

三重県地盤沈下調査研究会
平成 20 年度 調査研究報告書

2009 年 3 月

ま え が き

三重県北勢地域の地盤沈下は、さまざまな規制等が功を奏して、近年ほぼ沈静化しています。しかし、臨海平野部の元来軟弱な地盤が広がる一部の地域では、地盤の累積沈下量が過去 40 年余で 1m を超えているところもあります。

地球温暖化の時代を迎え、集中豪雨や台風時の高潮や内水氾濫等の防災対策には、十分な注意を払わなければなりません。こうした地盤が低く軟弱な地域は、地震や津波等に対しても潜在的な危険をはらんでいます。調査研究の成果をもとにした適切な対応を行うとともに、地下水採取規制や地盤沈下等の災害防止事業を今後も推し進める必要があります。

本研究会は、三重県北勢地域の地盤沈下の実態を把握し、その対策を検討することを目的に、地盤沈下に関する既存資料の収集と解析、地盤環境変動や地下水の水質・流動の実態とその将来予測、水資源管理等に関して調査研究を行ってきました。本年度の主な調査研究は以下の通りです。

地盤高変動の観測は、地盤沈下を高精度で直接測定することができる水準測量成果に基づいています。しかし、測量に膨大なコストや時間・労力が必要なだけでなく、計測場所も限定されます。地盤環境の新たな調査・研究手法として近年注目されている SAR(合成開口レーダー) 衛星を用いた観測手法の原理と有効性について検討しています。

次に、1991 年から継続実施されている自噴井の流出量や水温、電気伝導度、pH の計測調査の結果について述べています。これらは、北勢地域の地下水の涵養や流動・流出を表しており、本地域の地盤環境をさまざまな視点から考察する上で重要な観測資料となっています。

さらに、地盤沈下防止等対策要綱対象地域の南端にある鈴鹿川流域における陸域水循環解明の試みを報告しています。地下水涵養に深く関わっていると同時に、内水災害の起こりやすい三重県北勢地域で、標高データを用いた落水線図から表面水の流れを量的に調べています。こうした調査は、本地域の地下水量の定量的な把握にもつながります。

また、木曽三川下流域の海拔ゼロメートル地帯において、水防体制の実態と課題を把握するための詳細な調査を実施しています。河川の氾濫や局所的・短時間の集中豪雨への水防施設に対する対策が必要な実態を明らかにするとともに、水防施設・設備の移転等の対策について提言しています。

地盤沈下や地下水量のモニタリングを行うには、地下水位の広範な地域での観測が必要です。最後の研究では、こうした観測データをインターネット経由で自動的に取得でき、安価で利用可能なシステムについて、耐久実験の結果を具体的に議論しています。

本調査研究会の継続的な調査研究成果が、三重県およびその周辺地域における地盤沈下やそれに伴う内水氾濫等の災害防止、地下水をはじめとする水資源管理、水文循環システムの解明等の一助になることを願っています。

平成 21 年 2 月

三重県地盤沈下調査研究会
会 長 福 山 薫

衛星干渉 SAR (InSAR) による 地盤沈下研究の可能性について

**三重大学大学院 生物資源学研究科
共生環境学専攻 自然環境システム学講座
環境解析学研究室**

福 山 薫

2009 年 3 月

衛星干渉 SAR (InSAR) による 地盤沈下研究の可能性について

三重大学大学院 生物資源学研究科 共生環境学専攻

自然環境システム学講座 環境解析学研究室

福山 薫

1. はじめに

地盤沈下観測に従来用いられてきた水準測量は、地盤沈下を直接測定することができ、精度もきわめて高い。しかし、測量の労力や水準点の維持管理にかかる経費や、水準測量路線の網目から漏れた地域で監視ができないなどの多くの課題も残されている。一方、SAR (Synthetic Aperture Radar：合成開口レーダー) 衛星による観測は、地盤環境の新たな調査・研究手法としてきわめて有効であることが近年注目されている。本稿では、予備的研究の一環として、この手法の原理的な解説と有効性について検討する。

2. SAR 衛星

SAR は、電波のマイクロ波を用いる画像取得システムである。この衛星は自らのマイクロ波を地表に向けて照射するアクティブ・システムであり、マイクロ波は雲を貫通するので、天候にあまり左右されることなく (実際は、伝播経路中の大気内に水蒸気や水滴が大量に存在するとき、この影響を受けやすいが)、昼夜も関係なく運用することが可能である。

電波の性質である干渉性を利用すれば、電波伝播経路を正確に測定することができる。したがって、伝播経路の変化を衛星位置と捕捉時間 (送信してから受信するまでの時間) の関数として測定することによって、数値標高データ (DEM: digital

elevation model) を生成したり，数 cm 規模の地表の変形を観測することができる。

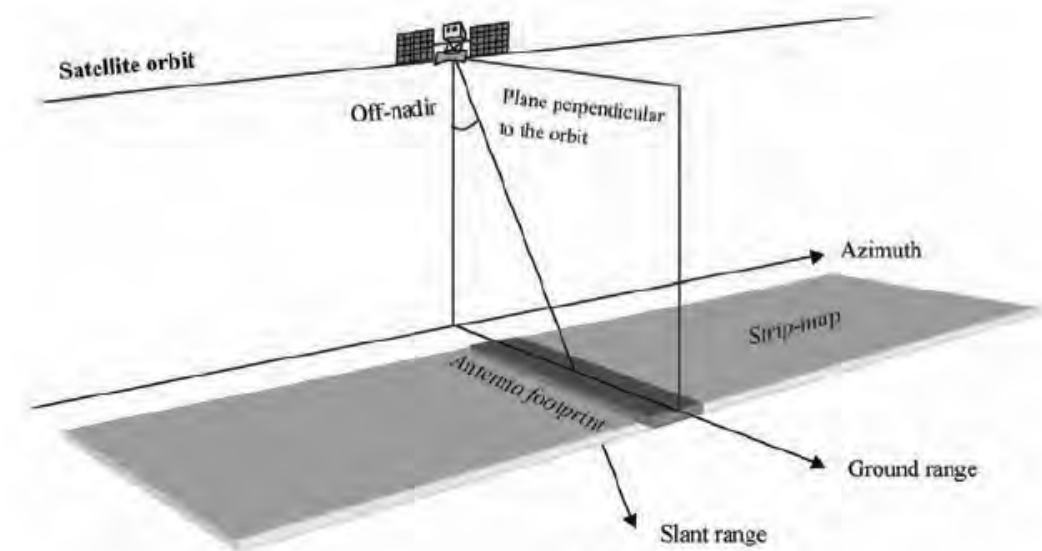


図 1 : Satellite SAR system

3. SAR 画像取得システム

衛星 SAR 画像取得システムの概略図を、図 1 に示す。衛星に搭載されたレーダーは、軌道に垂直な平面内で真下ではなく斜めの視線方向から地表面に伝播を照射する。この平面内で衛星の鉛直直下 (ナディア) 方向と視線方向とのなす角度を、オフナディア角と呼ぶ。かつて 1992～1998 年に運用されていた日本の JERS-1(「ふよう 1 号」) のオフナディア角は、35 度であった。最近の ALOS (「だいち」) のオフナディア角は、可変で 8～60 度である。

現在、各国で運用中の衛星 SAR システムを、使用されているマイクロ波の運用波長で分類すると、以下の通りである。

- X バンド：周波数 10GHz 帯、波長約 3cm。ドイツ-イタリア共同のスペースシャトルミッション等
- C バンド：周波数 5GHz 帯、波長約 6cm。ERS (ヨーロッパ連合) やカナダの Radarsat。米国のスペースシャトルミッション等。
- L バンド：周波数 1.2GHz 帯、波長約 24cm。日本の ALOS や JERS-1。

アンテナが走査する範囲は軌道に沿って衛星の航行速度で動いていく。ALOS は、上空約 690km の高度を約 7km/s の早さで飛行しているので、走査幅 ALOS の場合、地表の走査幅は 40～70km なので、この幅で毎分長さ 400km 余の細長い断片で地表を走査していく能力を持っている。

衛星の軌道に沿った方向 (移動方向) を一般にアジマス方向と呼ぶのに対して、視線方向はスラントレンジと呼ばれている。スラントレンジを地表の接線方向に投影したものがグラウンドレンジである。

4. 複素 SAR 画像

デジタル SAR 画像は、縦 (列)× 横 (行) に小さな画素 (ピクセル) を二次元的に配置したモザイクと考えることができる。この画素がそれぞれ地表のある小さな領域に結びついており、この地域幅が分解能に相当する。ALOS では、分解能は可変で 7～44m である。JERS-1 は 18m であった。

各画素の信号は、地表の各分解能エリア内にあるすべての散乱体 (構造物、植生、岩石等) によって反射 (正確には後方散乱) されたマイクロ波の情報から成る。この信号は振幅と位相の両方をもつ複素数である。

図 2 に、JERS-1 のよって取得された伊勢湾奥とその臨海部の振幅強度画像を示す。なお、この画像で、明るい (白い) 画素は後方散乱強度が大きく、暗い (黒い) 画素は小さい。

上にも述べたように、実際に検出される SAR 画像は、各分解能エリア内に含まれる物体 (散乱体) によるレーダーへの後方散乱放射の振幅情報を持っている。この振幅強度は、地上の散乱体は何からできているかという化学的な成分よりむしろ単純に粗度に依存する。普通、露出した岩石やコンクリートの構造物からなる都市部は強い振幅を示す。これに対して、なめらかな平面 (例えば静かな内水) では、電波はレーダー方向には反射されにくいため振幅は小さくなる。図 2 においても、伊勢湾内や木曾三川等の内水域は黒く後方散乱強度が弱く、都心部や湾内の微少な白い点として見える数多くの船体は、後方散乱が強いことを示している。



図 2 : JERS-1 detected image of amplitude around the head of Ise Bay and the seafront area

5. InSAR (干涉 SAR)

SAR 衛星は、同じ地域をわずかに異なる視角から観測することができる。この方法には 2 種類ある。一つは、同じ機器を搭載した 2 基のレーダーによる同時観測で、もう一つは同じ衛星でほぼ同じ探査反復軌道上で異なる時期に観測することである。例えば後者の方法に対しては、ALOS の回帰日数は 46 日なので、原則的にはこの日数の倍数の時間間隔の観測データが利用可能である。

軌道に直行する平面上での 2 つの衛星 (または 2 つの軌道) 間の距離を、干涉基線と呼ぶ (図 3)。これをスラントレンジに垂直に投影したものが垂直基線である。

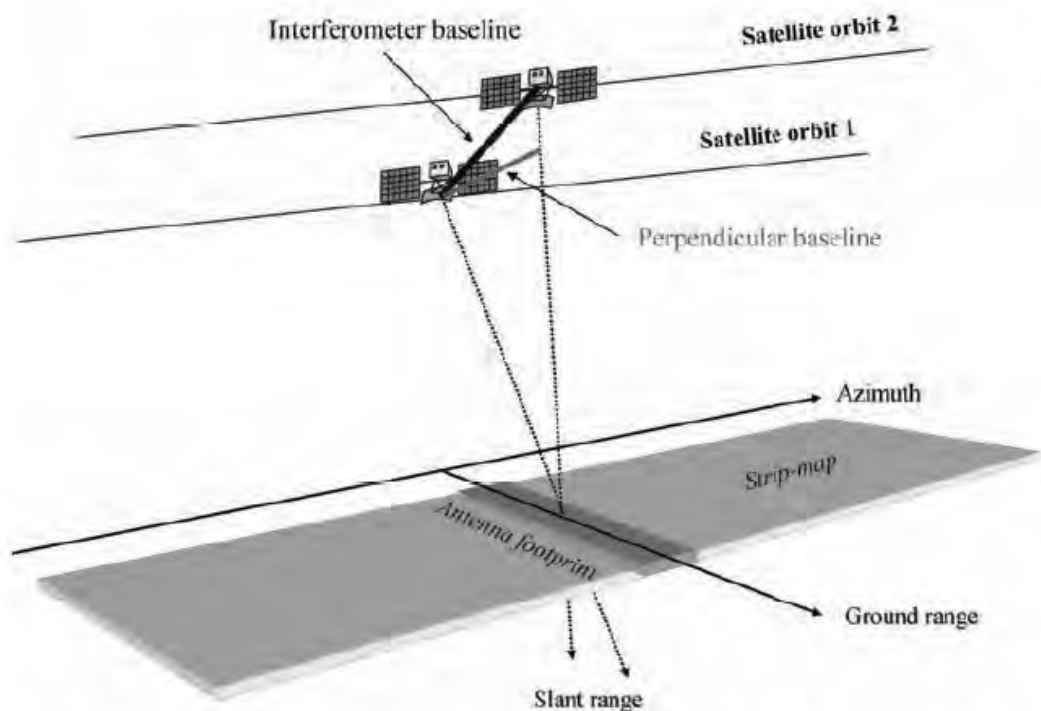


図 3 : Geometry of a satellite interferometric SAR

SAR インターフェログラムは、一枚目の SAR 画像を二枚目の画像の複素共役との交差積を画素ごとに求めることで得られる。したがって、インターフェログラムの振幅は 2 つの画像の振幅の積となる。一方、位相 (干渉位相) は両画像間の位相差となる。

5.1 干渉位相を用いた標高測定

時間的に変化しない地表の分解能エリア中に、散乱強度がきわめて強い地点が一つあると仮定しよう。

図 3 に示したように、2 基の SAR からわずかに異なる視角でこうした点散乱体を観測する。この場合、各 SAR 画素の干渉位相は、2 基の SAR の各々から該当のエリアまでのマイクロ波の伝播経路差にのみ依存することになる。

点散乱体からもたらされる位相変化が仮にあったとしても、この経路差によって相殺されるため、干渉位相はその影響を受けないことになる。

地上の基準点がいったん決まると、基準セルから別のセルまで進むことで生じる電波の経路差の変化量 (Δr) は、図 4 に示すような幾何学関係から簡単な式で求められる。当然のことながら、基線長が短く、問題とするエリア間距離があまり大きく離れていないという場合の近似を用いる必要である。必要な幾何学因子は、垂直基線 B_n 、レーダー目標距離 R 、直距離の垂線上で計ったセル間距離 q_s で、これらから Δr に対して次の近似式が成り立つ。

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R}$$

したがって、干渉位相の変化量 $\Delta \phi$ は、 Δr を送信波長 λ で割った値に比例し、

$$\phi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R}$$

で表される。

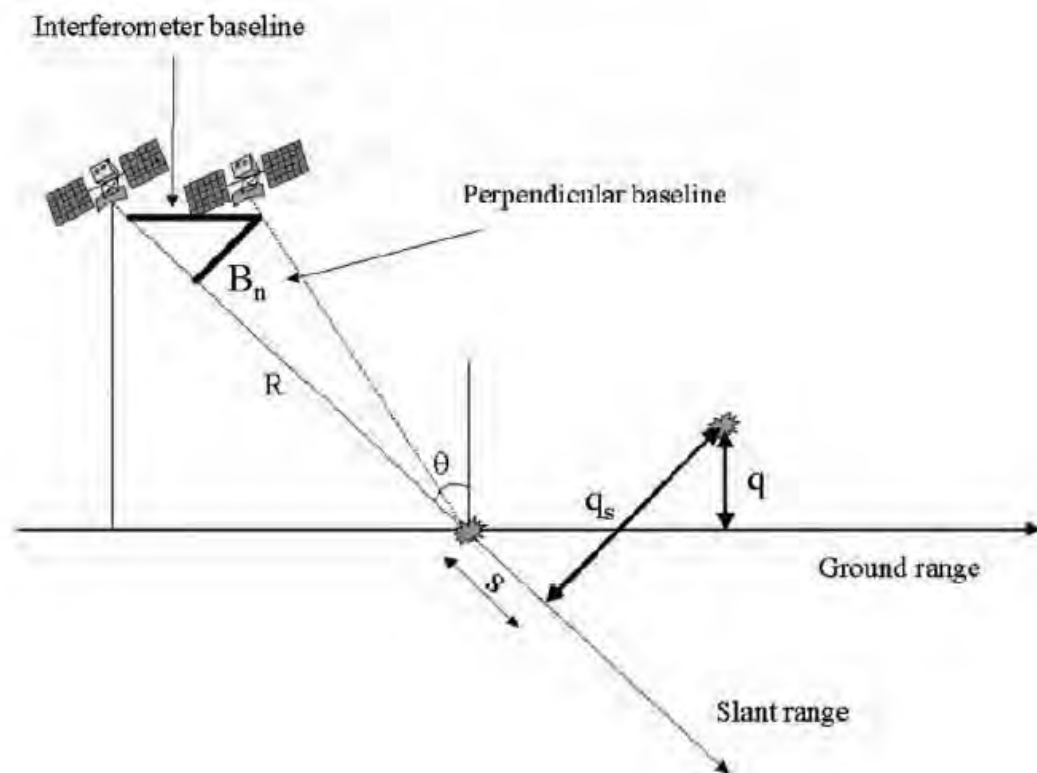


図 4：Geometric parameters of a satellite interferometric SAR system

この干渉位相の変化量は、次の 2 つの項に分けられる。

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta}$$

ここで、 θ は基準点での電波の入射角である。

第 1 項は、水平の基準面から計った地点目標間の高度差 q に、第 2 項は直距離線上で計った地点目標間の位置のずれに比例する位相変化量 s に相等する。

垂直基線は、衛星軌道の厳密なデータから知ることができる。また、第 2 項も研鑽が可能で干渉位相から差し引くことができる。この操作をインターフェログラムフラットニング処理と呼んでいる。

図 5 は、伊勢湾岸付近の SAR 画像に対するインターフェログラムフラットニング処理の例である。フラットニング処理前のインターフェログラムでは、陸域に軌道縞が明確に見られるの (コヒーレント) に対して、海域はそれが見られない (インコヒーレント)。

