

# Internet 上の対話型 GPS 可降水量データベースの開発と、 GPS 可降水量の動態に関する研究

近藤昭彦\*・中山大地\*・興野巧磨\*\*・

\*千葉大学環境リモートセンシング研究センター

\*\*千葉大学大学院自然科学研究科

## I. はじめに

GPS (Global Positioning System) は米国によって開発された人工衛星による位置決定システムである。もともと軍用に開発されたシステムであるが、民生分野の利用が可能になってから、カーナビ、飛行機や船舶の航法支援システム、測量、等様々な分野に応用されるようになった。GPS で得られる位置の情報には様々な誤差が含まれるが、最も重要な誤差は大気とそこに含まれる水蒸気に起因する大気遅延量であり、GPS による測位の精度向上の障害要因となっていた。一方、GPS 衛星の軌道情報が高精度化されることによって、大気遅延量の中から水蒸気に関するシグナルを高精度で抽出する技術が考案された(例えば、Businger *et al.*, 1997)。これにより、測位の誤差を気象学におけるシグナルに変換することが可能となった。

地震国である日本では地殻変動の観測を目的とした超高密度の GPS 観測網を整備している(宮崎・畑中, 1998)。その配置密度は約 20km に 1 点であり、気象観測における AMeDAS の観測密度にも匹敵する。しかし、AMeDAS には水蒸気に関する観測項目はない。気象学分野における水蒸気観測の手法はラジオゾンデに依存しており、全国でわずか 18 ヶ所で観測が行われているのみである。湿度の観測も全国で約 150 カ所の気象官署で行われているが、水蒸気の多様な時間空間変動を捉えるには全く不十分であった。

このような背景のもと、科学振興調整費による GPS/MET Japan プロジェクトは 1997 年度からスタートした。プロジェクト発足までには測地学分野における大気遅延の評価に関する研究や(例えば、田中, 1986 ; 市川ほか, 1997)、1995 年からは GPS の集中観測による水蒸気変動に関する総合研究(科研費基盤研究(A)、代表: 田中寅夫)が行われており、プロジェクトの基盤は確立していた。気象学分野では高い時間空間分解能の水蒸気情報を得ることが困難なこと、測地学分野では水蒸気に起因する大気遅延量が精度向上の障害になっていた。ここに、国土地理院が整備している稠密な GPS 観測網から時間空間分解能の高い水蒸気情報を抽出し、気象学分野の研究に応用するとともに、測地の精度を高めるというプロジェクトに対する動機があった。

2000 年 3 月で GPS/MET Japan は前期 3 年間の研究を終えたが、この間に水蒸気観測の精度向上に関する研究(例えば、大谷ほか, 1997)、水蒸気変動の実態に関する研究(例えば、岩淵ほか, 1998)が進み、GPS の水蒸気観測手法としての精度は十分確認され、実用段階に入ったといえる。現在では国土地理院による GPS 観測密度である約 20km に 1 地点の割合に相当する全国約 1000 地点における、3 時間ごとの可降水量観測値のデータセットが作成されている。

これらの水蒸気情報はこれまで不可能であった高時間空間分解能の水蒸気の動態や、大気陸面相互作用に関わる諸現象を明らかにする可能性を秘めており、潜在的に様々な応用分野が考えられる。しかし、GPS/MET Japan による水蒸気データセットは大容量かつ位置の情報を持つ地理情報であるため、複雑多様な気象現象に

関するシグナルをその中から抽出する発見的な研究を行うには、系統だった分析的なデータのスクリーニングが必要である。

そこで、本論ではまず関連分野のユーザーが簡単にデータにアクセスでき、適当な条件による検索とダウンロードが行える Internet 上のシステムを開発した。このシステムでは水蒸気情報を他の地理情報と同時に可視化することによってデータのスクリーニングを行うことができる。扱うデータが位置の情報を持つ地理情報であるため、可視化して分布を見ることのメリットは非常に大きい。データアクセスに関しては Internet 上に構築することによってユーザーの便宜を計った。今後、多くのユーザーの利用を期待しているが、本論ではシステムの構成について記述した後、このシステムの運用によって明らかになった可降水量の動態について若干の事例を紹介する。

## II. 対話型 GPS 可降水量データベースの構築

### 1. GPS 水蒸気情報

国土地理院のGPS連続観測システムによって取得された3時間ごとのルーチン観測データはSINEX(Software-INdependent EXchange Format)形式でデータ化されている(宮崎・島田、1998)。GPS/MET JAPANではこれをもとに、GPS観測点での定常ルーチンで解析された可降水量、内挿した気象要素、高層データを含んだCD-ROMを各年ごとに作成した(瀬古、1998)。本論ではこのデータセットを用いて、Internet上の対話型データベースシステムを構築した。

### 2. システムの構成

本研究における対話型 GPS 可降水量データベースは、以下の3点の条件を満たす仕様とした。

第1は、対話的なデータの検索・ダウンロードが可能なシステムである。利用者は条件を満たすデータを画面上で検索し、必要なデータをダウンロードしてそれぞれの研究分野に利用可能でなくてはならない。これは Internet でデータベースを公開し、WWW ブラウザでデータの検索・表示を行うシステムを開発することにより解決した。

第2に膨大なデータから必要なデータを効率よく抽出することが可能であるということである。これは様々な条件でデータを検索できる以外にも、データを適切に可視化して、データのスクリーニングを可能にすることにより解決した。

