

# 便益計算を用いた メコン河洪水氾濫総合評価の試み

## INTEGRATED EVALUATION OF THE MEKONG RIVER FLOOD USING BENEFIT CALCULATION

風間聡<sup>1</sup>・森杉壽芳<sup>2</sup>・沢本正樹<sup>3</sup>  
So KAZAMA, Hisayoshi MORISUGI and Masaki SAWAMOTO

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉山06)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北大学大学院情報科学研究科 (同上)

<sup>3</sup>フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

Flood benefit was calculated for integrated evaluation of the Mekong River flood and inundation in Cambodia. Flood and inundation were simulated using dynamic wave model in main channels and non-uniform flow model for flooded area. Agricultural, industrial and fishery benefits were mainly considered. Data were obtained from field and literature survey. The estimated benefits were about 20 billion-JPY for rice production and 10 billion-JPY for fish catch in the case of the 2000 flood. On the other hand, the damage to rice production was only about 5 billion-JPY. Supposed that upstream countries developed flood control system and could make 50% water level reduction, damage decrease would be less than all benefits decrease. This means that flood and inundation bring much benefit in the Lower Mekong. We would like to propose the development with allowance of flood and damage.

**Key Words :** Numerical simulation, rice production, fishery, flood damage, Cambodia

### 1. はじめに

2000年にメコン河は過去最大級の洪水に見まれ、土木学会から調査団が派遣され、現地調査と情報収集が行われた<sup>1)</sup>。その報告書の中では、洪水氾濫に対する都市部と地方の認識の差が指摘されている。都市域では流通や教育の停滞からその被害の深刻さが指摘されていたが、地方部では洪水を自然と受けとめ、生産の場として利用していた。元来洪水は負のイメージであるが、近年、正の部分も注目されつつある。特にメコン河の場合、洪水の規模と水産資源の相関性<sup>2)</sup>や、農地の肥沃化<sup>3)</sup>が述べられている。こうした問題を包括的に論じるためには、各評価量が定量的に扱われている必要があり、かつ相互比較できるものである必要がある。そこで、本研究では洪水の変動に伴う2次量を経済価値に置きかえる便益手法を導入して洪水氾濫を総合的に評価することを試みる。

洪水に対する便益被害計算は国内ではすでに多くの事例があり、治水経済調査マニュアルとして作成されている<sup>4)</sup>。また、JICAは治水の費用効果をプノンペンにおいて調査している<sup>5)</sup>。こうした報告書では洪水損害に関す

る原単位については言及しているが、洪水氾濫の便益については求められていない。環境に関わる社会費用の計算は多くの研究例があるが、参考となるものにIPCC

(The Inter-governmental Panel on Climate Change)の報告書<sup>6)</sup>が挙げられる。ここでは、温暖化の影響評価のため、生態系、水、森林等の価値が述べられている。また、先進国と途上国の違いについても述べられているため参考になる。こうした原単位計算を参考にして、洪水氾濫計算に基づいた便益の計算を試みる。

メコン河上流国は多くのダム計画を持っているが、洪水時期に貯留を限るとして、その治水効果を述べている。メコン河下流域特にカンボジア、ベトナムは、渇期のダム放流制限による水不足を懸念していることとダム建設の直接的便益が得られないため、上流国のダム建設による洪水制御には否定的であり、自国の治水計画に熱心である<sup>7)</sup>。しかし、洪水氾濫の規模は大きく、連続堤を築くような治水技術では対応できない部分が多い。そのため氾濫と共生する開発計画が望まれる。こうした状況を踏まえて、(1)洪水氾濫規模によってどの程度便益は変化するのか、(2)総合対策にはどのような視点が有効かを調べることを本研究の目的としている。氾濫が与える

