

# Svalbard 島近海での極域巻雲の航空機観測と解析

増田一彦\*, 小林隆久\*, E. Raschke\*\*, W. Koch\*\*, F. Albers\*\*, and U Maixner\*\*,

\* 気象研究所 茨城県つくば市

\*\* GKSS Research Center D-21502 Geesthacht, Germany

## 要旨

1993年3月12日に Svalbard 島近海の北極海上で ARKTIS93 実験の一部として航空機により、高度 8500m から 3000m までの 10 高度で、上向き・下向きの放射フラックス、巻雲の粒子の大きさ等の観測を行った。PMS-FSSP、OAP-2DC プロープによって測定した巻雲粒子のデータをもとに、巻雲粒子のモデル化を行うとともに光学的厚さを求めた。これらを放射伝達モデルに取り入れ、各高度での短波長放射フラックスを求め、測定値と比較した。高度 8500m から 3000m までの巻雲を一括した解析では良い一致を示さなかった。観測が約 2 時間にわたって実施され、この間に雲の構造が変化した可能性があることが一つの原因と考えられる。次に、雲の層を 3000-6000m、6000-8500m に分割して解析した。注目している雲層より上層または下層の雲の光学的厚さを変化させて解析を試みた結果、注目している雲層内部での放射フラックスは放射伝達計算の結果と観測値とでほぼ一致した。

## はじめに

巻雲は地球放射収支に影響を与えていると考えられ、また巻雲粒子の沈降により水分を下方に運び、雲の下層からの降水の引き金になっている。巻雲特性の様々な時間・空間的スケールの監視とモデル化は気象・気候の研究に重要である。しかし、極域・熱帯域での観測は直接観測の難しさから多くの事が知られていない。

ARKTIS93 は北極海の上でのエネルギーと渦の交換の研究を行うために、Bremerhaven の Polar-Marine 研究所、Hamburg の気象研究所を中心に計画・実施された。その一環として Svalbard 島 (Spitsbergen Archipel) 近海の北極海上空で巻雲の内部および境界での巻雲粒子、放射、風の観測実験が実施された。ここでは、測定された微物理量からモデル化した巻雲粒子モデルを使って放射伝達計算により求めた巻雲内部での短波長放射フラックスと放射計による測定値とを比較した結果について報告する。

## 結果

1993年3月12日に Longyearbyen 空港から約 120km 離れた海域で観測を実施した。下方には層積雲が見られた。8518m から 3035m までの 10 高度(8518, 7907, 7298, 6689, 6080, 5471, 4862, 4251, 3645, 3035m)についてそれぞれ 30-40km の航路で観測を行った (Koch, 1996, Raschke et al. 1997)。航空機(Falcon 20)には巻雲粒子を観測する PMS-FSSP, OAP-2DC プロープ、温度、湿度、風の変動、上向き・下向きの太陽放射・長波放射量を測定するための測器が搭載された。

巻雲粒子のモデル化は、粒子の向きが 3 次元的にランダムである正 6 角柱モデルを使うことを前提として次のように行った(Koch, 1996, Raschke et al. 1997)。まず、PMS-FSSP, OAP-2DC プロープの測定値から粒子の断面積が同じになるような球の直径(d)を求め、24 種類の d の値に分

類した。24種類の  $d$  の値に対して、空間的平均断面積が同じになるような正六角柱を設定した。ここで、正六角柱の長さ( $L$ )と直径( $D$ :六角形の対角線の長さ)との間には  $D=aL^b$  ( $L$  が  $100\mu\text{m}$  以下の粒子に対しては  $a=0.7$ ,  $b=1.0$ 、 $L$  が  $100\mu\text{m}$  以上の粒子に対しては  $a=0.0696$ ,  $b=0.5$ 、ただし式中の長さの単位は  $\text{cm}$ )の関係を仮定した(Mitchell and Arnott, 1994)。その結果、正六角柱の大きさは  $L$  の値で  $7\text{-}1720\mu\text{m}$  まで 24 クラスに分類された。波長  $0.55, 0.77, 1.05, 1.29, 1.89\mu\text{m}$  における粒子の消散断面積、単一散乱アルベド( $\omega_0$ )、位相関数を Macke(1993)による幾何光学近似プログラムで求めた。最後に、各観測高度について、それぞれのクラスでの個数を考慮して水平方向の平均の単散乱特性を求めた。

