

18. 世界流域データベースの開発

DEVELOPMENT OF GLOBAL BASINS DATABASE(GBDB)

増富祐司*、乾 祐介**、松岡 譲***

Yuji Masutomi, Yusuke Inui, Yuzuru Matsuoka

ABSTRACT; We have developed the global basins database (GBDB). GBDB includes the drainage basins map which consists of polygons of catchments which are subdivisions of basins into elementary drainage areas. Each polygon of a basin is identified by a Pfafstetter code and is attributed with geographic, topographic, and social information. The drainage basins map were generated from digital elevation models of which natural depressions are manually identified and which are modified by the methods of “stream burning” and “ridge fencing”. We used the stream data and the basin data modified by collected data, atlases, and basin maps in the procedures of “stream burning” and “ridge fencing”. The results of comparisons with collected basin maps and upstream areas of the river discharge stations reveals that GBDB provides a more accurate and reliable drainage basins map than HYDRO1k database.

KEYWORDS; drainage basin, stream burning, ridge fencing, basin management

1 はじめに

現在、世界の多くの地域で水不足、水質汚染といった問題が起こっているが、これらの問題の主たる原因は不適切で非持続的な水管理システムにある。これに対し合理的な水資源管理技術により、気候変化の水文学的影響や追加的な不確実性に適応し、現在問題の生じている地域またはこれから生じる地域の被害を軽減もしくは無くすることが可能であると考えられる。しかしそのためには精度の良い流域界データとそれに基づく流域単位の基礎情報を整備・提供することが不可欠である。

現在まで全球で流域単位の基礎情報を提供するデータベースとして、ニューハンプシャー大の水システム解析グループが作成した IWWAP (Indicators for WWAP) と米国地質調査所 (U.S. Geological Survey) が開発した HYDRO1k (USGS, 2000) がある。IWWAP は 30 分メッシュの流向図 (Flow Direction Map) に基づき、降水量、流出量、貯水池、人口、水需要量といった水文情報、地理情報、社会科学的な情報を含んだ統合的な流域データベースである。HYDRO1k は 30 秒メッシュの標高データ (Digital Elevation Model : DEM) より作成された水文データセットである。データセットには流域界データ (ポリゴン)、河道位置データ (ポリライン)、30 秒メッシュの流向図と流積図 (Flow Accumulation Map) が含まれ、流域界データには複数の地形情報が含まれている。IWWAP は現在存在する唯一の統合的な流域データベースという点で優れているが、30 分メッシュという低解像度の流向図を基に作成されているために正確に流域、河道の形状を表現できない。この点で 30 秒という高解像度の DEM を元に作成された HYDRO1k は優れているが、流域界データに対する信頼性の検証が全く行われておらず、流域界データは多くの大きな誤りを含んでいる。

そこで本研究では、統合的で持続的な水管理システム構築に向けた基礎情報の整備・提供を目的とし、正確で信頼性

* 国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室 Climate Risk Assessment Research Division, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

** 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

*** 京都大学大学院地球環境学堂 Hall of Global Environmental Research, Kyoto University

の高い流域界データを作成した。次に作成した流域界データに自然科学的な基礎情報だけでなく社会科学的な基礎情報も付加し、統合的な世界流域データベース（GBDB）の開発を行った。

2 GBDB の概要

GBDB は地理情報システム（Geographical Information System : GIS）で表された流域界データ（ポリゴン）とそこに格納された属性情報から成る。対象は全球である。流域界データは流域を一定の規則で分割した単位流域から構成され、人口、土地利用、上流流域面積といった属性情報が単位流域ごとに与えられている。表 1 に単位流域に格納されている属性情報を示す。全単位流域数は 73074 であり、平均単位流域面積は 1806km²である。GBDB は ArcGIS Ver. 9 ジオデータベースフォーマットを用いて作成され、格納されている属性情報は MS Access を用いて閲覧できるほか、図 1 に示すように ArcMap を使用し流域界データを閲覧できる。図 1 中の各ポリゴンは単位流域を表し、画面上でこれをクリックすると、図 1 右にあるようなフォームが現れ、格納されている属性情報を閲覧することができる。

