

JERS-1 SAR 画像解析によるメコンデルタの 洪水リスク評価

春 山 成 子* 志 田 健**

Flood Risk Evaluation of the Mekong River Delta Utilizing JERS-1 SAR Images

Shigeko HARUYAMA * and Ken SHIDA **

Abstract

The Mekong delta is experiencing flood damage at a time when the population is growing and farmland is expanding. Because the Mekong River Delta is one of the important grain belts in Vietnam, planning disaster mitigation is government policy. The purposes of this study are to present a method of visualizing flooded areas, classify geomorphology, and make flood risk map using JERS-1 SAR of the Mekong River Delta. JERS 1 SAR data, including geo-reference, noise reduction, re-sampling, and calculation of Normalized Radar Cross Section (NRCS), were processed by TNTmips. The flooded area in the Mekong River Delta is visualized and flood dynamics are discussed. The relation between NRCS and micro-geomorphology was clarified by a field investigation and a geomorphologic land classification map is presented. After evaluating flood risk in four levels, a flood risk map was created by visualizing the evaluation. Differences between NRCS of JERS 1 SAR before and after a flood are calculated, and the flooded area is visualized for differences lower than -1.8 (dB). This value (-1.8 dB) was defined by a field investigation. Flooded area maps for 1995, 1997, and 1998 were created. The relation between NRCS and geomorphology was clarified by field investigations, and a detailed geomorphologic map in the Mekong delta was created with reference to the geomorphologic land classification map.

Key words : Mekong Delta, flood risk, SAR, geomorphologic land classification map

キーワード : メコンデルタ, 洪水リスク, SAR, 地形分類図

I. はじめに

東南アジアの大陸部では、最近 20 年間、急速に進んだ産業構造の変化によって河川流域では急激な変貌を示している。この結果生じた河川流域

の土地被覆変化は、近年、河川の中・下流地域において洪水災害の質的な変容をきたしている（春山, 2004）。農業地域での洪水の軽減を図るには、排水機能を強化させること、都市域においては人工堤防を建設し、放水路を掘削することで洪水流

* 東京大学大学院新領域創成科学研究

** 富士通

* Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo

** Fujitsu Co.Ltd.

を迅速に流下させること、また、集水地域からの流出を一時貯留させるためにダムなどの治水インフラ整備が必要であるが、メコンデルタのように湛水期間が長期化し、洪水氾濫地域が広域にわたる地域では氾濫水を農業用水源、または、氾濫域を養殖池に転用して氾濫水を活用する視点も必要である。河川流域のもつ自然環境特性を生かし、社会との共生空間を創造していくため、当該地域では総合的な流域管理計画と防災計画策定の策定は重要課題である（春山, 2001; Mekong River Commission, 2002a, b, c, d）。

メコン川流域では農業開発を支えるための水資源利用計画をめぐって「開発と環境保全」、「持続的な農業生産」は重要な課題であった（堀, 1996）。しかし、国際河川であるためにメコン川流域が抱える社会的環境は複雑であり、流域内での開発状況は不均衡である。上流から下流地域までの流域内6か国の経済ステージは異なり、流域管理手法・考え方の認識の相違から流域規模での総合的流域管理計画の立案には困難があった。メコン川流域の中では最上流部に位置する中国、すなわち、集水地域での開発圧力が下流地域に比べて大きい。中国内陸部の雲南省では、近年、相次いで水力発電用ダム（2001年にダシャオシャンドム 1350MW, 1993年にマンワンダム 1500MW）が建設されており、さらに2010年に向けて新規のダム建設計画が予定されている。中国国内におけるメコン川は本川河道にそって並ぶ盆地部の氾濫原に都市が市街地を拡大させ、山地斜面では森林伐採が進み耕地に変貌しており、土地利用変化は顕著である。このように、河川の上流地域で土地資源・水資源開発が先行する、一方、流域寄与率の大きい内陸国のラオスでは焼畑農耕地域が緩やかに拡大しているものの森林面積の減少率は低く、土地利用変化は少ない。しかし、ヴィエンチャン平原南部を流れるメコン川中流部では本川河道の左岸側で河岸侵食による農地欠損、首都ヴィエンチャンの都市基盤に損失をもたらしている。

タイ東北部に位置するコラート高原ではメコン川支流ナム・チー川流域に展開する氾濫原とこれ

に続く侵食段丘では、ラオスからの移民の流入が13世紀以降に断続的に続き、森林が耕地に開発されてきた歴史がある（石井・桜井, 1990）。しかし、20世紀にはいつてからの耕地拡大は当該地域における水条件・土地条件には不適合であり、土地条件で可能な開発許容力を越えた開発がおこなわれたことで耕地での塩類化をきたした。トンレサップ湖岸低地のリセッションライス生産では洪水氾濫は水資源であるが、洪水長期化は農業障害の要因となる。歴史的な洪水となった2000年の洪水を事例にあげると、カンボジア領内メコンデルタでの湛水期間は1996年洪水より2週間長期化し、トンレサップ湖岸とベトナム領内で農業生産が減産した（志田・春山, 2004）。洪水被害を軽減するために最下流国のベトナムではカンボジア国境近くに洪水防御施設（堤防と可動ラバーダム）を建設しており、カンボジア領内メコンデルタの洪水氾濫特性への影響も大きい（Le. *et al.*, 2005）。

メコンデルタでの減災計画には、災害予知から災害復旧までの各階梯を勘案し、1）流域内に的確な洪水予知ができるようにすること、また、洪水予警報をスムーズに行うための災害ネットワークを策定して洪水情報を共有できるようにすること、2）流域住民に向けた速やかな洪水情報の伝達、および、洪水メカニズムの知識の住民への理解、おのおのの地域の持つ地域固有の防災技術を尊重して定着させること、3）洪水発生時における、迅速な救援活動と避難場所への誘導、避難行動支援体制の樹立、4）洪水地域での人命救助と医療活動支援体制、5）洪水後においては災害復興計画および復旧計画をたてるためのサポート体制の強化、これらに加えて、6）当該地域での産業特性を考え、洪水氾濫水を有限な水資源に転用する洪水のポジティブな側面に視点をおいた農業政策への転換、7）長期湛水地域での農業・水産業分野を交えた地域特性を生かした最適な土地利用計画への誘導、8）総合的な流域全体を見通した減災手法を開発することなどが求められている。総合的な流域管理を考えるためにハザードマップの作成、流域住民への知識伝達と利用普及

が望まれている。

II. メコン川の自然概要

メコン川はチベット高原東部に位置する高度 4000 m のタンラ山脈 (4968 m) に水源をもつ全長 4200 km の河川である。上流地域の中国南部でのメコン川は構造線を直線的に流下するが、ミャンマーとラオスとの国境地帯を南下すると、タイ東北部で流向を東西方向に変更して、ヴィエンチャン平原とコラート高原の境界地域を流下する。コラート高原ではナム川、チー川などの支流を合流させ、さらに、下流地域ではトンレサップ湖からのトンレサップ川水系をあわせるためカンボジア中央部でメコン本川は流量を増大するものの、ベトナム領内にはいると河川が分派するため本川河道流量は減少して東シナ海に流入する (図 1)。

