

## GCOM(地球環境変動ミッション)委託研究

### AMSR2 土壌水分、積雪アルゴリズムの高度化および陸面データ同化システムによる 広域水循環データセットの開発

#### GCOM(地球環境変動ミッション)とは

GCOM(地球環境変動ミッション：宇宙航空研究開発機構[JAXA])は、全球規模の気候変動・水循環変動メカニズムの理解に必要な地球物理量を計測する全球・長期継続衛星観測システムを構築・利用実証し、最終的には気候モデル研究機関との連携を通じて将来気候予測の改善に貢献することを目的としています。全球の総合的、長期的、および均質な観測を実現するために、GCOMは2種類の衛星システム、1年間の重複期間を設けた3世代の衛星シリーズから構成され、全体で13年以上の観測を実施しますが、その2種類の衛星システム内の1つがGCOM-Wシリーズです。その第一世代であるGCOM-W1衛星(第1期水循環変動観測衛星)は高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)を搭載し、水・エネルギー循環の理解に貢献します。GCOM-W1に搭載されるAMSR2は、水に関連した地球物理量の観測を行うための多周波・二偏波のマイクロ波放射計であり、ADEOS-II搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)および現在も軌道上で継続的にデータ収集を行っている改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)の実績を基に設計・製造されています。

#### 「AMSR2 土壌水分、積雪アルゴリズムの高度化および陸面データ同化システムによる広域水循環データセットの開発」について

「AMSR2 土壌水分、積雪アルゴリズムの高度化および陸面データ同化システムによる広域水循環データセットの開発」は、GCOM(地球環境変動ミッション)の一環として宇宙航空研究開発機構(JAXA)より委託を頂いた研究プロジェクトです。

地球規模の気候変動に影響を与える水・エネルギー循環は、土壌水分・積雪などの陸面状態により大きく影響を受けます。ゆえに、全球規模の時間的に連続した土壌水分および積雪量を定量的に推定することは、気候変動予測における重要な課題となります。そこで本研究プロジェクトでは、地上マイクロ波放射計による観測実験を行い、その観測結果に基づき改良したマイクロ波放射伝達モデルを土壌水分アルゴリズム、積雪深アルゴリズムおよび陸面データ同化手法に適用し改良を加え、全球への適応性・推定結果の長期安定性に富む頑健なアルゴリズム・手法を構築することを目的としています。また2001年より実施しているロシアヤクーツクリファレンスサイトにおける積雪深観測を継続し、プロダクト検証データを取得します。

## 実施体制

共同研究参画機関

宇宙航空研究開発機構

協力連携機関

東京大学大学院農学生命科学研究科附属 生態調和農学機構

Institute for Biological Problems of Cryolithozone

## ■これまでの成果

### 1. 土壌水分・植生を対象としたマイクロ波衛星アルゴリズムの開発・改良

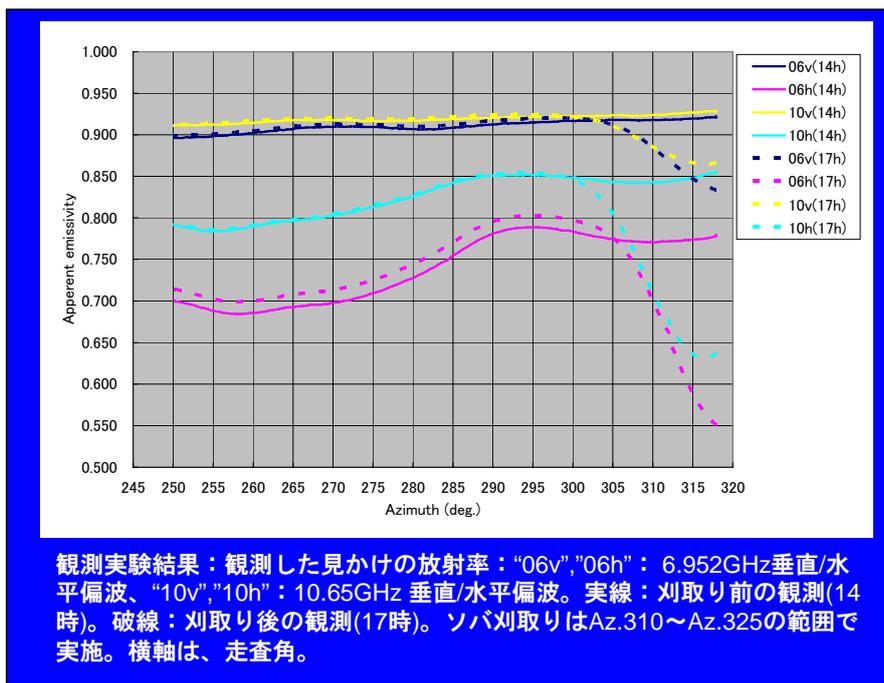
#### (1) 地上マイクロ波放射計による観測実験

マイクロ波は水分に反応します。ゆえにマイクロ波衛星データを用いてマイクロ波放射伝達モデルにより土壌水分を推定する場合、多くの水分を含む植生の影響度を評価する必要があります。本研究プロジェクトでは、東京大学大学院農学生命科学研究科附属 生態調和農学機構内観測圃場において地上マイクロ波放射計による観測実験を実施しました。

