



Title	山岳氷河の質量・水収支の経年変動
Author(s)	知北, 和久; 和田, 知之; 工藤, 勲 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 75, 1-13
Issue Date	2012-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.75.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49051
Type	departmental bulletin paper
File Information	75-P1-13.pdf



山岳氷河の質量・水収支の経年変動

知北 和久・和田 知之

北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

工藤 勲

北海道大学大学院水産科学研究院

キム・ヨンオン

アラスカ大学国際北極圏研究センター

(2011 年 12 月 19 日受理)

Interannual variations of mass balance and hydrology of a mountain glacier

Kazuhisa A. CHIKITA, Tomoyuki WADA

Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

Isao KUDO

Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

and

Yongwon KIM

The International Arctic Research Center, the University of Alaska Fairbanks,
Alaska, U. S. A.

(Received December 19, 2011)

Meteorological and hydrological data for a drainage basin of a mountain glacier, the Gulkana Glacier, Alaska, monitored by U. S. Geological Survey (USGS) for more than 40 yrs, are corrected and retrieved. Interannual variations of daily mean air temperature and daily precipitation near the glacier and daily runoff rate at a proglacial stream averaged over the ablation period (June to September) indicate that the increasing rates of 1968–2010 and 1985–2010 are 0.012 °C/yr and 0.014 °C/yr, 0.024 mm/yr and 0.041 mm/yr, and 0.092 mm/yr and 0.25 mm/yr, respectively. Thus, the runoff rate and precipitation tend to increase greatly in the recent years. The daily glacier-melt runoff rate averaged over the ablation period was obtained on the assumption of zero englacial water storage change over the period. As a result, the glacier-melt runoff rate exhibits the linear relationship with the daily mean air temperature near the glacier. The summer ablation of the glacier was larger than the winter accumulation in many years, consequently indicating that the net mass balance is negative in almost all the years. Especially since 1988, the net mass balance is

negative in any years. The tendency of greatly negative cumulative net mass balance since 1988 suggests that the glacier thickness become zero in ca. 2160. Meanwhile, the glacier area tends to decrease greatly and linearly since 1993 at the rate of $-0.18 \text{ km}^2/\text{yr}$. This indicates that the glacier area would be zero in ca. 2096. The large decrease of cumulative net mass balance since 1980's is common to the three glaciers, Gulkana, Wolverine and South Cascade, monitored by USGS since 1960's. The decreasing rate of glacier thickness in 1980's to 2004 is -0.74 m/yr for Gulkana Glacier, -0.78 m/yr for Wolverine Glacier, and -0.71 m/yr for South Cascade Glacier, thus showing the similar tendency in thinning.

I. は じ め に

近年の地球温暖化は世界の山岳氷河の縮退を招き、特に2000年代に入り氷河の縮退率が増加傾向にあることが示されている (Cogley, 2009). ここで、氷河の縮退 (shrinkage) とは、氷河の表面積の減少 (retreat) と氷厚の薄層化 (thinning) の両方を考慮した氷河の質量減少を指す. 1961~2003 年間に現地観測で得られた山岳氷河の質量収支データによると、この間のアラスカの氷河の平均縮退率は 53.8 Gton/yr 、ヒマラヤ~チベット~カラコルムの氷河では 30.7 Gton/yr である (Dyurgerov and Meier, 2005). また、GRACE 衛星による重力変化から、2002~2005 年間のアラスカ氷河の平均縮退率は 101 Gton/yr 、2003~2009 年間のヒマラヤ~チベット~カラコルム氷河の平均縮退率は 47 Gton/yr であり (Matsuo and Heki, 2010)、近年における縮退率の増加、特にアラスカ氷河の著しい縮退が認められる. なお、これらの縮退率は、夏の消耗期に失われる氷河の体積と比例関係にあり (Meier, 1984)、このことは、氷河の縮退が冬の降雪による涵養量よりも夏の融解による消耗量に支配されていることを意味する.

他方、1990 年前後における氷河域の面積は、アラスカの氷河で $7.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、ヒマラヤ~チベット~カラコルムの氷河で $1.16 \times 10^5 \text{ km}^2$ で、後者は前者の 1.55 倍である (Dyurgerov and Meier, 2005). つまり、単位面積当たりの氷厚変動量 (m 水当量) について、アラスカの氷河はヒマラヤ~チベット~カラコルムの氷河よりも氷厚の減少率が 2 倍以上高いことになる (Dyurgerov and Meier, 2005). なぜ、アラスカ氷河の縮退が相対的に大きいかは、今後も多くの議論が必要であるが、地球温暖化の原因を二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素など温室効果ガスの大気中濃度の増加に結びつける観点では、「北極圏での濃度およびその増加率が相対的に高い」(気象庁, 2006, 2011) ことが要因の一つと考えられている. しかし、アラスカの気温変動は 1949 年~2009 年間の気温上昇率は 0.035°C/yr だが、1970 年代半ばに気温の急激な上昇が見られ、1977 年以後は殆ど上昇していない (Alaska Climate Research Center ; URL <http://climate.gi.alaska.edu/ClimTrends/Change/TempChange.html>). 1970 年代半ばの気温シフトは海面水温変動が大気に与える影響として起こる太平洋 10 年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation) に因るといわれ (Mantua et al., 1997; Hartmann and Wendler, 2005)、これは地球温暖化とは独立した自然変動である. 他方、ネパールでは標高が高いほど気温上昇率は高く (Shrestha et al., 1999)、ヒマラヤの氷河域では 1977~1994 年間平均で $0.03\sim 0.12^\circ\text{C/yr}$ である. この上昇率は、アラスカの氷河域での 0.014

℃/yr よりも高い (成田, 2007). さらに, ある氷河域の縮退率は, 氷河が存在する流域斜面の向きや傾斜など日射に対する地形効果によって大きな差が現れる (Liu et al., 2010). このように, 近年における氷河の著しい縮退について, 単純に温度上昇のみから議論することには問題がある.

