

千葉大学環境リモートセンシング研究センター 助教授

本多 嘉明

「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」

1. 研究実施の内容

本研究の目的は、人工衛星による植物生産量推定モデルの開発とモデルの高精度化である。植物生産量推定にはバイオマスが最も重要なパラメータとなるため、衛星データからの高精度なバイオマス推定モデル開発を主眼とした研究を行ってきた。成果として以下のことが挙げられる。

1) モンゴル草原における大面積検証サイトの運用および検証データ収集手法の確立

大陸規模、あるいは全球を高頻度観測する人工衛星センサーは、必然的に地上解像度が数百mから1km程の中程度解像度センサーとなる。このような解像度のデータと直接比較し得る地上観測データの取得方法はこれまで確立されていなかった。本研究ではこれを可能とする観測機器を開発し、観測手法を確立した。この観測サイトはNASAの衛星地球観測プロジェクト(EOS)の公式検証サイトとして登録された(http://modis-land.gsfc.nasa.gov/val/coresite_gen.asp)。

2) モンゴル草原における高精度なバイオマス推定モデルの開発

上記の観測サイトにおいて、草本植物のバイオマスを人工衛星データから推定するアルゴリズムを確立した。また、草丈をパラメータとして用いると推定精度が向上することを実証し、衛星データから草丈を推定するアルゴリズムを構築した。さらに、世界で初めて種々の土地被覆における二方向性反射を実測する機材および手法を開発した。これらを用い、異なる植生タイプにおいて実測した二方向性反射データとバイオマスに密接な関係があることから、植物の3次元構造を人工衛星から把握することで、推定精度向上が可能であることを示した。また、既存の衛星データを解析し、衛星データから二方向性反射データを取得できることを示した。

3) 二方向性反射データの観測機材の開発

二方向性反射データを利用することができれば、これまでの衛星観測よりも葉面積指数や樹木の分布状況などのより詳しい植生情報が得られるという期待から、二方向性反射データが盛んに研究されるようになった。その結果、International Workshop on Multiangular Measurements and Modelsが今年3回目を迎えた。しかし、二方向性反射モデルと実験室あるいは人工的な小領域の二方向性反射計測が報告されるのみであった。従来は下図左に示すような観測機材が主流であり数十cm四方の観測対象しか観測できず、農地や草原の草本植生しか対象とできない。通常の衛星観測の複数パスを利用した指数も提案されていないのが現状であった。これは、実際の植生を満足に実測することができなかったことが一番の問題点であった。実際の植生と二方向性反射データを結び付けることができるのは本研究で開発した観測機材(下図右)のみであり、森林や湿地帯なども観測対象とすることができる。したがって、十分な観測視野面積を確保できるので実際の植生から検証データ