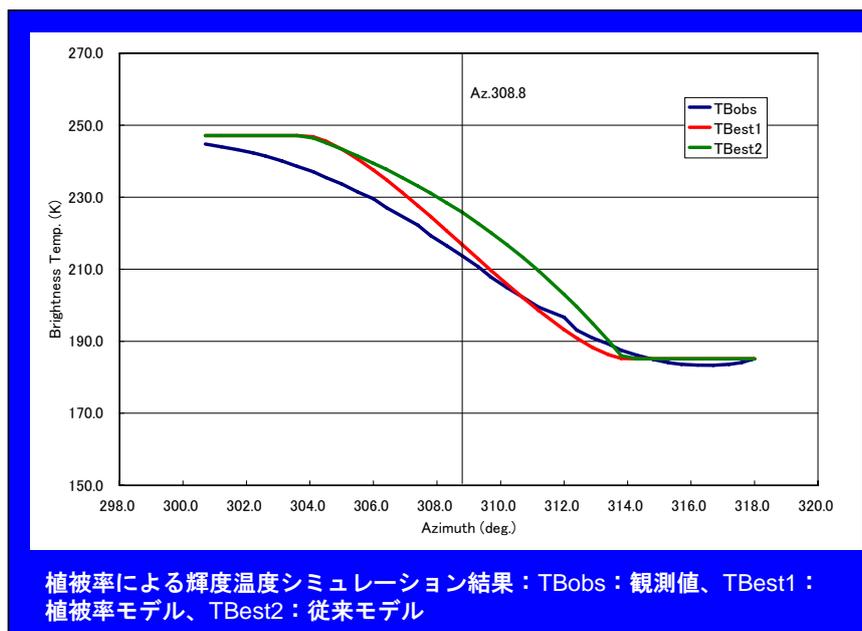


地上マイクロ波放射計による観測実験：(左)観測風景、(右)観測計画図

次図に集中観測実験の結果を示しました。本実験では、Az.310～325の領域のソバと牧草を刈り取って裸地を作成し、刈取りの前後の14時と17時にマイクロ波放射計観測を行いました。次図のAz.318度付近が刈り取りを行った領域に相当し、Az.310度が裸地と植生域の境界になります。また縦軸は「見かけの放射率」です。これは観測輝度温度を地表面温度で除した値ですが、ここで用いた地表面温度は上向きと下向きの赤外放射計の観測値から推定した温度です。植生が刈り取られた領域にマイクロ波放射計のフットプリントが入り、植生被覆率の減少に伴い見かけの放射率が急激に減少する様子が明瞭に現れています。



また土壌水分アルゴリズムにより Az.300 ~ Az.318 を対象に輝度温度(10GHz(H))を推定し、観測データとの比較を行った結果を次図に示します。TBest1 は植被率によって裸地と植生域が混在する時の影響を考慮した植被率モデルを用いた結果であり、TBest2 は植被率を50%とし、均一な植生層を仮定した従来の植生モデルを用いた結果になりますが、植被率モデルによる結果(TBest1)の観測データとの良好な一致が確認され、本観測実験を通じて、土壌水分アルゴリズムにおける植被率モデルの有効性を確認することができました。



## (2) 土壌水分を対象としたマイクロ波放射伝達モデルとアルゴリズムの開発・改良

小池ら(2000)は、地上マイクロ波放射計実験観測に基づいて構築した放射伝達モデルによってルックアップテーブルを作成し、それを参照して土壌水分 SM と植生水分 VWC を同時に推定する土壌水分アルゴリズムを開発しましたが、半乾燥域を対象として開発されていたために、植生が多い地域では精度が低下するという問題が指摘されていました。また植生が少ない地域でも、植生モデルが的確でないために、欠損値が多いなどの問題がありました。そこで本研究プロジェクトにおいて、植生データベースの更新と粗度パラメーターの見直しを行うと共に地表面付近における地温の温度勾配の影響について検討を行い、土壌水分アルゴリズムの改良を行いました。

### 1) 植生被覆率データベースの更新

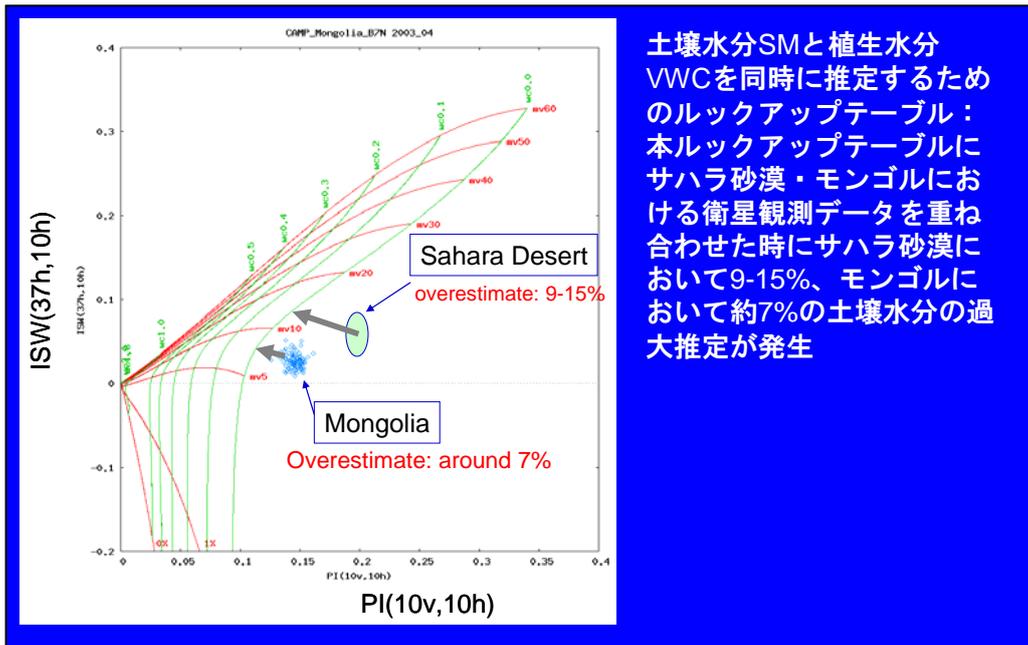
植生被覆の状態は年々変動があり、土壌水分推定における植生被覆の変動の影響は無視できないことに鑑み、Terra/Aqua MOIDS Vegetation Indices に含まれる EVI データを使用しました。まず EVI の偏差をみると、植生はシベリア南部で平年より少なく、東南アジア～インド北部にかけて多い傾向がみられます。一方、土壌水分の差の分布をみると、植被率に実データを使った場合と平均値をつかった場合とで、体積含水率において最大  $\pm 30\%$  程度の差がみられ、EVI の偏差の大きい地域で顕著になる傾向があります。そこで AMSR-E 全期間の植生被覆率データセットを作成し、土壌水分の推定に用いました。

