

## I-9 GPS を用いた局所地域の天気短期予測システムの基礎研究

A Fundamental Study of Neural Network System for Conjecturing Weather in Local Area Using GPS

田中 成典\*  
Shigenori Tanaka  
高田 知典\*\*  
Tomonori Takada

古田 均\*  
Hitoshi Furuta  
佐田 達典\*\*  
Tatsunori Sada

広兼 道幸\*  
Mitsuyuki Hirokane  
内野 幸生\*\*\*  
Kousei Uchino

## 【抄録】

GPS は、近年測量分野で活用されている。しかし、GPS の計測結果には、水蒸気が要因となる電波の遅れによる観測誤差が含まれている。そこで本研究では、水蒸気によって変化する GPS データを利用して、天気を同定するシステムの研究開発を行った。GPS データと天気項目を関係付けるには、ニューラルネットワーク技術を用いた。

まず、予備実験では、本実験で用いるデータ項目の選別を行うため、GPS データから天気の逆同定を行った。予備実験のデータ項目でパイロットシステムを構築した結果、晴れと雨項目については、ほぼ完全に同定することができた。次に、予備実験の結果を考慮して、本実験を行った。本実験では、GPS データに加えて気象要素を併用して天気の逆同定を行った。その結果、晴れ/曇り項目以外は、完全に同定することができた。

## 【Abstract】

Recently, GPS is used in the field of survey engineering. But the measure of GPS data includes an error of observation because the microwaves influenced by water vapour are delayed. In this study, we developed a system for identifying weather using GPS data. We have used the neural network technology in order to relate GPS data with weather classification.

Firstly, in a preliminary examination, we selected the data items, where GPS data identified the weather. As a result of constructing a system using the data items, we have obtained from the preliminary examination, the "fine weather" and "rainy weather" items have been almost completely indentified.

Secondly, we conducted the final examination considering with their results which we have obtained from the preliminary examination. In the final examination, the weather was indentified by the GPS data and weathor factors. As a result, other than the "fine/cloudy weather" item we have been able to completely indentify all of the weather items.

## 【キーワード】

天気短期予測, 局所地域, GPS, ニューラルネットワーク, 同定問題

## 【Keywords】

Conjecturing Weather, Local Area, GPS, Neural Network, Identification Problem

---

\* 関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

\*\* 三井建設株式会社 技術本部

〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1 (TEL) 0471-40-5207 (FAX) 0471-40-5218

\*\*\* 関西大学大学院 総合情報学研究科

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

## 1. まえがき

汎地球測位システム（GPS：Global Positioning System）は、船舶や航空機などが運行中に現在位置を計測するため活用されてきた衛星航法システムである。最近では特に、GPSは測量分野で活用[1]されている。GPS測量の計測結果には、GPS電波の遅れによる観測値の誤差が内在している。観測誤差の要因として、GPS衛星の位置によるもの、受信機そして、GPS衛星に積まれている時計の誤差や、電離層、マルチパス、そして大気中の水蒸気などによる電波の遅延が考えられる。水蒸気以外の誤差要因は、ある程度除去することができる。しかし、水蒸気の誤差要因に関しては、それが変幻自在な動態のため、現在の技術では完全な把握はできないことから、電波の遅延による誤差を除去[2]することは難しい。ただし、この水蒸気をGPSで計測するという試み[3]も行われている。

そこで、この現象を逆に利用して、水蒸気によって変化するGPSの観測データに内在する誤差[4]を用いて、ニューラルネットワーク技術を併用することにより局所地域の天気を同定するための天気予測システムの研究開発を目指す。

まず、前段階として予備実験を行い、GPS天気予測のシステム化の可能性を模索する。次に、本実験では、予備実験の成果を考慮して、実用に適用できるようなシステム開発を試みる。そのため、誤差と天気を関係付けるためのニューラルネットワークシステムの精度向上を目指す。

