

報告書概要

①技術研究開発課題名	合成開口レーダ（SAR）を利用した防災情報把握に関する技術開発
②技術研究開発テーマ名	高分解能ポラリメトリック SAR を用いた水害状況把握技術の開発
③研究代表者	
氏名	所属・役職
島田 政信	宇宙航空研究開発機構 宇宙利用ミッション本部 地球観測研究センター 研究領域総括
④共同研究者	
氏名	所属・役職
大木 真人	宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター 開発員
河野 宜幸	同 地球観測研究センター 研究員
滝口 太	同 衛星利用推進センター 防災利用システム室長
西川 肇	日本大学生産工学部土木工学科 非常勤講師
藤井 壽生	日本大学生産工学部土木工学科 教授
工藤 勝輝	日本大学生産工学部土木工学科 教授
岩下 圭之	日本大学生産工学部土木工学科 教授
朝香 智仁	日本大学生産工学部土木工学科 助手
青山 定敬	日本大学生産工学部土木工学科 助教
⑤背景・課題	
<p>平成23年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、その直後に発生した大津波により甚大な被害が生じたが、津波の到達後、程なく日没を迎えたことから翌朝までその詳細な浸水状況を把握することができなかった。このように、夜間・悪天候時の災害発生には、光学カメラによる空中からの被災状況の把握が困難なことから、昼夜問わず観測可能で雲を透過するマイクロ波を利用した合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar : SAR）を用いて上空から撮影することで、迅速な被災状況把握が期待される。一方で、SAR で撮影されたデータから災害情報を読み取るためにはデータ処理が必要であり、地殻変動分野では人工衛星を用いた干渉 SAR 等の手法が存在するが、回帰日数が長い場合、迅速な災害対応には不向きなことから、航空機 SAR の実用化や洪水による浸水域などを把握するための技術開発が必要である。</p>	
⑥技術研究開発の目的	
<p>本研究は、(独)宇宙航空研究開発機構（JAXA）と日本大学が共同で、JAXA 所有の航空機搭載高分解の L 帯ポラリメトリック SAR (Pi-SAR-L) を用いて模擬水害検出実験を実施し、撮影技術や水害情報抽出のための解析手法と現地調査データによる浸水域と最適な撮像条件の定量的な評価、SAR 画像、現地調査データ、DEM 等を用いた大規模河川の水域・浸水深の推定手法の検討などを行い、実用に供するための技術開発を行うことを目的とする。</p>	

⑦技術研究開発の内容・成果

(1)実施体制

本研究の実施体制は、以下のとおりである。

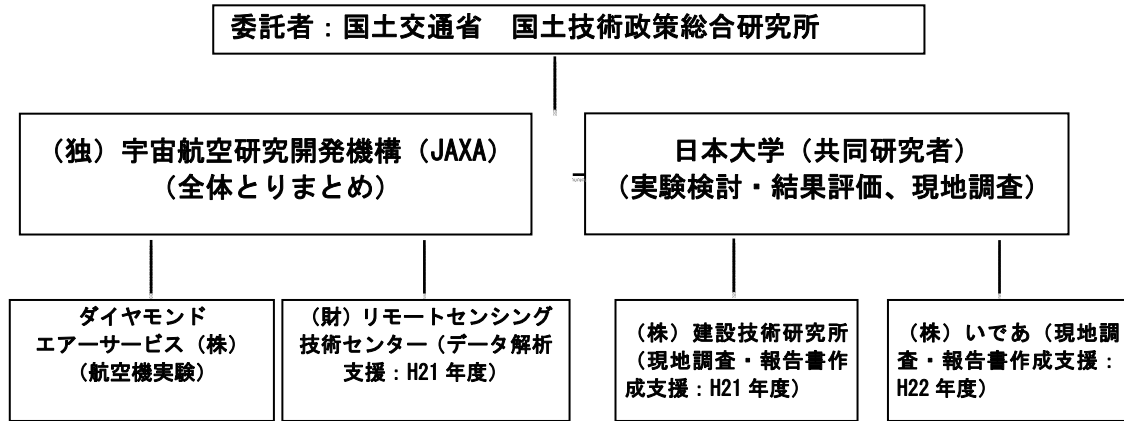


図 1 実施体制図

(2)実施概要

【平成 21 年度における検討】

Pi-SAR-L による撮影技術の実証

- 水田の湛水を内水氾濫に想定して Pi-SAR-L による観測を実施する
- 同一エリアを異なる入射角で撮影するとともに、現地調査を行い、現地写真等の地表面データを取得する。
- 大規模河川を対象として、Pi-SAR-L による観測を実施する。異なる入射角で撮影するとともに現地調査を行う。

【研究実施内容】

種子島現地調査
⇒水田状況調査

長良川現地調査
⇒河川水域測量

Pi-SAR-L による
撮像

Pi-SAR-L による
撮像

浸水範囲抽出の推定に最適な手法や撮像条件の検討

- 水田で取得したデータ、及び保有する過去のデータの振幅画像等を利用し、水域の変化を抽出して、模擬浸水域推定を行う。また、入射角毎に抽出した浸水域と現地調査データを照合し、浸水範囲抽出手法の定量的評価を行う。
- 大規模河川で取得したデータから川幅を抽出するとともに、砂州砂地等の地表面の識別を行う。

【研究成果】

入射角 40 度 HV または VH
3×3m 移動平均
水域判定：閾値-33dB
水域判定率－誤判定率 約 0.65
川幅判定：
平均誤差約 2.86m
標準偏差約 3.29m
RMS 誤差約 4.36m