そして第3に、今後のデータベースの維持管理のため低コストのシステム構築が必要であるという点である。これには低価格の汎用 PC を用いてフリーのソフトを利用することにより問題の解決を図った。

なお、GPS 可降水量とともに表示してスクリーニングを容易にする各種データには著作権が存在するものがあるため、データのダウンロードにはパスワードによるログオンを要求するシステム仕様としている。

#### 1) データベースシステムの概要

本システムはクライアント・サーバーデータベースシステムを採用し、検索等に関わるすべての処理をサーバ側で行うことによりクライアント側の負担を軽減している。また、クライアントとしては一般の WWW ブラウザを利用するため、Internet に接続ができる環境があれば、OS やハードウェア構成にかかわらず本データベースを利用可能である。

本システムのサーバには一般の PC (CPU は Intel 社製の Celeron 300MHz、メモリ 128MB、ハードディスク 12GB) を用い、OS には Red Hat Linux4.2 を用いている。HTTP サーバには Apache1.3.4、RDBMS (リレーショナル・データベース・マネージメント・システム) には PostgreSQL6.4.2、また、データのマッピングには GMT3.3.2 を使用し、生成される PS (ポストスクリプト) ファイルを Ghostscript と ImageMagick を用いてビットマップ画像に変換している。これらのアプリケーションは、スクリプト言語の一種である PHP 3.0.6 を HTTP サーバモジュールとして用いる事によって連携している。以上のシステムは基本的にフリーソフトから構成されており、サーバの維持管理の点からも、お互いの連携の点からも最適の組み合わせと考えられる。

図 1 にシステムの構成を示す。ユーザは WWW ブラウザを利用して検索フォームにアクセスし、必要事項を入力して HTTP サーバに送る。HTTP サーバはブラウザから送られた要求 (クエリー) を受け付け、PHP3 スクリプトを実行して SQL クエリーを作成し、これを RDBMS に発行する。RDBMS はデータベースにアクセスし、検索結果を HTTP サーバに返す。検索結果は HTTP サーバ内部で PHP3 スクリプトによって処理され、表形式への変換、GMT を用いたマッピングおよびダウンロード用データの作成などの処理を経た後、最終的に HTML に整形される。この HTML がクライアントのブラウザに送られ、結果が表示される。このように、検索フォームから送られたクエリーはすべてサーバ側で処理され、ブラウザに表示される仕組みになっている。

## 2) データベースの構成

本データベースシステムでは、1996 年 4 月から 1998 年 12 月までの GPS 可降水量データと、降水量や風向風速と対比を行うための AMeDAS データの 2 種類のデータベースを使用する。

GPS 可降水量データベースは GPS 可降水量テーブル、GPS 月平均可降水量テーブル、GPS 可降水量観測地点情報テーブル (945 地点) の 3 個のテーブルからなり、それぞれ観測地点番号をキーとしてリレーションを構成している。AMeDAS データベースは、AMeDAS 観測要素テーブル、AMeDAS 観測地点情報テーブル (約 1300 箇所) の 2 個のテーブルからなり、同様に観測地点番号をキーとしてリレーションを構成している。AMeDAS データに関しては風向風速のデータのみを使用しているが、今後その他のデータも比較のために利用可能にしていく予定である。

それぞれのテーブルに含まれるデータを表 1 に示す。なお、各データベースの容量は、GPS 可降水量データベースの容量が約 1GB、AMeDAS データベースが約 65MB となっている。

## 3) 検索システムの利用方法

現在、データベースは "http://133.82.233.178/GPSmet/" で公開している。エントリーページから検索画面へ進むと、可降水量データ検索フォーム、観測地点情報検索フォーム、可降水量コンター作成フォームの 3 種類の検索フォームが用意されている。現在、一般ユーザに公開しているのは可降水量コンター作成フォームのみであり、他のフォームとデータのダウンロードに関しては