が取得できる。



従来の観測機材



開発した観測機材



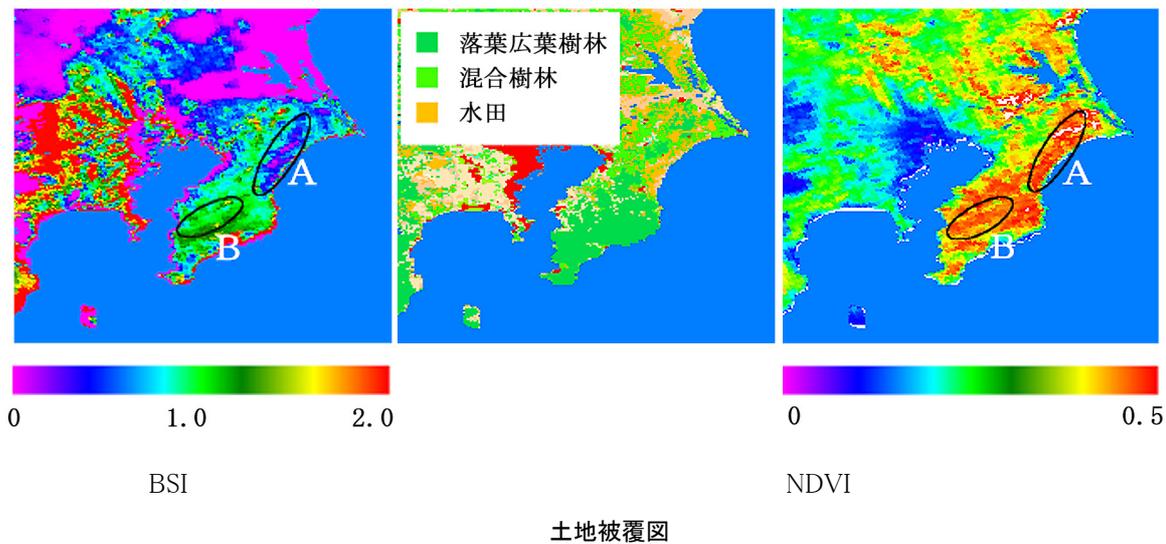
従来の観測機材の観測領域



開発した観測機材の観測領域

4) 二方向反射データを利用した新たな植生指数(BSI: Bi-directional Structure Index)の開発

2) より、3次元構造の情報を含んだ植生の表層状態を区別する必要があることが分かった。そこで二方向反射データを利用した新たな植生指数 BSI を開発した。下の図は房総半島の BSI 画像、土地被覆図、NDVI 画像を示しており、これらを比較すると水田と混合林が NDVI では区別できないのに対し、BSI 画像でははっきりとした違いを示している（土地被覆図および現地写真参照）。BSI が植生の3次元構造の違いを表すことから、植生タイプの違いやバイオマスを反映していることが分かった。そこで、本研究では東アジアバイオマスマップを試作し、良好な結果を得ている。



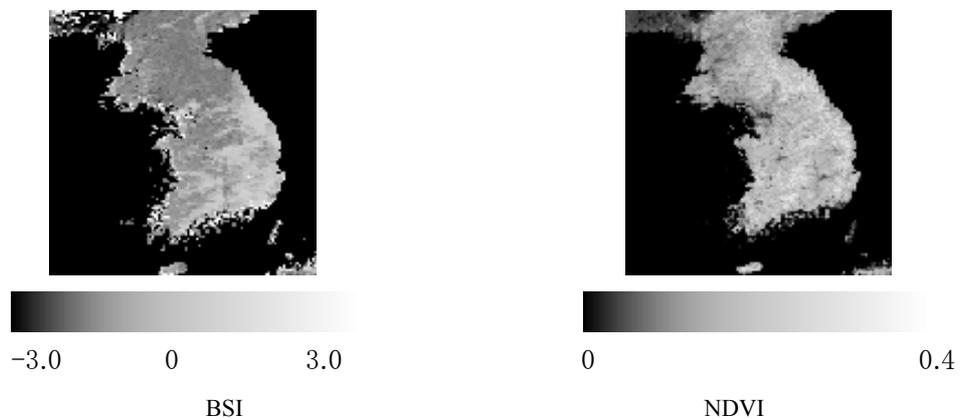
(A) 水田



(B) 混合林

5) 広域バイオマスマップへの応用研究

衛星による植生の3次元情報を考慮した草本のバイオマス推定が高精度で行うことができた。この過程で BSI (植生の3次元構造を表現する指数) を提案した。この指数を使うと地上解像度 6km でも次のような結果を得ることができる。





地形図 (引用：二宮書店)

これは1998年8月初旬の朝鮮半島の画像である。右が従来から使われている正規化植生指数で明るい色が植生の密度が高いことを示しており、半島全体に植生が繁茂していることを示している。一方、左のBSI画像を見ると半島の南半分の東側のみが高い値を示しており大きな植生があることを示している。半島の地形図を見ると半島全体の東側に山脈が広がっているが、北半分の東側の山脈にこの地域のBSI値が低いことから大きな植生が少ないと考えられる。これらの結果をバイオマス推定に活用する研究を実施した。

