

# 連続した河川堤防システムの整備・管理に関する被害の視点からの考察

長坂 丈巨<sup>1)</sup>      中村 要介<sup>2)</sup>      吉川 勝秀<sup>3)</sup>

1), 2) 三井共同建設コンサルタント株式会社  
(〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15 三井生命高田馬場ビル)

3) 日本大学理工学部社会交通工学科  
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

わが国での堤防システムは、計画洪水を想定して、計画高水位をもとに整備・管理されている。そして、一つの河川ではその計画洪水のもとで、一連区間では左右岸、上下流の安全度は確率的に一樣とされている。しかし、現実には、計画で想定している状態とは乖離しており、河川の安全性は上下流等で異なっている場合が多い。

そのような堤防システムの整備・管理においては、堤防システムの決壊等に係わる水理的な検討とともに、堤防システムの破綻（決壊）時の被害からの検討が必要である。

本研究は、堤防システムの破綻（決壊、破堤）によって生じる被害を推定することで、その河川の被害特性分析を行ない、被害からみた河川堤防システムの管理の方向性について、諸外国の場合とも比較検討しつつ、基本的な考察を行った。その検討・考察は、日本最大級の河川である利根川を対象として定量的に行ったが、その方法は、他の河川流域にも適用しうるものである。

キーワード：河川堤防、河川堤防システム、洪水被害ポテンシャル、被害額、国際比較

## I. はじめに

わが国での堤防システムは、計画洪水を想定して、計画高水位をもとに整備・管理されている。そして、一つの河川では、その計画洪水のもとで、一連区間では左右岸、上下流の安全度は確率的に一樣とされている（吉川，2011）。しかし、現実には、計画で想定している状態とは乖離しており、河川の安全性は上下流等で異なっている場合が多い（Yoshikawa and Ito, 2011）。

そのような堤防システムの整備・管理においては、堤防システムの決壊等に係わる水理的な検討とともに、堤防システムの破綻（決壊）時の被害からの検討が必要である。

本研究は、長く連続した河川堤防システムを対象として、その整備・管理の基本的事項について、想定被害を推定することにより考察を行ったものである。その考察は、堤防で国土を守っている主要な国々とも比較しつつおこなった。

## II. 従来の研究と本研究の基本的立場

河川の整備・管理において被害からの検討を行った研究としては、河川整備（寝屋川の改修）の経済的な妥当性についての広長ら（1954）がある。その後、水害被害に関しては、被害率の調査を踏まえた治水経済調査要綱（建設省、現国土交通省）が定められ、河川行政ではそれを用いて河川整備の効果の推定が行われるようになってきている。山口ら（1981）は、同要綱の被害率を活用しつつ都市化の洪水被害への影響の要因分析や河川整備の経済的な妥当性の検討を行っている。

洪水の氾濫にともなう被害に関連しては、現国土交通省による想定氾濫区域・氾濫水深の公表、内閣府（中央防災会議）による利根川や荒川の想定氾濫区域等の公表がなされ、一部河川では被害額の推定が行われているが、長い河川堤防システムの現況の安全性やこれからの整備・管理と関係づけたものではない。

河川の整備・管理に関連する水文・水理的検討(上記の国土交通省, 中央防災会議のものを含む)などの詳細な研究は数多くなされているが, 河川の洪水被害からの分析・検討や, 同視点から長く連続した河川堤防システムの整備・管理についての検討はほとんどなされていない。

そこで, 本研究では, 連続した河川堤防システムの整備・管理について, 堤防システムの破綻(決壊, 破堤)によって生じる被害を推定することで, その河川の被害特性分析を行ない, 被害からみた河川堤防システムの管理の方向性について, 諸外国の場合とも比較検討しつつ, 基本的な考察を行った。その検討・考察は, 日本最大級の河川である利根川を対象として定量的に行ったが, その方法は, 他の河川流域にも適用しうるものである。

### Ⅲ. 氾濫原の特性に基づく氾濫原の区分と浸水の特性

河川の決壊による被害を推定するため, 氾濫原の標高・治水地形, 過去の氾濫実績等から, 利根川の氾濫区域を図-1のように区分(ブロック化)した。その区分は, 図-2の治水地形分類図上に示すように, 基本的に治水地形に対応したものである(基本