表 1 単位流域の属性情報

属性情報	データ型	単位	説明
OID	Object ID		ArcGISが自動的に割り振るID
Shape	Polygon		GISデータタイプの区別
Region_NO	Short Integer		地域番号
SubRegion_NO	Short Integer		準地域番号
Basin_NO	Short Integer		流域番号
Pfa_Code	Long Integer		Pfisstetter Code
Dwn_Pfa_Code	Long Integer		下流単位流域のPfisstetter Code
Accum_area	Float	[m ²]	上流流域面積（自身の単位流域面積を含む）
Ave_Elev	Float	[m]	単位流域内平均高度
Ave_Slp	Float		単位流域内平均傾斜
Str_Lngth	Float	[m]	単位流域内河道長
Ave_Str_Slp	Float		単位流域内河道平均傾斜
Country_1~Country_5	String		単位流域が属する国名
Country_1_Rt~Country_5_Rt	Float	[%]	単位流域が属する国の割合
Pop	Long Integer	[人]	単位流域内人口
Pop_Dnsty	Float	[人/m ²]	単位流域内人口密度
LULC1~LULC17	Float	[%]	単位流域内土地利用/被覆面積割合
Shape_Length	Double	[m]	単位流域周回長または単位河道長
Shape_Area	Double	[m ²]	単位流域面積

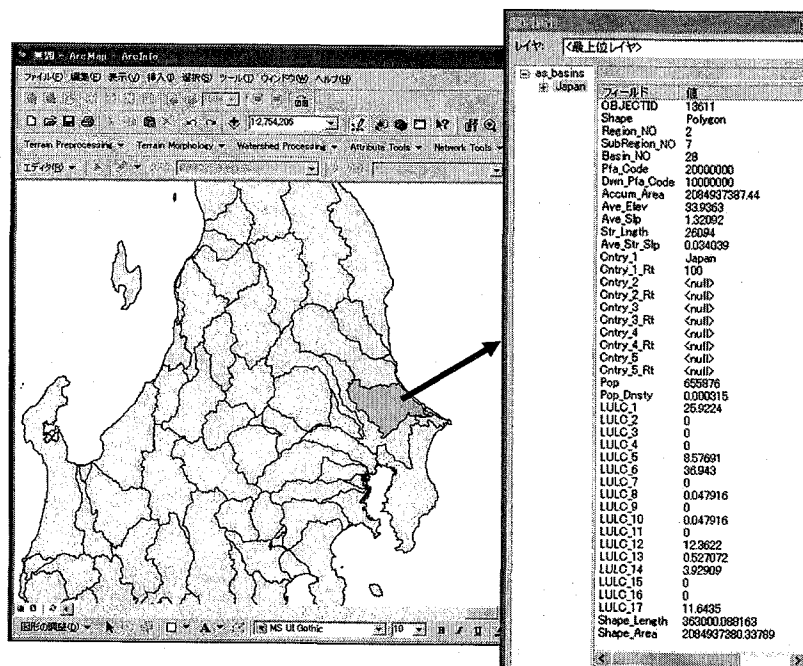


図 1 GBDB

3 GBDB 作成手法

GBDB の作成は大きく分けて次の二つの作業からなる。それは①流域界データの作成、②流域界データへの属性情報の格納である。以下ではそれぞれ作業について詳しく説明していく。

3.1 流域界データの作成

本節ではまず、(A) 項で、標高データ (Digital Elevation Model : DEM) から流域界データを作成する際の問題点を指摘した後、(B) 項で、本研究で適用した流域界データ作成手法を説明する。

(A) DEM から流域界データを作成する際の問題点

DEM から流域界データを作成する手法は現在では一般的になっており、多くの地理情報システムソフトで実行できる。しかしこれらの方法には、DEM の誤りが原因で、作成される流域界データにも誤りが含まれるという問題点がある。HYDRO1k (USGS, 2000) は当時世界最高解像度の DEM であった GTOPO30 (USGS, 1996) を元に作成されたが、流域界データには多くの大きな誤りが含まれている。