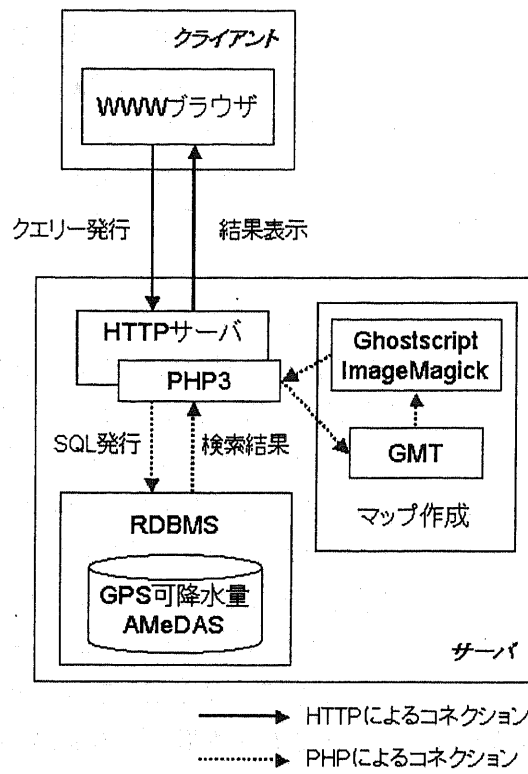


図1 システムの基本構成

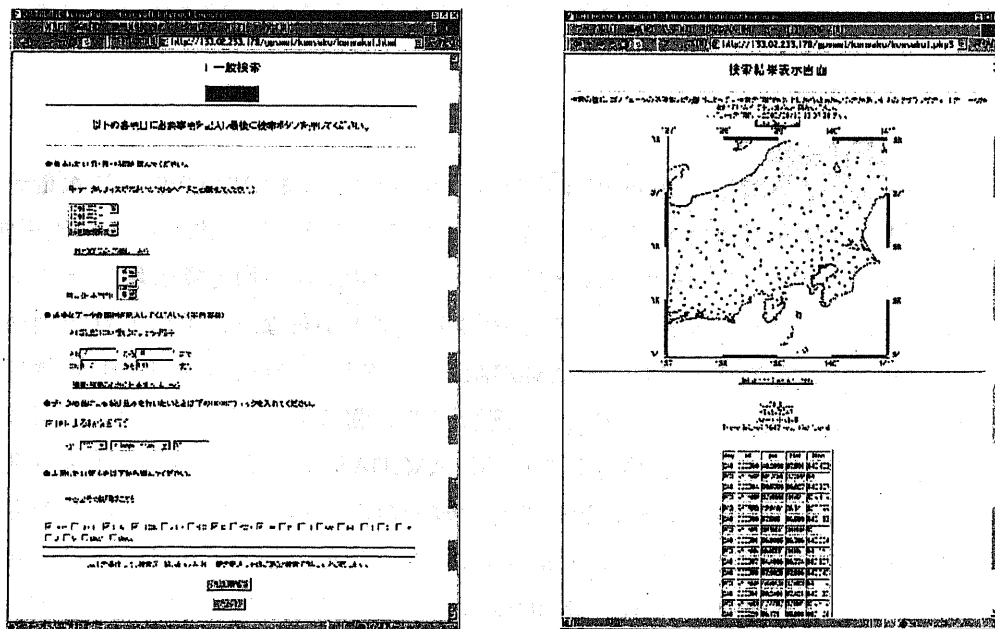


図2 検索条件設定画面 (左) と検索結果 (右)

GPS/MET JAPAN のパスワードの入力が必要であるが、近日中に公開する予定である。なお、AMeDAS に関しては公開の権利を持たないため、データのダウンロードはできない（ユーザーは気象業務支援センターを通じて購入可能）。

可降水量データ検索フォームでは、1996年4月から1998年12月までの観測項目の検索が可能となっている。検索条件は観測年月・時間の他に、観測地点の緯度経度、観測値の値などを設定できる。同時に二ヶ月以上の検索を行うことも可能であるが、データ量が膨大になるため、サーバへの負荷を考えるとなるべく一ヶ月ごとの検索が望ましい。また、表示項目も選べるようになっており、必要な項目のみを表示することが可能である。

図2に検索画面と検索結果を示す。ブラウザの上半分には検索条件を満たす観測地点位置が地図上にプロットされ、下半分には検索結果が表示される。これらの結果から、検索条件の見直しなどを検討することが可能である。地図上の"Data Download"のリンクは、ブラウザの下半分に表示されている検索結果をタブ区切りテキストで表示するものである。ブラウザにリンク先をファイルに保存する機能があれば、適当なファイル名をつけて検索結果を保存することが可能になる。

観測地点情報検索フォームは、GPS 観測点の観測点番号別、都道府県別、緯度経度の指定による検索の三種類の検索ができる。なお、現時点（2000年3月）では1997年のGPS観測点に関する情報のみが検索可能であるが、データが揃い次第順次拡充していく予定である。このフォームでは地点番号、地点名、緯度経度、標高、所在する都道府県・市町村、標高などの項目を表示することができ、検索フォーム下部のチェックボックスで表示項目を選ぶことができる。検索結果画面ではブラウザの上半分に観測地点が地図上に表示され、下半分にはそれぞれの観測地点の各種情報が一覧表で表示される。また、地図上部の"Data Download"からは、可降水量データ検索と同様に検索結果をファイルとしてダウンロードすることが可能である。この場合、システムの都合上漢字コードがEUC形式になってしまうため、パソコン上のGISや表計算ソフトなどで利用するには漢字コードをシフトJISに変換する必要がある。

本検索システムの中核をなすのが可降水量コンター作成フォームである。このフォームは検索条件にコンターを作成したい日時および範囲を入力することにより、可降水量を地図上に表示する。画像は等値線とカラーマップによる二種類の表示をサポートしており、AMeDASデータより得られる風のデータとリンクすることによって、同時に風向風速も表示される。等値線およびカラーマップによる検索結果を図3と図4に示す。地図上の赤い矢印がAMeDASによる風向風速を表している。また、ここでも他の検索結果と同様にデータをダウンロードすることが可能である。データフォーマットは経度、緯度、可降水量の順番になっており、GISや他のアプリケーションでのデータの再利用が可能になっている。

### III. データベースによって捉えた可降水量変動

#### 1. 台風の移動に伴う可降水量変動

研究実施時点でデータ検索が可能な期間は1996年から1998年であるが、この間に可降水量変動との対比が可能な台風は7個（上陸6個、接近1個）あった。ここでは1996年の台風6号を対象にして、台風通過に伴う可降水量の変動について記載する。

