■SAFE プロジェクト

SAFE(Space Applications For Environment)プロジェクトは，アジア太平洋地域における環境変化を把握し温暖化による影響を緩和させるために，各国政府機関に対して衛星リモートセンシング技術を応用した長期的な環境モニタリングを促すことを目指しています.
我々の研究室では，SAFE プロジェクトのプロトタイピングとして，カンボジア王国およびパキスタン・イスラム共和国において，主要河川流域を対象として、「地域水循環の理解と予測による地域水利用情報」を提供するシステムの研究開発を行うとともに、開発したシステムを現地機関において活用するための体制を検討しています。
SAFE ホームページ: http://www.eorc.jaxa.jp/SAFE/index.html

＜カンボジア王国における SAFE プロジェクト＞
“Water Cycle and Agricultural Activities”

＜パキスタン・イスラム共和国における SAFE プロジェクト＞
“Monitoring Water Cycle Variations & Assessing Climate Change Impacts”

■カンボジア王国における SAFE プロジェクト

＜プロジェクトテーマ＞
Water Cycle and Agricultural Activities

＜協働機関＞
カンボジア水資源気象省

＜カンボジア王国の背景＞
カンボジア王国（Kingdom of Cambodia）は 1953 年フランスから完全に独立し，様々な政変や紛争，そして社会システムが完全に破壊され多くの国民が犠牲となったクメールルージュとして知られる苦難の時代を乗り越え，現在国際的な支援も受けながら着実に成長を続けています．このような歴史的背景から，産業や科学技術も一旦リセットされており，この状態から一つ一つ積み重ねているのが現在の状況です.
カンボジアの気候は，熱帯モンスーン気候帯に属し明確に雨期と乾期がわかれています．5 月から 10 月が雨期, 11 月から 3 月が乾期というのがカンボジア人の目安のようです. また，東南アジア最大の湖，そして伸縮することで有名なトンレサップ湖が国土中央部に存在します．この湖は，トンレサップ川を介して首都プノンペンでメコン川に合流しており，雨期になりメコン川の水位が上昇すると，トンレサップ川が逆流を始め膨大な量の水がトンレサップ湖に注ぎ込み面積が拡大します．逆に乾期になると湖の水が流れ出し，面積が縮小します．最大面積は 1 万 km2 以上になると言われており，琵琶湖の 15 倍の面積と同程度かそれ以上ということになります．カンボジアの国土約 18 万 km2 が，日本の国土約 38 万 km2 の半分程度であることを考えると，トンレサップ湖の存在がカンボジア人の生活へ与える影響の大きさが想像できます．カンボジア人は，多くが農業や漁業に従事し，主食は米と魚です．雨期にもたらされる雨，そしてメコン川やトンレサップ湖が湛える水をカンボジア人はうまく利用して農業を営み，魚を獲り，世界遺産アンコールワットに代表されるクメール文化を育んできたといえます.

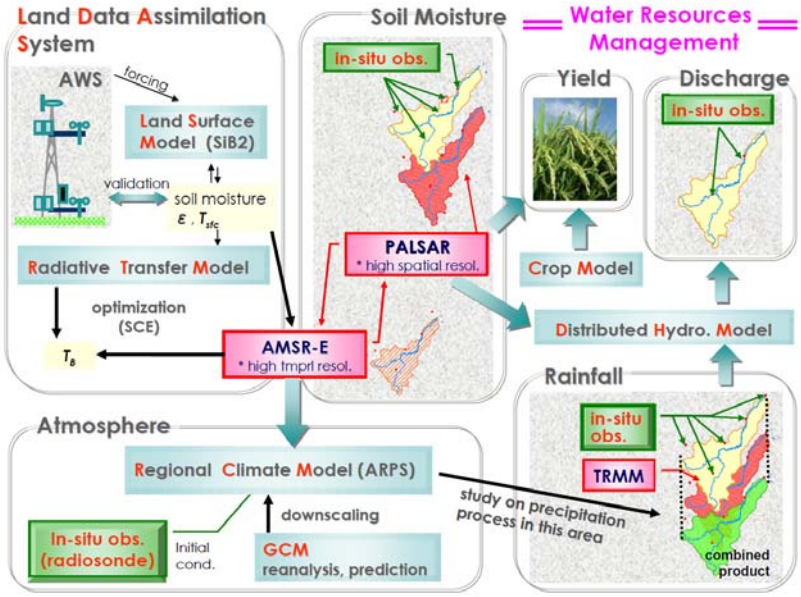
写真：トンレサップ湖の水位変化

写真： カンボジアにおける水との関わり

＜プロジェクト概要＞

カンボジア王国の主要産業は農業であり，熱帯モンスーン気候帯のもとで雨季と乾季を有する当地域では，その水利用の大部分を雨季に供給される天水（雨水，河川氾濫水，溜まり水など）に依存しています．とりわけ，サンカー川流域（Stung Sangker River Basin）を含むカンボジア北西部は，国内随一の穀倉地帯であり，人工的な大規模灌漑システムの整備率が低いなか，天水資源の有効利用が農業生産力を決定付ける鍵となっています．

