

氷河の熱収支に与える大規模森林火災の影響

The Effect of Large Forest Fires on the Heat Budget of a Glacier

知北 和久¹・成田 悠一²・キム ヨンウォン³・ケビン エングル⁴
Kazuhiisa A. CHIKITA, Yu-ichi NARITA, Yongwon KIM and Kevin ENGLE

¹ 北海道大学大学院 理学研究院 准教授

² 北海道大学大学院 理学研究科 大学院生 (修士課程)

³ アラスカ大学 国際北極圏研究センター 助教授

⁴ アラスカ大学 アラスカ地理情報ネットワーク 教授

要 旨

2004 年と 2005 年の夏季に、アラスカ州ユーコン河流域で大規模な森林火災が約 2.5～3 ヶ月間発生し、大気中に大量の煙が放出された。その煙は、ユーコン河源頭部の山岳氷河域にまで達し、本研究で対象としているガルカナ氷河でも、この煙霧に覆われる「イベント」が生じた。

この煙霧は直達日射を妨げ、これによって、氷河表面における熱収支構成要素の絶対量や比率が変化する可能性がある。

本研究では、氷河上空の天候、および煙霧が氷河上空を覆うイベントの有無を MODIS 可視画像を用いて判別し、衛星画像の撮影日の気象条件を「晴れ」「曇り」「煙霧」に分類した。また、ガルカナ氷河で観測された気象データを用いて同氷河の熱収支を計算し、画像の分類結果と比較検討した。

その結果、「曇り」で降雨を伴う場合は気温と日射の減少が同時に起こり、顕熱フラックスと正味放射の著しい減少が見られた。一方、「煙霧」の場合、日射の障害による短波放射の減少はあるが、同時に長波放射が増大し、結果として正味放射量の減少は小さかった。さらに、煙霧には、雨を伴う「曇り」の場合ほど気温を減少させる効果は見られず、むしろ、総観的な大気運動による顕熱・潜熱フラックスの変動が氷河融解に対し影響が大きいことがわかった。

《キーワード：氷河；森林火災；煙霧；熱収支；MODIS 画像》

1. はじめに

氷河融解量は、氷河表面における日射とアルベドに関係する「短波放射フラックス」、気温・氷河表面温度・雲量などに関係する「長波放射フラックス」、主に気温と風速に支配される「顕熱フラックス」、相対湿度と風速に支配される「潜熱フラックス」の4つの成分の熱収支によって決まる。各成分の絶対量や割合は、氷河が存在する場所の地形・気候や氷河上の気象状態の変化によって変わるため、氷河の融解量や融解特性を知るには、熱収支成分と「地球の温暖化」「広域的な気流の変化」などの気候変化や「晴れ」「曇り」などの気象変化との関係を明らかにする必要がある。気候・気象の変化以外で氷河の熱収支に影響を与える短期的なイベントとして、近年、温暖化・乾燥化によって多発している大規模な森林火災が挙げられる。大規模な森林火災では大量の煙が大気中に放出するため、その煙が氷河上空を覆うと直達日射を阻害し、これによって氷河の熱収支特性に影響を与えることが考えられる。実際、2004年と2005年の夏季にアラスカ・ユーコン河流域において大規模な森林火災が発生し、アラスカ州環境保護局(Alaska Department of Environmental Conservation)のweb pageによると、火災による煙がフェアバンクスなどの市街地に達し、濃い煙霧によって日射が遮られる事態が生じた。この森林火災の発生期間は6月～9月で、2004年で約3ヶ月間、2005年で約2.5ヶ月間燃え続けた。被災面積は、2004年で 6.52×10^6 エーカー($2.63 \times 10^4 \text{km}^2$)、2005年で 2.66×10^6 エーカー($1.07 \times 10^4 \text{km}^2$)で、それぞれ四国の1.4倍、0.6倍に相当する。この煙霧は、総観的な風速場に乗ってユーコン河源頭部の氷河域にまで達し、本研究の対象であるガルカナ氷河も煙霧に覆われた(写真-1)。

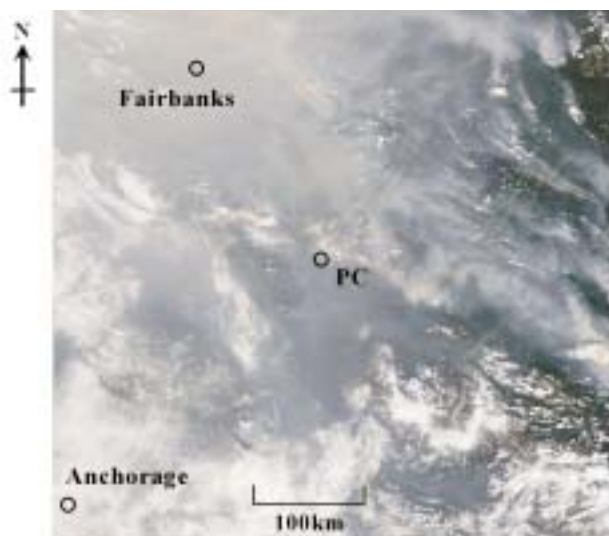


写真-1 MODIS可視画像でみる煙霧の様子
(AKDT 2004年7月2日12時39分) (アラスカ大学GINAによる画像を修正)。PC地点付近の白色の筋はガルカナ氷河を含む氷河域、灰色は煙霧、南西の白色部は雲

氷河の気候・気象と熱収支との関係については、これまで数多くの研究がある。例えば、Brazel et al.¹⁾、Hannah et al.²⁾は、夏季の気象データについて主成分分析などの統計解析を行い、氷河融解期の気象をいくつかの代表的なパターンに分類して熱収支との関係を議論した。しかし、森林火災の煙霧の影響を含めた氷河の熱収支を議論した例は極めて少ない。

本研究に関して、アラスカ・ユーコン河の源頭部にあるガルカナ氷河流域で、2004年と2005年の氷河融解期に気象観測を実施した。本研究では、気象データを用いて熱収支を計算し、氷河流域の「晴れ」「曇り」などの大気条件に加えて、森林火災の「煙霧」が覆う「イベント」における熱収支特性を明らかにする。ここでは、「晴れ」「曇り」「煙霧」の判別にはTerra衛星搭載のMODISセンサーによる可視画像を用い、この解析結果と現地の気温、湿度、日射データから求めた熱収支とを比較検討する。

2. 対象流域とデータセット

(1) ガルカナ氷河流域の特徴

研究対象流域は、アラスカ州ユーコン河の支流・タナナ川の流域源頭部にあるガルカナ氷河流域 ($63^{\circ} 16' N, 142^{\circ} 25' W$)である(図-1)³⁾。ガルカナ氷河は大きく分けて、年間の質量収支が正である上流部の涵養域(最高点標高 2470 m)と負になる下流部の消耗域(最低点標高 1160m)から成る。涵養域と消耗域を分ける平衡線(年間の氷河質量収支がゼロとなる線)の標高は、1966年～1996年平均で約 1770m である。ガルカナ氷河の主な流動方向は南南東向きで、デブリや岩屑に覆われた氷河末端へと続いている。流域面積は 31.1km^2 で、流域内には流域の大部分を占めるガルカナ氷河と東部にあるペグマタイト氷河(Pegmatite Glacier)が存在する。1993年航空写真によると、流域内の氷河被覆面積は 19.84km^2 で全体の約 64%に相当する^{4),5)}。1967年には、ガルカナ、ペグマタイトの両氷河以外に無名の小氷河が存在し、氷河被覆面積は全体の約 70%(22.2km^2)であった。結局、1967年～1993年間の27年間で無名の小氷河は消失し、被覆面積は 2.36km^2 減少した。流域内の非氷河域に植生はなく、表層はデブリで覆われている。ガルカナ氷河の末端からは、フェラン・クリーク(Phelan Creek)と呼ばれる河川が流出し、夏季には氷河の融解水および雨水が流出している。

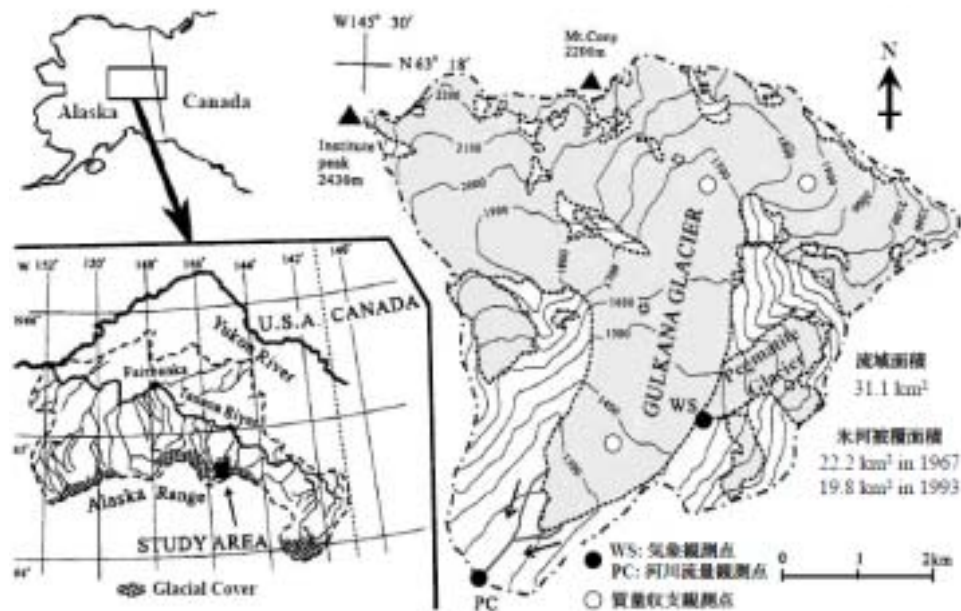


図 - 1 アラスカ州のタナナ川流域(左)とガルカナ氷河流域(右)の位置

ガルカナ氷河流域では、米国地質調査所(U.S. Geological Survey, 以後 USGS と記す)によって、流量および気象観測が 1967 年から行われており、氷河の質量収支観測も 1966 年から継続的に行われている(図-1)。流量観測点は、ガルカナ氷河末端から約 1.1km 下流の PC 地点(標高 1125m)である。気象観測点は 2ヶ所あり、氷河東側のサイドモレーン上、標高 1480m の WS 地点で気温・降水量・風速が、流域末端の PC 地点で気温・降水量が連続測定されている。氷河の質量収支観測は図-1の印で示された 3 点で行われ、上流から、涵養域の代表点(標高 1840m 地点)、平衡線付近(標高 1690m)、消耗域の代表点(標高 1370m)のそれぞれで質量収支を観測している。

(2) USGS 気象データ

USGS による PC 地点の気象・流量観測データは USGS Real-Time Water Data for Alaska (<http://waterdata.usgs.gov/ak/nwis/current/>) で、WS 地点の気象データは USGS Water Resources of Alaska-Benchmark Glaciers-Gulkana Glacier Home Page (<http://ak.water.usgs.gov/glaciology/gulkana/>) で公開されている。これらの Web page で公開されていないデータは、USGS から直接提供を受けた。得られたデータセットは、WS 地点の 2004 年 6 月～9 月と 2005 年 6 月～9 月の日平均気温データ、同期間の日平均風速、および PC 地点の日積算雨量である。WS 地点(図-1)に設置されている温度センサーは、地上 1.5~2.0m の白色のシェルターに格納されており、シェルターの底は開放されている。センサーはアナログ式の温度計で、精度は $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 程度である⁶⁾。同シェルター内には、1996 年からは精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ のデジタル温度計が設置されている⁵⁾。また、風速は、地上 3m において、Taylor Scientific Engineering 社製の WS-3 回転翼式風速計で観測している。風速センサーの感度は、下限で 1.34m/s で、測定精度はおよそ $\pm 5\text{m/s}$ である⁵⁾。風速は 15 分ごとに記録しており、本研究では、それを日平均値に変換して使用した。

(3) 現地観測データ(日射・アルベド・気温・湿度)