## 2. 予備実験

本実験を遂行するための前段階として、GPSデータから天気を逆同定（図1）するパイロットシステムの構築を試みた。

### 2.1 予備実験計画

局所地域の天気短期予測を行うに当たって、GPSデータに内在する誤差と天気との関係を見出すためのデータ項目を検討する必要がある。

そこで、本実験で用いるデータ項目を探るために、図2に示す工程で予備実験を行った。

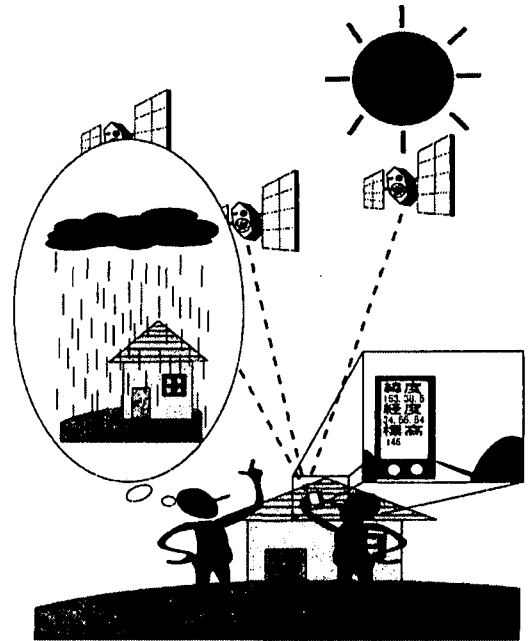


図1 研究概要図

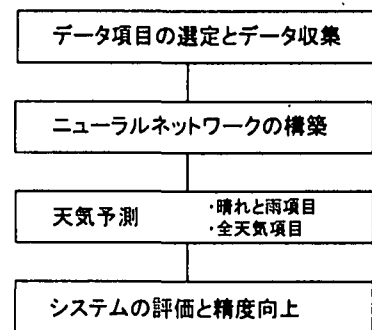


図2 予備実験の工程

まず、約半年間を通じて、同時刻同地点のGPS測量を実施する。次に、水蒸気によるGPS電波の遅延により生じる斜距離のばらつき誤差と、天気との関係をニューラルネットワーク技術で関係付け、天気短期予測のパイロットシステムを構築する。さらに、GPSデータから測量時の天気を予測し、逆同定が適切に行われているかパイロットシステムを検証する。

実験に用いるデータは、約半年間を通じてほぼ毎日、午後2時から1時間測量を実施することによって収集する。2点間の斜距離、基線ベクトルである  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ,  $dh$ , 斜距離の品質精度を示すレシオ、衛星配置指数である PDOP と、測量時の天気を記録し、これらのデータを用いてパイロットシステムの開発を行う。

### 2.2 パイロットシステムの構築

入力項目として、2点間の斜距離、基線ベクトル、

レシオ, PDOP を, 出力項目として, 測量時の天気情報を用いて, ニューラルネットワーク技術によりそれらに関連付けた. また, 入力データは, 全て正規化した値[0-1]とした. 出力データは, 図3に示すように, 天気を晴れから雨の5段階のファジィ量で定義付けた. ネットワークは, 3層の階層型ネットワークを採用し, 入力層は, 7ユニット, 出力層は, 1ユニットとした.

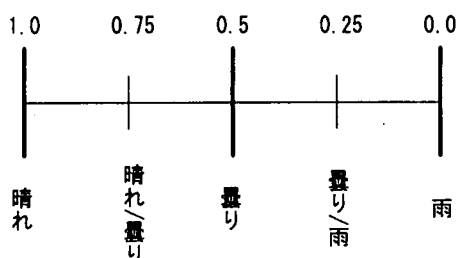


図3 天気のファジィ量

予備実験では, 1998年11月11日から1999年5月26日までの約半年間で収集した121の観測データを用いて, 項目毎のデータ数を統一[5]してシステムを構築した. 天気項目毎のデータ数を表1に示す.

表1 項目毎のデータ数

天気の評価	実測データ数	採用データ数
晴れ	39	7
晴れ/曇り	36	7
曇り	30	7
曇り/雨	9	7
雨	7	7
合計	121	35

雨項目のデータ数が他の項目に対して少ないため, 雨のデータ数に倣って, 天気項目のデータ数を統一した. データ選出の方法は, 天気項目毎の平均値から偏差を求め, 偏差の少なかった上位7つを天気項目毎の代表データとした.

### 2.3 天気予測の解析

#### 2.3.1 晴れと雨項目による解析結果

前処理を施して選出したデータ群を, 晴れと雨項目に限定し解析を試みた. 雨項目にデータ数を統一した場合, 解析に用いるデータ数は著しく少なくなる. そのため, 解析結果の信憑性を確かめる必要がある. そこで解析には, 学習データパターンと推定データパターンを対とした3組のデータパターンをランダムに選択して, プロトタイプシステムの信憑性を確かめた.