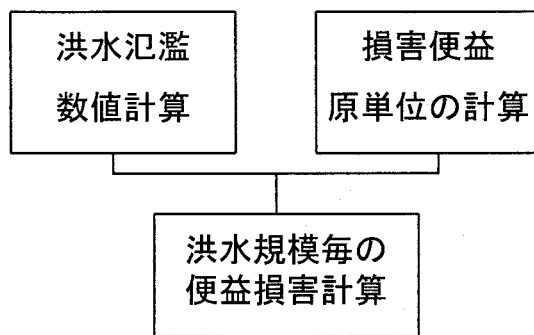


図-1 研究の流れ

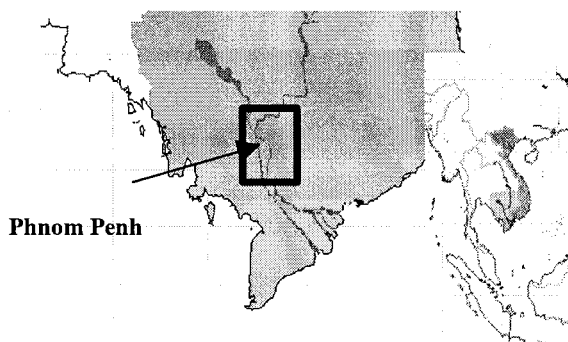


図-2 計算対象域

各影響を同じ指標で評価することにより、洪水氾濫の生かすべき箇所と防ぐ必要のある地域の理解が可能になると考える。また、本研究の成果は開発政策の意志決定の支援ツールとして期待できるものである。

本論文は2000年洪水波形を対象としてプノンペン周辺の洪水氾濫の規模を変化させた数値計算を行い、その結果に便益と損失の原単位を組み合わせることから氾濫の損害と便益計算を行う(図-1)。

## 2. データセットと氾濫計算

計算対象地域はカンボジア国首都プノンペンをほぼ中心とした110km×140km四方の15,400km<sup>2</sup>である(図-2)。この地域の洪水規模と氾濫面積の関係を求めるため、数値計算のデータとして以下のものを用意した。地理情報として、標高データに USGS の GTOPO30 を用い、土地利用分類に国際建設技術協会のもを用いた。気象・水文データは、プノンペンにおいて過去最高の水位を記録した2000年の洪水についてメコン河委員会(MRC: Mekong River Commission)が編集したデータを利用した。

洪水氾濫計算は、Hagiwaraら<sup>8)</sup>と同様に河道には1次元 Dynamic Wave モデルを、氾濫原にはInoueら<sup>9)</sup>がメコンデルタで用いた方法を参考に越流式と不等流式によって行った。空間格子サイズは1kmであり、時間刻みは1分で

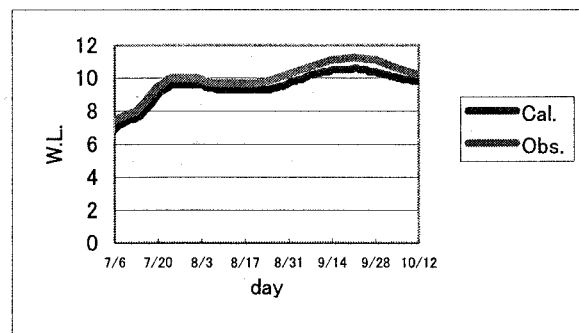


図-3 プノンペンでの洪水計算結果と観測値との比較

ある。境界条件として、メコン河上流のコンボンチャム、トンレサップ川のプレックダム、メコン河下流のタンチャウ、バサック川下流のチャオドックの水深データを用いた。プノンペンの水位データを検定用に使い、良い一致を得ている(図-3)。用いた1次元dynamic wave modelは以下の式の通りである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式(1)の連続式と式(2)の運動式から成る。ここで、 $A$ は通水断面積、 $Q$ は河道流量、 $q$ は分岐、合流流量、 $v$ は流速、 $H$ は水位、 $h$ は水深である。氾濫モデルは、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

の連続式と

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{h^{7/3}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{h^{7/3}} \quad (5)$$

