

水資源 GIS アプリケーション Arc Hydro の概説と 米国における事例紹介

川崎昭如・吉田 聡・佐土原聡

Outline of the water resources GIS application, Arc Hydro, and case studies in the United States

Akiyuki KAWASAKI, Satoshi YOSHIDA and Satoru SADOHARA

Abstract: Arc Hydro data model and tools are described in this paper, which emphasizes the importance of integrating GIS applications for consistency and uniformity in order to further develop environmental researches. Arc Hydro is utilized by many organizations engaged in water resources and water basin management in the United States. Data model structures, tool functions for basin analysis, and relationships between hydrologic / hydraulic simulations and GIS applications are explained. Arc Hydro case examples from municipal governments and university's research / development are described.

Keywords: Arc Hydro, 統合 (integration), 構造化 (structuring), 水資源 (water resources), 流域管理 (basin management)

1. はじめに

2003年、米国科学財団 (NSF) は Environmental Cyberinfrastructure の構築に関するレポート (NSF, 2003) を発表し、複雑な環境システムを研究するためには IT 資源を活用して多量の情報を構造化、統合化することが重要であると記している。また、1990年代以降の我が国の環境保全に関する取り組み (例えば環境基本法 (1993)、環境影響評価法 (1997)、自然再生推進法 (2003)) を実現するためには、多面的な研究アプローチや共同研究機関の迅速な連携が重要であり、その際のデータ取得、データ加工、解析、合意形成というグループ間の連携と

その効率化に GIS の活用が期待されている (亀山ほか, 2004)。

本報では、水資源・流域管理における関連データの統合化と構造化により、それに関わる多様なステークホルダーの連携を支援することができる Arc Hydro を概説するとともに、米国の水資源・流域管理におけるその活用事例を紹介する。Arc Hydro は、「データ生成→管理→解析・シミュレーション→解析結果の表示」という水資源・流域管理の一連の過程を支援することを目的とした GIS データモデルと、その構築および解析を支援するツール群から構成される。水資源・流域管理に関する多様な研究アプローチや利用者の全てのニーズに対して万能というわけではないが、水資源・流域管理において共通に必要なとされる領域に関しては、データの生成から課題解決に至るまでの全体的な整合性と一貫性をもったデータベースを提供する。

川崎：〒150-8925 東京都渋谷区神宮前5丁目53-70
国際連合大学 環境と持続可能な開発プログラム
United Nations University, Environment and Sustainable
Development Programme
5-53-70, Jingumae, Shibuya-ku, Tokyo 150-8925, Japan
E-mail: kawasaki@hq.unu.edu

我が国の水環境分野においても、水環境総合情報サイト（環境省、2005）や水情報国土データ管理センター（国土交通省河川局、2002）、河川 GIS の構築が進められているとともに、航空レーザースキャナ計測による精緻な数値標高モデル（Digital Elevation Model; DEM）データやレーダーアメダス解析雨量など、河川流域の詳細な空間的特徴の把握が可能になりつつある。このような高精度の空間データと水文気象データを効果的に活用して、水に関わる現象を詳細に分析してその成果を総合することで、新しい水文解析手法を確立することが求められている（高棹、1997）。水資源・流域管理に関わる種々のデータを構造的にデータベースへ格納して、効率的な検索や解析、さらにはシミュレーション・モデルとの連携までを支援する Arc Hydro の検証は、今後の水文関連のデータベースの構築およびツールの開発を検討する上で意義がある。

2. Arc Hydro

2.1. 開発の経緯と Arc Hydro の位置づけ

米国では、水文・水資源シミュレーションと GIS を組み合わせて、地域スケールで水資源管理を支援する試みを長年にわたり行っている（松岡、1997）。1970 年代初期から、米国環境保護庁（USEPA）が中心となって米国地質調査所（USGS）や米国海洋大気庁（NOAA）などの協力によって Reach File システムが開発された（USEPA、1994）。これは初期段階の米国河川ネットワーク・データベースとして広く活用され、その後の幾度かの拡充・発展により、汚染物質の総量規制制度（Total Maximum Daily Load）ならびに水質モニタリング情報システム（STORage and RETrieval; STORET）などと連携し、河川汚染物追跡表示システム（Routing and Graphical Display System; RGDS）の運用や排出権許認可の発行作業（Permit Compliance Systems; PCS）などに使用されている（松岡、1997; Maidment, 2002）。