多重散乱モデルによる放射フラックス( $0.3\text{-}3.0\mu\text{m}$ )の計算は平行平面モデルを仮定し、Masuda et al. (1995)で使用したプログラムを利用した。観測、モデルの概略を図1に示す。

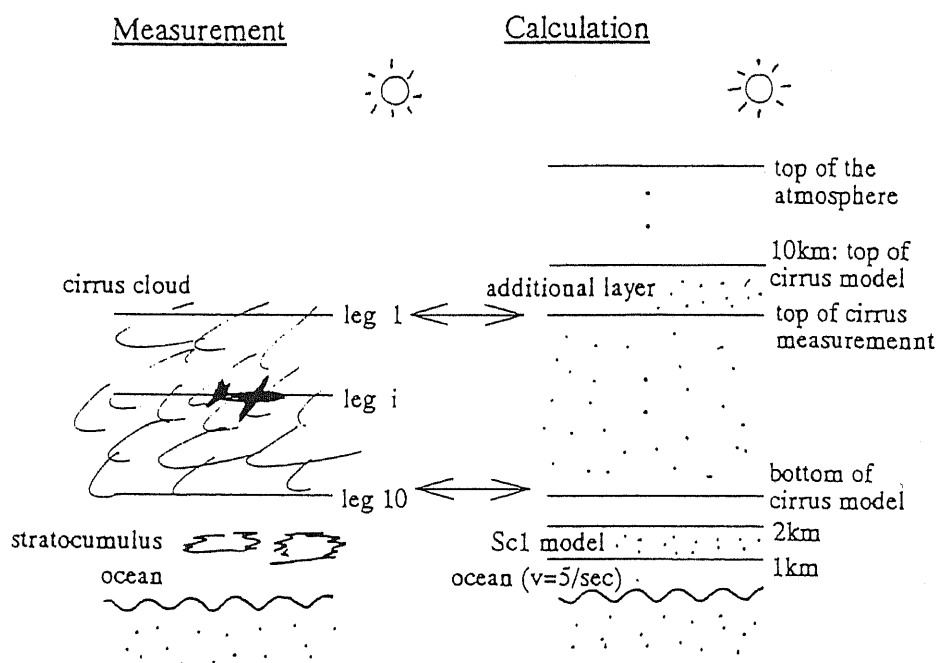


図1 観測、モデルの概略

巻雲層はそれぞれが均一な 10 個の層に分割した。観測最高高度(8518m)での下向きフラックスの観測値に合うように、光学的厚さが 1.0 の巻雲層を 1 層追加した。この雲層の追加は、観測最高高度でも巻雲粒子が観測されていることから不合理ではないと考えられる。巻雲下方の層積雲の光学的厚さは観測最底高度(3035m)での上向きフラックスと下向きフラックスとの比に合うように 3.8 と定めた。なお、太陽天頂角は観測時の代表的な値、 $80.5^\circ$  に設定した。計算結果を図 2(a)( $\Delta$ )に示す。図中●およびエラーバーは観測値の平均値および標準偏差を示す。○に観測最高高度を真の雲頂高度と仮定した場合の計算結果を併せて示す。観測値(●)と計算値( $\Delta$ )との比較から、下向きフラックスに注目すると、モデル中での巻雲の光学的厚さをより小さくすると計算値と観測値が一致するように見える。一方、下向きフラックスおよびその上向きフラックスとの比に注目すると、モデル中での巻雲の光学的厚さをより大きくすると計算値と観測値が一致するように見える。モデル計算で設定した巻雲の光学的厚さは微物理量から推定したものであり、また巻雲粒子モデルも近似的なものである。これらに起因する計算誤差の概略を見積