の運動式からなる。ここで、 $M=uh$ 、 $N=vh$ であり単位幅流量を表している。粗度係数は $n=0.05$ を与えた。越流量は、完全越流ともぐり越流を以下の2式で与えた。

$$Q = 0.35Bh_1 \sqrt{2gh_1} \quad (6)$$

$$Q = 0.91Bh_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (7)$$

ここで $B$ は越流幅で格子幅を、堤防高さ $h_1$ は水位を $h_2$ は氾濫原の水位である。

### 3. 便益と損害の原単位

損害の原単位をJICAはプノンペン周辺の洪水対策の便益計算において求めている<sup>9)</sup>。しかし、都市部に限られた計算のため、今回は別途、調査した結果と収集した資料に基づいて原単位を推定することとする。

洪水氾濫の便益で大きな部分を占めるのが、農産物と水産資源および地下水資源である。また、損失に関しては流通や農作物に関するものが第一に考えられる。これら以外にも、希少種の保護、舟運等の便益、疫病、水質悪化、教育の停滞等の損害が考えられる。環境や自然に関する原単位は、IPCCの報告書<sup>9)</sup>にも記述されているように、全てを把握することは困難である。そこで、本研究では洪水氾濫便益計算の第一段階として、カンボジア経済の基幹をなし、金額的に大きな部分を占めることが予想される農業、水産業、工業に絞る。

一次生産物の価格は場所と時間によって変化し、品種や品質によっても変化する。また途上国では均一な価格設定がされていないため、同じ商品、流通上でも販売価格が違ふことが多い。本研究では、それらの変化を無視して、2002年の調査時の価格と入手した公式資料に記述された価格をもとに原単位の推定を行う。

#### (1) 農作物の原単位

カンボジアの農業は灌漑農業とコルマターージュと呼ばれる自然農業に大きく分かれる。プノンペンより下流域では氾濫原が広がっているため自然農業が広く行われている。コルマターージュは河川から氾濫水を取水し、氾濫原に耕作する農法である。この農法による生産物のほとんどは米である。

米の価格は場所によって大きく異なる。プノンペン郊外では仲買人の購入価格として、もみ付き1kgがおおよそ300リエル（おおよそ1,000リエル=38円、300リエル=11円）である一方、市内のスーパーでは1,500リエル（57円）、市場では約800リエル（30円）で売られている。ここでは流通過程をなるべく省いて考えたいため、消費者価格を採用することとし、販売価格に差がある場合は平均値とする。よって米1kgを1,200リエル（46円）とする。

カンボジアでの単位面積当りの収量は、角道・後藤<sup>10)</sup>によると1.35ton/haであり、もみからの穀物収量割合はベトナムやインドネシアを参考<sup>11)</sup>にするとおおよそ85%である。これにより、1km<sup>2</sup>当りの米収量は108tonとなり、金額にすると4,968,000円となる。

#### (2) 漁業の原単位

氾濫原の主な水産物はナマズや鯉類である。漁法はコルマターージュの取水口や堰の近くでの定置網が良く見ら

れる。また、小船を用いた投網漁もよく見られる。そのほとんどは鯉類の小魚であり、これらは魚醬（トゥックトレイ）やクサヤ（プラホック）のような加工品として利用される。比較的大型の鯉やナマズの種類はそのまま調理して食する。

水産物の価値も時間と場所によって大きく異なるが、農産物と同様、ここではおおよそ平均と考える値を用いる。市場での調査や農業森林水産省のレポート<sup>12)</sup>によると年間通しておおよそ1US\$/kg (=120円/kg)である。

メコン河の多くの魚類は雨季に氾濫原で産卵し、乾季のメコン河の水位が下がる際に孵化し河に戻る<sup>13)</sup>。水位と漁獲量の相関が高いことをBaranらはトンレサップ川のDaiと呼ばれる定置網漁の調査で示した<sup>2)</sup>。このことから氾濫原面積と漁獲量に間に線形関係があるとする。Baranらは同じ論文の中で1995年のトンレサップ域の水田域と総漁獲量での漁獲量を分けて示しており、その値はそれぞれ12,900tonと230,000tonである。一方、Kiteが行ったトンレサップ域の氾濫計算によると1995年では水田域とそれを含む氾濫原の面積はそれぞれ1,300km<sup>2</sup>と15,000km<sup>2</sup>としている<sup>14)</sup>。