上記のような誤りを最小限に抑えるために “Stream Burning” という手法が Maidment (1996) により提案されている。この手法は既存の河道位置データに沿って DEM の標高を下げた後、流域界データを作成するものであり、既存の河道位置データと整合性のある流域界データを出力できる。ただしこの手法を適用する際の注意点として以下のような場合がある。

①DEM のひとつのセル内に複数の河道が存在している場合、②Stream Burning に使用する河道位置データが誤りを含んでいる場合である。①、②の場合は作成した流域界データが誤りを含む可能性を持つが、現在のところこれらの誤りを自動的に取り除く方法はない。

また DEM から流域界データを作成する上で非常に重要な作業として、DEM に存在する無数の窪地 (周りがすべて自身より高い標高で囲まれているセル) が “実際に存在している窪地 (natural sink : 本論文ではこれを自然窪地と呼ぶ)” なのか、DEM のエラーによる窪地なのか識別する作業がある。この識別作業も自動的に行う手法はない。

(B) 全球流域界データ作成手法

本研究では (A) 項で説明した DEM から流域界データを作成する際の問題点を受け、以下の方法により流域界データを作成した。図 2 に流域界データ作成の作業フローを示す。以下では図 2 中の Step に従って、詳細に説明する。

Step1 : ここでは DEM に対し、自然窪地の同定を行う。本研究で使った DEM を表 2 に示す。自然窪地の同定はまず自然窪地の候補を挙げ、その中から収集した河道・湖沼データを参照して