その後、Reach File バージョン 3 をベースとして、National Hydrography Dataset (NHD) が USGS と USEPA によって開発された。これは 1 : 100,000 スケールの包括的な米国内分水界地理ネットワーク・

データセットを実現し、州によっては 1 : 24,000 ほどのより大縮尺の NHD データも作成されている。NHDinGEO と呼ばれる最新のデータセットは、シェープファイルのみならず、ジオデータベース¹⁾形式でもデータをダウンロードできる²⁾。

これらの充実した河川ネットワーク・データベースを活用して、USEPA は総合汚染評価システム（Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources; BASINS）を、ArcView GIS (3.x) を用いて完成させた（USEPA、1996）。このシステムは、米国内の集水域データセットと複数の環境評価モデルを一つのパッケージとして統合したものであり、多くの政府機関・自治体等で使用されている。Arc Hydro データモデルは、新しい ArcGIS 技術を用いて BASINS を拡張させたものと位置づけられ、より豊富で効果的な手法の提供を目指して、具体的には以下の点の改善に注力した開発が進められた（Maidment, 2002）。

- ・水環境を表す地理空間データと水量や水質などの時系列データのより効率的な統合
- ・これまでに開発されたような個別のシステムではなく、複数の行政機関や部局において、水資源に関わる業務を広範囲にカバーする共通の地理空間データ基盤の構築
- ・それぞれのモデルが個別の GIS データベースで独立的に処理されるのではなく、関連づけられた複数の水文モデルの支援を可能とするデータ構造の開発
- ・上流から下流までの連続的な水の動きを捉えるために、集水域と河川、河川と取水口・排水口などの異なるデータセット間の関連づけの実現

これらの課題における共通のテーマは統合である。異なる種類の GIS データと水質や水量などの表形式の水資源データの統合、データとモデルの統合、異なる空間スケールの統合であり、それを実現するために Arc Hydro は以下の項目を基本概念とした。

- ・全てのデータが共通の地理座標系を持つ。
- ・広域を表現するために、主要なデータ構造はベクタデータ（ポイント、ライン、エリア）であり、

必要であればラスターデータやTINサーフェスデータにより支援される。

- ・フィーチャからフィーチャへの水の挙動をトレースするために、異なるデータレイヤの地理フィーチャ間の関連付けをリレーションシップにより定義する。
- ・各種観測データ等の時系列情報と、水環境の地理情報を接続させる新たな仕組みを構築する。

2.2. 開発体制と利用環境

テキサス大学オースチン校水資源研究センター (Center for Research in Water Resources; CRWR) と ArcGIS の開発企業である ESRI 社は“水資源 GIS コンソーシアム”を設立し、CRWR の David R. Maidment 教授を中心に、ArcView GIS や ARC/INFO 上での水資源 GIS の研究開発を精力的に進めてきた (Maidment and Djokic, 2000)。それらの成果を統合・発展させたものとして、ジオデータベース¹⁾を基盤とした、Arc Hydro データモデルならびに Arc Hydro ツールの初期バージョンを 2002 年に公式公開した。現時点では主に表流水を対象としているが地下水データモデルも開発中である。Arc Hydro データモデルは ArcGIS Desktop (ArcView, ArcEditor, ArcInfo) の拡張ジオデータベースモデル (テンプレート・データモデル) として開発されており、CRWR の Web サイトにて無料でダウンロードできる³⁾。また、オープンソース GIS の MapWindow においても、部分的であるが、Arc Hydro が利用できる環境が開発されつつある (Chen and Ames, 2006)。USGS の河川統計情報 StreamStats⁴⁾ では、アイダホ州のように Web 上で Arc Hydro の機能が使えるものも出てきている。USGS では Arc Hydro を使った Web サイトを増やしていくことを計画しており、その活用可能性は広がりを見せている。