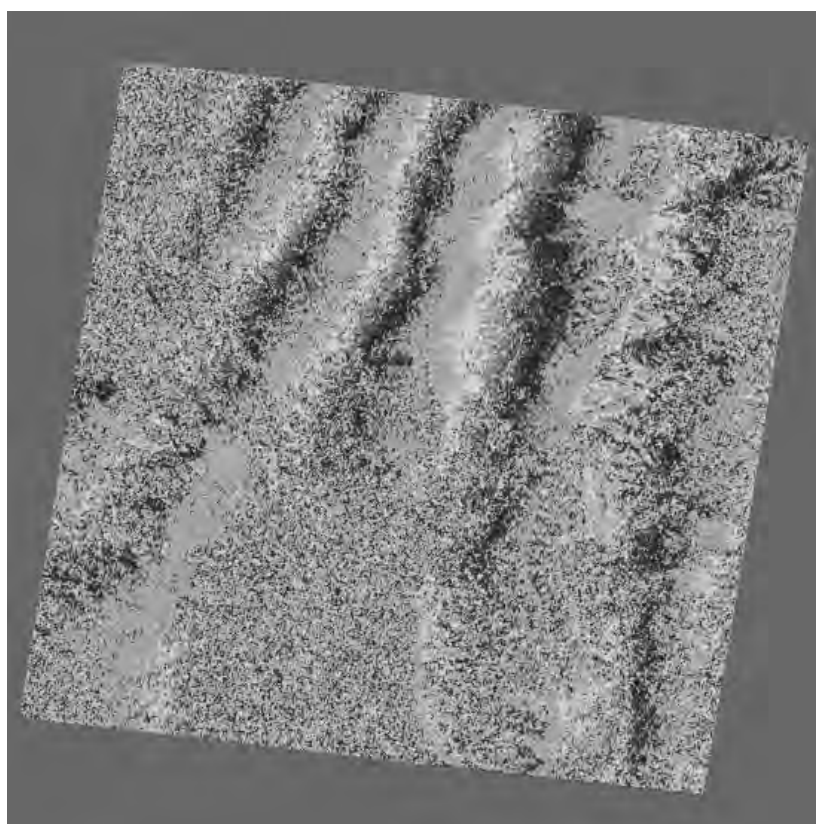
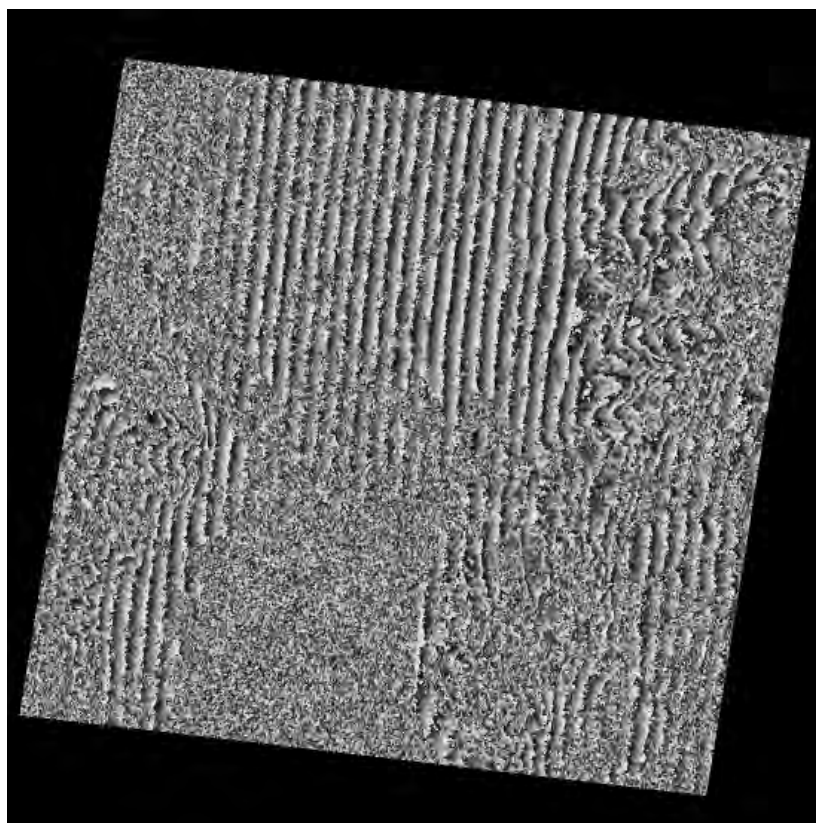


图 5 : Top: interferogram. Bottom: flattened interferferogram

アンビギュイティ高度 h_a は、インターフェログラム平滑後の干渉位相で 2π の変化をもたらす高度として定義される。

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n}$$

例えば JERS-1 の場合、 $\lambda = 23.5\text{cm}$, $\theta = 35^\circ$, $R = 570\text{km}$ なので、

$$h_a \approx \frac{38400}{B_n}$$

垂直基線が 1000m の場合、 2π の干渉位相変化は約 38m の高度差に対応する。原理的には基線が長いほど高度測定は正確になる。なぜなら、長基線で位相雑音は高度雑音が小さくなるためである。しかし、垂直基線には上限がある。つまり、長基線になると干渉信号に相関性が落ち、干渉位相解析に必要な干渉縞 (フリンジ) がなくなる。結論として、信号対雑音電力比 (今は信号は地形高度) を最大にする最適な垂直基線があることになる。JERS-1 の場合、この最適基線は約 1000m である。

干渉位相は 2π の周期性を持つので、フラットニング処理をしたインターフェログラムを用いると標高の相対的な測定ができる。アンビギュイティ高度の整数倍 (2π の位相サイクルの整数倍に相等) 削除した後、フラットニング処理をしたインターフェログラム上の 2 地点間の位相変化量から、実際の高度変化の測定ができる。この位相干渉縞に 2π の正確な整数倍数をに加える過程を、位相アンラッピングと呼ぶ。

アンラッピングの技法にはよく知られているものがいくつかある。しかし、位相アンラッピングは普通は単一の解法はなく、経験的手法に基づいてその情報をうまく利用するというべきかもしれない。

干渉位相のアンラッピング処理ができると、SAR 座標系での標高地図が得られる。これが、DEM(数値標高モデル) を入手する第一歩である。次に、SAR 高度地図を、一般に用いられている準楕円体 (例えばベッセル楕円体や WGS84) を参照して、UTM 等の別の測地系座標上での値に変換する必要がある。

5.2 地盤変形・移動等の測定：差分干渉法

地表にある点散乱体のいくつかが、2 回の SAR 観測の間に例えば地盤沈下や地滑り、地震などによって、その相対的な位置がわずかに変わったと仮定しよう。こうした場合、基線に寄らない次の位相項が干渉位相に付け加わることになる。

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda}d$$

ここで、 d はスラントレンジ方向に投影した散乱体の相対的な変位である。

つまり、インターフェログラムフラットニング処理後の干渉位相には、高度とこうした地盤の移動に伴うものが含まれている。

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda}d$$

さらに、数値標高データ (DEM) が利用可能なら、干渉位相から高度から生じる位相項を差し引くことができる。この結果得られるのが、いわゆる差分インターフェログラムである。これにより、地盤の変形や移動した成分を測定することができる。

6. まとめ

SAR 衛星による観測は、地盤環境の調査・研究手法として有効であることが注目されてきた。しかし、SAR の真髄である InSAR(干渉 SAR) のデータ処理には、きわめて高度の専門的技術が必要であり、またそのソフトウェア自体もたいへん高価なのが現状である。

近年、オランダのデルフト工科大学の地球観測・宇宙空間システム研究所の Dr. Ramon Hanssen らが開発した InSAR の解析処理ソフトウェアである Doris (Delft object-oriented radar interferometric software) は、最近評価が高まってきたフリーソフトである。この Doris と、GIS ソフトウェアである GRASS や、地図作画アプリケーションとして有名な GMT (いずれもオープンソースソフトウェア) 等と融合させて、SAR 衛星の JERS-1 (ふよう 1 号) や ALOS (だいち) が濃尾平野上空で観

測したデータを利用して、Doris による地盤沈下解析の可能性と、特に、これらを使用するための InSAR データの解析原理について検討を加えてきた。

なお、本稿で利用した JERS-1 SAR データの所有権は経済産業省および宇宙航空研究開発機構にある。

【参考文献】

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A. Prati, C., and Rocca, F. (2007) : InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, European Space Agency, TM-19, 40pp.

小平信彦 (1994a) : 合成開口レーダ (SAR) -1-, 日本リモートセンシング学会誌, 14, 258-262.

小平信彦 (1994b) : 合成開口レーダ (SAR) -2-, 日本リモートセンシング学会誌, 14, 350-353.

小平信彦 (1995a) : 合成開口レーダ (SAR) -3-, 日本リモートセンシング学会誌, 15, 277-280.

小平信彦 (1995b) : 合成開口レーダ (SAR) -4-, 日本リモートセンシング学会誌, 15, 397-401.

国土地理院 (2009) : 国土地理院 干渉 SAR ホームページ, <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>

Shimada, M. (1999) : Verification processor for SAR calibration and interferometry, Adv. Space Res. Vol. 23, No. 8, pp. 1477 - 1486.

北勢地方の自噴井調査

平成 2 1 年 3 月

三重大学

大野 研

0. 序章

1991 年度から、北勢地方の自噴井の計測を継続している。即ち、北勢地方の 7 カ所の自噴井から、月に 1 回自噴量、水温、電気伝導度、pH を計測している。これらは、北勢地方の地下水の涵養、流動、流出をあらわしており、北勢地方の地盤環境の基本的なデータとなる。北勢地方の健全な地盤環境に必要な計測であると考えている。

1. 地下水調査の概要

- 調査地点：当初は 10 カ所の自噴井であったが、噴出が止まったなどの事情で 7 カ所に減少している。図 1 に井戸の位置を示す。表 1 に地表地質、標高、井戸深度を示す。
- 調査項目：調査項目は、自噴量、水温、電気伝導度、pH である。

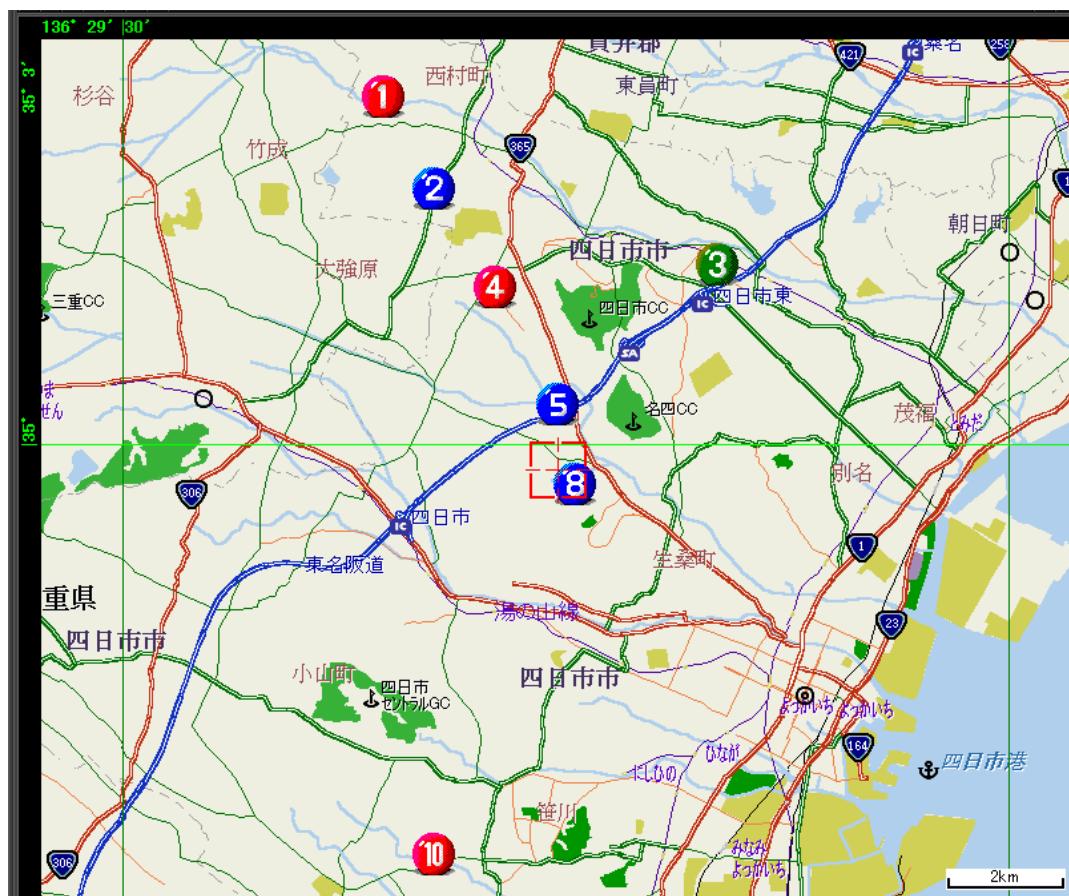


图 1 測定自噴井位置

表 1 調査井戸の深度・標高。地表地質

井戸番号	深度(m)	標高(m)	地表地質
NO.1	-178	43	河床・新期扇状地推積物
NO.2	-243	45	低位段丘・中位段丘推積物
NO.3	-41	22	河床・新期扇状地推積物
NO.4	-382	45	低位段丘・中位段丘推積物
NO.5	-276	39	低位段丘・中位段丘推積物
NO.8	-234	50	低位段丘・中位段丘推積物
NO.10	-108	32	低位段丘推積物