2. 研究構想

1. 基本構想

<研究の背景>

全球での植物生産量を定量的に把握することが物質循環解明(水、二酸化炭素など)、地球環境保全(炭素固定など)、食料問題解決などのために不可欠である。人類存続のキーワードであり、衛星観測による植物生産量の全球把握は緊急のテーマである。

<着眼点>

衛星観測スケールと地上検証スケール(現地観測サイト)の相違は、推定する物理量の精度に直接影響する。高精度定量化を図るためには、衛星観測スケールに対応したサイト(4km×4km)内での植生・地表状態等の均質性と安定性が必須条件である。的確な推定手法の確立には、サイトの適切な選択と新たな実証手法の開発(直接サンプリング手法の開発、飛行体による広域高速検証手法の開発等)が必要であり、これを中心として研究開発を行う。

<コンセプト>

全球的な植物生産量の把握と、正確かつ定量的な評価には、克服すべきいくつかの問題

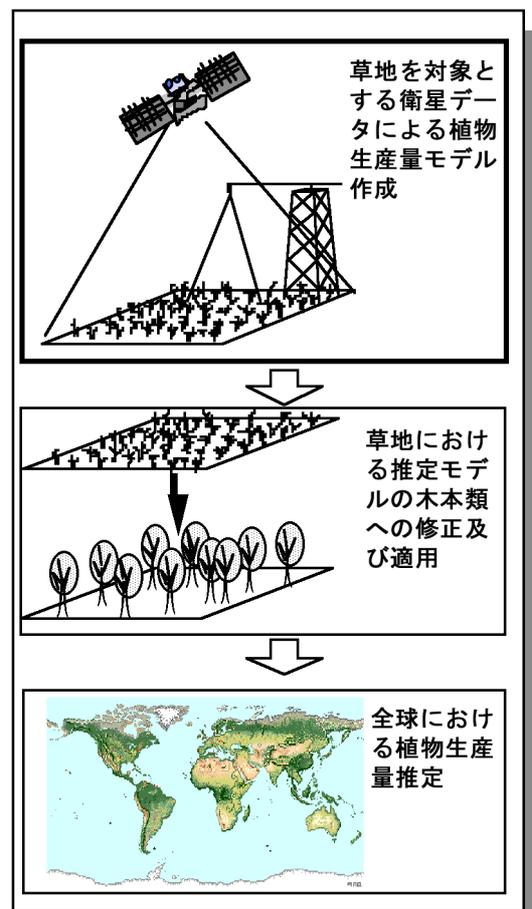


図1 衛星データによる全球の植物生産量推定手法確立の構想

がある。広域化の為に必要な衛星データから、直接的に生産量を推定する手法は確立されておらず、実証的手法を開発する必要がある。これには、従来の手法にはない衛星による植生被覆状態の一時的な知見と物理量としての生産量を関連づける新たなパラメータを開発する必要がある。本研究では、草本植生をモデルとして、これに適合する現地観測サイトの定常及び集中運用を通して、衛星からの広域的かつ高精度定量化の図られた植物生産量推定手法を開発する方針である。

<将来展望>

本研究では、草本モデルの開発が主である。この手法の開発により、砂漠・半砂漠・草原等の全陸地の約60%を把握することが出来る。さらに、確立されるこの手法を基にして森林植生に適用可能な手法を開発することにより、陸域植生の大半をカバーすることが可能となる。