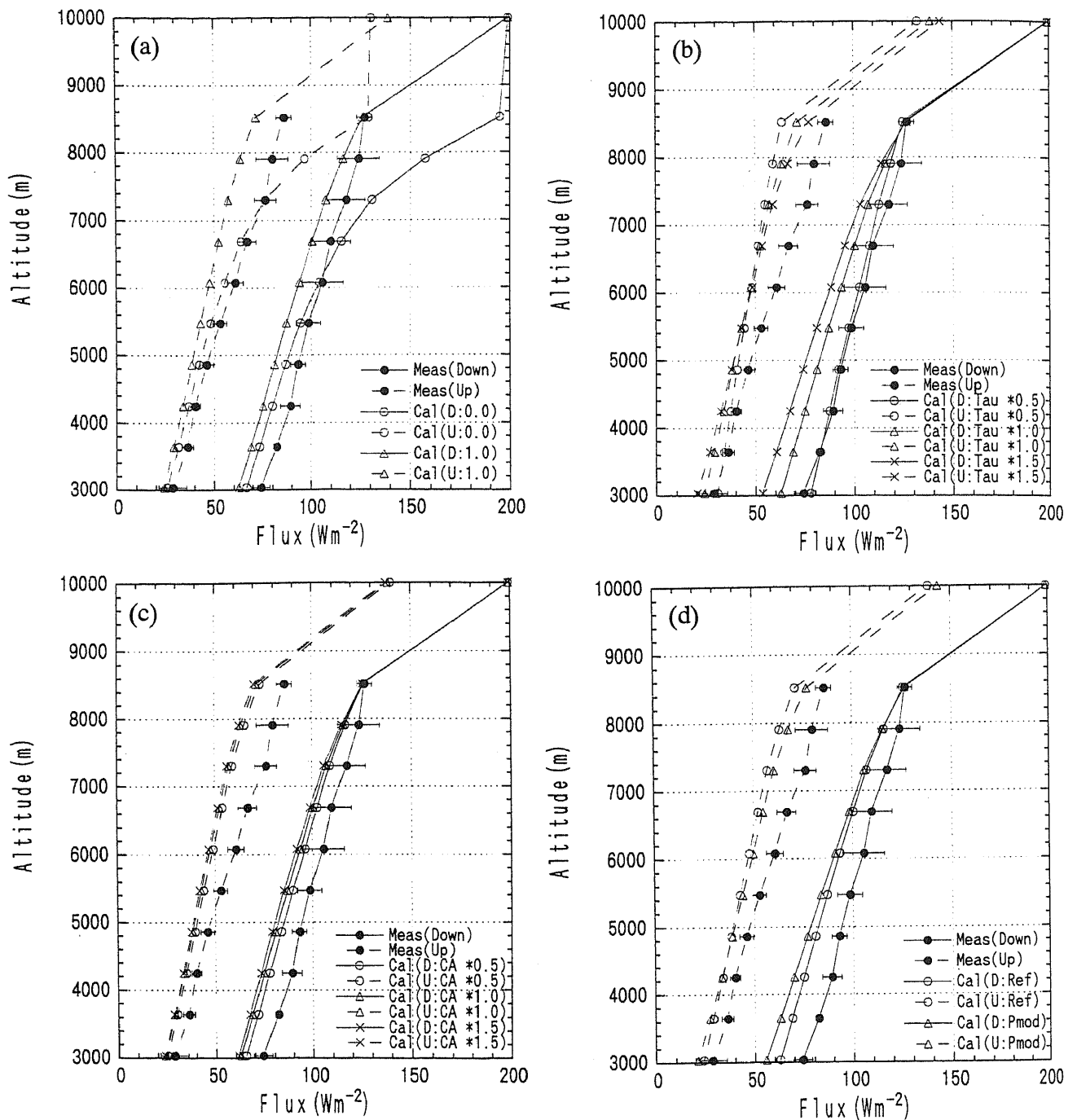


図2 下向きフラックス(実線)、上向きフラックス(点線)の計算値と観測値との比較。  
 1993年3月12日、北緯77°、東経6°。●およびエラーバー：観測値の平均値および標準偏差を示す。