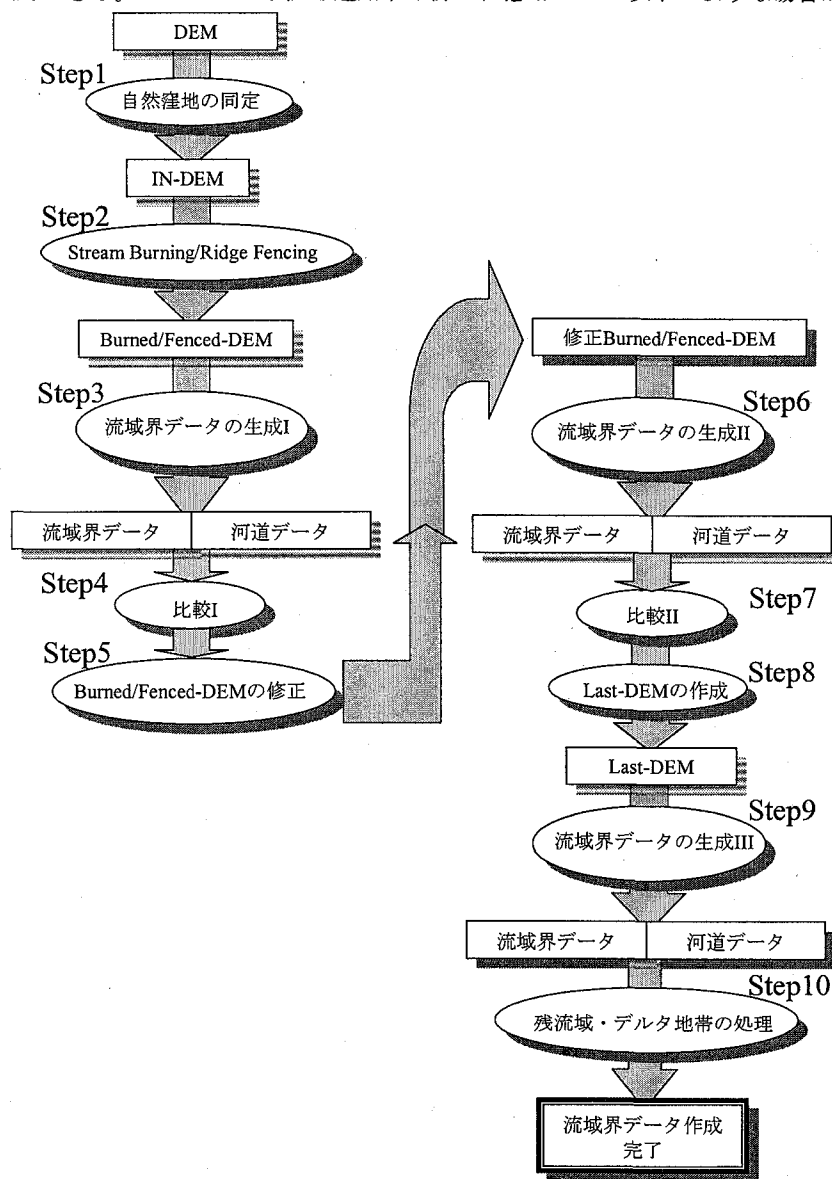


図 2 作業フロー

同定を行う。自然窪地の候補としては HYDRO1k で配布されている DEM(以下 H1k-DEM と呼ぶ)の自然窪地及び次の

(a) ~ (c) に該当する GTOPO30 の窪地である。ここで GTOPO30 を使用する理由は、GTOPO30 が H1k-DEM に窪地処理を行う前の DEM であるからである。(a) : DDM30 (30 分メッシュの流向図; Döll ら, 2002) で最下流となっているセル内またはセルの近辺。

(b): 世界湖沼データベース (Global Lakes and Wetland Database : GLWD ; Lehner ら (2004)) で流出口を持たないまたは持たない可能性がある湖 (MGLD_TYPE が closed か closedx の湖) の位置あるいはその近辺。

(c): 収集した流域界データ・流域図より閉流域の存在が記述されており、その閉流域の中あるいは近辺。

以上により選択した窪地の候補のなかから、その窪地を通る河道・湖沼データが、海またはより高度の低い地域へ到達していないものを選び、自然窪地とした。

最後に自然窪地と同定された箇所の DEM の値を Null 値にした。これにより窪地処理をしてもこの窪地は埋まらない。このようにして作成した DEM を IN-DEM と呼ぶ。

Step2: Step1 で作成した IN-DEM に Stream Burning、Ridge Fencing を行い、Burned/Fenced-DEM を作成する。Ridge Fencing とは既知の流域界に沿って DEM の標高を上げた後、流域界データを作成する手法であり、既存の流域界データと整合性のある流域界データを作成することができる。また同時に得られる流向図、流積図は既存の流域界データと整合性を持つ。

Stream Burning、Ridge Fencing に使用した河道位置データ、流域界データを表 3 と表 4 に示す。Stream Burning では河道・湖沼データに沿って DEM の標高を 5000m 下げ、また Ridge Fencing では流域界データに沿って DEM の標高を 500m 上げた。

Step3 : Step2 で作成した Burned/Fenced-DEM を入力とし、流域界データと河道位置データを生成する。このとき河道とみなす上流セル数の閾値は 1000 に設定した。

Step4 : Step3 で作成した流域界データと河道位置データ、Stream Burning で使用した河道位置データ、Ridge Fencing で使用した流域界データを GIS 上で重ねて視覚的に比較する。そしてこの視覚的比較により Stream Burning で使用した河道位置データと作成した河道位置データが一致していない箇所、また Ridge Fencing で使用した流域界データと作成した流域界データが一致していない箇所を見つける。ここで Stream Burning で使用した河道位置データと作成した河道位置データが一致しない原因は、上述のように DEM のひとつのセル内に複数の河道が存在するからである。また Ridge Fencing で使用した流域界データと作成した流域界データが一致しない原因は、Stream Burning に使用した河道位置データが Ridge Burning に使用した流域界データを貫通しているからである。

Step5 : Step4 で見つけた Stream Burning で使用した河道位置データと作成した河道位置データが一致していない箇所、また Ridge Fencing で使用した流域界データと作成した流域界データが一致していない箇所を修正する。この修正は Burned/Fenced-DEM を修正することで行う。前者の場合は、複数の河道が隣接して存在しているセルの DEM の標高を上げる。また後者の場合は Stream Burning に使用した河道位置データが Ridge Fencing に使用した流域界データを貫通している箇所の DEM の標高を上げる。以上のようにして作成した DEM を修正 Burned/Fenced-DEM と呼ぶ。

Step6 : 修正 Burned/Fenced-DEM を入力とし、流域界データと河道位置データを作成する。この Step6 で作成した流域

表 2 使用した DEM

地域、国、流域	河道・湖沼データ
日本	KS-272,W09-50A; 国土数値情報 (日本)
朝鮮半島	River-Korea
カナダ	canadaskel_l, canadalake_p; GeoGratis Canada
上記以外の地域、国、流域	watrcrs1, inwatera(f_code=BH000のみ); VMAP0