メコン川の総流域面積は 7,955,000 km²、年間総流出量は 4,410 億 m³ である。メコンデルタでの既往最大洪水であった 1978 年洪水での最大洪水量はパクセ (Pakse) 基準点で 57600 m³/s を記録しているが、同一地点での最小流量は 12500 m³/s である。水源地域であるチベット高原には水河があり、その融雪水が河川を涵養するため、モンスーンの影響を受けるメコン川ではあるが安定的な基底流量を保っている。パクセ基準点での最近 40 年間での洪水流量の出現を見ると、1978 年洪水流量は 188 年確率、2000 年洪水の流量は 47604 m³/s で 12 年確率と計算できる (表 1, 図 2)。モンスーン期の河川流量は大きく変化し、河川水位の上昇幅も大きい、その変化は日本の河川と比べて緩やかである。上流地域のラオス・ルアンプランバン地点では河川水位が上昇する 5 月から最高水位を迎える 9 月までの水位上昇幅は 13 m、中流パクセ基準点では 6 月から最高水位を示す 9 月中旬までの上昇幅は 11 m、下流プノンペン地点では水位が 7 月に急激に上昇に転じて 10 月中旬には最高水位をむかえるが水位上昇幅は 5 m であり、ベトナム領内チャウドック地点でも同様な数値変化を示している。洪水ピークが下流に伝播する時間は、



図 1 メコンデルタの概要。

Fig. 1 Outline of Mekong River Delta.

ヴィエンチャンからプノンペンまでの 230 km で 10 日が平均である (Mekong River Commission, 1996)。ベトナム領内のメコンデルタ最下流地域では河道が分岐し、感潮域が広く河川水位が干満の影響が反映されるため洪水伝達ピークの伝播速度の識別は困難である。

III. 既往研究と本研究の目的

ベトナム領メコンデルタの水田面積は、2062.7 千 ha で水田利用率 76.3%, 米 (粳重量) の生産量は 67.5 万 t/年、単位当たり米収量は 4 t/ha とベトナムの穀倉地帯である。農業地域では蔬菜・果樹も栽培されているが稲作に特化している。メコンデルタでの農業形態は氾濫原の微地形に適応しており、後背湿地では洪水稲作、自然堤防および砂丘・砂州には集落・蔬菜畑・果樹畑が展開している。このような典型的なデルタ景観は土地生

表 1 パクセでのメコン川の年最大流量.

Table 1 Maximum Discharge of Mekong River at Pakse

年	流量	リターンビリオド	大順
1978	57600	188.8	1
2000	47604	12.1	2
1984	45500	6.3	3
1961	44700	4.9	
1997	41847	1.9	
1995	37827	0.4	

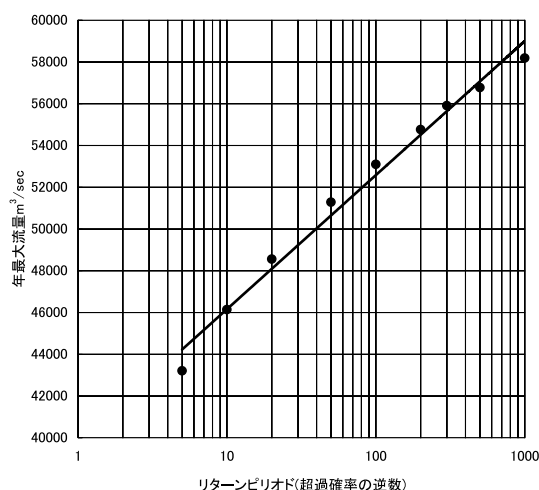


図 2 パクセでの最大洪水のリターンビリオド (Mekong River Hydrological Year Book (1960–1997 年) からメコン川本流のパクセ地点の年最大流量を計算した。2000 年についてはメコン川委員会の未公表資料を利用した)。

Fig. 2 Return Period of Maximum Discharge of Flood at Pakse (The Maximum Discharge was calculated from data in “Mekong River Hydrological Year Book” published by MRC. The Maximum Discharge of the 2000 flood was provided by Mekong River Committee).

産性を向上させるために、後背湿地では二期作、二期作+畑作が普及しつつある。稲作景観は地形要素から雨期の湛水深度が異なることを反映させて、稲作の作付け形態は一期作、二期作、三期作、稲作+蔬菜複合、稲作+養殖複合の5つの農業形態のパターンがあり、洪水氾濫の開始時期、

終了時期の違いは水稻耕作の作付暦にも影響を与えている (春山・志田, 2005)。

ベトナム領内メコンデルタの北部にあるドンタップ省は洪水稲作地域 (2 m 以上の湛水域) であり、洪水氾濫特性からすれば雨期一期作が好ましいが、近年、2 期作を志向し、洪水制御可能な地域では3 期作が導入された。メコンデルタで大きな被害をもたらした 1996 年の洪水後、ベトナム政府はメコンデルタを稲作重点地域に認定し、洪水被害軽減にむけ、道路脇に 50 cm のコンクリート壁を敷設し湛水期稲作の保護を開始し、農業省は雨期の降水および洪水状況をテレビ放映で各農家に周知する一方、稲の早期収穫を指導し生産性の安全性を図っている。しかし、メコンデルタの主要都市であるミト、カントー、ヴィンロンでは都市近郊の稲作農業地域が宅地・工業用地に変化し、土地利用が変化している。かつては「洪水共生空間」であった稲作地域が複合農業を志向し、農業が集約化したため、メコン川の長期溢流氾濫は農業被害、都市水害を併発し、新たな防災計画が望まれている (春山・志田, 2005)。

本研究では、湿潤熱帯地域における洪水動態を空間的に把握し、メコンデルタの微地形とどのような関係があるのかを明らかにするため、マイクロ波を観測手段として用いる合成開口レーダーを洪水氾濫解析の手段として使用した。一年間を通して降雨日数が多く、被雲率が高いモンスーンアジア、熱帯地域・亜熱帯地域での氾濫モニタリングには光学センサーより全天候型である合成開口レーダーが適している。ヨーロッパでは 1991 年に ERS 1 SAR が打ち上げられ熱帯雨林地域での植生、地質、土地利用の探査目的として観測が行われた。日本でも災害監視を目的とした JERS-1 SAR は 1992 年に打ち上げられたが、1998 年に運用を中止している。

JERS-1 SAR の空間分解能は 18 m であるが、東南アジア大陸部の河成海岸平野では地形起伏が乏しく、洪水氾濫期間が3 ヶ月近くにも達し、平野全域に氾濫地域が広域にわたるため、デルタ全域を視野にいたした洪水氾濫モニタリングにはこの解像度が適当である。JERS-1 SAR は能動的

なセンサーを搭載しているため太陽光を必要とせず、季節・昼夜・時間を問わずに安定した観測ができるという利点もあり、運用を終了してはいるものの、1992年以降1998年までに取得できた画像は湿潤熱帯地域の定常的な洪水氾濫解析には貴重なデータである。さらに、雨期が長く、雲に被覆される期間が長いメコンデルタのような地域での研究には、可視／近赤外領域の光学センサーと比べて合成開口レーダーに優位性がある。(飯坂監修日本写真測量学会編, 1998; 資源・環境観測解析センター, 1999)。