以上をもとに氾濫原の単位面積当りの漁獲量は、水田域、総氾濫域それぞれ10ton/km<sup>2</sup>と15ton/km<sup>2</sup>となり、その価格は、それぞれ1,200,000円/km<sup>2</sup>と1,800,000円/km<sup>2</sup>となる。

#### (3) 工業の原単位

カンボジアの工業の地域経済に占めるGDPの割合は25%足らずであり大きくはない。ここでいう工業は製造業、鉱業、建設、電気、水道を含んだものである。製造業は衣料関係が多くを占め工業用水は多くない。しかも多くは上水道を利用しており、氾濫水を利用しているものは希少となる。その中で清涼飲料水やビールは地下水を用いており、これらの水は氾濫時期に涵養される。FAO(Food and Agriculture Organization, UN)のアルコール飲料の統計によるとカンボジア国民一人の年アルコール摂取量は0.7kgであり、プノンペン近郊の人口を150万人とすると、年1,050tonが地下水資源として利用されている。

ビール単価に占める水の料金は不明であるので、ここではカンボジアの工業用水道料金（500リエル/m<sup>3</sup> = 約19円）を乗じることとする。すると飲料水における地下水の価値はおおよそ20,000円となる。この額に見られるように氾濫水が工業用水に対する貢献度は他の産業に比べて極端に小さいため無視することとする。

#### (4) 氾濫による損害額

損害額は各国連機関や赤十字が報告している。それら報告書の推定値はまちまちで計算手法やデータの幅が大きい。各項目に分類された例も少ない。入手した資料の中で唯一、水田域の被害額をまとめていた国連人道問題

表-1 便益損害原単位

|          | 便益 (円/km <sup>2</sup> ) | 損害 (円/km <sup>2</sup> ) |
|----------|-------------------------|-------------------------|
| 水田       | 4,968,000               | 467,000                 |
| 水産 (氾濫原) | 1,800,000               |                         |
| 水産 (水田)  | 1,200,000               |                         |
| 工業       | 20,000                  |                         |

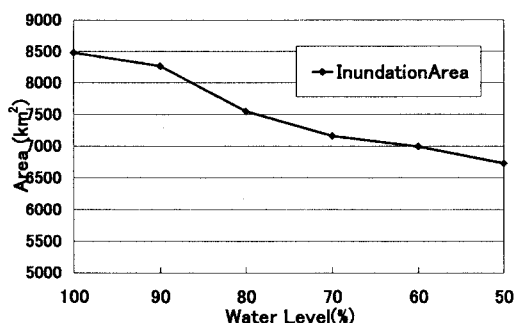


図-4 水位の減少と氾濫面積の関係

調整事務所 (OCHA, UN Office of the Coordination of Humanitarian Affairs) のレポートを参考にする<sup>15)</sup>。これによると冠水した水田と破壊された水田はそれぞれ1,370km<sup>2</sup>、1,200km<sup>2</sup>であり、関連して浸水家屋や壊れた家屋の情報が記録されている。その被害額は1,000万US\$ (= 12億円)となっている。この両方を影響域とすると損害面積は2,570km<sup>2</sup>となり、1km<sup>2</sup>当りの損害額は、467,000円となる。この額が米の単位面積当りの生産額より低くなっているのは、全域が同じ耕作周期をとっていないためである。つまり、一部地域は刈り取り後であった。