2. 地下水調査の結果及び考察

2-1 自噴量

図 2-1 から図 2-7 に、1991 年 5 月から 2008 年 1 月までの自噴量の変化を示す。

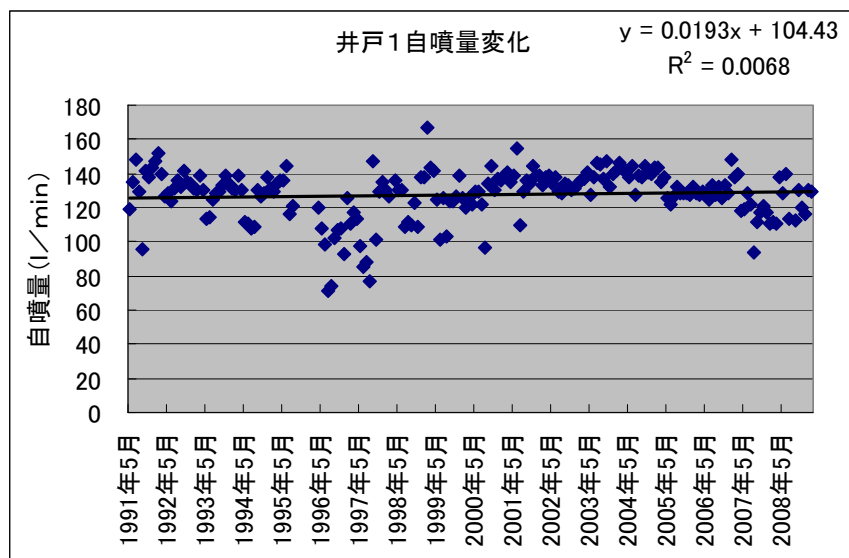


図 2-1 自噴井 1 の自噴量変化

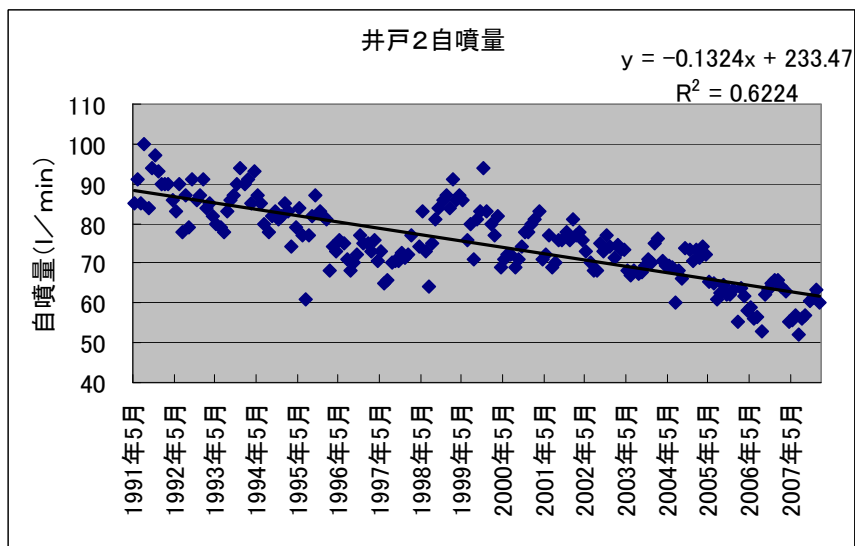


図 2-2 自噴井 2 の自噴量変化

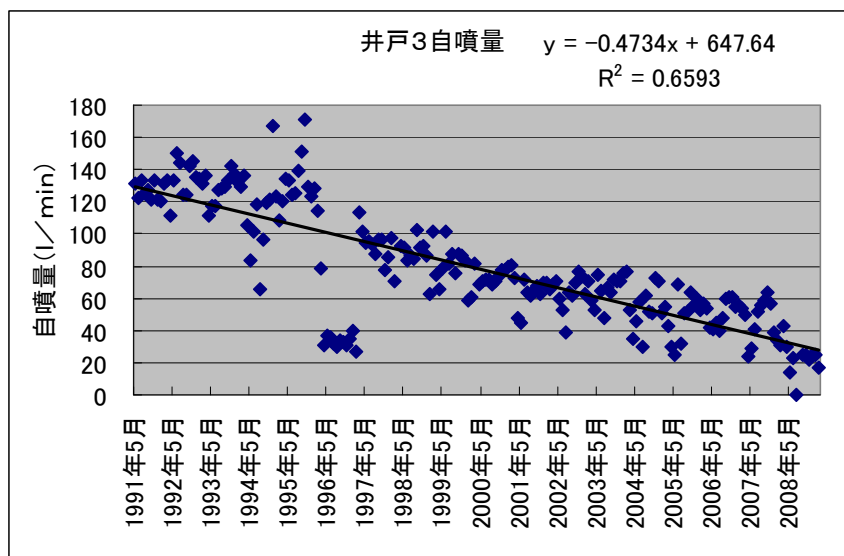


図 2-3 自噴井 3 の自噴量変化

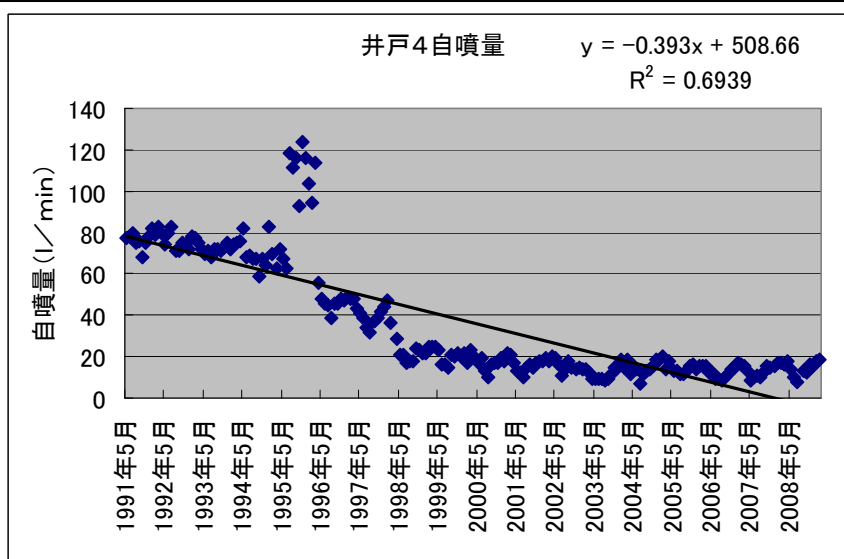


図 2-4 自噴井 4 の自噴量変化

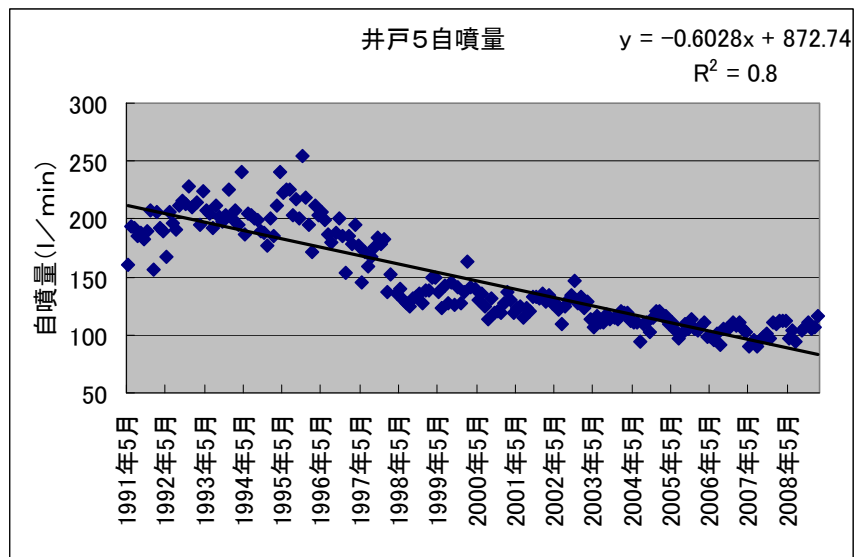


図 2-5 自噴井 5 の自噴量変化

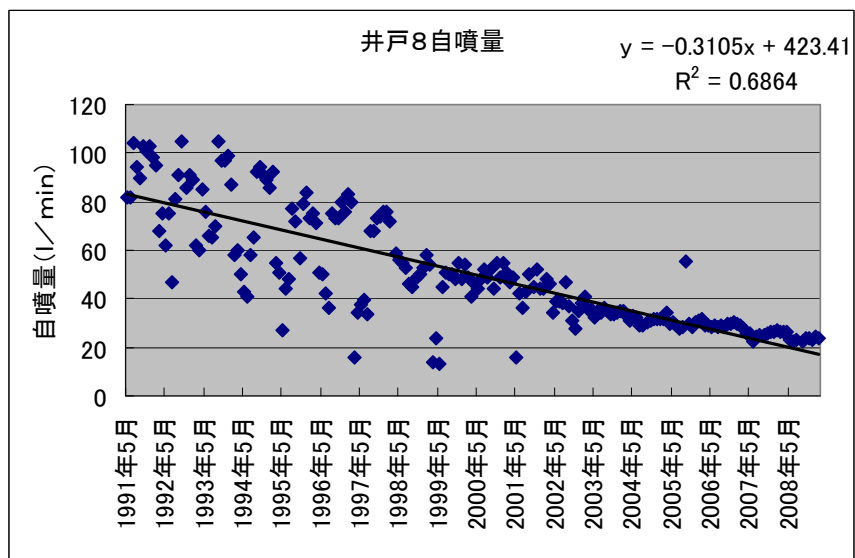


図 2-6 自噴井 8 の自噴量変化

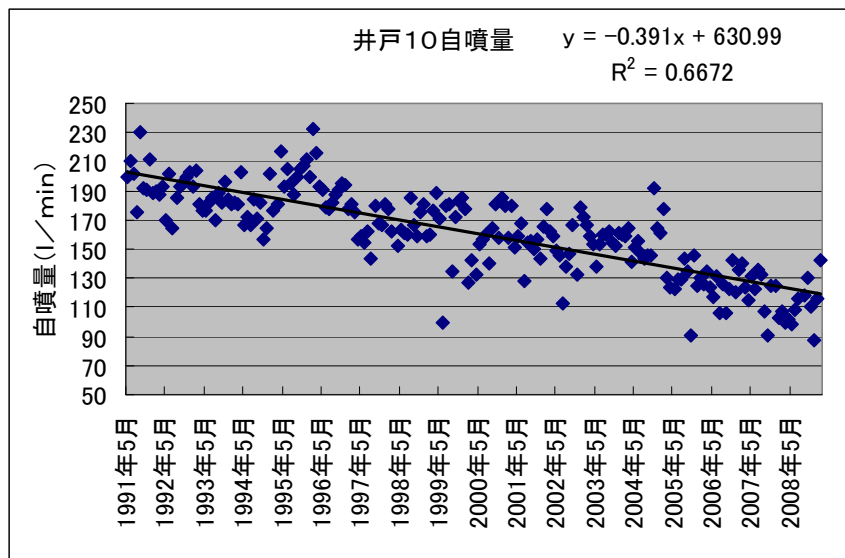


図 2-7 自噴井 10 の自噴量変化

これらの図から、井戸 1 を除いて、いずれの井戸の自噴量も長期的に減少傾向を示していることが分かる。井戸 2, 3, 8, 10 では、ほぼ線形的に減少を続けているのが分かる。特に井戸 3 では、本年度 7 月に自噴量が 0 となることがあった。反面井戸 4, 5 では、1998 年頃から減少傾向が弱まっている。

次に全ての井戸の自噴量を同じグラフに示した図 2-8 を示す。

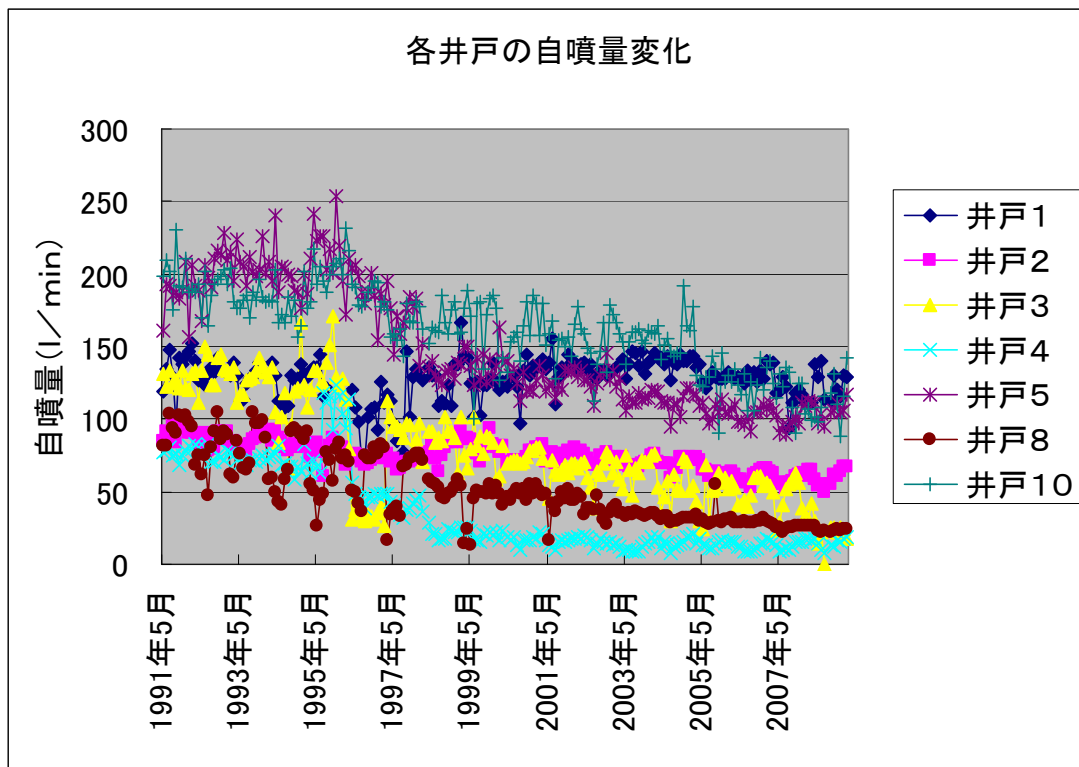


図 2-8 各井戸の自噴量変化

この図から見ても分かるように、自噴量の減少傾向は深刻である。いかなる地盤環境の変化がこの減少を招いているのか、またこの減少がさらに地盤環境の変化を生むのかを慎重に検討する必要がある。

さらに、地盤環境の変化を検討するためには、その他の計測値の変化も重要である。そこで、図 2-9 から図 2-16 に各井戸の地下水温の変化を、図 2-17 から図 2-24 に電気伝導度の変化を示す。