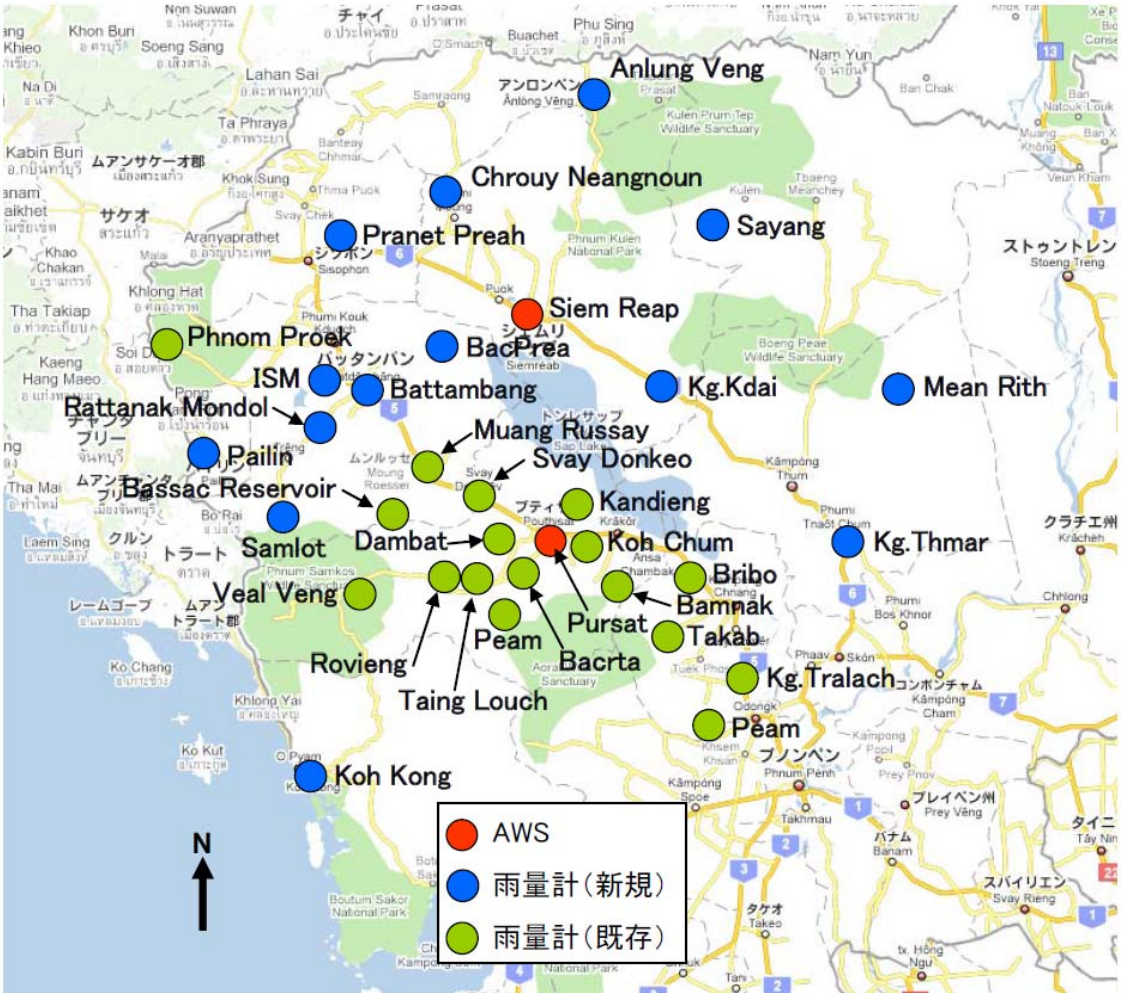
こうしたなかでの本プロジェクトの狙いは，水資源量に大きく影響する降水にまず着目し，降水メカニズムの理解を深めることで，「予報」というレベルにまでは達しないものの，「どういう条件の時に雨が降りそうなのか」をある程度物理的に解き明かしモデル化することで，農民に対して利用可能水量を提供できるようなシステムをつくる基盤を整備することです．本プロジェクトでは，降水のモニタリングに加え，降水に対する陸面応答結果としての土壌水分にも着目し，現業利用に資する時空間解像度でモニタリングデータを提供できるよう，衛星データからの解析アルゴリズムも開発しています．



図： プロジェクトの全体像

1. 観測、データ統合基盤構築

基本観測ネットワーク整備を目的に，2009 年度から各気象観測機器をカンボジア各地に設置し，各解析・検証用のデータを収集しています.

