洪水氾濫特性と水稻栽培パターン

—カンボジア・メコンデルタを事例として—

Flood Inundation Characteristics and Cropping Pattern :
Lesson from Mekong Delta, Cambodia

春山 成子*・伊藤 健**・桶谷 政一郎***

Shigeko HARUYAMA, Takeshi ITO and Seiichiro OKETANI

I はじめに

表層地質並びに微地形条件は持続的な土地利用計画・水資源利用計画の重要な基礎要件である。モンスーンアジアの稲作農業形態は地盤・地形条件に適応すると考えられるが、環境基盤である微地形と洪水氾濫特性が稲作形態に及ぼした影響は明らかでない。衛星リモートセンシングでは広域な農業地域の土地被覆分類手法を開発し、多時期の画像を用いることで農地もしくは水田を正確に分類することが可能となったが (Okamoto・Kawashima1999, Ribbes 1999), 地域固有の水稻栽培パターンにまでは言及されていない。モンスーンアジアの巨大デルタに広がる水田地帯は洪水常習地域であるが、一方、洪水が稲の生育期に水資源として利用されることもあり、地域資源としての意味を考えるべきである。カンボジア・ベトナム両国にまたがるメコンデルタは洪水常習地域であり、1996年と2000年の洪水が長期氾濫したために農業被害の軽減を考えなければならないが、一方で洪水氾濫の伝統的雨季稲作における水資源評価も求められている (Le et al. 2004)。本研究では稲作を主たる土地利用とするカンボジア領内メコンデルタの氾濫原を対象として水稻栽培パターンを明らかにし、雨季の洪水氾濫が地形条件と水稻栽培パターンに与える影響を分析した。この研究は洪水氾濫が常習化する大陸部モンスーンアジアの巨大デルタでの防災計画、持続的農業的土地利用計画の一助となる。

II 研究方法・データ

本研究では土地利用、水稻栽培パターンが平均的な洪

図1 研究地域の衛星画像

Fig. 1 Remote Sensing Data of Our Study Area

(JERS-1 SAR データの合成画像、赤と緑の線は1シーンデータの範囲を示す)

水時の氾濫特性と合致すると考えて平常年程度の洪水形態と水稻栽培パターンの対応関係を考察した。水稻栽培パターンと洪水氾濫特性を分析し、土地利用図を作成するにあたり、LandsatTM(path126-row52;1995.4.14,1995.6.1,1995.7.19,1995.12.10,1996.1.11,2000.8.1,2000.9.17,2000.11.5,2000.12.23,2001.5.8),ETM+(path126-row52;2001.7.11,2003.2.13),JERS-1SAR(path117,118-row280-282;1995.3.25,1995.6.20,1995.8.3,1995.9.16,1995.12.13)を用い図1の範囲を切り出して解析に用いた。地形分類図はOketani et al (2007) を使用して洪水氾濫との関係を検討した。土地

*三重大学 Mie University

**NTT(株) NTT

***東京大学 The University of Tokyo

Key Words : 1) メコンデルタ, 2) 水稻栽培パターン, 3) 洪水, 4) 地形

図2 研究のフロー
Fig. 2 The Study Flow Chart

利用図では水稻栽培パターンとの関係に着目しband 1～band 5 を使用してISODATA分類法で各データを20クラスに分類した。

洪水氾濫と水稻栽培パターンの関係を解析するためにメコン川委員会の流量データ（Hydrological Statistics 1960－2004年）を用い、プノンペン地点の河川洪水流量の確率洪水年を計算した。1978年洪水は188年確率、2000年洪水は12.1年確率、1995年洪水は0.4年確率であった。当該地域の平均的洪水年を1995年とし、この年の洪水記録を用いることにした。洪水氾濫分析では1995年9月の最大洪水氾濫期の洪水氾濫域を分析対象として領域外をマスクして解析した。

