

水文学へのリモートセンシングとGIS技術の応用

近藤昭彦

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

本稿はリモートセンシングとGISを水文過程研究の重要な手法とし、さらに社会に貢献できる成果を生み出すためのリモートセンシングとGIS技術の応用のあり方について論じた。水循環研究の対象はグローバルからローカルスケールにわたる。グローバルは多数の地域からなり、個々の地域は固有の多様性、関連性、空間性、時間性、すなわち地域性をもつ。人間社会に還元できる科学の成果を出すためには地域の視点が必要である。同時に、地域をグローバルの中に位置付けることによって、国際社会に還元できる成果を生み出すことができる。このような応用はGISによって空間上に集積された知識ベースによって実現できると考えられる。

キーワード：リモートセンシング、GIS、水文学、地域性、知識ベース

Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Hydrology

KONDOH Akihko

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

The manner of applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) to hydrology was described to make them important techniques for hydrological applications and to produce achievements that contribute to human life. The targets of hydrology ranges from local to global scales. Global scale involves a number of local regions. Each region has peculiar variability and interrelationships of the components, spatial and historic nature, and they construct a regional characteristics. To achieve the outcomes that contribute to the human society, the viewpoint based on the region is necessary. At the same time, the outcomes that will help international exchanges will appear by locating the regional experiences on the global context. Such an application will be realized by knowledge base constructed on the GIS.

Key words: remote sensing, GIS, hydrology, regionality, knowledge base

はじめに

水文学が研究対象としている”水循環”という言葉からイメージされる現象には時代による変遷があったように思われる。1980年代までは水循環とは蒸発も含む陸水の循環の意味合いが強かった。それが1990年代に入ると気候変動がクローズアップされてきたこともあり、大気中の水蒸気循環のイメージが強くなった。しかし、両者を併せたものが水循環に他ならず、21世紀に入った現在は総括的な水循環認識の必要性が高まってきたといえる。水文素過程の個別研究では水問題を含む地球環境問題に対する社会の要請に応えられなくなってきたからである。

水は世界の中で偏在し、地域性に従って循環している。したがって、水問題を議論するためには地域の特性の理解が何よりも重要である。一方、昨今のグローバル化の波の中で、地域の水問題も世界のコンテキストの中で議論する必要性が生じてきた。そのためには空間と時間の枠組みを構築した上で、その中に地域の問題を位置付ける必要がある。ここにリモートセンシングおよび地理情報システム(GIS)による情報集積の重要性がある。

空間情報として水循環に関する情報を収集する目的は大きく分けて二つのトレンドがある。一つは気候変動予測のための水循環情報収集であり、もう一つは水資源・水管理のための情報

収集である。気候変動の人間生活に対する影響は必ずしも明らかにはなっていないが、将来に対する不安要因であることは認めざるを得ない。しかし、気温や降水量が変動したときにどのような現象が生じるのか、まだ良く理解されていないのではないかと思われる。気候変動がグローバルな現象だとしても影響を受けるのは人間の活動拠点である地域であり、地域には個性が存在する。気候変動の影響評価にフィールド科学の視点、すなわち地域の視点がどれほど生かされているだろうか。危機的な状況を強調することは政策としてはあり得るが、科学の立場からは地域ごとの水循環の実態の正確な認識に基づく影響評価が必要である。

もう一つの目的である水資源や水管理に関する問題は地域性を理解することなしに解決することはできない。地形、地質、気候、植生、土地被覆等の場の条件に人間活動や気候変動等による歴史性の組み合わせによって形成される地域性は地域の水循環のあり方を決定する。それに適応した手法によってのみ地域における水資源の開発や適切な管理を行うことが可能になる。したがって、人間社会の立場からは地域の視点による水循環情報の集積の必要性が見えてくる。よく言われることであるが、水問題も含む地球環境問題が顕在化してきた 21 世紀に求められている水循環研究は地域に還元できる成果を創出するものでなくてはならない。そのためのフレームワークとなるものが GIS であり、時間・空間情報を提供するリモートセンシングである。

本論では、リモートセンシングと GIS の応用について述べるが、その技術的側面については触れない。すでに、環境解析技術としては十分成熟しており、多数の商用ソフトウェアが利用できるからである。現在、問題となっているのはむしろ、何を組み合わせ、何を導くか、という点である。ここに地理学が蓄積してきた知識を応用する場が存在する。また、GIS は空間解析技術とともに、データベースとしての機能を有しており、数値だけでなく文章や画像として記録された空間の属性を蓄積することができる。本論では時空間の中に蓄積された水文情報の解析のあり方についての考察を試みる。

リモートセンシングと GIS 技術の応用の視点

気候変動のように全球スケールの現象の予測には大気大循環モデル (GCM) のような演繹的な方法をとらざるを得ない。この場合、モデ

ルに物理量を提供することがリモートセンシングの重要な使命のひとつになる。しかし、得られた気候変動の影響を地域のスケールで評価しようとする多様で複雑な現象に直面せざるを得ない。この場合、フィールドにおける帰納的手法、経験的手法が威力を発揮する。メカニズムは不明でも水文学的知識により影響評価に対する判断が得られる場合も多い。もちろん、得られた経験的関係の物理性の検討から新たな手法が発見される可能性もある。