浸水域抽出結果と現地データの照合により、入射角と浸水域抽出精度の依存性を分析し、最適な撮像条件を明らかにする。

- 入射角毎の抽出結果を比較し、浸水範囲抽出手法及び撮像条件について実用化に向けた課題を明確化する。

実用化に向けた課題：
水域抽出技術のさらなる精度向上
緊急観測時のデータ提供における所要時間の短縮

【平成 22 年度における検討】

浸水域情報抽出技術の開発

平成 21 年度調査結果をもとに、浸水域情報抽出技術をさらに詳細に検討し、各技術の精度について定量的に評価する

【研究実施内容】

各種フィルタ（スペックル雑音低減）
処理による精度向上の検討

【研究成果】

H21 年度長良川データによる定量評価結果
使用フィルタ：
2 ルック処理のフィルタ
後方散乱係数閾値：-25dB

河川の水域変化を把握する水害情報抽出技術の開発

大規模河川（長良川）を対象として、Pi-SAR-L による観測と現地調査を実施し、平成 21 年度に同地域を対象として実施した水域（川幅）抽出の結果と実験領域の DEM を利用し、浸水域変化の推定を行う。

【研究実施内容】

長良川現地調査（平面測量・現地状況調査）

Pi-SAR-L による撮像

河川の水域変化及び水位変化を把握する水害情報抽出技術の開発

実験水路で計画されている模擬水害実験に同期して、Pi-SAR-L により、実験水路周辺を観測する。さらに得られたデータを解析して浸水域を抽出するとともに、実験領域の現地観測データを用いて抽出情報を定量的に評価する。また、実験領域の DEM 及び現地測量データを用いた浸水域及び浸水深の変化分などの情報抽出についても検討する。

Pi-SAR-L による撮像
⇒ 水域変化に対応した時系列データの取得

帯広現地調査（平面測量・横断測量・水際線調査）

【研究成果】

長良川 8 月 3 日の結果
水域判定：閾値 -25dB
水域判定率－誤判定率 約 0.73
川幅判定：
最小平均誤差約 1.94m

帯広 8 月 4 日の結果
水域判定：閾値 -29～-30dB
水域判定率－誤判定率 約 0.82
水位変化：
誤差約 0.1～0.6m

情報提供における課題と対応策の検討

防災ユーザーへの情報提供までに要する時間、処理方式、提供情報形態等に関わる課題及び対応策を検討する。なお、研究期間中に水域抽出に関連する緊急災害が発生し、Pi-SAR-L が利用可能な場合は、観測及び被害情報の抽出を行い、具体的な事例として課題及び対応策を詳細に検討する。

【研究実施内容】

台風 9 号の上陸に同期し、Pi-SAR-L による緊急観測を実施

長良川現地調査（水位変化調査・現地状況調査）

【研究成果】

緊急観測時において、今年度導入した新機材を用い、従来の観測後のデータ処理に要する所要時間の短縮を実現
今後、観測準備に要する時間を短縮できるような設計を有する新型の航空機搭載合成開口レーダの開発に応用予定。

(3) 平成 21 年度

航空機 SAR による撮影技術の実証では、種子島南種子地区の水田と長良川鶴飼大橋上流の砂州周辺において入射角 30 度、40 度、50 度の異なる入射角で撮影して現地調査の結果と比較した。次に、浸水範囲抽出の推定に最適な撮像条件や手法を以下のように定量的に検討した。

SAR 画像の各ピクセルの輝度値 (DN) は、以下の式で後方散乱係数 σ^0 に変換可能である。

$$\sigma^0 = 10 \times \log_{10}\langle DN^2 \rangle - 74.11 \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここに $\langle \rangle$ は平均処理を表す。滑らかな水面では鏡面反射が卓越し、後方散乱係数 σ^0 は小さくなることが期待される。この特性を利用して本調査では、後方散乱係数が閾値以下のピクセルを水域と判定し、また閾値の違いによる精度の違いも検証することとした。評価は各閾値によって定義された水域・非水域と現地調査による水域・非水域の面積比で正解率と誤り率との差を判定率として評価する。

- ・ 正解率 = 現地調査の水域かつ SAR 画像でも水域となる面積 / 現地調査の水域面積
- ・ 誤り率 = 現地調査の非水域かつ SAR 画像の水域となる面積 / 現地調査の非水域面積
- ・ 判定率 = (正解率) - (誤り率)

なお、SAR 画像のざらつきを低減するため、原画像の他に以下の 4 種の簡単なフィルタ処理を施した画像と比較した。

- a) 1 pixel x 1 pixel (フィルタ無し)
- b) 3 m x 3 m (3 pixels x 3 pixels) 移動平均
- c) 3 m x 3 m (3 pixels x 3 pixels) 分散値
- d) 5 m x 5 m (5 pixels x 5 pixels) 移動平均
- e) 5 m x 5 m (5 pixels x 5 pixels) 分散値

