

カタバ風帯に見られるダークストリーム

遠藤辰雄¹・山内 恭²・石川貴之³・掛川英男⁴・川口貞男²Dark Streams Observed on NOAA Satellite Images
over the Katabatic Wind Zone, AntarcticaTatsuo ENDOH¹, Takashi YAMANOUCHI², Takayuki ISHIKAWA³,
Hideo KAKEGAWA⁴ and Sadao KAWAGUCHI²

Abstract: In the katabatic wind zone in Antarctica, some characteristic streams are frequently observed in NOAA satellite images especially in the winter season. We call these “dark streams” in this work. These dark streams are observed to move and change location and their width slightly in a series of successive scenes of NOAA images; however, distributions seem to be restricted to areas of some specific topographies. We measured air temperature and wind speed at one point by means of one of our AWS (Automated Weather Station) system. Air temperature was not particularly low and remained steady, and wind speed was constantly high, 13 m/s or more. TBB analyzed from NOAA AVHRR may provide surface temperatures which are thought to be proportional to the air temperature which is equalized to emittance temperature of the blowing and drifting snow particles. On the basis of these data, air temperature inside the stream was 15°C or higher than that outside. Along the central line of the stream, air temperature was analyzed to vary with height at the dry adiabatic lapse rate. From these observational results it may be considered that these dark stream images are composed of a warmer air stream compared with that of the outside and a strongly forced downward current along the slope.

要旨: 南極のカタバ風の地域における NOAA の衛星画像で、冬季間にしばしば特徴的な流れの様子が観測される。ここでは、それをダークストリームとよぶことにする。このダークストリームの縞模様は一連の NOAA 衛星画像の中で、動きがあり、その位置と幅が変化するのが認められた。しかし動きはするが、その範囲はある特定の地形の地域に限られて見られる特徴がある。幸いに、この領域に設置した無人気象観測点の気温と風速の記録が得られた。気温はあまり低くないが一定の値を保っており、風は一定して 13 m/s ほどで強いのが特

¹ 北海道大学低温科学研究所. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

² 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

³ 東芝. Toshiba, 1385, Shimo-isigami, Ootawara 224.

⁴ 須坂保健所環境衛生課. Suzaka Public Health Center, 812-2, Ooaza Suzaka Aza Yamazaki, Suzaka 382.

徴であった。NOAA の赤外放射測定で得られる赤外輝度温度 (TBB) による地表面温度は地吹雪や飛雪の粒子からの射出によるとすると、気温に比例するものと考えられる。これによると、ダークストリームの内側の気温は外側に比べて、約 15°C 以上高いことになる。また、ストリームの中心軸に沿った気温と高度から得たプロファイルによると、それは完全な乾燥断熱減率であることがわかった。以上のことから、ダークストリームは周囲に比べて暖かくて強い斜面下降流によって形成されていることが、結論される。

1. はじめに

ブライド湾から内陸 120 km のあすか観測拠点に至るルート上で (図 2 参照), 猛烈な強風と吹雪に遭遇して, 前進不可能となったことが, あすか観測拠点の最初の越冬報告のなかで記されている。ここではそのカタバ風の効果が NOAA の画像に現れている例を示し, それがどの