2.3. Arc Hydro データモデル

2.3.1. データモデルの基本概念

降雨や積雪による流域からの流出量を推定する手法を考える上で、歴史的に見ると、流域内部の水文過程に関する研究を積み上げて、入力である降雨や積雪から出力である流出量への変換を説明するという方法よりは、入力と出力の対応関係を直接モデル化するという方法が先行的に採用されてきた (高棹, 1997)。しかし、流入と流出の関係は、入力と出力の関係を直接数式化できるものではなく、流域内の水文要素 (地形や土壌、水路など) の特性を考慮して、モデル化される必要がある。

Arc Hydro では、「雨水が落ちた地点から地表面の傾斜方向に沿って河川へ注ぎ込まれ、さらに海域へたどり着くまでの全ての経路を追跡する」という概念のふるまいモデルを採用している。実際の水の動きは相当複雑であるため容易にモデル化できるものではないが、Arc Hydro で採用しているモデルの長所としては、流域全体において、水がどのようにあるフィーチャ (例えば、集水域) から他のフィーチャ (流出点) へ流れていくのかを、理路整然とした手順で追跡できることにある。たとえば、図 1 で示す Arc Hydro framework は、5 つのデータセットから構成される最も単純なかたちの Arc Hydro データモデルである。ユーザの目的に応じて、三次元の河道表現や水質・水量測定データ分析などの拡張的な Arc Hydro コンポーネントを追加することもできる。

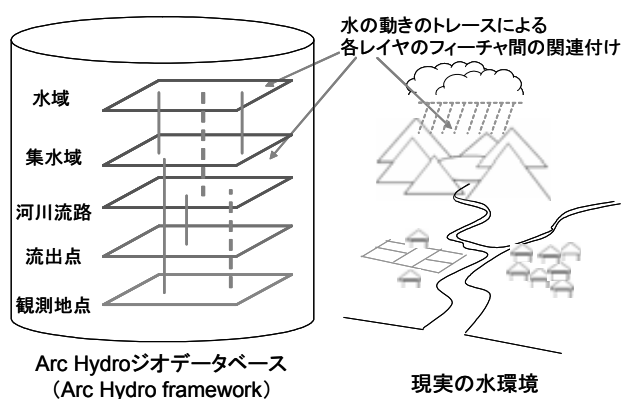


図 1 Arc Hydro の概念

また、これまでの水資源 GIS は主にラスターデータによるものが中心であったが、Arc Hydro はジオデータベースというリレーショナル・データベース管理システム (RDBMS) に格納されるベクタデータが基盤となるため、異なるデータレイヤの地理フィーチャ間の関連づけを可能としている。この点で、Arc Hydro は従来のシェープファイルなどの個別の GIS レイヤ管理方式と大きく異なる。

2.3.2. データモデルの基本構成

Arc Hydro データモデルの基本構造を図2に示す。

- ・ Drainage, Hydrography, Network, Channel, Time Series の5つから構成されるレイヤ群は、ジオデータベースとして一つの RDBMS に格納される。
- ・ ジオデータベース内部の全フィーチャには固有の整数識別値である HydroID が属性として割り振られる。この HydroID が、各レイヤ間のリレーションシップ・クラスを設定する際のキー・フィールドになる。

- ・ 外部の情報システムに格納されているフィーチャを関連付けるために、HydroCode というテキスト型の識別値も用意されている。
- ・ リレーションシップならびにネットワーク機能によって、レイヤ間の接続性が認識され、全体としての一貫性と整合性を持ったデータモデルが成り立つ。

2.4. Arc Hydro ツール

Arc Hydro ツールとは、データモデルの構築やデータ管理、解析機能を集約したものである。Arc Hydro ツールも無料でダウンロードできるが³⁾、それ単体での使用はできない。現時点では、ArcGIS Desktop 上で拡張ツール (DLL) として使用する。以下にツールの基本機能を示す。

① Arc Hydro 流域データベース構築支援

例えば、地形などのデータが揃えば、2.3.2. のリレーションシップ・クラスの構築や HydroID および NextDownID 等の関連識別値の付与を、Arc Hydro ツールにより半自動的に行い、全体として整