Pi-SAR-L 観測時、航空機は高度 27,500ft を直線飛行する。観測ではオフナディア角 15 度 (ニアレンジ) から、地表面における観測幅 15km に相当するオフナディア角約 74 度 (ファーレンジ) のレンジ範囲内でデータを取得し、ターゲットへのオフナディア角を 30 度、40 度、50 度と変化させて三回の観測を行う。実際の観測では、送信ビームの照射方向は変化させず、ターゲットとなる箇所における入射角がほぼ所望の角度となるように航空機の飛行経路を平行移動させることでターゲットにおける入射角の変化を実現する。本観測における空間スケールでは地表面の曲率を考慮しても入射角はオフナディア角とほぼ近似できる。

i) 浸水範囲抽出の推定に最適な手法や撮像条件の検討

まず、種子島テストサイトにおいてそれぞれの入射角において抽出法と閾値の関連を調べた結果、どの入射角においても HH や VV よりも HV と VH が良い結果を示した。抽出法の比較では、HV または VH の 3 m x 3 m (3 pixels x 3 pixels) 移動平均の値による閾値-34 dB 前後という条件が最も良く、完全水域判定率が約 0.8、誤判定率が 0.2 以下となった。また、入射角依存性については、それぞれの入射角で最も良い結果を比較すると、入射角 40 度が最も精度がよく、誤判定率が約 0.15 であった。

ii) 川幅推定

次に、長良川テストサイトで水域判定率が最も良好であった入射角 40 度、3 x 3 m 移動平均 閾値 -26 dB による水域判定結果を用いて、現地調査の水域と重ね合わせると以下ようになる。砂州を挟む込む広めの川道（左岸：図の下側）と狭い川道（右岸：図の上側）があるが、砂州の左岸の広めの川道は水域判定と現地調査の水域はよく一致している。この内の 10 カ所を任意に選んで川幅推定を行った結果、この 10 カ所の川幅平均は約 38.12 m（現地調査）と約 35.26 m（航空機 SAR）、平均誤差は約 2.86 m（航空機 SAR が過小推定）、標準偏差約 3.29 m、RMS 誤差約 4.36 m であった。航空機 SAR のレンジ方向分解能が約 3 m であること、またこの砂州の水際には大小さまざまな石と水域が入り交じっており、現地調査でも水際の位置決めが厳密ではなかったことなどを考慮すると、ほぼ妥当な値であると思われる。

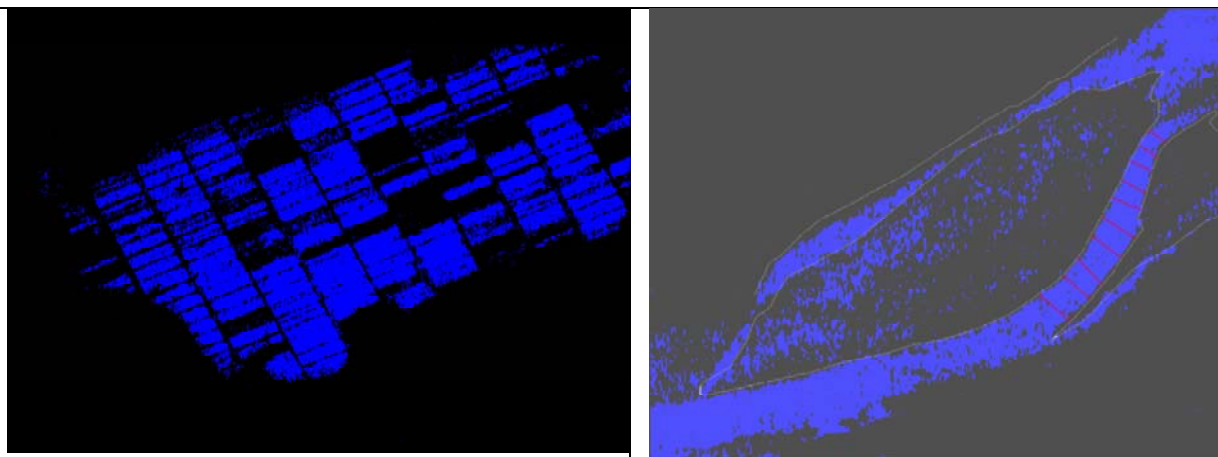


図 2 3m x 3 m (3 x 3 pixels)移動平均 閾値-34dB（左：種子島）と-26dB（右：長良川）

平成 22 年度へ向けた課題として、さらなる水域抽出精度向上と実際の災害発生を想定した緊急観測実証実験などがあげられる。

(4)平成 2 2 年度の成果

i) 航空機搭載 L 帯合成開口レーダによる水域抽出技術の検討

平成 2 1 年度の調査では、SAR 画像から水域の判読や抽出を行っているが、陸地であっても水面のように滑らかで平坦な表面を持っている場合など、水域と非水域とで地上のターゲットの散乱特性が類似しているケースもあることが明らかになっている。このような場合、SAR 画像における雑音（画像の濃淡のゆらぎ）が、わずかなものであっても水域の判別に影響を及ぼすことが懸念される。

SAR 画像の画素は、画素内のさまざまな散乱点からの散乱波が干渉し合っ観測されているためにスペckル雑音とよばれる特徴的な雑音が存在し、画像上では粒状のランダム的な濃淡のパターンとして現れる。スペckル雑音は SAR のようなコヒーレントな電磁波センサーであれば、センサーの性能や観測波長に関わらず必ず発生し、原理的に避けることができない。また、熱雑音などの加法性雑音とは異なりスペckル雑音は乗法性雑音であり、信号強度が強くても相対的に雑音が小さくなるわけではなく、信号強度に比例して雑音も大きくなる点にも注意を要する。

スペckル雑音の強度は統計的には指数分布をとるが、マルチルック（画像上でいくつかの画素の平均をとること）処理を行うと、N ルック処理であれば雑音の標準偏差を $1/\sqrt{N}$ に低減することができる。ただし画素数が $1/N$ に減ることから、分解能が低下する。

ii) マルチルック処理

スペckル雑音を低減する最も確実な方法はこのマルチルック処理であるが、ルック数を上げると空間分解能が低下することから、災害監視への応用においては好ましくない。分解能を最大限に保持し、かつ雑音を効果的に低減させるために、マルチルック処理のルック数は最小限（1~4 ルック程度）にし、必要に応じてさらにスペckル雑音低減フィルタを用いて雑音を低減することがよく行われる。