### 2) 粗度パラメーターの見直し

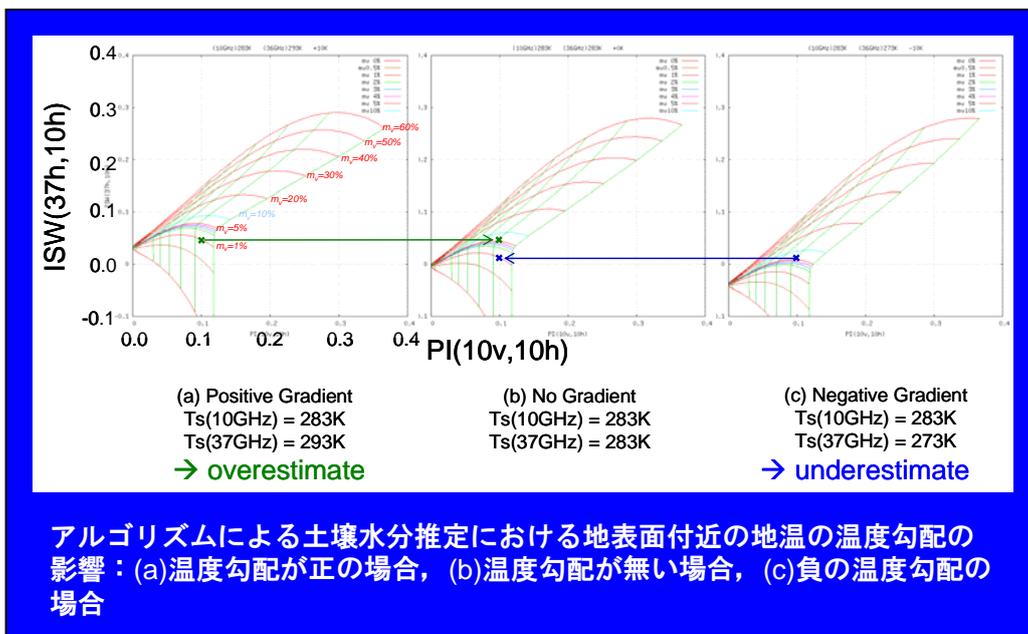
地表面粗度は、植生と同様にマイクロ波放射伝達に影響を及ぼす因子です。したがって、植生の放射伝達モデルの精度や植被率データベースの品質の向上を効果的に反映するためには、粗度モデルの精度も高める必要があります。そこで粗度のパラメーター Q と H を CEOP のリファレンスサイトのモンゴルのデータを用いて検討し、 $Q = 0.189$ ,  $H = 0.873$  (10 GHz 帯)、 $Q = 0.344$ ,  $H = 0.680$  (36GHz 帯)に決定しました。

### 3) 地表面付近地温の温度勾配の影響に関する検討

土壌水分アルゴリズムにより土壌水分推定を行った結果、サハラ砂漠やモンゴルなどの乾燥条件下において土壌水分の過大推定が確認されました。次図は、土壌水分 SM と植生水分 VWC を同時に推定するためのルックアップテーブルですが、本ルックアップテーブルにサハラ砂漠・モンゴルにおける衛星観測データを重ね合わせると、サハラ砂漠において 9-15%、モンゴルにおいて約 7%の土壌水分の過大推定が発生することが分かりました。そこで、この発生原因について調査しました。