湛水深度測定、聞き取り調査を行い、後背湿地などの地形単位が示す最大湛水深を考えて湛水深度3.1m以上を湛水深度大、1.1m－3mを湛水深度中、0.1m－1mを湛水深度小に分類した。当該地域の早期・中期稲作は湛水深0－1m、深水氾濫稲作は湛水深1.1－3m、浮稲および浸水湿地林の湛水深は3mが対応する。水稻栽培暦から生育期間を勘案し5ヶ月以上の湛水期間を長期湛水、3～5ヶ月を中期湛水、1～3ヶ月を短期湛水として区分した。水稻栽培パターンを確認するため、カンボジア農林水産省Nhon氏を同行して2004年9月、12月、2005年8月、12月に該当する省の52農村を訪問して1995年の洪水状況と水稻栽培パターンを確認した。水稻栽培パターンを空間分析するため洪水湛水域に含まれる全45区のクロッピングパターンデータを用い、水稻栽培パターンの生育期間を1月1日からの日数をX₁、X₃₆₅として生育していたら1、生育していなければ0と数量化しウォード法を用いてクラスター分析した。クラスター分析にはSAS社のJMPを使用した（図2）。

Ⅲ カンボジア・メコンデルタの洪水氾濫と水稻栽培

カンボジア領内メコンデルタの主たる土地利用は稲作であり、氾濫原の微高地には集落・畑作も立地する。扇状地と段丘・丘陵には畑作、果樹園、ゴム林が卓越し、一部に陸稲が栽培されている。稲作は地域によって作付け時期が異なり、1）減水期稲作、2）深水氾濫稲作、3）早期稲作、4）中期稲作、5）晩期稲作の5パターンがあり、さらに、6）畑地、7）樹林地、8）湿地が分布する。Landsat TM画像では中期稲作と晩期稲作を分離できないため土地利用図では同一カテゴリーで扱った。トンレサップ湖岸平野には深水氾濫稲作も点在するが、このカテゴリー面積は狭く、衛星画像では湿性植生と近似し稲作地域として認識できない。深水氾濫稲作地域の湛水深度は深く、水位変化は0.1m/day以下、収穫までに8ヶ月以上を要するので深水氾濫稲作は湿地クラスに分類した。1995年の土地利用図では早期稲作面積は454,263ha（21%）、中晩期稲作面積は1,393,705（65%）、深水氾濫稲作面積は83,889ha、（4%）、減水期稲作面積は216,000ha（10%）であった。（図3）。

乾季に生育する減水期稲作、生育期が雨季開始期から乾期中盤までの長期間にわたる深水氾濫稲作、雨季中盤から生育する早期・中期・晩期の各稲作の中でも早期稲

図3 メコンデルタ氾濫原の土地利用図
Fig. 3 Land Use Map of the Flood plain of Mekong Delta

図4 湛水深度と稲作のモデル図
Fig. 4 Model of Inundation Depth and Rice Cultivation

作は作付け期間が短く、晩期稲作は長期にわたっている。洪水氾濫が最大に達した洪水水深は図4に示すように早期稲作では浅く、晩期稲作では深い。減水期稲作も生育期間の違う早期・遅期の2種類があり、早期は11月～1月、遅期は1月～3月を生育期とする。中期・晩期稲作の作付け時期は近似している。

IV 洪水氾濫特性と水稻栽培パターン

メコンデルタ地形分類図(図5-1, 図5-2)では当該地区を残丘、段丘、沖積段丘と低地地形に分類され、氾濫原は自然堤防、後背湿地IとII、谷底平野、湿地に区分されている。後背湿地Iは湛水期間が5カ月、深度が3.1mを超え、IIは湛水期間が5カ月未満、湛水深度は3m以浅である。地形分類図に示すポイントバーは蛇行した河道に沿う自然堤防に近似した地形であり、コルマタージュは雨季に洪水流を農地に引き込む水路であり周辺に洪水堆積物がみられる。人工改変地は切り土地、盛り土地を示している。