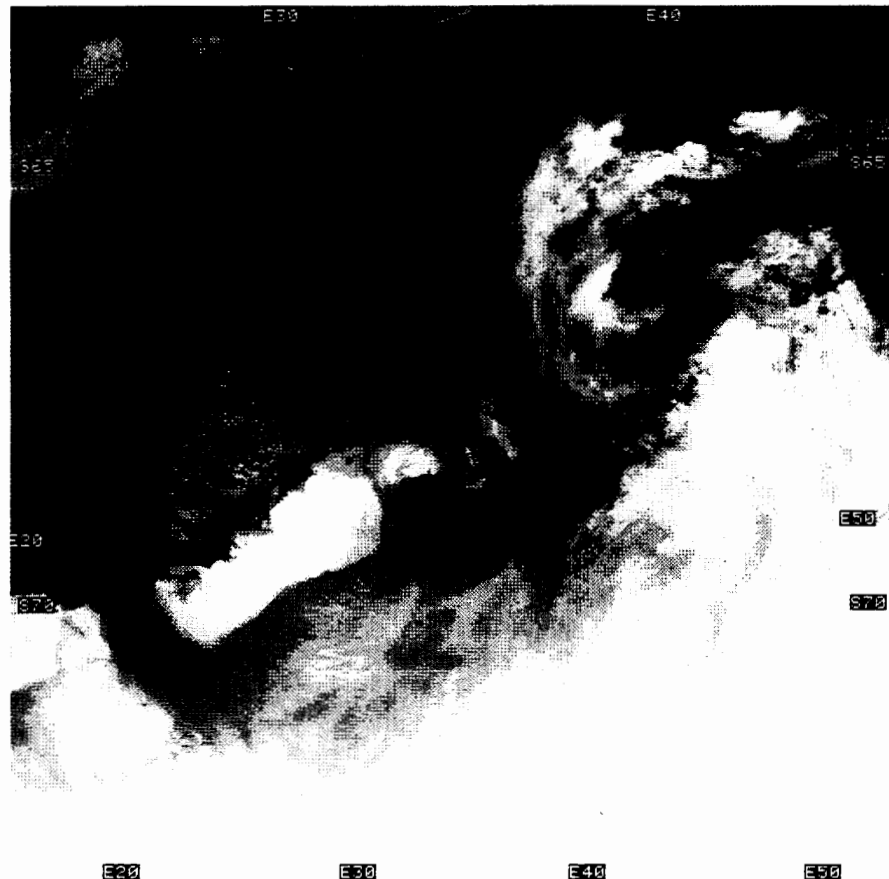


図 1a これまで見られた中で最も見事なダークストリームがバード氷河からブライド湾に流れているのがみられ, さらに海上に 200 km も及んでいるのがみとめられる。濃い褐色が輝度温度の高温, また明るい黄色が低温を示す (1988 年 7 月 5 日)。

Fig. 1a. The best case of a clean-cut (i.e. dark) stream in the scene observed by the NOAA satellite in this area. The dark stream at its strongest, flowed from Byrd Glacier to Breid Bay and 200 km out over the sea ice. Dark brown indicates higher temperature; light yellow indicates lower brightness temperature (5 July 1988).

様な原理で顕在化されるか、考察した結果を報告する。

図 1a は NOAA の AVHRR5 チャンネルによる赤外画像である。濃い茶色から明るい黄色までの濃淡に沿って輝度温度の高い領域と、低い領域の分布が示されている。図 1a の左下の V 字型のブライド湾 (70°S, 20°E) に向かって、内陸の「あすか観測拠点」(70°32'S, 24°08'E) の東方から濃い茶色の帯状の縞模様がはっきりとみとめられる。これは NOAA の受信・現地処理の始まった 1987 年以来、関係者の間で注目されてきたものであるが、そのなかで最も明瞭なケースである。

この種の現象はすでにロス海の棚氷の上でもみられ、SWITHINBANK (1973) をはじめとして、KURTZ and BROMWICH (1983), BROMWICH (1989a, b), PARISH and BROMWICH (1989) らによって報告されているが、彼らはこれらを、warm signatures とか、thermal features, thermal signatures,