表 3 Stream Burning に使用した河道データ

国・地域	DEM	解像度
日本	G04-56M; 国土数値情報 (日本)	250mメッシュ
朝鮮半島	3secDEM-Korea	3秒メッシュ
日本、朝鮮半島以外の地域	H1k-DEM	1kmメッシュ

表 4 Ridge Fencing に使用した流域界データ

地域、国、流域	流域界データ
日本	KS-273; 国土数値情報 (日本)
韓国	Basin-Korea
メコン川下流域	B-CATLMB50; Mekong River Commission ¹⁾
カナダ	canadaskel_l, canadalake_p; GeoGratis Canada
アメリカ	Hydrological Unit Catalogue
オーストラリア	Australia's River Basins 1997 ¹⁾

1)流域界データを修正して使用

界データと河道位置データは、Step3, 4 の処理により Ridge Fencing に使用した流域界データ、Stream Burning に使用した河道位置データと整合したものとなっている。ただし、Stream Burning に使用した河道位置データが Ridge Fencing に使用した流域界データを貫通している箇所については、Ridge Fencing に使用した流域界データのみと整合性を持つ。

Step7: Step6 で作成した流域界データ、河道位置データを世界各国・機関から収集した流域界に関するデータ・資料と比較・参照し、Stream Burning に使用した河道位置データ、Ridge Fencing に使用した流域界データに誤りがないかチェックを行う。ただしここで Stream Burning に使用した河道位置データの誤りと判断するのは、比較に用いたデータ・資料の多くが Stream Burning に使用した河道位置データと整合していない場合である。また Ridge Fencing に使用した流域界データの間違いと判断する場合も同様である。ここで使用した収集したデータ・資料とは、流域界データ、河道位置データ、流域図、河道図、世界地図、及び世界流出量データセンター (Global Runoff Data Center : GRDC) の流量観測所データのことである。本論文中で収集したデータ・資料といった場合は、これらのデータ・資料を指すことにする。また GRDC の流量観測所データに関しては上流流域面積が 1000km² 以上でかつ河川名、観測名、緯度・経度から正しい観測所の位置の同定が可能であり、さらに記載されている上流流域面積の値が他の情報と比較して妥当なものを選択し使用。選択した流量観測所は、全 7222 観測所中、4883 観測所であった。

Step8: Step7 で発見した Stream Burning に使用した河道位置データの誤り、また Ridge Fencing に使用した流域界データの誤りを修正する。これを修正 Burned/Fenced-DEM を修正することによって行う。ここで作成した DEM を Last-DEM と呼ぶ。

Step9: Last-DEM を入力として流域界データを作成する。ここで作成した流域界データは Step10 の残流域の処理、デルタ地帯の処理を経て最終的な流域界データとなる。またここでは最終的な河道位置データ、流向図、流積図も同時に作成する。

Step10: Step9 で作成した流域界データに対し、残流域の処理とデルタ地帯の処理を行う。本研究において残流域とは流域面積が 1000km² より小さい流域のことである。GBDB では複数の残流域を地理的な位置関係より結合してひとつの単位残流域として扱う。またデルタ地帯では、河道が河口付近で分流、合流を繰り返しながら海に到達する。既存のツールではこのような分流する地帯を表現できず、しばしば単位流域の上下流の関係は実際と異なるものとなる。またデルタ地帯では単位流域の定義自体も難しい。そこで GBDB ではデルタ地帯のいくつかの単位流域を併合した。