- (a) ○：計算値(上部追加層の光学的厚さ=0.0)。△：計算値(上部追加層の光学的厚さ=1.0)。
- (b) 巻雲モデルの光学的厚さの影響。○：0.5倍、△：1.0倍、×：1.5倍。
- (c) 巻雲粒子モデルの吸収率  $(1-\omega_0)$  の影響。○：0.5倍、△：1.0倍、×：1.5倍。
- (d) 巻雲粒子モデルの位相関数の影響。○：変化前、△：変化後、asymmetry factor で5-11%の減少に相当。

もるためにいくつかの計算を行った。図 2(b)は巻雲の光学的厚さの設定値を一律に 0.5、1.5 倍した場合の結果である。0.5 倍したもの(○)は下向きフラックスは観測値とほぼ一致するが、上向きフラックスは上層で観測値との差が更に大きくなっている。図 2(c)は巻雲粒子の吸収率のモデル化の誤差の可能性を考慮して  $1-\omega_0$  の値を一律に 0.5、1.5 倍した場合の結果である。図 2(d)は巻雲粒子の位相関数を変化させた場合の結果である。ここでの位相関数の変化は前方散乱を小さく、後方散乱を大きくするように与えた。その結果 asymmetry factor が、波長によって違いがあるが、5-11%減少している。図 2(c)、(d)からは巻雲粒子の単散乱特性の、ここで与えた変化量に対しては、計算値は変化するが、観測値との差異の大きさに比較して影響は小さいことがわかる。また、設定した巻雲の光学的厚さの変化に対してはフラックスの計算結果に与える影響は大きい、観測値との差異を定性的に説明できない。

ここまでの解析は、観測中雲の構造が変化しなかったという仮定のもとに行われている。一方、観測は約 2 時間にわたって実施されたことを考慮すると、この間に雲の構造が変化している可能性がある。ここでは雲の層を 3000-6000m、6000-8500m に分割して解析を行った結果について述べる。巻雲下部(3000-6000m)の解析では、そこでの巻雲モデルを微物理量から推定したものをそのまま使い、上部および追加した層の光学的厚さを一律に変化させた。上向き・下向きフラックスの計算値と観測値との観測高度での平均 2 乗残差を図 3(a)に示す。これより、光学的厚さを 0.5 倍した場合の計算結果が観測値と良い一致を示すことが推察される。各観測高度での計算値と観測値とを図 3(b)に示す。もとの計算値(○)に比べ上部の光学的厚さを変化させた計算値(△)は改善されており、ほとんどが観測値の平均値±標準偏差以内にある。同様に、巻雲上部(6000-8500m)の解析では、そこでの巻雲モデルを微物理量から推定したものをそのまま使い、下部および層積雲の光学的厚さを一律に変化させた。上向き・下向きフラックスの計算値と観測値との観測高度での平均 2 乗残差を図 4(a)に示す。これより、光学的厚さを 2.6 倍した場合の計算結果が観測値と良い一致を示すことが推察される。各観測高度での計算値と観測値とを図 4(b)に示す。もとの計算値(○)に比べ下部の光学的厚さを変化させた計算値(△)は改善されており、観測値の平均値±標準偏差以内にある。

#### おわりに

航空機により観測された巻雲の微物理量をもとに放射計算を行い、巻雲内部で測定された放射フラックスとの比較を行った。高度 8500m から 3000m までの巻雲を一括した解析では良い一致を示さなかった。観測が約 2 時間にわたって実施され、この間に雲の構造が変化した可能性があることを考慮して、雲の層を 3000-6000m、6000-8500m に分割して解析した結果では、注目しているそれぞれの雲層内部での放射フラックスは放射伝達計算の結果と観測値とでほぼ一致した。