ローカルはグローバルの一部であり、両者は別個に存在するわけではないが、両者を同時に理解するためには階層的な見方が必要である。支配方程式は同じかも知れないが、見えている現象をおもに支配する要因が異なるからである。流出現象を例にとると、1980 年代に研究が進んだ谷頭部における流出発生メカニズムに関しては様々な概念が提唱され、現象の多様性が理解された(田中 1989)。しかし、マクロ水文モデルが対象とする流域スケールになると谷頭部における現象はより時空間スケールの大きな現象には影響をあまり及ぼさなくなり、より大きなスケールの現象に支配されるようになる。だからマクロ水文モデルで流出の再現ができるのである。しかし、扱う問題、例えば崩壊や水質形成、水汚染問題では谷頭部の現象が重要になってくる。

また、乾燥・半乾燥地域における水資源として極めて重要な地下水を考えると、広域の地下水流動系 (regional groundwater flow system) はおもに大地形によって決定される。一方、局地的な地下水の流れ (local groundwater flow system) は地質、小地形に強く影響されるので、井戸掘削地点の選定といった実務的な作業においては近傍の地質・地形状況を精査する必要がある。しかし、まず広域地下水流動系の中で掘削地点を位置付けてから局地的な条件の検討を行わないと目的を達成することは困難である。グローバルとローカルの関係もこれと同じ関係である。

このように地域を単位とすることによって具体的な水循環の解明とその利用・管理を行うことができるが、同時にそれをグローバルの中に位置づけることによって単なる情報を知識あるいは智慧として国際社会に還元できる仕組みが生まれてくる。この場合の地域とは、それを構成する要素の間の多様性、関連性、時間性、空間性 (榎根 2001) に関して等質性を有する範囲と定義でき、水収支等の水文条件に対して等質性を考えると水文地域を定義することができる (榎根 1972)。この水文地域を対象として水循

環情報を収集することによって地域に対応した、人間社会に還元できる成果を生み出すことが可能と考えられる。図1にフレームワークとしてのグローバルとローカルの関係の模式図を示す。グローバルの中には多数の地域が含まれ、各地域の中にはさらに分割された地域が含まれる。人間生活に関わる水文現象はより小さな地域レベルによって支配されるが、それを大きな空間スケールのコンテキストの中にも位置付けるためにGIS技術を利用することができる。

リモートセンシングによる情報抽出の方法

グローバルスケールのモデルに供給するリモートセンシング情報は土壌水分、植生情報、雪氷情報、等々があるが、数え上げることができる程度である。しかし、地域に対応したリモートセンシングによる情報抽出手法は極めて多岐にわたる。土壌水分や地表面温度といった物理量、あるいは植生指数のような指標はリモートセンシングデータによる高次情報そのものであり、水文情報でもあるが、これらの判読によって抽出できる情報はまた多岐にわたる。

表1は蒸発散、浸透、地下水、流出といった水文素過程ごとに可能と考えられる情報抽出の手法についてとりまとめたものである。ここには単なる物理量（土壌水分、降水量、等）の抽出のみでなく、水文素過程とリモートセンシングによるマルチスペクトル情報との間の経験的関係に基づいて推定可能な情報、および判読によって抽出可能な情報も含まれている。

たとえば、蒸発散量は植生指標と良い相関があることは多くの研究によって認められており（たとえば Kondoh 1995; Kondoh and Higuchi 2001）どのような時間・空間スケールの蒸発散量を求めるのかを明らかにすれば、十分実用的な手法である。もちろん、厳密な現地観測で求められる蒸発散量の精度をリモートセンシングに求めることはできないが、地上観測網を高密度に展開することも実質的に不可能である。リモートセンシング画像の中に含まれる空間情報を利用して蒸発散量の空間分布を推定できる可能性があり、これは他のものに代え難いリモートセンシングの利点である。

表1の内容はまだまだ不十分であり、今後も検討を継続する必要がある。1990年代は1992年打ち上げのJERS-1、1996年のADEOS-1、1997年のTRMM/PRといった日本の衛星、センサーが地球環境観測に重要な役割を果たした期間でもあった。21世紀に入った現在、米国のTarra、

Aqua衛星、日本のADEOS-II衛星（みどり2号）ははじめ複数の衛星が運用段階に入り、地球観測の黄金期に入っている。様々な空間スケールにおける情報抽出の手法について多角的なアプローチから検討しておく必要があると同時に、個々の成果を統合する仕組みとしてGISの利用を進めるべきである。

水循環情報の蓄積の方法

デジタル地理情報としての水循環情報は数値情報と空間情報に分けられる。数値情報は降水量、河川流量、といった地点における観測値そのものであり、既存のデータベースシステムによって簡単にデータベース化することができる。しかし、数値情報は空間情報の中に位置付けると新たな情報を生み出すことができる。簡単な例では地形、土地利用、植生、地質、土壌、気候値等の空間情報の中に河川流域の流況に関する情報を置くことによって、地域性に支配された流出特性を理解することが可能となる。これ以外にも空間性を認識することによって理解することができる現象は多数存在する。