推定結果を図4(a)-(c)に示す. その結果, パイロットシステムでは, 晴れと雨項目をほぼ完全に推定できた. したがって, GPSデータと天気との関係を同定することができた.

#### 2.3.2 全天気項目による解析結果

全天気項目を用いてパイロットシステムの再構築を試みた. この解析も3組のデータパターンを選択して, プロトタイプシステムの信憑性を確かめた.

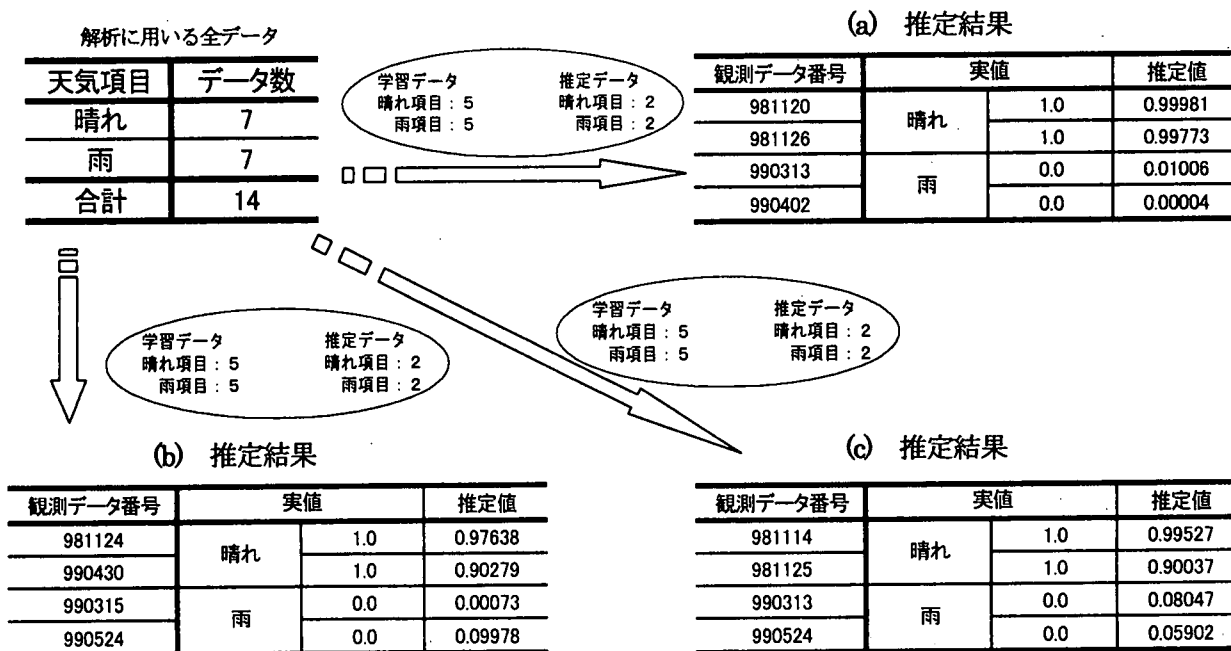


図4 晴れ雨の解析結果

その推定結果を図5(a)-(c)に示す。縦軸には推定結果のファジィ量を、横軸には天気ファジィ量を取った。また、平均二乗誤差と相関係数を併記した。

解析結果から晴れ、雨に関しては、ある程度良い結果が得られた。しかし、その他の項目(晴れ曇り、曇り、曇り雨)に関しては、ほとんど正しい結果が得られなかった。

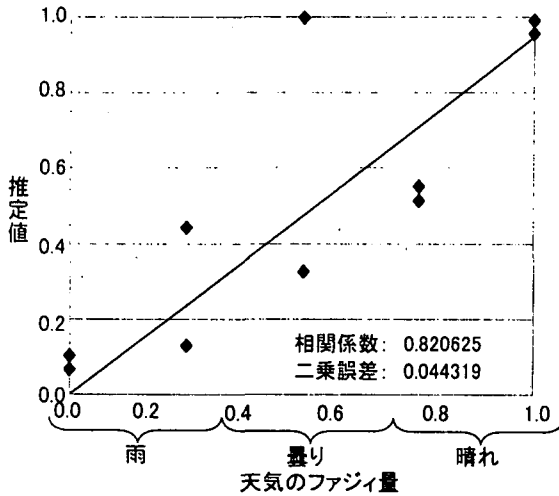


図5(a) 推定結果

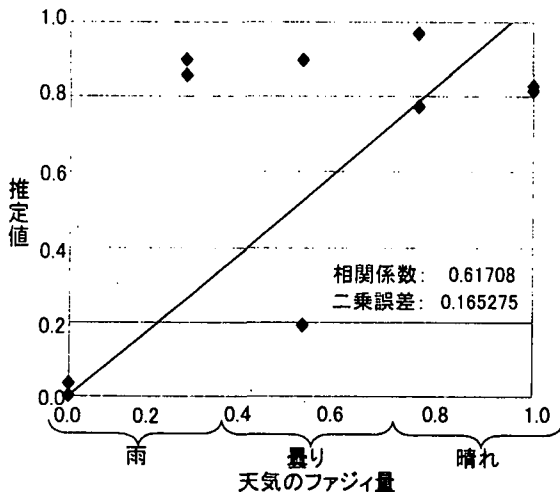


図5(b) 推定結果

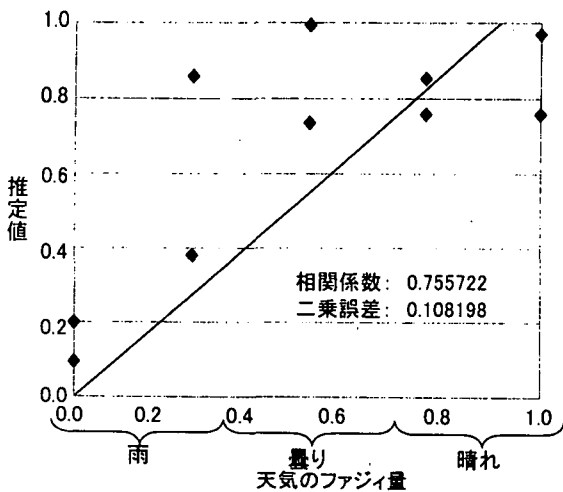


図5(c) 推定結果

## 2. 4 予備実験からの考察

予備実験によって収集したデータを用いて、天気予測パイロットシステムの開発を行った。その結果、GPS データから天気予測が可能であろうということが分かった。しかし、晴れ曇り、曇り、曇り雨に関しては、予備実験での問題が残った。それらの測定精度を向上させるためには4つの課題があると考えられる。

- 1) データ数が少ないため、継続して観測データを収集する必要がある。
- 2) 予備実験においては、およそ100メートルの基線を採用したが、計測基線のばらつきが非常に小さかった。また、水蒸気による誤差は、2点間の高低差に起因すると思われるが予備実験では、2点間の高低差は約20メートル程度であった。そのため、観測データに水蒸気の影響が生じやすいような基線を取ることで、すなわち、高低差をなるべく大きくとれる基線を設定する必要がある。