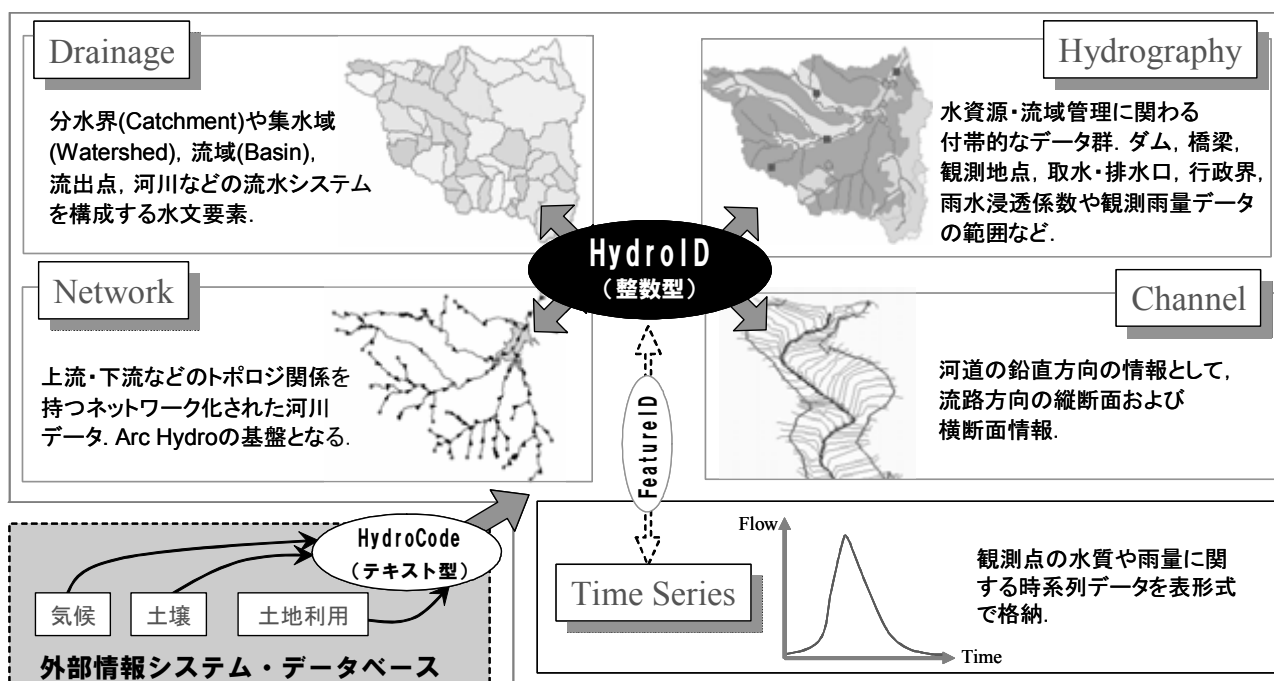


図2 Arc Hydro データモデルの基本構成

合性が取れた Arc Hydro 流域データベースを構築できる。なお、NextDownID とは、あるクラス内における下流側に位置する次のフィーチャの HydroID である。これらの識別値より、河川や集水域フィーチャ群は、上流から下流までの流路方向と接続関係を判別する (図 3)。

② 上流・下流関係を考慮した流域解析支援

Arc Hydro ツールには、データモデルの特性を活かした解析支援機能がある。例えば、“上流追跡機能”により、流域内の任意の河川や集水域をクリックすると、その地点より上流側の全集水域が自動的にトレースされる。それにより、その河川、集水域に関連付けられているデータ (例えば水質調査点) もあわせて検索できる。さらに、“属性データの統計処理機能”によって、その (選択された集水域に関連付けられている) 水質調査地点に関連付けられてい