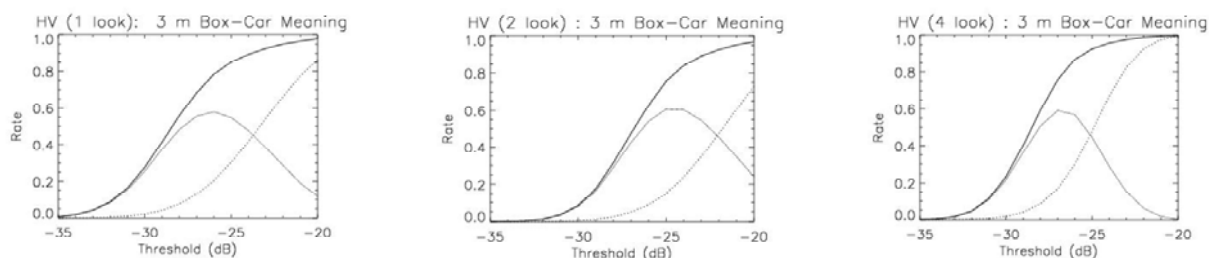


図 3 HV 偏波 1 ルック (左) と 2 ルック (中央) および 4 ルック (右) の 3m 移動平均による判定率 (細線)、太線：正解率、点線：誤り率

1 ルック処理の判定率は-26dB で約 0.57 であるのに対し、2 ルック処理では-25dB で約 0.62、4 ルック処理では-27dB で約 0.59 であることが分かる。今後は 2 ルック処理を基本とし、各種フィルタによる違いを評価する。

(5) スペックル雑音低減フィルタ

移動平均フィルタ (Box-car フィルタ) は最も単純な手法で、画像上のウィンドウ (対象となる画素を中心としてその周辺を含む小領域。通常 3×3 ピクセルなど正方形の窓をとる) での移動平均をとる。平成 21 年度はこの移動平均フィルタを用いた。

平成 22 年度は、さらに三種類のフィルタを用いて評価するが、ここではそれぞれフィルタ A,B,C とする。

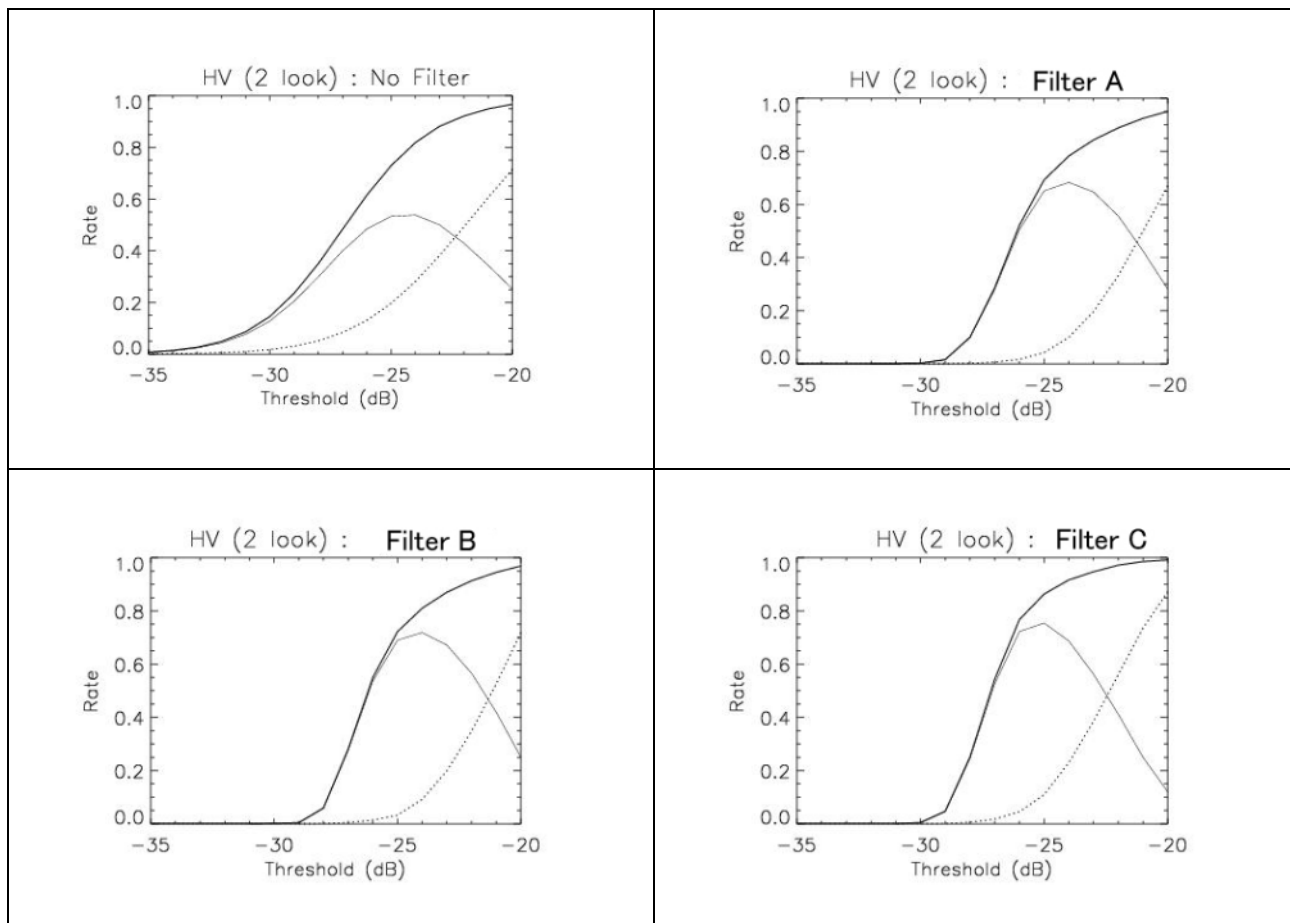


図 4 HV 偏波 2 ルックのフィルタ無し画像 (左上)、フィルタ A (右上)、フィルタ B (左下)、フィルタ C (右下) の判定率 (細線) 太線 : 正解率、点線 : 誤り率