2004 年と 2005 年に、PC 地点付近で日射量、WS 地点付近で気温・湿度・雨量の現地観測を行った(図-1)。観測期間は 2004 年 7 月 2 日～9 月 8 日と 2005 年の 6 月 14 日～9 月 7 日である。氷河近傍の日射については、PC 地点の南東 500m の南向き斜面で全天日射計(ブリード社製全天日射計ソーラーミニ PCM-01 型: 波長領域, 305~2800nm; 精度 $\pm 3\%$)を設置し、1 時間ごとの日射量(W/m^2)を測定した。気温・相対湿度・雨量については、WS 地点近傍において、地上 1m 付近に温湿度計(HIOKI 社製温湿度計データミニ 3641 型: 測定範囲, $-45\sim 85^{\circ}\text{C}$, 0.0%~100.0%; 精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\sim 12\%$)を設置し 1 時間ごとの気温・湿度を得た。なお、これらの時間値は日平均値に変換し解析に用いた。また、2005 年 6 月 14 日 14:00~16:00 に、ガルカナ氷河末端部分において氷河上の雪、フィルン、デブリ被覆部分のアルベドを測定した。また、2005 年 9 月 7 日 15:00~16:00 に、氷河末端部分で氷河の裸氷部分のアルベドを測定した。

(4) 衛星データ

ガルカナ氷河上空の気象状態の判別に用いた衛星画像は、米国国家航空宇宙局(NASA)の Terra 衛星に搭載されているセンサー、MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)のバンド 1, 4, 3 の可視領域データがアラスカ大学アラスカ地理情報ネットワーク(GINA; Geographic Information Network of Alaska)から提供された。各バンドの観測波長域は、バンド 1 が $0.620\sim 0.670\mu\text{m}$ 、バンド 4 が $0.545\sim 0.565\mu\text{m}$ 、バンド 3 が $0.459\sim 0.479\mu\text{m}$ であり、空間分解能は 250~500m である。データは幾何補正され、さらに簡易的な大気補正と放射量補正がなされた。画像の撮影期間と枚数は、2004 年 7 月～8 月の 5 枚と、2005 年 8 月の 5 枚である(表-1)。画像の領域としては、図-1 のタナナ川流域(但し、Nenana の上流域)がおさまる範囲を選んだ(図-2)。図-2 での衛星画像の四隅の座標は、左上($65^{\circ} 30' \text{N}$, $150^{\circ} 00' \text{W}$)、右上($65^{\circ} 30' \text{N}$, $139^{\circ} 30' \text{W}$)、左下($61^{\circ} 30' \text{N}$, $150^{\circ} 00' \text{W}$)、右下 ($61^{\circ} 30' \text{N}$, $139^{\circ} 30' \text{W}$) である。なお、図-2 の画像では上半分は煙霧で覆われ、下半分は快晴である。また、快晴箇所の白色部は全て氷河被覆域を示す。

表 - 1 解析に用いたMODIS画像

Satellite/Sensor	Date	Time (AKDT)
Terra/MODIS	2 July 2004	1239h
Terra/MODIS	11 Aug. 2004	1328h
Terra/MODIS	15 Aug. 2004	1303h
Terra/MODIS	17 Aug. 2004	1429h
Terra/MODIS	20 Aug. 2004	1321h
Terra/MODIS	8 Aug. 2005	1404h
Terra/MODIS	13 Aug. 2005	1245h
Terra/MODIS	15 Aug. 2005	1232h
Terra/MODIS	17 Aug. 2005	1220h
Terra/MODIS	19 Aug. 2005	1346h

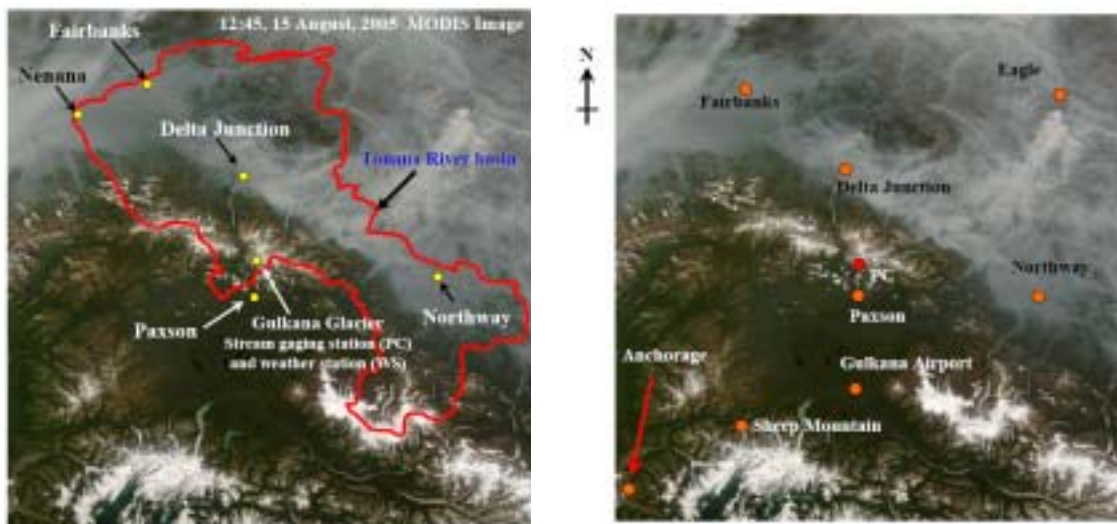


図-2 Nenanaより上流のタナナ川流域を含む解析対象領域（左）と8ヶ所の空港の位置（右）
 （2005年8月15日12:45のMODIS可視画像）（アラスカ大学GINAからの画像を修正）。
 右図のPC地点はガルカナ氷河流域での観測点

（5）空港における定時実況気象通報式（METAR）データ

画像内に存在する8ヶ所の空港(図-2, 表-2)における天候(Weather condition)と視程(Visibility)を, 2004年6月~9月, 2005年8月の定時飛行場実況気象通報式(METAR) Wunderground.com (<http://english.wunderground.com>) より入手し, 流域内の衛星画像のグラウンド・トゥールースとして用いた(表-3)。

表-2 対象領域内の空港の位置

Airport Name	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Anchorage	61° 10' 28" N	149° 59' 47" W	46
Delta Junction	63° 59' 40" N	145° 43' 18" W	389
Eagle	62° 46' 35" N	141° 09' 03" W	268
Fairbanks	64° 48' 54" N	147° 51' 23" W	132
Gulkana	62° 09' 18" N	145° 27' 24" W	481
Northway	62° 57' 40" N	141° 55' 44" W	522
Paxson	63° 01' 28" N	145° 30' 02" W	809
Sheep Mountain	61° 48' 43" N	147° 30' 25" W	838

表-3 使用したMODIS画像(表-1)に対応した8ヶ所の空港における天候と視程

Time & Date	METAR	Paxson	Fairbanks	Anchorage	Delta Junction	Northway	Eagle	Sheep Mountain	Gulkana Airport
1239h, 2 July 2004	Condition	Smoke	Smoke	Overcast	Smoke	Smoke	Clear	Smoke	Smoke
	Visibility (km)	3.2	0.8	16.1	2.0	1.6	6.4	6.4	8.0
1328h, 11 Aug. 2004	Condition	-	Smoke	Scattered Clouds	Smoke	Smoke	Clear	Overcast	Partly Cloudy
	Visibility (km)	-	4.8	16.1	2.0	0.8	4.8	32.2	16.1
1303h, 15 Aug. 2004	Condition	Scattered Clouds	Smoke	Overcast	Overcast	Smoke	Clear	Smoke	Smoke
	Visibility (km)	19.3	8.0	16.1	16.1	0.8	14.5	4.8	8.0
1429h, 17 Aug. 2004	Condition	Smoke	Smoke	Smoke	Smoke	Smoke	Clear	Smoke	Smoke
	Visibility (km)	2.4	0.8	8.0	2.0	2.4	8.0	6.4	9.7
1321h, 20 Aug. 2004	Condition	-	Smoke	Overcast	Smoke	Smoke	Clear	Overcast	Overcast
	Visibility (km)	-	1.6	16.1	2.4	4.0	16.1	1.2	16.1
1404h, 8 Aug. 2005	Condition	-	Overcast	Scattered Clouds	Scattered Clouds	Mostly Cloudy	Clear	Scattered Clouds	Scattered Clouds
	Visibility (km)	-	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	32.2	16.1
1346h, 9 Aug. 2005	Condition	Smoke	Smoke	Mostly Cloudy	Smoke	Partly Cloudy	Clear	Smoke	Scattered Clouds
	Visibility (km)	16.1	4.8	16.1	6.4	16.1	16.1	3.2	11.3
1245h, 13 Aug. 2005	Condition	Scattered Clouds	Smoke	Mostly Cloudy	Smoke	Smoke	Clear	Clear	Clear
	Visibility (km)	24.1	1.2	9.7	2.8	3.2	1.2	32.2	16.1
1232h, 15 Aug. 2005	Condition	-	Smoke	Mostly Cloudy	Smoke	Smoke	Clear	Smoke	Clear
	Visibility (km)	-	2.4	16.1	6.4	11.3	16.1	16.1	16.1
1220h, 17 Aug. 2005	Condition	Smoke	Smoke	Overcast	Smoke	Smoke	Smoke (Haze)	Overcast	Overcast
	Visibility (km)	32.2	0.8	16.1	6.4	9.7	0.4	32.2	16.1

3. 方法

本研究では、先ず、表-1 に示す 10 枚の衛星画像を用いて、タナナ川流域の上空の気象（煙霧、曇り、晴れ）を画像中の各画素について分類し、その分類結果を基に、各画像データを撮影した日時でのガルカナ氷河流域上空の気象を推定した。さらに、その推定結果を用いて、各画像を同流域の上空の気象ごとに分類した。分類した 10 枚の画像の中から、同時期にガルカナ氷河近傍で地上気象が観測されている 9 枚の画像を選び、気象データから求めた「ガルカナ氷河における熱収支」と画像から推定した「ガルカナ氷河上空の天候」との関係を検討した。以下では、これらの手法について述べる。

(1) 衛星画像による天候の判別 - タナナ川流域とその周辺

衛星画像データには、地球表層に存在する様々なものから反射した光の強度が、各画素に 1 チャンネルについて 8bit(0~255)の情報量(DN 値: Digital Number)で記録されている。画像データを用いて地球表層の存在物を分類したい場合、その存在物の光学特性がそれぞれ異なる場合は、各画素の情報量の特徴から分類できる。このような衛星画像の分類法には様々なものがあるが、大別すると「教師付き分類法」と「教師なし分類法」がある。「教師付き分類法」では、先ず衛星画像中の分類したい対象（以降、クラスと呼ぶ。本研究では、煙霧・雲・地表のことを指す）が明らかな領域を指定し、その領域(トレーニング・フィールド)に含まれる画素の情報量の統計値から各クラスの特徴を推定する。そして、そのクラスの特徴を基準にして、その他の領域の画素を分類する。一方、「教師なし分類法」は、分類の基準となる領域を設けず、画像中から無作為に取り出された各画素を、画素データ特徴の類似性のみから、幾つかのグループに分類する方法である。本研究では、教師付き分類法である「最尤法」と、教師なし分類である非階層的クラスター分類法の 1 つである「ISODATA 法」を組み合わせる手法をとった。具体的な手順は次のとおりである。

(i) 分類の基準となる画像の選択

表-1の10枚の画像および画像内に存在する8ヶ所空港(表-2)の定時飛行場実況気象通報式(METAR)による各空港の天候と視程を用いて、分類したいクラス(雲・煙霧・地表など)がもれなく含まれているような、「分類の基準となる画像」を 1 枚選択する。

(ii) クラスター分類と分類結果の解釈

手順 (i) で指定した画像について、ISODATA法を用いて画像中の特徴が類似した画素をいくつかのクラスに分類し、METARと比較してそれぞれのクラスを解釈する。