- 3) 収集されたデータの基線長は、解析段階で対流圏における誤差をある程度補正して求められている。予備実験においては、この補正された基線を用いてシステムの構築を行った。この補正を適用しないことで、さらにシステムの精度を高められると考える。
- 4) GPS データのみから天気予測を高精度に行うには、限界があると考えられる。そのため、天気を構成している気象要素(気温、気圧、湿度、風向、風速)についても考慮する必要がある。

## 3. 本実験

予備実験の成果を基に、GPS データから天気を同定する実用システムの構築を試みる。

### 3. 1 本実験計画

予備実験の解析結果を考慮して、図6に示す工程で本実験を計画した。ニューラルネットワークを用いてシステム構築を行う場合、データの質と量が、そのシステムの精度を左右する。そこで、本実験においても、予備実験と同様に半年間を通じて、同時

刻同地点の GPS 測量を実施する。また、予備実験によって見いだされた課題を考慮した上で、次の7点に留意しながらデータ収集を行った。

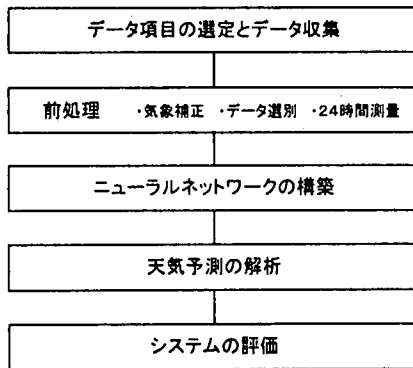


図6 本実験の工程

- 1) 月曜から金曜の午前 9:00 からの 1 時間を測量実施時間とする。なぜなら、建設現場では、朝方の天気情報のニーズがあるためである。
- 2) 基線長の解析結果から、水蒸気による誤差を見出すために、標高差 70 メートルの基線長約 600 メートルを計測する。
- 3) 測量地点である 2 点の PDOP を記録する。PDOP の値は、衛星配備が完了した現在では値の変動は大きくないが、時間毎に遷移する衛星の幾何的配置に伴って変化する。そこで PDOP の記録は、8:59 から 9:01 までの毎分計 3 回を記録する。システムを構築する際の PDOP の値は、平均値を用いる。