ここで、森林の水源涵養機能に関する議論を考えてみよう。湿潤地域に位置する健全な森林は水源涵養機能を持つことは科学的に証明されている（たとえば、塚本1998を参照）。ではなぜ未だに議論の対象になるのだろうか。ここで半乾燥地域を考えると、森林では樹木が吸水するため土壌は深部ほど乾燥している事実に出会う。すなわち気候帯によって水源涵養機能に対する森林の機能が異なるのである。このように、空間的視点を取り入れることによって現象の理解を容易にする事例は多くある。もっとも、乾燥地域の森林といっても人間の手の加わった疎林であることが多い。十分時間を経て森林が再生したとすると、熱収支が変わり、森林が雨を呼ぶという現象も考えられなくはない。この場合、時間性の理解が重要になるが、これもデータベースによる蓄積を行っておくことによって将来理解が可能になるかもしれない。

水循環情報を空間情報として解釈するにはベースマップが存在すると便利である。いくつか考えられるが、流域区分図や水文地域図といったベースマップが考えられる。水文地域とは水文環境に関する基準に基づいて地域を区分した地図である。たとえば基準として水収支とその季節変化を考えると、水の不足、余剰に基づく流域区分図ができあがる。図2はそのような図の一例である。

この図は可能蒸発散量の計算値と土壤水分貯留容量のマップから月単位の水収支計算を行い、水不足および水余剰量を計算した結果である。

この図から得られる情報は数多い。たとえばモンスーンアジアの特徴は乾燥と湿潤が隣り合っていることが挙げられる。これは水資源の開発、管理を考える場合に重要な視点を提供してくれる。東アジアでは北ないし北西方向に乾燥が進んでいるが、淮河付近を境界として水余剰地域と水不足地域が接している。華南の豊富な水を華北に導水する「南水北調」はこの地域性を利用した導水プロジェクトであることが容易に理解できる。

地域の水問題をこの図の中に位置付けることによって問題の性格が明瞭になる。例えば、チャオプラヤ川中下流域には乾燥域である D 地域が存在するが、感覚としては年間を通じて水に恵まれているように見える。この地域はもともと雨期の水田一期作地域であったが、乾期の水稻栽培が 1960 年代以降の巨大ダム建設と灌漑システムの整備によって始まった。しかし、ダムの貯水量は 90 年代初頭には死水レベル近くまで達しており(新谷ほか 1994)、水危機の恐れは常に存在している。複数の視点に基づくベースマップの中に地域をプロットすることによって水問題の理解と対策の選定も可能になると思われる。

知識ベースの構築

水循環情報を空間情報として整備したら、そこから水循環に対する解釈を得る必要がある。そのためには数値情報に加えてフィールドにおける経験を同時に集積する必要がある。このような経験は学術誌、報告書や単行本に残されているものも多いが、大半は個人のセンスとして蓄積されているのであろう。しかし、水問題が解決すべき危急の課題として認識された現在は、そのような経験も最大限に活用する必要がある。現在の日本人の生活レベルを今後も維持しようとするならば、より賢明な水循環の管理が求められるはずだからである。そのためには、経験情報も GIS 上のデータベースとして蓄積すべきである。

ではどのような経験を集積したら良いだろうか。すべてを網羅することは一人では不可能だが、筆者がこれまでに経験したいくつかの事例について述べてみたい。

事例 1 : 土壤水分と地下水涵養

地表面の乾湿あるいは土壤水分と呼ばれる物理量は大気・陸面相互作用を解析対象とする際の極めて重要なパラメーターである。この場合、重要な点は地表面が乾いているか、湿っているか、という点である。しかし、同じ物理量から地中水循環に関する情報を抽出しようとする場合には、なぜそこが湿っているか、あるいは乾いているか、という情報が重要になってくる。地表面が湿っていると判断された場合、地下水涵養が無いから湿っている場合と、湿っているから地下水涵養が生じている場合の二通りが考えられる。このとき重要になることはフィールドにおける経験から得られた水文学的知識である。リモートセンシング情報に他の様々な地理情報を組み合わせた結果と水文学的知識を組み合わせることによって対象地域の地中水循環のあり方を推定することができる。リモートセンシングと GIS によって、データの蓄積、可視化はできるが最終的に情報を抽出する際には経験による判読が重要な位置を占める。

東アフリカ高地に位置するタンザニアの名目上の首都、ドドマの水資源は断層破碎帯地下水からの揚水によって賄われており、この地下水の涵養機構を知ることはドドマの発展の可能性に直接関わる重要な課題となっている。ここでは断層線崖の上の台地面は緩い波丘地となっており、凹地には浅い池が多数存在する。この池の水の安定同位体組成は蒸発の影響を受けて重くなっているが、破碎帯地下水の同位体組成は軽く、その涵養源が背後の台地上の湿地ではないことが明らかとなった。湿地はブガと呼ばれる極めて透水性の低い粘土で覆われており、この場合は地下水涵養が無いから湿地となっていると考えられる(Shindo ed. 1989, 1990, 1991, 1994; 小野寺ほか 1996)。

一方、日本、特に積雪地域では高原上に湿原が形成されている例が多数存在するが、周辺の崖において地すべりの発生が多く地域で認められる。これは湿地からの地下水涵養が原因となっていると考えて間違いはないであろう。

両者の形態上の類似性はあるが、水循環のあり方は全く異なる。このように水文学的経験によって、リモートセンシングによって得られる空間情報を正確に解釈することが可能となる。