(iii) 最尤法によるクラス分類

手順 (ii) の結果をもとに、いくつかのトレーニング・フィールドを選び、この範囲内の画素データを基準にして、最尤法で10枚の画像中の画素を分類する。

本研究においては、手順 (i) の「分類の基準となる画像」として、2004 年 8 月 20 日 13:21 の MODIS 画像を選んだ (図-3, 表-1, 表-3)。図-3 では、Anchorage, Sheep Mountain 付近は厚い雲に覆われ、Fairbanks, Delta Junction, Northway 付近は靄のような煙霧に覆われている。また、Eagle 付近では地表の様子が見え、ほぼ「晴れ」と考えられる。実際、表-3 の METAR による天候(Condition)と視程(Visibility)では、Anchorage, Sheep Mountain, Gulkana の天候は「曇り」であり、視程も 16km 以上ある。また、Fairbanks, Delta Junction, Northway では、煙霧が観測され、視程も 1.6~4.0km と非常に小さいため、地表付近まで煙霧に覆われていると判断される。また、Eagle においては、視程が 16km 以上と非常に良好で、天候も晴れである。このように、図-3 の画像は、雲に覆われている状態(Cloud),

煙霧に覆われている状態(Smoke),晴れて地表が見える状態(Clear)の3つの状態が全て含まれているため,分類基準の画像に適している。

次に,より詳細な分類を行うために,手順(ii)として,手順(i)で選んだ画像をISODATA法によって8クラスに分類し,それぞれのクラスの解釈(意味づけ)を行った。ISODATA法では,まず分類対象にいくつかの適当なクラスターを与え,その初期クラスターの重心と個々の画素の「距離」を計算する。そして,最も「距離」が近いクラスターに画素を分類し,全ての画素が分類されたら各クラスターの重心を再度計算する。このとき,新しい重心と個々の画素の「距離」を基準に分類する,といった操作を繰り返す。そして,重心の再計算によって所属するクラスが変わるような画素の数が,ある閾値より小さくなったとき,収束したとみなし操作を終了する。本研究では,分類の基準となるクラスター重心と個々の画素の「距離」として,3つのチャンネルのDN値による3次元ユークリッド距離を用いた。また,分類の収束条件として,重心の再計算によって所属するクラスを変えない画素の数が全画素数の98%になったときに収束したとみなした。

分類結果を図-4に示す。METARデータ(表-3)と元の画像(図-3)とを比較すると,まずMETARデータから,Anchorage, Sheep Mountainのクラスター(Cluster 1, 2, 3)は雲のクラスター, Eagle付近のクラスター(Cluster 8)は晴れていて地表の様子が確認できるクラスター, Fairbanks, Delta Junction, Northway付近のクラスター(Cluster 4, 5, 6)は煙霧のクラスターであると考えられる。また,元の画像を見ると, Fairbanks(煙霧: Cluster 4)から東へ約300kmにあるEagle(天候晴れ: Cluster 8)に向かって,煙霧が徐々に薄くなっているように見える。この場合,クラスター分類の結果ではCluster 4, 5, 6, 7, 8と段階的に変化することから,煙霧のクラスターはCluster 4, 5, 6, 7の順で煙霧の濃さを表すと考えられる。雲のクラスターでは, Cluster 1は元の画像において,ほぼ飽和している画素の集合であり, Cluster 2はやや薄い雲, Cluster 3は雲の境界付近を表していると考えられる。

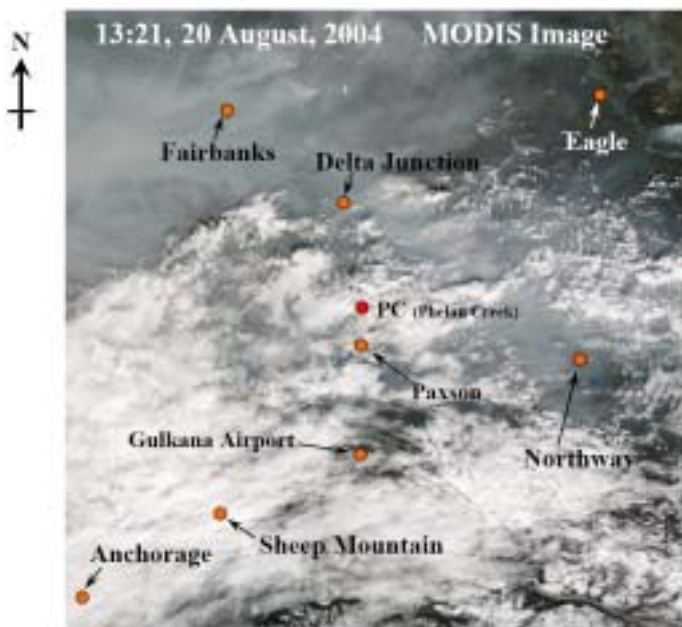


図-3 「分類の基準となる画像」として使われたMODIS画像
(2004年8月20日13:21撮影)
(アラスカ大学GINAからの画像を修正)

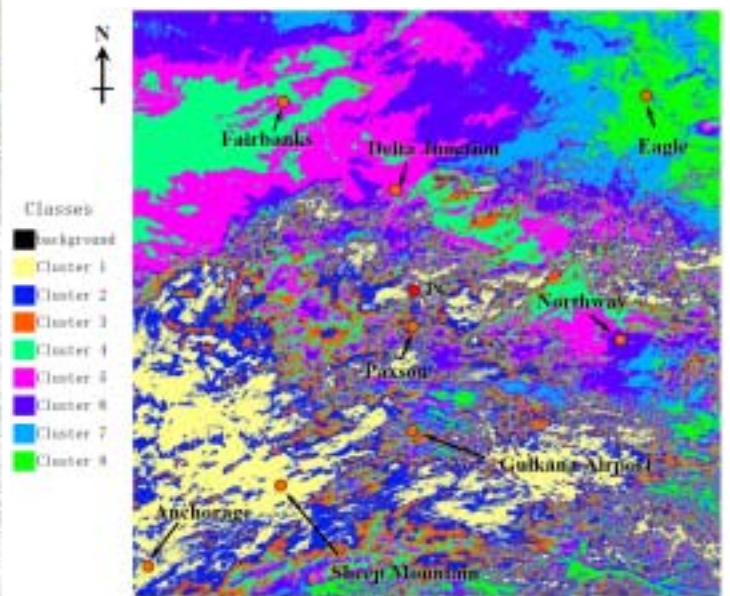


図-4 SODATA法によるMODIS画像
(2004年8月20日13:21)に対するクラスの分類

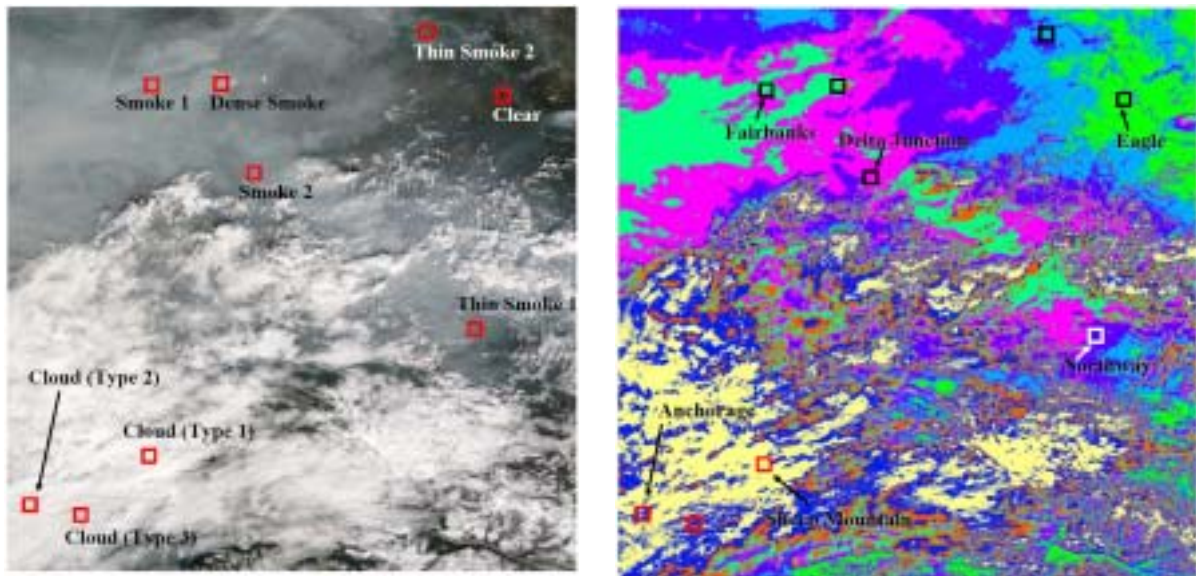


図-5 「最尤法による分類」に対して指定されたトレーニング・フィールド

以上の結果を参考に、手順 (iii) の最尤法による分類に必要なトレーニング・フィールドを9箇所指定した(図-5)。なお、それぞれのフィールドの広さは40×40画素に統一した。9箇所のトレーニング・フィールドに対応するクラスは、煙霧のクラスはFairbanks上空のやや濃い煙霧の領域「Smoke 1」、その近傍の最も濃い煙霧の領域「Dense Smoke」、Delta Junction上空の中間的濃さの「Smoke 2」、Northway上空のやや薄い領域「Thin Smoke 1」、そして、Eagle近傍の最も薄い領域「Thin Smoke 2」の5種類である。雲のクラスは、Sheep Mountain近傍の画素がほぼ飽和している領域「Cloud 1」、Anchorage近傍の「Cloud 2」、Anchorage近傍でやや薄い雲である「Cloud 3」の3種類、晴れのクラスはEagle上空の「Clear」の1種類である。

最尤法は、画像中のある画素がどのクラスに属する確率(尤度)が最も高いかを判断し、最大の確率(最大尤度)を示すクラスに分類する手法である。このため、最尤法では分類の母集団である各クラスの確率密度関数を知る必要がある。この確率密度関数として、多次元正規分布を仮定し、各クラスのトレーニング・フィールドから得たデータの平均と分散・共分散を用いて、その多次元正規分布を最尤推定することが行われる⁷⁾。本研究でも、この方法を採用した。最尤法では、選んだトレーニング・フィールドの画素のデータ値(DN)の統計量から生成した確率密度関数の重なりが少なく、データ値(0~255)の広い範囲わたっていることが望ましい。本研究で用いた9箇所のトレーニング・フィールドのデータに対する度数分布と確率密度関数を、各バンドについて図-6に示す。これによると、各バンドの確率密度関数は重なりが小さく、ほぼデータの全領域にわたっている。このため、今回のトレーニング・フィールドの選択は適当であると考えられる。