各種フィルタの判定率では、フィルタ C が -25dB にて判定率約 0.75、フィルタ B は -24dB にて判定率約 0.72、フィルタ A は -24dB にて約 0.68、フィルタ無しでは -24dB にて約 0.53 である。移動平均 (Box-car) は -25dB で約 0.62 であったが、各種フィルタと比較するとその判定率は全て良好で、ここではフィルタ C を用いた閾値 -25dB による水域判定が最も良い結果となった。

(6)河川の水域変化を把握する水害情報抽出技術の開発

平成21年度委託研究において、平成22年2月24日に調査を行った岐阜県長良川の「鵜飼大橋」上流域を調査対象とした。平成21年度委託研究の成果より、最も良好な抽出結果であった調査対象への入射角40度となる経路にて飛行し、平成22年8月3日（火）データ取得を行った。各種フィルタの判定率では、フィルタCが-25dBにて判定率約0.73、フィルタBは-24dBにて判定率約0.70、フィルタAは-24dBにて約0.65、フィルタ無しは-25dBで約0.57である。

ここでもフィルタCを用いた閾値-25dBによる水域判定が最も良い結果となった。

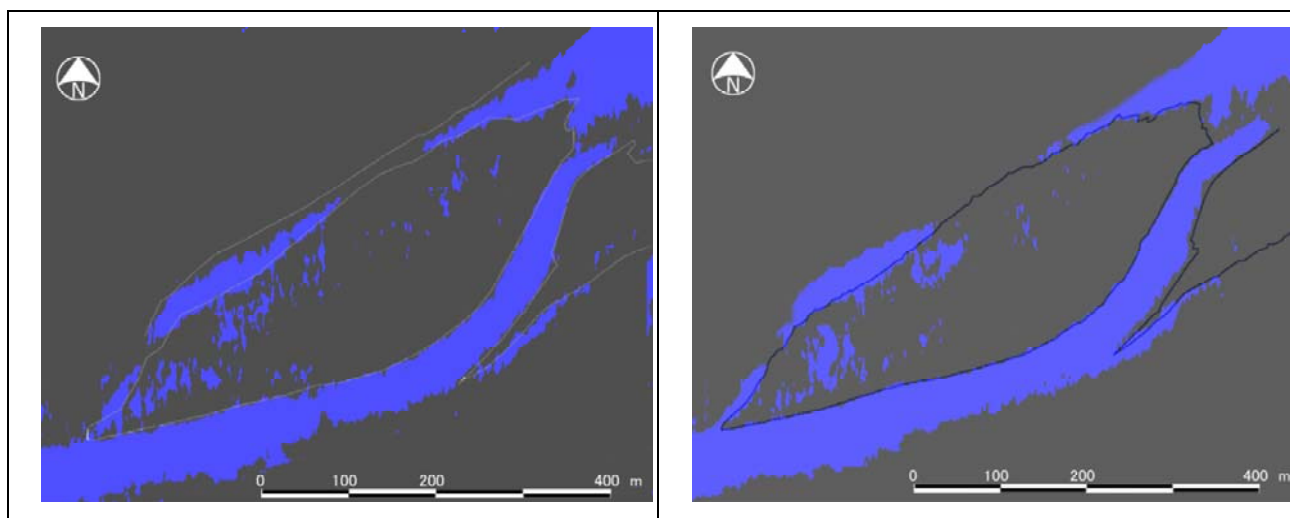


図5 HV偏波2ルックのフィルタC閾値-25dBによる水域（青色）と現地調査による境界線（左：平成22年2月24日、右：平成22年8月3日）

平成21年度とほぼ同じ区間で、10箇所について任意に選んで川幅推定を行った結果、この10箇所の川幅平均は、約39.95m（現地調査）に対し、閾値が大きいほど誤差は小さくなり、-24dBにおいては約38.0m（Pi-SAR-L）、平均誤差は約2m（Pi-SAR-Lが過小評価）であった。（平成21年度においては、平均誤差は、約2.86m）