合成開口レーダー利用が可能になると Brakenridge (1998) は ERS-1 SAR に地盤高を入力して洪水位を求め洪水波の動態を導き出す方法を提案した。越智ほか (1991) は、光学センサー NOAA-AVHRR 画像を用いてバングラデッシュの雨期の湛水域を抽出し、SAR 画像から洪水域抽出が可能であることを示した。湛水地域を認定するためには、マイクロ波リモートセンシングを用いた後方散乱係数を用いることが有効であるとしている。Nico *et al.* (2000) は ERS 1 SAR データを用いて、洪水前と洪水後に後方散乱係数が異なることを利用して洪水湛水域を抽出した。Benie *et al.* (1998) は合成開口レーダーを使用して、地表面の形態が画像上に示される特有の色調・キメなどどのような関係があるのかを明らかにした。さらに、Dwivedi *et al.* (1999), Bourgeau-Chavez *et al.* (2001) は経年湿地、湛水地域が残存する低地部での湛水地域が土地条件に応答することから土地被覆項目別の後方散乱係数を求めた。また、Conway (1997) はパプアニューギニアの熱帯雨林での植生変化を抽出するのに合成開口レーダーが有用であることを明らかにした。また、Wu *et al.* (2001) は L バンド SAR, C バンド SAR を利用して湿地植生分類手法を確立させた。しかしながら、水田および湿地が複合する河成海岸平野での氾濫域解析は確立されていない。

そこで、本研究ではメコンデルタの地形分類図を作成し地形特性を明らかにし、衛星リモートセンシングを用いて当該地域の氾濫原の微地形が洪水動態に与える影響を評価することを目的とす

る。ここで扱う洪水の規模はメコンデルタの平均的な洪水流量を対象としている。デルタの微地形から洪水動態を評価することは地球温暖化にかかわって進行する海面上昇を想定した場合の洪水脆弱性を解釈するための一助ともなる。また、メコンデルタでは溢流氾濫水は氾濫原での稲作農業用水源でもあり洪水動態のモニタリングは水資源運用の基礎資料となりうる。

IV. 研究手法について

本研究ではベトナム領内のメコンデルタを研究対象地域として、リモートセンシングデータ解析により氾濫域を抽出し、メコンデルタの微地形との関係を見出し、洪水リスクの評価を行う。洪水との関係については、パクセ基準点を流量基準点として、最近 40 年間の流量変動から平均的洪水を発現させた洪水を抽出し、1995 年と 1997 年の洪水ステージを明らかにし、画像解析から雨期の洪水氾濫域を抽出し、旱魃年となった 1998 年の氾濫域との比較を踏まえて洪水氾濫リスクを考察することにした(図 3)。画像解析から地形分類予察図を作成したのち、2000 年、2001 年及び 2002 年の乾期に簡易測量を含めた地形調査を行い、メコンデルタ地形分類図を作成した。現地では農業省の下部組織を訪問して洪水被害の聞き取り調査を行い、既往洪水の微地形が洪水動態に与える影響を評価した。研究を進めるに当たり、複数の JERS-1 SAR 画像データから後方散乱係数を計算して、デルタを湛水域・否湛水域に分類し、洪水氾濫の時系列変化を再現し、差画像から氾濫域の乾期・雨期からメコンデルタの微地形と洪水との対応を抽出した。研究の全体的な流れは図 4 に示した。

1) 使用した JERS-1 SAR データと地形データ

本研究で用いた JERS-1 SAR は図 5 に示した。画像は打ち上げから運用終了時までの JERS-1 SAR 画像データを収集した。この際、ノイズの大きな画像は排除した。また、ベトナム地理局作成 (MapInfo 形式) の省別 1 万分の 1 スケールの数値地図 (標高データは 500 m 間隔、精度 0.1 m) のデータを TNTmips (Microimage 社) に地点空

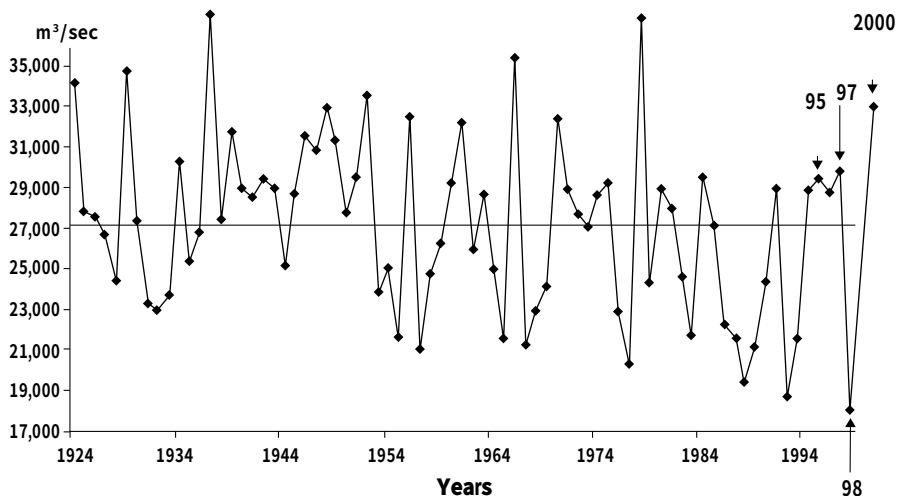


図 3 パクセにおけるメコン川の平均流量変化 (Sokleang, N. (2000): Mekong River Flow Data Analysis に 2000 年のデータをメコン川委員会の未公表資料から追補した)。

Fig. 3 Variations in Average Flow of Mekong River at Pakse (Variations in average flow were from data by Sokleang, N. (2000): Mekong River Flow Data Analysis and average flow of 2000 flood provided by Mekong River Commission).

間データとして位置・標高を入力し、TIN (Triangle Irregular Node) に変換し、インバース法で補完して空間情報データとし、TNTmips を用いて JERS-1 SAR 画像に重ね合わせてベースマップとして使用した。

2) JERS-1 SAR データの前処理

JERS-1 SAR データの前処理は次に示す手順で行った。1) データ入力：CD-ROM 形式の JERS-1 SAR データ (Logical Format: CEOS-BSQ, Processing Level: 2.1) を TNTmips に入力した。以下に説明する SAR 画像前処理は TNTmips を使用している。2) スペックルノイズの除去：SAR 画像に表れるセルごとの濃度の揺らぎについては、これを除去するためにリーフィルターを用いた。フィルタサイズは幅の狭い灌漑水路の消失をふせぐことができること、フィルタ効果が極めて弱く乱れた画像とならないように考慮した最適値としてピクセル数は 5×5 ピクセルを用いた。3) 幾何補正：フィルタ処理を施した画像には 1 シーンに地上基準点を 1 万分

の 1 数値地図 (MapInfo 形式でベクター形式) に合わせて 20 点確保して、幾何補正した。同一地点を撮影した SAR 画像で最もコントラストが明瞭で地上基準点を確保しやすい画像を参照画像として幾何補正に用いた。幾何学的誤差は SAR の空間分解能である 12.5 m 以下になるようにした。4) 規格化後方散乱断面積 (NRCS: Normalized Radar Cross Section, 後方散乱係数 σ^0 と呼ぶ)：SAR データを処理設備の特性とは無関係なものに変換するために規格化後方散乱断面積に変換した。ここでは Shimada and Isoguchi (2002) の下記の変換式を用いた。

$$NRCS = 20 \log_{10} I + CF [dB]$$

I：SAR 標準処理成果物 (レベル 2.1：Amplitude 表現) に含まれるピクセルのカウント値 (DN: Digital Number), CF：変換係数である。本研究で用いたデータは 2000 年 4 月以降に処理されているので、CF は -85.34 を用いた。