こうした山岳氷河の縮退状況・条件を踏まえ, 本論文では米国地質調査所 (U. S. Geological Survey) が 1960 年代より観測を続けている 3 ケ所の氷河流域の中から, アラスカ・ガルカナ氷河流域を対象として将来の氷河変動について議論する. ここでガルカナ氷河流域を選んだ理由は, この流域がユーコン河の支流タナナ川の源頭部にあり, 氷河の質量収支変動が亜寒帯～寒帯河川の流出に与える影響評価に密接に関係するからである (Wada et al., 2011).

II. 対象流域の概要と観測方法

米国地質調査所 (USGS) によって, 1960 年代から今日まで氷河質量・気象の観測が行われている氷河流域は, アラスカのガルカナ氷河 (Gulkana Glacier, 北緯 $63^{\circ} 16'$, 西経 $142^{\circ} 25'$; 標高 1,125 ~ 2,473 m) とウルヴァリン氷河 (Wolverine Glacier, 北緯 $60^{\circ} 24.5'$, 西経 $148^{\circ} 54.5'$; 標高 460 ~ 1,640 m) およびワシントン州サウス・カスケード氷河 (South Cascade Glacier, 北緯 $48^{\circ} 21.3'$, 西経 $121^{\circ} 03.5'$; 標高 1,665 ~ 2,518 m) の流域である (URL: <http://ak.water.usgs.gov/glaciology/index.html>). Fig. 1 に, 今回研究対象のガルカナ氷河の流域と流域内観測点の位置を示す. この流域 (面積 31.1 km^2) はガルカナ氷河末端から流出するフェラン・クリークの水位観測

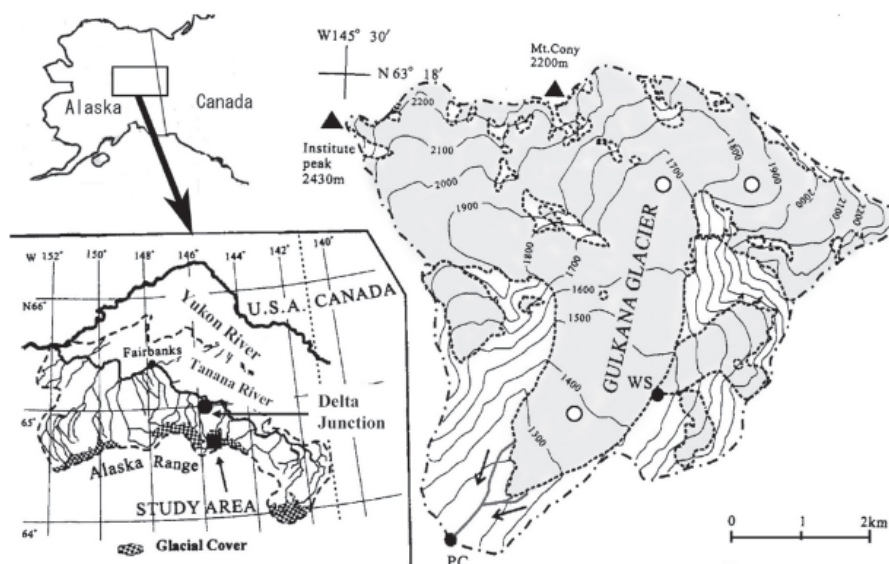


Fig. 1. Location of a weather station, Delta Junction, and a glacierized drainage basin upstream of a gauging station, site PC, at proglacial Phelan Creek, and a weather station, site WS, in the drainage basin, including the Gulkana Glacier and the Pegmatite Glacier (modified after March, 2000). The three white circles on the Gulkana Glacier indicate measurement points for the glacier mass balance.

点 PC 地点を最低標高 (1,125 m) とし、アラスカ・タナナ川の支流デルタ川の源頭部にある。流域の最高点は標高 2,473 m である。流域内の氷河域は、ガルカナ氷河、および東からガルカナ氷河に合流するペグマタイト氷河からなり、両者の面積比率はおよそ 9 : 1 である (Fig. 2)。気象観測点 WS 地点 (標高 1,480 m) はペグマタイト氷河の末端付近、ガルカナ氷河の左サイド・モレーン上に位置する。なお、ガルカナ氷河の末端は厚いデブリで覆われている。ガルカナ氷河とペグマタイト氷河の合計被覆面積は、1967 年で 22.2 km² (流域面積の 71.4 %), 1993 年で 19.8 km² (同 63.7 %), 2004 年で 17.3 km² (同 55.6 %) である。これから求められる氷河被覆面積の減少率は 1967~1993 年間で 0.092 km²/yr, 1998~2004 年で 0.23 km²/yr となり、近年の著しい面積縮小が認められる。なお、PC 地点における流量は氷河上の気温が正となる氷河消耗期 6 月~9 月で年間の約 90% を占め、この期間の流域の熱収支・水収支が重要であることがわかる。次に、ガルカナ氷河流域での観測方法を以下に示す。