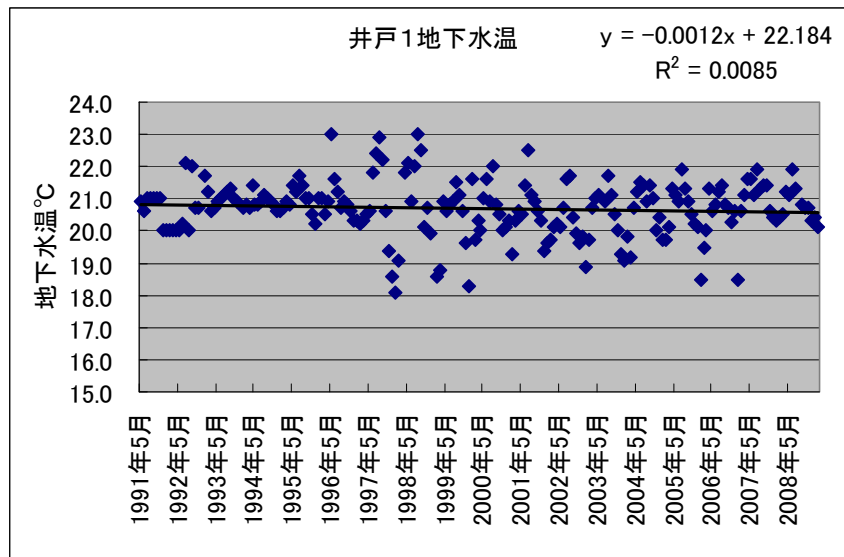


図 2-9 自噴井 1 の地下水温

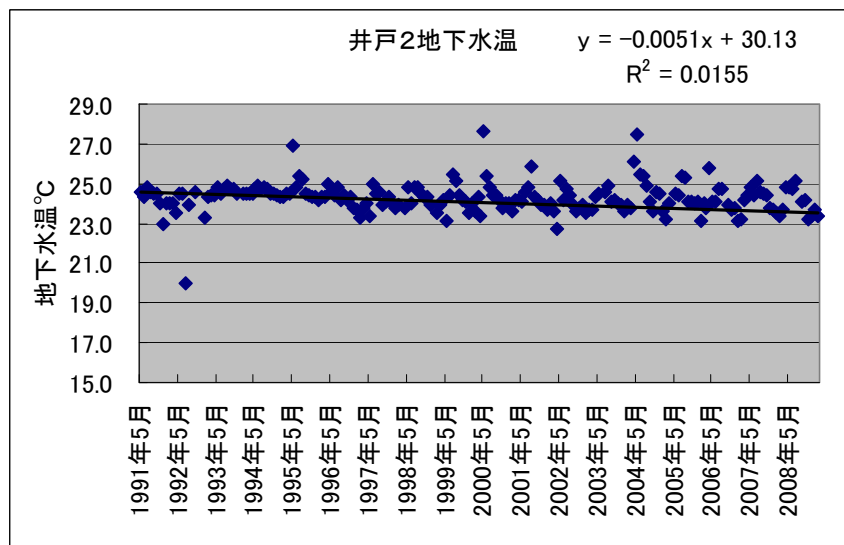


図 2-10 自噴井 2 の地下水温

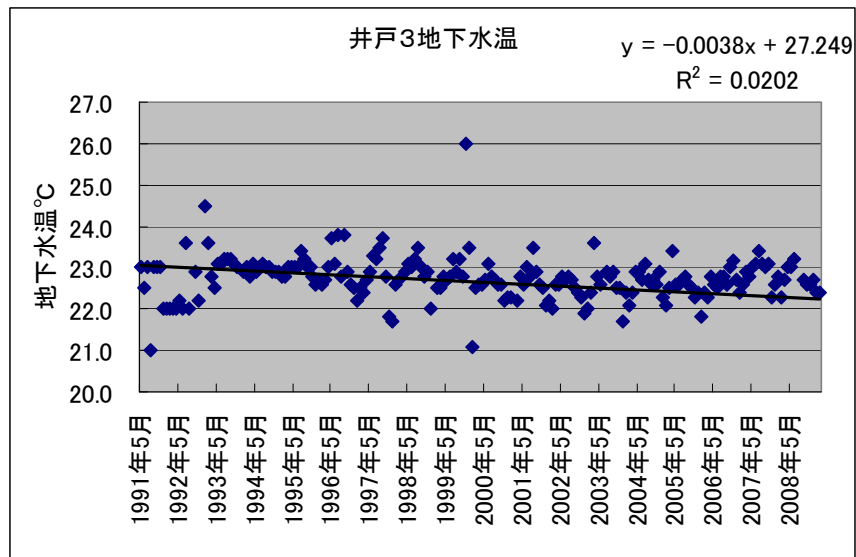


図 2-11 自噴井 3 の地下水温

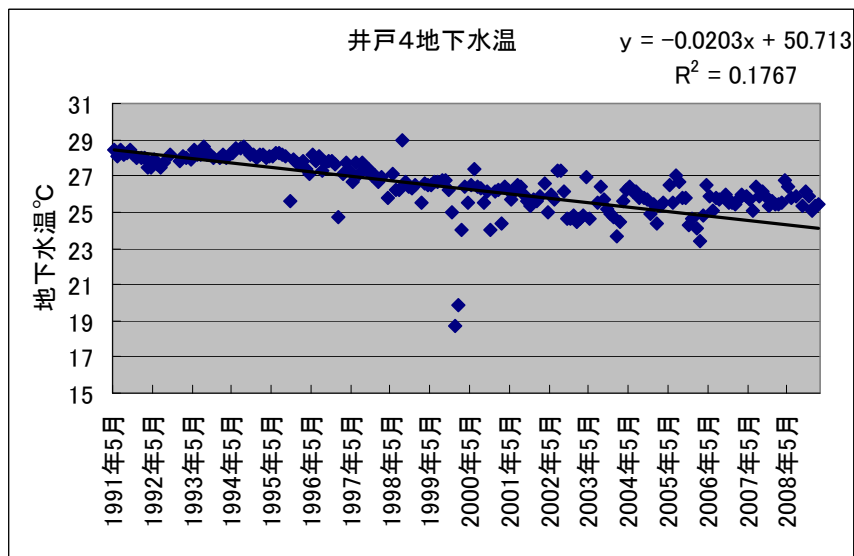


図 2-12 自噴井 4 の地下水温

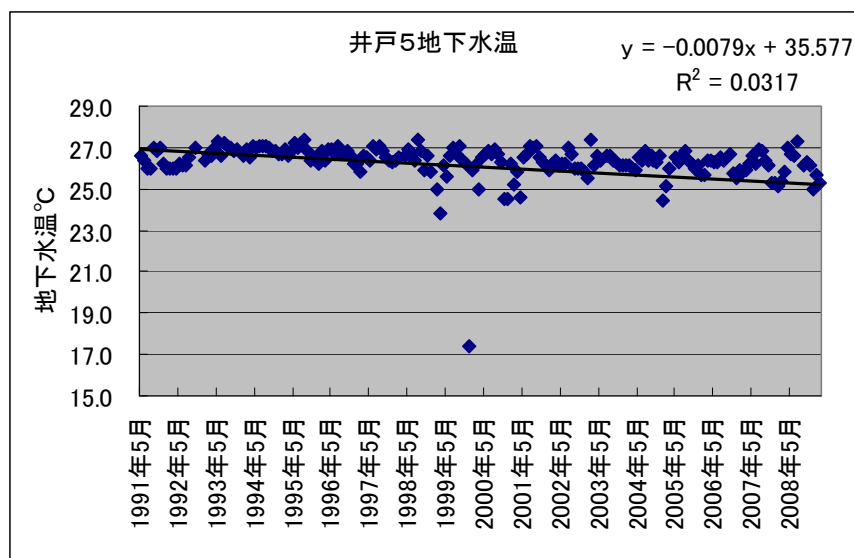


図 2-13 自噴井 5 の地下水温

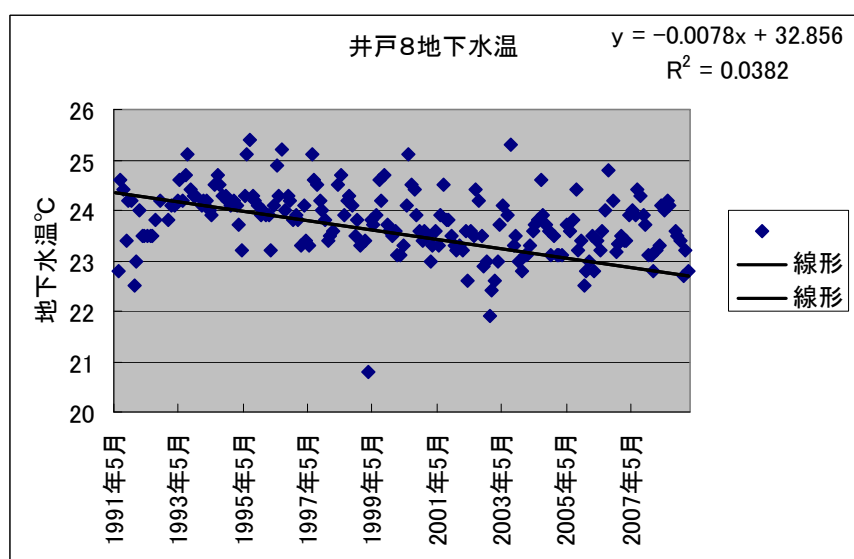


図 2-14 自噴井 8 の地下水温

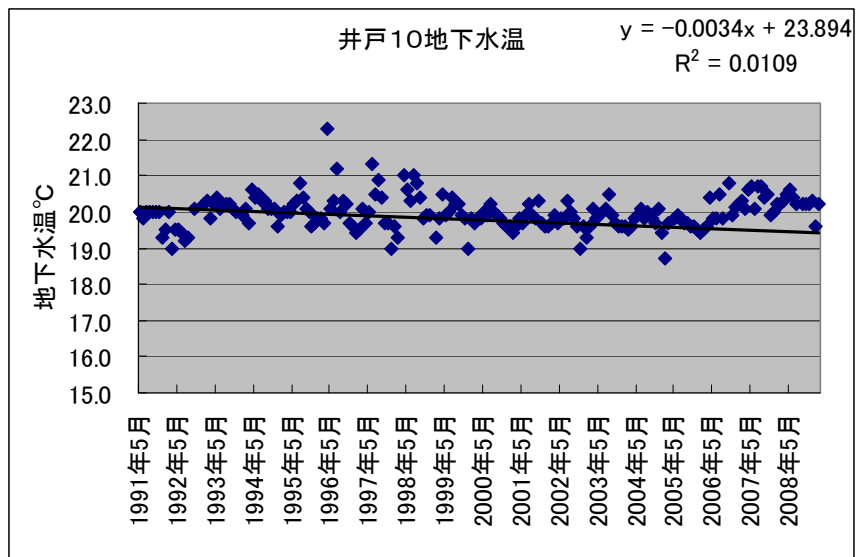


図 2-15 自噴井 10 の地下水温

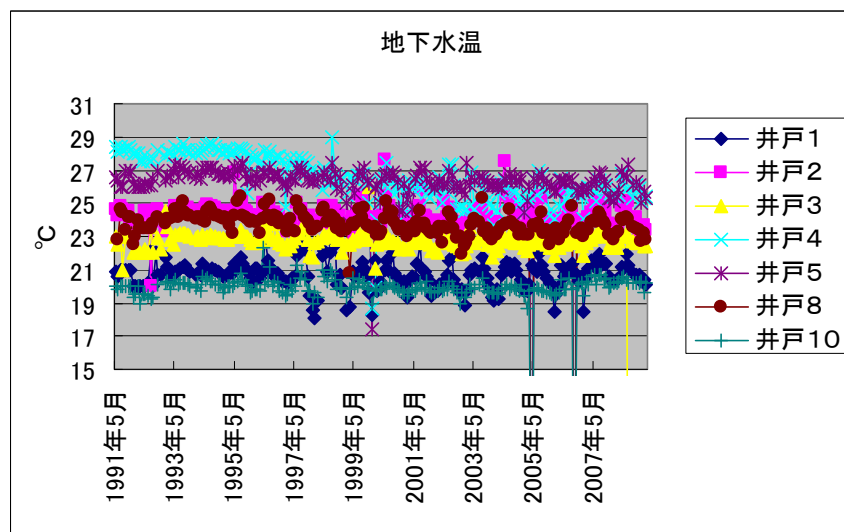


図 2-16 各井戸の地下水温変化

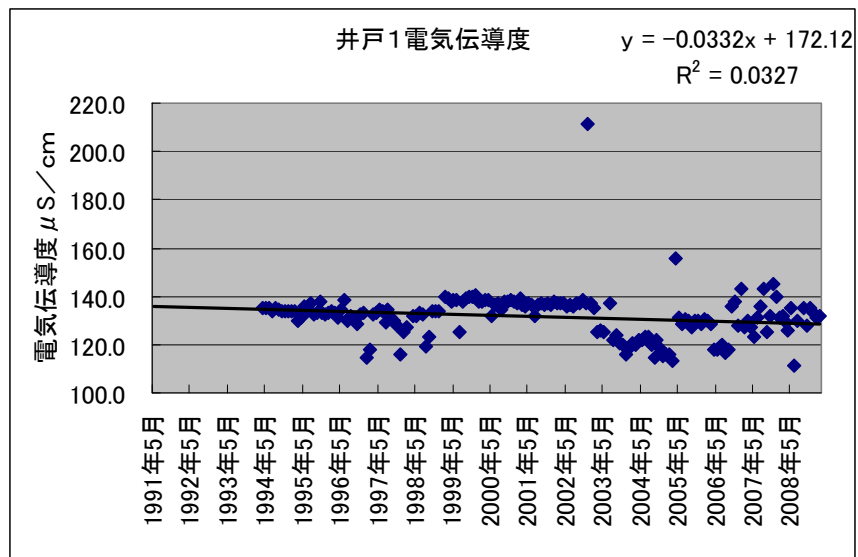


図 2-17 自噴井 1 の電気伝導度

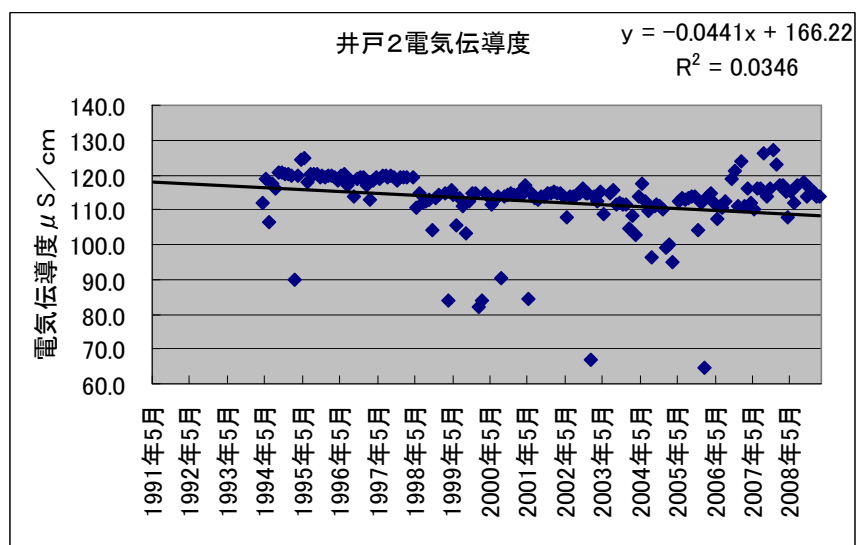


図 2-18 自噴井 2 の電気伝導度

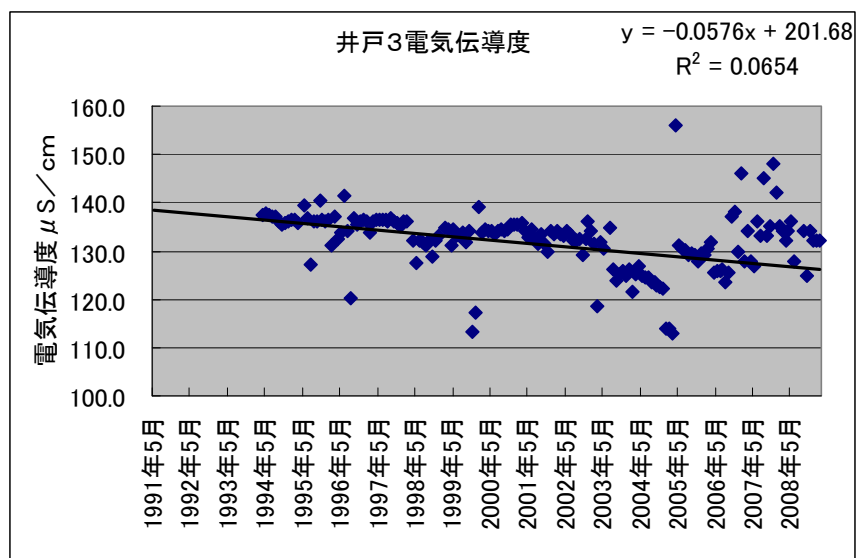


図 2-19 自噴井 3 の電気伝導度

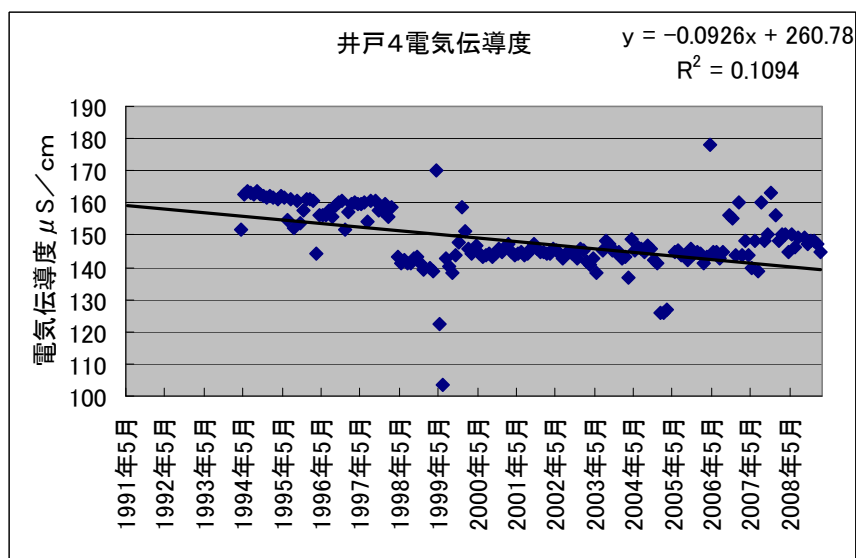


図 2-20 自噴井 4 の電気伝導度

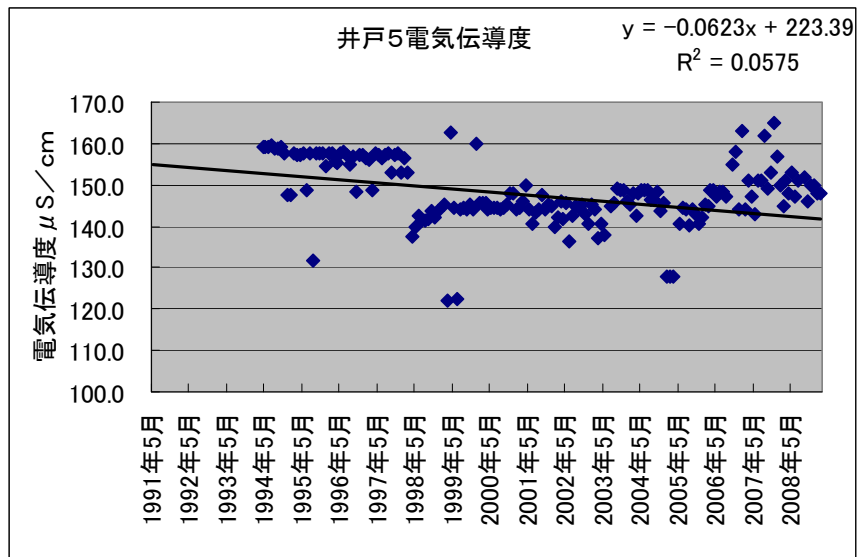


図 2-21 自噴井 5 の電気伝導度

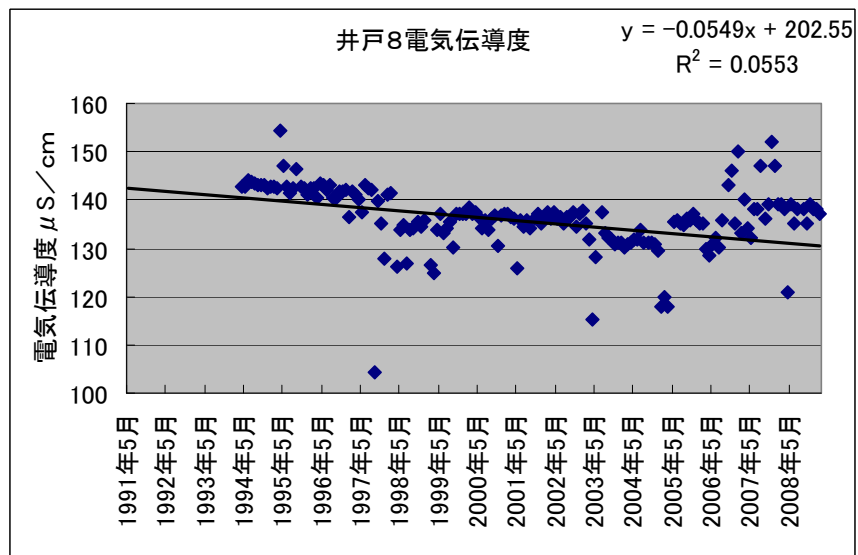


図 2-22 自噴井 8 の電気伝導度

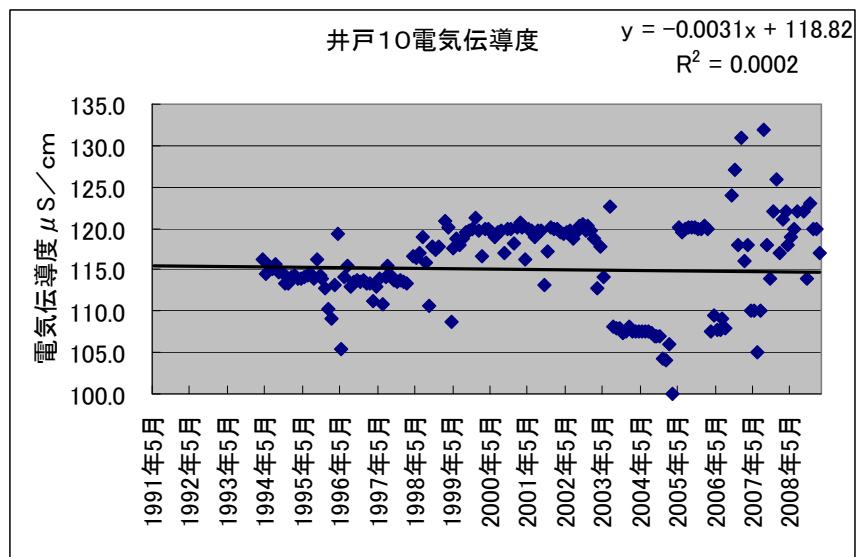


図 2-23 自噴井 10 の電気伝導度

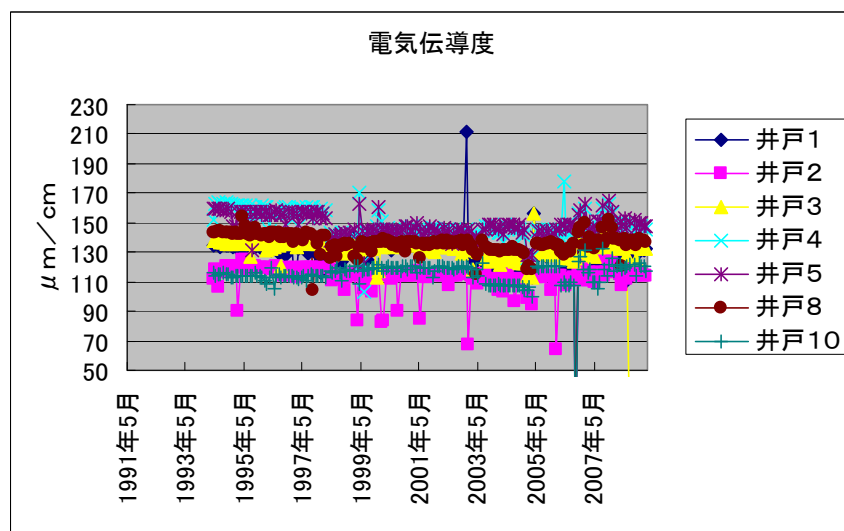


図 2-24 各井戸の電気伝導度変化

地下水温に関しては、すべての井戸でわずかに低下傾向が見られるが、測定の全期間（約 17 年間）を通して安定しており、異常は見られない。また、図 2-16 から分かるように、井戸 3 を除くと、概ね深い井戸は高い水温を示す。

電気伝導度に関しても、全期間を通して見たときには、ほぼ安定していると言える。いずれの井戸でも、わずかに低下傾向が見られるが、ここ数年は逆に増加する傾向が見られる。