2. 研究の内容

<研究のアプローチ>

当研究グループの最終的な目的は、図1に示す研究段階を経て衛星観測による全球陸上植生の植物生産量準リアルタイム観測を行う手法の確立と全球陸上植生の植物生産量（バイオマスの時間差分によって一定の機関の植物生産量は定義される）の把握である。そのためには複雑な現地観測データを必要としない衛星観測による植物性産量推定手法が必要である。しかし、一般に高頻度観測衛星による観測の空間スケールの最小単位は1から数km²程度である。それに対応した広大な地上で定量的な植物生産量を実測することは不可能で、植物生産量を推定しても実証的に検証することができなかった。植物生産量を実証的に検証する手法を確立することも信頼できる植物生産量推定の開発にとって重要なことである。陸上の植生は草本を主体とした草原植生と木本を主体とした森林植生の二つに大きく分けられ、全球陸上植生の植物生産量を把握するためには両方の植生の植物生産量を把握する必要がある。しかしながら、この二つの植生には大きな違いがある。それは植生の

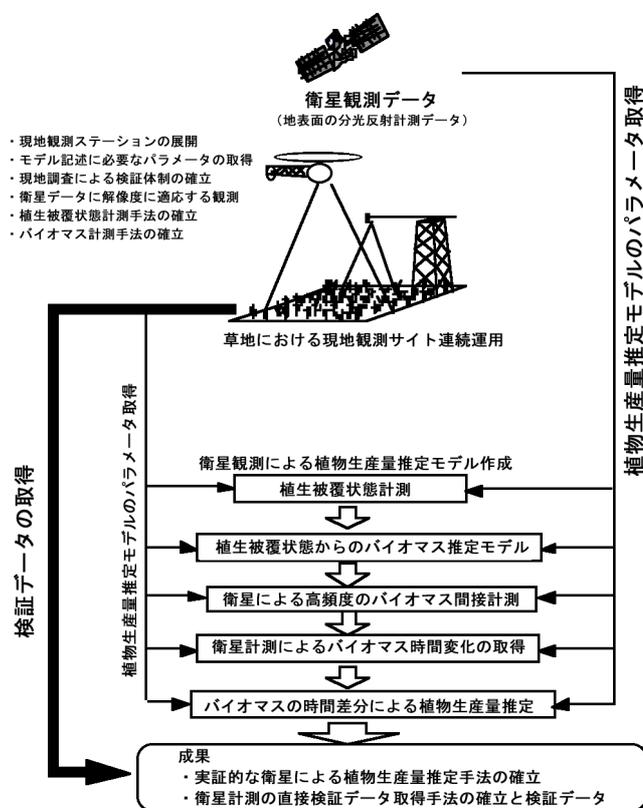


図2 本研究の流れ

構造的な違いと各々のバイオマスに占める生産量の割合の違いである。森林植生が高木層、亜高木層、低木層、林床のように立体的に多層構造をなしているのに対して草原植生は一層構造と取り扱うことができ、衛星による観測として取り扱いやすい。また、森林植生の植物生産量の計測は、一般的にバイオマスに占める植物生産量の割合が低いことなどのために5年程度の長期間で行われる。それに比較して草原の植物生産量は1日単位あるいは数日単位の短期間で計測でき、1年間で何度も開発される手法を試すことができる。手法開発の観点からは、草原植生における植物生産量推定手法を確実なものにすることが重要である。そのためには平坦で均質な植生が広がる広大な草原を対象にして実証的に手法開発を行う必要がある。そのような条件を満たす草原が東モンゴルに存在しており研究を進める上でその草原の利用が望まれる。

<主要な研究項目>

本研究では、次の考えに基づいて研究を進める。草本主体の草原植生においては植生被覆状態（植生被覆率など）の推定を衛星データによって推定できる。さらに、草原タイプごとに植生被覆率（植生被覆率状態を表す一つの指標）とバイオマスが強い相関を持っている。そこで衛星データからバイオマスの時系列データを作成し、ある時点とある時点のバイオマスの差分からその期間の植物生産量を推定する。



図3 車両による移動多点観測

図2に示すようにこの基本的な考えに基づいて開発された植物生産量推定モデルに必要な観測パラメータを衛星観測のみから得た場合と現地観測から得た場合の推定結果を求める。さらに刈り取り法によって植物生産量を実測して真値を得る。