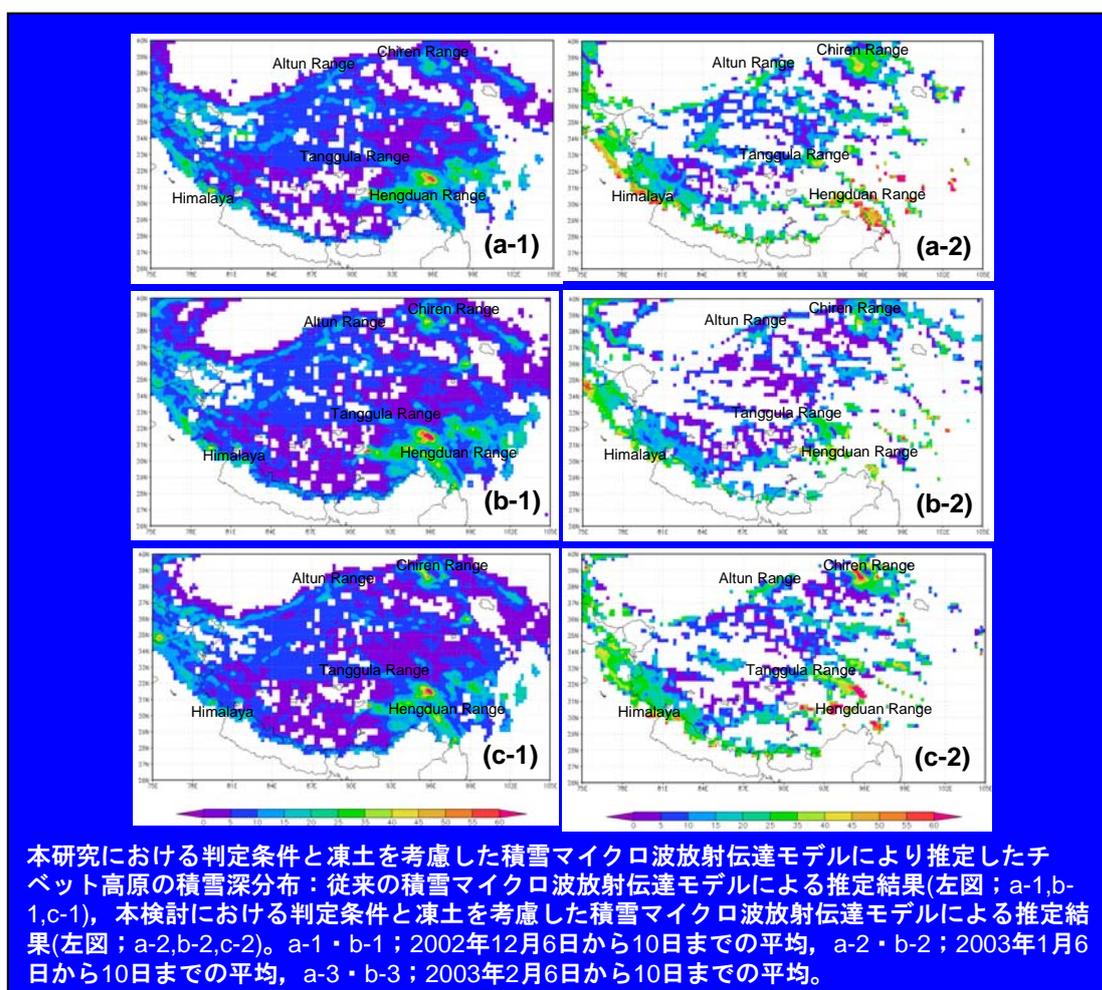
次図の(a)は地表面付近の地温の温度勾配が正の場合、(b)は温度勾配が無い場合、(c)は負の温度勾配の場合を示していますが、正の温度勾配が発生する時には土壌水分が過大に推定され、逆に負の温度勾配が発生する時には過小に推定されていることが分かります。これにより乾燥条件下における土壌水分の推定誤差は、地表面付近の地温の温度勾配の影響により発生している可能性が高いと判断し、現在、地表面付近の地温の温度勾配の影響を考慮したアルゴリズムの改良を行っています。