次に、pH の変化を図 2-25 から図 2-32 に示す。

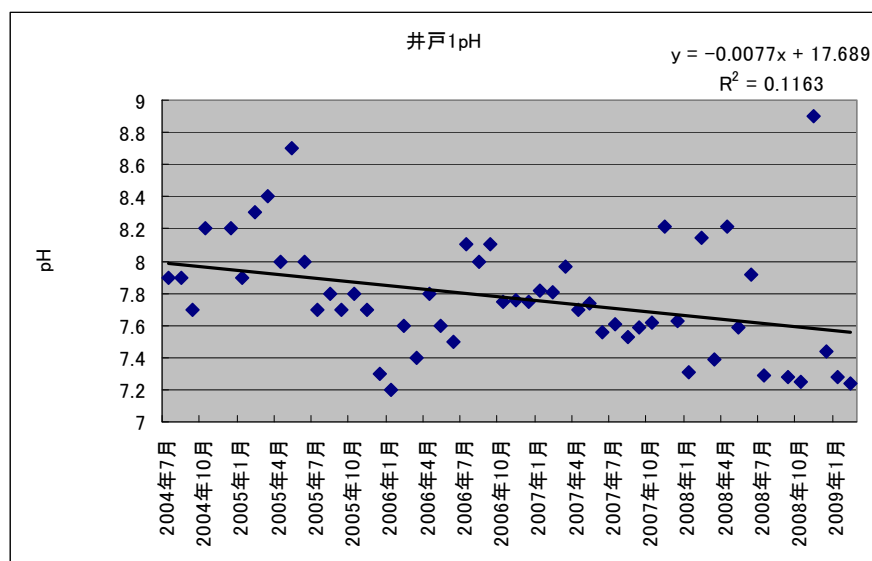


図 2-25 自噴井 1 の p H

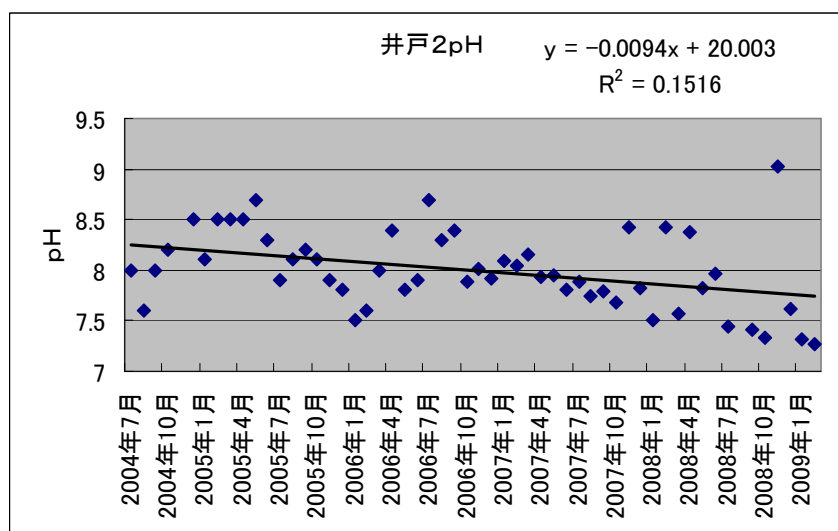


図 2-26 自噴井 2 の p H

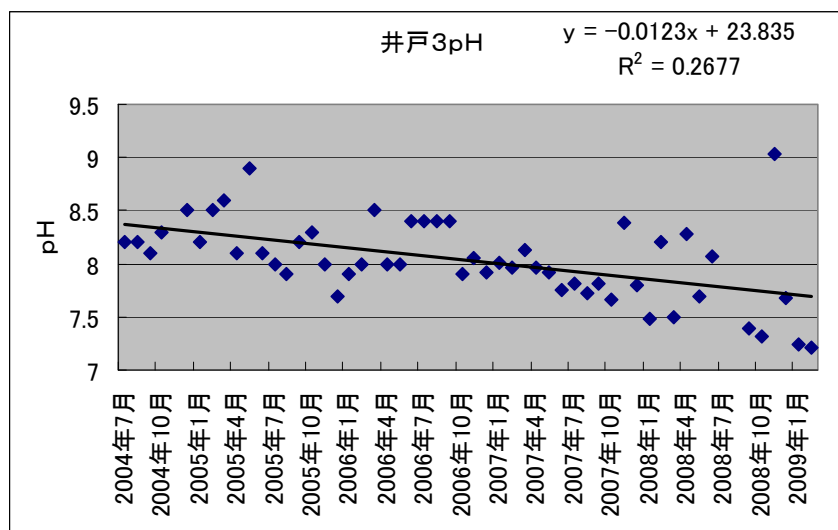


図 2-27 自噴井 3 の p H

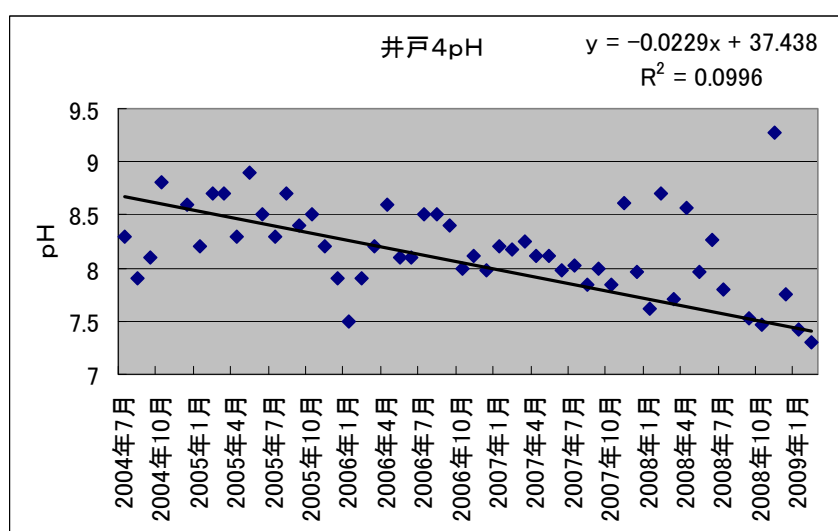
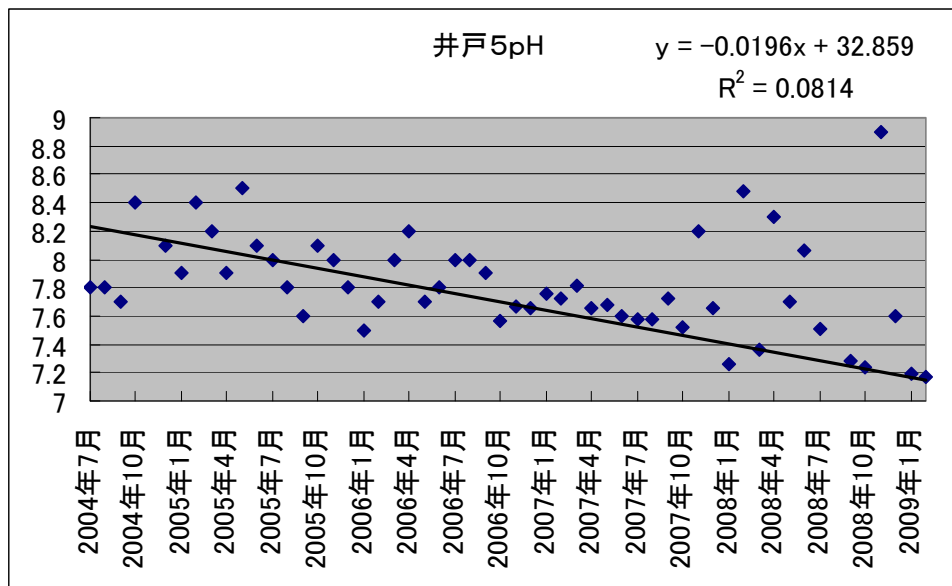


図 2-28 自噴井 4 の p H

図 2-29 自噴井 5 の p H



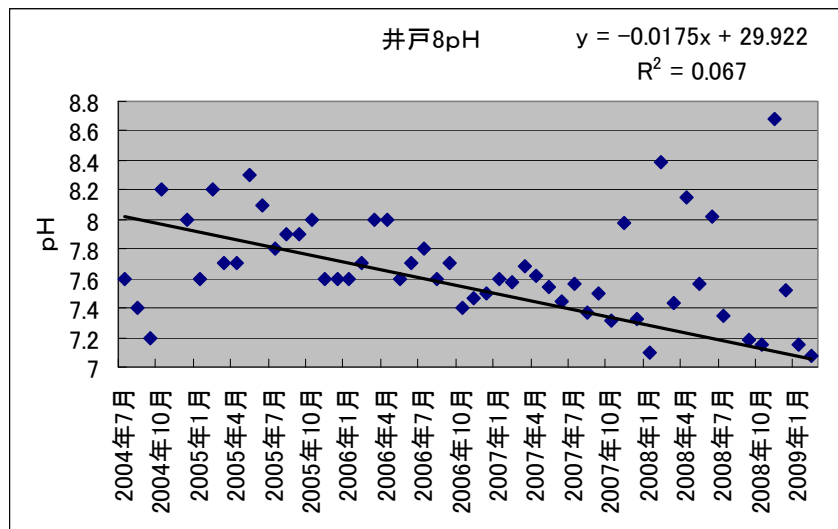


図 2-30 自噴井 8 の p H

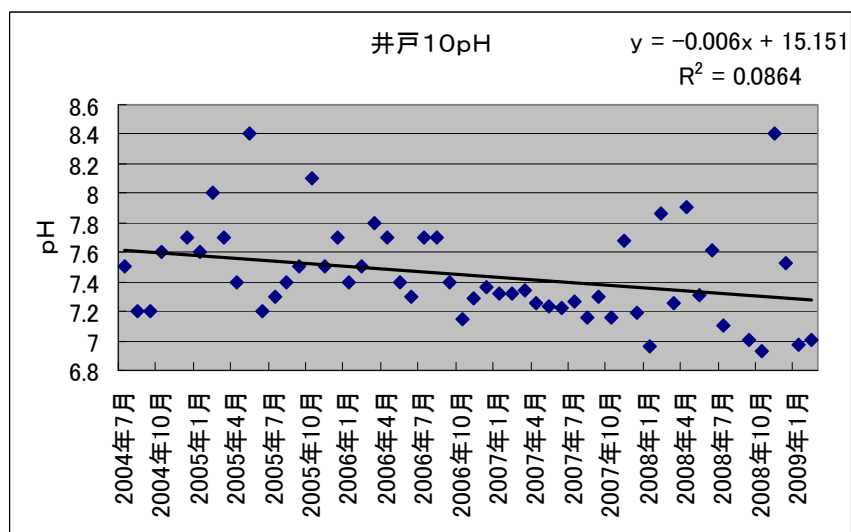


図 2-31 自噴井 10 の pH

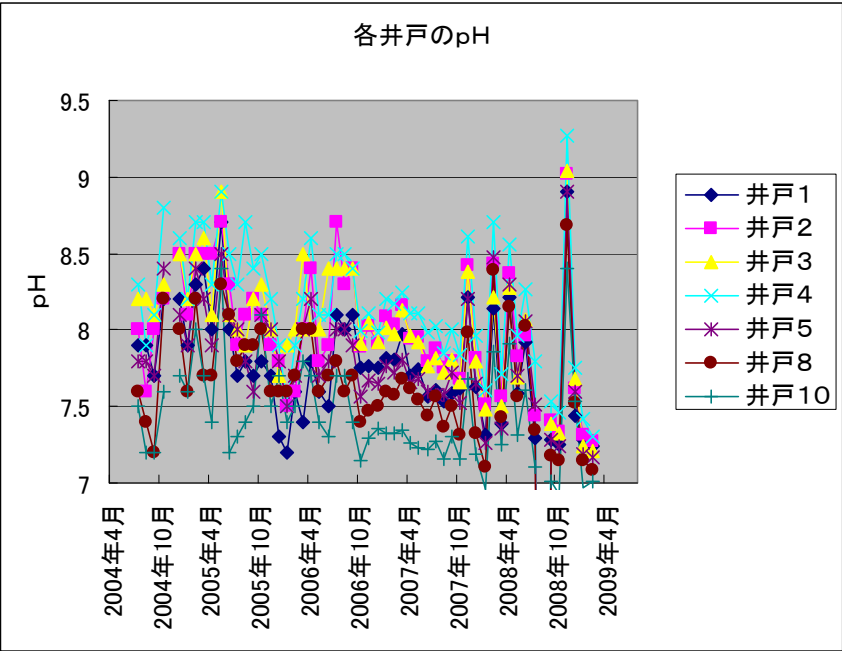


図 2-32 各井戸の pH 変化

pHに関しては、測定点が少ないが、いずれの井戸でもわずかに低下傾向を示している。また、井戸のよって違いがあるが、冬期に減少し、春先に向けて増加するような傾向も少し観察できる。

3. まとめ

継続して観測している自噴井の観察状況を叙述した。序でも述べたように、健全な水循環システムを構築するためには、これらのメカニズムの解明が必要である。一番顕著な変化を見せている自噴量の減少についても、これが地下水涵養量の減少なのか、地下水利用量の増大なのかがはっきりしない。井戸によって若干の違いがあるが、自噴量が春から夏にかけて減少する傾向があるので、地下水利用量の増大が顕著な影響を与えているのは確かである。しかし長期的な自噴量の減少傾向が、単なる利用量の増大なのか、地下水涵養地域の開発などによる涵養量の減少なのかは、不明である。

鈴鹿川流域を対象とした水の流れに関する研究

葛葉 泰久（三重大学大学院 生物資源学研究科）

鈴鹿川流域を対象とした水の流れに関する研究

三重大学大学院生物資源学研究科 葛葉泰久

1. 序論

本報告では、鈴鹿川流域における陸域水循環の解明の基礎的部分について、報告する。

まず、解析の対象地は鈴鹿川流域で、ここは、三重県地盤沈下地域の南端にあたる。ここで、流域内の降雨がどのような経路で河口に流れるのかを解析した。通常、降水（によって地表面に液水として到達した水）は、最終的には蒸発散によって、気体状態の水に戻るが、ある部分は、地下水涵養に貢献し、ある部分は貢献することなく表面水として河口に運ばれる。表面水として河口に運ばれる水は、地下水涵養には貢献しないので、この表面水の流れを量的に把握することは、地下水量把握につながる。

以下は、本研究の導入部となる、本年の研究内容である。

- 1) 標高データを用い、落水線図を作る。これにより、表面水と地下水の両方を包含した水の流れがわかる。
- 2) 流域内で水が集まりやすい場所を上述の情報をもとに探索する。結果として得られる地域は、水が集まりやすい、地下水涵養に関わりが深い地域であると同時に、内水災害の起こり易い地域でもある。特に地盤沈下の影響で、標高が低くなっている場合には危険である。

2. 落水線図

DEM データとして、50m メッシュのものと 250m メッシュのものを用いた。図 1、2 は、それぞれの場合に得られた落水線図である。図中の青い線は、実際の河川を表している。

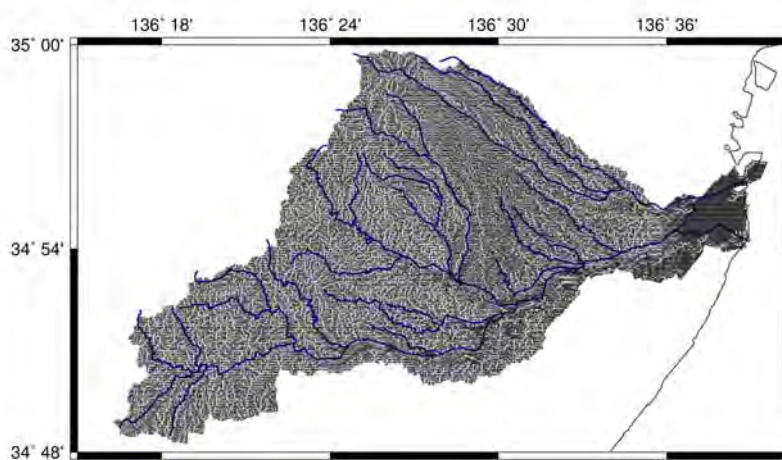


図 1 50m メッシュの標高データを用いて作成した鈴鹿川流域の落水線図

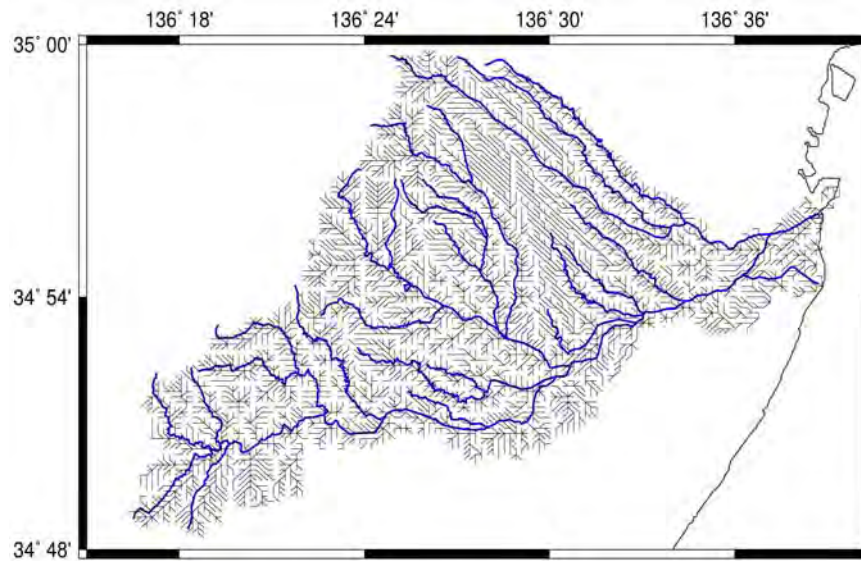


図2 250m メッシュの標高データを用いて作成した鈴鹿川流域の落水線図

3. くぼ地の存在

落水線図を作成するとき、周りより低い土地を“くぼ地”と称す．本研究では、一つの格子点の水が流れる方向を、16方向想定するので、“くぼ地”とは、周りの16方向、すべての標高より低い格子点を示す．このような点では、当該格子点の水が次の格子点に流れない．そのため、通常の流出解析では、不都合な点と考えられ、何らかの手段でくぼ地を消去する．人工的にくぼ地の標高を高くするなどの方法が標準的である．しかし、本研究では、水の集まりやすい場所を探索するため、このような“くぼ地”を利用した．

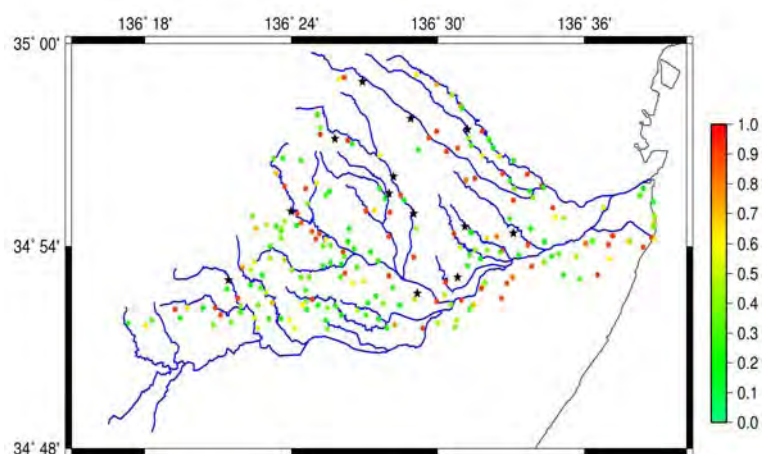


図3 50m メッシュの標高データを用いた場合にくぼ地と評価された地点

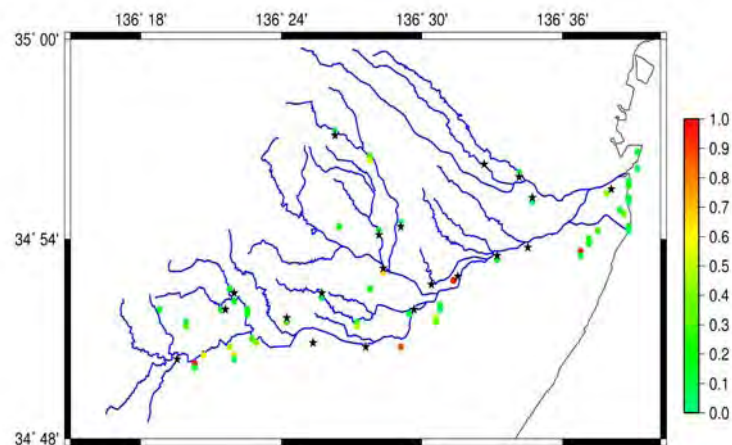


図4 250m メッシュの標高データを用いた場合にくぼ地と評価された地点



図5-10：昭和49年7月の洪水による浸水区域図（国交省）

図3，4は、それぞれ、50mメッシュ，250mメッシュの標高データを用いて落水線図を作成した際に“くぼ地”と評価された地点を表したものである。図5の実際の内水氾濫による浸水地域と比較すると、本研究の手法で、一定の精度で内水氾濫のポテンシャルを表せると考えられる。また、上述の地点は、表流水が集まる場所で、地下水涵養という観点から、（今後さらに検討が必要ではあるが）重要な地点と推測できる。

**木曽三川下流域における
海拔ゼロメートル地帯の水防体制・第二報
－木曽三川左岸下流地域を対象とした調査報告－**

**浦山 益郎（三重大学大学院工学研究科）
小川 宏樹（岐阜市立女子短期大学）**

木曾三川下流域における海拔ゼロメートル地帯の水防体制・第二報

－木曾三川左岸下流地域を対象とした調査報告－

浦山 益郎（三重大学大学院工学研究科）

小川 宏樹（岐阜市立女子短期大学）

1. はじめに

（１）研究の背景

海拔ゼロメートル地帯は、地形上、洪水や高潮などによる水害を受けやすい。治水対策として河川改修は重要な事業であるが、短時日に完遂できるわけではないため、水害の発生が予想されるときに人命と財産を守り、被害を最小限に食いとどめる水防活動は重要な対策である。木曾三川流域の海拔ゼロメートル地帯では古くから自衛のために地域住民による水防活動が行われてきた。内田和子¹⁾によると近世以来の伝統的な水防活動は水害予防組合²⁾に引き継がれてきたが、河川改修の進展に伴う輪中の統廃合と連動して水害予防組合の廃止・統合が進み、地域が担ってきた水防機能が市町村や水防事務組合へ移行した。また、河川改修と排水ポンプによる内水排除技術の進展は、地域住民の水防意識の希薄化、水防活動にあまり協力的でない新住民の増加などを招き、伝統的な水防社会の変質につながっているとしている。

また近年、局地的な短時間の豪雨（いわゆるゲリラ豪雨）による都市型水害（平成 12 年東海豪雨、平成 20 年 8 月末豪雨等）の問題が顕在化している。このような集中豪雨は、気象観測網の整備により降雨現象を捉えることは可能となったが、現在の気象予測技術では未だ予測が困難である。また、都市部でのヒートアイランドや局地風による積乱雲の急激な発達の原因とされているが、その正確なメカニズムの解明には至っていない³⁾。

