた。ここでは、2002～2005年間の観測結果に合うように経験定数 a, b を決めると表-4のようになり、2004年と2005年について、得られたSSCと観測結果との比較を図-9に示す。結果として、sediment rating 式の指数 b はどの年も $b = 3.58$ の一定値をとり、計算SSCと観測SSCとの相関は、2002年で $r = 0.746$, 2003年で $r = 0.928$, 2004年で $r = 0.834$, 2005年で $r = 0.327$ であった。これから、氷河被覆域からの流出の再現がよくない2005年では、SSCについてはさらに再現性が低下することがわかる。また、表-4より、タンク・シリーズNo. 4の a 値がNo. 2のそれより常に小さい。これは、流送中に浮遊土砂が河川流路に堆積することを示唆しており、今後の土砂流出モデルでは氷河からの土砂流出機構に加えて河道内での堆積・侵食の効果を考慮する必要がある。なお、 b 値が一定であることは、融解期前までに氷河作用の基盤侵食で生産される土砂量が十分であり、氷河からの流出に応じた侵食が安定していることが考えられる^{17), 18)}。

5. 結論と今後の問題

本論文では、亜寒帯の氷河性河川、アラスカ・タナナ川の流域を対象に、流域の水収支評価とこれに基づくタンク・モデルによる流出解析、さらにsediment rating 式を用いた土砂流出解析をおこなった。結果として、氷河被覆域は全流域面積の約4%にすぎないが、氷河域からの流出（降雨流出+融解流出）は融解期間全体におけるタナナ川の63～83%を占め、その流出を決める主要因となっている。特に、大規模森林火災が発生した2004年では氷河域の寄与が大きかった。ただし、タンク・モデルによる流出解析では、森林火災の煙霧が氷河域を覆った期間での再現性が悪く、その原因はPDD法による氷河融解量の過大評価によると判断された。このため、氷河融解に関係する熱収支・水収支の評価をより精密に求める必要がある。さらに、土砂流出解析の結果では、タンク・モデルによる流出分離が浮遊物質濃度(SSC)変化の再現に大きく依存することがわかった。流出に対してsediment rating式を適用するということは、土砂流出解析としてはまだ第一近似の段階である。今後は、分布型モデルによる流出解析と河道侵食を考慮した土砂流出モデルの開発が必要である。他方、タンク・モデルの適用によって表-3のパラメータ値を固定しても各年のハイドログラフをかなり良く再現することがわかった。このため、ここでのタンク・モデルが、今後の気候変動に応じた長期的な水環境変化や洪水に対する予測に活用できると考える。

謝辞: 現地観測にあたっては、米国地質調査所(USGS)フェアバンクス支所・水資源部の Matt Schellekens 氏、Rod S. March 氏、および Yutana Barge Line 社・社長 Matt Sweetsir 氏に大変お世話になった。厚く御礼申し上げます。また、USGS からは流量・気象データに関し、NOAA と WRCC からは気象データに関し常に快い提供を受けた。ここに感謝致します。さらに、アラスカ大学国際北極圏研究センター(IARC)所長・赤祖父俊一博士や事務員・Yoriko Freed 氏には現地受入れ機関として多くの便宜を図って頂いた。深謝いたします。なお、本研究は平成 17 年度（財）北海道河川防災研究センターの研究助成に拠った。

参考文献

- 1) Brabets, T. P., Wang, B. and Meade, R. : Environmental and hydrologic overview of the Yukon River, Basin, Alaska and Canada, *Water-Resources Investigations Report 99 - 4204*, U.S. Geological Survey, 106p., 2000.
- 2) Rouse, W. R. : Progress in hydrological research in the Mackenzie GEWEX study, *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp.1667-1685, 2000.
- 3) Chikita, K. A., Kemnitz, R. and Kumai, R. : Characteristics of sediment discharge in the subarctic Yukon River, Alaska, *Catena*, Vol. 48, pp.235-253, 2002.
- 4) Carey, S. K. and Woo, M.-K. : Slope runoff processes and flow generation in a subarctic, subalpine catchment, *Journal of Hydrology*, Vol. 253, pp.110-129, 2001.
- 5) Woo, M.-K. and Marsh, P. : Snow, frozen soils and permafrost hydrology in Canada, 1999-2002, *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp.215-229. 2005.
- 6) Meade, R. H., Bobrovitskaya, N. N. and Babkin, V. I. : Suspended-sediment and fresh-water discharges in the Ob and Yenisey rivers, 1960-88, *Journal of Earth Sciences*, Vol. 89, pp.461-469, 2000.
- 7) Bobrovitskaya, N. N., Skakalsky, B. G., Zubkova, K. M., Dobrotvorskaya, G. I., Petrova, I. V., Tsivjyan, M. V., Christyakova, N. I., Yanuta, V. G., Callender, E. C., Landa, E. R., Meade R. H., Councell, T. B. and Bruce, R. A. : Hydrologic and hydrochemical data for the Ob-Irtysh and Yenisey River system of central Russia 1954-1988, *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 97-232, 177p., 1997.
- 8) 知北和久・森田俊一・和田知之 : 亜寒帯流域における流出機構に関する研究－アラスカ・タナナ川を例として－, (財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要, XVI, pp.111-122, 2005.
- 9) Chikita, K. A., Wada, T., Kido, D. and Narita, Y. : Discharge and sediment load in the subarctic Tanana River, Alaska: monitoring and modeling, *Hydrological Sciences Journal*, 2006 (in press).
- 10) Kido, D., Chikita, K. A. and Hirayama, K. : Subglacial drainage system changes of the Gulkana Glacier, Alaska: discharge and sediment load observations and modeling, *Hydrological Processes*, 2006 (in press)
- 11) 知北和久・森田俊一・和田知之・城戸大作 : 亜寒帯河川流域における水・土砂流出機構－アラスカ・タナナ川－, 日本水文学会誌, 第 36 巻, 2006 (印刷中) .
- 12) March, R. S. : Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, runoff and ice thickness data at Gulkana Glacier, Alaska, 1995 balance year, *Water-Resources Investigations Report*, No. 00-4074, U. S. Geological Survey, 117p., 2000.
- 13) 口澤 寿・中津川誠 : 熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定, 平成 14 年度環境研究室成果報告書, 独立行政法人 北海道開発土木研究所環境水工部環境研究室, pp.76-89, 2003.
- 14) Dingman, S.L.: *Physical Hydrology*, 2nd edition, Prentice-Hall, 646p., 2002.
- 15) 知北和久・城戸大作・中津川誠 : 氷河流域からの土砂流出の機構に関する研究－アラスカ・ガルクカナ氷河を例として－, (財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要, XV, pp.191-204, 2004.
- 16) 大澤和敏・酒井一人 : 降雨-土砂流出解析のための浮遊土砂流出モデルの構築－沖縄県における赤土流出モデル化に関する研究－, 農業土木学会論文集, 第 217 巻, pp.65-70, 2002.

- 17) Walling, D. E. : Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization, in *Fluvial Processes in Instrumental Watersheds* edited by K. J. Gregory and D.E. Walling, Institute of British geographers special publications, Vol. 6, pp.169-192, 1974.
- 18) Morgan, R. P. C. : *Soil Erosion and Conservation*, 2nd ed., Longman, 298p., 1995.