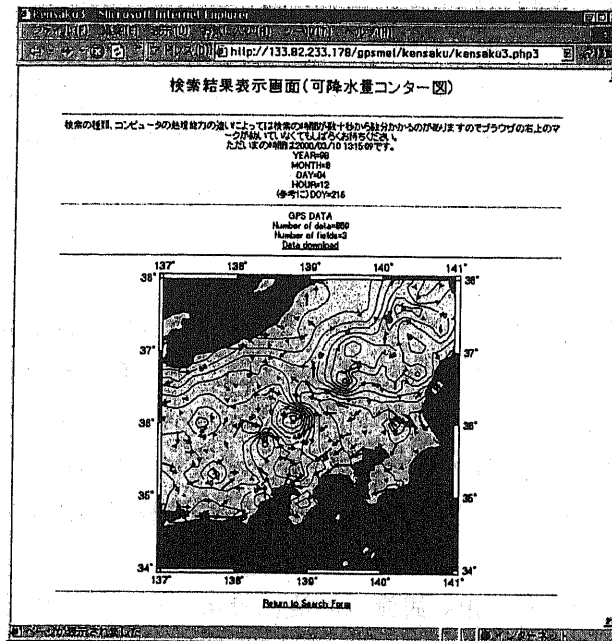


図3 可降水量コンター図

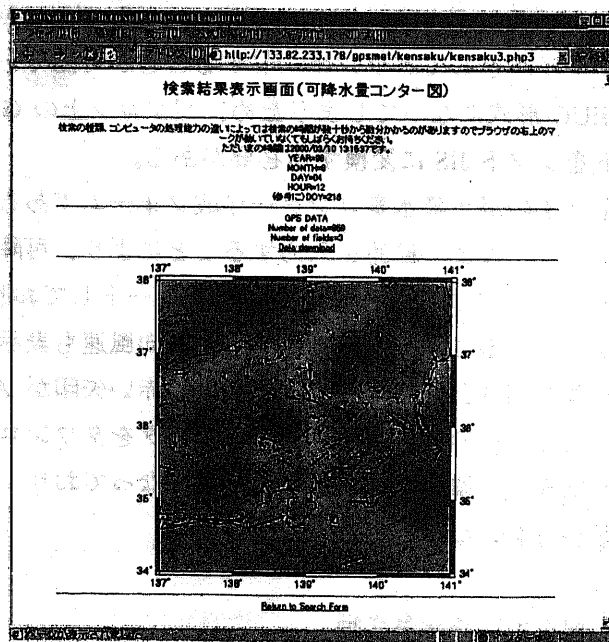


図4 可降水量カラーマップ

図5と図6は台風6号通過時の衛星画像（気象協会調整画像）と台風経路図である。台風6号は7月13日15時にマリアナ諸島の北の海上で発生した後、北西に進み、16日の9時ごろに南大東島の南東の海上で中型で非常に強い勢力となった。その後、北に進路を変え、18日13時過ぎに中型で強い勢力を保ちながら鹿児島県薩摩半島南部に上陸した。引き続き、台風は勢力を弱めながら九州を縦断して周防灘を北に進み、進路を東に変えて19日15時に愛媛県の北の海上で弱い熱帯低気圧となった。

台風の移動経路と時刻に関する情報を得たら、GPS可降水量データベースシステムにアクセスし、領域・時間を設定することにより、可降水量分布画像および対応する時刻のデータをダウンロードする。得られたデータはユーザーの利用する作図アプリケーションソフトウェアによって簡単に図化することができる。

図7は96年7月18日18時のGPS可降水量データベースシステムを利用して作成した可降水量のコンター図である（データスクリーニング用システムであるので陸域のみに注目）。同時に示した風向・風速ベクトルから台風はこの時点で熊本県付近にあることがわかる。可降水量は台風の前面で低く、中心よりやや遅れて可降水量のピークが見える。また、台風の進行方向右側に可降水量の大きな値を示す地域が広がっているが、これは水蒸気のソースが海洋にあることを示唆している。

図8は台風6号通過時の鹿児島におけるGPS可降水量、ゾンデ可降水量と降水量の変動を示した図である。GPS観測点（ID=940097鹿児島1）の標高は472mであり、高層観測点（ID=827鹿児島）の標高31mよりかなり高い。高層気象観測とGPSによる可降水量の絶対値のバイアスはこの標高の差に起因しているが、GPSとゾンデによる可降水量変動はよく一致していることがわかる。

GPS可降水量の増加が始まるのは7月17日9時で、この時点は図5のGMS画像によるとほぼ鹿児島に台風の雲がかかる時刻と一致している。その増加量は約27mmであるが、GPS可降水量は17日15時から21時のあいだに一旦約14mm減少した。この時GPS観測点は台風を取り巻く雲の間に位置していた。その後、台風が中心が近づくにしたがってGPS可降水量は増加し、7月18日15時頃に最大となる。降水量はGPS可降水量の2度目の上昇時に生じ、GPS可降水量と降水量のピークはほぼ一致した。その後、GPS可降水量は減少し、台風の雲が抜ける20日の9時ごろに最低を記録する。

図9は台風の進路方向に位置するGPS観測点における可降水量の変動を示す。台風接近時の可降水量の1度目の増加時、2度目の増加時ともにきれいに位相の遅れが見られる。鹿児島と安岐の距離は約250kmで、可降水量のピークの位相差は9時間である。したがって、台風は時速約30kmで進行していたことになる。

## 2. 寒冷前線通過時の可降水量変動

前線の通過に伴う可降水変動は岩淵ほか（1998）や高木（1999）によって報告されている。特に岩淵ほか（1998）はGPS可降水量の変動が気象現象を反映していることを初めて示した重要な研究である。今後も様々な解析事例を積み重ねていく必要があるが、本論で構築したデータベースが有効なツールとなると思われる。そこで、構築したデータベースの運用によって、可視化を行い、その動態について検討を行った事例を記載する。