氷河の質量収支は、氷河上の代表点 3 点 (Fig. 1 の白丸) にステークとピットを設け、氷河

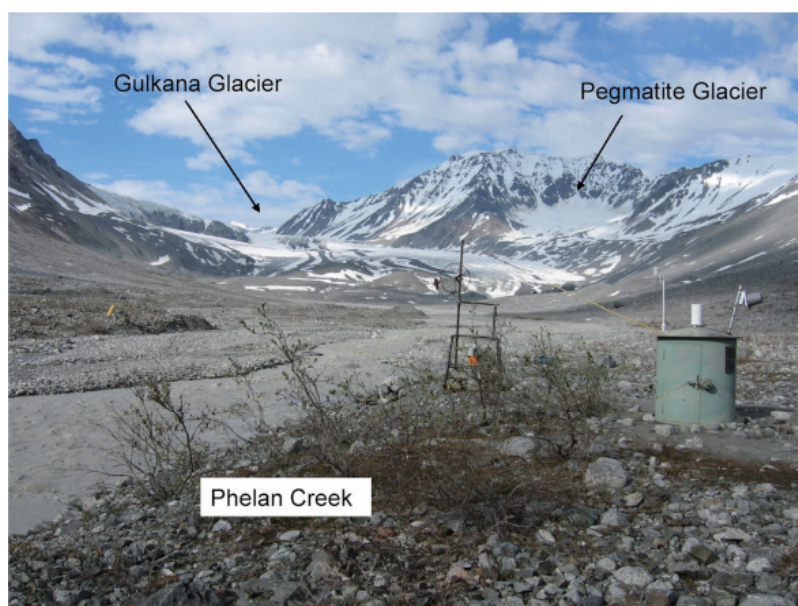


Fig. 2. USGS gauging station, site PC, at a proglacial stream, Phelan Creek, from the Gulkana Glacier and the upstream view (June 2006). The drum on the right is a shelter for the gauging station.

表面の変動量と密度を直接測定するインデックス法をとっている (March, 2000, 2003; March and O'Neel, 2011; Mayo et al., 2004; Van Beusekom et al., 2010)。この 3 点 (標高 1,370 m, 1,690 m, 1,840 m) は、標高の低い順に、氷河の消耗域 (年間正味質量収支が負), 平衡線高度 (年間正味質量収支ゼロ) 付近, 涵養域 (年間正味質量収支が正) の代表点として使用される。これらの点では、冬季に氷河へ涵養された積雪の量、すなわち最大積雪深が毎年 3 月~5 月の間に

一度測定され、夏季には融解し消耗する氷や雪の量が毎年8～10月の間に一度測定される。これにその年の標高100 m間隔の面積を乗じ、最後にその年の総氷河面積で除することで、それぞれ氷河全体の冬季質量収支、夏季質量収支を水当量 (m) として求めている。結局、この差が毎年の正味質量収支として求められる。また、このとき各年の平衡線高度 (標高 m) も得られる。

氷河先端からの流出河川、フェラン・クリークの水位はPC地点で15分間隔で測定され、同地点での毎年数回の流量観測から水位～流量曲線を求めて、水位から流量に変換される。この日平均データは、USGSのウェブ上で公開されている (URL: http://waterdata.usgs.gov/ak/nwis/uv/?site_no=15478040&period=14)。フェラン・クリークは流路変動 (水平方向の移動や河床変動) が大きいため、日平均流量の観測誤差は5～10%程度である (March, 2000, 2003)。気象観測点WS地点では、気温・降水量・風速が15分間隔で計測されており、日平均気温・日雨量・日平均風速の値はウェブ上 (URL: <http://ak.water.usgs.gov/glaciology/gulkana/met/index.html>) からダウンロードが可能である。

III. データの修復と復元

USGSによるガルカナ氷河の質量収支・気象・水位データは、1966年または1968年から今日まで得られているが、途中、様々なデータ欠損がある。また、観測機器の途中変更による系統的な値の差異も認められる。このため、これらに伴うデータの復元と修復が必要である。なお、本論文で用いるデータは、ガルカナ氷河からの融解流出が卓越する6月～9月平均の流量・気温・日降水量データであり、USGSによって認可された2010年9月30日までのデータである。

WS地点の気象は1967年10月1日から今日まで得られているが、気温については1968～1998年は精度 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ のアナログセンサー、1996年～2010年は精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ のデジタルセンサーを用いて測定された (March and Trabant, 1996; March, 2003)。結局、1996～1998年の3年間は両センサーを使用した重複期間である。この期間について6月～9月間の日平均気温をとると、デジタルセンサーの値 (y) がアナログセンサーの値 (x) より約 1.2°C だけ一貫して高いことがわかった。この関係を回帰式で表すと、

$$y = 0.994 \cdot x + 1.22 \quad (R^2 = 0.986, P < 0.001) \quad (1)$$

である。この回帰式を用いて、1968～1995年のアナログ値をデジタル値として変換した。また、WS地点の6月～9月について、気温については1976年と1992年、降水量は1992年と2004年に20日以上欠測がある。このため、WS地点の北北西86 kmにあるデルタ・ジャンクション空港 (標高389 m; Fig. 1) の気象データを用い、6月～9月の各月の平均気温と平均日降水量について、両地点間の相関から、欠測日を持つ月の値を求めた。結果として、平均気温 ($^{\circ}\text{C}$) については、

$$y_T = 0.747 \cdot x_T - 4.86 \quad (R^2 = 0.958, P < 0.001) \quad (2)$$

平均日降水量 (mm/day) については,

$$y_P = 0.200 \cdot x_P + 1.38 \quad (R^2 = 0.645, P = 0.025) \quad (3)$$

の回帰式が得られた。ここで, x_T , x_P はそれぞれデルタ・ジャンクション空港での各月の平均気温と平均日降水量, y_T , y_P はそれぞれ WS 地点の各月の平均気温と平均日降水量である。平均日降水量については, 平均気温に比べ相関は低い。しかし, 他の気象観測点 (たとえば, WS 地点の南南西 26.5 km にあるバクソン空港) は欠測が多く観測期間も短いため, ここでは, WS 地点降水量データの復元用として (3) 式を用いることとした。結果として, (2)(3) 式を用い, WS 地点における 1968~2010 年間の 6 月~9 月の各月平均気温と各月平均日降水量が得られた。