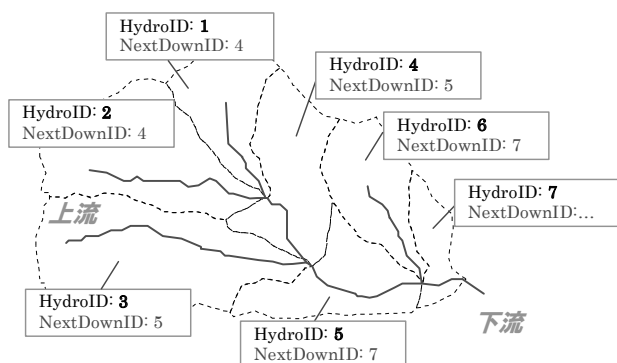


図 3 HydroID による集水域の接続関係

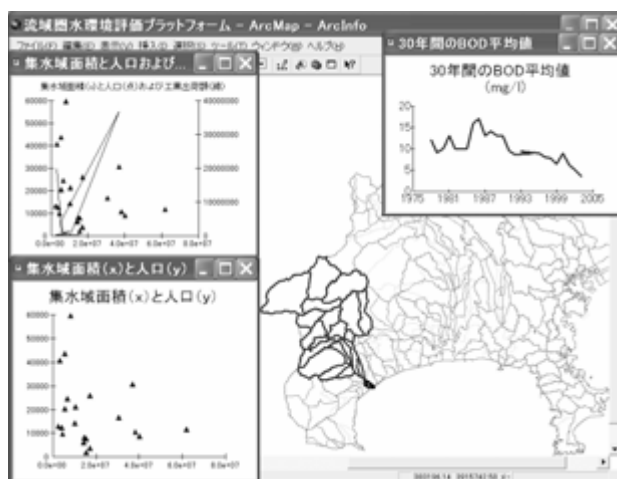


図 4 Arc Hydro の機能を利用した解析イメージ

る属性テーブル (例えば、「健康項目」や「総窒素・リン」などの水質測定項目) の任意フィールド (例えば、“年間 BOD (生物化学的酸素要求量) の平均値”) を統計処理してその値を取得できる (図 4)。また、“河川累積統計機能”を用いて、河川の上流から下流にかけて、集水域データの累積的な集計も可能である。

3. シミュレーション・ソフトウェアとの連携

3.1. HEC-HMS と HEC-RAS の概要

米国陸軍工兵隊水文工学センター (Hydrologic Engineering Centers; HEC) によって開発された HEC-1 や HEC-2 (U.S. Army Corps of Engrs., 1982, 1985) のような水文・水理シミュレーション・モデルは 1960 年代に開発が始められ、その後の数十年使われ続けている。しかし、HEC-1 や HEC-2、HSPF (Johnson *et al.*, 1980) などの水理・水文ソフトウェアは集中パラメータ系または空間的に 1 次元のシミュレーションであり、GIS はシミュレーション自体にそれほど本質的に関わっていない (松岡, 1997)。その後、新しいソフトウェア工学の開発アプローチとともに、HEC-HMS や HEC-RAS のようなシミュレーション・ソフトウェアが採用されるようになってきた。HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) とは、流域を複数の集水域が集まったツリー上のシステムと捉えて、その上流から下流までの降雨-流出過程をシミュレートするためのソフトウェアである。広範囲にわたる河川流域の地形的な空間分布とともに、都市域や各集水域の土地被覆状況を考慮して流出量を算出する。また、HEC-RAS (River Analysis System) は、一次元の水理解析を実行するためのソフトウェアである。定常流水面形状ならびに非定常流解析のコンポーネントが用意されており、河川の形状と流入量から水面形状の変動を計算する。

3.2. HEC-HMS と HEC-RAS と GIS の連携

1990 年代には、HEC モデルと ARC/INFO や ArcView GIS との関係付けを実現するさまざまな試みが行われた。テキサス大学 CRWR による HEC-

HMS と ArcView GIS の接続支援ツール CRWR-PrePro (Olivera and Maidment, 2000) の開発や、HEC による HEC-RAS と ARC/INFO の接続支援ツール HEC-GeoRAS (Ackerman *et al.*, 2000) の開発などが行われた。また、ブリガムヤング大学と米国陸軍工兵隊水路試験場 (Waterways Experiment Station; WES) が開発し、多くの米国政府機関および世界中で使用されている河川流域解析システム (Watershed Modeling System; WMS) も ARC/INFO や ArcView GIS, GRASS とのデータの受け渡しを可能としている (EMS, Inc., 2006)。

Arc Hydro では HMS と RAS に対して、ジオデータベース形式で地理空間データを供給するための HEC-GeoHMS と HEC-GeoRAS という専用の拡張ツールをそれぞれ 2006 年、2007 年に公式公開した。これは HEC の Web サイトから無料でダウンロードできる⁵⁾。図 5 に HMS, RAS と Arc Hydro の連携フローを示す。