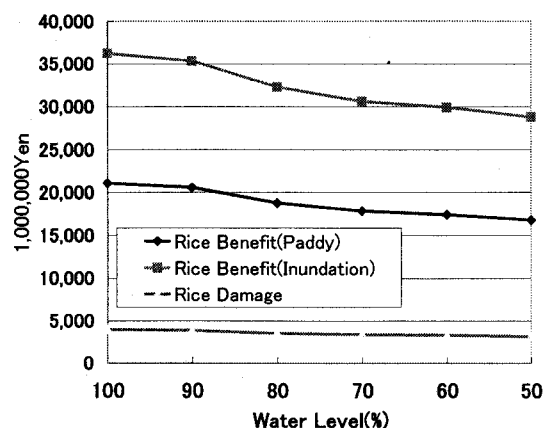
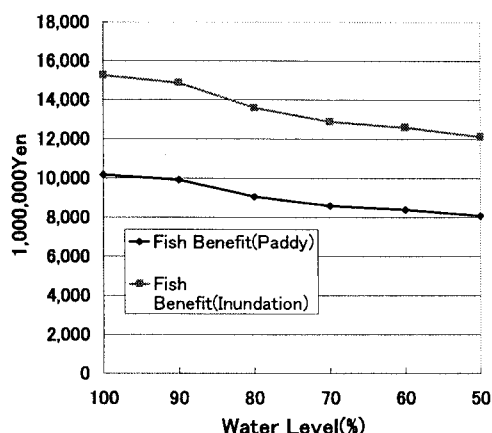
ここで注意するのは、この額が毎年有効でないことである。2000年洪水の場合、洪水時期が通年よりも早いため、収穫前の稲が被害した点である。最大水位が比較的同時に洪水時期が通常時期であった1996年の大洪水の総被害額 (40mil. US\$) と2000年洪水の総被害額 (80mil. US\$) を比較すると半分であることから時期の違いによって大きな差があることがわかる。

ここで得られた原単位を表-1に表す。

#### 4. 損害便益計算

##### (1) 計算条件

洪水規模の違いに氾濫面積変化に伴う便益損害計算を行う。洪水規模の違いは2000年洪水波形を基本として、Hagiwaraらが用いた洪水波の水位が10%毎に減少した場合の氾濫面積とした<sup>8)</sup>。これは特に上流側のコンポンチャムの最大水位が、16mから13.8mまで変化し、高水位の期間が20日から70日に縮小する。

図-5 氾濫規模と米生産額と損失額  
(洪水時期がずれた場合)図-6 氾濫規模と漁獲額  
(水田域のみと氾濫原全域の場合)

得られた氾濫面積に各原単位を乗じることから便益と損害を計算する。土地利用データによると対象域は水田域が50%を占め、氾濫原が36%を占めている。水田域のみの場合とこの両地域を水田域とした場合を考えると、実際には氾濫原が全て水田域とは限らないが、浮稲による低地も耕作可能であることや、開拓が進んでおり、早晚多くの地域で水田域になることが考えられる。実際、現地では水田域に変化した地域が多く見られた。

水産域は水田域のみとする計算と氾濫原と河道域も含むものとする計算の2通りを行うこととする。

##### (2) 計算結果

図-4に数値計算による水位と氾濫面積の関係を示す。氾濫面積は3ヶ月間の計算中に最大を記録した面積を用いている。2000年洪水の氾濫面積は8,500km<sup>2</sup>であるが、50%の水位低下が可能ならその氾濫面積は6,700km<sup>2</sup>となる。洪水水位が減少すると氾濫面積は減少するが、その減少面積は大きくない。50%の水位が減少しても氾濫面積はただだか20%程度の減少である。これはカンボジア

のメコンデルタ域が極めて低地にあるため、数mの水位上昇で広い範囲にわたって拡散できるからである。また、2000年洪水ではプノンペンで6mほど水位が上昇しているが、50%の計算でも3mの水位上昇があり、デルタ域に広く氾濫する。

図-5には図-4の関係をを用いた水位と米の生産額と損害額の関係を示している。水田の損害額が生産額に比べると10%程度なのは、前述した通り刈り取りは一斉行われるわけではないので、一部刈り取りが済んでいる地域や深稲、浮稲等の氾濫対応種が栽培されている点が考えられる。洪水規模が同様な1996年洪水の場合、被害額は過去最悪と言われている2000年の半分であり、多くの洪水は被害額の減少が期待される。つまり、稲作に限れば洪水氾濫は便益の方が大きい。稲作はカンボジアの最大の産業であり、大きな額を示している。