PC 地点での 6 月~9 月流量データについて, 1979~1989 年は全く欠測しており, この期間のデータを復元する必要がある。他方, WS 地点での気象データは 1976 年, 1992 年, 2004 年の 6 月~9 月に欠測期間があった。結果として, 流量の計測期間 1968~1978 年, 1990~2010 年のうち 1976 年, 1992 年, 2004 年を除いた年の 6 月~9 月間データについて, 「PC 地点の平均日流量」と「WS 地点の平均気温 T (°C) と平均日降水量 p (mm/day)」との間の関係を調べた。その結果, 回帰式として,

$$q = 0.00244 \cdot x_g^2 + 0.311 \cdot x_g \quad (R^2 = 0.853, P < 0.001) \quad (4)$$

が得られた。ここで, q は PC 地点での 6 月~9 月間の平均日流出高 (mm/day) で, 平均日流量 (m^3/day) を流域面積 $3.11 \times 10^7 \text{m}^2$ で除した値である。また, $x_g = f \cdot T + p$ で, ここでは, $f = 6.0$ (一定) とした。以上から, 1968 年~2010 年について, 6 月~9 月平均の気温・日降水量・日流出高が得られた。これに, 1966 年~2010 年間の平衡線高度 (equilibrium line altitude; ELA), 1966 年~2009 年間の氷河質量収支, および 1966 年~2009 年間の氷河面積 (一部は March and O'Neel (2011) に記載) のデータを加えることで, ガルカナ氷河の過去の変動をさぐることにする。

IV. 氷河の経年変動と水収支

1966 年~2009 年におけるガルカナ氷河の質量収支 (m 水当量) の変化を Fig. 3 に示す。冬の質量収支は, 多くの年で 1~2 m 水当量の範囲にあり, 経年のトレンドとしてはほぼ一定である。夏の質量収支は, 全ての年で負であり, 特に 1993 年以降, 大きく減少していることがわかる。結果として, 正味の質量収支はほとんどの年で負であり, 夏の収支と同様, 1993 年以降大きく減少している。図に示す回帰直線の傾きで見ると, 冬の質量収支は $+6.1 \times 10^{-4} \text{m/yr}$, 夏の質量収支は -0.020m/yr , 正味の質量収支は -0.021m/yr で, 夏の消耗期での氷河厚の減少傾向がそのまま, 氷河の薄層化傾向を表している。また, 同様に 1985 年~2009 年間では, 冬の質量収支は 0.0022m/

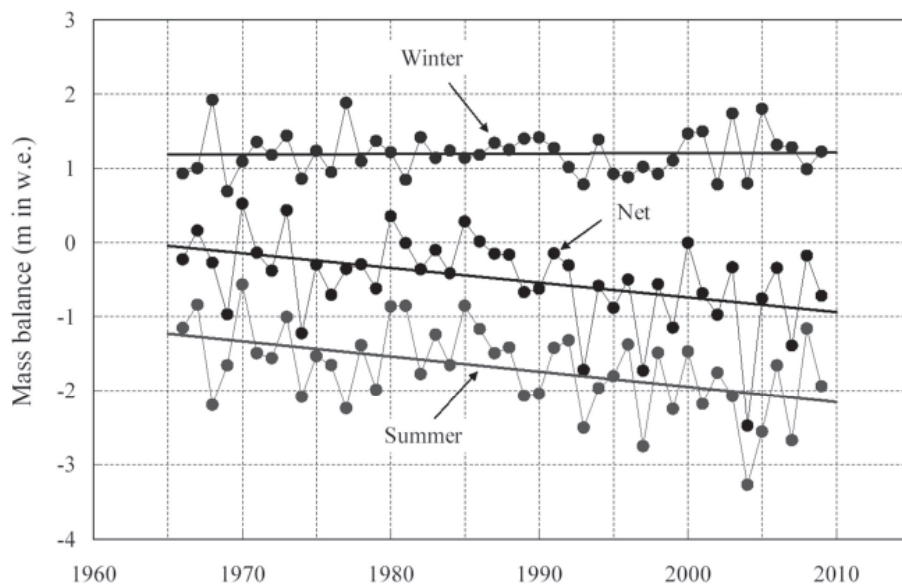


Fig. 3. Interannual variation of the summer, winter and net mass balances in m water equivalent for the Gulkana Glacier.

yr, 夏の質量収支は -0.034 m/yr, 正味の質量収支は -0.032 m/yr で, 近年に向かい降雪量の上昇, 夏と正味の質量収支の減少が認められる. これに関連して, 1966 年~2009 年間のガルカナ氷河の面積変化を Fig. 4 に示す. 1966~2009 年間の面積減少率はトレンドとして -0.077 km²/yr である. しかし, 正味の質量収支が 1993 年以降大きく減少していることに対応し, 1994 年から直線

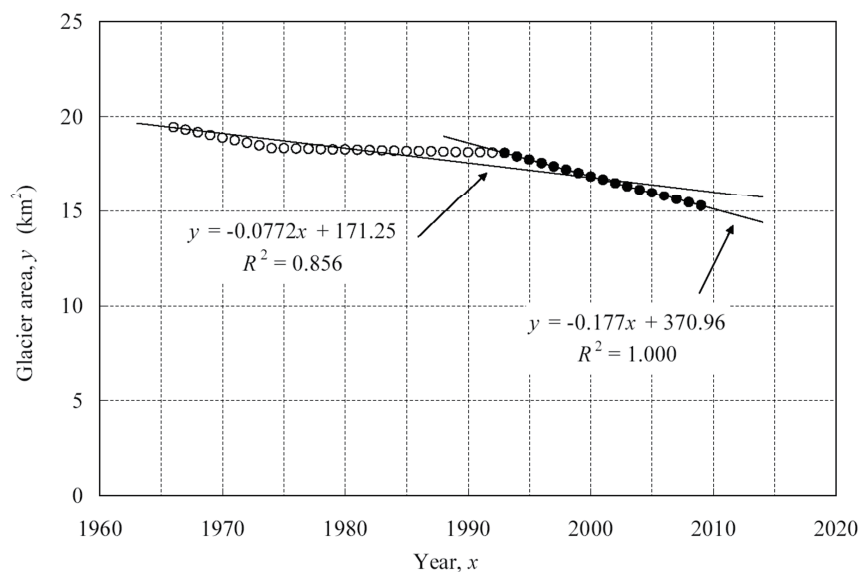


Fig. 4. Interannual variation of the Gulkana Glacier area.