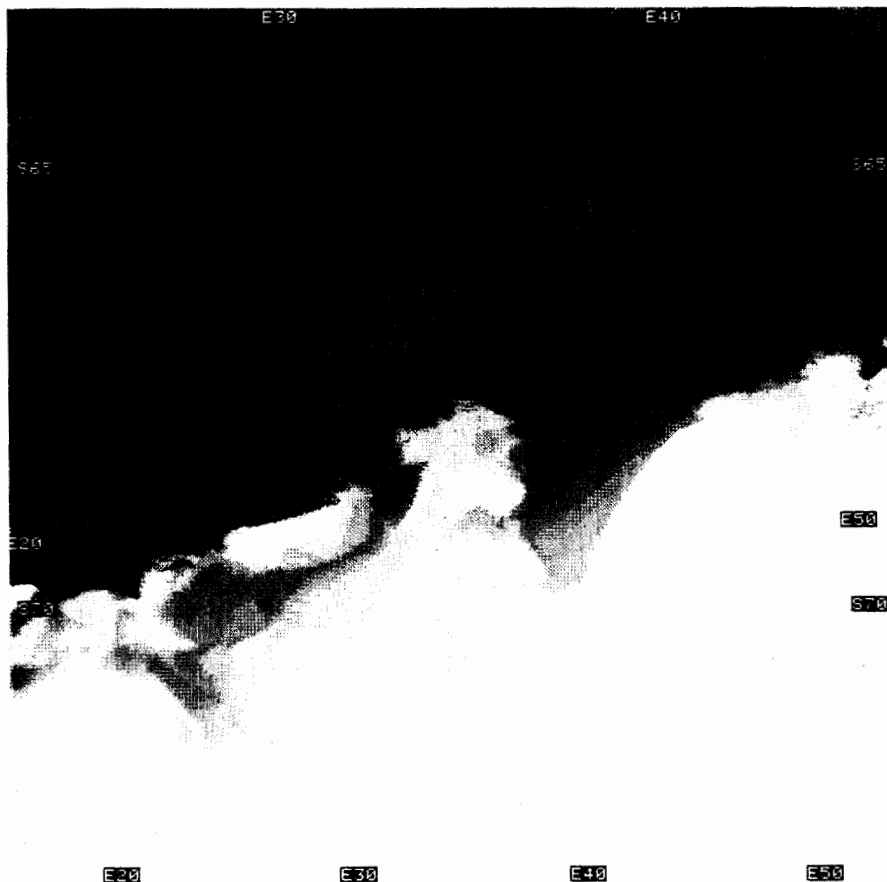


図 1b ダークストリームの全く見られない珍しいケース。この図は図 1a と全く同じフレームで緯度経度のマーク及び雲のないところで見える海岸線等はすべて一致している。そこで図 1a でダークストリームの見られるところに、いつも何がしかの模様が見られるが、図 1b ではそこに何も見えていない極めてまれなケースである (1988 年 7 月 9 日)。

Fig. 1b. Extremely unusual cases (9 July 1988) with no dark stream observed in the location where dark streams are usually observed as shown in Fig. 1a.

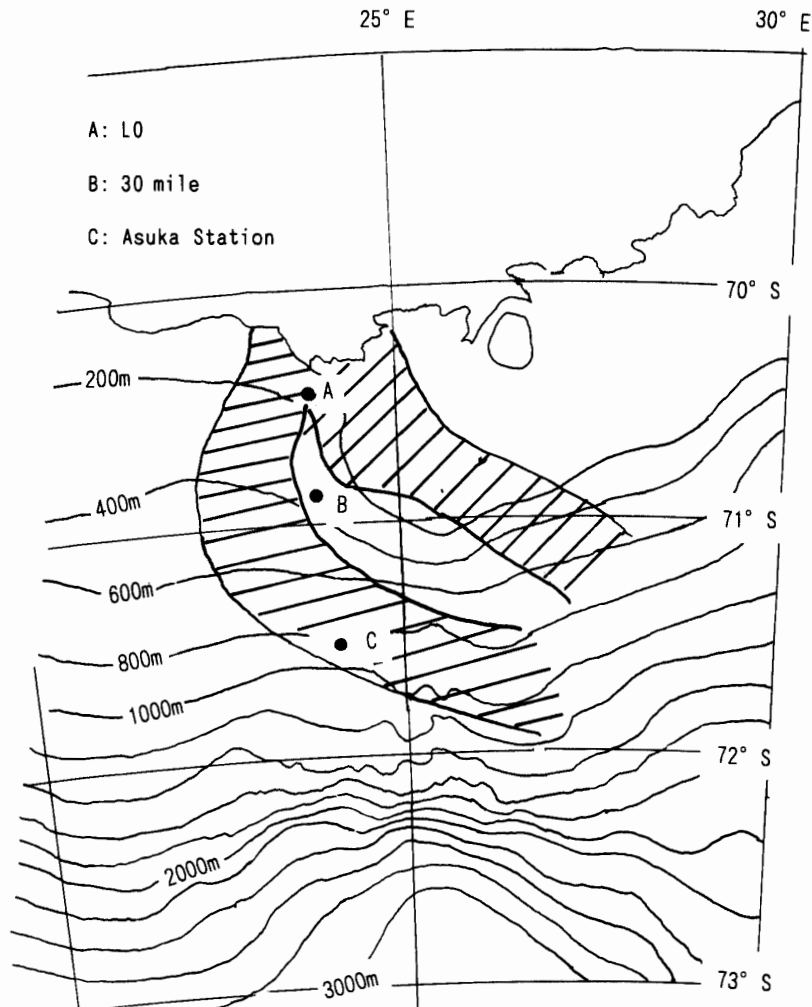


図2 1987年の一冬期間にみられた帯状のダークストリームの幅の東側の境界線と西側の境界線の変動する範囲をそれぞれ東西の2つのハッチされた領域で示してある。したがって双方に挟まれる領域ではダークストリームが発生する時には、それが常に存在する領域に相当する。

Fig. 2. The variation range of distribution of west and east side boundaries of the dark streams observed in winter, 1987, shown as the two hatched areas on the west and east sides of the figure, respectively.