- 4) 気温、気圧、湿度、風向、風速等の気象要素の記録は、9:15 から 9:21 までの毎分計 7 回を記録する。システムを構築する際の気象要素の値は、それらの平均値を用いる。
- 5) 天気の評価は、観測時の前後 30 分を観察する。また、午後 3 時と午後 9 時についても記録する。
- 6) 測量時の天気項目を細分化し、表 2 に示す 13 項目とする。
- 7) 観測時の状態を詳しく記録する。

表2 天気の評価

データ収集時の天気の評価	
①快晴	②晴れ
③晴れ後曇り	④曇り後晴れ
⑤晴れ時々曇り	⑥曇り時々晴れ
⑦曇り	
⑧曇り後雨	⑨曇り時々雨
⑩雨後曇り	⑪雨時々曇り
⑫雨	⑬大雨

表3 予備と本実験の概要

項目	予備実験	本実験
基線長	約121メートル	約642メートル
データ収集期間	1998年11月11日 1999年5月26日	1999年9月8日 2000年2月28日
合計データ数	約121データ	約80データ
収集データ項目	斜距離 基線ベクトルの dx 基線ベクトルの dy 基線ベクトルの dz 基線ベクトルの dh レシオ PDOP 測量時の天気	斜距離 基線ベクトルの dx 基線ベクトルの dy 基線ベクトルの dz 基線ベクトルの dh レシオ 地点1のPDOP 地点2のPDOP 気温 気圧 湿度 風速 測量時の天気

表4 収集したデータの一部

データ番号	斜距離	レシオ	dx	dy	dz	dh	PDOP		湿度 %	気圧 hpa	温度 °C	風速 m/s
							西之口	駐車場				
990908	642.667	5.0	465.905	380.849	225.626	74.713	5.9	2.4	70.9	984	27.0	1.8
990909	642.664	5.7	465.908	380.841	225.624	74.706	2.5	2.6	63.5	985	25.5	1.6
990910	642.666	13.0	465.912	380.839	225.627	74.705	2.5	2.5	59.5	984	26.5	0.7
990913	642.668	14.2	465.904	380.850	225.631	74.719	2.4	2.3	70.0	986	27.0	0.7
990914	642.673	21.4	465.914	380.846	225.629	74.709	2.4	2.3	79.4	986	25.2	0.9
990916	642.674	10.2	465.908	380.852	225.635	74.719	2.5	2.5	69.7	994	23.0	0.1
990917	642.674	14.8	465.911	380.846	225.639	74.715	2.5	2.5	64.1	990	25.5	0.9
990921	642.674	12.0	465.913	380.843	225.641	74.714	2.8	2.8	85.0	986	24.5	0.1

表5 収集したデータから削除したデータの一部

データ番号	斜距離	レシオ	dx	dy	dz	dh	PDOP		湿度 %	気圧 hpa	温度 °C	風速 m/s
							西之口	駐車場				
991022	642.752	3.9	465.546	381.213	225.996	75.347	2.7	2.7	65.7	1001	26.5	0.4
991125	658.752	6.9	414.271	431.445	276.023	162.839	2.7	2.5	84.0	987	13.5	0.6
991220	642.677	22.0	465.881	380.874	225.663	74.763	—	2.0	55.9	1000	2.6	0.9

表 6 測量結果の一部

12/13	斜距離	レシオ	dh	基準となる月	12/13~12/14	斜距離	レシオ	dh	基準となる月
AM09:00	642.679	20.7	74.795	1999年12月	PM21:00	642.682	11.4	74.794	2000年6月
AM10:00	642.678	6.3	74.797		PM22:00	642.682	4.1	74.775	
AM11:00	642.682	20.6	74.800	2000年1月	PM23:00	642.681	11.7	74.798	2000年7月
AM12:00	642.681	21.9	74.799		PM24:00	642.681	27.2	74.800	
PM13:00	642.680	11.8	74.794	2000年2月	AM01:00	642.683	13.1	74.792	2000年8月
PM14:00	642.685	5.2	74.806		AM02:00	642.682	7.4	74.793	
PM15:00	642.677	8.1	74.796	2000年3月	AM03:00	642.681	23.0	74.798	2000年9月
PM16:00	642.683	15.6	74.796		AM04:00	642.680	30.4	74.800	
PM17:00	642.685	5.4	74.794	2000年4月	AM05:00	642.680	9.7	74.799	2000年10月
PM18:00	642.681	27.7	74.796		AM06:00	642.686	4.9	74.810	
PM19:00	642.680	7.8	74.801	2000年5月	AM07:00	642.681	12.4	74.799	2000年11月
PM20:00	642.683	11.7	74.802		AM08:00	642.680	24.6	74.794	