事例 2 : 降雨強度と地下水涵養

大気 CO₂ 濃度が現在の 2 倍になったときに降水量はどう変動するかという問いに対して、数

値モデルは降水域は減少するが、降水強度は増加する、という答えを出している（例えば、Noda and Tokioka 1989）。降水の総量が減ってしまったら水資源として使える余剰水は地表面水収支の観点からは減少ということになるが、降水強度が大きくなった場合に生じる現象はよく報道されるように洪水ということになるのだろうか。もちろん洪水が災害であるかどうかは人間側の問題も関わり、一概に論じることはできない。降水量の変動に敏感な地域は乾燥、半乾燥地域であり、そこでは地下水が重要な水資源となっている。地下水の将来を考えるには涵養量の推定が最も適切な指標を与えるので、降水量の変動の影響は地下水涵養に対する影響の視点から捉えることが現実的な見方の一つである。

無降雨時には地表面からは蒸発散が生じ、土壌断面の表層付近では上向きの水分移動が生じている。しかし、その下では降下浸透が生じている。上下の水分移動の境界が（発散）ゼロフラックス面と呼ばれる境界であり、これより下に浸潤した水分は地下水涵養となる。降雨後短い時間でゼロフラックス面の下まで浸潤してしまえば多くの地下水涵養量が期待できることになるが、降下浸透速度は降雨強度に依存することが知られている。降雨強度が大きいほど浸透速度も大きく、地下水涵養量となる可能性も高くなる（佐倉・開発 1980）。

前述のドドマの水道水源として揚水されている断層破碎帯地下水の安定同位体組成は比較的軽く蒸発の影響をあまり受けていないことが明らかとなったが、同様な組成の水は背後の粗粒の砂質土壌から成る平坦面の土層下部の基盤直上に分布していた。これから半乾燥地域特有の降雨強度の強いスコールによって短時間でゼロフラックス面下の土層下部に達した水が岩盤の亀裂を通して断層破碎帯に達する涵養メカニズムが推定された（小野寺ほか 1996）。

断層線崖の背後には赤色土、湛水を伴う粘土、粗粒砂質土壌の分布域があるが、砂質土壌分布域が地下水涵養に有効であることが明らかとなっている。したがって、リモートセンシングにより土壌の分布を知ることは涵養域の広がりを推定することにつながる。また、この地域にはシロアリの巣であるマウンドが多数存在するが、マウンド間の凹地に降雨時の表面流が集中することによる選択流 (preferential flow) としての浸透が地下水涵養に有効であることも明らかになった（松本ほか 1991）。

このようにフィールドで得られた経験情報は画像データから水循環情報を抽出する際の重要

な経験情報となる。経験に基づく判読は与えられた問題に対する実質的な判断を与えることが多い。

事例 3：乾燥地域におけるワジの重要性

ワジは砂漠と山岳の間に位置する乾燥地域特有の地形である。まれに生じる降雨によりワジに水流が発生し、集中流として砂漠に達し、地下水を涵養する（新藤 1998）。アラブ首長国連邦ではほとんどの都市は西部の沿岸部と東部のオマーン山脈沿いに位置している。内陸部の都市は用水として地下水を利用しているが、それは山地、扇状地、ワジの地形配列によって生じる水循環系とワジにおける降雨時の集中流として涵養された地下水である（Tang *et al.* 2001）。しかし、都市域の地下水位は過剰用水によってどこでも低下している。

砂漠に接した乾燥地域ではリモートセンシング画像により地形の配列を判読することによって、集中流として地下水涵養が行われる可能性の高い地域を推定することができる。この地域では乾燥砂をある程度透過する L バンド SAR 画像と光学画像の組み合わせによる判読が水循環情報抽出に有効かもしれない。水循環の実態を知ることによって、画像に記録された情報の何が重要かが明瞭になってくる。地形配列と水循環の関係は重要な経験情報である。

事例 4：砂丘の保水性

砂漠は沙漠とも書き、文字通り水が少ない地域として認識されている。しかし、アラブ首長国連邦の砂漠地域を訪れたとき、意外と水が豊富なことに驚いた。調査の基地としたアライン (Al Ain) の平均年降水量は 100mm 程度であるが、砂漠では降水が浸透した直後、砂層表層に乾燥表層ができる。これが蒸発を抑制する効果を持ち、実際に砂丘を掘ってみるとしっかりと濡れている。蒸発から保護された地中水はゆっくりと浸透し、地下水面に達する。バルハン型の砂丘は風下側の傾斜が急な非対称の断面形を呈しているが、地下水流動系の理論によるとこの傾斜の急な側の斜面基部に地下水の流出が集中するはずである。実際に個々の砂丘のこの位置に立つと、オアシスあるいは井戸を発見することが多い。したがって、砂漠の砂丘といえども地下水流動系が存在し、地形と地下水流動系の関係を知ることによって水を得る場所を特定することができる。

このように、地形（砂丘地形）、地質（砂）、気候（日射と降水条件）と地域特有の現象（乾燥表層）を知り、地下水流動系に関する経験的知識を組み合わせると地下水資源開発の可能性を知ることができる。場の条件はリモートセンシングで得られる情報も多い。