3.2 流域界データへの属性情報の格納

本節では各単位流域へ格納した属性情報 (表 1) について説明する。OID と Shape は ArcGIS により自動的に与えられ、Shape_Length (単位流域周回長)、Shape_Area (単位流域面積) は ArcGIS により自動的に算出される。Accmu_Area (上流流域面積) については上流の Shape_Area を合計して与えた。各単位流域は Region_NO (地域番号)、SubRegion_NO (準地域番号)、Basin_NO (流域番号)、Pfa_Code (Pfaffstetter Code) で識別される。まず全世界を大陸ごとに 6 地域に分け Region_NO を与えた。次に各地域を分割しこれを準地域とし、それぞれの準地域に SubRegion_NO を与えた。さらに各準地域内の各流域に Basin_NO を与えた。最後に各流域内の各単位流域に Pfaffstetter Code 体系 (Pfaffstetter, 1989) を用いた Pfa_Code を与えた。Pfa_Code については Accumu_Area と各単位流域の上下流の関係から算定し与えた。Pfa_Code により各単位流域の上下流の関係が用意に判断できる。Dwn_Pfa_Code (下流単位流域の Pfaffstetter Code) については下流単位流域の Pfa_Code より与えた。Ave_Elev (単位流域内平均高度)、Ave_Slp (単位流域内平均傾斜) については GTOPO30 から算出した。Str_Lngth (単位流域内河道長) については作業 Step9 で流域界データと同時に得られる河道位置データの単位河道長より与えた。Ave_Str_Slp (単位流域内河道平均傾斜) については河道位置データと GTOPO30 より算出。Country_1~Country_5 (単位流域が属する国) と Country_1_Rt~Country_5_Rt (単位流域が属する国の割合) については国連食料農業機関 (Food and Agriculture Organization of the United Nations) が作成した行政界データ (FAO, 2002) を用いて与えた。Pop (単位流域内人口)、Pop_Dnsty (単位流域内人口密度) についてはオークリッジ国立研究所が作成した全球 30 秒メッシュ人口データ LandScan2003 (ORNL, 2003) を各単位流域で集計し Pop を求め、それを Shape_Area で除して Pop_Dnsty を求めた。LULC1~LULC17 (単位流域内土地利用/被覆面積割合) については米国地質調査所が作成した全球 30 秒メッシュの土地利用/被覆データ Global Land Cover Characterization (Loveland ら、2000) を用いて与えた。土地

利用/被覆の分類としては地球圏－生物圏国際共同研究計画（International Geosphere Biosphere Programme）の土地利用/土地被覆分類を用いており、1 から 17 の番号はこれに対応したものである。

4 他のデータとの比較による信頼性の検討

本章では他のデータとの比較を行い、GBDB の流域界データの信頼性の検討を行う。比較に使用したデータは①収集した流域界データ、②GRDC 流量観測所の上流流域面積である。以下ではそれぞれの比較方法と比較結果について述べる。

4.1 収集した流域界データとの比較

収集した流域界データを作成した流域界データと GIS 上で重ねて、地理的な比較を行った。比較において地理的な一致度を右式で与えられる $AMAR$ (Average Match Area Rate) で評価した。 $AMAR$ は 1 のとき重ねた二つの流域界は完全に一致していることを示し、1 に近づくほど地理的な一致がよいことを表す。同じ比較を HYDRO1k の流域界にも行った。図 3 に比較結果を示す。図 3 の横軸は比較流域の整理番号で、GBDB の各流域に $AMAR$ が大きい順につけた番号である。縦軸は $AMAR$ である。GBDB の結果 (338 流域) と HYDRO1k の結果 (331 流域) を同時にプロットしてある。図 3 より GBDB の流域界データはほとんどの流域で $AMAR$ が 1 に近く、HYDRO1k より大きい $AMAR$ を示していることがわかる。

$$AMAR = (MAR_A + MAR_B) * 0.5$$

ここで

$$MAR_A = MA / CA$$

$$MAR_B = MA / RA$$

CA : Calc_Area; GBDB又はHYDRO1kの流域界データの流域面積

RA : Ref_Area; 収集した流域図より作成した流域界データの流域面積

MA : Match_Area; 地理的に CA と RA が一致する面積

4.2 GRDC 流量観測所データの上流流域面積との比較

ここでは GRDC 流量観測所データ 4883 点を用いて、報告されている上流流域面積と GBDB で計算した上流流域面積を比較した。比較結果を HYDRO1k の比較結果とともに図 4 に示す。図 4 の(a)が GBDB の比較結果で、(b)は HYDRO1k の比較結果である。ただし HYDRO1k のデータにはオーストラリアのデータがなく 4753 点の結果である。図 4 の横軸は GRDC 流量観測所データで記載されている上流流域面積を表し、縦軸は計算した上流流域面積である。横軸・縦軸とも常用対数に取ってある。図中の各点が各 GRDC 流量観測所に対応する。図 4 の(a)と(b)を比べると明らかに上流流域面積が 10000km² 以下の観測所において HYDRO1k の一致度より GBDB の一致度が向上しており、上流流域の流域界や流域面積が小さい流域の流域界を正確に表現できていることが推測できる。