以上、7点に留意しながら、本実験のデータ収集を行った。予備実験と本実験で収集したデータの相異点を表3に示す。本実験において収集したデータ項目は、2点間の斜距離、基線ベクトルである  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ,  $dh$ , レシオ, PDOP, 気温, 気圧, 湿度, 風向, 風速, その日の天気とした。収集したデータの一部を表4に示す。

### 3. 2 採用データの前処理

ニューラルネットワークシステムでは、学習処理を円滑に行うために、データ加工を施してからシステムを構築する必要[6]がある。そこで本研究では、データ選別、気象補正の解除、GPS衛星の特性による補正の前処理を行った。

#### 3. 2. 1 データ選別

測量時に、収集できなかったデータ項目や、明らかに誤ったデータを収集し、データ整理時にその存在を発見した場合があった。例えば、測量データの基線解析において、レシオの値が小さいため、整数値バイアスを確定できずに厳密解が求まらない場合や、基線長の基線解析が、平均値と十数メートル異なる値の場合などである。そこで、表5に示すように、全項目のデータが揃っていない場合や、明らかな欠陥データは、本実験で用いなかった。

#### 3. 2. 2 気象補正の解除

本研究で用いた基線解析ソフトでは、対流圏におけるGPS電波の補正は、予め設定[7]されている。それは、ホップフィールドモデル(気象モデル)と呼ばれるもので、本研究では、このホップフィールドモデルの対流圏における補正を解除する。気象モ

デルを適用しないことで、計測した基線は、対流圏で水蒸気の影響を受けた解析結果となる。

ホップフィールドモデルを適用した場合と、適用しない場合の基線長計測値のデータのばらつき度合を図7に示す。明らかに、補正なしの方が水蒸気の影響を適切に捉えることができる。したがって、気象補正なしのデータを採用する。

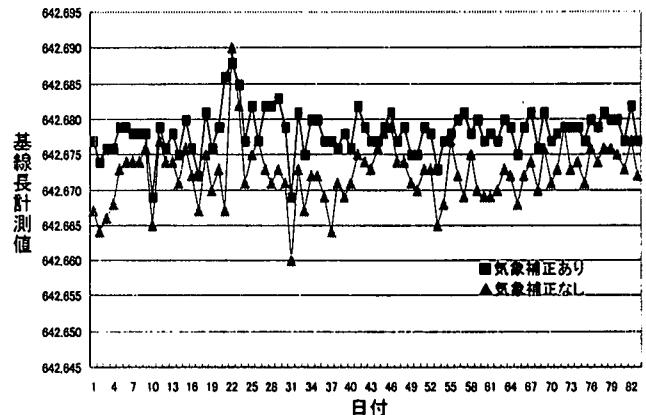


図7 気象補正の比較

#### 3. 2. 3 GPS衛星位置特性による補正

GPS衛星の周回周期は、0.5恒星日[8]であるが、実際には僅かな誤差が生じている。この誤差によって衛星は、1日で4分、約1ヶ月で2時間後の位置のずれが生じる。GPS測量における基線長の誤差は、このGPS衛星の位置にも起因している。そのGPS衛星の位置特性による誤差を取り除くことで、水蒸気誤差の影響が大きい基線長を求めることができる。

しかし、GPS衛星の位置特性による誤差は、正確に求める事はできない。そこで、基準となる日に24時間測量を行うことで、GPS衛星の位置が要因となる基線長の変動をモデル化し、位置特性による基線長誤差を減少させることを考える。

本研究では、1999年12月13日に24時間測量を行った。そして、本実験で収集したデータは、AM9:00

のデータを12月のAM9:00, AM11:00のデータを1月のAM9:00といった具合に対応させることにより、月毎の基準となる基線長を見出した。その基線解析結果を表6に示す。