(7)河川の水域変化及び水位変化を把握する水害情報抽出技術の開発

模擬水害（破堤）実験を実施する北海道開発局帯広開発建設部管理の千代田実験水路を観測対象とし、入射角40度となる飛行経路を飛ぶものとする。

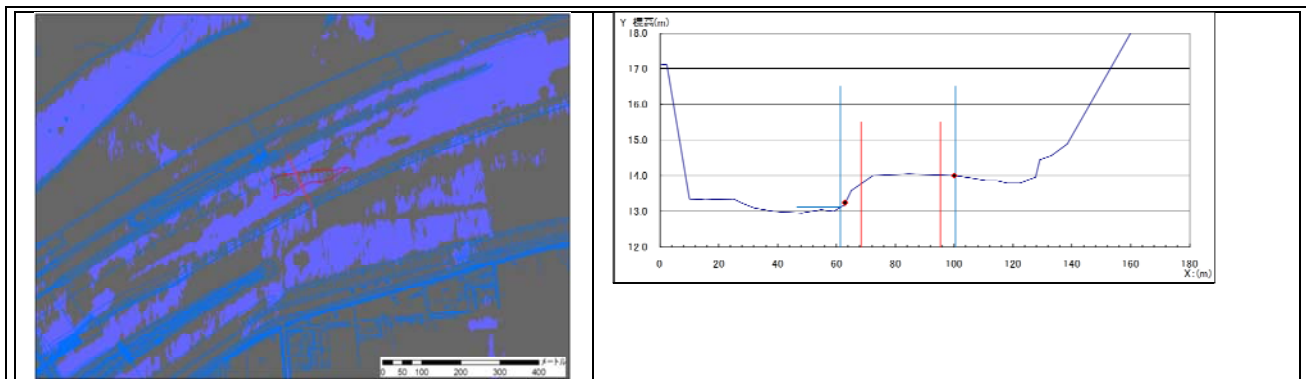


図 6 左図：HV 偏波 / 2 ルック / フィルタ B / 閾値 -30dB による水域（青色）と現地調査による砂州の境界線（赤線）と横断測線 BA 上における平面測量結果による水際位置（平成 22 年 8 月 3 日）。

横断測線（左図赤直線）上における平面測量結果による水際位置を赤点で示すとともに、航空機 SAR 画像から得られた水際位置を赤線（EW パス）、青線（NS パス）で示した。今回の撮影画像では水計測域が急勾配な地形変化のない地域であったことから、誤差は最大で 60cm 程度と比較的小さいものであった。

(8) 台風増水時の実証実験と浸水情報提供における課題と対応策の検討

津波や洪水等の浸水を伴う災害発生時に緊急災害観測を実施する場合、情報提供における課題としては、(1) 航空機観測の飛行許可申請と準備に要する時間の短縮、(2) 観測後の迅速なデータ処理と情報提供、である。(1) では、現在の Pi-SAR-L では機内搭載に丸 1 日近くを要するが、平成 23 年度末に完成予定の新型 (Pi-SAR-L2) では機内設置の簡略化が計られた設計を検討している。緊急観測の実証事例として、平成 22 年 9 月 8 日 (水) に中部地方を通過した台風 9 号による長良川の増水について観測を実施した。

平成 22 年 9 月 2 日に発生した熱帯低気圧は 4 日に台風 9 号へと発達し、東シナ海を北上した。台風 9 号は 9 月 8 日 (水) 午前には福井県付近に上陸し、温帯低気圧へと勢力は落としたものの強い雨雲を伴いながら岐阜県中部を横断した。調査対象地近傍の岐阜県地方気象台の記録によると、9/8 は午前中を中心にまとまった降雨があり、11 時頃より日野揚排水機場水位観測所 (55km) および長良水位観測所 (53km) の長良川水位も 11 時頃より急激に上昇し 13~14 時頃最高水位に達したのち、緩やかに水位低下がみられた。

現地調査班の長良川鵜飼大橋上流の状況を確認しながら、中心付近の雨雲が通過した直後の 14 時に名古屋空港を離陸して観測を行った。8 月 3 日の長良川観測と同様に、長良川鵜飼大橋上流付近が入射角 40 度となる経路を飛行し、機内に持参したノート PC によってデータ処理を行い、前述した手法を用いて観測から 1 時間程度で長良川鵜飼大橋上流の水域を抽出した。この結果は航空機 SAR 観測と本研究にて開発した手法が水害時における浸水域抽出に有効であることを実証したものとえよう。

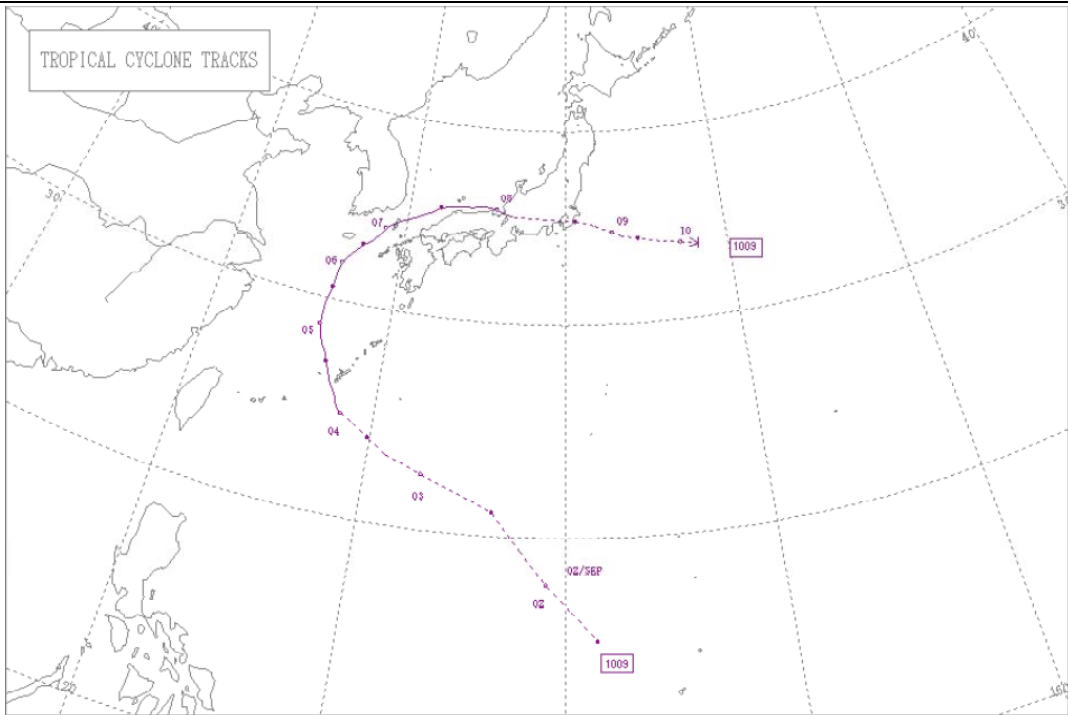


図 7 台風 9 号 (T1009: MALOU) 経路図 (気象庁ホームページより)