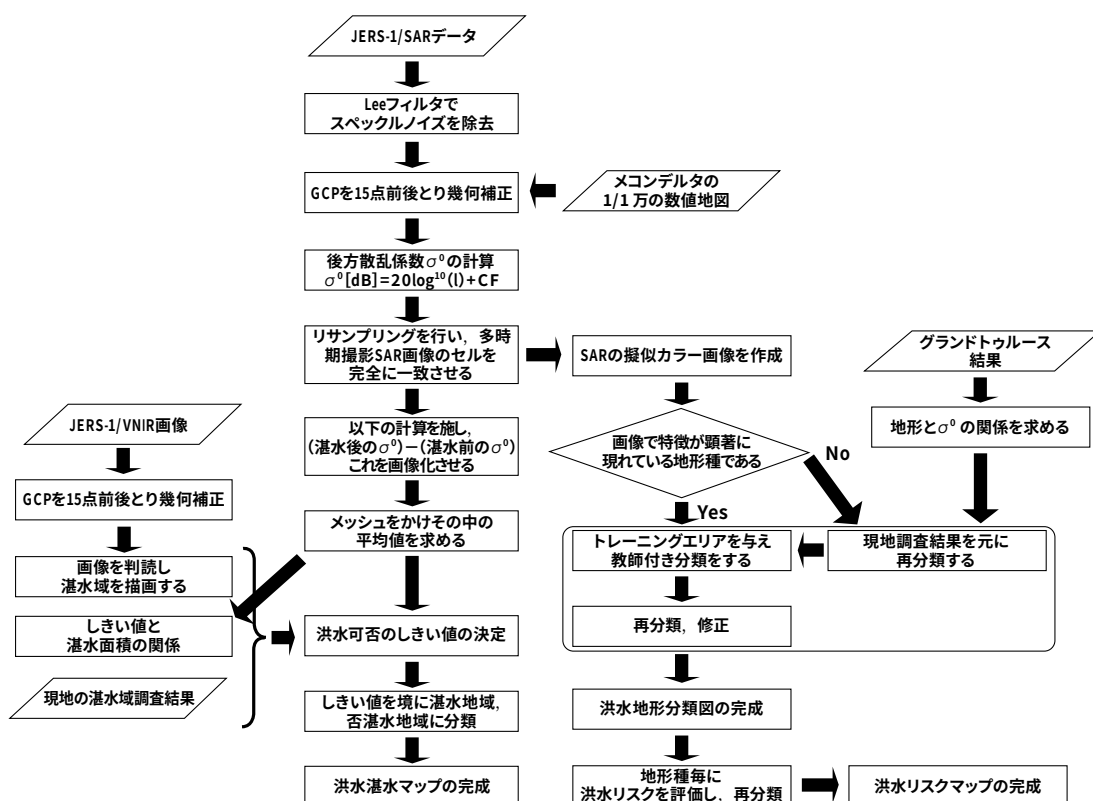


図 4 研究のフローチャート.

Fig. 4 Study Flow Chart.

JERS-1 SAR 画像の各セルに上記の変換を施し、画像化させた。5) リサンプリング：多時期撮影 SAR 画像の各セルを一致させるために、幾何補正済みの画像のリサンプリングにセル配置を参照画像と照合して変換し、同一地点画を幾何補正するとともにセル (NRCS を表すピクセル) を一致させ、Nearest Neighbor 法を用いて内挿処理してリサンプリングした。その結果はメコンデルタの JERS-1 SAR 画像擬似カラー合成画像に示した。画像の RGB にはノイズのない画像として、R：1998 年 3 月 28 日、G：1998 年 5 月 11 日、B：1998 年 9 月 20 日の各 JERS 1 SAR 画像に当てはめて処理した。

メコンデルタで洪水氾濫地域を抽出するために Nico *et al.* (2000) の方法を用い、湛水地

域の NRCS がどのように時系列的変化をするのかに着目した。河川および池沼などのような常時水面地域は洪水でも影響を受けないため NRCS が変化しない。そこで、氾濫原を対象に湛水前後の NRCS 変化量を計算し、変化量が閾値を越えた時の湛水域を抽出することにした。また、水面 (河川、水路、養殖池、永年湿地) を除き洪水氾濫地域と内水氾濫地域、潮汐洪水氾濫地域の湛水域を 3 分類した。NRCS 変化量の画像化後に植生による画像ノイズを捨象するため、画像のメッシュ分割後、各セル内の NRCS の差を平均してその平均値をセル値とした。その後、セル平均値と NRCS 平均値が増水期前後でどのように変化するかを確認した。モンスーン末期の増水期では蒸発散・バイオマスなどの変化量より洪

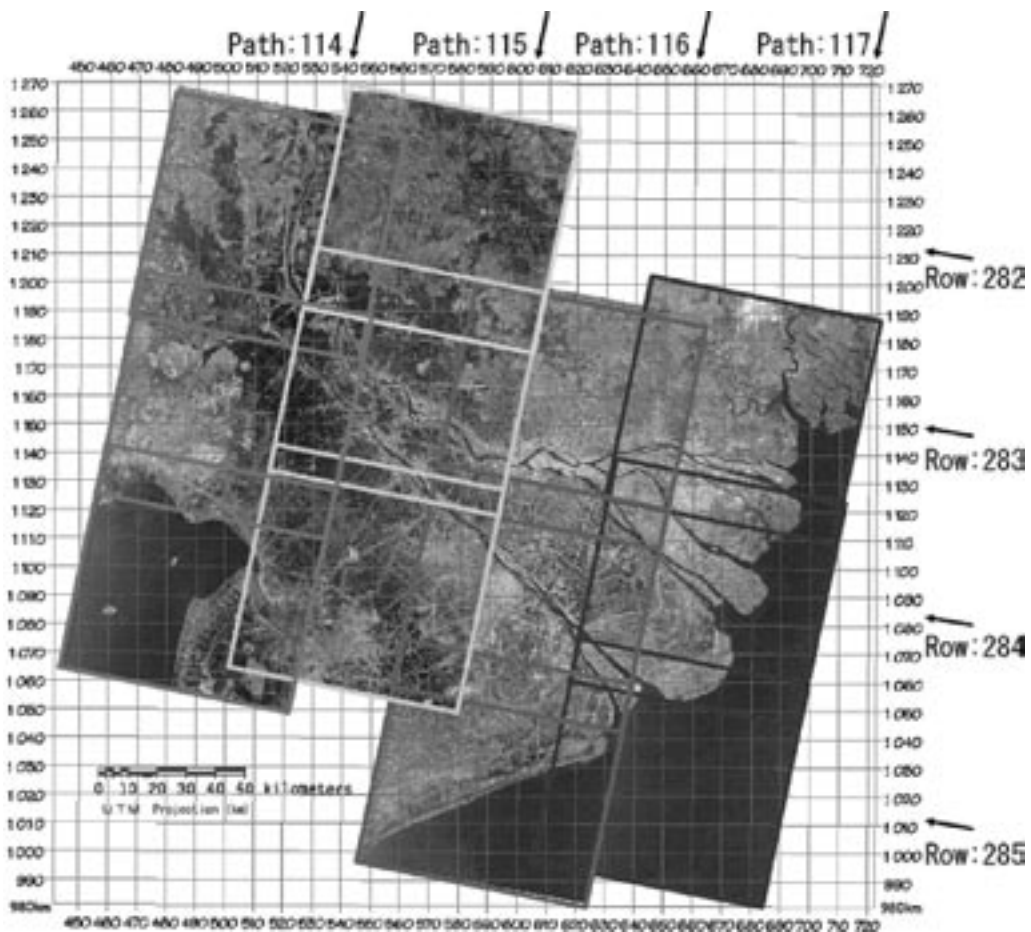


図 5 JERS-1 SAR の Path-Row.