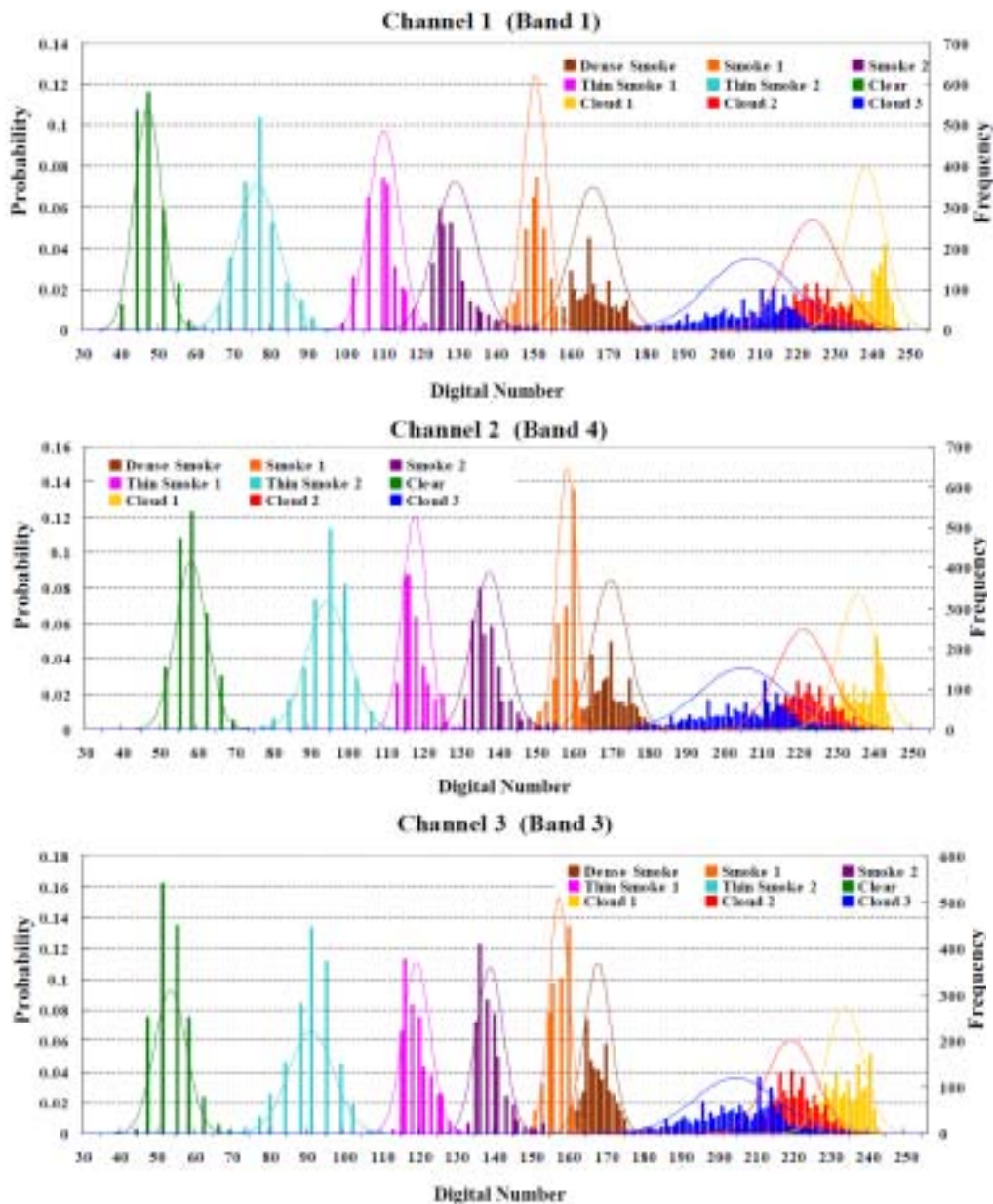


図-6 各トレーニング・フィールドにおけるDNの頻度分布と対応する確率密度関数

(2) ガルカナ氷河流域上空の天候と熱収支との関係

前記の MODIS 画像によるタナナ川流域上空の天候の判別結果を利用して、MODIS 画像の撮影日時におけるガルカナ氷河流域上空の天候を推定した。ここでは、天候として「晴れ (Clear)」, 「曇り (Overcast)」, 「濃い煙霧 (Dense Smoke)」, 「煙霧 (Smoke)」, 「雲と煙霧の混在 (Cloud and Smoke)」の 5 グループに大別した。他方、分類した衛星画像の撮影日におけるガルカナ氷河の熱収支を、WS 地点での気象データから計算した。熱収支の計算法を以下に示す。

氷河表面の熱収支を算出する場合、熱収支式の構成要素として、短波放射(日射)収支と長波放射(大気放射, 地球放射)収支, 乱流伝達熱である顕熱フラックスと潜熱フラックス, 雨による熱伝達である降雨伝達熱を考える必要がある。この中で、降雨伝達熱はガルカナ氷河のような亜寒帯の氷河では夏季の気温がそれほど高くないため、他の構成要素と比較して無視できるとした^{8), 9)}。また、氷河表面に入力する熱フラックスのうち、融解に利用されず氷河内部へと下向きに伝達する熱も存在すると考えられるが、これも小さいとみて無視した⁹⁾。結果として、本研究で使用する熱収支式は次のように

なる：

$$Q_M = R_d + H + lE \quad (1)$$

ここで、融解に使われる熱量 Q_M 、正味の入力放射量 R_d 、顕熱フラックス H 、潜熱フラックス lE (l は蒸発の潜熱)で、単位は全て W/m^2 である。式(1)の R_d は、全天日射量 I とその反射率 (アルベド、反射能) α 、大気からの長波放射 L_a 、地表面(氷河表面)からの地球放射 L_e から成り、

$$R_d = I^\downarrow(1-\alpha) + L_a^\downarrow - L_e^\uparrow \quad (2)$$

ここで、積雪や氷は黒体とみなせるので、地球放射 L_e は地表面温度 T_s (K) とステファン - ボルツマン定数 $\sigma(=5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ を用いて σT_s^4 で表すことができる。式(2)において、 I には観測値を用い、アルベド α は、2005年6月および9月の氷河末端における測定値の平均値から、氷と雪について、それぞれ $\alpha=0.15, 0.6$ とした。大気放射 (L_a) については、ガルカナ氷河では測定が行われていないので、近藤¹⁰⁾の経験式を用いて推定した。また、氷河表面の温度 T_s は、融解期においては常に 0°C として計算した。

(1)式の顕熱フラックス H と潜熱フラックス lE については、次のバルク式から求めた：

$$H = \rho_a c_p K_H u (T - T_s) \quad (3)$$

$$lE = l K_E u (e - e_s) \quad (4)$$

ここで、空気の密度 ρ_a (kg/m^3)、定圧比熱 c_p ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)、顕熱のバルク輸送係数 K_H 、地表面温度 T_s 、地表からの高さ z (m)での気温 T (K または $^\circ\text{C}$)と風速 u (m/s)、水の蒸発潜熱 l 、雪面温度における飽和水蒸気圧 e_s (hPa)、高さ z (m)での水蒸気圧 e (hPa)、および水蒸気のバルク輸送係数 K_E である。本研究では、Paterson⁸⁾により、顕熱のバルク輸送係数 K_H は雪面と裸氷面に対し、それぞれ 1.5×10^{-3} 、 2.0×10^{-3} とした。空気密度 ρ_a は、ガルカナ氷河から南約 50 km にあるパクソン空港 (Paxson) の気圧に高度補正をかけた値から推定し、 c_p は 1010 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$) を用いた。風速 u および気温 T は、WS 地点における観測値を用いた。また、氷河表面の温度 T_s は、融解期においては常に 0°C と仮定した。さらに、 e_s は融雪時には 0°C における飽和水蒸気圧として計算し、 e は WS 地近傍の日平均相対湿度と日平均気温から計算した。また、中立大気を考え、 $K_E = K_H$ として計算した¹⁰⁾。

4. 結果と考察

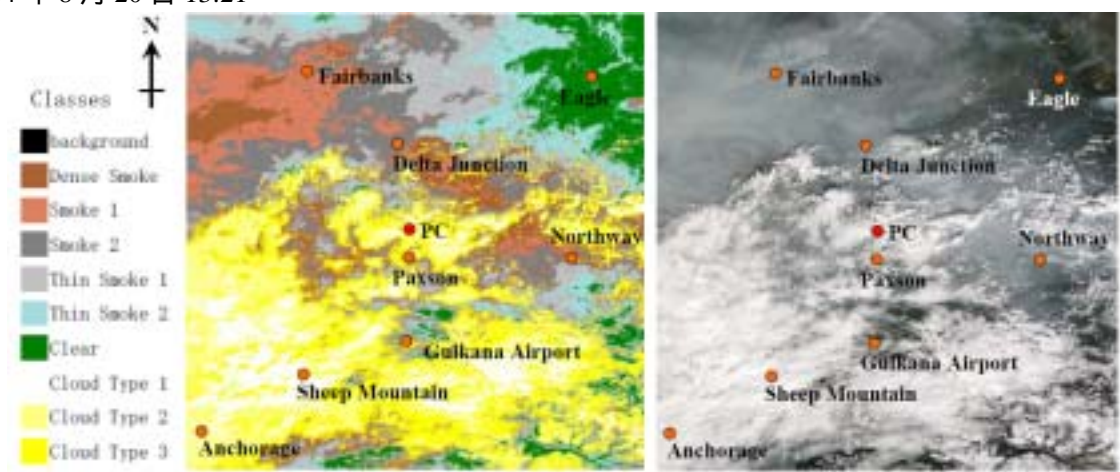
(1) 衛星画像を用いたタナナ川流域上空の天候の判別

3-(2)の手順 (iii) において、トレーニング・フィールドとして指定した「2004年8月20日13時21分のMODIS画像」を最尤法で分類した結果(図-7a)とMETARデータ(表-3)との比較から、両者はほぼ一致しており、元の画像と比較しても明らかな誤分類は見られない。このことから、分類に用いたトレーニング・フィールドは適当なものであったといえる。

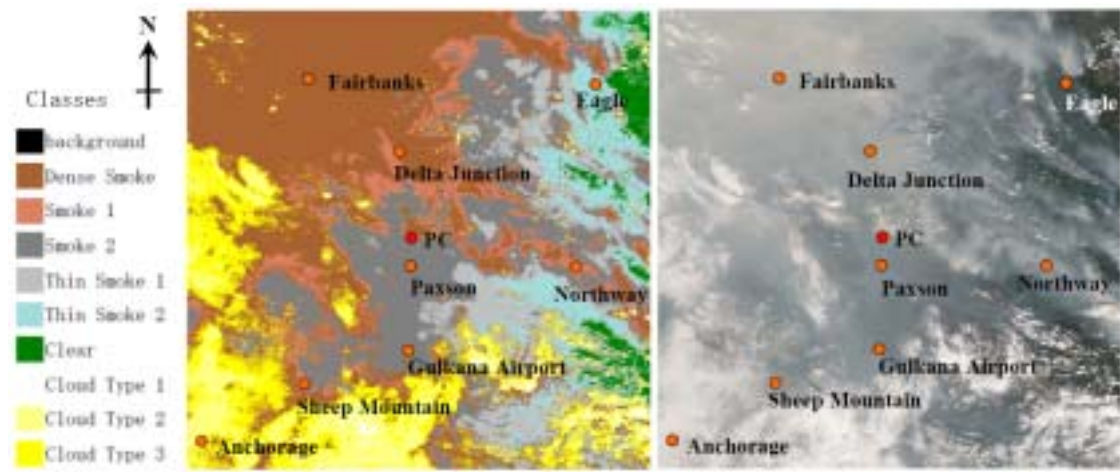
このトレーニング・フィールドを用いて、他の9枚の画像を分類したところ、図-7b~7jの結果が得られた。この中で、薄い煙霧、あるいは中程度の濃さの煙霧が支配的であった図-7f、図-7g、図-7h、図-7jをみると、図中の煙霧の分布と表-3の対応するMETARの天候および視程の低下がほぼ一致している。しかし、同画像中の雲の判別において、図-7g、図-7hのようにGulkana空港東側に位置する氷河域を雲と分類する誤分類が見られる。これは、可視光領域データのみでは、雪氷と雲の判別が

かないことを意味する。この場合、たとえば、近赤外画像など他の波長領域の適用が考えられる。また、図-7hにおいては、PC 地点付近の氷河域を薄い煙霧が覆っている状態が見られるが、煙霧の直下に氷河域があるような状態では、濃い煙霧に誤分類されている。このことから、地表の光学的性質が大きく変化する場所では、本研究の手法による薄い煙霧の判別は困難であると考えられる。