この真値を用いて現地観測から得られた正確な観測パラメータによる植物生産量推定値を評価することにより、推定モデル自体の検証が行える。この真値と現地観測による植物生産量推定値を用いて衛星による植物生産量推定値を評価することにより、衛星データの高精度な利用の検証が行える。

これらを実現するためには主に次の3点を明らかにする必要があり、主要な研究項目としてあげることが出来る。

- 1) 実証的な検証情報の取得手法開発
- 2) 衛星観測によるバイオマスを推定するのに最も効率的な植生被覆状態指標の開発
- 3) バイオマスの時間差分から植物生産量を推定するモデルの開発

＜具体的な手法＞

本研究は次のような順序で進める。

1) 観測サイトの選択

(a) 広大で均一な植生 (b) 平坦な地形 (c) 立体構造が単純な植生 (d) 専有利用の条件を満たす東モンゴル草原の中で最適の地域を高解像度データによる調査と現地調査で決定する。

2) 現地観測手法の確立

現地観測を効率よく正確に行うために①～③の開発が必要である。

①植生被覆状態の計測システムの開発

植物生産量の直接計測によって真値を得ることができるが、この方法はいわば破壊試験であり、観測対象を破壊することになる。これでは連続的に変化する植物生産量をまったく同じ対象で連続的に把握できない。本研究では既に二次元的な情報である植生被覆率や分光データから間接的に地上部の植生バイオマスを推定する手法で一応の成果をあげた。また、移動多点観測（図3）や植生被覆率や分光データを現地で短時間で収集する無線誘導無人ヘリ観測などの装置開発を既に手がけているが、これらの高度化を行う。対象物のステレオイメージを異なる複数の太陽高度で取得し三次元のより詳しい植生被覆状態の情報を取得する方法を開発する。

②特定面積のバイオマスの直接計測システム

一般に草原で行われているバイオマスの刈り取り法は1 m²程度を対象として行われているが、本研究では数十m²の刈り取り調査が必要になるが、バイオマスを正確に計測するシステムの開発が必要になる。1996年の実験では電機芝刈り器と電機掃除機を組み合わせる予備実験を行ったが、測定のはらつきを無くす改良が必要である。

③無線誘導無人高速ヘリコプター観測システム

定期的に観測サイト全体の地表面分光情報と植生被覆状態を無線誘導無人高速ヘリコプター観測で把握し、観測サイトが均質な状態を維持しているか正確に把握し、サイト全体の植物生産量の把握に役立つ。観測サイト全体の分光情報を用いて衛星情報の大気補正の各手法の評価が行える。そのためには無線誘導無人高速ヘリコプターによる高精度の分光情報取得をGPS情報を利用して熟練オペレータなしで行えるシステムの開発が必要である。

3) 植生被覆状態の新たなパラメータ開発

草原で実測されたバイオマスを正確に記述できる植生被覆状態を表わすパラメータにどのようなものがあるかを明らかにし、その中から衛星から推定できる植生被覆状態パラメータを決定する。すなわち、衛星がもたらす地表面の分光情報から推定可能な植生被覆状態のことである。1996年までの研究では植生被覆状態を表わすパラメータとして植生被覆率を利用して成果をあげてきたが、植物層の厚さなどの情報を含む三次元計測などにより精度を向上した植生被覆状態を示すパラメータの開発を行う。このパラメータを用いてより高精度のバイオマスの推定手法の開発を行う。