katabatic signatures 等と呼んでいる。ここでは表示した図に見られる外見に従って、これを仮に「ダークストリーム」と呼ぶことにする。

2. ダークストリームの実態に関する観測解析結果

図1aは前述の様に、これまでこの領域で観測されたもののなかで最も明瞭にみえる例である。図の右上に発達した低気圧による、ボルテックス・クラウドバンドが見られ、逆に左半分は雲が無く、よく晴れていることを示している。このような状況はこの現象が明瞭にみえるための十分条件であることが後述される。このカラー表示では、このダークストリームの濃い褐

色の部分は、その周囲の明るい黄色の部分に比べて輝度温度が高いことを定性的に示している。その実際の計測値は図3および図4に示されるとおりで、ストリームの中心軸上の温度は、その東西の周囲にくらべて最大で15°C以上も高いことが、図4の主流軸に直交する輝度温度の横断分布からも明らかである。

これらの出現は6月から10月までの冬期間に限られ、そのうちで雲のない時に、しばしばみとめられる。それらの分布域を調べるため、1987年の一冬期間の分布位置の集計して図2に示す。それによると内陸側では、図1aの例を中心位置として、その3倍の幅で、時によって移動するのがわかる。しかし海岸付近では例外なくブライド湾に収束するようにして分布しているのが特徴である。これらのことから、この縞模様がある特定の地形または雪面の効果が反映してみられると言うよりは、流動する現象の効果を反映していることを示すものと考え事が出来る。

このダークストリームの内側に設置された無人気象観測点 (70°50'S, 24°00'E) で得られた気

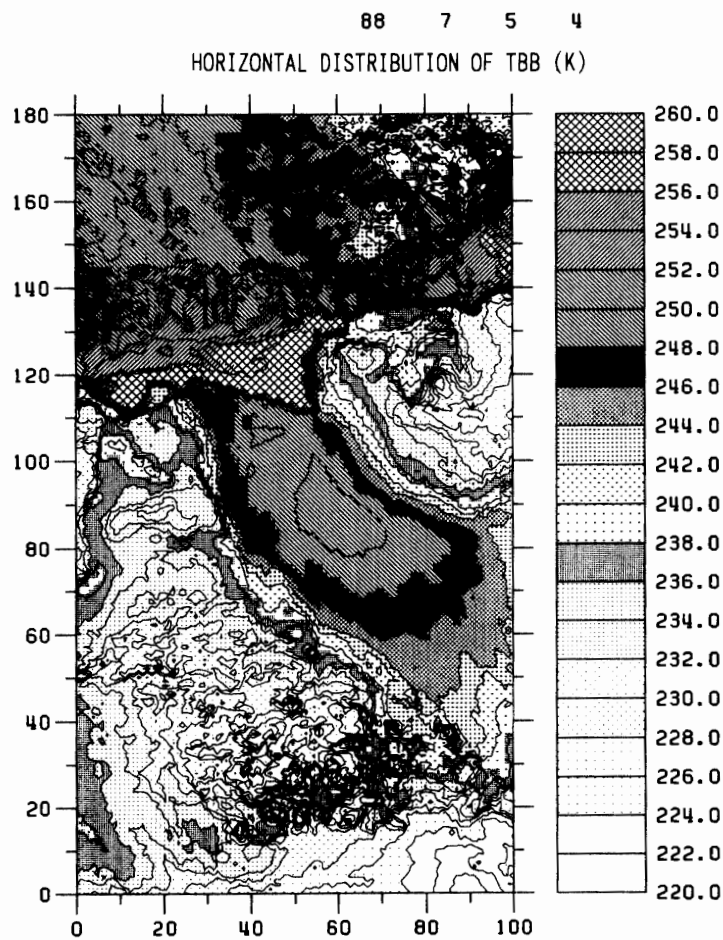


図3 図1aの例のダークストリームを拡大し、輝度温度の水平分布を等値線で示したもの。
 Fig. 3. Horizontal distribution of TBB brightness temperature over the dark stream shown in Fig. 1a.