(a) 2004 年 8 月 20 日 13:21



(b) 2004 年 7 月 2 日 12:39



(c) 2004 年 8 月 11 日 13:28

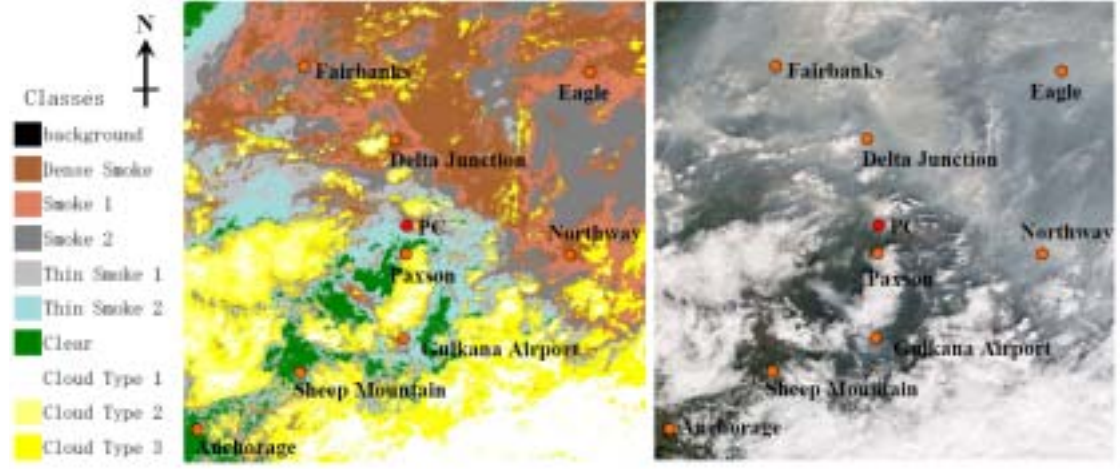
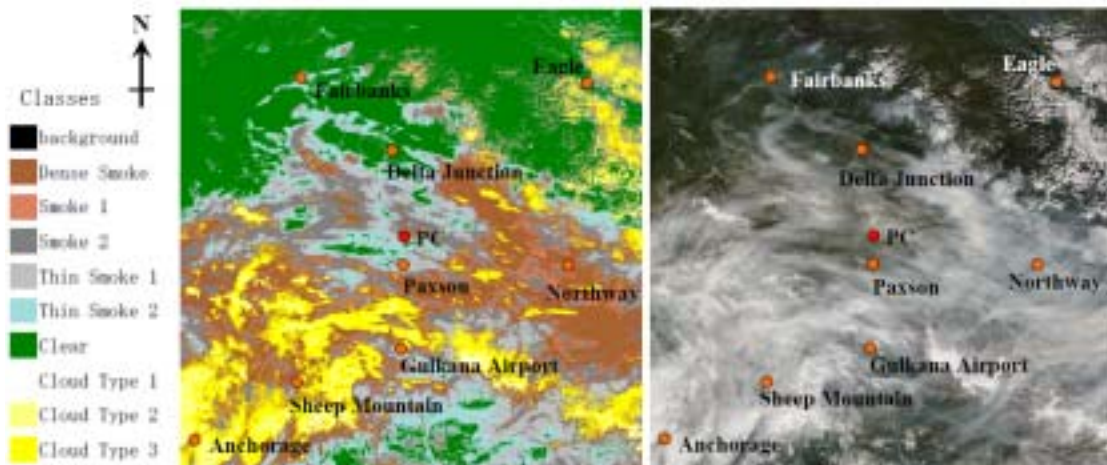
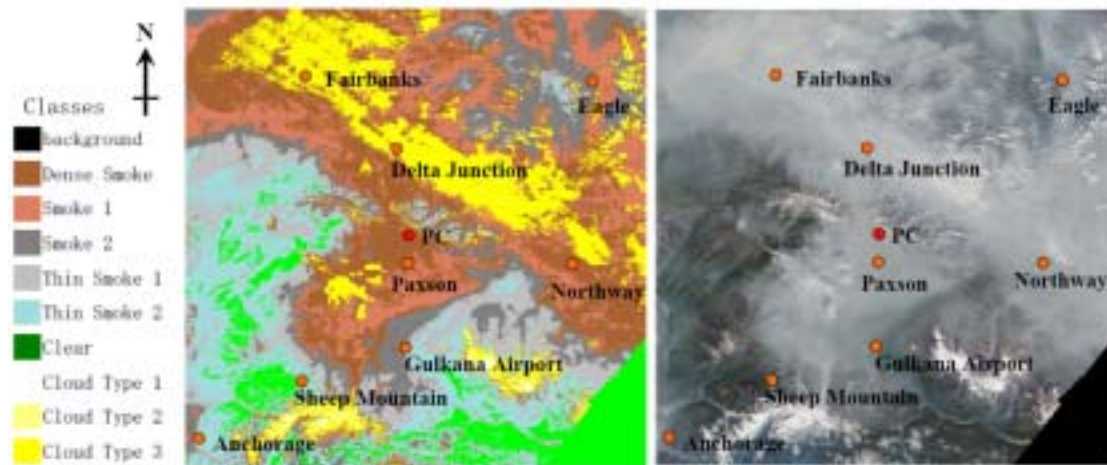


図-7(a) ~ (c) 最尤法による分類結果 (左) と元画像 (右) との比較

(d) 2004年8月15日 13:03



(e) 2004年8月17日 14:29



(f) 2005年8月8日 14:04

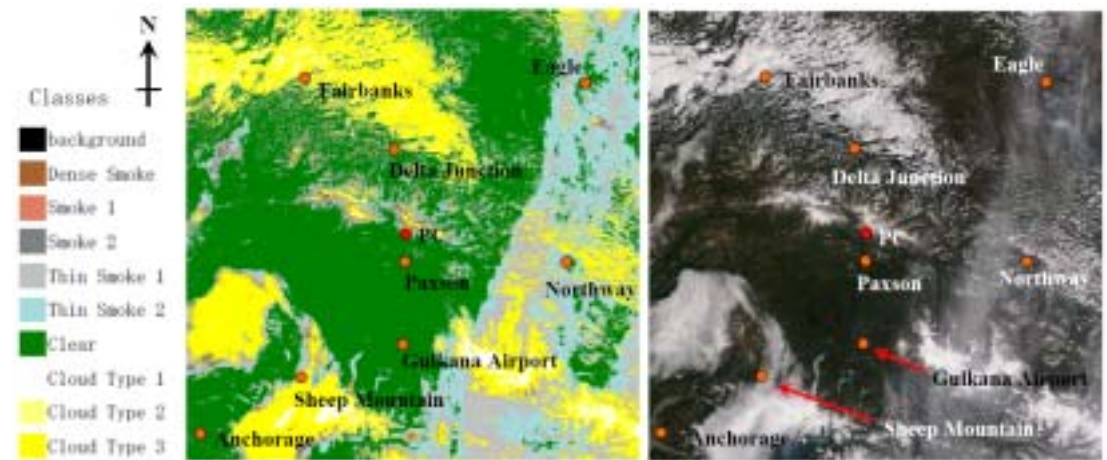
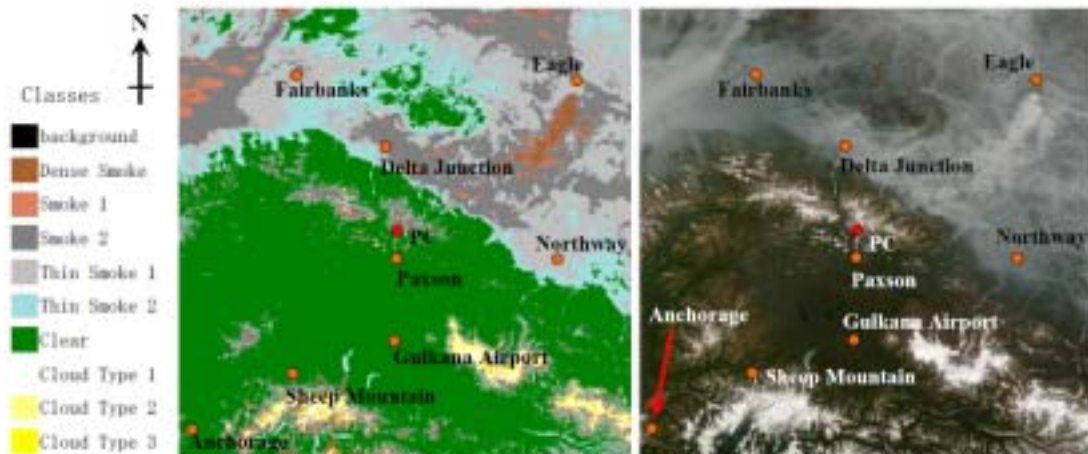
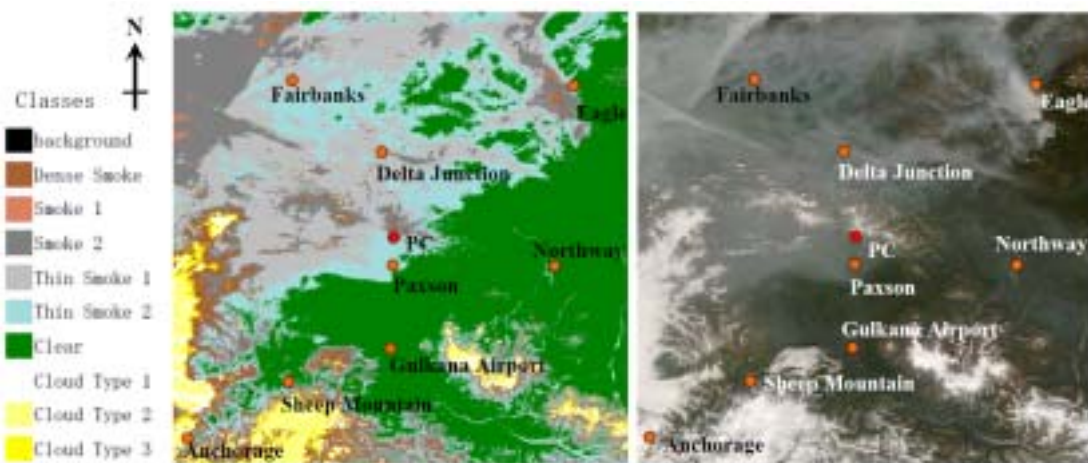