減水期(早)稲作区は洪水末期の減水期11-1月に作付けが開始し3ヶ月後に収穫する。この栽培区は早期湛水、湛水深度が中・大の2地区が対応し、自然堤防を一部に含むが、後背湿地I・沼沢地で84%を占める。減水期(遅)稲作区は短期から長期の湛水期間で湛水深度は中・大が対応している。地形ユニットは沼地・後背湿地に対応し、後背湿地Iで59%を占める。湛水期間中・長期の地区が68%、湛水深度は中・大で90%、減水期稲作に影響を与えるのは湛水期間より湛水深度である。

早期稲作は生育期間3-4ヶ月であるが作付け時期には地域差がみられ、6-7月には作付けが開始している。この稲作区は非湛水域を主分布地とし、早期湛水域・湛水深小の地域を含んでいる。早期稲作は沖積段丘に85%分布し、天水に依存している。中・晩期稲作は早期湛水域の湛水深度小が対応している。

中期稲作の生育期間は6ヶ月であり、5-6月に作付

図5-1 プノンベン上流側の地形分類図
Fig. 5-1 Geomorphologic Land Classification Map of the Upper Part of Phnom Phen
(Oketani et al. 2007)

図5-2 プノンベン下流側の地形分類図
Fig. 5-2 Geomorphologic Land Classification Map of the Lower Part of Phnom Phen
(Oketani et al. 2007, 凡例は図5-2と同じ、プノンベンから下流を示す)

け、11-12月に収穫する。晩期稲作の生育期間は7-8ヶ月と長く、5-6月の作付けで12-1月に収穫する。上記2者は後背湿地で72%が占められるが、沖積段丘に

も28%分布している。また、早期湛水地区で72%が占められ、湛水深度小の地域には53%が対応している。晩期稲作の湛水深度は20～60cmであり、中期稲作の場合には天水依存地域も含んでいる。

深水氾濫稲作は緩やかに増水する地域に分布しており、湛水深度大・長期湛水地域と対応している。この稲作では5月に作付けして12～1月に収穫するが、雨季から乾季にかけて湛水が継続している地域である。

上記のように各水稻栽培パターンは氾濫原の地形と洪水氾濫特性に適応し、また、湛水特性は微地形に依存し、稲作暦の空間分布に影響を与えていることがわかる。水稻栽培パターンの広域空間分布をみるとメコン川、バサック川ともに右岸では深水氾濫稲作を除く水稻栽培パターンが認められ、メコン川左岸には早期稲作、最も作付け時期が早い深水氾濫稲作を除いて、全ての水稻栽培パターンが分布する。メコン川本流域ではプノンペン北部で湛水深度が大きく、雨季でも水位変化が一日当たり0.1m/dayを超え、洪水流動が大きい。この数値は浸水稻作の限界値である（聞き取り調査による）。バサック川流域には5水稻栽培パターンが分布している。

V 水稻栽培パターンのクラスター分類

1 水稻栽培パターンの分析結果

クラスター分類結果を7水稻栽培パターンに分類した。代表的な水稻栽培データとしてコンボンチャム（Kampong Cham）区、プノンペン（Phnom Penh）区、コンボンチュナン（Kampong Chhnang）区を取り上げる（図6）。クラスター1はメコン川とトンレサップ川の間、バサック川右岸に分布し、深水氾濫稲作を除く稲作形態がある。クラスター2はメコン川左岸にあり、クラスター1より早期稲作の作付け時期が早く、深水氾濫稲作を除く水稻栽培が行われている。クラスター3はバサック川流域に相当し、クラスター2に深水氾濫稲作が加わったタイプであり、全ての水稻栽培パターンが認められる。クラスター4はトンレサップ川流域であり、クラスター3より早期稲作の作付け時期が遅い。クラスター5はメコン川下流側でありクラスター1から中期・晩期稲作を除いたタイプであり、乾季稲作と早期稲作のみられる。クラスター6はメコン川右岸下流側にあり、深水氾濫稲作と晩期稲作は行われない。分析結果から洪水氾濫特性に次の関係がみいだせる。