## 2. 積雪を対象としたマイクロ波衛星アルゴリズムの開発・改良

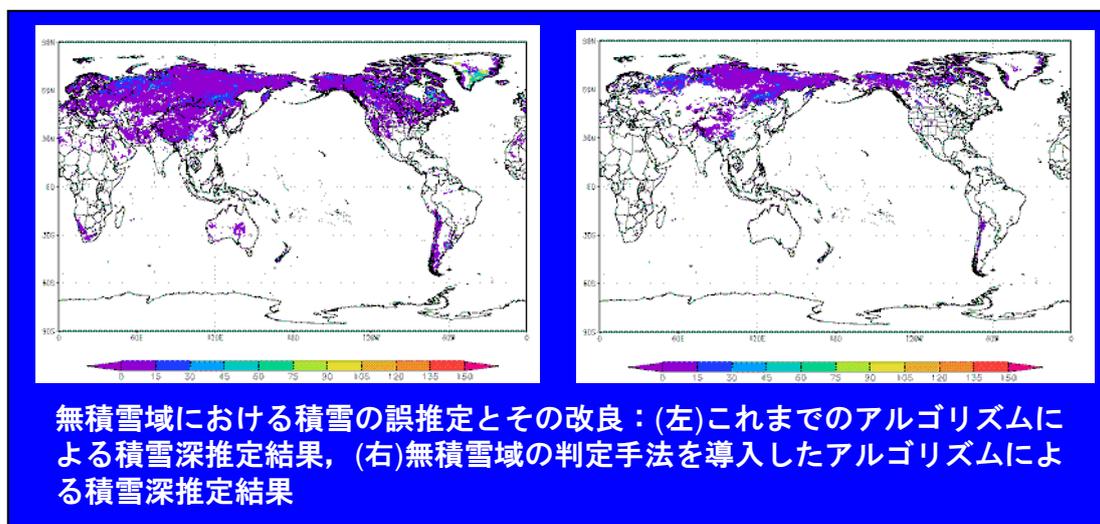
### (1) 積雪と凍土の違いを考慮した放射伝達モデルの検討

積雪と土壌の 2 層からなる積雪を対象としたマイクロ波放射伝達モデルに凍結土壌層を導入した積雪 / 凍結土壌を対象としたマイクロ波放射伝達モデルを考案しました。また本モデルを高緯度寒冷圏のシベリアに適用した結果、それまでは凍結土壌の影響により過大に推定されていた積雪量の推定精度を向上させることができました。更に積雪検知に有効な 19GHz(V)と土壌内部まで透過する 6GHz(V)の比を用いて土壌凍結の有無を判断し、19GHz(V)・37GHz(V)・90GHz(V)を組み合わせた指標により積雪による散乱効果を検知した上で、積雪 / 凍結土壌を対象としたマイクロ波放射伝達モデルを適用することにより、それまで過大に評価されていたチベット高原の積雪量の推定精度を向上させることができました(次図参照)。



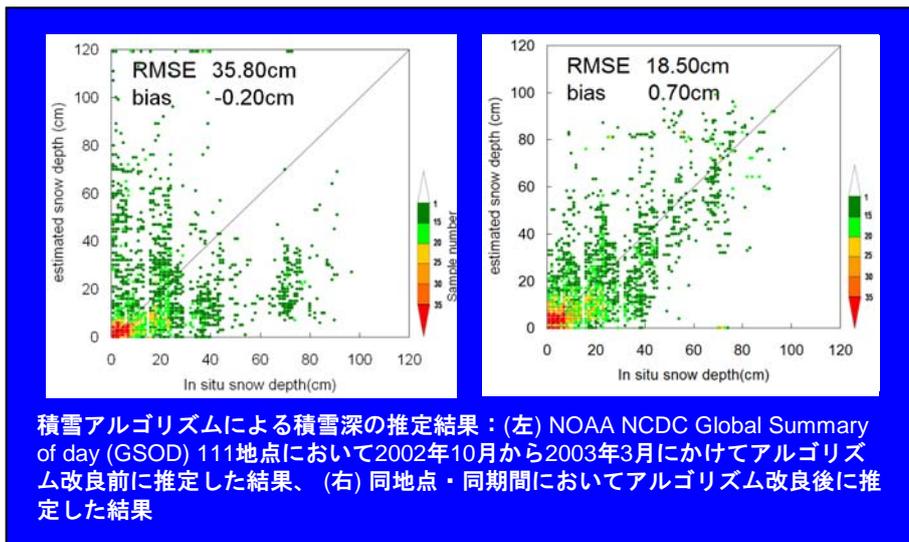
## (2) マイクロ波による積雪の有無の判定

土粒子と氷粒子の複素比誘電率はほぼ等しいため乾燥・冷却された土粒子は、マイクロ波領域において氷粒子とほぼ等しい散乱媒体として評価されます。ゆえに衛星マイクロ波センサは、次図(左)のように積雪の無い地域であっても土粒子が乾燥・冷却される砂漠を積雪として誤って検知してしまう場合があります。そこで 19GHz (V)・37GHz (V) とその差を用いて、積雪の無い領域における誤った推定を解消する判定条件を考案しました。その結果、次図(右)に示されるように積雪の無い地域における誤った推定がほぼ解消されました。



## (3) 冬季における植生の影響検討

これまでは MODIS の NDVI をそのまま適用し、全球の植生を評価していました。しかし濃い森林地帯を集中的に検討したところ、植生タイプによりその影響度が全く異なり、積雪深の推定に大きく影響を与えることを理解しました。そこで植生タイプ毎の積雪深の推定誤差の傾向が比較的明瞭に確認された土地被覆情報(ESA Glob cover data)を導入して植生の影響評価を行うよう積雪アルゴリズムを改良しました。また積雪アルゴリズムでは、冬季の MODIS NDVI データは高緯度寒冷圏において信頼性が低いため有効な NDVI が得られる 9 月前半のデータを適用しています。冬季の積雪深推定において 9 月前半の NDVI を用いることで問題になるのが、冬季の植生の状態との相違です。その中でも落葉樹は、9 月前半は多くの葉があるのに対し、冬季は全ての葉が枯れ落ちるため水分量が全く異なります。そこで ESA Glob cover data より計算グリッド内の落葉樹の占める割合を求め、9 月前半の NDVI に落葉樹の割合を導入することにより冬季に対応する NDVI を求めて植生タイプ毎にチューニングを行い、NOAA NCDC Global Summary of day (GSOD) 111 地点における 2002 年 10 月から 2003 年 3 月にかけての積雪深を推定しました。その結果を地上観測値との比較したところ、次図に示すような推定精度の改善が確認されました。