図-7(d) ~ (f) 最尤法による分類結果(左)と元画像(右)との比較

(g) 2005年8月13日 12:45



(h) 2005年8月15日 12:32



(i) 2005年8月17日 12:20

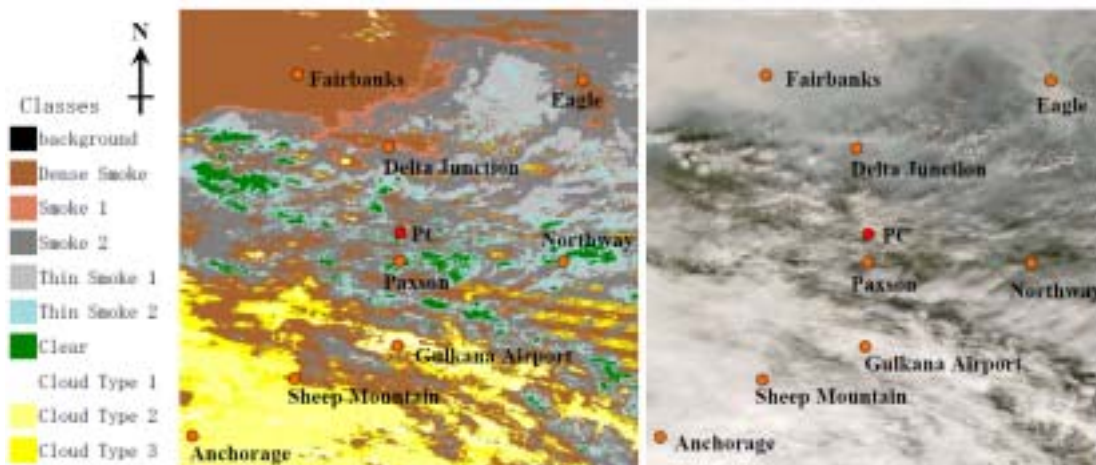


図-7(g) ~ (i) 最尤法による分類結果 (左) と元画像 (右) との比較

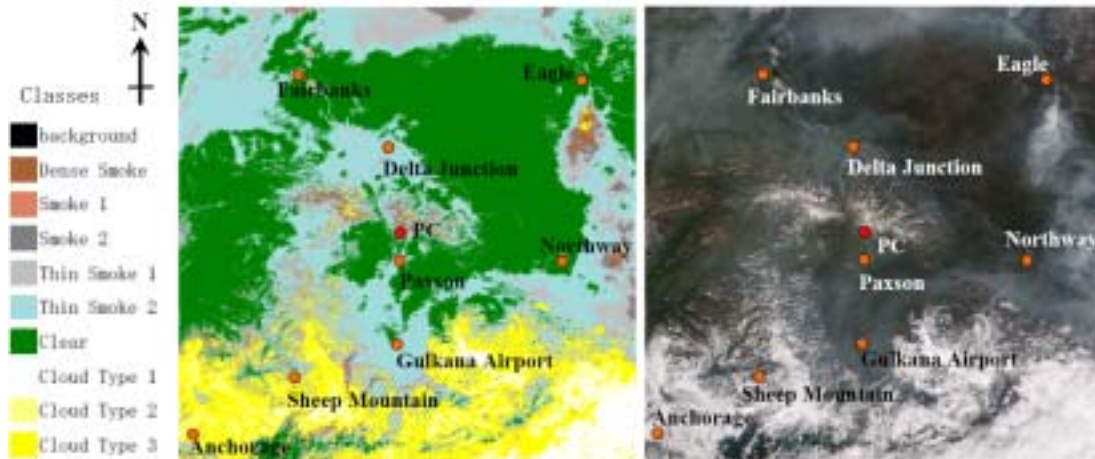


図-7(j) 最尤法による分類結果（左）と元画像（右）との比較

図-7 で非常に濃い煙霧が広い範囲で確認された(b), (c), (i) においては, METAR との比較ではある程度の一致が見られた. これらの画像において, 雲と煙霧を判別する際に問題となるのが, 雲と煙霧の相対的な高度である. 図-7c の元画像を見ると, Delta Junction 付近において煙霧が雲よりもやや低い高度に存在するように見え, 実際, 分類後の図でも煙霧と雲がはっきりと区別されている. しかし, 図-7a と図-7b の元画像では, 煙霧が雲よりも高い高度にあるように見え, 分類結果も曖昧になっている. また, 図-7e においては, Fairbanks, Delta Junction 上空の広範囲にわたって, 煙霧が雲と誤分類されている. この原因としては, トレーニング・フィールドを指定した図-7a の画像の煙霧が, 図-7e の煙霧と比較して薄かった可能性, および煙霧の粒子が時間経過とともに変性し, 煙霧の単一散乱アルベドが大きくなって, 煙霧が雲の性質に近づいた可能性などが考えられる¹¹⁾.

雲と煙霧がほぼ同じ高度に存在する場合は, より判別が困難となる. 図-7d と図-7h の元画像を見ると, 雲と煙霧がほぼ同じ高度で混在しているように見える. この場合, 図-7h と表-3 とを比較すると, Sheep Mountain から Gulkana Airport にかけての分類と Paxson や Northway 付近の分類はほぼ変わらないが, METAR の天候と視程はそれぞれの場所で異なっている. このことから, 雲と煙霧がほぼ同じ高度に存在する場合の判別は困難といえる.

以上の結果から, 氷河上空の状態を MODIS 可視画像を用いて判別する場合, 煙霧が存在しないときの雲と地表の判別は, 氷河域以外では容易であり, 氷河域の位置も既知であるため判別には支障はない. 薄い煙霧が存在する場合は, 衛星画像から判別でき, 氷河域を覆う煙霧の濃度は, 煙霧が拡散しやすく一様に広がるという性質を考慮すれば, 周囲の判別結果から推測することは可能である. 非常に濃い煙霧が流域を覆う場合は, 煙霧の分類は容易であるが, 雲と煙霧の相対的な高度には注意する必要がある.

以上を踏まえて, ガルカナ氷河上空の天候を MODIS 画像から推測し, 気象データから計算した熱収支と比較検討する.

(2) ガルカナ氷河流域上空の天候と熱収支

図-8は、図-7の(a), (c) ~ (j)の衛星画像と最尤法による分類結果の画像をガルカナ氷河流域のPC地点を中心に拡大し、再度分類した結果である。ここでは、PC地点上空の天候について、「晴れ (Clear)」(図-8a)、「曇り(Overcast)」(図-8b)、「濃い煙霧 (Dense Smoke)」(図-8c)、「煙霧 (Smoke)」(図-8d)、「雲と煙霧の混在 (Cloud and Smoke)」(図-8e)の5種類にグループ分けした。

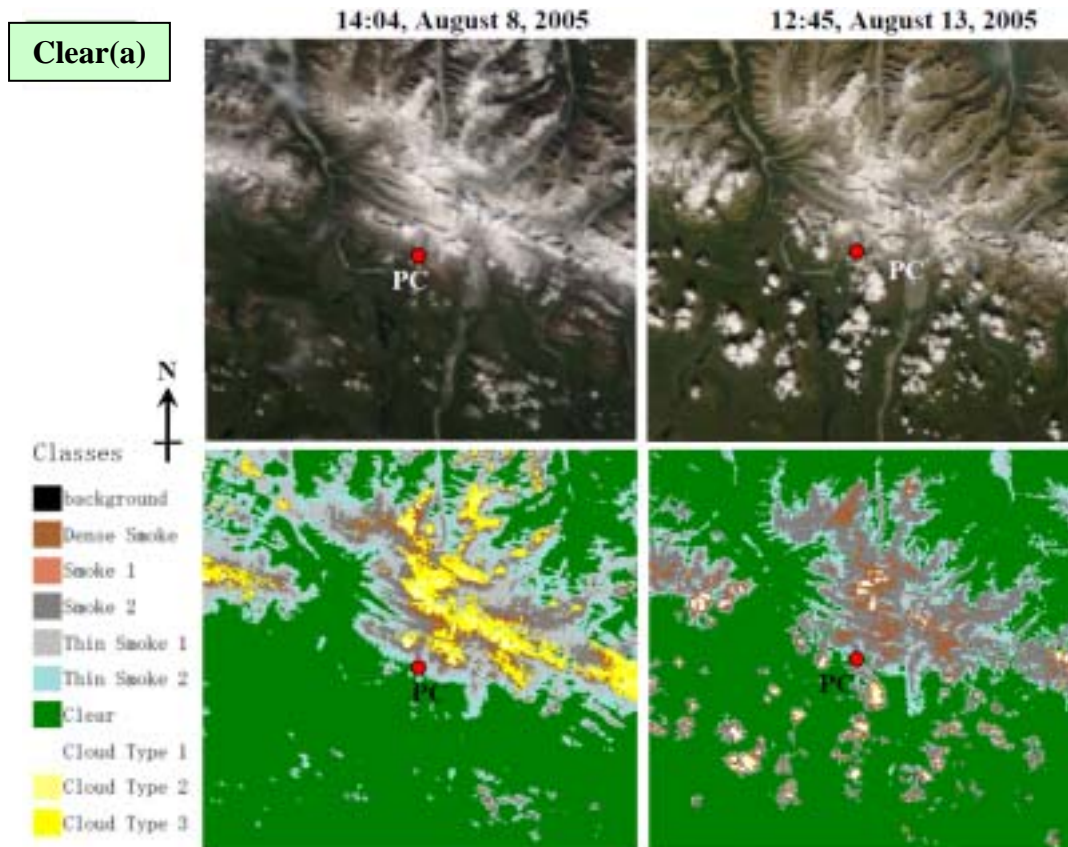


図-8(a) ガルカナ氷河流域のPC地点を中心とした元画像(上)と分類結果(下)天候が5つのグループ、(a)「晴れ(clear)」, (b)「曇り(overcast)」, (c)「濃い煙霧(dense smoke)」, (d)「煙霧(smoke)」, (e)「雲と煙霧(cloud and smoke)」に大別されている

このグループ分けの際には、図-8a の分類結果に見られるように、氷河地帯の氷河に覆われていない地表を「薄い煙霧」と誤分類する問題があった。この原因は、本研究では可視光に限定して使用しているため、バンド間の分光特性よりも主に DN 値の大きさ(反射強度)に依存しているためと考えられる。この氷河域の非氷河部分の影響は、図-8d のように「薄い煙霧」と「濃い煙霧」の判別の際にも認められ、非氷河部分の上空の煙霧は、周囲の煙霧と比較して濃度が高いと判別される傾向がある。しかし、煙霧の高い拡散性を考えると氷河域近傍の煙霧の濃度はほぼ一定と考えられ、氷河域以外では平均的な土地被覆である「植生」の画素(例えば、図-8の画像中の南西部分)の分類結果を用いて、氷河域を覆う煙霧の濃度をある程度推定することができる。図-8では、この方法を用いてガルカナ氷河上空の煙霧の濃度を推定し、グループ分けしている。

図-9, 図-10は、2004年と2005年のガルカナ氷河 WS 地点における、熱収支各要素の日平均値と気象データ(日雨量, 日平均気温, 日平均風速)の時間変化を示す。図では、熱収支において、氷河が吸収する熱量を正, 放出する熱を負としている。各熱収支要素の大きさをみると、期間全体として正

味放射が最も大きく，2004年，2005年の観測期間平均でそれぞれ 107.6 W/m^2 ， 93 W/m^2 である．次に大きいのが顕熱フラックスで，それぞれ 89.7 W/m^2 ， 65.3 W/m^2 である．