天気予測システムを構築する際のGPSデータ(斜距離; dx, dy, dz, dh)は、日々の測量結果である基線長と、モデル化した月毎の基準となる基線長との差(表7)を使用した。

表7 システム構築データ

	斜距離	dx	dy	dz	dh
990908 日々の基線長	642.667	465.905	380.849	225.626	74.713
2000年9月 モデル化した基線長	642.681	465.861	380.895	225.681	74.798
差	0.014	0.044	0.046	0.055	0.085

### 3. 3 システムの構築

入力項目に、測量結果である斜距離, dx, dy, dz, dh, レシオ, PDOP, 気温, 気圧, 湿度, 風速を、そして出力項目に、測量時の天気を用いて、ニューラルネットワーク技術によりそれらに関係付けた。

実験データは、1999年9月8日から2000年2月28日までの約半年間で収集した約80のデータを用いた。天気項目毎のデータ数を表8に示す。

表8 項目毎のデータ数

天気の評価	実測データ数
晴れ	38
晴れ/曇り	14
曇り	16
曇り/雨	8
雨	3
合計	79

本研究で構築したシステム(図8)は、メインシステムを母体とした4つのサブシステムで構成した。天気は、図9に示す5段階の天気のファジィ量で表現し、これらはデータ収集時に評価された13段階の天気を再分類したものである。各サブシステムは、晴れ用(第1システム)、晴れ曇り用(第2システム)、曇り用(第3システム)、曇り/雨用(第4システム)であり、図10のように運用する。まず、第1システムで晴れ判別を行う。晴れ項目と判定されなかったデータは、第2、第3、第4システムと次々にシステムで判別される。第4システムで曇り/雨項目と判定されなかったデータは、雨項目である。