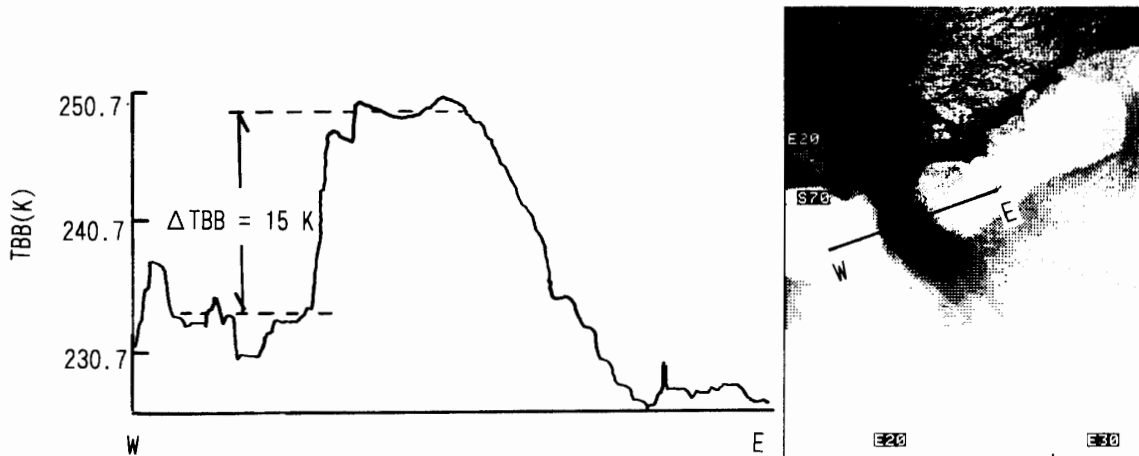


図4 図の右半分に示すダークストリーム (図1aと同じもの) 上のプライド湾に流れ出る直前の陸上における、図のWとEを両端とするダークストリームをほぼ東西によぎる直線に沿った輝度温度のプロファイルを示す。その横軸の長さが左図のWEの距離に相当する。

Fig. 4. TBB profile along nearly zonal traversed line of the dark stream as shown in the right half of the figure with W and E marks at the ends of it. This case is the same one shown in Fig. 1a.

温と風速の時間変化を図5に示す。その位置は図2にBと示されている、あすカルートの海岸から2つ目の「30 mile」と記される地点である。図1aの例は1988年7月5日にあたり、その日はいつものように平均風速が10-14 m/sで吹いていて気温は -20°C である。ところがその直後の7月9日から12日にかけて風が弱くなり、気温が $4-5^{\circ}\text{C}$ も下がっているのが認められる。この時の衛星画像が図1bに示すようにダークストリームがみられていないケースである。上層雲に遮られて地表面のTBBが観測出来ない場合を除けば、このダークストリームは程度に差はあるが、ほとんどいつも見られ、図1bのように、これが見られない例を見つける方が難しいくらいである。それは図5の時間変化において風が無い現象が占める期間がわずかであ

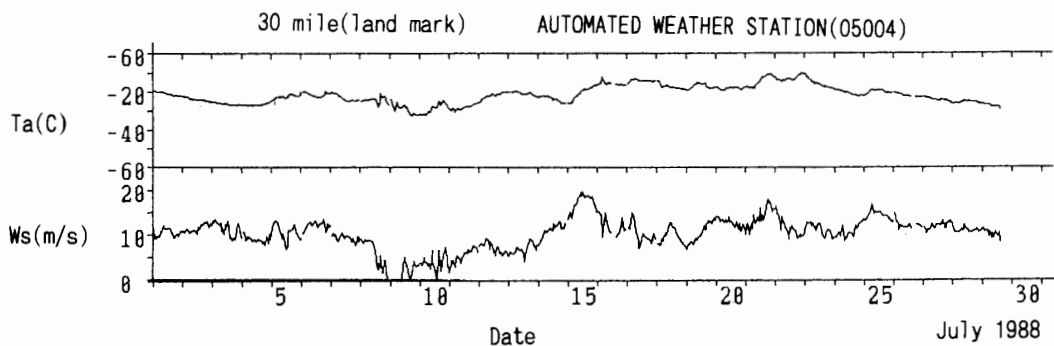


図5 30マイル地点における無人気象観測で得られた気温と風速の時間変化

Fig. 5. Temporal variations of air temperature and wind velocity obtained by an automated weather station at the mile stone called "Mile 30".