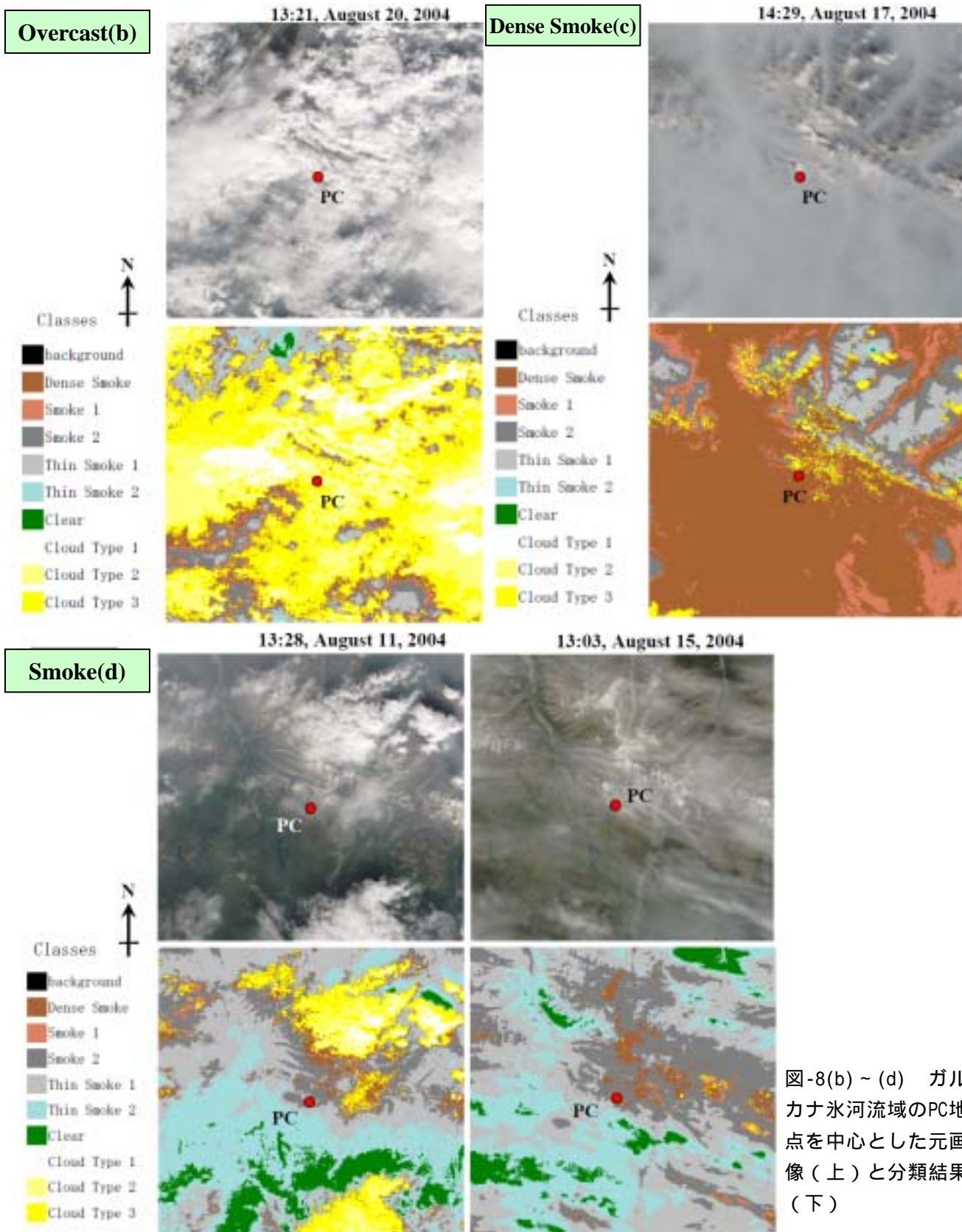
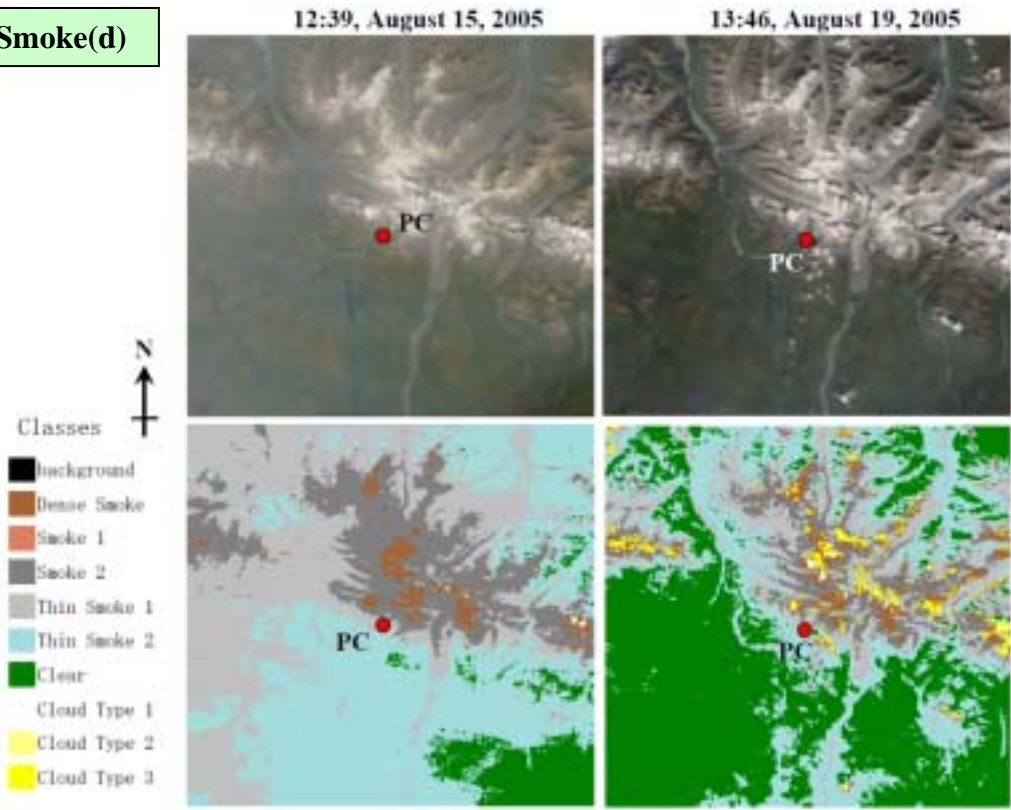


図-8(b)～(d) ガルカナ氷河流域のPC地点を中心とした元画像（上）と分類結果（下）

Smoke(d)



Cloud and Smoke(e)

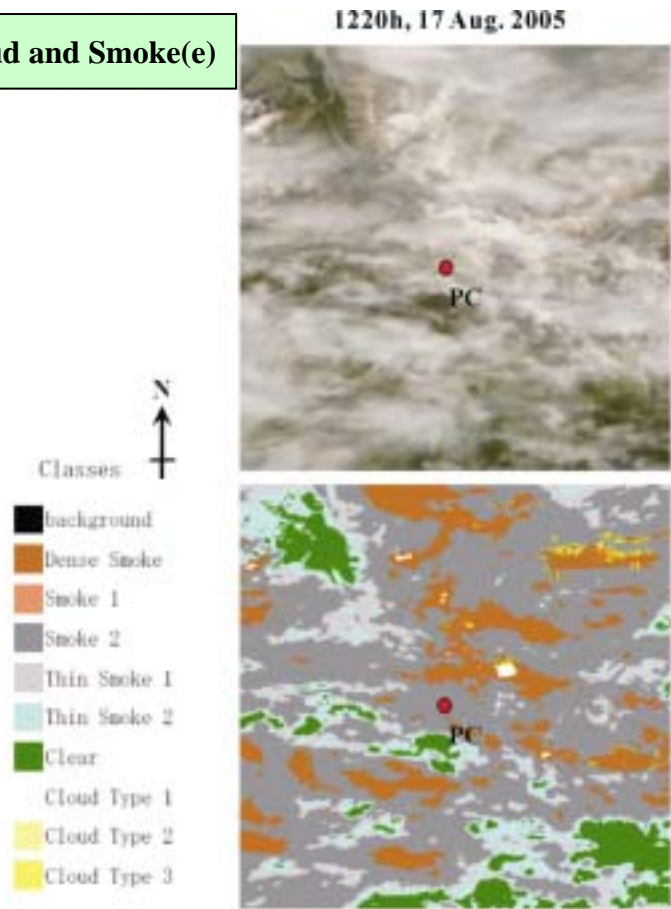


図-8(d) ~ (e) ガルカナ氷河流域のPC地点を中心とした元画像（上）と分類結果（下）

しかし、短期的に見ると、2004年、2005年の8月中旬の高温かつ風速が大きい時期には、顕熱フラックスが正味放射より大きい値をとる日もみられる。また、正味放射と顕熱フラックスは、降雨時には著しく低い値を示す傾向がある。これに対し、潜熱フラックスは、2004年、2005年の観測期間の平均値がそれぞれ 39.8 W/m^2 、 19.8 W/m^2 と他の成分と比較して小さく、降雨の有無に大きな影響を受けずに変動している。また、多く期間で潜熱フラックスは正の値をとっており、これは氷河表面への「凝結」による潜熱の発生が起きていることを意味する。

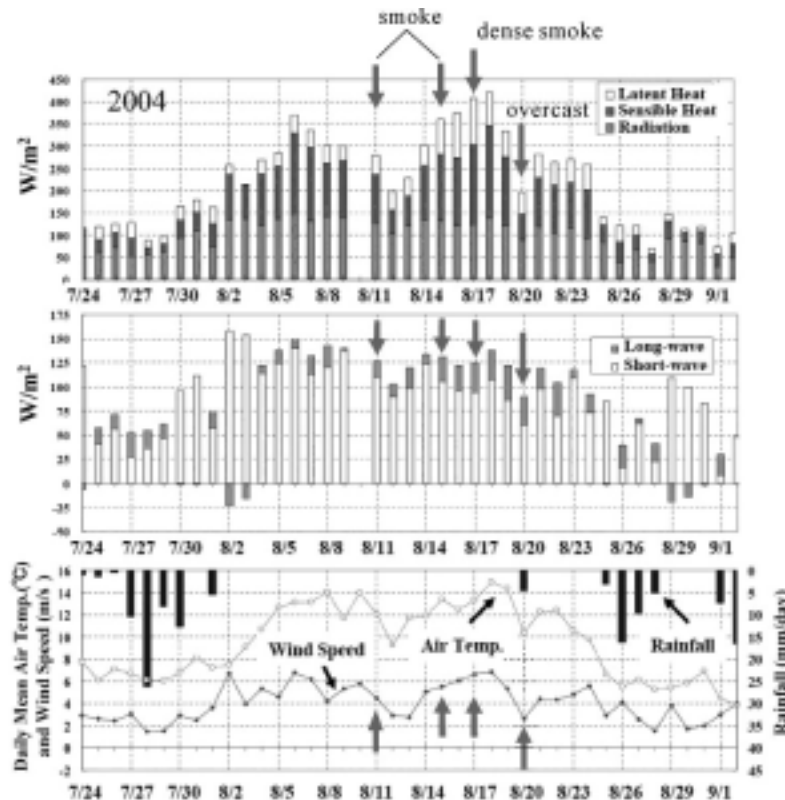


図-9 2004年におけるガルカナ氷河の日平均熱収支と気象の時間変化。
太い矢印は、表-1のMODIS画像に対応する日付とPC地点上空の天候を示す。

図-9、図-10の太い矢印は、図-8の「晴れ(Clear)」、「曇り(Overcast)」、「濃い煙霧(Dense Smoke)」、「煙霧(Smoke)」、「雲と煙霧の混在(Clouds and Smoke)」の分類結果の画像の撮影日に対応している。

図-8aで示すように、「晴れ(Clear)」と分類された2005年8月8日と2005年8月13日の熱収支として、正味放射量はそれぞれ 139 W/m^2 、 157 W/m^2 (平均 148 W/m^2) であり、このうち、短波放射量がそれぞれ 142 W/m^2 、 135 W/m^2 (平均 139 W/m^2) で正味放射の主要な成分であることがわかる。また、長波放射量はそれぞれ -3.5 W/m^2 、 21.5 W/m^2 (平均 9.0 W/m^2) で両者に比較的大きな差が生じた。顕熱フラックスについては、それぞれ 84 W/m^2 、 215 W/m^2 、潜熱フラックスはそれぞれ 31 W/m^2 、 79 W/m^2 と8月13日が8月8日より約2.5倍大きい。この原因は、画像撮影日の日平均気温がそれぞれ 10°C 、 15°C 、風速がそれぞれ 4 m/s 、 7 m/s で、気温と風速の差による。

図-8bの「曇り(Overcast)」と分類された2004年8月20日では、正味放射量が 90 W/m^2 で「晴れ」に比べ約39%小さく、そのうち短波放射成分 61 W/m^2 、長波放射成分 29 W/m^2 で、正味放射に占める長波放射の割合が33%と非常に高い。このことから、雲による日射の阻害効果と長波放射の射出効果が大きいことがわかる。このときの顕熱、潜熱の各フラックスはそれぞれ 56 W/m^2 、 50 W/m^2 で、顕

熱フラックスが非常に小さい。これは、2004年8月20日には降雨があり、この降雨に伴って気温が10°Cまで低下したこと、さらに、風速が2.7 m/sと小さかったことに因る。