(1) クラスター1

クラスター1はメコン川本流右岸側、バサック川下流右岸を分布域とする。メコン川右岸には早期湛水域、バ

サック川右岸には長期湛水・湛水深度大の地域が分布し、水位変化は0.1m/dayを示めす。このクラスターは深水氾濫稲作を含まない。

(2) クラスター2

クラスター2はメコン川本流左岸側にあり、早期湛水域、湛水深度中・小の地域に合致する。メコン川の上流を比較すると、下流側に湛水深度が大きい地域が広がっている。この地域の水位変化は0.1m/dayを超える旬が多く、深水氾濫稲作が行われていない。

(3) クラスター3

クラスター3はバサック川沿いにあり、プノンペン～チャウドック間の水位変化は緩やかで0.1m/day以内に

クラスター1 Khsach Kandal

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター2 Kampong Siem

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター3 Prey Kabbas

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター4 Rolea B'ier

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター5 Leuk Daek

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター6 Kang Meas

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

クラスター7 Chol Kiri

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
乾季稲作												
深水氾濫稲作												
早期稲作												
中期・晩期稲作												

図6-1 主要地点の水稻栽培パターン
Fig. 6-1 Rice Cultivation Pattern of the Important Study Area

図 6 - 2 水稲栽培パターンのクラスター分類結果
Fig. 6-2 The Result of Cluster Analysis of Rice Cultivation Patterns

収束し深水氾濫稲作が行われている。プノンベンより下流側は長期湛水・湛水深度が大きく、深水氾濫稲作に対応している。

(4) クラスター 4

クラスター 4 はトンレサップ川沿いにあり、コンボンチュナン～プノンベンの水位変化は0.1m/day以内に収束し、深水氾濫稲作が行われている。減水期稲作は作付け開始時期が11月であるが、生育期間が6 カ月で収穫が4 月後半である。このクラスターは長期湛水域に対応する。

(5) クラスター 5

クラスター 5 は早期湛水域に対応するが、湛水深度大で中期・晩期稲作地区と異なる。水位変化は0.1m/dayを超える旬が多く、クラスター 3 とは異なる洪水氾濫特性で稲作作付け体系も異なっている。

(6) クラスター 6

クラスター 6 はメコン川とバサック川に挟まれた地域で湛水開始が遅れる地域であり中期稲作、晩期稲作の分布域は限られる。水位変化は0.1m/dayを超え、深水氾濫稲作は認められない。

(7) クラスター 7

図 7 旬別にみた河川の水位動態

Fig. 7 The Water Dynamics of the Rivers for Each Season

(縦軸は水位増水を示し単位はm。横軸は1-12月を旬別に記載。メコン委員会の河川水位を図化。左は1995年洪水、右は2000年洪水を示す。)

クラスター 7 はトンレサップ川の中流地域に限られている。雨季開始期より湛水開始する浸水氾濫稲作、早期稲作地域である。水位変化は0.1m/dayを超える。

洪水氾濫特性と水稻栽培パターンは各クラスターで湛水期間・湛水深・洪水期の水位変化などに違いがあることがわかった（図 6-1, 図 6-2）。

2 水稻栽培パターンと地形ユニット

プノンベン周辺に分布する段丘は更新世に形成された地形面であり、メコン川が完新世に形成した氾濫原と比べて高位にある。カンボジア領内メコンデルタの地形起伏は乏しいが、本研究では段丘面より高位の地形をマスクして稲作形態を解析した。河成地形である自然堤防地帯、凹地部で恒常的な湛水地区となる後背湿地、完新世

に地形形成が進んだ後背湿地より高位にあり、高洪水位時期に冠水する沖積段丘面、洪水・堤防建設で本川河道から切り離されたが雨季に洪水が流れ乾期に水面を残す旧河道は洪水特性に地域性を与えている。

微地形単位と水稻栽培パターンの空間分布の関係を分析したところ、減水期稲作（早）は後背湿地、沼沢地に分布し、稲作形態はメコン川本流右岸地域、バサック川右岸地域には深水氾濫稲作以外の稲作、早期稲作の中でも早い時期の作付け稲作地域が分布し、深水氾濫稲作以外の稲作地域はメコン川左岸地域に分布することがわかった。