解析は1996年10月7日から8日にかけて日本列島を通過した寒冷前線について行った。図10は当時の天気図であるが、中国四国地方を東北東から南南西に寒冷前線が延び、太平洋に抜けていく

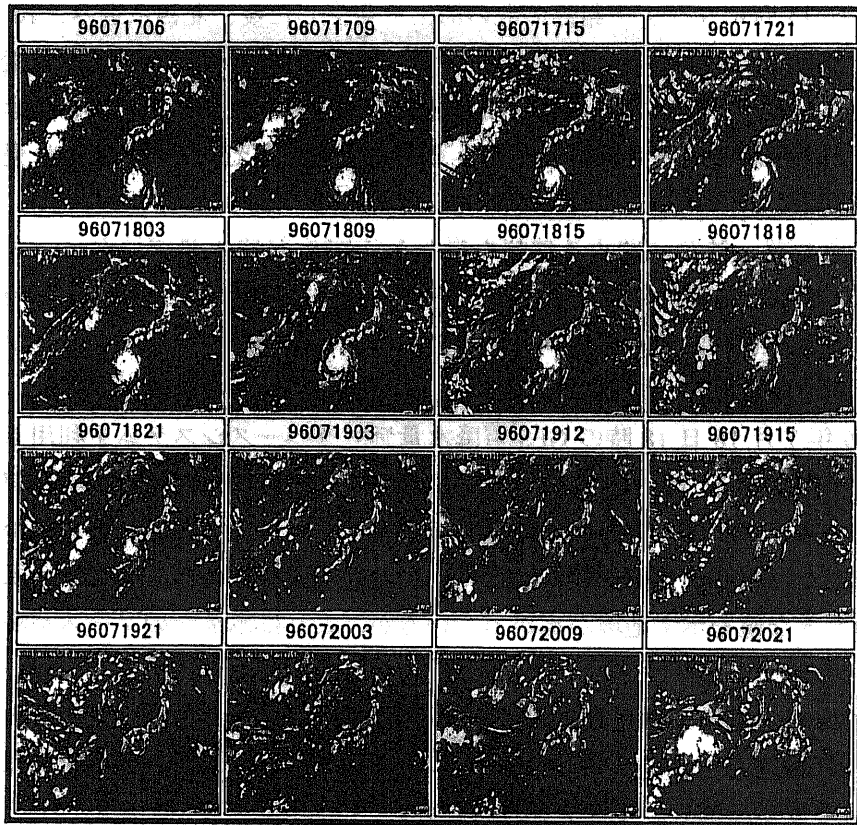


図5 1996年台風6号上陸時の雲画像  
(財団法人日本気象協会調整画像)