事例5：水循環の理解と現状認識

中国西部、新疆のトルファン盆地はカレーズ、坎儿井と呼ばれる伝統的な取水技術によるオアシスが多数存在している。その起源は不明であるが、少なくとも清朝の末期に数が増えたことは確かなようである。ということは現存する多数のオアシスは自然の水循環に人間の手が加わることによって成立しているともいえる。

カレーズは天山山脈山麓の扇状地の上部に井戸を掘削し、地下水面に達したら、そこから扇端部に向かって縦坑をいくつも掘削して地下水路を連結して建設される。扇状地の水循環を知り、いずれ内陸流域として砂漠に消えてしまう水を資源として取り出しているのである。

扇状地の地下水のソースは山岳氷河の融解水であるので、トルファンにおいて気候変動の影響を論じる場合、重要なのは山岳氷河の消長である。中緯度の山岳氷河は温暖化の影響を最も受けやすいので（中尾、1998）水資源の持続的な供給の問題を考える場合、氷河の動態の理解が重要である。現在観測されている山岳氷河の後退が続く限り、いずれオアシスへの水供給は停止する。

トルファンにおいて短期的な視点から問題となっている点は、開水路による扇頂からの直接の取水、および地下水揚水である。表流水からの取水は扇状地への涵養量を減少させ、地下水揚水は周辺の地下水位低下を引き起こし、ともにカレーズの機能を停止させる。

自然の水循環の中から取り出すことの可能な水量によって維持されている社会は持続可能な社会であるが、一度、限界を超えた水利用が始まると、その社会は持続可能ではなくなる。水循環、特に地下水は大きな貯留容量と滞留時間をもつため、持続不可能な社会への進行が自覚されにくいという特徴をもつ。地下水利用の限界に到達した時点で経済的な発展を諦めざるを得ない時代がすぐやってくると思われるが、そのとき人間はどのような対応がとれるのだろうか。

水循環の実態を知ることによってのみ、何が本当に重要な問題であるのかが理解できる。こ

れを知らずに対策を講ずることは不可能である。GISによる水循環情報集積の目的は水循環の実態の把握と真の問題点の発見でなければならない。

事例6：地形の配列と地下水流動系

中国の華北平原は90年代中頃まで食糧生産を飛躍的に伸ばし、食糧庫として中国の発展を支えてきた。しかし、それは大量の地下水揚水や施肥の結果であり、前者は地下水位低下、後者は水汚染の懸念を引き起こしている。その対策を考えることは容易ではないが、少なくとも水循環の実態を知ることなしに対策を考え出すことはできないことは明らかである（近藤ほか2001）。

華北平原の黄河の北側部分（海河平原）は三つの水文地域に分割されている。西側の太行山地の山麓に広がる山前平原、その東側の低平原、そして渤海湾沿いの海岸平野である。穀物生産量は山前平原で高く、低平原で高い。低平原は浅層地下水の溶存成分濃度(TDS)が高く、土壤の塩性化が穀物の収量を低くしている。海岸平野は三角州であり、塩の生産も行われており、農業には不適である。

なぜ山前平原で穀物収量が高いかについては諸説もあるが、地形により簡単に理解できる。華北平原の地形分類図(Wu *et al.* 1996)をみると、山前平原は扇状地に対応している。扇状地は扇頂から涵養された地下水が扇端で流出する一つの地下水流動系のユニットを構成している。この循環系から水資源を取り出して山前平原の穀物生産は収量を上げているのである。その東部の低平原は扇状地の水循環の流出域にあたること、また、黄河や海河の旧流路が比高数mの微低地を形成して局地地下水流動系の流出域となるため、蒸発により塩分が集積しやすい水文環境であることが穀物収量が低いことの原因となっている。

このような地形の配列によって生じる水循環を知ると現在何が問題であるのかが理解できる。もちろん、地下水の過剰揚水が問題であることは明らかであるが、太行山麓に建設された数千のダムが、扇状地への水の供給を止めていることが重大な問題なのである。これまで得られた水文学的知見から考えられる対策は、扇状地への涵養を増やすことであろう。洪水時の無効放流をうまく扇頂部における地下水涵養に使う方法があるかもしれない。

このように、ある気候条件における地形・地

質の配列を知ると、水循環のあり方を推定することができる。ここから現状の認識、問題点の抽出が可能となり、さらに対策へつながる場合もあるだろう。このような気候・地形・地質と水循環の関係は水循環情報として集積すべき最も重要な知識情報の一つである。

事例7：地質構造と地下水涵養

岩盤地域の地質構造はリニアメントやテクスチャの解析によってある程度推定することが可能である。沖積低地の地質構造も微地形や土地利用から推定することも不可能ではない。地質構造を知ることによって日本における経験が海外で適用可能かどうか知る手がかりを与えてくれる場合もある。

東京下町低地では1970年代初頭までに地下水の揚水による地下水位低下が進行し、地盤沈下をはじめとする地下水災害が頻発した。そのため、法律によって地下水揚水を規制したところ地下水位は急激に回復し、今度は建築物の浮力の増大等の問題が生じてきた（遠藤ほか2001）。では、華北平原において地下水揚水規制が可能だとしたら日本と同じ状況は起こるだろうか。もちろん降水量の絶対値が日本と比較して少ないため、予測は単純ではないが、地質構造が糸口を与えてくれそうである。