的に減少しており、その減少率は $-0.18 \text{ km}^2/\text{yr}$ で 1966～2009 年間の 2 倍強である。もしこのまま減少するとすれば、ガルカナ氷河は 2096 年までには消失すると予想される。しかし、実際には、厚いデブリで覆われた氷河域は氷河表面への日射が遮られ、外気からの顕熱は熱伝導として伝わるため、この部分が dead ice として融け残ることが考えられる。

Fig. 3 での正味質量収支の積算された変化、及びこれに Fig. 4 の面積変化を考慮したガルカナ氷河の正味体積の積算変化を Fig. 5 に示す。なお、図には水の密度 1000 kg/m^3 として計算した氷河全体の正味質量の積算変化も示す。図より、1988 年付近から氷河の厚さや体積・質量は直線的に急激に減少し、回帰式で示される 1988 年～2009 年間のガルカナ氷河氷厚の減少速度は -0.862 m/yr 、同氷河全体の質量変化率は -12.2 Mton/yr 、体積変化率は $-12.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ である。また、実際の正味質量収支の積算量は、1966 年～2009 年の 43 年間で -21.8 m 、1985 年～2009 年の 24 年間で -17.1 m 、1999 年～2009 年の 10 年間で -7.9 m であり、平均減少率はそれぞれ -0.51 m/yr 、 -0.71 m/yr 、 -0.79 m/yr である。これより、近年に向い薄層化 (glacier thinning) が加速していることがわかる。1976 年 5 月 28 日に、ガルカナ氷河上のステーク設置点 3 点 (Fig. 1 の白丸) でポータブル・アイスレーダーを用いて氷厚が測定された (March, 2000)。これによると、消耗域地点で $50 \sim 150 \text{ m}$ 、平衡線付近で $70 \sim 270 \text{ m}$ 、涵養域で 180 m の氷厚があった。このときの氷河全体の平均氷厚を 150 m とすれば、1976 年から 2009 年までの氷厚減少分 22 m を考慮すると、2009 年の平均氷厚は 128 m となる。Fig. 5 の回帰式、 $y_2 = -0.8612x + 1708.2$ を用いると、この厚さがゼロとなる年代は 2160 年頃になる。以上から、面積の縮小からは 2100 年頃、氷厚の減少からは 2160 年頃にガルカナ氷河が消失することが予想される。

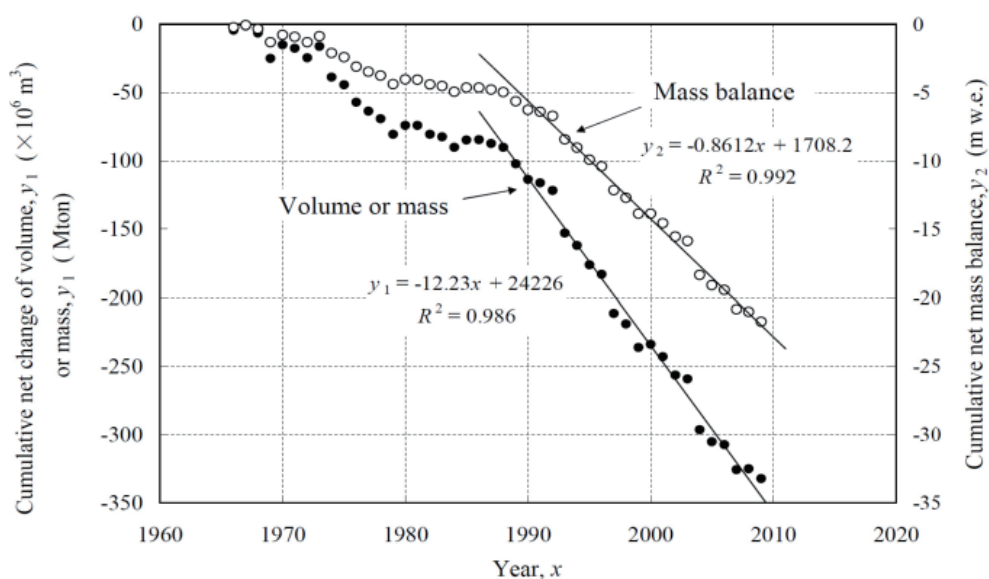


Fig. 5. Variation of cumulative net mass balance (m water equivalent) and cumulative net change of volume and mass for the Gulkana Glacier. Regression lines and equations for 1988 – 2009 are shown.

WS 地点の気象データと PC 地点の流量データについて、6 月～9 月間の平均気温・平均日降水量、および平均日流出高の経年変化を Fig. 6 に示す。図中の黒丸は、回帰式 (2)～(4) を用いて復元した値である。図に示す 3 要素は、いずれも増大のトレンドを持ち、気温、降水量、流出高について、それぞれ $0.012\text{ }^{\circ}\text{C/yr}$, 0.024 mm/yr , 0.092 mm/yr の上昇率を持つ（図中の実線）。なお、