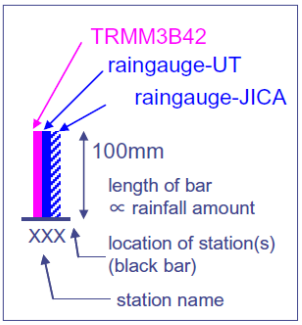


図： カンボジアにおける AWS（自動気象観測システム）および雨量計の設置位置

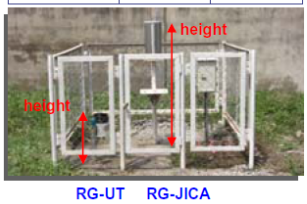
2. 乾季における局所循環と広域場の関係とそれによる降水現象の定量的理解

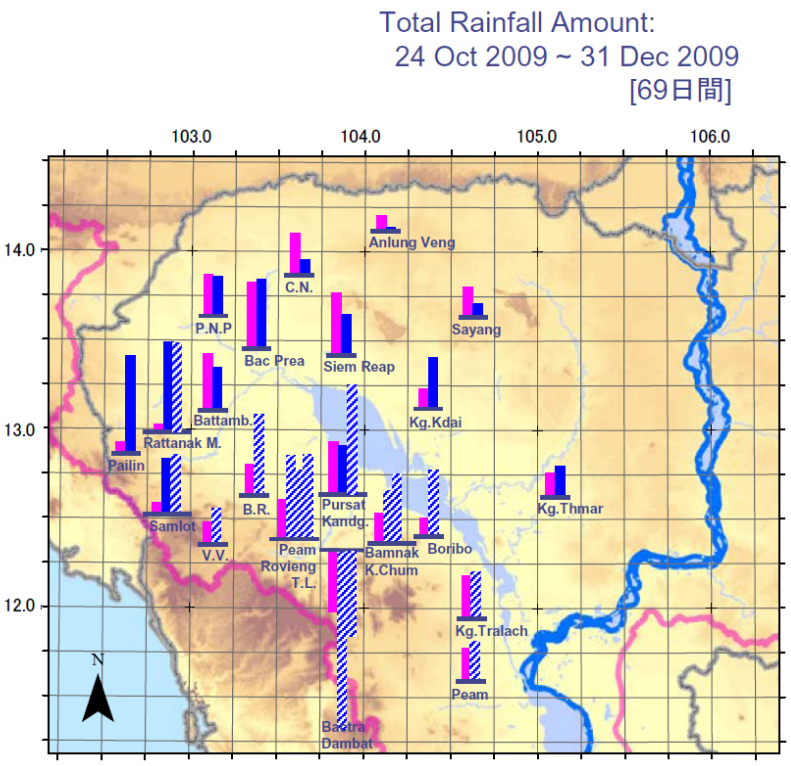
＜ポストモンスーン期の降水量の時空間分布＞

2009 年ポストモンスーン期の降水量について，新たに設置した地上雨量計データを用いて TRMM/3B42 データを検証しながら同時期の降水の時空間分布の特徴について検討しました．この結果，TRMM/3B42 では明瞭な地域分布が見られませんでしたが，雨量計データからは，北東部に比べて南西部で多い傾向が明瞭に見られました．また，TRMM/3B42 では，降水イベントの検知数自体が少ないことから，明瞭に見られませんでしたが，雨量計データからは，北部・南西山地で昼間の降水が卓越する一方，湖上および南西湖岸沿いでは夜間から早朝の降水が卓越する傾向が見出されました．



raingauge	UT	JICA
	ONSET RG3M	Ota Keiki
1pulse	0.2mm	0.5mm
installed on	Sep-Oct. 2009	2003-2006
height	0.50m	1.50m





図： 2009 年ポストモンスーン期に関する，TRMM/3B42，既存雨量計（RG-JICA），新規設置雨量計（RG-UT）雨量計による降水量の地域分布．

＜ポストモンスーン期の広域大気場と局地循環による相互作用とそれによる降水＞

本検討では，2009 年のポストモンスーン期を対象として，以下の知見を得ました．

本地域では，広域大気循環場によって定義される「モンスーン期」が終了した後の約 1 ヶ月間（10 月中旬から 11 月中旬頃），主に湖西岸域で降水が生じていました．この期間の降水は，カンボジア上空領域外から水蒸気が流入・収束することによる「広域性降水」が 6~7 割であり，対して，領域内の水蒸気が領域中で再配分されることによって生じる「局地循環性降水」が 3~4 割でした．局地循環性降水が全降水に占める割合は，深夜から早朝にかけて高く，これは，湖南西からの山風・陸風（南西風）と広域北東風が湖上で収束することによって深夜から早朝に降水が生じている可能性を数値実験的に示した既往研究結果と合致していました．

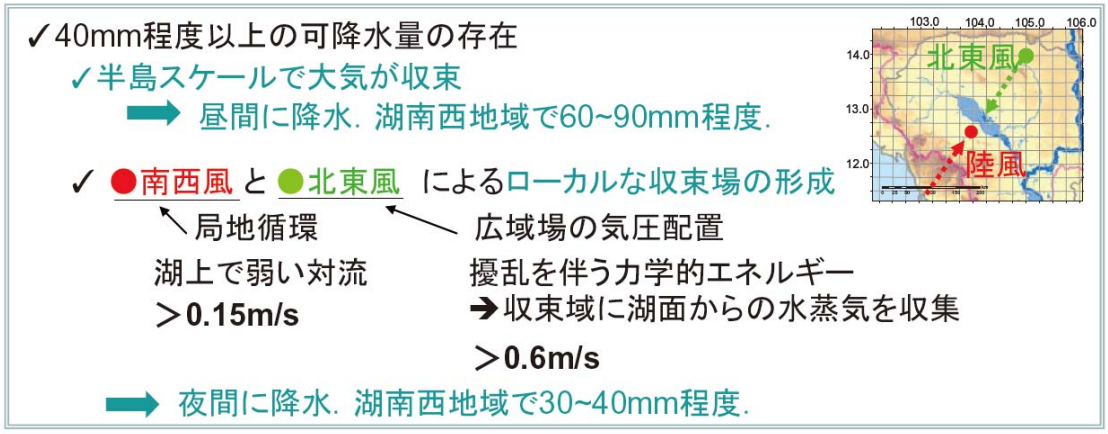
一方，11 月後半以降には，殆ど降水が見られません．この時期，季節進行とともに水蒸気の発散場がより続くようになっており，これが，カンボジア国内の可降水量を急減させ，降水が生じにくい場を作っていると見られます．局地循環性降水が生じる期間の夜間の可降水量は 45mm 程度，生じない期間は 28mm 程度であり，このように，局地循環性降水が生じるためには，局所的な風の収束のみならず，少なくともある一定の大気湿潤度が保たれていることが前提として必要であることがわかりました．