関東平野は将棋倒し構造（藤田1953）と呼ばれる構造を持ち、地下水の帯水層が平野縁辺部で地表に露出する。一方、華北平原では西部の太行山地との境界は断層であり、山地側の隆起、低地側の沈降によって平原地下の地層は山地に水平に接し、地表には露出しない。したがって、直ちに揚水規制が行われたとしても容易に地下水面が回復する可能性は少ないのではないかとと思われる。

このように衛星データ以外の地理情報、ここでは地質情報を同時に扱うことによって水循環情報の質は飛躍的に高まる。リモートセンシングで見えないことでも情報として集積する努力を行わないと実態の正確な理解は難しい。ここにGISにより空間情報を集積する価値がある。

以上の事例は水文学的知識・経験のほんの一部に過ぎない。これらの経験的知識を集積することによってリモートセンシングによる画像情報から得られる情報量は格段に増加するはずである。デジタルデータによる自動判読、物理量抽出の容易性という利点を生かすことによってリモートセンシングによる水循環情報の収集能

力はセンサー技術の進歩とともにますます高まると考えられるが、地域という視点に立った場合、人間の目による「判読」という作業が果たす役割は極めて大きい。

知識ベースの構築の技術的側面に関してはまだ明確なアイデアはない。しかし、うまく構成されたWebページや、ドキュメント自体のデータベースと全文検索システム、等々利用可能な技術はすでに登場している。技術的には不完全でも構築を開始する環境は整ってきた。知識ベースを目指した取り組みはURL "<http://dbx.cr.chiba-u.jp/gdes/index.html>"にて進めているので参照願いたい。

おわりに

水循環情報収集から水循環に対する解釈を得るまでのステップは以下になるとと思われる。

- ・フィールドにおける量的情報の集積
- ・質的情報すなわち水文学的経験・知識の集積（フィールドにおける事例研究の成果の集積）
- ・空間情報も扱う地理情報データベースとしてのデータベース構築
- ・データベースシステムの運用

完成したシステムを的確に運用することによってデータベースに含まれる水文学的経験・知識から地域に還元できる智慧を生み出すことができるはずである。そのためには、どのような情報を集積すれば良いのか、これは地域を構成する要素の多様性、関連性、空間性、時間性を認識するセンスが必要になってくる。今後の環境研究は総合的でなくてはならない、ということによく言われることであるが、それを実現する重要な手法がデータベースである。

その構築に際してリモートセンシングは常に重要な時間・空間情報の提供ソースである。20世紀はグローバルを低空間分解能で見た時代であった。これにより大きなスケールの現象を大まかに理解することができた。しかし、21世紀はグローバルを高空間分解能で見る時代である。地球表層は極めて多様であるが、グローバルの視点のみでは多様性がノイズになってしまう可能性もある。ところが、地域の視点に立つと一見ノイズに見えた現象がシグナルであり、それを捉えることによって地域に貢献できる成果を創出することができるのである。もちろん、グローバルを細かくしていけばローカルになるわ

けではない。水循環過程を考えると、数値モデルの分解能を上げれば個々の素過程を表現する微分方程式のそれぞれの重要性が異なってくる。様々な空間スケールにおける現象認識を階層的に行う手法は、フィールドにおける経験から生み出されたものであり、このような多層的な空間情報の集積も GIS の重要な機能である。

地域の問題を理解あるいは解決したら、その成果はグローバルな視点の中に位置づけなければならない。それによって地域間の理解が進み、水問題、水災害に対する適切な手法の選択や開発、あるいは気候変動に対する実質的な影響評価が可能になるはずである。しかし、地域を扱う個別性の科学は、一般性の科学と比較すると十分なアピールに成功していないように思われる。それは、個別成果を位置付けるフレームワークが存在しなかったことが理由の一つと考えられる。リモートセンシングと GIS が利用可能になった現在の危急の課題は GIS によるフレームワーク作成と、地域の知識の集積による知識ベースの構築である。様々な地理情報（空間情報）と水文学的経験・知識を地理情報データベースとして集積し、人間の能力によって運用し、解釈を得ることが重要である。リモートセンシングは常に重要な時間・空間情報の提供ソースであり、GIS は地域性を集積する空間的枠組みであるといえる。