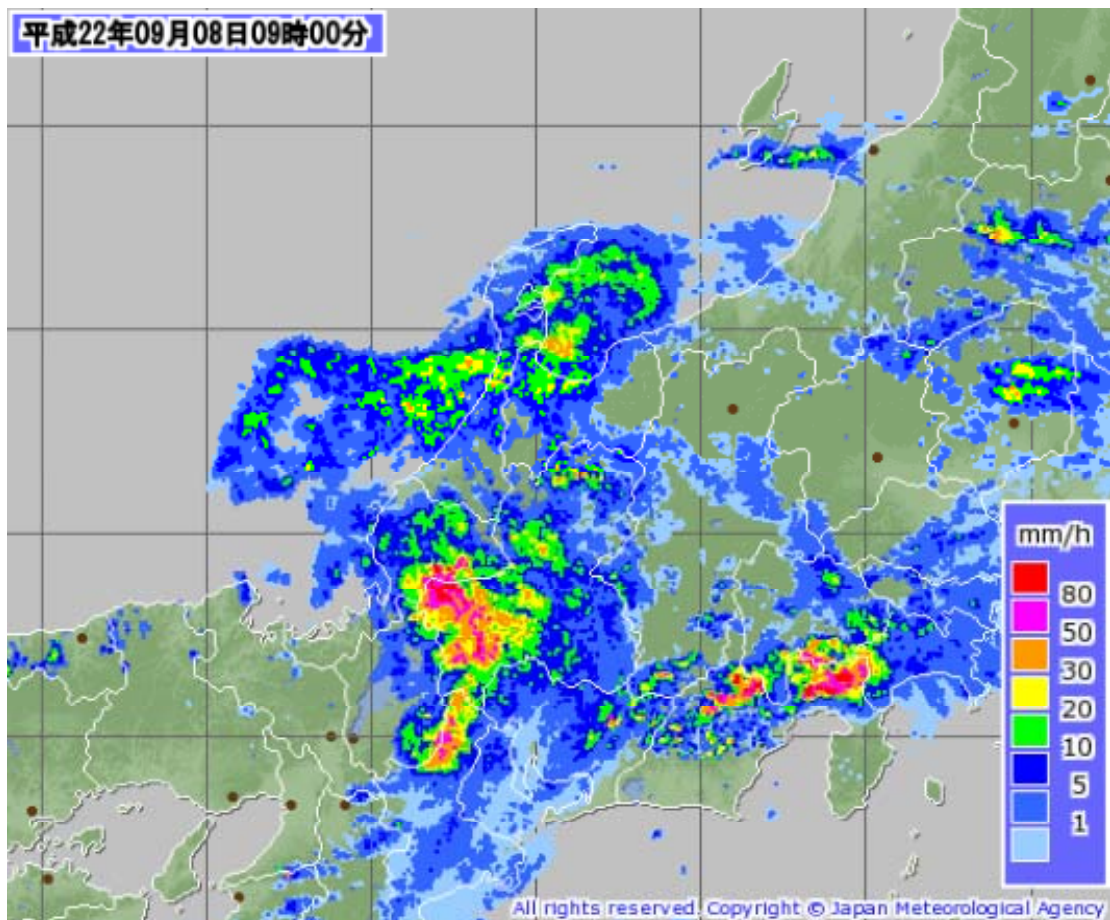


図 8 レーダー・アメダス雨量合成図 (平成 2 2 年 9 月 8 日 9 時 : 気象庁 HP より)

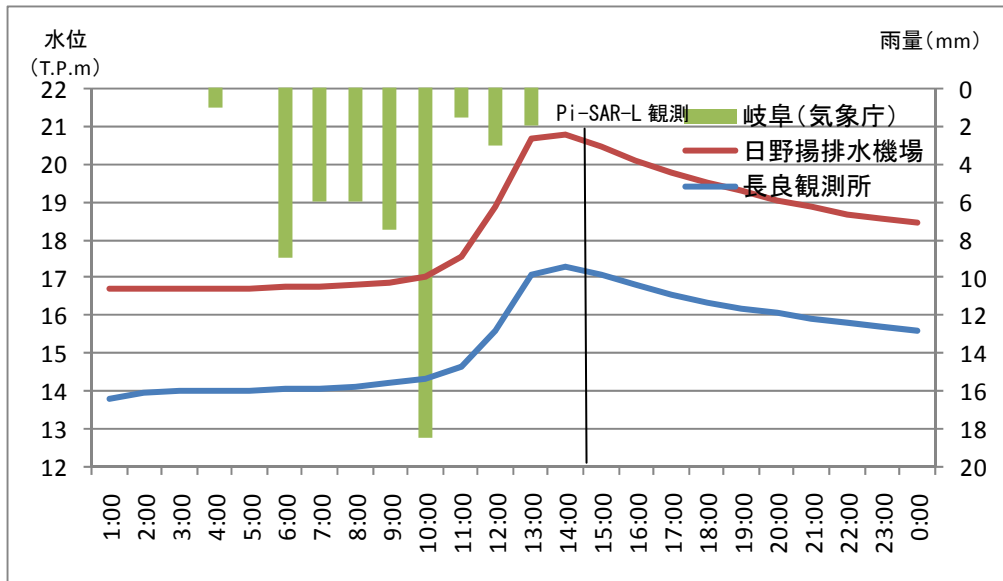


図 9 長良川水位（日野揚排水機場・長良）変化と降水量（岐阜（気象庁））



図 10 長良川鵜飼大橋と上流の砂州の全景写真：平成 22 年 8 月 3 日（左）と 9 月 8 日 15 時頃（右）（金華山より東方を望む。写真左側が北となる）