4) 衛星による高頻度バイオマス間接計測の開発

衛星観測から直接バイオマスを推定することはできない。しかしながら、衛星観測から植生被覆状態を推定することは可能である。既存の研究では植生指数（赤色センサーや近赤外センサーなどを利用した指数）を用いて植生被覆率を推定する手法が一般的であった。しかし、草原のような単純な構造を持った植生といっても3次元の構造を持っている。高頻度観測衛星はその軌道の特性と観測幅が大きいことから複数の軌道を利用すると同じ地表面を違った角度と異なる太陽位置で観測することができる。異なった観測条件で同一の対象を観測したとき、植生が平面構造と仮定した場合に推定される観測結果と立体構造を持った植生の観測結果では違いがある。この違いから植生の3次元構造の情報を含んだ新しい植生指数を提案する。3次元構造を表現した植生被覆状態を新しい植生指数で推定するモデルを開発することにより、衛星観測で植生被覆状態を今まで以上に正確に推定できる。ここで開発される推定モデルの検証は観測サイトの実測値によって評価でき、改良を加えることができる。このようにして衛星観測から植生被覆状態が推定されると前項で開発された植生被覆状態によるバイオマスの推定手法を用いてバイオマスが推定できる。

5) 植物生産量を推定するモデルの開発

実学的な林学や農学の分野と理学的な植物学や植物生態学では、バイオマス自体の定義が異なっている。一般に林学や農学では地上部にある植物の生態重量をバイオマスと定義し、これに対して植物学や植物生態学では地表面下の根系を含めた生態重量をバイオマスと定義している。ところで、植物生産量はバイオマスの時間差分で定義されるから地上部のバイオマスの時間差分を求めることによって実学的な植物生産量を求めることができる。植物学的な植物生産量を得るためには、地上部の植物生産量から植物生体全体の植物生産量を推定する必要があるが、これは植物学あるいは植物生態学の生産モデルの分野に託すべき領域である。

ここで問題になるのは、2時期の異なる観測条件下における衛星観測で推定されたバイオマスが植物生産量を正確に導出できるだけの精度を持っているかということになる。バイオマス推定の精度に応じて差分を取る期間を調整する必要がある。この調整は地上で得られた検証情報を用いることによって可能である。

以上の研究を完了すると、衛星観測を用いて植生被覆状態とバイオマスの関係が明らかにされた草原植生について一定期間の植物生産量の推定が可能になる。また、この研究を通してグローバルスケールの植物生産量推定の次のステップである詳細な現地観測を必要としない植物の光収支を利用した衛星観測による植物生産量の推定手法開発の基礎情報を得ることができる。