### 3. 陸域水文データ同化手法(LDAS-UT)の開発・改良

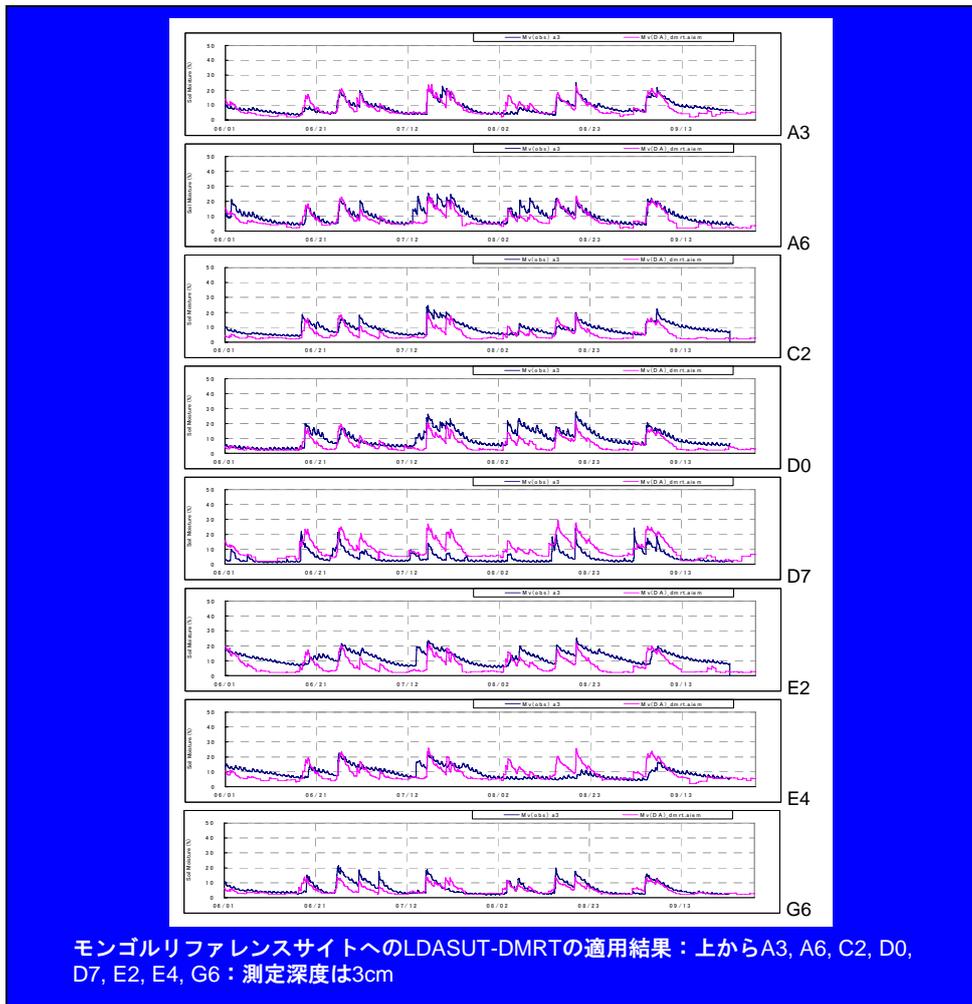
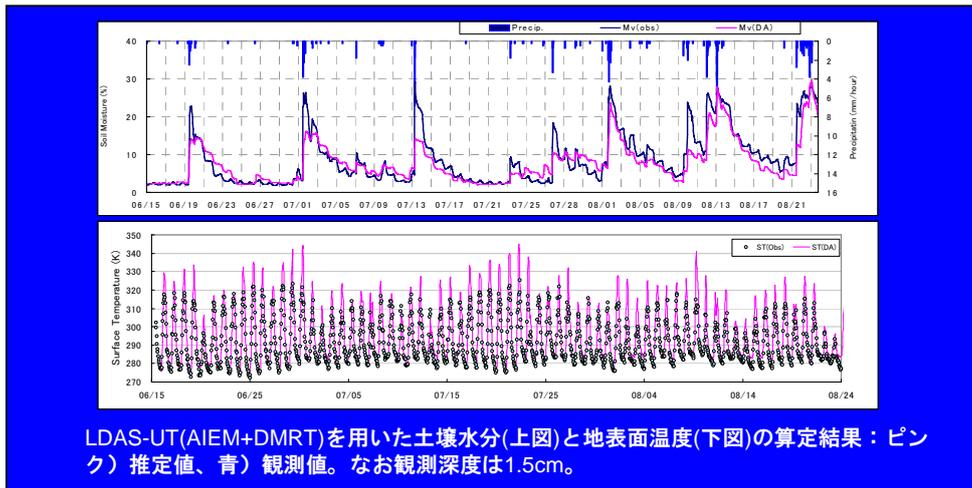
#### (1) 陸域水文データ同化手法の概要

陸域水文データ同化手法(LDAS-UT)は、2つのPassを持ったデータ同化システムです。Pass1で地表面パラメータの最適化を実施しパラメータ推定を行った後、Pass2でその最適化されたパラメータを入力値としてデータ同化をします。モデル操作子(Model Operator)にLSM(陸面モデル)を、観測操作子(Observation Operator)にRTM(マイクロ波放射伝達モデル)を使用しており、LSMは輝度温度を計算するRTMの初期値となる地表面付近の土壌水分、地表面温度、植生温度を計算します。またRTMによって計算された輝度温度と観測された輝度温度の差を最小化することにより土壌水分を推定する手法です。本研究プロジェクトでは、疎な植生・密な植生の地点を抽出し、本手法を2ヶ月程度適用することにより陸面パラメータの最適推定の検証と改良を行いました。