る事からも、容易に推察される。しかも、1日に1回の衛星観測の瞬間がそれと同期する確率は、さらにかなり低いことになる。

3. 発現と維持のメカニズムに関する考察

このダークストリームはセールロンダーネ山地から流れ出るバード氷河の急斜面から始まっているのであるが、その勾配は南極大陸全体でも他に例を見ないほどの急勾配でもある。この斜面に沿って分布する輝度温度をダークストリームの中心軸にそって、図2の等高線と比べて読みとった高度に対する輝度温度の分布を図6に示す。図では斜面を下るにつれて、輝度温度が増加し、ブライド湾の開水域に対応して、急激に増加している。その後海上では海水域になり、陸上の0-200 mの高度に相当する輝度温度を維持しているのが注目される。ここでは図に黒丸で示したものが斜面の輝度温度で、その高度分布を図の右半分に示す。それによると1 km 登るにつれて10°C ずつ減少していて、これは正に大気の乾燥断熱減率と一致していることになる。

一般的に自由大気は高度が高くなるにつれて温位が高くなるように成層しているものである。このことから、ダークストリームは内陸の海拔高度の高いところの温位の高い大気が下降して、その流れの特に密集した通り路の位置に、この現象が観測されることに相当していることになる。流れの中は上流と下流が等温位であることから、その気温は下流に行くにつれて、

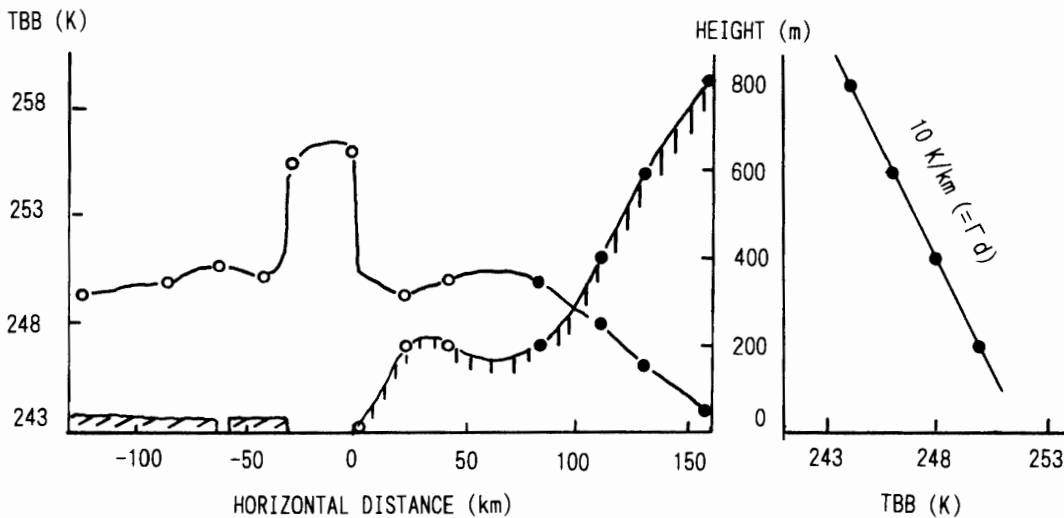


図6 ダークストリームの中心軸に沿った高度に対する輝度温度の分布
左図: 輝度温度と高度の横断面表示。右図: 斜面部分(黒丸)の輝度温度の鉛直プロファイル。

Fig. 6. Brightness temperature distribution with altitude along the slope of the axis line of the dark stream. Left: Vertical cross section display of brightness temperature and altitude. Right: Vertical profile of brightness temperature along the slope (solid circles) of the axis line of the dark stream.

外側の周囲に比べて温位の高い分だけ暖かくなると考えられる。しかし大気の温度が上がっても大気そのものの赤外放射は低いので衛星で観測する地表の輝度温度を高めることにはならない。この激しい斜面下降流の温度は通り路の雪面や微視的に舞い上がる地吹雪の粒子の温度と、すぐ馴染むものと考え、それら雪面の固体および地吹雪の固体粒子の赤外放射の射出率は高いので、それらの温度を介して、それから放出される赤外放射が強められる。この特に強いカタバ風の通路は内陸側では、その時の一般場の気圧配置等によって多少偏位すると考えることが出来る。ブライド湾では西側の緩い丘陵と東側に隣接する棚氷帯に形成される動かない接地逆転層による寒気境界層の丘陵効果との間に挟まれ、そこに気流の方向が絞り込まれて限定されるものと考えられる。またこの流れは南半球のケルビン波の効果として、元来西側の緩い丘陵部の尾根伝いにすり寄るように流れる性質があり、そのため東側に隣接する厚い寒気境界層の動かない気層を、逆にそれほど剝離して破壊しないと考える事もできる。このことは図4の輝度温度の横断分布にも表れている。図の左右がそれぞれ西と東に相当し、この輝度温度の水平方向の温度勾配を比べて見ると、西側がより急で、東の方が緩やかである。これは西側の固い地形効果と東側の柔らかい流体効果の違いが表れたものと考えることが出来る。