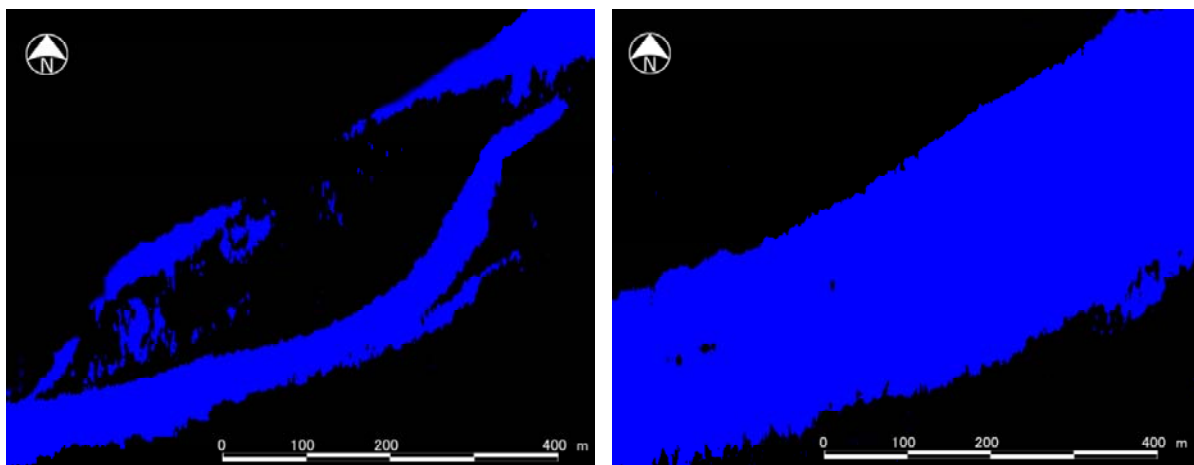


図 11 平成 22 年 8 月 3 日（左）、9 月 8 日 14 時 35 分頃（右）長良川鵜飼大橋上流の砂州付近：青域は 2look/HV/フィルタ C/-25dB により定義された水域

(9)まとめ

平成21年度・平成22年度にわたり、航空機搭載 L 帯合成開口レーダ (Pi-SAR-L) を用いた浸水域、浸水深を推定する技術開発を実施し、種子島、長良川、帯広のテストサイトで、Pi-SAR-L データ、地上データを取得し、それらを複合的に解析した結果、以下の結論を得ることができた。

1) 電波的に“暗い”水で覆われた浸水域をそれ以外の場所と区別する(水域抽出)には、信号対雑音比(SN)条件の良好な入射角40度近辺で水平偏波送信-垂直偏波受信(HV偏波)のPi-SAR-L信号を用いて行うのが最も抽出精度が高い(誤判定率が小さい)ことがわかり、長良川の実験サイトでは1.95mの平均位置誤差、判定率約0.73を計測した。浸水域抽出にはSAR画像の二値化が必要であり、その為にフィルタ適用と閾値の設定が重要であることが本研究の結果、確認された。閾値については-25~30dBが最適であるが、水面や地表面の状態により異なる値を持ち、マニュアルでの設定が必要となる。

2) 浸水深の算出には、非浸水時の高精度標高データが必要である。長良川テストサイトでは、国土地理院取得の5m DEMと2.5m LPのデータが用意されており、それらを用いて計測することができた。手法は、1)水際線を画像から抽出し、つぎに2)DEMを用いて深さに変換することであり、浸水域の特定同様にその精度は閾値に左右される。帯広サイトの計測域では急勾配の地形変化が無かったことから浸水深の推定誤差は最大で60cm程度と比較的小さいものである。

3) 本技術研究において開発された水域抽出手法、及び合成開口レーダによる水域観測は、平成22年9月8日台風9号に伴う大雨増水時の観測において、その実用性は実証された。Pi-SAR-Lは搭載している航空機の高速度飛行性能、高高度での飛行(8km~12km)が可能なこと、高分解能性(現状は2.5m)、観測幅が15kmと広いこと、繰り返し飛行や多方位観測が可能なことなどの長所を備えており、悪天候下での飛行と観測の実施、将来的な機器の改修(機能付加、分解能向上、機上での画像化)、短時間での画像解析等が期待されることから、水害域抽出に衛星SAR同様に水域抽出が期待される。

⑧今後の課題・展望

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大津波は広域にわたり甚大なる被害を与えたが、発生直後に日没を迎えたことからその詳細な浸水状況の把握は翌朝以降となった。水害等による浸水状況の把握は特に発災直後に迅速に行うことが求められるが、平成22年9月8日台風9号による長良川増水時のPi-SAR-L観測では、その最高水位に達した直後に観測を実施し、速やかに長良川の増水状況の把握に成功したことで、航空機搭載合成開口レーダの災害情報把握に対する実用性は実証されたものと考えられる。今後は発災時に速やかに被災状況を把握出来るよう、合成開口レーダを常時搭載した航空機を常備して日頃より災害発生に備えることが重要であると考えられる。