#### (2) 疎な植生を持つサイトにおける陸面パラメータの最適推定

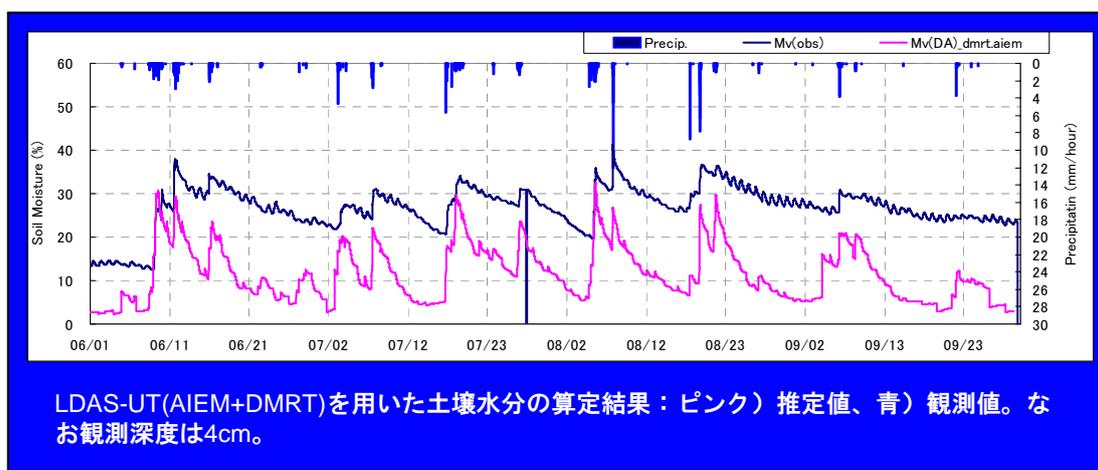
疎な植生を持つCEOPリファレンスサイトであるチベット高原ガイゼサイトとモンゴルサイトにおいて陸面パラメータの最適値を推定し、陸域水文データ同化手法により陸面での土壌水分・地温・放射・顕熱・潜熱フラックスの算定を行いました。チベット高原ガイゼサイトにおいては、まず土中の散乱効果を考慮しないマイクロ波放射伝達モデルを用いた陸域水文データ同化システムであるLDAS-UT(AIEM)を適用しました。その結果、2007年6月16日~8月23日の期間において湿潤期(8月)では土壌水分の推定値が合うものの6月、7月の降雨が少ない乾燥期においては、推定した土壌水分と観測値に差が生じてしまいました。そこで乾燥期における乾燥土壌水分を表現するために、土中の体積散乱効果を考慮したマイクロ波放射伝達モデルが導入されている陸域水文データ同化システムであるLDAS-UT(AIEM+DMRT)を適用し土壌水分を推定してみました。その結果、乾燥期における乾燥土壌水分を表現することができました。

また同 LDAS-UT(AIEM+DMRT)を CEOP モンゴルリファレンスサイトの 8 つの ASSH 観測ステーションに適用した結果、土壌水分が比較的妥当に推定されたサイト、過大、過小に算定されたステーションが存在することが分かりました。しかし、それらのステーションの推定値の平均と観測値の平均を比較することにより妥当な値が示されることが分かりました。



### (3) 密な植生を持つサイトにおける陸面パラメーターの最適推定

半乾燥地帯でありながら耕作地的な土地利用をしている CEOP Tongyu サイトを対象に、土中の体積散乱効果を考慮したマイクロ波放射伝達モデルが導入されている陸域水文データ同化システムである LDAS-UT(AIEM+DMRT)による陸面パラメーターの最適推定を行いました。Tongyu Cropland においては、対象期間の中で6月9日に発生した降水現象時に土壤水分推定値と観測値が約 27%とほぼ同じ値を示しており、その後も降水イベント出力の土壤水分が上昇し、推定値と観測値が近づく傾向にあるものの、定量的には合っておらず、LDAS-UT(AIEM+DMRT)による推定結果が低くなる傾向にあることが分かりました。



しかし、空間の不均一性に焦点を当て、検討を加えた結果、植生がフットプリント内に不均一に分布することにより、土壤水分の推定精度にも影響を及ぼすことが定性的に示されました。これによりマイクロ波放射伝達モデルに植生被覆率（ミクセルモデル）を導入する等のモデル改良することにより土壤水分の推定精度が向上される可能性が示唆されました。

### 4. ロシアヤクーツクリファレンスサイトにおける積雪深観測データ(プロダクト検証データ)の取得

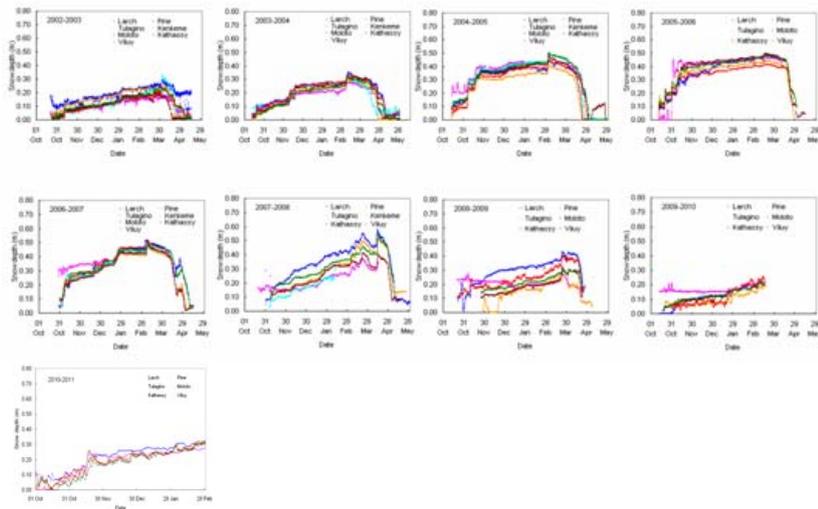
2001 年より実施しているロシアヤクーツクリファレンスサイトにおける積雪深観測を継続し、プロダクト検証データを取得しています。