引用文献

- 遠藤 毅・川島眞一・川合将文 2001. 東京下町低地における "ゼロメートル地帯" 展開と沈静化の歴史. 応用地質 42: 74-87.
- 小野寺真一・近藤昭彦・佐藤芳徳・林 正貴・新藤静夫・松本栄次・池田 宏 1996. 東アフリカ、タンザニアの半乾燥地域における地中水循環. 日本水文科学会誌「ハイドロロジー」26: 75-86.
- 近藤昭彦・田中 正・唐 常源・佐倉保夫・嶋田 純・芝野博文・劉 昌明・張 万軍・胡春勝・劉 小京・陳 建耀・沈 彦俊 2001. 中国華北平原の水問題. 水文・水資源学会誌 14: 376-387.
- 榎根 勇 1972. モンスーンアジアの水文学地帯. 東京教育大学地理学研究報告 XVI: 33-47.
- 榎根 勇 2001. 地域について総合的に考える. 地理 46(12): 12-17.
- 佐倉保夫・開発一郎 1980. 野外土槽における雨水の鉛直移動. 筑波大学水理実験センター報告 4: 25-29.
- 新谷 渡、竹内邦良、Vanchai SIVAARTHITKUL 1994. チャオプラヤ川流域の水資源危機とその対策. 水文・水資源学会誌 7: 520-528.
- 新藤静夫 1998. アラブ首長国連邦の水文 - 平成7, 8年度文部省国際学術研究成果 - 千葉大学、156pp.
- 田中 正 1989. 流出. 気象研究ノート「水循環と水収支」167: 67-89.
- 塚本良則 1998. 森林・水・土の保全 - 湿潤変動帯の水文学地帯学 - . 朝倉書店.
- 中尾正義 1998. アジア高山地域の氷河の特性と将来. 水文・水資源学会誌 11: 732-739.
- 藤田至則 1953. 地層の将棋倒し構造について. 新生代の研究 18: 335-344.
- 松本栄次・池田 宏・新藤静夫 1991. タンザニア中部におけるシロアリの水文地形学的役割. 地形 12(3): 219-234.
- Kondoh, A. 1995. Relationship between the Global Vegetation Index and the Evapotranspirations derived from Climatological Estimation Methods. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(2): 6-14.
- Kondoh, A. and Higuchi, A. 2001. Relationship between satellite-derived spectral brightness and evapotranspiration from a grassland. *Hydrological Processes* 15: 1761-1770.
- Noda and Tokioka 1989. The effect of doubling CO₂ concentration on convective and non-convective precipitation in a general circulation model coupled with a simple mixed layer ocean model. *J. Meteorol. Soc. Japan* 67: 1057-1067.
- Shindo, S. ed. 1989. Study on the recharge mechanism and development in the inland area of Tanzania. Progress report of Japan-Tanzania Joint Research, 92p.
- Shindo, S. ed. 1990. Study on the recharge mechanism and development in the inland area of Tanzania (2). Progress Report of Japan-Tanzania Joint Research, 125p.
- Shindo, S. ed. 1991. Study on the recharge mechanism and development in the inland area of Tanzania (3). Progress Report of Japan-Tanzania Joint Research, 80p.
- Shindo, S. ed. 1994. Study on the recharge mechanism and development in the inland area of Tanzania (4). Progress Report of Japan-Tanzania Joint Research, 109p.
- Tang, C., Machida, I., Shindo, S., Kondoh, A. and Sakura Y. 2001. Chemical and isotopic methods for confirming the roles of wadis in regional

groundwater recharge in a regional arid environment. *Hydrological Processes* **15**: 2195-2202.

Wu, C., Xu, Q., Ma, Y. and Zhang, X. 1996.

Palaeochannels on the North China Plain: palaeoriver geomorphology. *Geomorphology* **18**: 37-45.

表 . 1 地域の視点におけるリモートセンシングの水文素過程への応用手法の例
 Table1 Examples ofremotesensing applicationtolocalhydrological processes

素過程	測定・観測項目	間接物理量・知識ベース	センサー	備考
蒸発散	遮断	植生指標 LAI 遮断	可視・近赤外反射率 マイクロ波放射・散乱	経験的手法
	蒸散	光合成速度 蒸散速度 植被率 群落コンダクタンス	可視・近赤外反射率 可視・近赤外反射率	経験的手法
	蒸発抑制	ボーエン比	熱赤外 植生指標・輝度温度	半経験的手法
	その他	物理量の直接推定 地上観測との組み合わせ	様々 可視・近赤外反射率 熱赤外	微分的手法 半経験的手法
浸透	土壌水分	乾湿と地中水循環の関係	可視・近赤外反射率 マイクロ波放射・散乱	水文学的知識
	地 形	地下水流動系	光学センサーステレオペア 干渉 SAR	水文学的知識
地下水涵養	土壌水分	乾湿と地中水循環の関係	可視・近赤外反射率 熱赤外	水文学的知識
	地 形	地形と地下水流動系	マイクロ波 可視・近赤外反射率 干渉 SAR	水文学的知識
地下水流動	地 形	地形と地下水流動系	光学センサーステレオペア 干渉 SAR	水文学的知識
	リニアメント	割れ目地下水	光学センサーステレオペア 干渉 SAR	水文学的知識
地下水流出	地表面温度	地下水温	熱赤外	暖かい(冷たい)水の流出
	地 形	地形と地下水流動系	光学センサーステレオペア 干渉 SAR	水文学的知識
河川流出	土地被覆	植生、塩分集積	光学センサー	水文学的知識
	地 形	DEMによる落水線抽出	光学センサーステレオペア 干渉 SAR	空間情報解析
	土壌の物理性 粗 度	植生の活性 植生指標 土壌構造 テクスチャー	光学センサー 光学センサー SAR	経験的關係 経験的關係