この局地的集中豪雨は、10km 四方程度の極小範囲に 100mm/時を超える猛烈な雨が降るが、1 時間程度しか続かないという特徴がある。一般に、都市下水は最大降水量 50mm/時程度を想定しているため、これを超える雨量は処理しきれず、その結果、雨水が市街域にオーバーフローする都市型水害が発生する。

（２）研究の経過

昨年度実施した「木曾三川下流域における海拔はるメートル地帯の水防体制－三重県桑名市・木曾岬町を対象とした調査報告－」において、現在の水防体制（水防行政、水防組織、水防施設）には次のような課題があることを明らかにした。

1) 水防行政の課題

- ・近世以来、地域が担ってきた水防の責務が、明治末期以降に市町村や水防事務組合等の行政移管した結果、地域の水防意識が低下した
- ・消防、河川管理、防災の 3 部署に水防機能が分散した結果、水防に関する責任の所在が曖昧となった

¹ 内田和子：「近代日本の水害地域社会史」、古今書院、1994.12

² 水害の防御という共通の目的を持つ人々がつくった地縁的な公共組合。明治 41 年の水害予防組合法が根拠法。

³ 三上岳彦ほか「東京都内における夏期の局地的大雨に関する研究」東京都環境科学研究所年報 pp.33-42 2005

2) 水防組織の課題

- ・地域の水防団が消防団に編入・一本化された結果、水防に対する水防技術が継承されにくい状況がつけられた
- ・全国的な傾向として、水消防団員数の減少や構成員の高齢化が問題となっており、地域の水防体制が弱体化する懸念がある（図-1の全国データ[×印]）

3) 水防施設の課題

- ・水防設備を備蓄する水防倉庫の大半は大規模河川の堤防法面に設置されている、市街地で発生する都市型水害に対する備えとなりにくい（守備範囲が異なる）
- ・消防を主たる目的とする消防本部・消防署や消防団本部・分団詰所などの施設は、水害ハザードエリアにも立地しており、水害発生時に機能しない危険性がある（図-2）

特に「水防施設」については、例えば水防倉庫は河川堤防の決壊による水害に備えるための施設であり、そもそも守備範囲が異なることから、近年問題となっている都市型集中豪雨には対応できていない。また市街地の施設であっても、水害ハザードエリアに立地する施設も多数存在し、災害発生時に機能しない可能性が高い。

このように、都市型水害は予測が難しく、また自然現象であるため未然に防ぐことは困難である。そこで、発生した災害に対して人的・経済的被害を最小限に食い止めるための水防体制を確立することが有効な対応策であると言える。

（3）研究の目的

本稿では、昨年度に引き続き木曽三川下流域の海拔ゼロメートル地帯における水防体制の実態と課題を把握するために、木曽三川下流左岸地域の海部地区水防事務組合⁴に属する9市町村（愛西市、津島市、弥富市、美和町、甚目寺、七宝町、大治町、蟹江町、飛島村：以下、海部地区と略す）を対象に、水防施設整備の現況を調査した（図-3）。

広域で水防活動を実施している地域の特性を把握するために、複数の市町村で水防管理団体を形成している海部地区水防事務組合の事例と、昨年度調査を実施した単独で水防管理団体となっている桑名市の事例と比較しながら分析を行なう。

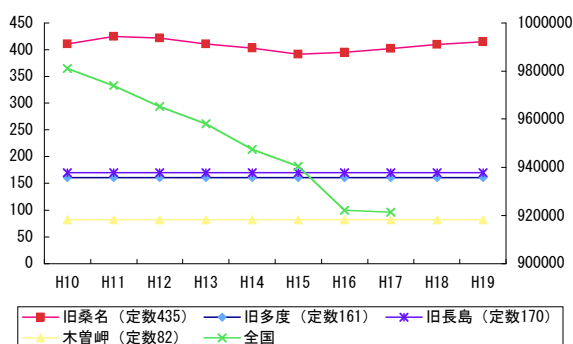


図-1 水消防団員数の変化

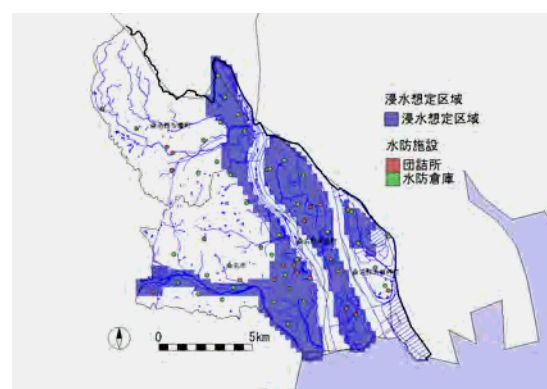


図-2 水防施設の立地状況

⁴ 愛知県知事が、水防上公共の安全に重大な関係があると認めて指定した水防管理団体。水防管理団体とは、水防の必要のある市町村、水防事務組合及び水害予防組合をいう。また水防事務組合とは、複数の市町村が共同で水防に取り組むために設立された事務組合をいう。

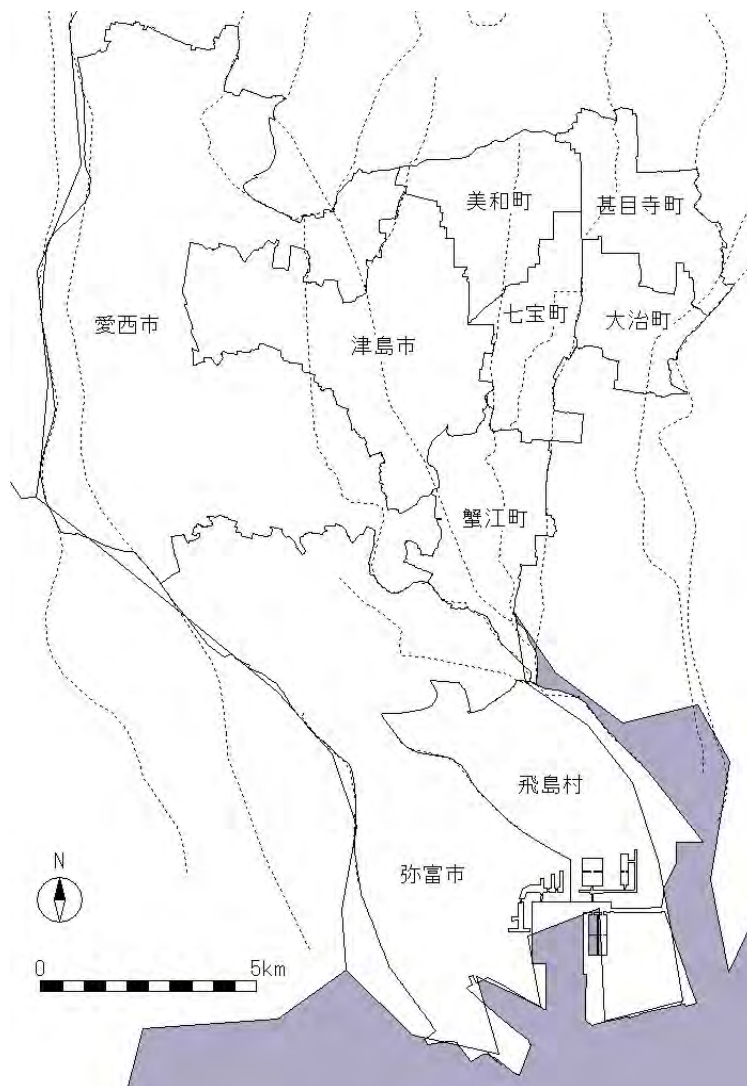


図-3 調査対象地域

2. 海部地区9市町村の水防施設の実態

(1) 水防事務組合とは

水防事務組合は、地形の状況（複数市町村にまたがる河川流域、標高の高低差等）により、市町村が単独で水防責任を果たすことが困難であると予想される場合にこれを設けることが義務づけられている⁵。またその範囲は、水防団等が出動できる距離を考慮し、20km 程度を想定している。

水防事務組合の主な役割は、管轄する地区の水防計画の策定や広域調整、水防倉庫及び水防機材・備品等の購入、維持管理といった平常時の事務業務である。気象や災害の予警報が発令した際の水・消防団への出動命令や指揮等の非常時の水防活動への対応は各市町村（消防本部、河川や防災担部署）が担当している

広域で水防活動を行なうメリットとして、単独で水防事務を担う場合と比較し、広域的な

⁵ 水防研究会編著：「逐条解説 水防法」、ぎょうせい、2005.10

視点で水防体制を構築できること、効率的な事務運営が可能となること、参加市町村による平常時の水防訓練の実施や緊急時の協力体制が構築できること等が挙げられる。

逆にデメリットとして、水害の有無に関わらず組合運営のための分担金が生じること、気象や災害の予・警報を伝達する非常時の連絡体制が一つの市町村単独の場合と比較し複雑化すること（図-4）、平常時と非常時で役割を担う部門が異なるといった点が挙げられる。

（２）海部地区の水防体制

海部地区は木曽三川下流左岸に位置し、長良川から庄内川までの東西十数キロメートルの間に、国土交通大臣が水防警報を行なう河川の長良川・木曽川・庄内川、愛知県知事が水防警報を行なう河川の新川・日光川といった大規模河川が集まる、我が国でも有数の水防重要地域である。そのため、愛西市、津島市、弥富市、美和町、甚目寺、七宝町、大治町、蟹江町、飛島村の海部地区9市町村は水防事務組合を組織し、愛知県知事により指定水防管理団体に指定されている⁶。海部地区水防事務組合の組織体系は図-5の通りである。

海部地区水防事務組合は、各市町村から選出された議員30名（各市町村議会議員、消防団長等）で構成されている。また実際の実務を担う執行機関は、管理者（参加市町村長の互選）、副管理者（管理者以外の市町村長）、会計管理者（1名）、その他の職員（職員2名）で運営されている。年間予算は、3,300万円（平成19年度）で、これを各市町村が組合規約により定められた割合に応じ分担している⁷。

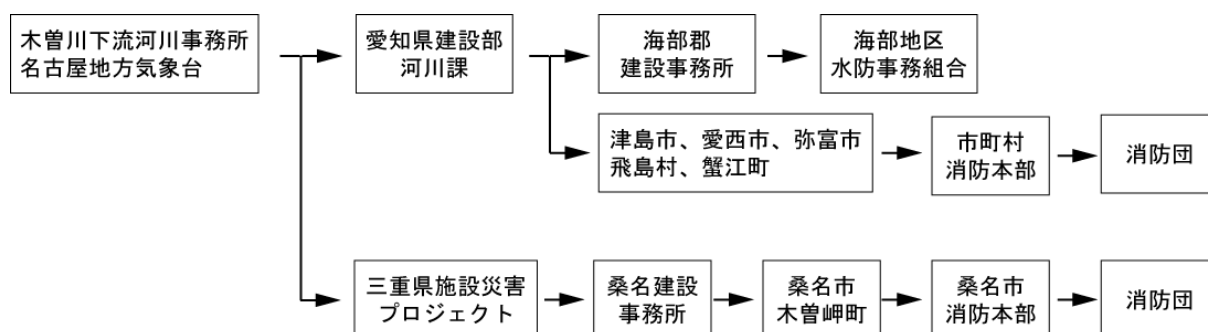


図-4 気象や災害に関する予・警報の連絡体制の比較（木曽川下流の例）

⁶ 海部地区水防事務組合規約(昭和48年)

http://www.town.shippo.aichi.jp/reiki_int/reiki_honbun/ai54703451.html

⁷ 均等割20%、人口割50%、固定資産税標準割30%

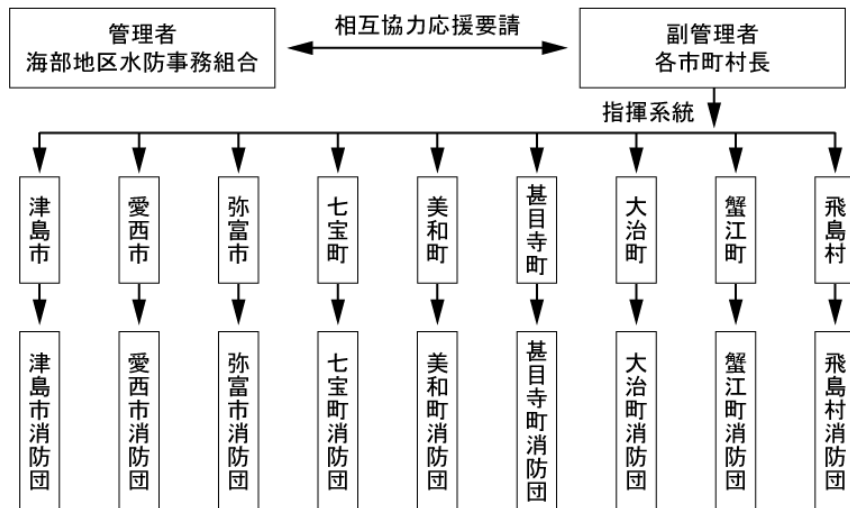


図-5 海部地区水防事務組合の組織体系

表-1 海部地区水防事務組合が防護対象とする河川および海岸

名称		防護すべき施設の区間
木曽川＊	左岸	愛西市及び弥富市の各区域内
	右岸	愛西市の区域内
長良川＊	左岸	愛西市の区域内
庄内川＊	右岸	甚目寺町及び大治町の各区域内
新川＊	左岸、右岸	甚目寺町及び大治町の各区域内
五条川＊	右岸	甚目寺町の区域内
筏川	左岸	飛島村大字重宝字葭野三二七の一番、地先鍋田大橋から下流の弥富市及び飛島村の各区域内
	右岸	弥富市稲元三丁目二八一番
鍋田川	左岸	弥富市中山町分水木曽川分流点から下流の弥富市の区域内
日光川＊	左岸、右岸	津島市、愛西市、蟹江町及び飛島村の各区域内
領内川	左岸、右岸	愛西市の区域内
三宅川	左岸、右岸	愛西市の区域内
目比川	左岸、右岸	津島市、愛西市及び美和町の各区域内
蟹江川＊	左岸、右岸	美和町大字金岩字江付、大半字界から下流の津島市、七宝町、美和町及び蟹江町の各区域内
福田川	左岸、右岸	七宝町、甚目寺町、大治町及び蟹江町の各区域内
善太川	左岸	津島市埋田町二丁目三番、地先から下流の津島市、愛西市、弥富市及び蟹江町の各区域内
	右岸	津島市橘町三丁目二八番
宝川	左岸	弥富市四郎兵衛三丁目、築留から下流の弥富市及び飛島村の各区域内
	右岸	弥富市四郎兵衛四丁目
小切戸川	左岸	大治町大字西條字苅屋橋二五番一、地先から大治町、七宝町及び蟹江町の各区域内
	右岸	大治町大字西條字笠見立五九番一
新堀川	左岸	津島市城山町一丁目一番、地先から下流の津島市及び愛西市の各区域内
	右岸	津島市上之町二丁目七番
海岸堤防		弥富市及び飛島村の各区域内

＊印は、国土交通省、県、市町村による洪水ハザードマップ（浸水想定区域）が策定されている河川

（３）海部地区の水防施設の実態

さて海部地区水防事務組合では、先に述べた５河川も含め、大小合わせて１７河川を防護対象とする河川として指定している（表－１）。

海部地区水防事務組合では、水防団員の集散や水防活動に必要な資機材を備蓄するための水防施設として、主に水防倉庫（一部防災倉庫）を整備している。地区内には、愛知県海部建設事務所が管理するものが６件および市町村が管理するものが８件（表－２）、組合が管理するものが３８件（表－３）整備されている。

一方、海部地区の標高データを１／４メッシュ（２５０ｍ四方メッシュ）で図示したものが図－５である。海部地区の全メッシュ数に占める海拔ゼロメートル未満地域のメッシュ数の割合は４５．８％（１，５３９メッシュ）となり、この地区の約半数は海拔ゼロメートル未満であることが分かる。特に次章で詳細な調査分析を行なった蟹江町をはじめ、飛島村、弥富市北部（十四山村地域）、愛西市南部（旧佐屋町地域）津島市南部では、市街地のほとんどが海拔ゼロメートル未満の地域である。

表－２ 海部地区の県及び市町村管理の水防倉庫

愛知県が管理する水防倉庫（６件）		各市町村が管理する水防倉庫（８件）	
水防倉庫名	所在地	水防倉庫名	所在地
海部郡本部	津島市西柳原町	津島市老松	津島市老松
海部郡立田松田	愛西市松田	弥富市三稲	弥富市三稲
海部郡立田杵先	愛西市杵先	弥富市役所	弥富市前ヶ須
海部郡下之森	七宝町下之森	愛西市役所	愛西市稲葉
海部郡東末広	弥富市東末広	愛西市西船	愛西市西船
海部郡鍋蓋新田	蟹江町鍋蓋新田	愛西市佐織庁舎	愛西市諏訪
		大治町防災倉庫	大治町馬島
		蟹江町防災倉庫	蟹江町西之森

表－３ 海部地区水防事務組合管理の水防倉庫

水防倉庫名	水防倉庫名	水防倉庫名	水防倉庫名
津島市 中一色北山	弥富市 十四山	愛西市 塩田	蟹江町 蟹江旭
津島市 葉荊	愛西市 下平	愛西市 鷹場	蟹江町 蟹江本町
津島市 百町	愛西市 葛木	愛西市 古瀬	蟹江町 蟹江今
津島市 埋田	愛西市 大成	七宝町 七宝	蟹江町 蟹江西之森
津島市 中一色清光坊	愛西市 小家	美和町 美和	蟹江町 蟹江大海用
津島市 莪原	愛西市 森川	美和町 花正	飛島村 飛島大宝
弥富市 前ヶ須	愛西市 鵜多須	甚目寺町 甚目寺	飛島村 飛島飛島
弥富市 加稲	愛西市 給父	大治町 大治西条	飛島村 飛島新政成
弥富市 加稲山	愛西市 高畑	大治町 大治八ツ屋	
弥富市 鍋田	愛西市 下大牧	大治町 三本木	

これらの水防施設の位置情報と標高データを GIS 上でレイヤー化したものが図-5 の通りである。水防倉庫を中心に半径 50m のバッファを発生させ、海拔ゼロメートル未満の標高データメッシュとの重なりを見たところ、愛知県が管理する水防倉庫 14 件の内 12 件(85.7%)、また各市町村が管理する 38 件の内 23 件 (60.5%) が海拔ゼロメートル未満地域に位置する。水防倉庫は、河岸堤防の法面に設置する場合が多く、堤防の盛土等により通常周辺地域よりも若干高い位置に設置されることが多いが、この地区は、国営かんがい排水事業の対象地域にもなっており、ここを流れる河川は日光川及びその支流や蟹江川など、河床が周辺の平地面よりも高いいわゆる天井川となっていることから⁸、ゲリラ豪雨のように短時間の局所的な豪雨に対し、水防倉庫が冠水する恐れがある。