はじめに、Arc Hydro ツールの標準機能で流域データベースを構築する。次に、GeoHMS ツールで、シミュレーションに必要なパラメータや手法の設定およびデータの生成を行う。この作業は手順に従い、半自動的に進めることができ、最終的にはそれらを集約したデータセットがデータ交換フォーマット (XML) で出力される。HMS ソフトウェア上では、それらを入力データとして、集水域ごとの流量の変化を算出する。また、GeoRAS ツールを用いて、TIN などの地形データから河道の横断面形状を計算して、RAS 解析の入力データの生成とパラメータの設定を行う。さらに、RAS ソフトウェアを用いて、河道の各横断面における河道流を解析し、河道断面ごとの水位ライン、ならびに河道の最上流端から最下流端までの縦断面に沿った水面形状を計算し、流量-時間曲線 (ハイドログラフ) を形成する。その結果を用いて再び GeoRAS ツールを使って、ジオデータベースとして湛水グリッドおよび氾濫原ポリゴンの生成を行う、という流れである。

上述のように、GIS と HMS ならびに RAS の連携には、ソフトウェア間のデータのやり取りが数回含まれるとともに、複雑なパラメータの設定を行う必

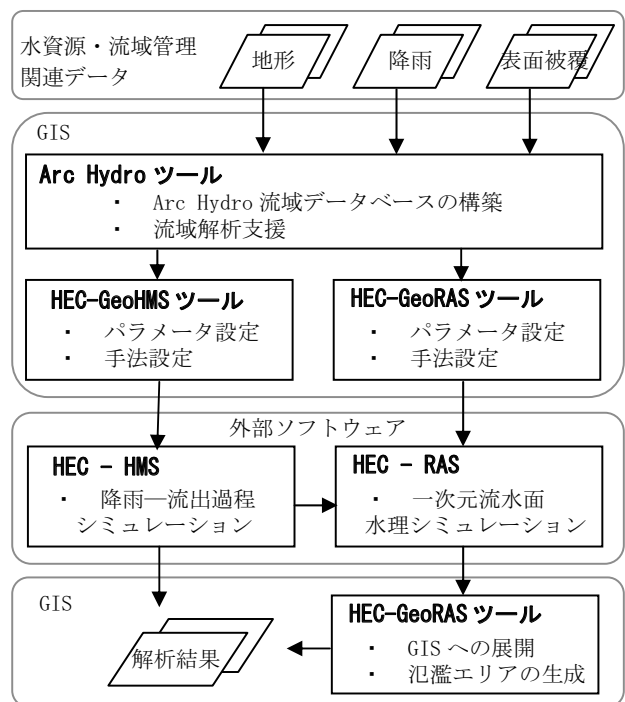


図 5 HMS, RAS と GIS の連携フロー

要があり、ボタン一つで簡単に連携ができるわけではなく、煩雑な操作も含まれる。しかし、「データ生成→管理→解析・シミュレーション→解析結果の表示」という過程を、全体的な整合性と一貫性を持って実行できるデータモデルとツールが用意されているという点で、これまでの GIS を利用した水文・水資源シミュレーションよりも、シミュレーション・プログラムと GIS の地理情報の密接な連携が実現されつつあるといえる。ただし、現時点の GeoHMS ならびに GeoRAS は、HMS と RAS の全ての解析機能に対応しておらず、パラメータや手法の設定に関しても限定的である。また、HMS と RAS 以外の水文・水資源シミュレーションや他分野のシミュレーション・ソフトウェアとの連携など今後の更なる改善と発展が期待できる領域であるといえる。

4. 米国の水資源管理における Arc Hydro の役割

米国では、研究開発支援基盤の形成として、サイバーインフラストラクチャ構想を推進しており、2006 年度の NSF-Wide Investments (優先投資分野)

5部門の1つとして選定されている (NSF, 2006). これは幅広い領域の科学研究をインフラ面 (計算機やネットワークなど) から支援するだけでなく, その研究成果を共有し, 研究者間の協働を促進することを目的としている. その一環として, 全米の100以上の大学が参画する The Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, Inc. (CUAHSI) は, 全米のさまざまな機関にある水文観測情報およびこれまでの研究成果を分散型で共有することができる Hydrologic Information System (HIS) の構築を目指している. HIS プロジェクトのリーダーであるテキサス大学の Maidment 教授を主導として, これまでの水資源 GIS の研究開発の成果やそこから生まれた Arc Hydro の概念や技術を基盤とした, 水文データの蓄積や利用に関する手法やデータの標準化などを進めており, サンディエゴ・スーパーコンピュータセンター (SDSC) 等と連携した研究開発を行っている.