<進め方>

モンゴル草原に設定する観測サイトにおいて正確でリアルタイム性のある実証的な検証情報を取得する。なお、モンゴル草原に設定する観測サイトはモンゴル国立リモートセン

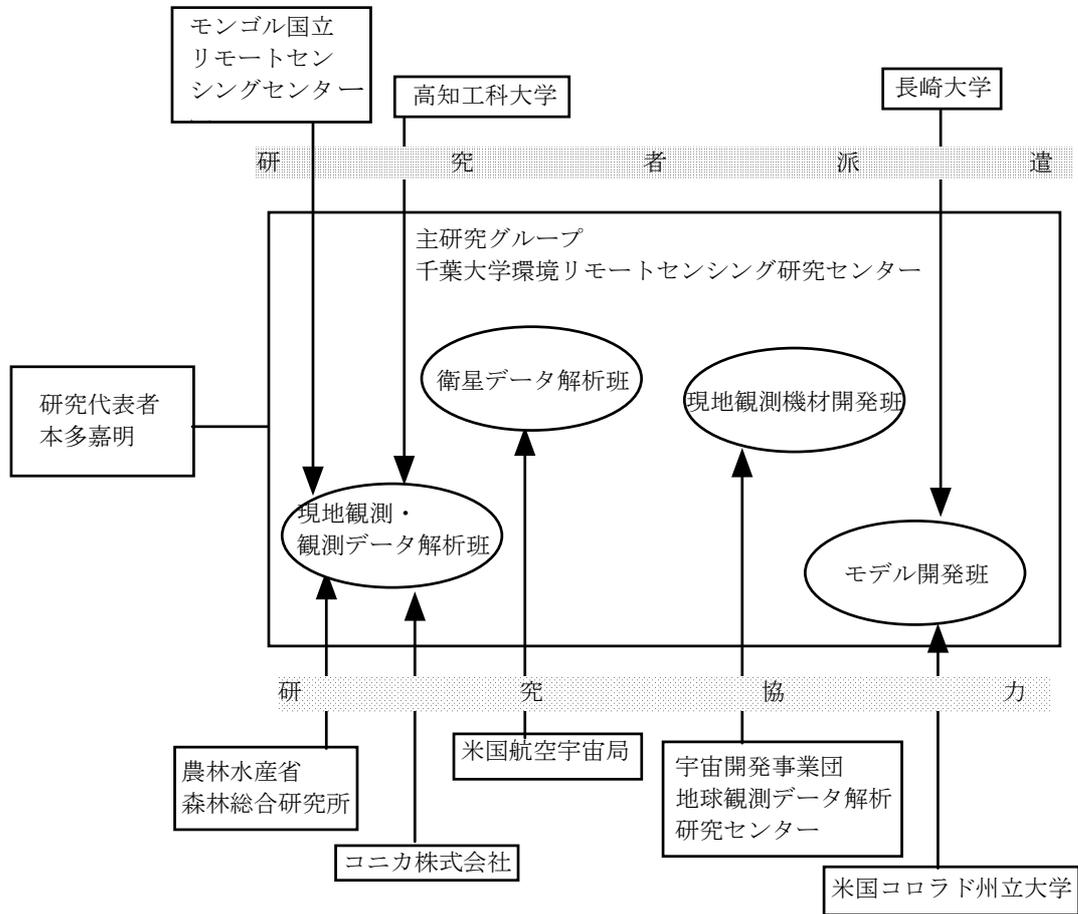
シング研究センターと千葉大学環境リモートセンシング研究センターの部局間協定に基づいてモンゴル政府の協力を得て運用される。

また、日本国内の主研究グループにおいて諸機関からの協力を得ながら衛星観測によるバイオマスを推定するのに最も効率的な植生被覆状態指標の開発およびバイオマスの時間差分から植物生産量を推定するモデルの開発を進める。また、夏期には現地における重点的な観測を実施し、その他の期間はモデルや手法開発に重点をおいて研究を実施していく。これにより衛星データによる植物生産量推定結果を実証的に検証することができ、衛星による植物生産量推定モデルの開発とモデルの高精度化が可能になる。

3. 研究実施体制

研究代表者 本多嘉明を中心に千葉大学環境リモートセンシング研究センター内に主研究グループを設置する。研究項目にしたがって主研究グループを①現地観測・観測データ解析班、②衛星データ解析班、③現地観測機材開発班、④モデル開発班の4班に分ける。各班には環境リモートセンシング研究センターのスタッフが少なくとも1名以上関わり、高木方隆助教授（高知工科大学）、森山雅雄助教授（長崎大学）、S. Khudulmur センター長（国立リモートセンシングセンター）らは研究者派遣という形で主研究グループに参加する。特に、S. Khudulmur センター長（国立リモートセンシングセンター）はモンゴル現地観測時のモンゴルサイドの代表を務める。さらに、C. J. Tucker 博士（NASA（米国航空宇宙局）/GSFC）、D. Ojima 博士（コロラド州立大）、小熊宏之（宇宙開発事業団）、粟屋善雄博士（農林水産省森林総合研究所）、木村凱昭氏（コニカ株式会社）らは助言や情報・データ交換を通して主研究グループに研究協力者として参加する。