また、水防施設の位置情報と表-1 に示した水防警報を行なう 6 河川において指定された浸水想定区域⁹の 1/4 メッシュデータを GIS 上でレイヤー化したものが図-6 ～図-11 である(図中水色部分が浸水想定区域)。

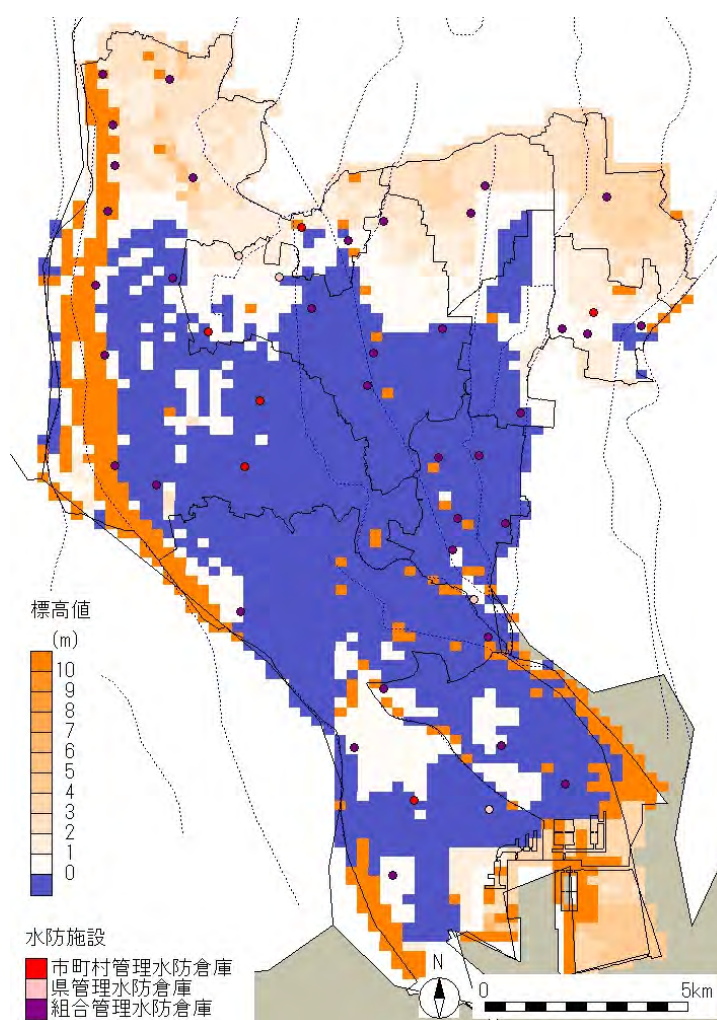


図-5 海部地区の海拔ゼロメートル未満の地域と水防施設（青が海拔ゼロメートル未満）

⁸ 国営かんがい排水事業資料(昭和 60 年～平成 8 年)

⁹ 水防法第 14 条に基づき洪水予報河川及び水位周知河川において、地域住民の洪水時の円滑かつ迅速な避難の確保を図るため、河川整備の基本となる降雨により河川が氾濫した場合に浸水が想定される区域として国土交通大臣もしくは都道府県知事が指定する。

先ほどと同様に、水防倉庫を中心に半径 50m のバッファーを発生させ、浸水想定区域の 50cm 以上冠水するおそれのあるデータメッシュとの重なりを見たものが表-4 である。浸水想定区域内に設置されている施設数は、該当する河川の浸水想定区域の広さにおよそ比例し、木曽川のような大規模な一級河川だけでなく、日光川のように市街地を流れる天井川では浸水想定区域も広いことから、その区域内にある水防施設数も多くなる。

表-4 浸水想定区域と水防施設

河川名	浸水想定区域 の割合＊	浸水想定区域内の水防施設数		
		県管理（6 件）	市町村管理(8 件)	組合管理（38 件）
木曽川	61.3%	5（83.3%）	7（87.5%）	28（73.7%）
庄内川	5.6%	1（16.7%）	1（12.5%）	4（10.5%）
新川	3.5%	0（0.0%）	1（12.5%）	3（7.9%）
五条川	3.9%	0（0.0%）	1（12.5%）	3（7.9%）
日光川	26.8%	2（0.0%）	4（50.0%）	19（50.0%）
蟹江川	9.2%	1（16.7%）	1（12.5%）	9（23.7%）

＊海部地区の 1/4 メッシュ（250m 四方メッシュ）3,363 メッシュ中、該当河川の氾濫時に 50cm 以上冠水するおそれのある浸水想定区域に該当するメッシュ数の割合

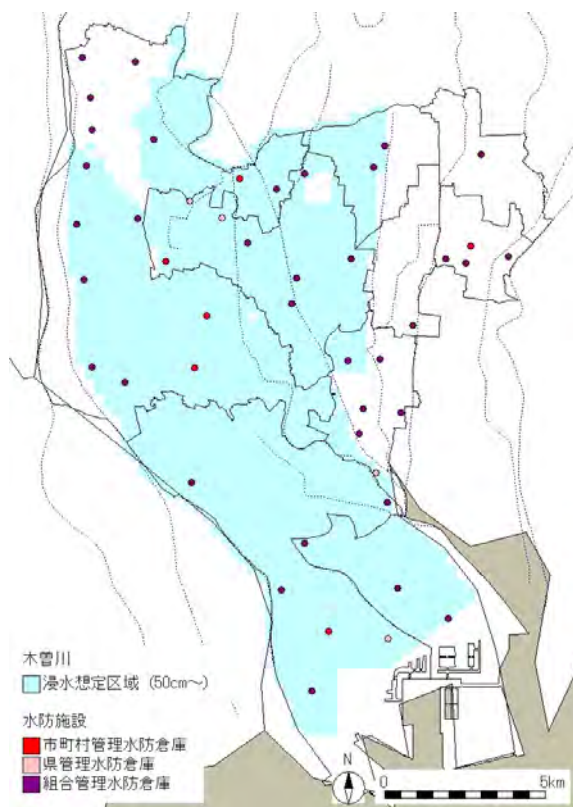


図-6 木曽川の浸水想定区域と水防施設

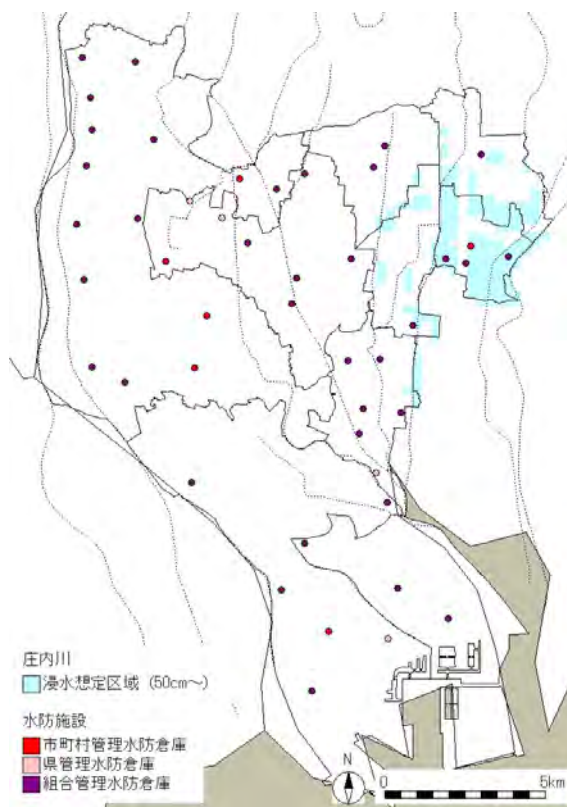


図-7 庄内川の浸水想定区域と水防施設

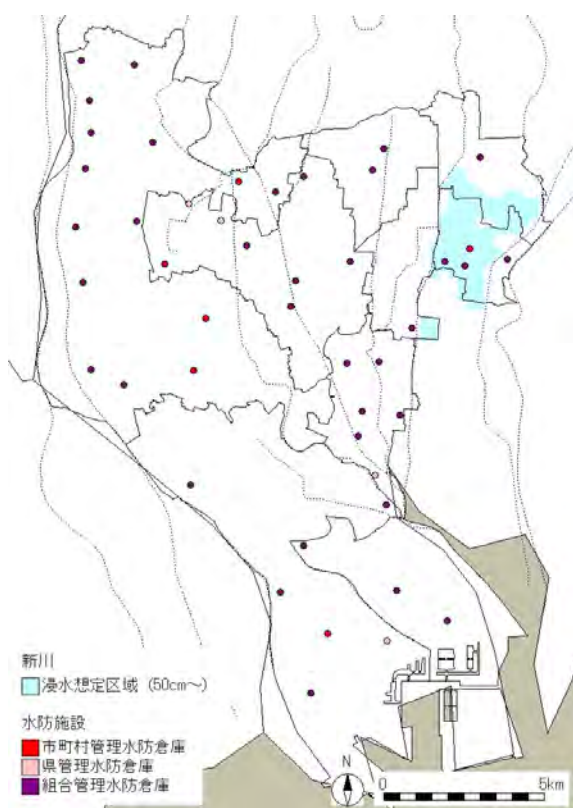


図-8 新川の浸水想定区域と水防施設

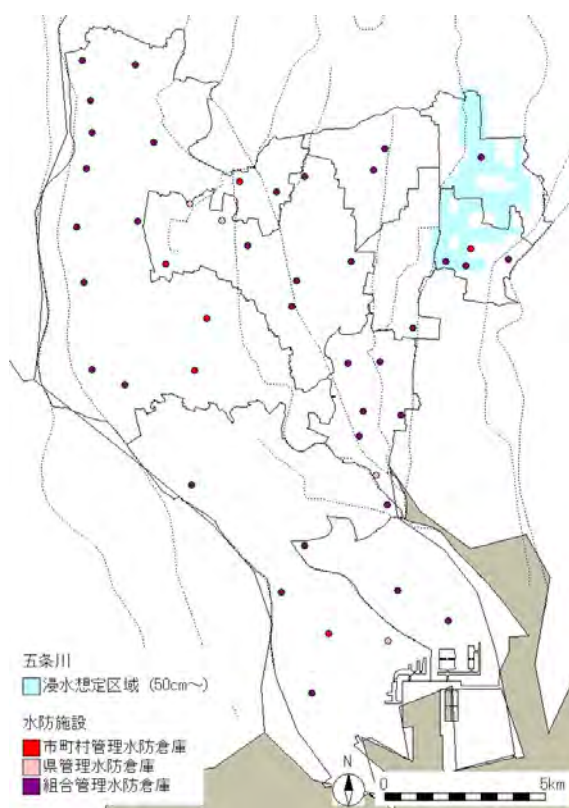


図-9 五条川の浸水想定区域と水防施設

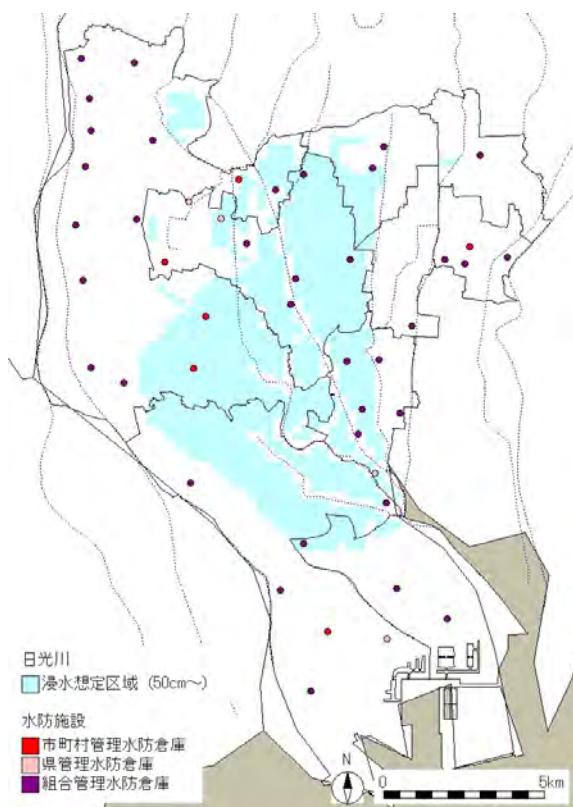


図-10 日光川の浸水想定区域と水防施設

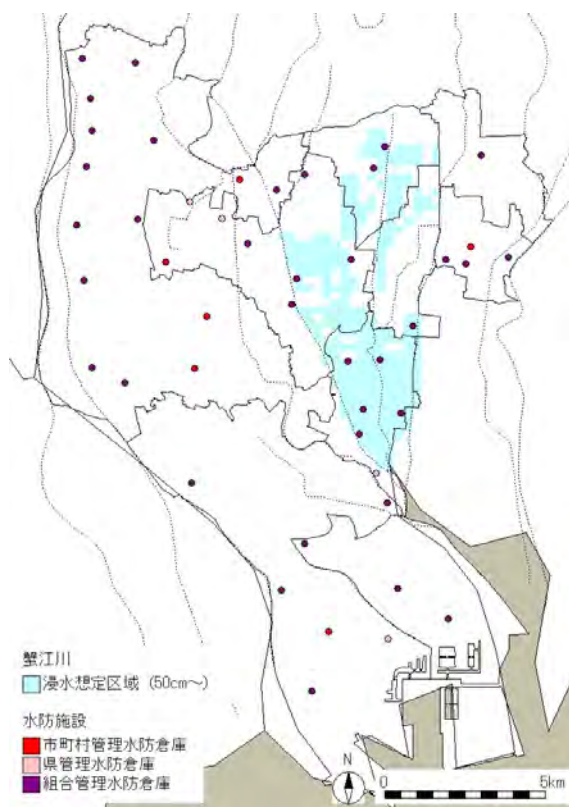


図-11 蟹江川の浸水想定区域と水防施設

3. 蟹江町における水防施設の実態

(1) 蟹江町の水防体制の概要

蟹江町は、愛知県南西部に位置し名古屋市中川区に隣接した地域である¹⁰。町内には蟹江川・日光川・福田川が南北に流れ、それぞれが伊勢湾に注いでいる。人口約 3 万 6 千人（1 万 4 千世帯、平成 21 年 1 月現在）、行政総面積の 11.10 平方キロメートル全域が海拔ゼロメートル未満地域であり、大小の河川面積が総面積の 4 分の 1 を占める海部地区でも有数の水郷地域である（図-1）。

町の水防事務は、消防本部・消防署（職員 52 名）が担当し、本町南・本町北・舟入・新蟹江東・新蟹江西・須西・学戸南・学戸北の消防団 8 分団に 187 名の分団員が所属している（表-5）¹¹。消防団員は、主に各地域の自治会を通じて集めているため、近年の全国傾向のような団員数の減少はほとんど見られない。

表-5 蟹江町消防団の現況

	人員	小型動力ポンプ 付積載車	小型動力ポンプ (台車付)	機械器具庫	火の見やぐら
団本部	団長 1 副団長 2		2		
本町南分団	25	1		1	1
本町北分団	25	1		1	
舟入分団	21	1		1	1
新蟹江東分団	21	1		1	1
新蟹江西分団	25	2	1	3	3
須西分団	25	2	1	3	3
学戸南分団	21	1	1	2	4
学戸北分団	21	1		1	1
計	187	10	5	13	14

表-6 蟹江町の避難所

施設名			
蟹江中学校	蟹江南保育所	蟹江児童館	西之森本田公民館
蟹江北中学校	蟹江西保育所	新蟹江児童館	源オコミュニティセンター
蟹江小学校	須成保育所	みどりの家	舟入ふれあいプラザ
舟入小学校	新蟹江北保育所	蟹江町立図書館	富吉コミュニティ会館
新蟹江小学校	蟹江町体育館	蟹江町歴史民俗資料館	藤丸公民館
須西小学校	蟹江中央公民館	蟹江町産業文化会館	
学戸小学校	老人福祉センター	上之町公民館	
蟹江保育所	蟹江町保健センター	海門公民館	

¹⁰ <http://www.town.kanie.aichi.jp/>

¹¹ 平成 20 年度消防概況、蟹江町消防本部

消防署が「水難」により出動件数は過去 10 年間に年 1～3 件である。また消防団の過去 5 年間の水防に関わる出動はないが、平成 12 年東海豪雨の際には、町内 13 ヶ所の県道・町道が冠水し、通行止め等の対応に消防団が出動した。

（２）蟹江町の水防施設の設置場所の特徴

１）浸水想定区域（日光川水系）と水防施設の関係

蟹江町では、平成 20 年 12 月現在、小中学校や公民館など町内の 29 の公共施設を災害発生時の避難施設に指定している（表-6）。そこで、町が管理する水防倉庫（防災倉庫）1 件、海部地区水防事務組合が管理する水防倉庫 5 件に加え、これら 29 件の避難施設の設置場所を図示したものが図-12、図-13 である。

蟹江町が公開している日光川洪水ハザードマップの浸水想定区域（詳細）を 1/10 メッシュ（100m 四方メッシュ）で示したものが図-12 である。水防倉庫・避難施設を中心に半径 50m のバッファーを発生させ、浸水想定区域の冠水するおそれのあるデータメッシュとの重なりを見た。

蟹江町全域 1,184 メッシュ中 723 メッシュ（61.1%）が浸水想定区域に指定されている。そこで、1.0m 以上浸水する地域（凡例の 3 段階目以上）に注目すると、この地域に組合管理の水防倉庫 2 件、避難施設 9 件が設置されている。特に町南東部の近鉄蟹江駅付近を中心に、蟹江川左岸地域に 1.0m 以上の浸水が予想される地域が集中していることから、これらの地域に立地する施設は注意が必要である。