図-6には水位と水産額の関係を、水田の場合と氾濫原の場合を表している。生産額を見ると水産額も高いことがわかる。カンボジア国内の陸域での総水産額は100～225百万US\$と推定されており<sup>16)</sup>、この半分程度であることからおおそ正確な数字と思われる。水田に限った水産高は氾濫原の場合の60%ほどである。

## 5. 考察

これまでの計算をまとめてみると、漁獲高と水産高が損害額の10倍のオーダーで効いており、便益が損害を凌駕している。2000年のカンボジア国全域の被害額は、8千万US\$ (=9,600,000,000円) である。これは道路の水没、損傷、流通障害等からの被害額を含んでいる。こうした総被害額が水田だけの漁獲高に匹敵する。実際には氾濫原で生産される魚全てが取れるわけではないので、同じ額の収益があるわけではない。しかし、その他の水産資源も併せて考えると氾濫原は莫大な資源を生み出していると言える。メコン河の魚の多くは回遊していることが知られている。そのため、下流域の氾濫原の減少は、上流国の水産資源の減少にもつながる。近年、トンレサップ湖で放流された巨大ナマズがタイ国で捕獲されたことから、繁殖の場である氾濫原が減少すれば、上流国に損害を与えることになる。

水田での米の生産額は水田での水産高の2倍となっている。氾濫による損害より生産高がはるかに大きいという興味深い結果を示している。つまり、洪水氾濫の時期は早まって幾つかの地域で被害が出ても、全域で見ると便益が大きいことになる。これはコルマターージュによって洪水後に氾濫域の水田で稲作ができるからである。洪水前の稲作では、7月には深稲、浮稲等を用い、氾濫後に高収穫米を利用するなどの対策が考えられる。また、洪水情報を伝達することによって、稲の種の決定が地域毎に決定できる。現在、米の世界価格は低下しているが、

将来食糧不足から上昇に転ずれば、より大きな便益になることも考えられる。

上流による貯留は、下流域の洪水水位を減少させるが、氾濫面積の減少は小さい。洪水による損害額の抑制に比べて便益の減少の方が大きく、カンボジアの利益は無いことがわかる。下流国は治水による侵食問題を懸念しているが、水産資源の問題も大きく、上流国もこの影響を受ける。

以上の結果を考えると、上流国の洪水時期の貯留やカンボジアの治水より、現状を維持したほうが便益の高いことがわかる。加えてカンボジアの氾濫は極めて広範囲で起こるため、氾濫制御を行うのにはコスト面で問題がある。本地域では氾濫と共生した開発が望まれる。ベトナムでは、ダイクシステムと呼ばれる氾濫水を輪中に溜めて乾季に利用する積極的な手法をとっている<sup>17)</sup>。ここでは運河を掘削した土を堤防にするものだが、運河を流通の場として利用している。これは氾濫をうまく利用した例であり、氾濫と共生した開発といえる。

本研究では、基本的な便益計算を行っており1次近似的である。他にも多くの考慮すべき便益がある。例えば、希少種の経済価値は大きい。氾濫に合わせた生活をするメコン淡水イルカ（イラワジイルカ）は近年観光資源としても注目されている。希少種の価値は一人当たり数10\$となっており<sup>18)</sup>、興味を示す人、例えばカンボジア国民や観光客数を考えると大きな便益となる。地下水は工業用水のみならず、現地では飲料水として利用されており、この便益も小さくないことが考えられる。

加えてより詳細な便益調査をする場合、将来を見越した時間、環境変化も考慮する必要がある。現在、カンボジア国内の生活水準は低いですが、より高い収入を得ようとした場合には状況が変わる。氾濫原の土地資産価値はほとんど無いに等しい状態であるが、例えば工場のようなより生産性の高いものに変換が進めば、本研究の結果は変わる。また、植物や野生動物等の環境価値は近年上昇しており、これらを考慮すると便益解析はよりいっそう複雑になるだろう。今後はこうした資産価値や環境価値等の時間変化を考えた総合評価を行っていく予定である。