積雪深計インストール状況 (2010年10月)



積雪深計測状況 (2010年11月)



これまでのロシアヤクーツクにおける積雪深観測結果

## 成果公表

### < 論文 >

- 1) 玉川勝徳, 小池俊雄, Hui LU, Kun YANG, 萩野谷成徳, 石川裕彦, XiangDe XU, Shihong WU: 陸面データ同化手法を用いた Tibet Gaize における土壌水分と地表面フラックスの推定, 水工学論文集, 第 53 巻, 397-402, 2009.
- 2) KATSUNORI TAMAGAWA, Toshio KOIKE, Lu HUI, Kun YANG, Shigenori HAGINOYA, Hirohiko ISHIKAWA, XiangDe XU, Shihong WU: Estimation of the soil moisture and land surface flux at the Tibet Gaize station, by using LDAS-UT, Second Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Study (iLEAPS) Science Conference Melbourne, 2009.
- 3) Hui LU, Toshio KOIKE, Kun YANG, Xiangde Xu, Xin LI, Hiroyuki TSUTSUI, Yueqing LI, Xingbing ZHAO, and Katsunori TAMAGAWA: SIMULATING SURFACE ENERGY FLUX AND SOIL MOISTURE AT THE WENJIANG PBL SITE USING THE LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM OF THE UNIVERSITY OF TOKYO, 水工学論文集第 53 巻, 1-6, 2009.
- 4) Hui Lu, Toshio Koike, Kun Yang, Xin Li, Xiangde Xu, Hiroyuki Tsutsui, Katsunori Tamagawa: Observing and Simulating Land Surface Energy and Water Fluxes Over The Tibetan Plateau, 2009.
- 5) Hui Lu, Toshio Koike, Kun Yang, Hiroyuki Tsutsui and Katsunori Tamagawa: Estimating Land Surface Energy and Water Fluxes by Using the Land Data Assimilation System developed at The University of Tokyo (LDASUT), Proceedings of 2009 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS09), 666-669, 2009.
- 6) Hiroyuki TSUTSUI, Toshio KOIKE, XiangDe XU, Shihong WU, Xin LI and Rui JIN and Hui LU: Application of the land data assimilation system for a frozen soil in the permafrost region of Tibetan Plateau, The International Conference on Land Surface Radiation and Energy Budgets, Proceedings, 2009.
- 7) 筒井浩行, 小池俊雄, 上野健一, XiangDe XU, Shihong WU, Li XIN, Jin RUI, Lu HUI: チベット高原凍土地帯における融解層の推定に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 53 巻, 433-438, 2009.
- 8) Tsutsui, H. and Koike, T: Estimation And Discussion Of Long-term Snow Depth Based On SSM/I Data, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol.27, No.1, 49 ~ 60, 2009.
- 9) 玉川 勝徳, 小池 俊雄, Hui LU, Kun YANG, Xin LI, Huizhi LIU: 陸面データ同化手法を用いた土壌水分推定に影響を及ぼす地表面不均一性に関する検討, 水工学論文集, 第 54 巻, 379-384, 2010.

- 10) Hui Lu, Toshio Koike, Kun Yang, Xin Li : Simulating of land surface soil moisture and energy flux in northern Africa using a land data assimilation system and UKMO output, 水工学論文集第 54 巻, 61-66, 2010.
- 11) 筒井浩行・小池俊雄・上野健一・XiangDe XU・Shihong WU・Rui JIN・Hui LU: マイクロ波放射伝達モデルへの凍結土壌層の導入と積雪衛星アルゴリズムの改良, 水工学論文集第 54 巻, 415-420, 2010.
- 12) 筒井浩行・小池俊雄: 積雪深の全球推定を考慮した衛星アルゴリズムの改良, 水工学論文集第 55 巻, 427-432, 2011.

< 会議等での口頭発表 >

- 1) T. Koike: Satellite remote sensing and data assimilation, the 1st African Water Cycle Symposium, Tunis, 2009.
- 2) T. Koike: GEOSS and Satellite Observations, GCOM Symposium, Tokyo, 2009.
- 3) T. Koike: Modeling the Global Water Cycle status and challenges, 第 6 回 GEO 本会議 Washington DC, 2009.
- 4) T. Koike: Integrated Observation and Modeling of Water Cycle, 2010 International Forum on Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing, China, 2010.
- 5) T. Koike: Climate Change and Water Cycle Variation - Mechanism, Projection, Assessment and Adaptation -, Japan-Denmark Water Forum, Embassy of Denmark in Tokyo, Tokyo, Japan, 2010.
- 6) T. Kike: Integrated Data Sets (CEOP), IGWCO COP Planning Meeting, Tokyo, Japan, 2011.
- 7) T. Kike: Asian Water Cycle Initiative, IGWCO COP Planning Meeting, Tokyo, Japan, 2011.
- 8) T. Kike: African Water Cycle Coordination Initiative, IGWCO COP Planning Meeting, Tokyo, Japan, 2011.