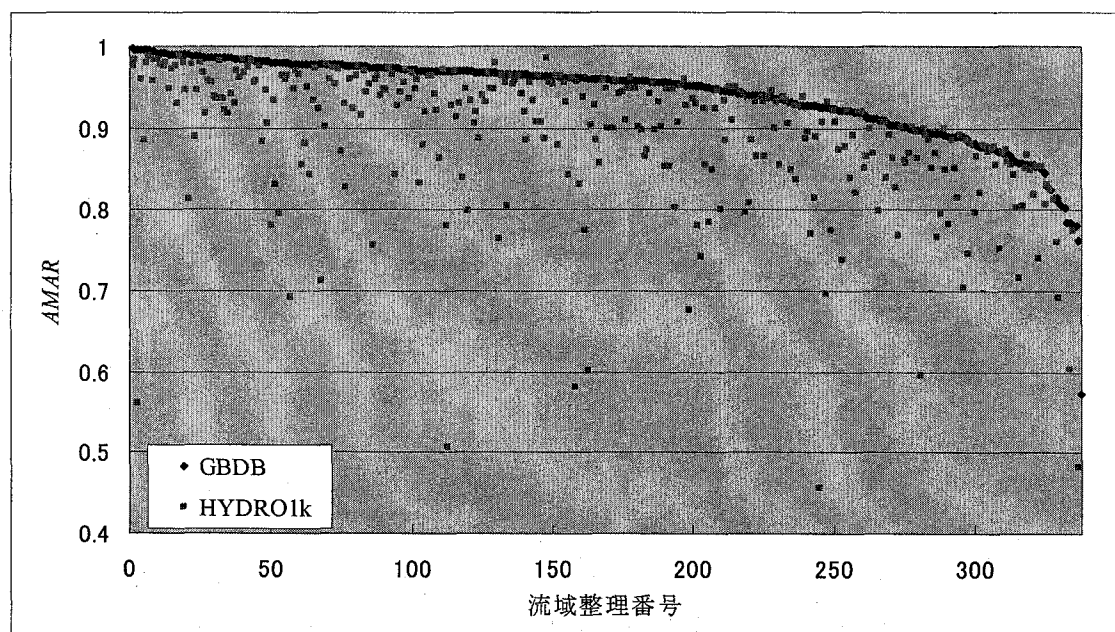
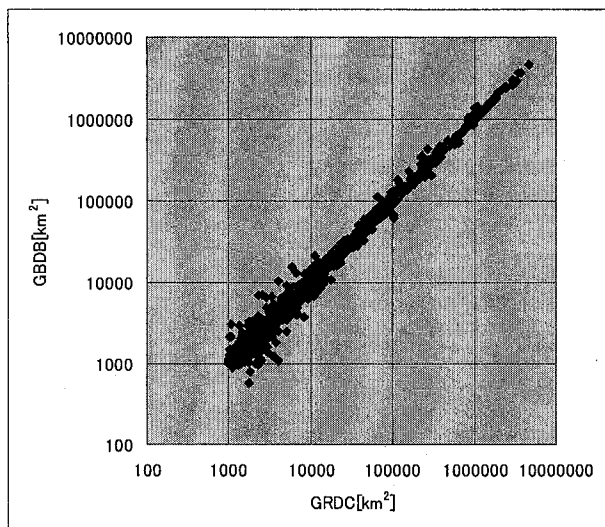
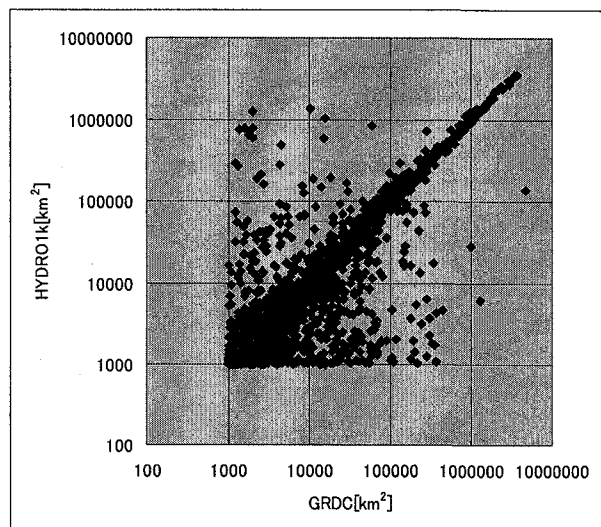