Fig. 5 Path-Row of JERS 1 SAR.

水湛水による NRCS 変化量が大きいので NRCS 減少量を閾値以上のセル抽出に用いた。

1998 年, 1997 年の画像のうち季節変化が明瞭な 8 月・10 月を用いて NRCS の差を求めた後, メッシュ分割後のセル内平均値を計算し, その平均値頻度分布を明らかにし, この頻度にセル面積 (0.09 km²) を乗じたものの中で, 閾値以下を湛水地域と定義して縦軸を湛水面積で示した (図 6, 図 7) ところ, 1998, 1997 年ともにセル内平均値が -1.8 (dB) 前後で頻度が変化するので, 本研究ではこれを閾値として用いた。1997 年および 1998 年の最大氾濫域を示す 9 月下旬の画像

を用いて, 氾濫湛水地域を図化するとともに, 両年の差画像から, 最大氾濫時期の 1) 両年ともに湛水した地域, 2) 1997 年に湛水した地域, 3) 1998 年のみ湛水した地域, 4) 湛水しない地域に分類した (図 8)。

V. メコンデルタ地形と洪水リスク

1) メコンデルタの地形

Nguyen *et al.* (2000), Ta *et al.* (2001, 2002), Tanabe *et al.* (2003), Thanh *et al.* (2004), Murakami *et al.* (2004) らは, メコンデルタ最下流地域でオールコアボーリングを行った。この

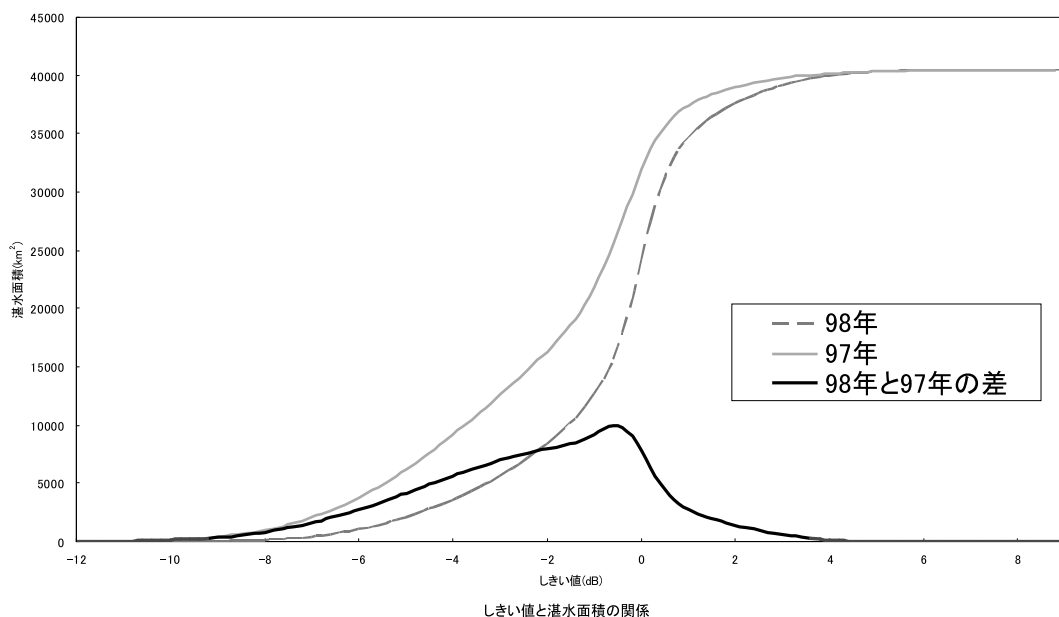


図 6 しきい値と湛水面積の関係.

Fig. 6 Relationship between Threshold and Inundation Area.

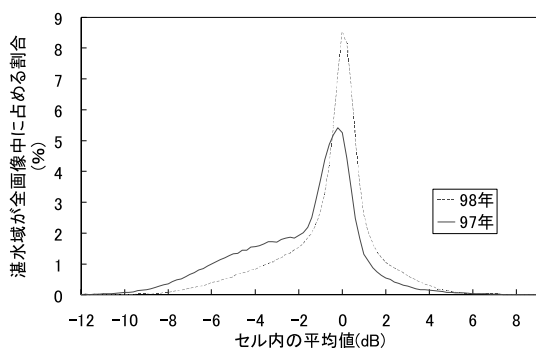


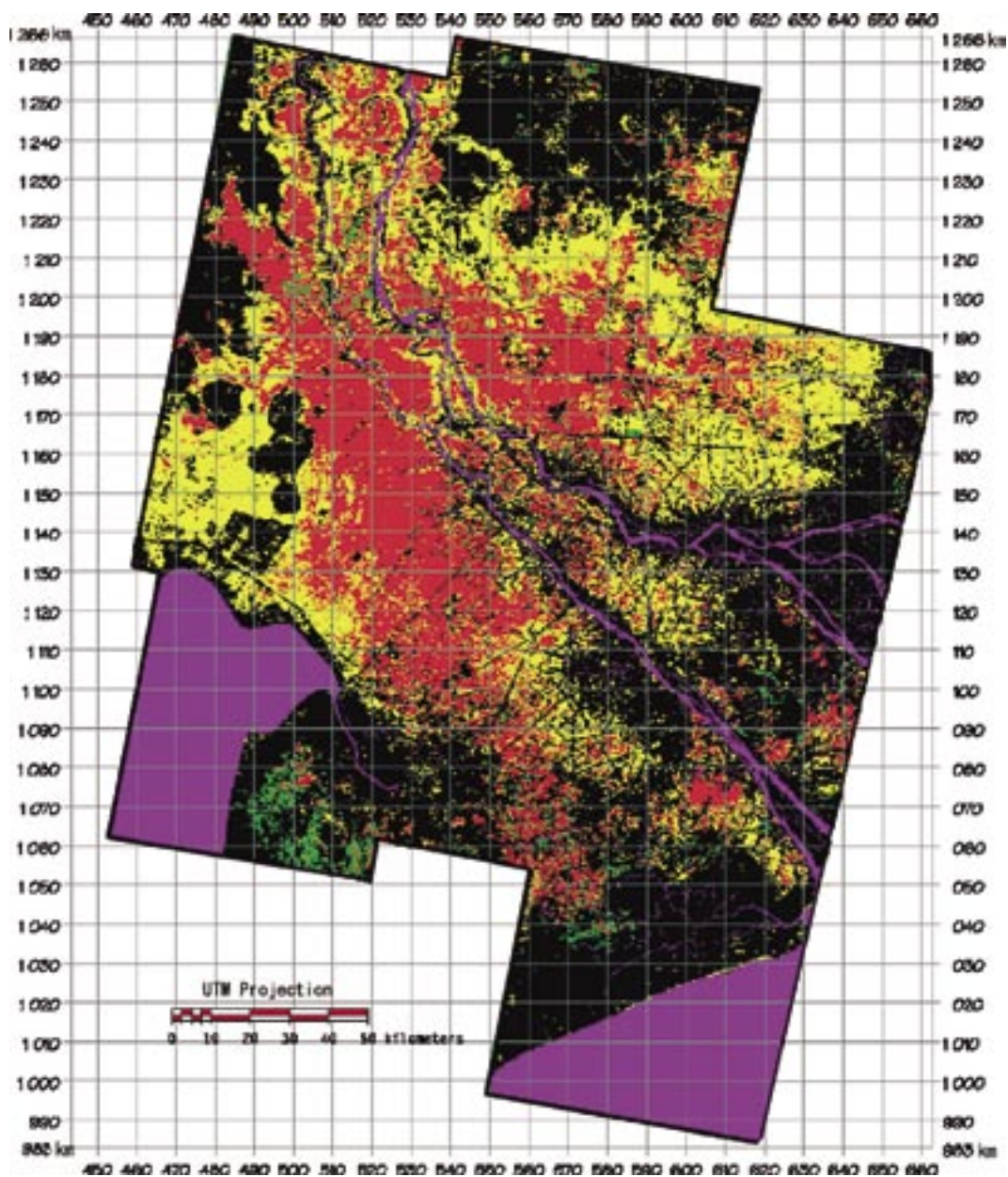
図 7 セルの平均値の頻度分布.