また，可降水量が充分に存在する 11 月中旬以前でも，局地循環性降水が生じない日もあります．湖南西岸からの陸風が弱い（0.15m s-1 程度以下）日には降水が生じず，また，湖南西岸の陸風が比較的強い場合でも，湖北東岸からの北東風が弱い（0.6m s-1 程度以下）日には降水が生じていません．反対に，湖北東岸からの北東風が非常に強く（4.0m s-1 程度）なると，湖南西岸でも北東風となって陸風が抑えられるため，降水が生じません．こうした北東風・南西風の強弱と降水有無との関係も，今回初めて現地観測データからも定量的に明らかになりました．

3. モニタリング・予測手法の開発

＜週～旬スケールの降雨予測手法の開発＞

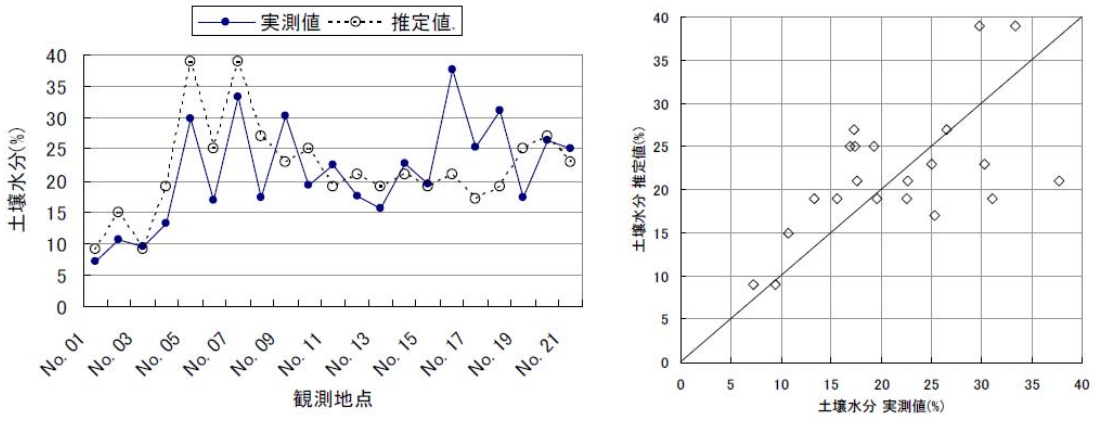
ポストモンスーン期の降水生起条件は，①まず，大前提として，40mm 程度以上の可降水量が存在していることが必要となります．既往の数値実験による検討では，湖と周辺陸地との大気水循環相互作用によって降水が生じることが示唆されていましたが，熱帯湿潤地域の本地域といえども，これは常に生じるわけではなく，ある一定量以上の可降水量が存在していることが前提として必要になります．この前提が満たされたとき，さらに②インドシナ半島スケールで大気の水蒸気が収束していれば，昼間に降水が生じやすく，湖の南西地域ではポストモンスーン期の約 1 ヶ月間で 60~90mm 程度の雨が降ることが見込まれます．



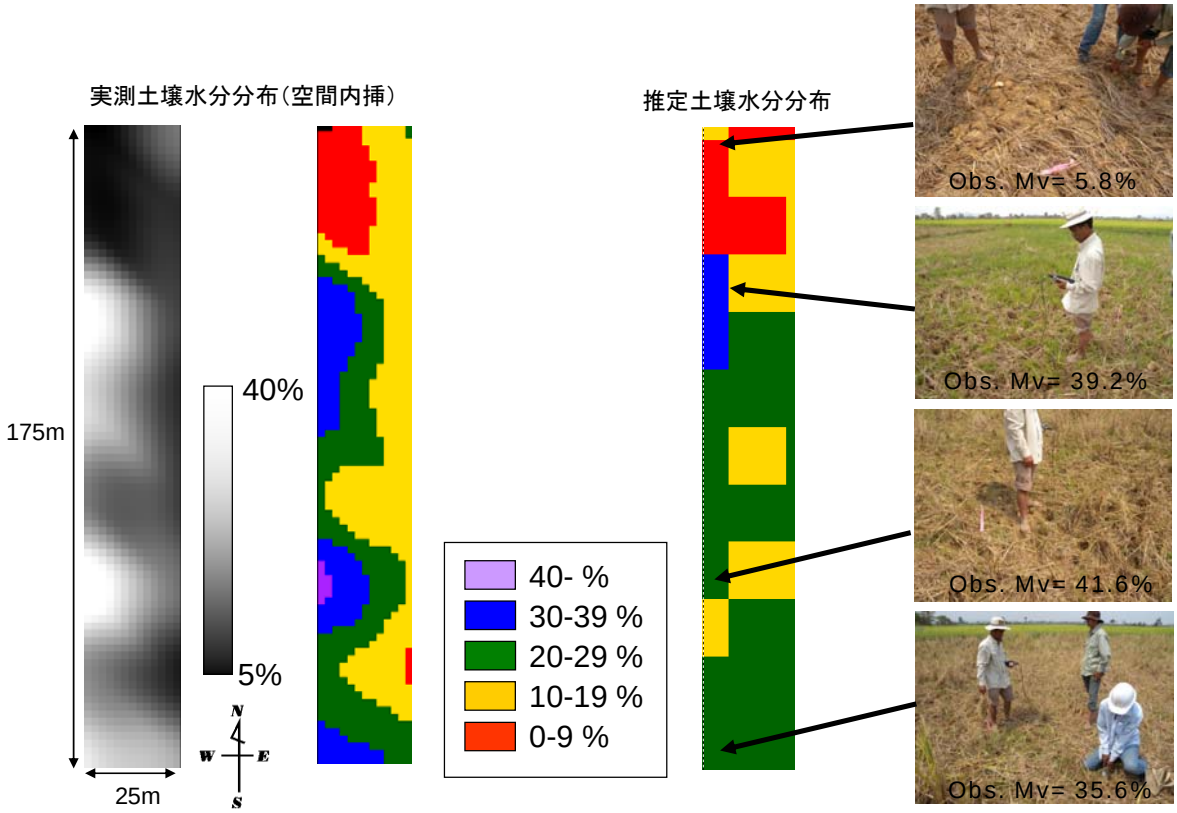
図： ポストモンスーン期の降水生起に関する概念図

＜PALSAR による土壌水分分布推定手法の開発＞

水田における詳細な土壌水分分布の把握を目的に，ALOS/PALSAR データを利用したアルゴリズムの開発を行っています．また，本アルゴリズムの広域適用を視野に入れて，地質や水田形態が異なる地域での検証準備を進めています．