3. 研究実施体制



4. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 10 年 12 月 10 日	CREST PEPPERS closed meeting -Mingolia campaign in 1988-	千葉大学 けやき会館	9 名	平成 10 年夏のモンゴルにおける現地観測の手法、収集データの内容、解析結果の紹介と今後の方向性についての討議を行った。本会議以前に、観測結果をまとめた CD-ROM 製作しており、その内容についての検討も行った。 モンゴル観測参加者（本多、高村、梶原、山本、近田、高木）がそれぞれ担当した観測結果についての細かい説明を CD-ROM を用いて紹介し、一部解析の終わったものについては、観測データの解析によって明らかになった知見を紹介した。米国から参加した Huete 氏からは、2 方向性反射特性の観測手法に関するコメントがあり、次年度の観測で氏の提案する方法を試み、これまでのものと比較することが検討された。Elvidge 氏からは CD-ROM について、観測キャンペーンの成果を WWW 上で閲覧できるような成果物としてまとめたことについて、非常に評価できるものであり、今後も継続していくべきだとのコメントがあった。
平成 13 年 2 月 27～ 28 日	The upcoming international workshop on grass land monitoring from space and ground	青葉の森公園 芸術文化 ホール	33 名	9 名の発表者はすべてゲストスピーカーで、人工衛星による草原モニタリングをテーマとする発表をおこなった。本ワークショップでは、最後に Discussion Session を企画し、今後、草原モニタリングにかかわる研究活動の方向性を議論した。その結果、現状で圧倒的に不足しているのが現地観測のデータであることが確認され、これらを収集し、取りまとめたデータベース構築が必要であるとの共通認識を得た。現地観測のみならず、衛星以外のデータ（地形データ等）を取りまとめることも重要であり、現地観測データとあわせて提供するようなデータセンターの必要性が認められた。世界的にも、現地観測データと衛星やその他の補助データを統合して扱えるような機関が少ない上に、研究者同士もデータに関しては閉鎖的である。したがって、始めはデータそのものはクローズであっても構わないから、どの研究者あるいは機関がどのようなデータを有するのかをまとめることが先決である。そのために、今回のワークショップ参加者を手始めとする研究者ネットワークをつくることが提案され、了承された。

5. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内8件、海外0件)

1. 山本浩万、本多嘉明、梶原康司、岡野千春、黄少博、松岡真如 (CEReS) : 「衛星による草原バイオマス計測のための移動多点現地観測データ解析に関する研究」写真測量とリモートセンシング Vol.36, No.4, 1997 38-49
2. 本多嘉明、梶原康司、山本浩万、岡野千春、黄少博、松岡真如 (CEReS) : 「モンゴル草原における広域観測領域を代表する最小面積に関する研究」、写真測量とリモートセンシング Vol.36, No.5, 1997 20-26
3. 松岡真如、建石隆太郎 (CEReS) : 「時系列モデルを用いた AVHRR データにおける反射率の補正に関する研究,写真測量とリモートセンシング」,vol.37, no.2, p.4-14, 1998.
4. 永野 修、山本浩万、岡田泰征、本多嘉明、梶原康司 (CEReS)、クリストファー D. エルビッジ : 「DMSP と GMS を用いた大規模森林火災モニタリング手法の検討」、写真測量とリモートセンシング, vol.37, no.3, p.32-41, 1998,
5. 橋本俊昭 (NASDA) : 「外部標定の原理を用いた ADEOS 衛星の挙動推定」、写真測量とリモートセンシング, vol.37, no.6, p4-13, 1998.
6. 高村民雄,岡田格 (CEReS) : 「雲・放射収支観測と CERES」、日本リモートセンシング学会誌、vol.18, no.5, p.75-85, 1998.
7. 近田朝子 (JST CREST)・山本浩万 (NASDA)・梶原康司・本多嘉明 (CEReS) ; 衛星データを対象とした BRF モデルを用いた草地植生の草丈算出に関する研究 : 写真測量とリモートセンシング” vol.40 6号、2002. 1/8
8. 本多嘉明 : 「産業用無人ヘリコプターを用いた空中観測システム」、月刊『測量』8月号、2002. 8/10