ここで報告した観測および解析は必ずしも完全なものではない。観測に関しては、一機の航空機で観測を行っているために、航路は上層の風を考慮して選ばれてはいるが、各高度で雲の同じ鉛直面を観測しているという保証はなく、また観測時間内で雲の構造の変化には対応していない。FSSP の解析では粒子の球形性を仮定しているために、それに伴う不確かさがある。航空機の速度(150-180m/s)での PMS プローブによる観測では、特に小さい粒子を見逃している可能性がある。解析に関しては、実際に観測された複雑な形状の粒子を単純な正 6 角柱で近似している。各高度の観測データを見ると、フラックス、雲粒子数など水平方向に非均一であるが、平行平面モデルを使った計算を行い、各層の平均値と比較をしていることなどがあげられる。これらの

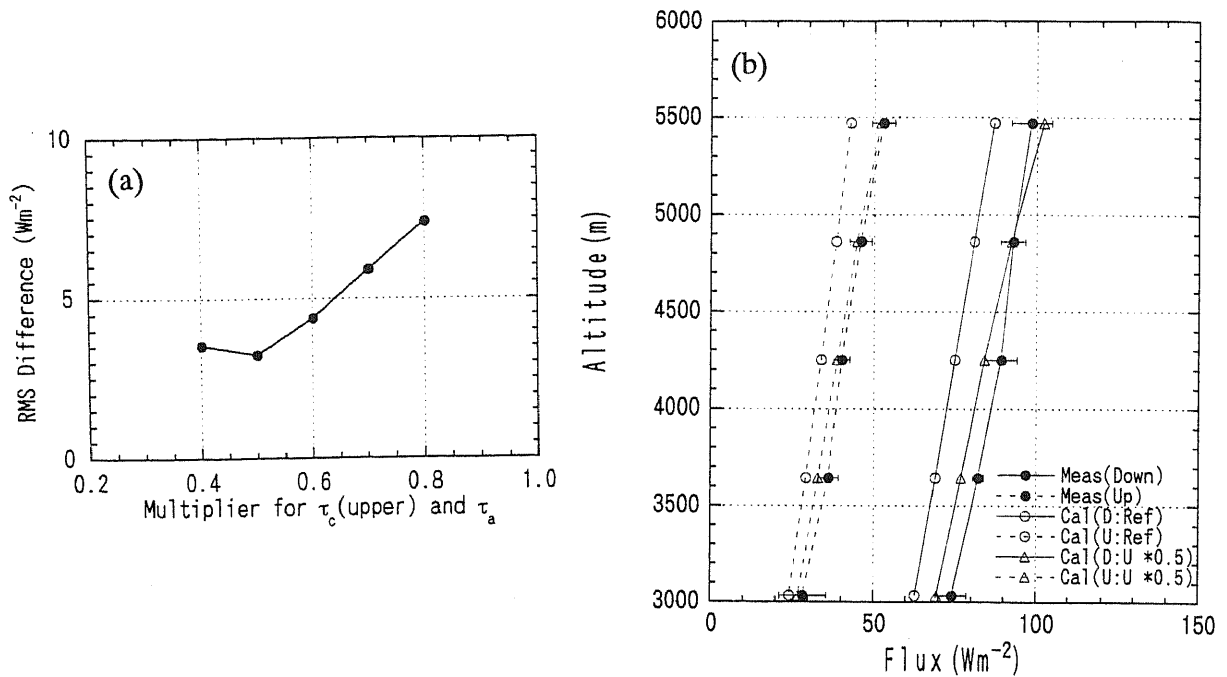


図3 巻雲下部の比較解析結果。  
 (a) 上部および追加層の光学的厚さを一律に変化させた場合の上向き・下向きフラックスの計算値と観測値との平均2乗残差。  
 (b) 下向きフラックス(実線)、上向きフラックス(点線)の計算値と観測値との比較。  
 ○: 倍率1.0の場合、△: 倍率0.5の場合。