図： 検証サイトにおける土壌水分推定結果



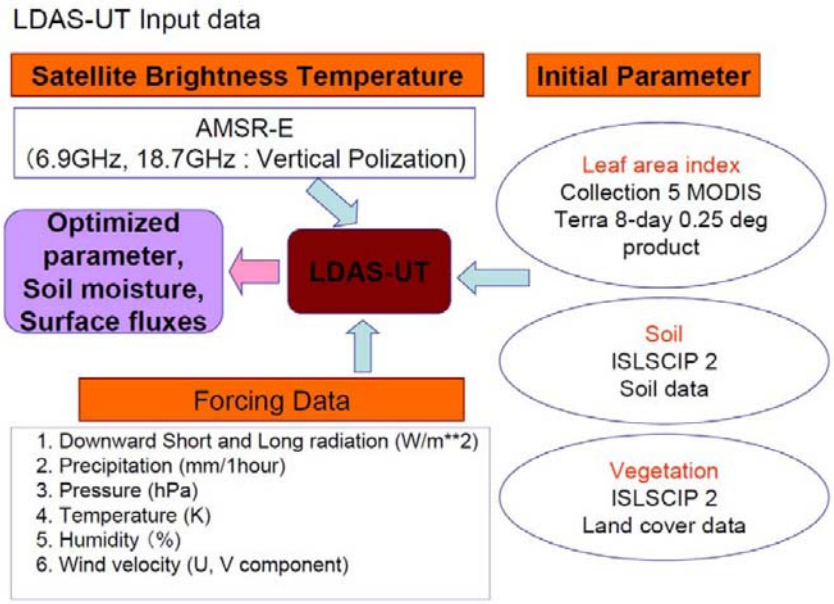
図：検証サイトにおける推定土壌水分の空間分布

＜AMSR-E 陸面データ同化による土壌水分推定手法の開発＞

本検討では，AMSR-E 陸面データ同化による土壌水分推定手法（LDAS-UT）を用いて，本プロジェクトで AWS を設置したプルサット観測地点に適用し，トンレサップ湖西岸域における検討を行っています.

AMSR-E のフットプリントは非常に広く，対象地域で計測される輝度温度は，植生，市街地，水田，水域等さまざまな土地利用からの影響が含まれますが，特に水域では輝度温度に及ぼす影響が大きくなります．プルサット観測地点はトンレサップ湖の西部に位置し，AMSR-E フットプリントの大きさの領域でトンレサップ湖の水面の影響を受ける地点となっています．そのため，フットプリント内に含まれる季節とともに湖水面積が増減するトンレサップ湖の影響を考慮する必要があります.

これまでの検討では，フットプリント内を陸域と水域の２つの土地被覆と仮定して，水域を含むフットプリントにおける輝度温度推定の検討を行いました．この結果，湖水面積が大きくなると，推定される陸域の輝度温度が大きくなり，推定された陸域の輝度温度に大きな値が含まれ，適切に推定されない場合があることが示されました.