メコン川本川河道流域では下流側は上流側と比較すると、洪水の湛水深度が大きく、雨季のコンボンチャムの水位変化は0.1m/day（図 7）を超え、洪水流動が大きく深水氾濫稲作は対応できない。バサック川流域には全ての稲作形態が分布するが、プノンベン～チャウドックの水位変化が0.1m/day以内で緩慢な変動であり、深水氾濫稲作を可能にさせている。プノンベン南部は長期湛水域であり湛水深が大きく、深水氾濫稲作地域である。

表 1～4 には、各水稻栽培パターンと微地形ならびに洪水氾濫特性との対応関係を示した。減水期稲作（早）

表 1 減水期稲作（早）と地形との対応関係
Table 1 The Relationship between Rice Cultivation (Early) in Lowering Water Level and Landform

湛水期間	推定湛水深	地形	面積 (km ²)	累積面積率
短期	中	後背湿地 I	117.8	13%
長期	大	後背湿地 I	87.0	23%
短期	大	後背湿地 I	82.4	32%
短期	中	自然堤防	60.2	39%
短期	中	沖積段丘面	49.3	44%
中期	大	後背湿地 I	49.1	50%
中期	中	後背湿地 I	46.4	55%
短期	小	沖積段丘面	46.0	60%
中期	大	沼沢地	45.2	65%
短期	小	自然堤防	44.4	70%
短期	小	後背湿地 I	38.4	74%
短期	中	後背湿地 II	31.4	78%
中期	中	自然堤防	29.1	81%
短期	大	沼沢地	27.6	84%
短期	大	自然堤防	27.5	87%
中期	大	沼沢地	26.7	90%
長期	中	後背湿地 I	24.2	93%
中期	中	沼沢地	21.7	95%
短期	小	後背湿地 II	21.4	98%
短期	中	沼沢地	19.6	100%

表 2 早期稲作と地形との対応関係
Table 2 The Relationship between Rice Cultivation in Early Period and Landform

湛水期間	推定湛水深	地形	面積 (km ²)	累積面積率
短期	小	沖積段丘面	34.4	23%
非湛水	非湛水	後背湿地 I	24.4	40%
短期	中	後背湿地 I	20.1	54%
短期	中	沖積段丘面	18.1	66%
短期	大	後背湿地 I	8.8	72%
非湛水	非湛水	自然堤防	7.0	77%
短期	小	後背湿地 I	7.0	81%
中期	小	沖積段丘面	4.8	85%
中期	中	沖積段丘面	4.8	88%
短期	中	後背湿地 II	4.1	91%
中期	中	後背湿地 I	3.7	93%
短期	小	自然堤防	3.6	96%
非湛水	非湛水	後背湿地 II	3.4	98%
短期	小	後背湿地 II	3.2	100%

表 3 中期・晩期稲作と地形との対応関係
Table 3 The Relationship between Rice Cultivation in Middle and Late Periods and Landform

湛水期間	推定湛水深	地形	面積 (km ²)	累積面積率
短期	小	沖積段丘面	95.4	48%
非湛水	非湛水	後背湿地 I	40.6	68%
短期	中	沖積段丘面	37.8	87%
非湛水	非湛水	後背湿地 II	16.1	95%
短期	小	後背湿地 II	10.3	100%

表 4 減水期稲作（遅）と地形との対応関係
Table 4 The Relationship between Rice Cultivation (Late) in Lowering Water Level and Landform

湛水期間	推定湛水深	地形	面積 (km ²)	累積面積率
長期	大	後背湿地 I	72.5	21%
長期	中	後背湿地 I	34.1	31%
長期	大	沼沢地	27.5	39%
中期	大	後背湿地 I	27.3	47%
短期	大	後背湿地 I	27.2	55%
短期	小	沖積段丘面	25.4	62%
短期	中	後背湿地 I	18.1	67%
中期	中	後背湿地 I	16.1	72%
長期	中	沼沢地	14.4	76%
短期	中	沖積段丘面	14.3	80%
中期	大	沼沢地	9.7	83%
短期	中	自然堤防	9.6	86%
中期	中	自然堤防	8.7	89%
短期	大	沼沢地	8.4	91%
長期	中	自然堤防	8.3	93%
中期	中	沼沢地	7.8	96%
短期	小	後背湿地 I	7.5	98%
長期	大	自然堤防	7.3	100%