Fig. 7 Frequency Distribution of Average Value of Cell.

コア解析からメコンデルタで 4000 年前の海岸線を復元し、1000 年ごとに旧汀線を描き、デルタ前進過程を推定し、完新世の海水準変動のなかでデルタの埋積過程を示した。本研究では上記研究を踏まえ、デルタの地形がメコン川の溢流氾濫とどのような関係があるのかに着目して、メコンデルタ地形分類図(図 9)を作成した。地形分類図

作成に当たっては Haruyama *et al.* (1996) の手法を用い JERS-1 SAR 画像を処理し、ベトナム地理局作成 (MapInfo 形式) の省別 1 万分の 1 スケールの数値地図 (標高データは 500 m 間隔, 精度 0.1 m) を基礎データとして用いた。

作成した地形分類図(図 9)からみたメコンデルタの地形特性は次のようである。カンボジア国境付近には独立した標高 125 m 前後の花崗岩もしくは変成岩などの基盤岩が露出する残丘が点在しており、これらの残丘裾を取り巻いて標高 6 m から 10 m の段丘面 (海成段丘および沖積段丘) が発達している。氾濫原面は起伏に乏しいが、メコン川本川河道及びバサック川に沿って形成される自然堤防と後背湿地の景観が見られる。海成段丘 I は地盤高 10 m の高位面でカンボジア側に広く分布し、海成段丘 II は地盤高 6-8 m の低位面でありベトナム領内に分布している。自然堤防はカンボジア側に認められる離水した旧自然堤防と現生のものに区分できる。メコンデルタ北部に位置するチャウドック付近では地盤標高が 5 m に



凡例	説明
Red	1997 年, 1998 年の両年とも湛水した地域
Yellow	1997 年にのみ湛水した地域
Green	1998 年にのみ湛水した地域
Black	まったく湛水しなかった場所

図 8 1997 年および 1998 年の洪水湛水図.

Fig. 8 Flood Inundation Map for 1997 and 1998.

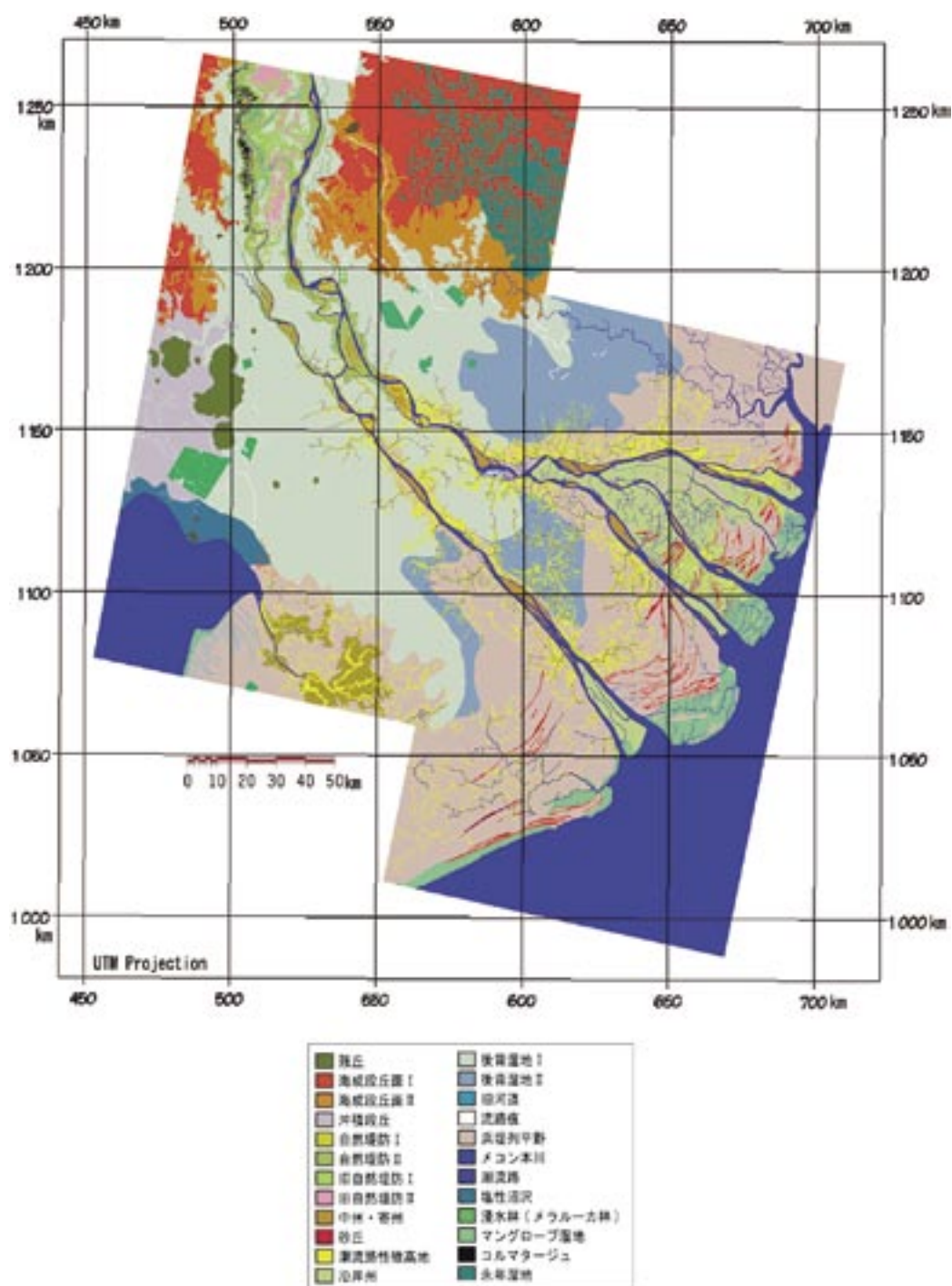


図 9 メコンデルタの地形分類図.

Fig. 9 Geomorphologic Land Classification Map of Mekong River Delta.