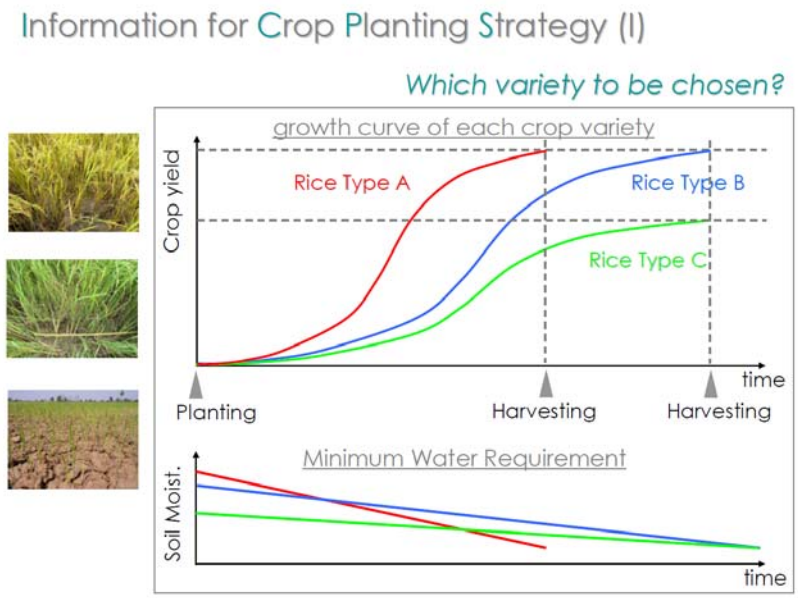


図： LDAS-UT で使用したデータの概要

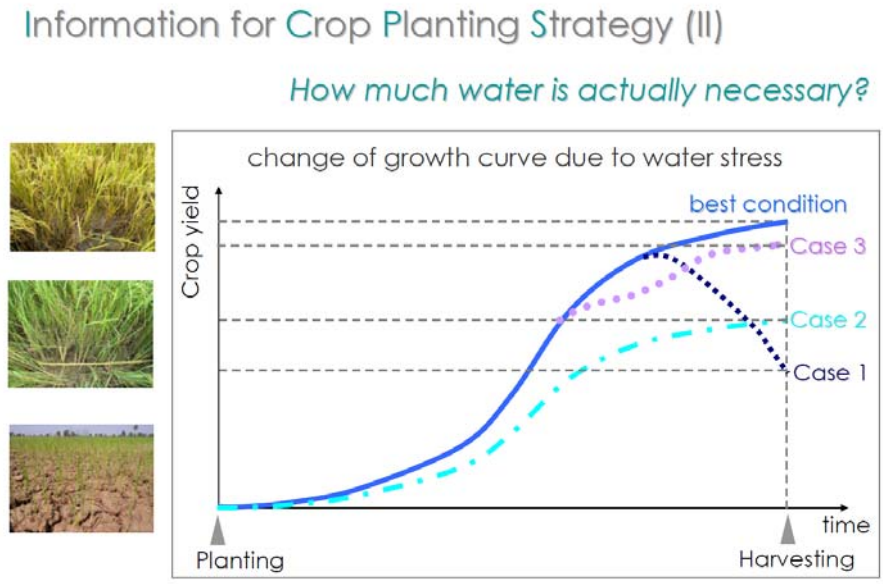
LDAS-UT は、2 つの Pass を持ったデータ同化システムである。これは、AMSR-E の低周波の輝度温度を同化する。モデル操作子は陸面モデルであり、観測操作子は放射伝達モデルである。LSM は、輝度温度を計算する RTM の初期値となる地表面付近の土壌水分、地表面温度、植生温度を計算する。計算された輝度温度と観測された輝度温度の差を最小化することにより土壌水分を推定する。

4. 農業への貢献策

カンボジア各地で現地調査，農業活動と水利用の実態についてのヒアリング調査，文献調査をもとに，灌漑農地，非灌漑農地（天水農地）それぞれに対する水情報の提供による支援策を設計しています.