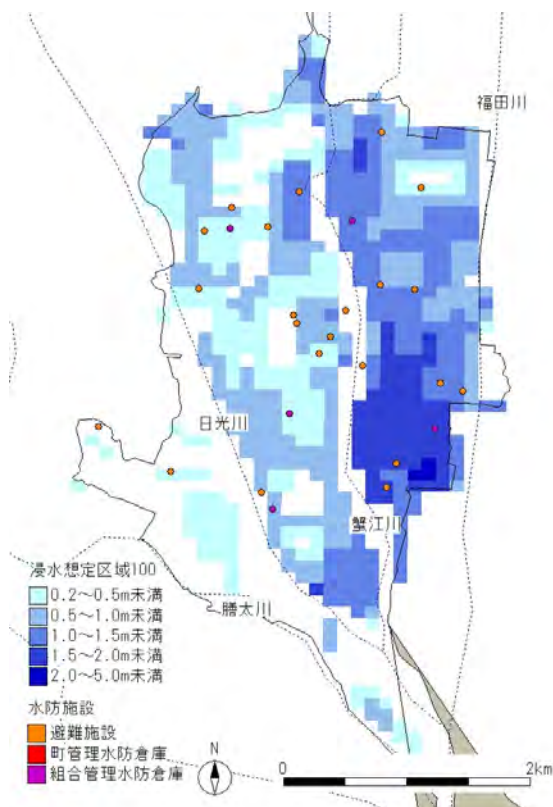


図-12 日光川水系の浸水想定区域（詳細）と水防施設および避難施設

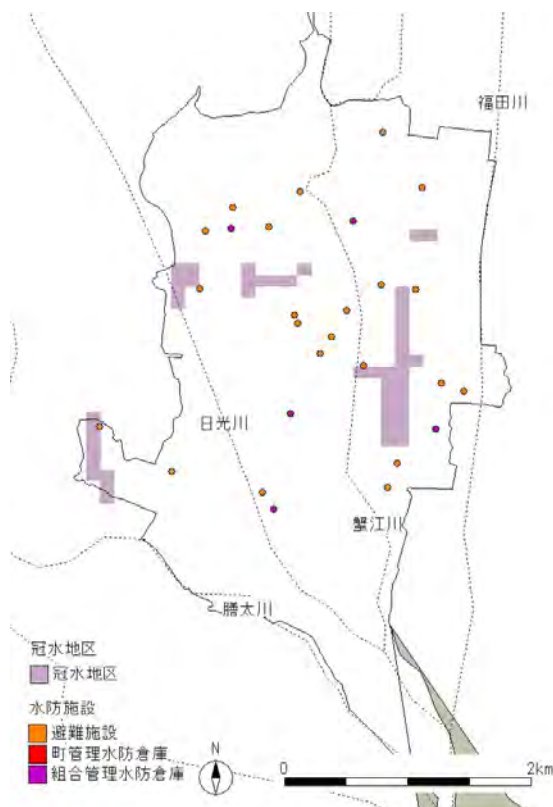


図-13 平成 12 年東海豪雨冠水地区と水防施設及び避難施設

2) 平成 12 年東海豪雨冠水地区と水防施設の関係

平成 12 年東海豪雨の冠水地区を 1/10 メッシュ（100m 四方メッシュ）で示したものが図-13 である。水防倉庫・避難施設を中心に半径 50m のバッファーを発生させ、浸水想定区域の冠水するおそれのあるデータメッシュとの重なりを見た。

蟹江町全域 1,184 メッシュ中 48 メッシュ（4.1%）が平成 12 年東海豪雨の際に冠水し、この地域には避難施設 4 件が設置されている。この中には保育園 2 件も含まれており、避難施設としての機能を果たさないだけでなく、開園時間中に水害が発生した場合、災害時要支援者¹²である園児が孤立する恐れがある。

4. まとめ

本調査では、木曽三川下流域の海拔ゼロメートル地帯における水防体制の実態と課題を把握するために、木曽三川下流左岸地域の海部地区水防事務組合¹³に属する 9 市町村（愛西市、津島市、弥富市、美和町、甚目寺、七宝町、大治町、蟹江町、飛島村：以下、海部地区と略す）を対象に、水防施設整備の現況を調査した。昨年度調査を行なった木曽川下流域の三重県側（桑名市、木曽岬町）と同様に、河川の氾濫や局所的・短時間の集中豪雨への水防施設に対する対策が必要な実態が明らかとなった。

海部地区は、地区の約半数が海拔ゼロメートル未満であり、排水機や下水では処理仕切れない短時間の局所的な豪雨に対しては、水防倉庫も冠水し、水防活動に支障を来す恐れがある。蟹江町のように市町村域のほとんどが海拔ゼロメートル未満の地域もあり、移転が難しい場合は、2 階建て RC 造や S 造へ改修する等の対策が望ましい。また東西十数キロメートルの狭い範囲に、水防警報を行なう河川が 6 つも集中していることから、浸水想定区域に対する対策も必要である。複数の河川の浸水想定区域に指定されている地域のデータや、第 3 章で分析した 1/10 メッシュ（100m メッシュ）の詳細データ等をもとに、洪水発生時に水防施設や設備が使用できることを前提に、個々の施設に対する詳細な評価を行ない、必要に応じて移転等の対策をとることが望ましい。

¹² 災害が発生した場合には、すべての被災住民が援護を必要とする状態となるが、必要な情報を迅速かつ的確に把握し、災害から自らを守るために安全な場所に避難するなど、災害時において適切な防災行動をとることが特に困難な人々をいう。具体的には、一人暮らしや寝たきりの高齢者、障害者、傷病者、妊産婦、乳幼児、児童、外国人等。

¹³ 愛知県知事が、水防上公共の安全に重大な関係があると認めて指定した水防管理団体。水防管理団体とは、水防の必要のある市町村、水防事務組合及び水害予防組合をいう。また水防事務組合とは、複数の市町村が共同で水防に取り組むために設立された事務組合をいう。

低コスト地下水位観測システムの開発 (その 2)

組み込み系 Linux システムの耐久性

伊藤 良栄 (三重大学大学院 生物資源学研究科)

低コスト地下水位観測システムの開発（その2）

組み込み系 Linux システムの耐久性

三重大学大学院生物資源学専攻
伊藤 良栄

1. はじめに

環境問題としての地盤沈下の長期的モニタリングや水資源利用としての地下水量評価などを行うには、地下水位の観測データが重要である。三重県や東海地方といった広範な範囲を対象とした解析を行うためには多地点の情報が必要である。また、リアルタイムで最新値を取得可能にするには、これらの観測機器がネットワークに接続し、自立的にデータベースサーバに観測データを提供する必要がある。最近の観測機器にはインターネットや携帯電話回線を通じて計測データを転送する機能をサポートするものが多いが、このようなモデルは一般的に高価であり、多地点に展開するには高額な費用を要する問題がある。

2. 研究の背景

インターネットの普及と発展により、フィールドサーバをはじめとするセンサーグリッド技術が急速に進歩してきた。我々のグループでは国内外での実証実験を通じ、野外観測におけるフィールドサーバの有効性とネットワーク不通時のローカルデータストレージサーバの重要性を指摘してきた。昨年度までに NAS(Network Attached Storage)である Linkstation(Buffalo 社)/玄箱(玄人志向社)、MicroPC、OpenBlocks 等の Linux ベースの機器に着目し、野外での運用試験を通じてそれぞれの特徴と問題点を抽出した。その結果、可動部品である HDD を含むシステムは温度や湿度等に対する耐久性が低くなるため、屋外での連続観測に問題があることが示された。

そこで本年度は、前年度初めて採用した組み込み系 Linux を用いたシステムの耐久性について検討することにした。

3. 用いたシステムの概要

3. 1 組み込み系システム

組み込みシステムを一言で単純にまとめれば「必要最低限の装備で特定の機能を実現する機器・ソフトウェアのまとまり」である。尤も、組み込みシステムの定義は曖昧であり、「機械や機器に組み込まれて、その制御を行うコンピュータシステム」や「マイクロチップとそれを制御するプログラムを組み込んだシステムもしくは IT(情報技術)を組み込んだシステム」、「メモリ上にあるソフトウェアがCPUまたはMPUと呼ばれるプロセッサで実行されて動作して目的を達する、一連の機器」など、人によって様々に定義されている。しかし、それぞれに共通することとして、組み込みシステムは PC やワークステーションなどいわゆる汎用システムを除くほとんどのコンピュータシステムであること、パソコンなどの汎用コンピュータより記憶容量が少ない状況下で動作させるため、提供する機能や性質を限定し、特定用途に専用化されているコンピュータシステムということである。

組み込みシステムは様々な分野で適用されている。組み込みシステムの適用対象物をごく一部

だけ取り上げると、表 3-1 の様になる。

表 3-1 組み込みシステムの適用分野と機器の例(高田ら(2003)より一部抜粋)

適用分野	利用例
家電製品	電子レンジ, 炊飯器, 冷蔵庫, 洗濯機, 乾燥機, エアコン
AV 機器	テレビ, ビデオ, デジタルカメラ, オーディオ機器
娯楽/教育機器	ゲームマシン, 電子楽器, カラオケ, パチンコ
通信機器	携帯電話機, 留守番電話機, ネットワークルータ, ハブ
運輸機器	自動車, 信号機, 鉄道車両, 航空機, 船舶
設備機器	ビル用照明, ビル用空調, エレベータ
宇宙・軍事	ロケット, 人工衛星, ミサイル

組み込みシステムは, CPU や RAM などのハードウェアと, それらをコントロールするソフトウェアがセットになっている。この内, 組み込みシステムに使用されるソフトウェアのみを指して「組み込みソフトウェア」と呼ぶ。この組み込みソフトウェアは, 大半はクロス開発によって開発される。

3. 2 組み込み系システムの中の組み込み系 Linux

組み込みソフトウェアは汎用システムと同様に OS とアプリケーションの 2 つに大別することができる。組み込みシステムで利用するソフトウェアのうち, 様々なシステムで共通して使われ, 他のソフトウェアに処理の仕組みを提供するソフトウェアが組み込み OS, 特定の問題をコンピュータで処理できるようにするためのソフトウェアが組み込みアプリケーションプログラムである。組み込みシステムが多様な特徴を持つように, 組み込み OS も様々な特徴を持つものが存在する。組み込み OS の代表的なものを表にまとめたものが, 表 3-2 である。

表 3-2 代表的な組み込み OS 及びプラットフォーム(福田(2007)より一部抜粋)

名前	特徴	リアルタイム処理	使用メモリ
μITRON	国産の組み込み向けリアルタイム OS 世界一のシェア 高速かつ軽量で, フットプリントが小さい	対応	少
REX	Qualcomm 者が主に携帯電話機向けに提供 W-CDMA/CDMA プロセッサとセットで利用	対応	少
VxWorks	WindRiver 社提供の UNIX ベースの組み込み OS 通信機器や制御系デバイスなどに広く利用される	対応	少
Windows CE ・ Windows Mobile	Microsoft 社の PDA・スマートフォン向け OS リアルタイム処理能力は無い	非対応	中
Windows XP Embedded	Windows XP の組み込み向けサブセット版 小容量かつ堅牢なシステム	非対応	中

組み込み系 Linux	組み込み向け Linux ディストリビューション ROM での実行，極小化されたカーネルサイズなど組み込み向けにチューニングされている	部分的に 対応	中
-------------	---	------------	---

1970 年代初めにマイクロプロセッサが開発されてから，組み込みシステムの適用分野は急速に拡大していった．特に 1990 年代半ばころからは，情報インフラの普及と半導体技術の進歩により，機械や機器のネットワーク化・デジタル化が急速に発展し，組み込みシステムに求められる処理能力は一段と大きくなった．この結果，以前から信頼確保や障害の早期除去のために行ってきたすべてのソフトウェアを自社開発するという考えから，早期に多くの機能が使える既存の設計資産やソフトウェアの再利用を進めざるを得ない状況になっている．特に，Windows や Linux は熟練した多くのソフトウェアエンジニアがいるため，これらが現在組み込みシステムにおいて多く利用され始めている．

組み込み Linux は，制限された機能や使用方法などによって，さらに tomato や μ CLinux, DD-Wrt, OpenWrt などさまざまな種類が開発されており，その一部はインターネット上で無料で公開されている．

4. 圃場耐久実験

4. 1 実験の概要

本研究の目的のひとつとして，屋外設置を前提とした耐高温性があった．パソコンのような精密機器を圃場に設置する際，降雨などによる水の浸入，夏季の屋外など高温条件下における熱暴走，砂塵などによる動作不良への対策が必要不可欠である．圃場耐久実験では，ハードディスクを全く使用しない圃場画像モニタリングシステムを作成し，このシステムを外箱に入れて動作し続けるか否かを検証することを実験の目的とした．システムの設置場所として，有線の LAN に接続しやすく，システムの不具合が発生した場合にすぐにメンテナンスすることができるように，三重大学学内圃場を選択した．図 4-1 が圃場耐久実験における機器設置の様子である．図 4-1 左下のシートが被せられた濃緑系の箱が本章における実験で使用したシステムである．本実験で機器は 2008 年 8 月 1 日からシステムメンテナンスのために回収した 2009 年 1 月 27 日まで設置され続けていた．画像モニタリングは 4 時から 20 時まで 30 分毎に画像を撮影するようにシステムを動作させることで実現した．



図 4-1 圃場耐久実験の設置状況

4. 2 開発したシステム

4. 2. 1 使用機器

本章の圃場耐久実験で使用した機器は制御用の CPU ボードと撮影用の USB カメラの 2 つであった。詳細は以下の通りである。

(1) 制御用 CPU ボード

本章の圃場耐久実験では、圃場側で用いる制御用 CPU ボードとして、タイで約 100 ドルで入手した ASUS 社 Wl-500gPremium(以下 wl500gP)を使用した。表 4-1 が wl500gP のハードウェア構成、図 4-2 左が Wl500gP の外観である。

表 4-1 wl500gP のハードウェア構成(OpenWrtDoc より)

Vendor	Broadcom
Bootloader	CFE
System-On-Chip	Broadcom BCM94704
CPU Speed	266Mhz
Flash size	8MiB (Spansion S29GL064M90)
RAM	32MiB
Wireless	MiniPCI Broadcom 802.11b/g BCM4318 802.11 Wireless LAN Controller
Ethernet	Robo switch BCM5325
USB	2x USB 2.0



図 4-2 使用機器の外観(wl500g Premium)

本実験で wl500gP をシステムに用いた理由として、USB ポートが使用可能であること、ハードディスクドライブ(HDD)を使用していないため耐高温性に期待が持てること、本体価格約 1 万円と安価であること等が挙げられる。

(2) USB カメラ

当初は入手が容易なことと低価格性から、約 1,000 円で手に入る PlayStation2 用 USB カメラ EyeToy を用いた。しかし、画像取得の比較実験において、EyeToy に大きな個体差があることが判明した。この個体差は設定ファイルである程度は調整することが可能であるが、長期間使用に

よる劣化の可能性もあり、圃場での長期設置に不安を残した。

そこで、本圃場画像モニタリングシステムで使用する USB カメラを、EyeToy から logicool 社の Qcam Orbit AF(以降 Qcam)に変更した。表 4-2 が Qcam の詳細情報、図 4-2 が Qcam の外観である。

表 4-2 Qcam のスペック(Logicool web ページより一部抜粋)

製品名	Qcam® Orbit AF
型番	QCAM-200R
品番	960-000118
価格	Logicool ストア価格 11800 円(税込)
画像センサ	200 万画素
画角(映る広さ)	75 °



図 4-2 Qcam 外観

表 4-2 で画像センサが 200 万画素とあるように、Qcam では 200 万画素(1600×1200)の画像を取得することができる。また、Qcam には Windows XP, Vista 対応のソフトウェアがあり、これを用いることで色調の調節、ズームなどをクリック 1 つで行うことができるが、Linux では API が公開されているのみで、それらの機能をサポートするソフトウェアがないため、今回は 200 万画素という高画質な画像を取得可能な USB カメラとして使用した。将来的には、遠隔から撮影点移動やズームなどが行えるように改良する必要があると考える。

図 4-3 に全体のシステムフロー図を示す。



図 4-3 システムフロー図

4. 3 実験結果

今回の圃場耐久実験において、本システムは 1 月 27 日の機器回収まで、熱暴走によって停止することなく動作し続けた。気象庁 Web ページより、2008 年 8 月・9 月において三重大学内圃場から最も近い津気象台で観測された日最高気温と日最低気温が図 4-4 である。

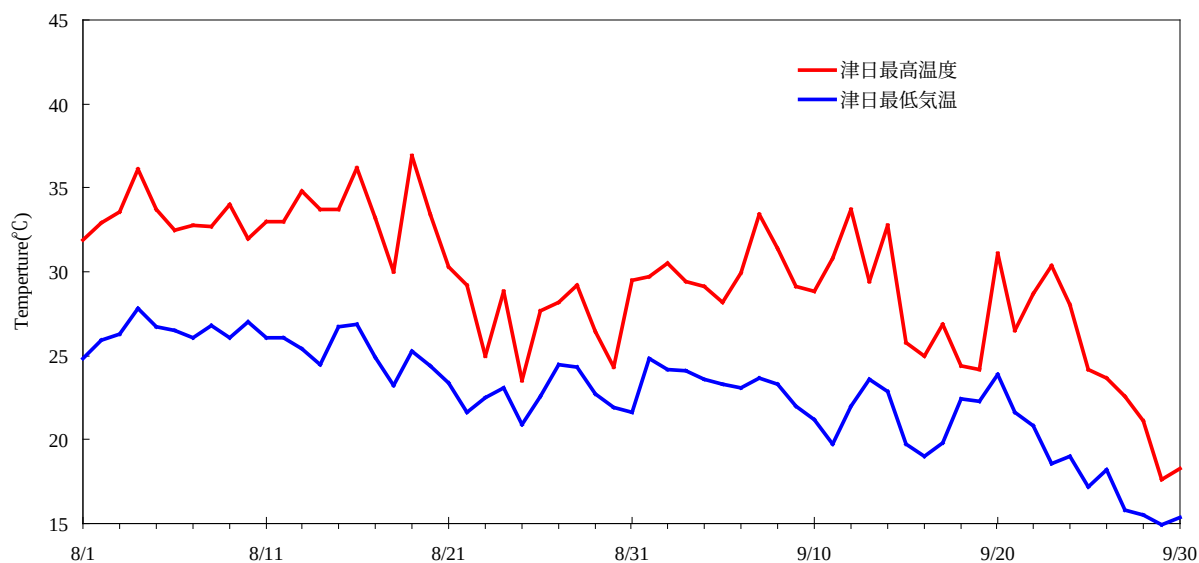


図 4-4 津気象台における 2008 年 8 月，9 月の日最高気温と日最低気温

圃場のような直射日光下において，圃場の気温は気象台で計測された気温より高温になると考えられる．このため，本実験で設置したシステムは，津気象台で観測された気温よりもより高い温度環境下で動作していたと考えられた．

以上のことを考慮して図 4-4 を見ると，8 月の津において日最高気温が摂氏 35℃以上である猛暑日にあたる日が 3 日，日最高気温が摂氏 30℃以上である真夏日にあたる日が 8 月 1 日から 21 日まで続いたことが分かる．また，9 月においても，真夏日が約 2 週間続いていたことが分かる．このような条件下でもシステムや機器が熱暴走せずに動作したということは，少なくとも津市近辺の圃場においては，真夏に熱暴走を起こすことなく動作するシステムを構築することができたといえる．

5. まとめ

CPU ボードとして HDD など可動部品を排除し，OS に組み込み系 Linux の一つである OpenWrt を採用したシステムを用いることにより，前年度までの実証実験で見られたような高温化における熱暴走は発生せず，夏季の屋外という過酷な条件化でも安定して稼働させることができた．

今後は，運用試験がまだ不足しているので，継続して実験を行い，通信インフラが整備されていない野外での通信経路確保や，商用電源に頼らない省電力対応等の残された問題を解決しながら，最終的には地下水位計測に向けてシステムの改良を進めて行きたい．