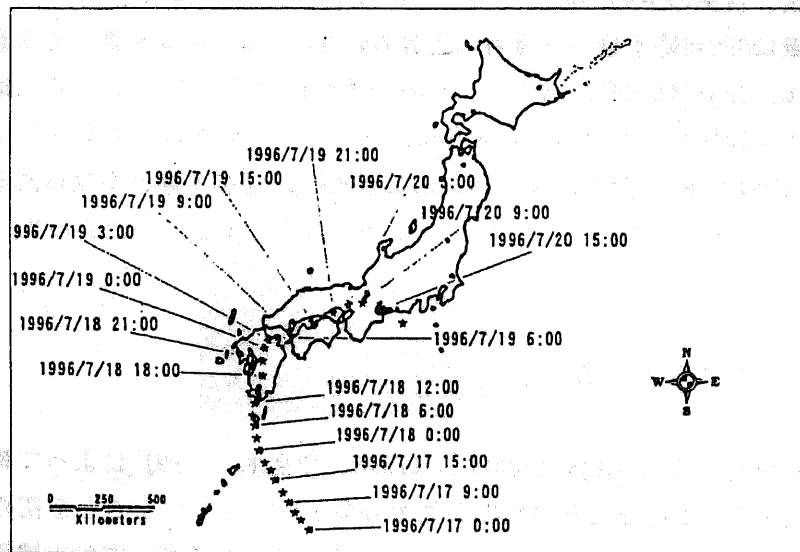


図6 1996年台風6号の移動経路



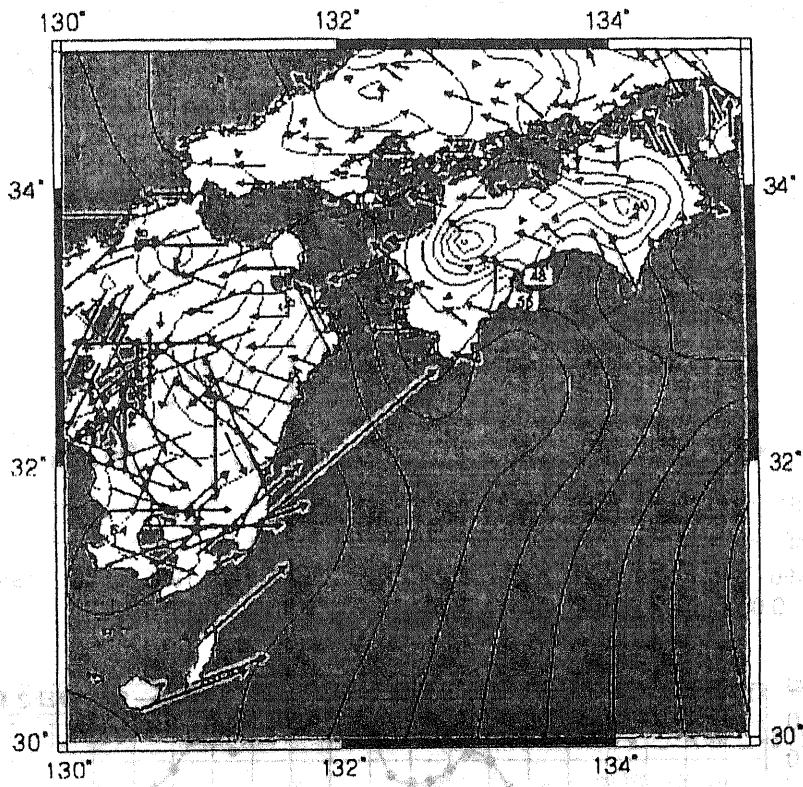


図7 1996年7月18日18時のGPS可降水量と風ベクトル

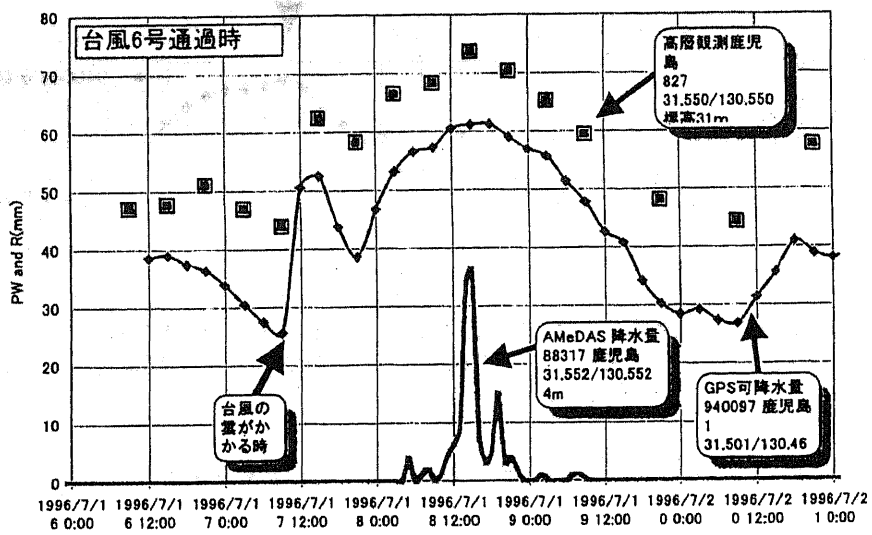


図8 GPS可降水量とゾンデ可降水量の変動

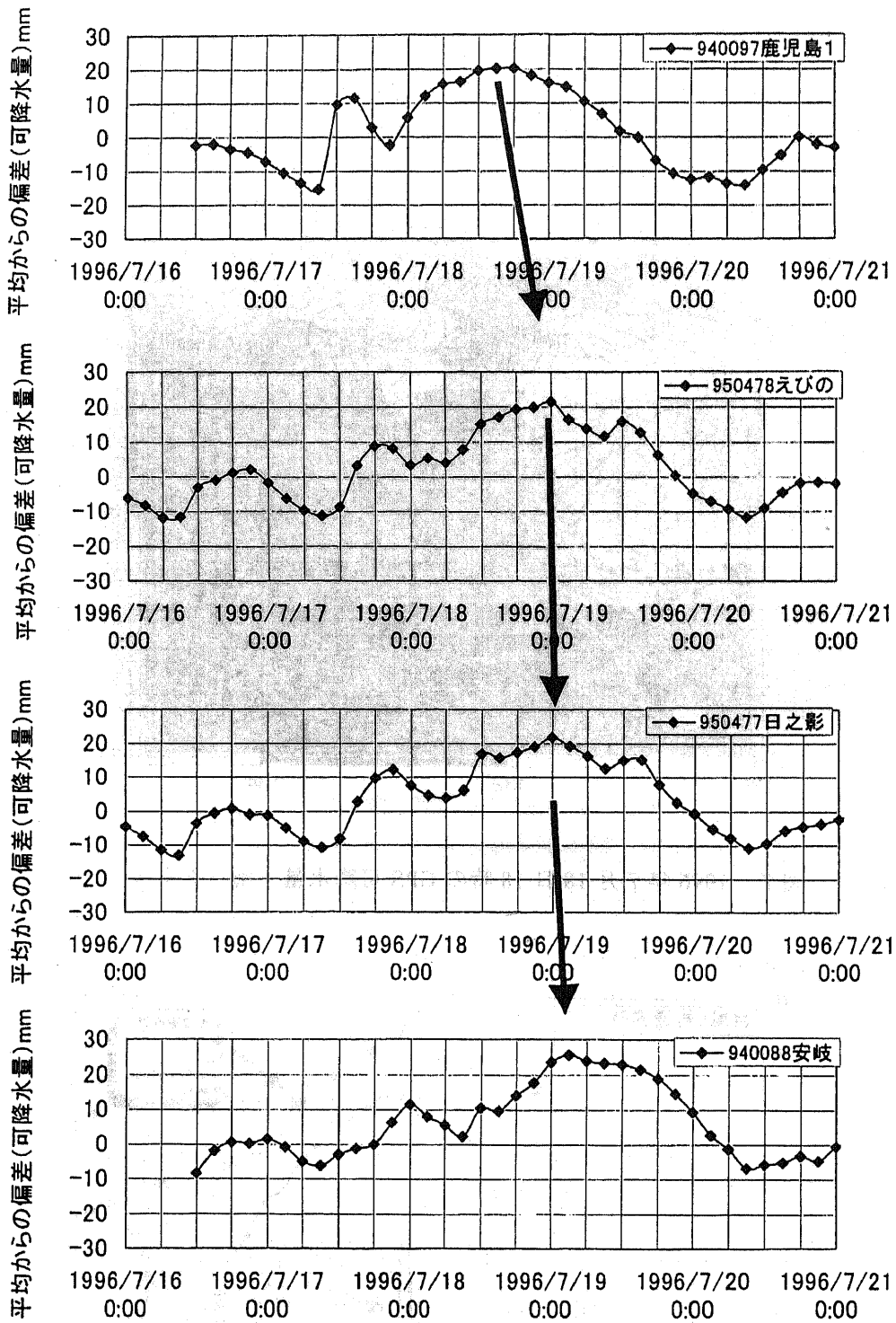


図9 台風6号移動経路におけるGPS可降水量変動

様子が認められる。そこで、この時刻のGPS可降水量のマップをデータベースシステムによって作成した。

図11は1996年10月7日06時から12時までのGPS可降水量の等値線図である（図7と同様にデータスクリーニング用システムであるので陸域のみに注目）。中国地方には南に向かって値が小さくなる東北東から南南西に伸びる等値線が認められる。そして、6時の図で中国地方中央部にある可降水量32mmの等値線が9時、12時と時間の経過につれてゆっくり南下している。

データベースシステムから可降水量データをダウンロードして、経度133度付近の5点（940074松江、950398西城、950405三原、950432西条、950443佐川）について前線の断面構造を図12に示した。なお、標高の差の影響を省くため、縦軸にはGPS可降水量ではなく、その地点の月別平均値からの偏差であらわしてある。7日6時の可降水量偏差は松江が最も高く20.2mmで、南方に向かって小さくなっている。前線が進行してきた9時になると可降水量偏差の南北の差は小さくなり、12時になると今治付近に偏差の極大が見られる。15時では偏差の極大はさらに南に移動している。