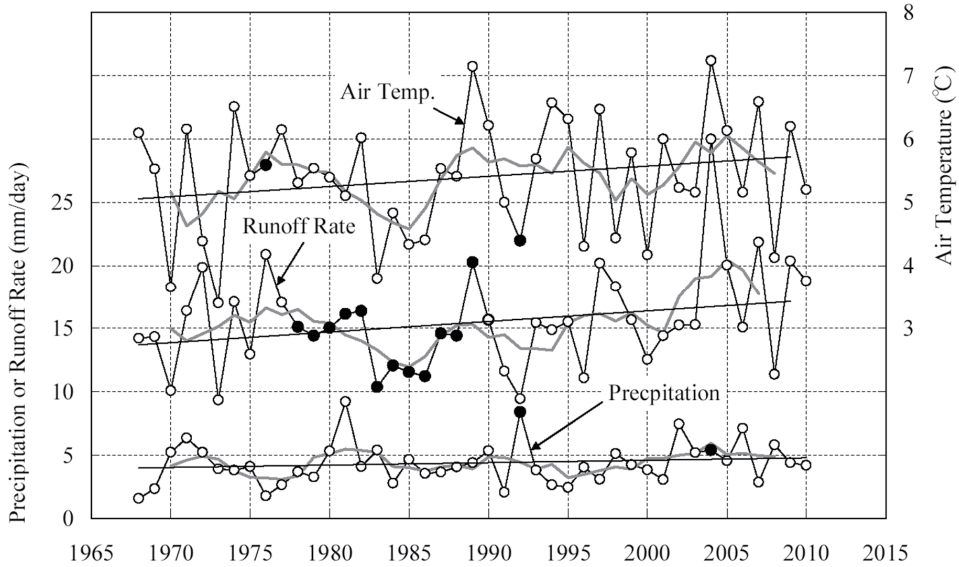


Fig. 6. Interannual variation of mean air temperature and mean daily precipitation at site WS, and mean daily runoff rate at site PC over June to September. Gray lines indicate 5-year moving averages. Black circles show the data retrieved by regression equations (2) – (4).

1985 年～2010 年の上昇率は、それぞれ $0.014\text{ }^{\circ}\text{C/yr}$, 0.041 mm/yr , 0.25 mm/yr であり、Fig. 3 の夏の負の質量収支に対応した、近年の流出高増大が顕著である。なお、6 月～9 月の 4 ヶ月間を水収支期間とし、この期間での融解水・雨水の氷河内貯留と PC 地点上流での蒸発量・蒸発散量が無視できるとすれば、Fig. 6 での日流出高から日降水量を差し引いた値が氷河融解による日流出高になる。実際、PC 地点上流の非氷河域には殆ど植生はなく、表面は基盤の露頭ないしは浸透性の高いデブリで覆われており、また平時の湛水域はフェラン・クリークの川水面のみである (Fig. 2)。このことから、PC 地点上流の非氷河域での蒸発散量は無視できる。また、9 月中旬以降を除いて、6 月～9 月の消耗期は氷河表面や川水面では蒸発よりもむしろ凝結の潜熱として表面に加えられ、氷河の場合は融解に寄与する (成田, 2007; Chikita et al., 2009)。一方、1 ヶ月程度の水収支期間では氷河内の貯留は無視できず、年によって貯留水が一気に排出されるイベントが発生する (Kido et al., 2007)。しかし、水収支期間を消耗期間全体にとれば、貯留量変化は比較的小さいことが Kido et al. (2007) によって示されている。

以上から、Fig. 6 における氷河融解日流出高の算出は第一近似的に妥当といえる。算出された

6月～9月間の平均日氷河融解流出高と WS 地点の平均気温との関係を Fig. 7 に示す．両者の間には有意な相関 ($R^2=0.558$, $P<0.001$) が認められ，このことは気温のみから氷河融解量を求める Positive Degree-Day 法 (Braithwaite, 1995; March, 2000, 2003; Ohmura, 2001) の有効性を示唆する．成田 (2007) によれば，消耗期間でのガルカナ氷河の融解量積算値は熱収支法と Positive Degree-Day 法で 5～7% の差があり，これは後者の方法の有効性を示している．

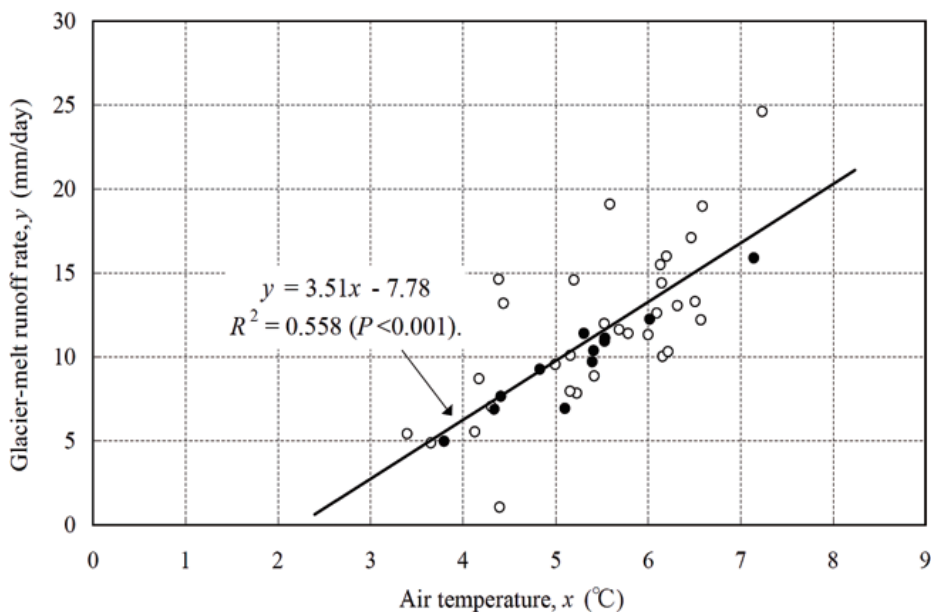


Fig. 7. Relation between mean air temperature at site WS and supposed mean daily glacier-melt runoff rate at site PC over June – September in 1968 – 2010. Black circles show glacier-melt runoff rate calculated from the retrieved runoff rate at site PC in 1978 – 1989 (Fig. 6).