及ぶ高位自然堤防（自然堤防Ⅰ）、地盤標高が最大でも3mに過ぎない低位自然堤防（自然堤防Ⅱ）の2つに分類できる。また、各々の自然堤防の背後には湛水深度の異なる湛水深度が1mを超える後背湿地（後背湿地Ⅰ）、湛水深度は1m以内の低位後背湿地（後背湿地Ⅱ）が形成されている。

メコンデルタの最前線には砂丘、潮流路性微高地、浜堤列などの微高地が形成されており、浜列平野に砂丘列が張り出している。砂丘頂部の高度は最大で7mに達するものもあるため、内陸側より沿岸部での地盤標高が高い。また、カントー地点から河口部にむかって、分流を繰り返しているメコン川には分流路、潮流路が発達しており、末端には潮流路性微高地が形成されている。河口部周辺にはマングローブ湿地林が現在拡大している。タイ湾側には砂丘が見られず、潮汐流路とこれにそって微高地が形成されている。また、浜堤列平野の内陸側には塩性湿地が広がっている。

カンボジア国境付近のバサック川とメコン川に挟まれたロンスエンコドラート地区では本川河道が蛇行を繰り返した痕跡が旧河道として明瞭であり、河道にそって自然堤防が連続している。自然堤防と後背湿地の比高はカンボジア国境のチャウドック市近くで2-3mであるが、下流に向かって低減するために、カントー市近辺では50cm程度になる。また、前者の自然堤防地帯は居住地域として利用されているために、土盛りをしている地区もあり、平均的な雨期の最大洪水時においても後背湿地での湛水深度が3mを越える。自然堤防の形態は上流側で幅が広く連続的であるが、下流側ではパッチ状である。自然堤防は砂混じりシルトで比較的細粒物質で構成されているが、一方、後背湿地の表層は粘土であり、水田として利用されている地区では粘性の高い粘土は乾期になると深い亀裂が入る。ドンタップ省では後背湿地が一部ラムサール条約で保護されており経年湿地が保全されている地区もある。カントー市以南では、感潮域になるため自然堤防の微高地は潮流路性微高地へと遷移し、表層土壌も粘土-シルトに変化している。南シナ海での干満差は平均で

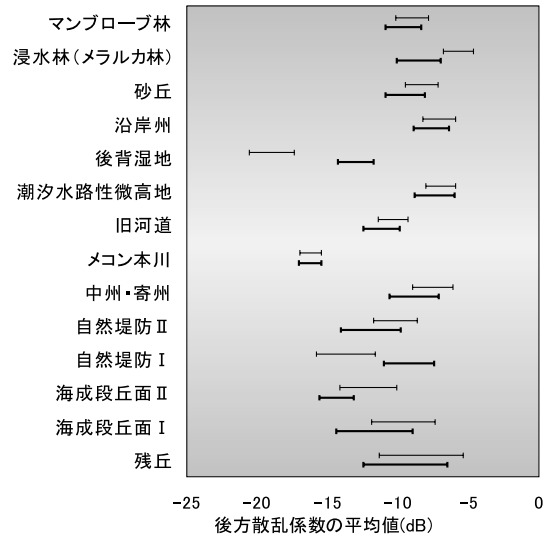


図 10 地形種別の後方散乱係数の平均値（細線は雨期、太線は乾期を示している）。

Fig. 10 Mean of NRCS of Geomorphologic Land form units.

2.5mであり、本川ではこのカントー市近くまでニッパヤシの植生が河川沿いに進出している。

2) メコンデルタの地形と後方散乱係数

氾濫原の微地形は最大洪水時の氾濫状況を再現することが知られている（大矢, 1979, 1993 など）。氾濫地域の再現性を考慮して作成したメコンデルタ地形分類図から、前節の1)で記載した地形種の代表的な地点を選定して、現地で地形を確認するとともに JERS-1 SAR 画像の後方散乱係数を計算した。選定した地点は160箇所であり、2003年12月に画像との照合を現地でを行った。ノイズのない画像として1994年から1998年までの JERS-1 SAR 画像上を選定し、メコンデルタ地形分類図上に示される残丘、海成段丘面Ⅰ、Ⅱ、自然堤防Ⅰ、Ⅱ、中洲、潮汐水路性微高地、後背湿地Ⅰ、Ⅱ、沿岸州、砂丘、塩性沼沢、メコン本川、旧河道、浸水林、マングローブ湿地、都市化地域などで後方散乱係数を計算した。後方散乱係数の変動幅は大きいですが、地形種ごとの変動幅は小さく、残丘では-12~-15、高位段丘面では-14.5~-7、低位段丘面では-15.5~-13、

高位自然堤防では-9~-5, 低位自然堤防では-14~-10, 浜堤列では-13~-8, 沿岸州では-9~-6, マングローブ湿地では-11~-7という値域をとることがわかった(図10)。

後方散乱係数は雨期と乾期で後背湿地では大きく異なっており, この変化幅は湛水状況の変化を表現している。同様に, 塩性沼沢, 浸水林の変化幅も洪水氾濫の影響を表現している。

3) 地形と洪水特性

2001, 2002年の両年, 現地最近10年間の洪水状況聞き取り調査を行ったところ, ベトナム領内メコンデルタの洪水氾濫形態は, 1) 上流側では河川からの溢流氾濫型であり, 2) 最下流部では高潮・台風時の海洋からの潮汐作用, 海水遡上の影響を受けて堤間低地で冠水する潮汐氾濫型を示し, 洪水氾濫の特性が異なっていることがわかった。上記氾濫形態の差異は JERS-1 SAR 画像からもよみとることができる(図7, 図8)。

次にデルタ微地形と氾濫域の関係をみるために, 1997年および1998年の湛水時系列変化を地形分類図と比較した。湛水がデルタ全体に拡大するのは6月以降であり, 9月下旬から10月上旬には氾濫域は最大を示し, 12月には氾濫域が減少する。雨期半ばの8月ではベトナム領内メコン川本川に近い後背湿地が氾濫開始, メコン川およびバサック川に挟まれる自然堤防と本川ぞいの自然堤防は冠水しないもののデルタ南端沿岸域の堤間低地で内水氾濫となる。9月には人工的盛土の道路と集落を残して自然堤防が冠水し, 12月に入るとメコン川とバサック川に挟まれる自然堤防地帯では離水し, 深水後背湿地に湛水域が残存するだけになる。

メコンデルタにおける平均的な氾濫湛水と地形との関係をみてみると, 1) ドンタップ省の深水の後背湿地Ⅰでは3ヶ月以上にわたる長期湛水, 2) 湛水の浅い後背湿地Ⅱでは1ヶ月未満の湛水, 3) 自然堤防Ⅰ, Ⅱともに雨期中期以降に一時的に冠水するものの離水が早い, 4) 浜堤列平野は河川氾濫の影響を受けることはないが堤間低地は50cm未満の湛水で1ヶ月未満の湛水に及ぶ, 5) メコン川のサイゴン川に向かう旧河道およびこれ

を取り巻く後背湿地では雨期中期以降にカンボジアからの洪水流が流下する, 6) 潮汐作用の及ぶ潮汐路性微高地および河川・水路に沿う幅1km区間では1ヶ月から2ヶ月以内の中期湛水域を形成し, 7) カントー以南の後背湿地Ⅱは1ヶ月以内に離水する早期離水域である。このようにメコンデルタでの氾濫動態は微地形に影響を受けている。

しかし, 都市近郊で人工改变地域(盛土地)が拡大したこと, 河川堤防が建設され, 国境線近くに堤防とラバーダム建設が進められたため, ベトナム領内での洪水氾濫の初動は遅れている。また, ベトナム領内メコンデルタでは本川河道からの溢流氾濫が緩やかに氾濫を開始し, 後背湿地などのデルタ凹地部に湛水するが, 干満の影響を受け洪水期間が長期化している。本川河道内での洪水流出時の河岸侵食などが併発している。