また, 米国の自治体および水管理事業者も, 表流水や上下水道, 地下水管理, 風水害対策ツールとして Arc Hydro を基盤としたシステムを運用しているところが増えている. 地域水管理のパイオニアとして我が国でも数々の事例が紹介されている南フロリダ水管理区 (South Florida Water Management District; SFWMD) (グリッグ, 2000; 桜井, 2003) は, エバングレーズ大湿地を有する南フロリダ特有の環境での水資源管理を目的とした独自の水資源管理 GIS を開発しており, その基盤として Arc Hydro データモデルと Arc Hydro ツールを採用している (SFWMD, 2005).

5. おわりに

本報では, 水資源・流域管理に関わる種々のデータを効率的にデータベースに格納して, データの検索や解析, さらにはシミュレーション・ソフトウェアとの連携までを支援する事例として, Arc Hydro データモデルと Arc Hydro ツールを紹介した. そして, Arc Hydro を中心とした米国水管理 GIS の現状と今後の展開を概説した.

我が国の水資源・流域管理への Arc Hydro の活

用に関しては今後の検討が必要であるが, 水資源・流域管理に関する情報を構造化して, 全体として整合性のとれたかたちで管理して, GIS 外部のシミュレーション・ソフトウェアとの密接な連携を実現していることは注視すべき点である. 2007年3月, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センターデータベース事業の一環として, 世界流域データベース (Global Drainage Basin Database; GDBD) が公開された. これにより, Arc Hydro ツールを用いて作成された世界6地域の流域界データ, 河道位置データ, 表面流向データをはじめとする6つの流域関連 GIS データをジオデータベース形式でダウンロードできるようになった⁶⁾ (Matsutomi *et al.*, 2007). 米国自治体の実務レベルや大学間の水文研究レベルのみならず, これからは日本国内においても Arc Hydro は広がりを見せる可能性もあり, 今後その動向を追跡する必要がある.

謝辞

本研究成果は, 文部科学省科学研究費補助金「GIS を基盤とした水関連データの構造化による水環境マネジメント・プラットフォーム」(課題番号: 18710035 研究代表者: 川崎昭如) による. ESRI ジャパン株式会社の菅原 修氏には本報に対するご意見をいただきました. 記して, 感謝いたします.

補注

- 1) ジオデータベース: 1999年, ArcGIS Desktop 8.1 とともに, ESRI 社が発表した GIS のデータ・フォーマットであり, 一つのリレーショナル・データベース・マネジメント・システム (RDBMS) に, ベクタ, ラスタ, テーブル, その他の GIS オブジェクトをテーブル形式で格納するものである (ゼイラー, 2001). ArcView GIS (3.x) のような GIS ソフトウェアは, 一つのテーマに対する空間特性や位置情報を個別の GIS レイヤとして複数のファイルで管理するものであり, いわゆる GIS データベースとはそれらの個別データレイヤを集積したものであった. それに対して, ジオデータベース

は一つの RDBMS 内に複数のテーブルが格納される。また、RDBMS 内の異なるデータレイヤ間のフィーチャとフィーチャの関連付け（リレーションシップ）の構築が可能であり、これらの関係性は、データ構造の一部として恒久的に格納される。すなわち、ジオデータベースによって有機的な関連を定義できるようになったため、これまではレイヤ単位でばらばらに管理されていたものが、全体として整合性の取れた一つのモデルとなり得る。

- 2) NHD Data: <<http://nhd.usgs.gov/data.html>>.
- 3) CRWR: <<http://www.crwr.utexas.edu/>>.
- 4) USGS StreamStats States Application: <<http://water.usgs.gov/osw/streamstats/sonline.html>>.
- 5) HEC – software:
<<http://www.hec.usace.army.mil/software/>>.
- 6) 世界流域データベース:<http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/db/enterprise/gdbd/gdbd_index_j.html>.