ガルカナ氷河の平衡線高度 (ELA; m asl) についても上昇傾向があり，1966 年～2010 年間で 1.00 m/yr，1985 年～2010 年で 2.8 m/yr である (Fig. 8)．後者の上昇率で考えると，西暦 2150 年には標高 2200 m に達し，涵養域がほとんどゼロになる．これに Fig. 4 に示す面積変化と Fig. 5 の氷厚の減少を考慮すると，ガルカナ氷河は西暦 2100 年～2160 年にはデブリで被われた dead ice を残し消失していることが予想される．

今回，修復・復元したデータを加えた 6 月～9 月データについて，過去の変動と年間変化率をまとめた結果を Table 1 に示す．1968 年～2010 年（または 1966 年～2009 年，1966 年～2010 年）間と 1985 年～2010 年（または 1985 年～2009 年）間の平均値について，正味質量収支を除き 1985 年～2010 年（または 1985 年～2009 年）間の方がやや高く，近年に向かって増加していることがわかる．また，変化率は 1985 年～2010 年（または 1985 年～2009 年）間が相対的に高い．特に，日流出高と平衡線高度 (ELA) の上昇率は 1968 年～2010 年（または 1966 年～2010 年）

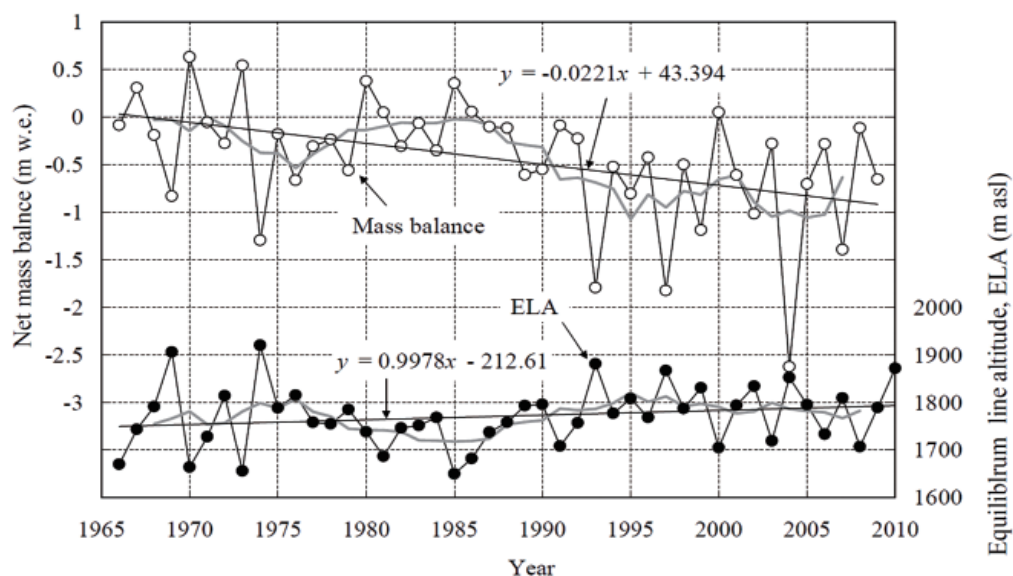


Fig. 8. Interannual variations of net mass balance (Fig. 3) and equilibrium line altitude (ELA) for the Gulkana Glacier.. Regression lines and equations between year (x) and net mass balance or ELA (y) are shown.

Table 1. Mean and standard deviation of mean air temperature and mean daily precipitation at site WS and mean daily runoff rate at site PC over June to September, equilibrium line altitude (ELA) and net mass balance of the Gulkana Glacier, and their annual rate in 1966 (or 1968) to 2009 (or 2010) and in 1985 to 2009 (or 2010).

Years	1968 - 2010	1985 - 2010	1968 - 2010	1985 - 2010
	Mean $\pm$ Std.	Mean $\pm$ Std.	Rate	Rate
Air Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	5.4 ± 0.9	5.5 ± 0.9	0.012°C/yr	0.014°C/yr
Precipitation (mm/day)	4.3 ± 1.7	4.4 ± 1.5	$0.024 \text{ mm/day}\cdot\text{yr}$	$0.041 \text{ mm/day}\cdot\text{yr}$
Runoff rate (mm/day)	15.5 ± 4.0	16.0 ± 4.4	$0.092 \text{ mm/day}\cdot\text{yr}$	$0.25 \text{ mm/day}\cdot\text{yr}$
Years	1966 - 2010	1985 - 2010	1966 - 2010	1985 - 2010
	Mean $\pm$ Std.	Mean $\pm$ Std.	Rate	Rate
ELA (m asl)	1771 ± 65	1777 ± 60	1.0 m/yr	2.8 m/yr
Years	1966 - 2009	1985 - 2009	1966 - 2009	1985 - 2009
	Mean $\pm$ Std.	Mean $\pm$ Std.	Rate	Rate
Net mass balance (m w.e.)	-0.44 ± 0.64	-0.64 ± 0.69	-0.022 m/yr	-0.033 m/yr

の2.7～2.8倍である。正味質量収支については、1985年～2009年間の平均値・変化率が絶対値で1966年～2009年間の約1.5倍増加している。しかし、気温上昇率は1968年～2010年間で 0.012°C/yr 、1985年～2010年間で 0.014°C/yr で大きな増加はない。つまり、気温変動のトレンドのみから正味質量収支の減少トレンドを説明することはできない。ガルカナ氷河の流域主方向は南向き (Fig. 1 参照) なので、短波放射の影響を強く受けていることが考えられ、このため

熱収支の観点からの議論が必要である。

今回は1ヶ所の氷河流域の議論であり、これがアラスカ氷河全体の経年変動をどの程度反映しているのかを考える必要がある。そこで、筆者らはUSGSが対象とする3ヶ所の氷河（ガルカナ氷河、ウルヴァリン氷河、サウス・カスケード氷河）に対し、Fig. 5に示す正味質量収支の積算値について比較検討をおこなった。その結果、1980年代に始まる氷厚の大きな減少傾向は、2004年までについて、ガルカナ氷河で -0.74 m/yr、ウルヴァリン氷河で -0.78 m/yr、サウス・カスケード氷河で -0.71 m/yr であった。つまり、近年の氷厚の減少率は氷河によって殆ど変わらないことがわかる。このことから、ガルカナ氷河の正味質量収支変動に関する議論は、アラスカ氷河全体の動向をみる有効な判断材料になることがわかる。