以上のように、6時から9時にかけて中国地方に前線が接近し、12時から15時にかけて通過した様子がGPS可降水量の変動から確認することができた。また、データベースシステムの運用によって現象の確認から、データの抽出、作図までが能率的に行うことが可能であった。

#### IV. まとめ

GPS気象学プロジェクトによって作成された水蒸気データセットは大容量の地理情報である。このデータセットから様々な分野の研究者が個々の研究対象に関する情報を抽出するためのツールとしてInternet上にデータベースシステムと可視化ツールの構築を行った。このシステムはGPS水蒸気情報に加えて、アメダス情報も重ねて可視化できるため、WWWブラウザ上でデータのスクリーニングを行うことが可能となった。このシステムを運用して、台風と前線通過に伴う可降水量変動に関する検討を行った。

1996年の台風6号の九州地方通過を検討した結果、各観測点におけるGPS可降水量の変動の位相差は台風の進行によく対応していることが確認できた。また、GMS雲画像と比較した結果、GPS可降水量の細かな変動は台風のスパイラルバンドの通過に対応していることが明らかとなった。また、1996年10月7～8日の中国地方の寒冷前線の通過とGPS可降水量の変動がよく対応していることが明らかとなった。

データベースシステムの運用によって、GPS可降水量の可視化が容易になったため、水蒸気変動の現象確認が能率的に行えるようになった。また、データ検索機能によって必要なデータの切り出しが簡単に行え、アプリケーション利用による作図も容易になった。本論で構築したデータベースシステムは大容量の地理情報から不特定のユーザーによる発見型の研究を行う非常に有効なツールとなると思われる。

#### 謝辞

本研究は国立天文台の内藤勲夫先生にきっかけを与えて頂いた。研究の遂行に際しては万納寺信崇氏、瀬古弘氏、岩淵哲也氏を始めとするGPS/MET Japanのメンバーの方々に多大なる援助を受けた。