参考文献

- 亀山 哲・福島路生・島崎彦人・高田雅之・金子正美 (2004) 流域圏環境管理のための GIS の活用－河川構造物による流域の分断化と河川生態への影響, 「資源環境対策」, **40** (11), 41-49.
- 環境省 (2005) 水環境総合情報サイト. <http://www.env.go.jp/water/mizu_site/index.html>.
- グリッグ, N.S. 著, 浅野 孝・虫明功臣・池淵周一・山岸俊之訳 (2000) 『水資源マネジメントと水環境－原理・規則・事例研究』, 技報堂出版. Grigg, N. S. (1996) *Water Resources Management: Principles, Regulations, and Cases*. New York: McGraw-Hill.
- 国土交通省河川局 (2002) 水情報国土データ管理センターホームページ. <<http://www3.river.go.jp/IDC/index.html>>.
- 桜井善雄 (2003) 南フロリダにおける水環境管理施策－生態系保全の視点から. 「水環境学会誌」, **26** (3), 22-25.
- ゼイラー, M. 著, ESRI ジャパン 訳 (2001) 『Modeling Our World: ジオデータベース設計ガイド』, ESRI ジャパン出版. Zeiler, M. (1999) *Modeling Our World: The ESRI Guide to Geodatabase Design*. Redlands, USA: ESRI Press.

- 高棹琢馬 (1997) 水文総論. (水文・水資源学会編), 『水文・水資源ハンドブック』, 朝倉書店, 1-8.
- 松岡 譲 (1997) GIS の応用. (水文・水資源学会編), 『水文・水資源ハンドブック』, 朝倉書店, 550-555.
- Ackerman, C. T., Evans, T.A. and Brunner, G. W. (2000) HEC-GeoRAS: Linking GIS to Hydraulic Analysis Using ARC/INFO and HEC-RAS. In Maidment, D.R. and Djokic, D. eds. *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*. Redlands, USA: ESRI Press, 155-176.
- Chen, L. and Ames, D.P. (2006) An Open Sources GIS Implementation of Arc Hydro, *Proceedings of the American Water Resources Association 2006 Spring Specialty Conference: GIS and Water Resources IV*, CD-ROM, Houston, USA.
- EMS, Inc. (2006) WMS 8.0 Overview.
<http://www.ems-i.com/WMS/WMS_Overview/wms_overview.html>.
- Johnson, R.C., Imhoff, J.C. and Davis, H.H. (1980) User's manual of the hydrologic simulation program-Fortran (HSPF), EPA-600/9/80-05, US EPA, Athens, GA, USA.
- Maidment, D.R. (2002) *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, USA: ESRI Press.
- Maidment, D.R. and Djokic, D. (2000) *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*. Redlands, USA: ESRI Press.
- Matsutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K. and Matsuoka, Y. (2007) Development of highly accurate global polygonal drainage basin data. *Hydrological Processes* (submitted).
- NSF (2003) An Occasional Paper of the NSF Advisory Committee for Environmental Research and Education. <http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/ac-ere/ac-ere1_ECI.pdf>.
- NSF (2006) NSF-Wide Investments.
<http://www.nsf.gov/news/priority_areas/>.
- Olivera, F. and Maidment, D. (2000) GIS Tools for HMS Modeling Support. In Maidment, D.R. and Djokic, D. eds. *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*. Redlands, USA: ESRI Press, 81-112.
- SFWMD (2005) Arc Hydro Geodatabase Project:
<<http://www.sfwmd.gov/gis/>>.
- U.S. Army Corps of Engrs. (1982) HEC-2 Water surface profiles, Hydrol. Engrg. Ctr., Davis, Calif., USA.

U.S. Army Corps of Engrs. (1985) HEC-1 flood hydrograph user's manual. Hydrol. Engrg. Ctr., Davis, Calif., USA.

USEPA (1994) The USEPA Reach File Version 3.0 Alpha Release (RF3-Alpha) Technical Reference. < <http://www.epa.gov/waters/doc/techref.html#History> >.

USEPA (1996) BASINS: Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources. < <http://www.epa.gov/waterscience/basins/basinsv3.htm> >.