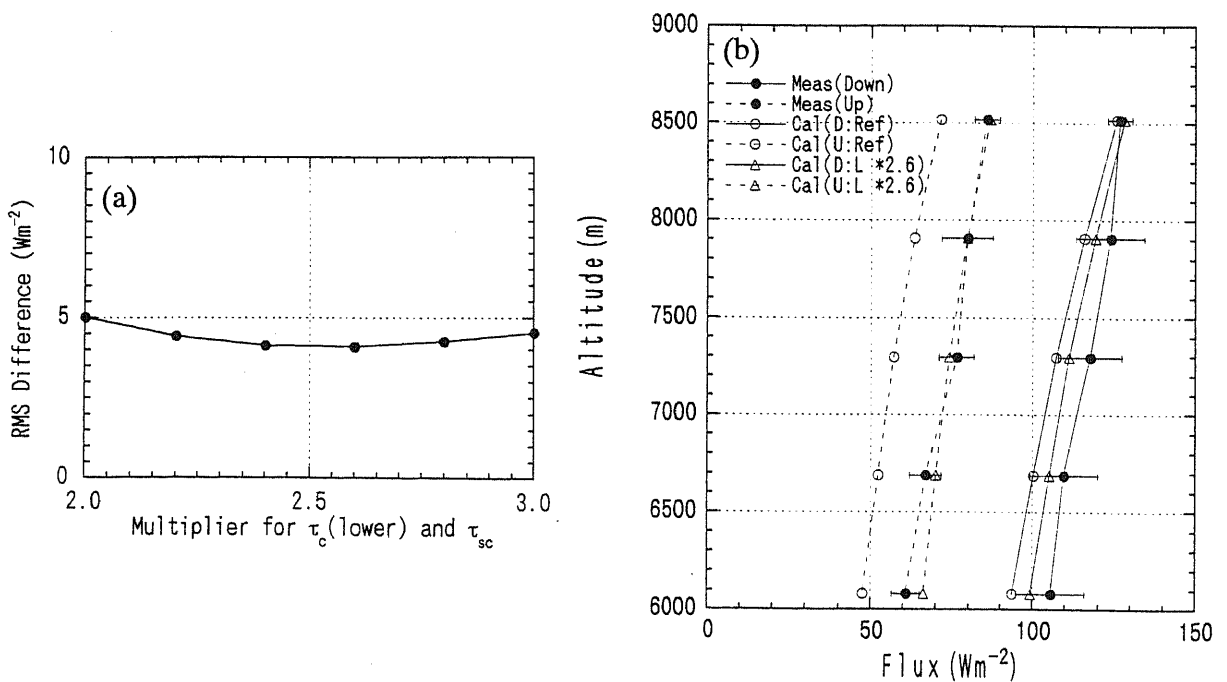


図4 巻雲上部の比較解析結果。  
 (a) 下部および層積雲の光学的厚さを一律に変化させた場合の上向き・下向きフラックスの計算値と観測値との平均2乗残差。  
 (b) 下向きフラックス(実線)、上向きフラックス(点線)の計算値と観測値との比較。  
 ○: 倍率1.0の場合、△: 倍率2.6の場合。

様々な制限・簡略化の中で行った研究ではあるが、数少ない航空機による巻雲観測データの解析において一定の成果があったものと考えます。今後、観測データ中の安定した領域に注目した解析、モンテカルロ法による雲の非均一性を考慮した解析を進める予定である。

#### 参考文献

- Koch, W., 1996: Solarer Strahlungstransport in arktischem cirrus. Phd Thesis, 97pp.
- Macke, A., 1993: Scattering of light by polyhedral ice crystals. *Appl. Optics*, **32**, 2780-2788.
- Masuda, K., H.G. Leighton, and Z. Li, 1995: A new parameterization for the determination of solar flux absorbed at the surface from satellite measurements. *J. Climate*, **8**, 1615-1629.
- Mitchell, D.L., W.P. Arnott, 1994: A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus cloud, Part II: Dependence of absorption and extinction on ice crystal morphology., *J. Atmos. Sci.*, **51**, 817-832.
- Raschke, E., W. Koch, F. Albers, U. Maixner, and K. Masuda, 1997: Airborne measurements of arctic cirrus near the island Svalbard. *IRS '96: Current problems in atmospheric radiation*, (W. L. Smith and K. Stamnes, Eds), A Deepak Publishing, 433-436.