多くのダークストリームは海岸で消えるが、この例(図1a)は珍しくブライド湾の沖200kmまで張り出しているのが注目される。図1aの右上にみられる大きな低気圧の周りの風の循環がダークストリームの流れる方向と一致しているので、この流れをいっそう強め、その勢いで、これが海上へ張り出すまでに至ったものと考えられる。しかし、海面上には、一般に気温を反映する放射の担い手としての地吹雪はないはずであるが、この場合にはこの低気圧が通過した直後の氷海域にあたり、そこに降ったばかりの海水上の新雪が海水温度を、より確実に断熱して、カタバ流の気温に馴染み、かつ新雪は地吹雪となり、それらがいずれも赤外放射の担い手となり得ることが、この海上におけるダークストリームの顕在化の原因と考えられる。図6の輝度温度の水平分布で、海上に流出すると一旦は海面からの高い温度を反映するが、また沖の氷海上に至ると、再び以前と同じ温度になっていることが、この事を説明するものと考えることが出来る。ダークストリームが海岸で突然に消える大部分の場合では、海面高度の大気層の温度より、カタバ流の気温が一般に高いと考えられるので、カタバ流は地表面から浮き上がりその高温を放射する媒体から離れてしまうので、もはやダークストリームとして表されないと考えることが出来る。また海岸部でカタバ流がハイドロリック・ジャンプすることも数値計算されているので、この場合も同様に海岸部でダークストリームが突然にして消えることの説明に使うことができる。

この低気圧は図1aの東部を雲で覆っている反面、西側半分の大陸斜面に対しては、全体的に下降流を強める方向の水平循環を提供しており、その領域全体の自由大気を沈降させることになると考えられ、したがって沈降域では雲一つ無い透明度の高い大気状態をもたらしている。これは放射冷却を促し、その結果の寒冷気塊がさらに斜面下降流の発達を強めているもの

と考えることが出来る。

ダークストリームのところが周囲より温度が高くなる理由として、南極の場合、地吹雪が低温で比較的ドライな雪粒によって構成されているので、激しい地吹雪の中で運動エネルギーの熱への変換がまず考えられるが、国内の地吹雪の観測結果に関する佐藤・東浦 (1988) の報告によれば、まず地吹雪に伴って湿度が増加し温度はそれらに伴ってむしろ低下する傾向を示している。運動エネルギーは吹雪粒子の蒸発を促し、その潜熱の消費により、気温がさがると考えられている。南極の冬は低温のため蒸発量もおのずと限られてくるので、衝突摩擦による昇温が期待されるが、このことを証明する直接の観測は、現在のところかなり困難であると考えられる。

この時期は極夜であり、斜面風があっても、雪面は放射冷却によって冷やされ、強い接地逆転層が形成される。このときの雪面の温度は風速が大きいほど接地逆転を緩めるので雪面温度は相対的に高くなるはずである。それは大気のほうが雪面より温度が高く、風速が速くなるにつれて、顕熱輸送が大きくなるからである。ダークストリームの内側は外側に比べて風速が高いことはこれまで考察してきたところである。従って、ダークストリームの輝度温度が高いのは雪面温度が高いことだけに過ぎないとも考えられる。しかし、あすか観測拠点で塔に登って観察した限りでは、かなりの高濃度で 5-7 m 以上の厚さの地吹雪が定常的に持続し、上から見て雪面は全く見えない状態であった。この地吹雪の厚さは 20-30 m になることも十分にあり得ることで、強風でも接地逆転が観測されているので、上層ほど気温が高く、吹雪粒子の方が雪面より大気温度になじみ易いうえ、上層にある吹雪粒子の方がより高温になると考えられる。しかし、この現象は無人気象観測の結果からみても、かなり定常的な現象であり、熱的には平衡状態に達しているとも考えなければならぬので、地吹雪粒子を含む大気温度と雪面のごく近くの温度とは、あまり大きな違いが無くなり、局所的な変動はわりと短時間に補償され、結局は吹雪粒子と雪面の双方が効いていることになる。しかし、その場合でも黒体放射の射出の担い手は地吹雪粒子が主で、雪面はその一部を補うものと考えられる。