は長期湛水深度で湛水深度が大きいのと比べると、早期稲作（早）での湛水期間は短く、地形面は沖積段丘面の湛水深度が浅い地区に対応する。減水期稲作（遅）は長期湛水期間に対応し、地形面は後背湿地Ⅰ、沼沢地に対応する。中期・晩期稲作は非湛水地区と湛水深度が浅い地区に対応している。

本研究地域の示した典型的な5つの水稻栽培パターンと地形・洪水特性をまとめると、1) 減水期稲作（早）の湛水期間は短く、湛水深度は中から大、地形は後背湿地並びに自然堤防に対応する、2) 減水期稲作（遅）の湛水期間は中から大の後背湿地と沼沢地に対応し、3) 早期稲作は非湛水と短期湛水、湛水深度が小さい沖積段丘面と後背湿地に対応する、4) 中期稲作は非湛水期間が長く、洪水氾濫期でも湛水深度が浅い沖積段丘に分布する、5) 晩期稲作は湛水期間が短く、湛水深度の浅い後背湿地Ⅱに分布することがわかった。微地形は洪水湛水特性に基礎要因を与え、水稻栽培パターンに影響を与えたことをみいだせた。

VI まとめ

カンボジア領内メコンデルタを対象に衛星画像を用いて水稻栽培パターンを中心に土地利用を分類し、稲作の作付け時期と湛水期間・湛水深・水位変化などの洪水氾濫との関係を分析した。洪水湛水特性は微地形に規定されて、微地形と稲作形態に密接な関係がみいだせた。起

伏に乏しい低平水田でも氾濫特性と微地形が水稻栽培パターンに影響を与えたことを示した。

引用文献

- 1) 越智士郎 (1991) : バングラディッシュにおける洪水危険度の分析. 写真測量とリモートセンシング, 30 (6), 34-38.
- 2) 瀬戸島政博・赤松幸生 (1990) : 画像解析により抽出した防災情報の高度利用に向けての試み. 写真測量とリモートセンシング, 29 (4), 4-15.
- 3) 小川茂男 (2007) : 環境と資源の定量的解析一. (秋山・石塚・小川・岡本・福原・斉藤・内田編, 『農業リモートセンシングハンドブック』, システム農学会, 東京, I-53.
- 4) Mekong River Committee (1960-2000) : Hydrological Statistical book of the Mekong.
- 5) Le, T. V. H., Haruyama, S., Nguyen, H. N., and Tran, T. C. (2008) : Infrastructure effects on floods in the Mekong River Delta in Vietnam, Hydrological Process, 22, 1359-1372.
- 6) Oketani, S., Haruyama, S. and Sotham, S. (2007) : Floodplain characteristics of the Mekong Delta in Cambodia. Geographical Reviews of Japan, 180 (2), 195-205.
- 7) Okamoto, K. and Kawashima, H. (1999) : Estimation of rice-planted area in the tropical zone using a combination of optical and microwave satellite sensor data. International Journal of Remote Sensing, 20 (5), 1045-1048.
- 8) Ribbes, F., and Le, T. T. (1999) : Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. International Journal of Remote Sensing, 20 (4), 745-765.

In this study, the authors tried to analyze the relationships between rice cropping pattern and flood inundation features of the Mekong River Delta in Cambodia, utilizing the several satellite data. We confirmed there are the five types of rice cropping patterns and 7 clusters for their formation depend upon the micro-geomorphology as for land form units of fluvial plain and inundation period, inundation depth.

Key Words : 1) Mekong delta, 2) Rice cropping pattern, 3) Flood, 4) Geomorphology

(2008年6月16日 受付)

(2009年6月11日 受理)