図： 作付けから収穫までにかかる日数と必要な土壌水分量のイメージ



図： ポテンシャル収量と渇水による減収のイメージ

■パキスタン・イスラム共和国における SAFE プロジェクト

＜プロジェクトテーマ＞
Monitoring Water Cycle Variations & Assessing Climate Change Impacts

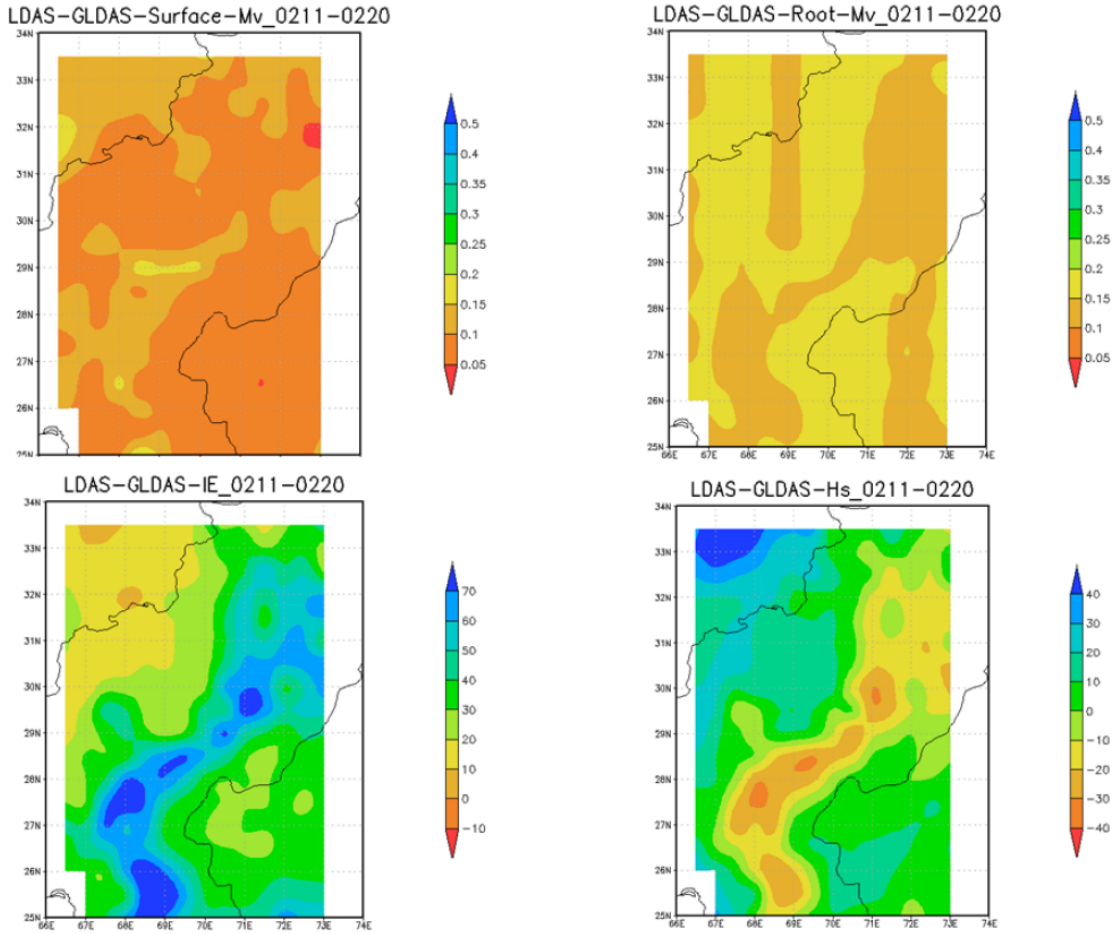
＜協働機関＞
パキスタン気象局，農業研究カウンシル

＜プロジェクト概要＞
気候変動に伴う水資源の大きな偏在、減少の影響を受けるパキスタン国が、その影響を緩和するための政策立案を支援する情報の提供を目的としています。インダス川、特にその上流域では、地上観測網が疎でしかも高標高地帯での観測データは皆無に近いことから降水量（降雨、降雪）の定量的な把握が困難です。また土壌水分や融雪量、地表面フラックスなど、水循環変動の把握と予測に欠かせない物理観測データは流域全域にわたって不足しています。
本研究ではこのように観測が不十分なインダス川流域において、降水（降雨、降雪）、積雪、融雪、土壌水分、蒸発、河川流出の自然系の水循環を記述する水文モデルを開発します。次いで、これらを数値気象予測モデル、気候変動予測モデルと組み合わせて、極端事象（洪水や渇水）や気候変化に伴う水循環変動を予測します。さらに、これらの情報を用いた水資源の最適管理システムを開発し、水資源計画・管理に有用な情報を提供したいと考えています。

1. 渇水モニタリング

パキスタンでの渇水のモニタリングと渇水時の農業への水資の適正利用を実現するためには、降雨観測・予測に加えて、土壌水分、蒸発散の広域モニタリングが必要です。これらの水文量土壌水分量を広域に定量的に把握する手法としては、衛星リモートセンシングで用いられるマイクロ波放射伝達モデルと陸面モデルとを組み合わせ、衛星データを用いた陸面データ同化(LDAS)が有効です。

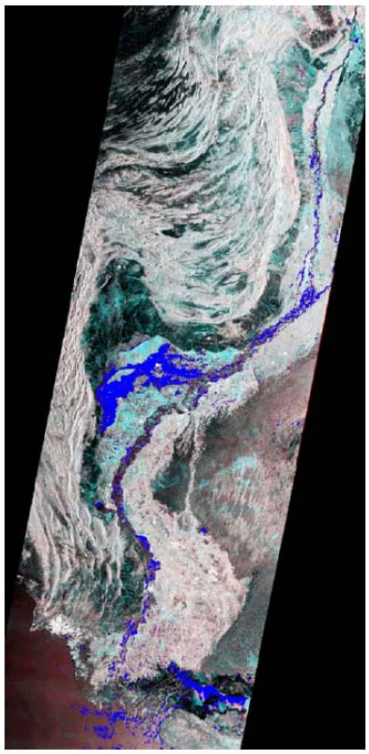
図は、NASA/GLADS より与えられる大気強制力を入力として，東京大学で開発された LDAS-UT より得られた 2006 年 2 月中旬 10 日平均の表層および根系層の土壌水分分布と潜熱および顕熱フラックスです。インダス河沿いに土壌水分が低く、高い潜熱と低い潜熱フラックス帯が確認できます。



図： LDAS-UT より得られたインダス河中下流の表層土壌水分、根系層土壌水分、潜熱フラックス、顕熱フラックスの 10 日平均の空間分布（2006 年 2 月 11-20 日）

2. 洪水モニタリング

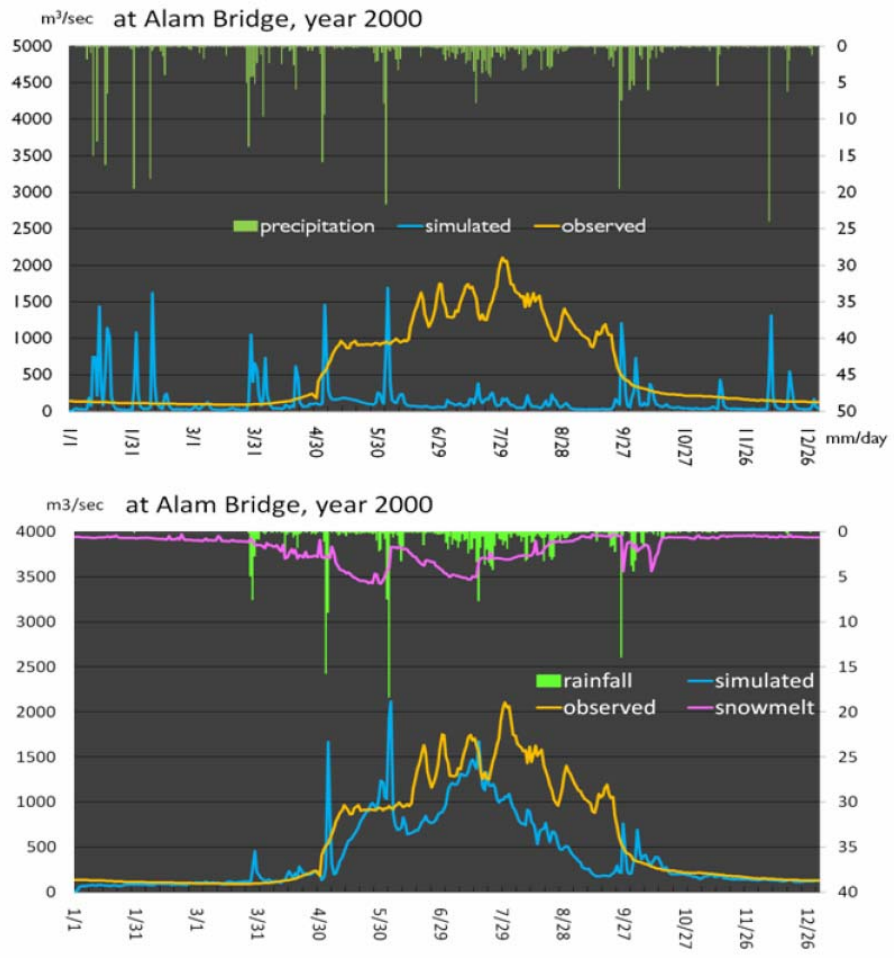
2010 年 7 月末からパキスタン インダス川流域で発生した大規模な洪水では、氾濫域の拡大に伴い甚大な被害が発生しました。そこで、このパキスタンの洪水による氾濫域の広がりを把握するために ALOS 搭載の PALSAR(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)データを用いて氾濫域の抽出を試みました。