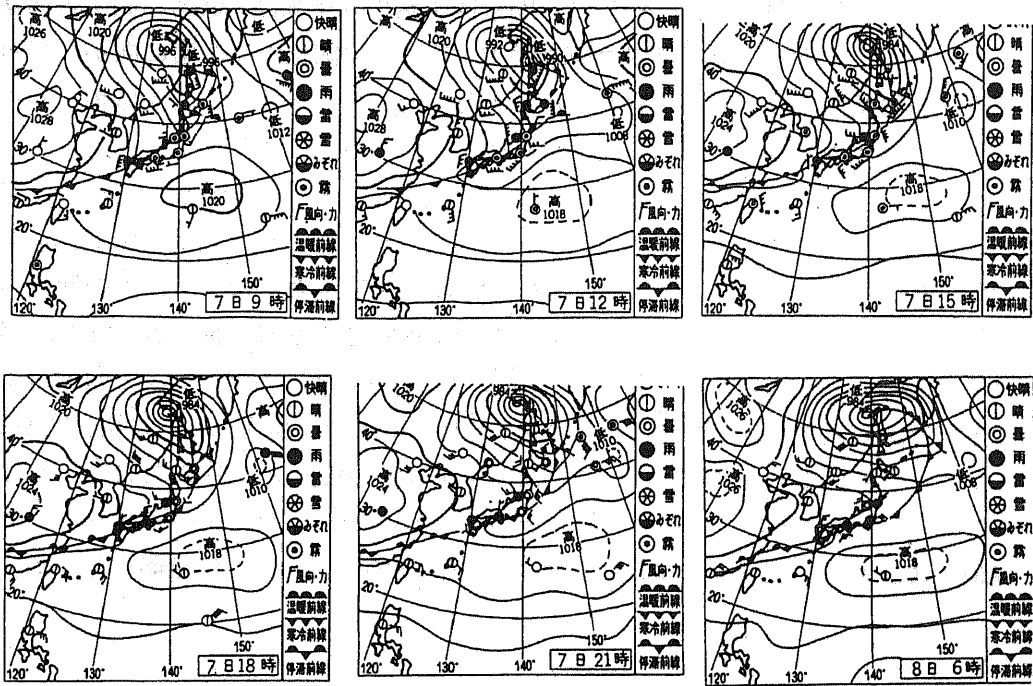


図10 1996年10月7～8日の寒冷前線の通過時の天気図

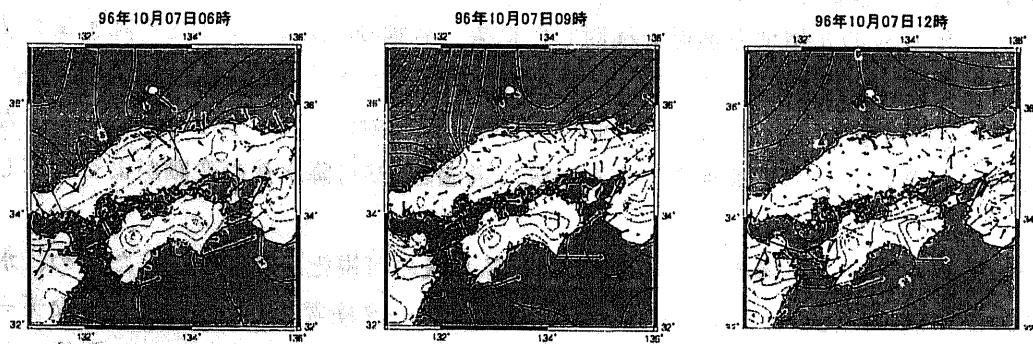


図11 寒冷前線通過に伴うGPS可降水量の変動

文献

Businger, S., Chiswell, S. R., Bevis, M., Duan, J., Anthes, R., Rocken, C., Ware, R., Exner, T. M., Van Hove, T. and Solheim, F. (1997): The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bull. Ame. Meteor. Soc.*, 77, 5-18.

岩淵哲也・内藤勲夫・萬納寺信崇・木村富士男(1998)：国土地理院 GPS/SINEX データから得られた日本列島上空の可降水量の動態. 気象研究ノート, 192, 133-144.

大谷 竜・辻 宏道・萬納寺信崇・瀬川爾朗・内藤勲夫(1997)：国土地理院 GPS 観測網から推定された可降水量. 天気, 44, 317-325.

興野巧磨(2000)：GPS 可降水量データベースシステムの構築及びその応用に関する研究—台風、寒冷前線通過時の可降水量の動態について—。千葉大学大学院自然科学研究科修士号学位請求論文。

瀬古 弘(1998)：GPS/MET Japan CD-ROM.

宮崎真一・島田誠一(1998)：GPS データファイル. 気象研究ノート, 192, 93-103.

宮崎真一・畑中雄樹(1998)：国土地理院 GPS 連続観測システムの概要. 気象研究ノート, 192, 105-131.

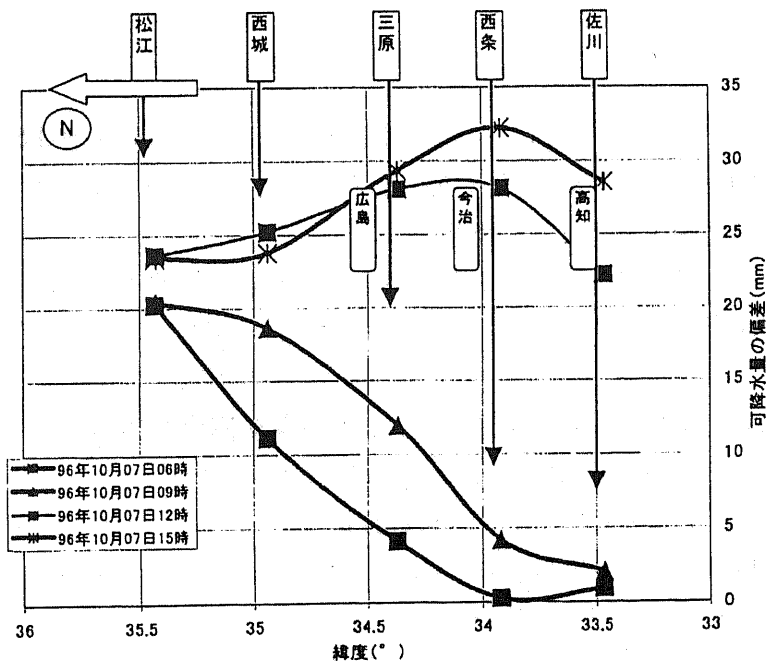


図 12 前線通過に伴う GPS 可降水量の経時変化