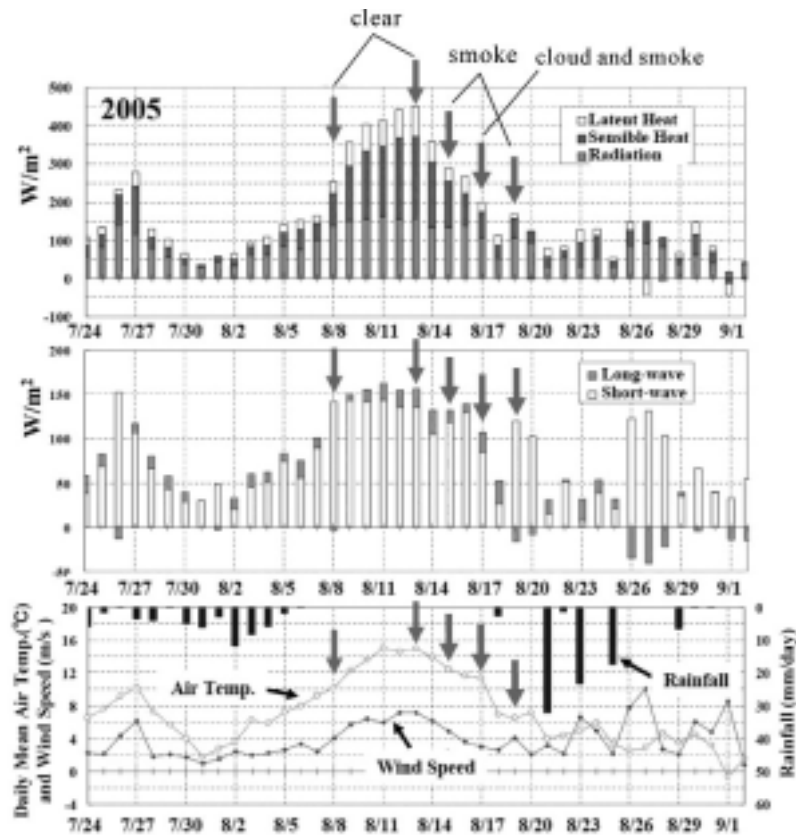


図-10 2005年におけるガルカナ氷河の日平均熱収支と気象の時間変化．
太い矢印は、表-1のMODIS画像に対応する日付とPC地点上空の天候を示す。

「濃い煙霧 (Dense Smoke)」(図-8c)と分類された2004年8月17日では、正味放射量 124 W/m^2 、短波放射成分 94 W/m^2 、長波放射成分 30 W/m^2 であった。一方、このときの顕熱、潜熱フラックスはそれぞれ 179 W/m^2 、 103 W/m^2 で正味放射と比較して大きな値をとった。これは、気温と風速が、それぞれ 13°C 、 6.64 m/s で、高温かつ強風の気象であったことが原因である。また、「煙霧 (Smoke)」(図8-d)と分類された2004年8月11日、2004年8月15日、2005年8月15日、2005年8月19日の正味放射量は、それぞれ 126 W/m^2 、 131 W/m^2 、 133 W/m^2 、 105 W/m^2 (平均 124 W/m^2)、短波放射量はそれぞれ 110 W/m^2 、 106 W/m^2 、 119 W/m^2 、 121 W/m^2 (平均 114 W/m^2)、長波放射量はそれぞれ 16 W/m^2 、 25 W/m^2 、 14 W/m^2 、 -16 W/m^2 (平均 10 W/m^2) である。以上から、2005年8月19日の長波放射量が唯一負の値をとり、その理由として、この日の煙霧は非常に薄く状況としては「晴れ」に近かったことが挙げられる。一方、顕熱フラックスはそれぞれ 109 W/m^2 、 151 W/m^2 、 122 W/m^2 、 53 W/m^2 、潜熱フラックスはそれぞれ 43 W/m^2 、 77 W/m^2 、 33 W/m^2 、 11 W/m^2 であった。以上から「煙霧 (Smoke)」グループ内では、正味放射量は $105 \sim 133 \text{ W/m}^2$ で範囲が 30 W/m^2 未満であるのに対し、顕熱フラックスと潜熱フラックスはそれぞれ $53 \sim 151 \text{ W/m}^2$ 、 $11 \sim 77 \text{ W/m}^2$ で変動範囲が大きかった。さらに、「雲と煙霧の混在 (Cloud and Smoke)」(図-8e)の2005年8月17日では、正味放射量 107 W/m^2 で、そのうち短波放射成分 85 W/m^2 、長波放射成分 22 W/m^2 であった。また、顕熱フラックス 68 W/m^2 、潜熱フラックス 24 W/m^2 であった。これから、「煙霧 (Smoke)」に比べ短波放射量が減少し、顕熱フラックス

ス・潜熱フラックスは「煙霧 (Smoke)」の下限値 (それぞれ, 53 W/m^2 , 11 W/m^2) に近かった。これは、雲が存在する場合の天候は、日射の遮断効果ばかりでなく、気温の低下や凝結の低下を伴う場合があることを示す。

以上から、「曇り」は「晴れ」グループの平均と比較して、短波放射で 78 W/m^2 、正味放射で 58 W/m^2 の減少がみられた。同様に、「濃い煙霧」の場合は、短波放射で 45 W/m^2 、正味放射で 24 W/m^2 の減少がみられた。「煙霧」グループの場合は、「晴れ」グループと比較して短波放射で平均 25 W/m^2 、正味放射で平均 24 W/m^2 の減少があった。「雲と煙霧の混在」と「晴れ」グループ平均との比較では、短波放射で 54 W/m^2 、正味放射で 41 W/m^2 の減少を示した。長波放射成分は、日射の障害が大きい「曇り」や「濃い煙霧」のグループで 30 W/m^2 程度の比較的大きな値をとるため、正味放射を考えると、日射の障害による短波放射量の減少をある程度緩和する作用をもつ。結果として、雲や煙霧による正味放射の減少は、観測される日射の減少ほど大きなものではないといえる。

顕熱フラックスは、式(4)にあるように主に気温と風速に依存して変動するので、「曇り」(図-8b)のように降雨が観測され、かつ気温が非常に低くなる場合にのみ、短波放射量と同期した大きな減少が見られる。このことは、図-9、図-10 において、降雨時に正味放射や顕熱フラックスが激減していることからわかる。「濃い煙霧」、「煙霧」、「雲と煙霧の混在」では、短波放射の減少に対応するような気温の減少は見られない。このため、煙霧によって直接引き起こされる顕熱フラックスの減少はないものと判断される。潜熱フラックスは、式(5)から主に風速と水蒸気圧に依存して変動するので、顕熱フラックスと同様、短波放射の減少に対応した変動を示さない。また、図-9、図-10 を見ると降雨の際にも潜熱フラックスに著しい変動は見られない。さらに、「晴れ」グループで $30 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 、「煙霧」グループで $10 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 程度と、同じグループ内で大きな変動を示している。このため、潜熱フラックスは、本研究で設定したグループに関係なく変動すると思われる。図-8 の画像で、潜熱フラックスの最大値は 2004 年 8 月 17 日の 103 W/m^2 、最小値は 2005 年 8 月 19 日の 11 W/m^2 で、2 日間の差は 92 W/m^2 であった。

このことから、潜熱フラックスは短期間で比較的大きな変動が起こりうる。

熱収支全体で考えると、顕熱フラックスと潜熱フラックスの変動は、正味放射の減少量の絶対値と比較して大きい。このことから、ガルカナ氷河の夏季の融解は、日射と風速、水蒸気圧の変動にともなう顕熱フラックスと潜熱フラックスの変動の影響を強く受け、雲や煙霧による日射の障害による融解量の減少効果は相対的に小さいことがわかる。

5. まとめと今後の課題

本研究では 2004 年と 2005 年の 6 月~8 月の期間、ガルカナ氷河流域を含むタナナ川流域において、10 枚の Terra/MODIS 可視画像を用いてタナナ川流域の上空の状態 (煙霧、雲、晴れ) の分類を行った。その分類結果は、グラウンド・トゥルースとして用いた流域内の空港での定時飛行場実況気象通報式 (METAR) による天候・視程データとほぼ一致しており、よい分類結果が得られた。さらに、ガルカナ氷河流域周辺に画像分類の範囲を絞り、画素の分類結果から、衛星画像を「晴れ (Clear)」、「曇り (Overcast)」、「濃い煙霧 (Dense Smoke)」、「煙霧 (Smoke)」、「雲と煙霧の混在 (Cloud and Smoke)」の 5 つにグループに分類した。この分類結果と画像撮影日に行ったガルカナ氷河における熱収支の結果とを比較したところ、正味放射については「晴れ」グループで平均 148 W/m^2 と大きく、これに対し日射の障害による正味放射の減少は、「曇り」の場合で 58 W/m^2 、「雲と煙霧の混在」の場合で 41 W/m^2 、

「濃い煙霧」の場合で 24 W/m^2 , 「煙霧」の場合で平均 24 W/m^2 であった。このことから、正味放射の減少には、煙霧よりも雲のほうが強く働くことがわかった。また、顕熱フラックスについては、基本的には5つのグループに左右されず、気温と風速に応じて、最大 215 W/m^2 , 最小で 53 W/m^2 と非常に大きな幅の変動を示すことがわかった。ただし、降雨があるような場合は、気温が急激に低下し、結果として、顕熱フラックスも激減する。潜熱フラックスも、設定したグループに左右されるような変動を示さず、最大 103 W/m^2 , 最小 11 W/m^2 と比較的大きな変動幅を示した。以上より、ガルカナ氷河において、最も融解量に影響するのは、顕熱フラックスが正味放射と同時に激減する「降雨時の曇り」の場合で、このとき融解量は急激に減少する。「濃い煙霧」「雲と煙霧の混在」「煙霧」の3グループでは、日射の阻害による正味放射の減少は見られるが、顕熱・潜熱の変動量と比較して小さく、「曇り」のように気温を減少させる効果も見られない。このため、結果としては融解量の減少効果は小さくなる。このことから、氷河が煙霧に覆われた場合でも、広域的な大気の循環による顕熱・潜熱フラックスの影響のほうが、融解量変化に大きく寄与することが示唆された。

今回は衛星可視画像の解析から気象状況を判断したため、サンプル数や分類結果に限界があった。このようなサンプル不足を補うには、他の波長領域、たとえば近赤外領域の画像解析や Brazel *et al.*¹⁾, Hannah *et al.*²⁾などによる気象データの主成分分析などの統計解析を行う必要がある。また、今回、熱収支を計算したのは氷河上1点のみであったが、氷河融解とその流出、および気象条件との関係を示すには、熱収支の計算を氷河全体に拡張し、天候条件や煙霧イベントによる流量への寄与を見積もる必要がある。

6. 謝辞

現地観測の際には、アラスカ大学国際北極圏研究センター(IARC)の所長・赤祖父俊一博士、事務職員 Yoriko Freed 氏、現北海道大学創成科学共同研究機構・田中教幸博士に大変お世話になった。また、USGS の Rod March 氏には、貴重なデータを提供していただいた。さらに、IARC の Reginald Muskett 氏には、本研究に関して貴重なご助言を頂いた。皆様に深く感謝いたします。さらに、(財)北海道河川防災研究センターの所長・星 清博士には、アラスカ研究に対し、これまで貴重なご助言を賜った。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Brazel, A. J., Chambers, F. B. and Kalkstein, L. S.: Summer energy balance on West Gulkana Glacier, Alaska, and linkages to a temporal synoptic index. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplement Band*, Vol. 86, pp.15-34, 1992.
- 2) Hannah, D. M., Gurnell, A. M. and McGregor, G. R.: Spatio-temporal variation in microclimate, the surface energy balance and ablation over a cirque glacier. *International Journal of Climatology*, Vol. 20, pp.733-758, 2000.
- 3) Kido, D., Chikita, K. A. and Hirayama, K.: Subglacial drainage system changes of the Gulkana Glacier Alaska: discharge and sediment load observation and modeling. *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 399-410, 2007.
- 4) March, R.S.: Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1995 balance year. *US Geological Survey Water Resources Investigations Report* 00-4074.33p.,

2000.

- 5) March, R.S.: Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1996 balance year. *US Geological Survey Water Resources Investigations Report 03-4095*.33p., 2003
- 6) March, R.S. and Trabant, D.C.: Mass balance, meteorological, ice motion, surface altitude, and runoff data at Gulkana Glacier, Alaska, 1992 balance year. *US Geological Survey Water Resources Investigations Report 95-4277*.32p., 1996.
- 7) 日本リモートセンシング研究会：*図解リモートセンシング*。日本測量協会, 1992 .
- 8) 小野延雄・石川信敬・新井 正・若土正暁・青田昌秋：*雪氷水文現象*。基礎雪氷学講座 VI, 古今書院, 196pp., 1994
- 9) Paterson, W.S.B.: *The physics of glaciers*. 3rd ed., Pergamon, Oxford, 481pp., 1994.
- 10) 近藤純正：*水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支-*。朝倉書店 , 350pp., 1994.
- 11) Vant-Hull, B., Li, Z., Taubman, B. F., Levy, R., Marufu, L., Chang, F., Doddridge, B. G. and Dickerson, R.R.: Smoke over haze: Comparative analysis of satellite, surface radiometer, and airborne in situ measurements of aerosol optical properties and radiative forcing over the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D10S21, doi:10.1029/2004JD004518, 2005.