## 6. まとめ

本研究は便益手法を用いてカンボジアのプノンペン周辺を対象として洪水氾濫の総合評価を行った。その結果、水田では被害よりも便益の方がはるかに大きいこと、氾濫による水田のみ漁獲高は2000年洪水の総被害額に匹敵するものであり便益効果が高いことがわかった。

本研究は基本的な項目のみを考えたものであるが、ここでカンボジア国の洪水対策の提言をすると、

- (1) 洪水情報を逐次住民に知らせる

- (2) 舟運の流通を奨励する
- (3) 7月時期の稲作は洪水対応種を推奨する
- (4) 氾濫農業を維持する

が主なものである。こうした対策案を述べることもできるのも総合解析の成果といえる。

**謝辞：**メコン委員会の森下申子弘氏には現地資料の提供と助言を数多く受け、また、日本工営㈱環境技術部井上憲彦氏には洪水便益計算に関わる資料を提供して頂いた。併せて深甚なる感謝の意を表明する。本研究は住友財団研究助成と科学研究費若手B（代表者：風間聡、13750481）によって行われた。

#### 参考文献

- 1) 土木学会水理委員会：メコン河洪水氾濫調査 2000年11月，84pp., 2000.
- 2) Baran, E., N. V. Zalinge and N. P. Bun, Floods, floodplains and fish production in the Mekong Basin: Present and past trend, Proc. Asian Wetlands Symp., pp.1-11, 2001.
- 3) 角道弘文，川合尚，後藤章，真勢徹：適正技術としてのカンボジアのコルマタージュシステム，農業土木学会誌，63，4，pp.357-362，1995.
- 4) 建設省河川局：治水経済調査マニュアル，81pp., 200.
- 5) JICA, The study on drainage improvement and flood control in the municipality of Phnom Penh, SSS, JR, 99-115, Vol.2, 1999.
- 6) IPCC第3作業部会編：地球温暖化の経済・政策学，中央法規，pp.151-192, 1997.
- 7) 中山幹康：メコン川流域国による新協定の交渉過程における国連開発計画の役割，水文・水資源学会誌，11，2，pp.128-140，1998.
- 8) Hagiwara, T., S. Kazama and M. Sawamoto, Relationship between inundation area and irrigation area on flood control in the lower Mekong, Proc. 13th congress the APD/IAHR, Vol.1, pp.596-601, 2002.
- 9) Inoue, K., K. Toda and O. Maeda, A mathematical model of overland inundation flow in the Mekong Delta in Vietnam, Ecosystem and Flood, [http://www.geos.unicaen.fr/mecaflu/web\\_flocods/Data/Eco\\_web/HTML/b34.htm](http://www.geos.unicaen.fr/mecaflu/web_flocods/Data/Eco_web/HTML/b34.htm), 2000.
- 10) 角道弘文，後藤章：カンボジアの農業農村開発とメコン下流域の水文環境，農業土木学会誌，65，4，pp.43-49, 1997.
- 11) (財)矢野恒太郎記念会編集：世界国勢図会.
- 12) Agricultural Marketing Office, Price bulletin for agricultural commodities, Yearly Bulletin Series, 2, 1999.
- 13) Lim, P., S. Lek, S. T. Touch, S. O. Mao and B. Chhouk, Diversity and spatial distribution of freshwater fish in Great Lake and Tonle Sap river (Cambodia, Southeast Asia), Aquatic Living Resources, 12, 6, pp.379-386, 1999.
- 14) Kite G., Modelling the Mekong : hydrological simulation for environmental impact studies, Journal of Hydrology, 253, pp.1-13, 2001.
- 15) OCHA, Cambodia- Floods OCHA Situation Report No.4, No.5, 2001.
- 16) Gum, W., Inland aquatic resources and livelihoods in Cambodia, - A guide to the literature, legislation, institutional framework and recommendations, Oxfam GB and NGO Forum on Cambodia, 2000.
- 17) Kazama, S., Y. Muto, K. Nakatsuji and K. Inoue, Study on the 2000 flood in the lower Mekong by field survey and numerical simulation, Proc. 13th congress the APD/IAHR, Vol.1, pp.534-539, 2002.

(2002. 9. 30受付)