図 3 収集した流域界データとの地理的一致度



(a) GBDB-GRDC



(b) HYDRO1k-GRDC

図 4 GRDC 流量観測所での上流流域面積比較[log₁₀-log₁₀]

5 まとめと課題

本研究では、以下の方法により全球流域界データを作成した。

- ① HYDRO1k 及び各国の比較的精度が高いと推測される DEM を基本的使用する。
- ② 自然窪地の同定は複数のデータ・資料を参考にして手作業で行う。
- ③ 既存の河道位置データを使用して、Stream Burning の手法を全球に適用。
- ④ 信憑性の高い流域界データが得られる国、流域に対しては Ridge Fencing の手法を適用。
- ⑤ Stream Burning、Ridge Fencing をした際に生じる誤りを手作業で修正する。
- ⑥ 収集したデータ・資料との比較・参照により Stream Burning、Ridge Fencing に使用した流域界データ、河道位置データの誤りを手作業で取り除く

この方法により作成した流域界データは収集した流域界データとの地理的比較、GRDC 流量観測所の上流流域面積比較において非常に一致を見せた。次に作成した信頼性の高い流域界データに様々な基礎情報を格納することにより、統合的な世界流域データベース (GBDB) を開発した。GBDB は持続的な水管理システムの構築に向けた基礎情報を提供し、さらには水に関連したさまざまな分野で研究・評価・解析に利用されることが期待される。

今後の課題として以下のことが挙げられる。①貯水池・湖沼データとの結合、②灌漑水路などの人工流路の考慮である。①に関しては、貯水池・湖沼が水需給に与える影響の大きさを考えると、これらのデータを GBDB に含めることは必須である。現在、GLWD (Lehner ら、2004) との結合を実行中である。②に関しては、現在利用できる流域界作成ツールでは下流に向かって分流するような上下流の関係を正確に表現できない。河口地帯ではこのようなことが頻繁に起きているが、これらの地域が水需給の面で大きな影響を持っていることを考えると、このような地域の上下流関係を正しく表現できるようにツールの改良を行う必要があると考えられる。

参考文献

- Döll, P., and B. Lehner, 2002. Validation of a new global 30-min drainage direction map, *Journal of Hydrology*, 258, 214-231
- ESRI, 1993. Digital Chart of the World 1:1M
- FAO, 2002. Coastline of the World(VMAP0). (available online at <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.search>)
- Lehner, B. and P. Döll, 2004: Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. of Hydrol.* 296/1-4: 1-22
- Loveland, T.R., B.C. Reed, J.F. Brown, D.O. Ohlen, J. Yang, L. Zhu and J. W. Merchant, 2000, Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data: *International Journal of Remote Sensing* , v. 21, no. 6/7, p. 1,303-1,330.
- Maidment, D.R., 1996. GIS and hydrological modeling: an assessment of progress. Presented at the Third International Conference on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, 20-25 January 1996.
- ORNL, 2003. LandScan(available online at <http://www.ornl.gov/sci/gist/landscan/>)
- Pfaffstetter, O., 1989, "Classification of hydrographic basins: coding methodology", unpublished manuscript, DNOS, August 18, 1989, Rio de Janeiro; translated by J.P. Verdin,
- USGS, 1996. GTOPO30 (available online at <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>)
- USGS, 2000.HYDRO1K (available online at <http://lpdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/>)