4. 気候学的役割に関する議論

また、この現象と関係して図 1a のダークストリームのすぐ東側の棚氷上に、ほとんど白に近いほど明るく、かつ一様な輝度温度の部分が見られる。その雪面温度が他に比べて、一際、低いことを示している。そのコントラストはグランドラインのところで強く、かなり明確な不連続な境界が認められる。これも、ほとんどいつでも見られることで南極域の気候学的因子のひとつとして興味を喚起するものである。地形的にはグランドラインで突然、斜面が終わり水平になるため、それより気温が高く軽い斜面下降流が、既存の重い接地逆転層の寒気を動かし押しやることは困難と考えられ、それらはグランドラインのところで、跳ね水のようにジャンプし地表面から離れるために輝度温度の高くしている担い手の地吹雪粒子を降り落と

して分離してしまい、そこでの輝度温度が突然、放射冷却によって、すでに温度が低くなっている雪面の輝度温度に移り替わってしまうものと考えられる。この構造は微気候学で言うところの斜面温暖帯と類似のものと考えられるが、確証的な観測や解析はまだなされていない。

ブライド湾はこのグランドラインが海岸線と接するところに相当し、この流れを遮るような寒気が下流にないうえ、左右の谷効果により収束された気流は、ここから関を切ったように一気に、かなり速い速度で海上に流れ出ることになる。従って、この湾岸部の雪面では地吹雪による質量輸送が他に比べて極めて高く、その結果、雪面の函養も大きくなると考えると、そこでの氷床の流動速度が他に比べて大きく顕著になるはずであり、ここでの氷床流動の異常に高い値の観測結果とも一致する。また、この海岸での氷崖が盛んにカーリングされることも、ひとつの証拠でもある。さらにこの強い吹き出しは、沿岸で開いた海水域（沿岸ポリニヤ）を形成維持していることも考えられ、これらは、極めて特殊な地形学的気候条件を構成していると言える。

5. おわりに

セールロンダーネのバード氷河からブライド湾に至る内陸斜面に、南極全体でも他に劣らないほどの見事なダークストリームの例を NOAA 衛星の画像から示す事が出来た。その時のダークストリームの領域内に設置された無人観測点で得られた気温（地吹雪の粒子を含む大気の温度）と風速の記録および衛星資料による赤外放射輝度温度の解析値を比較検討した結果、ダークストリームは強い斜面下降気流によって、もともと上層の高い温位の気塊が降下させられているので、常に周囲の大気より気温が高い事になる。その周囲の大気は静止しているとは考えられないが、その流速は、はるかに遅いので、接地逆転の形成の程度が強く、その分だけ地表温度が低いはずである。したがってストリームの中心部では両外側に比べて相対的により高温であることになる。そこでの赤外放射輝度温度の担い手は、この大気の温度に馴染んで同じ温度になっている地吹雪粒子と雪面の一部と考えられ、これがダークストリームの本体であると考えられる。したがってダークストリームは図2のように、時によって、位置が変動することも、このことから容易に説明される。これと同様な現象の研究は Terra Nova Bay において、先述の BROMWICH (1989a, b), BROMWICH and KURTZ (1984), PARISH and BROMWICH (1989) らによって精力的に観測され、その研究報告がなされている。その内容は複雑でかつ、時間変化の激しい現象である。しかし、ここで報告したブライド湾のダークストリームは規模がはるかに大きく、時間的に安定して、持続するものである。従って、比較的単純に扱うことが出来たといえる。その最大の好条件は、バード氷河の斜面の勾配とその吹走距離が、極めて大きいことに起因していると考えられる。

文 献

- BROMWICH, D.H. (1989a): An extraordinary katabatic wind regime at Terra Nova Bay, Antarctica. *Mon. Weather Rev.*, **117**, 688-695.
- BROMWICH, D.H. (1989b): Satellite analyses of Antarctic katabatic wind behavior. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **70**, 738-749.
- BROMWICH, D.H. and KURTZ, D.D. (1984): Katabatic wind forcing of the Terra Nova Bay polynya. *J. Geophys. Res.*, **89**, 3561-3572.
- KURTZ, D.D. and BROMWICH, D.H. (1983): Satellite observed behavior of the Terra Nova Bay polynya. *J. Geophys. Res.*, **88**, 9717-9722.
- PARISH, T.R. and BROMWICH, D.H. (1989): Instrumented aircraft observations of the katabatic wind regime near Terra Nova Bay. *Mon. Weather Rev.*, **117**, 1570-1585.
- 佐藤篤司・東浦将夫 (1988): 地吹雪時に観測された湿度上昇. 国立防災科学技術センター研究報告, **41**, 397-403.
- SWITHINBANK, C.R.M. (1973): High resolution satellite picture. *Polar Rec.*, **16**, 739-751.

(1996年7月19日受付; 1997年1月16日改訂稿受理)