V. ま と め

本論文では、アラスカ・ガルカナ氷河流域における1966年（または1968年）～2010年間のUSGSデータの修復・復元を試み、同氷河の質量・水収支に関する経年変動を調べた。結果として、1985年～2010年（または2009年）間の平均値は、正味質量収支を除きいずれも1968年～2010年（または1966年～2009年）間の平均値よりも増加していることがわかった。また、変化率は1985年～2010年（または2009年）間が相対的に高く、特に日流出高と平衡線高度（ELA）の上昇率は1968年～2010年（または1966年～2009年）の2.7～2.8倍であった。正味質量収支の減少率については、1985年～2009年間が1966年～2009年間の約1.5倍増加していることがわかった。また、流域水収支で得られた氷河融解流出高と氷河域気温との間には有意な相関が認められた。USGSが1960年代からモニタリングしている3ヶ所の氷河について、1980年代からの氷厚の年間減少率は同様の値をとり、ガルカナ氷河の質量・水収支の経年変動がアラスカ氷河全体の変動をみる良い指標となることを示した。

謝辞 本論文で使用したデータは、米国地質調査所（USGS）のweb上データばかりでなく、同フェアバンクス支所のRod S. March氏の厚意あるデータ提供に基づいている。ここに深謝致します。なお、本研究は2003～2010年JAXA（日本宇宙航空研究開発機構）/IARC（アラスカ大学国際北極圏研究センター）の国際共同研究計画「IARC-JAXA 情報システム（IJIS）及び衛星データ活用北極圏研究」の一部として実施された。

文 献

- Braithwaite, R. J., 1995. Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modelling, *J. Glaci.*, **41**, 153-160.
- Chikita, K. A., R. Kaminaga, I. Kudo, T. Wada and Y. Kim, 2009. Parameters determining water temperature of a proglacial stream: The Phelan Creek and the Gulkana Glacier, Alaska, *Riv. Res. Appl.*, **24**, 1-10.

- Cogley, J. G., 2009. Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis, *Ann. Glaci.*, **50**, 96-100.
- Dyrugerov, M. B. and M. F. Meier, 2005. Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot, *Institute of Arctic and Alpine Research. Occasional Paper* **58**, 177pp.
- Hartmann, B. and G. Wendler, 2005. The significance of the 1976 Pacific Climate Shift in the Climatology of Alaska, *J. Climate*, **18**, 4824-4838.
- Kido, D., K. A. Chikita and K. Hirayama, 2007. Subglacial drainage system changes of the Gulkana Glacier, Alaska: discharge and sediment load observations and modelling, *Hydrological Processes*, **21**, 399-410.
- 気象庁, 2006. 2004 年 12 月までの世界の観測結果を用いた大気中の温室効果ガスの状況. WMO 温室効果ガス年報, 1 号, 5pp.
- 気象庁, 2011. 2010 年 12 月までの世界の観測結果に基づく大気中の温室効果ガスの状況. WMO 温室効果ガス年報, 7 号, 4pp.
- Liu Q., S. Liu, Y. Zhang, X. Wang, Y. Zhang, W. Guo and J. Xu, 2010. Recent shrinkage and hydrological response of Hailuoguo glacier, a monsoon temperate glacier on the east slope of Mount Gongga, China, *J. Glaci.*, **56**, 215-224.
- Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace and R. Francis, 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- March, R. S., 2000. Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1995 balance year. *U. S. Geological Survey Water Resources Investigations Report*, 00-4074, 33pp.
- March, R. S., 2003. Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1996 balance year. *U. S. Geological Survey Water Resources Investigations Report*, 03-4095, 33pp.
- March, R. S. and D. C. Trabant, 1996. Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1992 balance year, *U. S. Geological Survey Water Resources Investigations Report*, 95-4277, 32pp.
- March, R. S. and S. O'Neel, 2011. Gulkana Glacier, Alaska-mass balance, meteorology, and water measurements, 1997-2001. *U. S. Geological Survey, Scientific Investigations Report*, 2011-5046, 69 pp.
- Matsuo, K. and K. Heki, 2010. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry, *Earth Planetary Sci. Lett.*, **290**, 30-36.
- Mayo, L. R., D. C. Trabant and R. S. March, 2004. A 30-year record of surface mass balance (1966-95) and motion and surface altitude (1975-95) at Wolverine Glacier, Alaska, *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 2004-1069.
- Meier, M. F., 1984. Contribution of small glaciers to global sea level, *Science*, **226**, 1418-1421.
- 成田悠一, 2007. アラスカ氷河流域における水文特性の経年変化. 北海道大学修士論文, 35 pp.
- Ohmura, A., 2001. Physical basis for the temperature-based melt-index method, *J. Appl. Meteor.*, **40**, 753-761.
- Shrestha, A. B., C. P. Wake, P. A. Mayewski and J. E. Dibb, 1999. Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: an analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971-94, *J. Clim.*, **12**, 2775-2786.
- Van Beusekom, A. E., S. R. O'Neel, R. S. March, L. C. Sass and L. H. Cox, 2010. Re-analysis of Alaskan benchmark glacier mass-balance data using the index method, *U. S. Geological Survey, Scientific Investigations Report*, 2010-5247, 15pp.
- Wada, T., K. A. Chikita, Y. Kim and I. Kudo, 2011. Glacial effects on discharge and sediment load in the subarctic Tanana River Basin, Alaska, *Arctic, Antarctic Alpine Res.*, **43**, 632-648.