注) SAR:合成開口レーダー、DEM:Digital Elevation Model

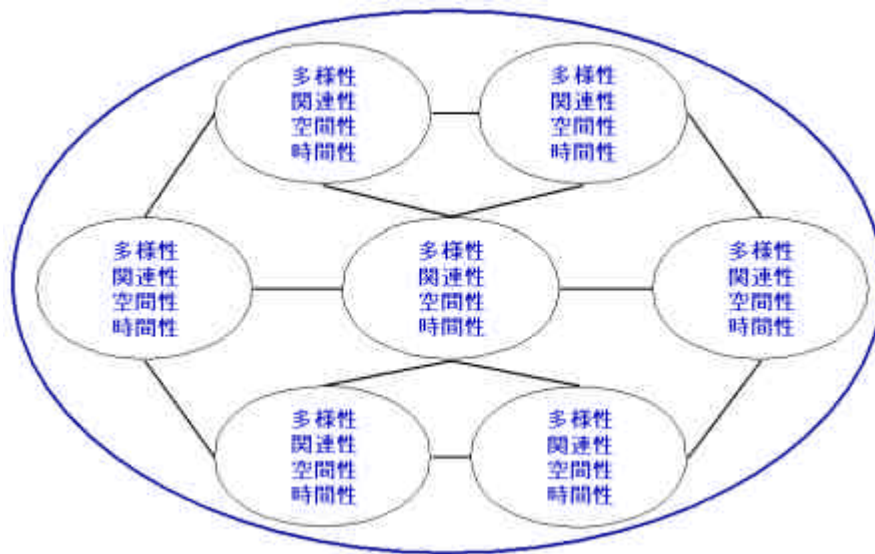


図1 グローバルとローカルの関係
 Fig.1 Relationship between *global* and *localscales*

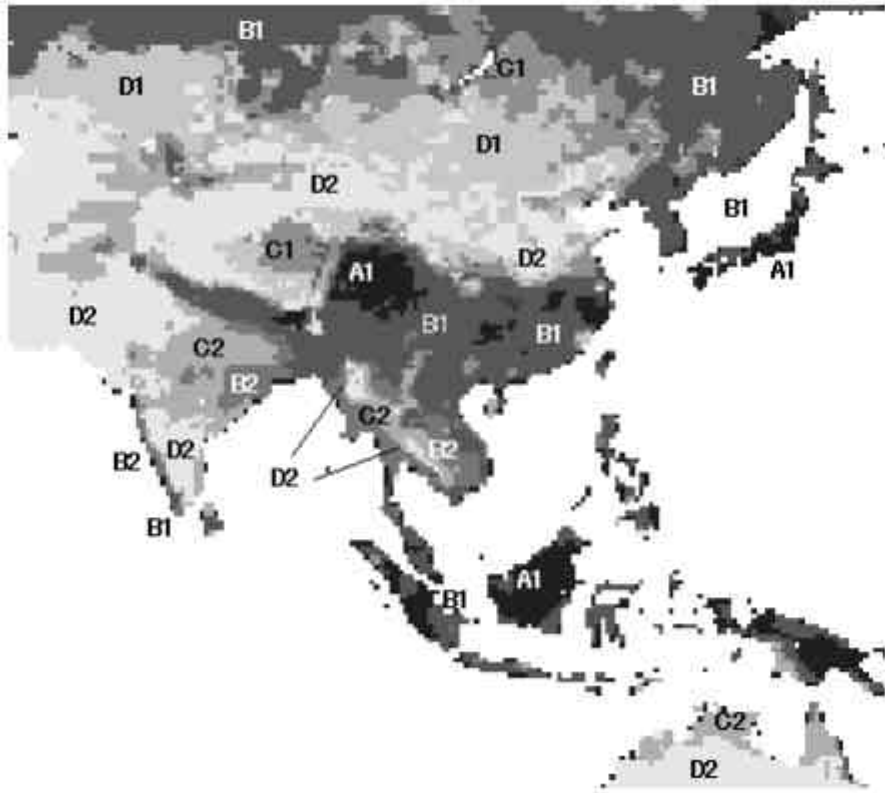


図2 モンスーンアジアの水文地域

- A1: 年間を通じて水余剰があり、総余剰量が 400mm 以上。
- A2: 年間を通じて水余剰があり、総余剰量が 400mm 未満。
- B1: 水余剰と水不足の月があり、水余剰の方が多く、水不足量は 200mm 未満。
- B2: 水余剰と水不足の月があり、水余剰の方が多く、水不足量は 200mm 以上。
- C1: 水余剰と水不足の月があり、水不足の方が多く、水不足量は 200mm 未満。
- C2: 水余剰と水不足の月があり、水不足の方が多く、水不足量は 200mm 以上。
- D1: 年間を通じて水不足であり、総水不足量が 200mm 未満。
- D2: 年間を通じて水不足であり、総水不足量が 200mm 以上。

Fig.2 Hydrological regions in Monsoon Asia

- Region A1: water surplus round the year ($ATS > 400\text{mm}$);
- Region A2: water surplus round the year ($ATS < 400\text{mm}$);
- Region B1: water surplus with some months of deficit ($ATD < 200\text{mm}$);
- Region B2: water surplus with some months of deficit ($ATD > 200\text{mm}$);
- Region C1: water deficit with some months of surplus ($ATD < 200\text{mm}$);
- Region C2: water deficit with some months of surplus ($ATD > 200\text{mm}$);
- Region D1: water deficit round the year ($ATD < 200\text{mm}$);
- Region D2: water deficit round the year ($ATD > 200\text{mm}$);