図： PALSAR で推定された氾濫域(2010 年 8 月 27 日)

3. 積雪・融雪流出予測システムの開発

エネルギー･水収支を同時に解くことができる分布型水文モデル(WEB-DHM)をそのまま適用すると、冬季降水量を雨と判別しているために冬季流出型が高く、夏季流出が過小評価されてしまいます。そこで，冬季の雨雪判別、積雪寒度指標による積雪層の冷却効果の表現を組み込み、さらに降水量の補足率の調節を組み込んだ結果を図に示しました。ピンク線が積雪量の季節変化を示し、特に冬季から 6 月までの河川流出量の再現性が飛躍的に向上しました。



図：WEB-DHM（上図）に雨雪判別、積雪の負の貯熱効果降、降水量調節を組み込んだ算定結果（下図）

■2010 年度成果公表

＜論文＞

1) 辻本久美子，小池俊雄，会田健太郎，Monichoth, S. I.,Sameng, P., Saravuth, L.：カンボジアにおける地上降水量観測網構築から見出された 2009 年乾季初期降水の特徴，水文・水資源学会 2010 年度研究発表会要旨集, pp. 32-33, 2010.

2) 辻本久美子・小池俊雄: カンボジアのポストモンスーン期降水に関わる広域大気場と局地循環の相互作用，水工学論文集，第 55 巻, pp. S_463-S_468, 2011 年 2 月.

3) 会田健太郎，小池俊雄，Jiancheng SHI: カンボジア水田地域における多偏波 SAR 土壌水分推定アルゴリズムの開発，水工学論文集，第 55 巻, pp. S_367-S_372, 2011 年 2 月.

＜国際会議等での口頭発表＞

1) So Im Monichoth, Kumiko Tsujimoto, Toshio Koike, Long Saravuth, Preap Sameng, Katsunori Tamagawa, Kentaro Aida: WATER CYCLE AND AGRICULTURAL ACTIVITIES DURING THE POST-MONSOON SEASON IN THE STUNG SANGKER RIVER BASIN AND WIDER AREA IN THE WESTERN CAMBODIA, SAFE workshop, Colombo, June 2010.

2) Kentaro Aida, Toshio Koike, Takeo Tadono, Jianchen Shi, So Im Monichoth, Preap Sameng, Long Saravuth: DEVELOPMENT OF MULTI-POLARIZATION SAR ALGORITHM FOR SOIL MOISTURE IN CAMBODIA, The 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Tokyo, 15-17 November 2010.

3) Toshio Koike, Kentaro Aida, Masanobu Shimada, Takeo Tadono: DETECTION OF INUNDATION AREA IN PAKISTAN USING PALSAR, The 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Tokyo, 15-17 November 2010.

4) So Im Monichoth, Kumiko Tsujimoto, Toshio Koike, Long Saravuth, Preap Sameng, Katsunori Tamagawa, Kentaro Aida: WATER CYCLE AND AGRICULTURAL ACTIVITIES DURING THE POST-MONSOON SEASON IN THE STUNG SANGKER RIVER BASIN AND WIDER AREA IN THE WESTERN CAMBODIA, SAFE workshop, Melbourne, November 2010.

＜広報誌等への掲載＞

1) Takeo Tadono, Masanobu Shimada, Kentaro Aida, Katsunori Tamagawa, Toshio Koike, Kazuhiko Fukami, Takahiro Kawakami, “Monitoring Flooding in Pakistan Using ALOS & GSMap Provided by JAXA” GEWEX Newsletter, Special CEOP Issue, Vol. 20, No. 3, p. 8, August 2010.

■2009 年度成果公表

＜国際会議等での口頭発表＞

1) Tsujimoto K. and Koike T., Land-Lake-Atmosphere interaction in the Tonle Sap Lake area and its effects on the post-monsoon rainfall in the western Cambodia, the 6th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore, Singapore, Aug., 2009.

2) Tsujimoto K. and Koike T., Mechanisms and processes for the generation of early-morning clouds over the Tonle Sap Lake in Cambodia, the 6th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle (GEWEX), Melbourne, Australia, Aug., 2009.

3) Saravuth L., Monichoth S.I., and Tsujimoto K., Water cycle and agricultural activities during the post-monsoon season in the western Cambodia, the 5th International Coordination Group Meeting GEOSS Asian Water Cycle Initiative (AWCI), Tokyo, Japan, Dec., 2009.

4) Monichoth S.I. and Tsujimoto K., Progress and future perspective through the SAFE activities in Cambodia, the 16th Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (APRSAF), Bangkok, Thailand., Jan., 2010.