VI. まとめ

本研究では湿潤熱帯地域の洪水動態の空間解析に有効な JERS-1 SAR データを用いベトナム領内メコンデルタを対象にして年々変動の大きな雨期の洪水氾濫域を抽出し, 平野の微地形特性と洪水との対応関係について分析した。メコンデルタ地形分類図と JERS-1 SAR 画像から抽出した平均的洪水期の氾濫湛水域を検討したところ地形ユニットごとの後方散乱係数はデルタの氾濫水動態はデルタ微地形と対応することが明らかになった。また, 沿岸域の浜堤列平野での洪水被害は軽微であるが, メコンデルタでは内陸部の後背湿地で湛水深度が大きく, 湛水期間が長期化しているが, これは洪水動態がデルタの地形要因と大きくかわり氾濫域を規定していることがわかった。JERS-1 SAR 画像から得られた後方散乱係数は洪水氾濫域の把握を行うための指標となることがわかった。

謝 辞

本研究を進める上でベトナム地質調査所 Dr. VuVan Vinh には大変お世話になりました。また, 査読委員の方には有益なご助言をいただきました。本研究は科学

研究費補助金課題番号 16251001「巨大河川の環境変動が社会環境に及ぼす影響評価」(研究代表者春山成子)を使用した。

文 献

- Benie, G.B., He, D.C., Wang, S., Ziou, D. and Gwyn, Q.H.J. (1998): Classification of SAR Images Using Morphological Texture Features. *Int. J. Rem. Sens.*, **19**, 3399-3410.
- Bourgeau-Chavez, L.L., Kasischke, E.S., Brunzell, S.M., Mudd, J.P. and Smith, K.B. and Frick, A.L. (2001): Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. *Int. J. Rem. Sens.*, **22**, 3665-3687.
- Brakenridge, G.R. (1998): Orbital SAR remote sensing of a river flood wave. *Int. J. Rem. Sens.*, **19**, 1439-1445.
- Conway, J. (1997): Evaluation ERS-1 SAR data for the discrimination of tropical forest from other tropical vegetation types in Papua New Guinea. *Int. J. Rem. Sens.*, **18**, 1439-1445.
- Dwivedi, R.S., Kushwaha, S.P.S., Bhattacharya, S.N., An, B. and Dasgupta, S. (1999): Monitoring the spatial extent of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. *Int. J. Rem. Sens.*, **20**, 2509-2517.
- 春山成子 (2001): 気候変化の中での地域資源の変容。21世紀の食料生産と農業工学。日本農業工学会編, 1-7.
- 春山成子 (2004): メコンデルタの洪水。地理, **49**, 90-95.
- Haruyama, S., Ohkura, H., Simking, T. and Simking, R. (1996): Geomorphologic Zoning for Flood Inundation Using Satellite Data. *Geo-Journal*, **38**, 273-278.
- 春山成子・大矢雅彦 (1990): メコン川流域の自然と開発。国際農林業協力, **13**, 27-43.
- 春山成子・志田 健 (2005): 環境共生のメコンデルター洪水の評価をめぐって。水利科学, **284**, 1-10.
- 堀 博 (1996): メコン河一開発と環境一。古今書院。
- 石井米雄・桜井由弓雄 (1990): 東南アジア世界の形成。講談社。
- 飯坂譲二監修: 日本写真測量学会編 (1998): 合成開口レーダー画像ハンドブック。朝倉書店。
- Le, T.V.H., Haruyama, S., Le, B.H. and Bui, D.L. (2005): Historical flood and inundation and hydrological regime in the Mekong River Delta. 平成 16 年度科学研究費補助金基盤研究 (A)。巨大河川の環境変動が社会環境へ及ぼす影響評価—メコン川流域の場合—, 38-50.
- Mekong River Commission (1996): *The Lower Mekong River Hydrological Yearbook*. MRC Publisher.
- Mekong River Commission (2002a): *Flood Management Programme Components #1-Establishment of a Regional FMM Center-*. MRC Publisher.
- Mekong River Commission (2002b): *Flood Management Programme Components #3-Mediation of Transboundary Flood Issues-*. MRC Publisher.
- Mekong River Commission (2002c): *Flood Management Programme Components #4-Flood Emergency Management Strengthening-*. MRC Publisher.
- Mekong River Commission (2002d): *Flood Management Programme Components #6-Land Use management-*. MRC Publisher.
- Murakami, F., Saito, Y., Kinoshita, Y., Tateishi, M., Nguyen, T.L., Luong, B.L. and Nguyen, T.T. (2004): High-resolution seismic survey in the Mekong river delta, Vietnam. *Stratigraphy of Quaternary system in deltas of Vietnam*. Department of Geology and Mineral Resources; 25-35.
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2000): Late Holocene depositional environments and coastal evolution of the Mekong River Delta, Southern Vietnam. *J. Asian Earth Sci.*, **19**, 427-439.
- Nico, G., Pappalepore, M., Pasquariello, G., Refice, A. and Samarelli, S. (2000): Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods - a GIS application. *Int. J. Rem. Sens.*, **21**, 1619-1631.
- 越智士郎・Rahman, N. M.・垣内博明 (1991): バングラディッシュにおける洪水危険度の分析。写真判読とリモートセンシング, **30**(6), 34-38.
- 大矢雅彦 (1979): 河川の開発平野。大明堂。
- 大矢雅彦 (1993): 河川地理学。古今書院。
- 志田健・春山成子 (2004): JERS-1 SAR データを用いたメコンデルタにおける洪水の影響評価。日本地理学会春季大会要旨集, **65**, 78.
- 資源・環境観測解析センター (1999): 地球資源衛星 1 号 (JERS-1) データ利用成果。ERSDAC.
- Shimada M. and Isoguchi O. (2002): JERS-1 SAR Mosaics of Southeast Asia Using Calibrated Path Images. *Int. J. Rem. Sens.*, **23**, 1507-1526.
- Sokleang, N. (2000): *Mekong River Flow Data Analysis*. The Royal University of Agriculture (Phnom Phen).
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2001): Sediment facies and diatom and foraminifer assemblages of Late Pleistocene-Holocene incised-valley sequence from the Mekong River Delta, Bentre Province, Southern Vietnam: the BT2 core. *J. Asian Earth Sci.*, **20**, 83-94.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I., Saito, Y. and Nakamura, T. (2002): Sediment facies and late Holocene progradation of the Mekong River Delta in Bentre Province, southern Vietnam: an example of evolution from a tide-dominated to a tide- and wave-dominated delta. *Sedimentary Geology*, **152**, 313-325.
- Tanabe, S., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2003): Delta Evolution Model Inferred from the Holocene Mekong Delta, Southern Vietnam. In Sidi, F.H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H., Posamentier H.W., eds.:

- Tropical Deltas of Southeast Asia- *Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum Geology*, SEPM Special Publication, **76**, 175–188.
- Thanh, T.D., Saito, Y., Huy, D.V., Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Tateishi, M. (2004): Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam. *Regional Environmental Changes*. **4**, 49–62.
- Wu, Q.X. and North, H.C. (2001): A Multi-scale Technique for detecting forest-cover boundary from L-band SAR Images. *Int. J. Rem. Sens.*, **21**, 1439–1445.
- (2004 年 10 月 30 日受付, 2005 年 12 月 19 日受理)