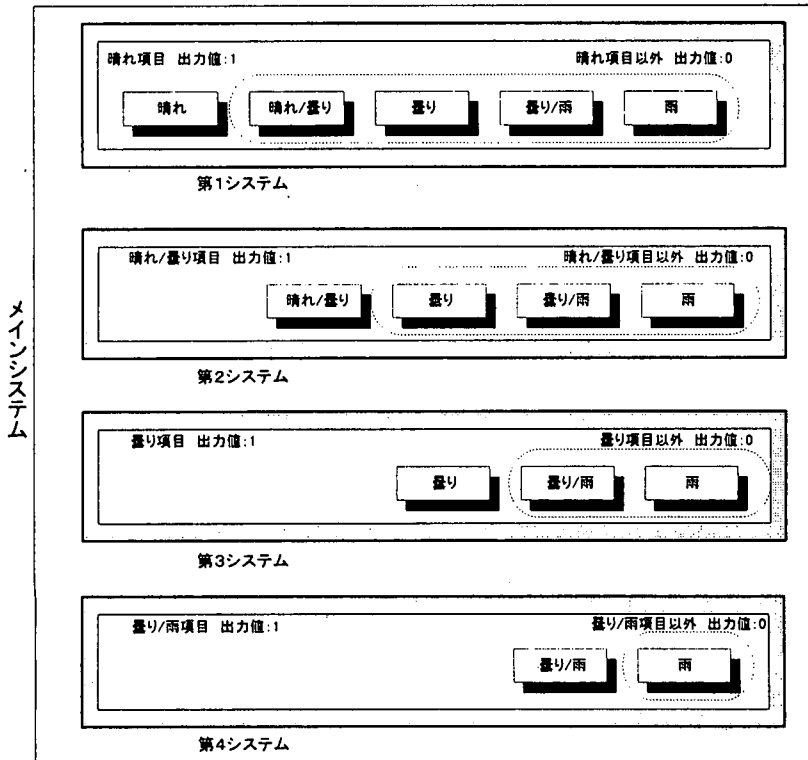


図8 システムの構成

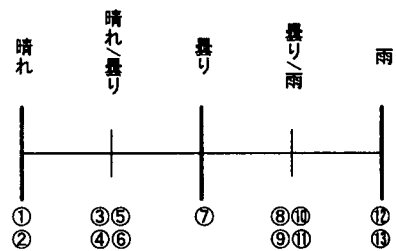


図9 天気のファジィ量

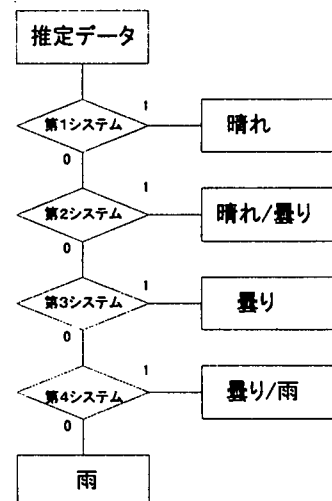


図10 システムの運用方法

表9 推定結果

日付	観測値	晴れ用サブシステム		晴れ/曇り用サブシステム		曇り用サブシステム		曇り/雨用サブシステム	
		実値	推定値	実値	推定値	実値	推定値	実値	推定値
990921	曇り/雨	0.0	0.00522	0.0	0.00355	0.0	0.01400	1.0	0.94470
000207	曇り/雨	0.0	0.00088	0.0	0.00395	0.0	0.22413	1.0	0.97204
000121	雨	0.0	0.19197	0.0	0.98573	0.0	0.16938	0.0	0.29901
991209	曇り	0.0	0.00438	0.0	0.55669	1.0	0.99731	-	-
000112	曇り	0.0	0.00775	0.0	0.32186	1.0	0.99703	-	-
990909	晴れ/曇り	0.0	0.00771	1.0	0.99836	-	-	-	-
990908	晴れ/曇り	0.0	0.03273	1.0	0.95581	-	-	-	-
991001	晴れ	1.0	0.99955	-	-	-	-	-	-
991216	晴れ	1.0	0.99989	-	-	-	-	-	-
平均二乗誤差		0.004232296		0.198163557		0.01582718		0.031082277	

### 3. 4 解析結果

システムの運用方法に従って、天気予測を行った。推定結果を表9に示す。また、天気項目毎の実値と推定値の平均二乗誤差を併記した。

解析結果から、晴れ/曇り用サブシステムを除いて、ほぼ精度よく天気を推定することができた。特に、晴れ項目に関しては、平均二乗誤差も 0.004232296 とかなり高い精度で推定できた。

### 3. 5 本実験からの考察

本実験では、収集したデータを用いて、天気予測システムの開発を行った。その結果、曇り、雨項目の推定データは、評価し難い結果が得られたが、その他の推定データにおいては、良い結果が得られた。特に、第1システムにおいては、全推定データとも高い精度で推定できた。

予備実験と本実験を比較すると、予備実験において推定できなかった晴れ曇り、曇り、曇り雨の天気は、本実験では、気象要素を考慮したため精度良く推定できた。晴れ曇り、曇り雨などの微妙な天気項目に関しては、満足いく結果は得られなかったが、予備実験を上回る結果が得られた。

### 4. あとがき

本研究では、まず予備実験を行い、GPSデータと天気の同定作業を行った。その結果、晴れ、雨項目に関しては、ほぼ完全に同定することができた。しかし、曇りを含む項目に関しては、満足する結果が得られなかった。そこで、本実験では、予備実験の結果を活してデータ収集時の条件を厳しくした。次に、本実験によって収集したデータを用いて、天気予測システムの開発を行った。GPS電波の対流圏で

の遅延を最大限に引き出してからシステムの構築を行った。解析結果から、天気項目の推定は、雨、曇りデータの一部の結果を除いてほぼ正しい結果が得られた。

本研究の成果から GPS データを用いた局所地域の天気短期予測が可能であることがわかった。しかし、システムの実用化を考えるとさらに高精度な推定結果を必要とすると考えられる。今後、建設省国土地理院のデータを利用し、精度向上を目指す予定である。さらに、午後3時、午後9時に記録した天気データを用いて、長期的な天気予測を行う方法について議論する。なお、本研究を遂行するに当たり、関西大学総合情報学部平成11年度「卒業研究2」の補助を得た。

### 参考文献

- [1] 土屋 淳, 辻 宏道: やさしいGPS測量, 日本測量協会, 1997.
- [2] Thierry Gregorius, Geoffrey Blewitt: The effect of Weather Fronts on GPS Measurements, GPSworld, 1998.
- [3] 内藤 勲夫: GPS気象学: 水蒸気を測る, パリティ, 1998.
- [4] 大谷 竜: GPS 気象学への応用, 日本航海学会, 1999.
- [5] 田中 成典: 建設技術者のための知識情報処理の実践, 関西大学出版部, 1999.
- [6] 船橋 誠壽: ニューロコンピューティング入門, オーム社, 1992.
- [7] WAVE ソフトウェア ユーザガイド, トリンブルジャパン, 1996.
- [8] 日本測地学会: GPS - 人工衛星による精密測位システム -, 1989.