的に氾濫原を区分したものであるが, 一部区域は, 便宜上ローム台地を含むものとして示した)。なお, この治水地形分類図は国が管理する河川について, かつて河川が乱流して形成された氾濫原, そしてさらに詳細な旧河道跡, 自然堤防, 後背湿地等の治水地形を示したもの(昭和50年代初めに建設省河川局<当時>と国土地理院で作成)であり, 堤防が決壊して氾濫すると, その旧河道跡や後背湿地などの治水地形に沿うように氾濫水が流れることが経験的に知られている。図に示すように, 東京を抱える氾濫原(東京氾濫原), 下流の霞ヶ浦に至る左岸側の氾濫原では, 氾濫流は拡散・流下する(拡散・流下型の氾濫となる)。また, 利根川と渡良瀬川に囲まれた氾濫原や利根川と小貝川に囲まれた氾濫原は貯留型の氾濫となる。もちろん, 貯留型の氾濫原でも, 貯留された水位の影響を受けるまでは, あるいは上流区で決壊した場合には拡散・流下型の氾濫となる。(Nagasaka *et al.*, 2010)

この氾濫区域における戦後の本川決壊による氾濫は, 昭和22(1947)年の利根川の決壊であり, 図-3に示すような氾濫が生じている。この堤防決壊により, 氾濫流は東京にまで至り, 東京氾濫原の相当部分が浸水したことが知られる。同図には, 洪水による浸水深も示している。

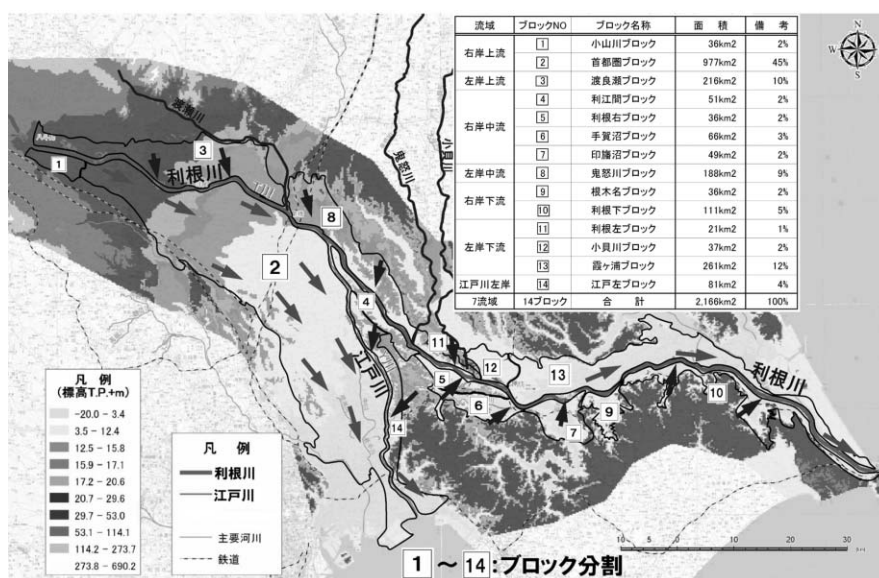
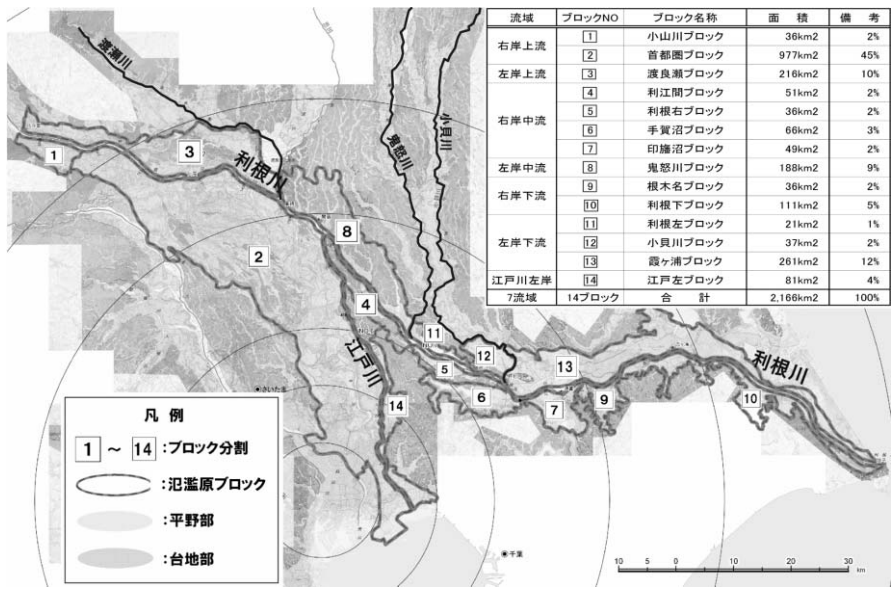
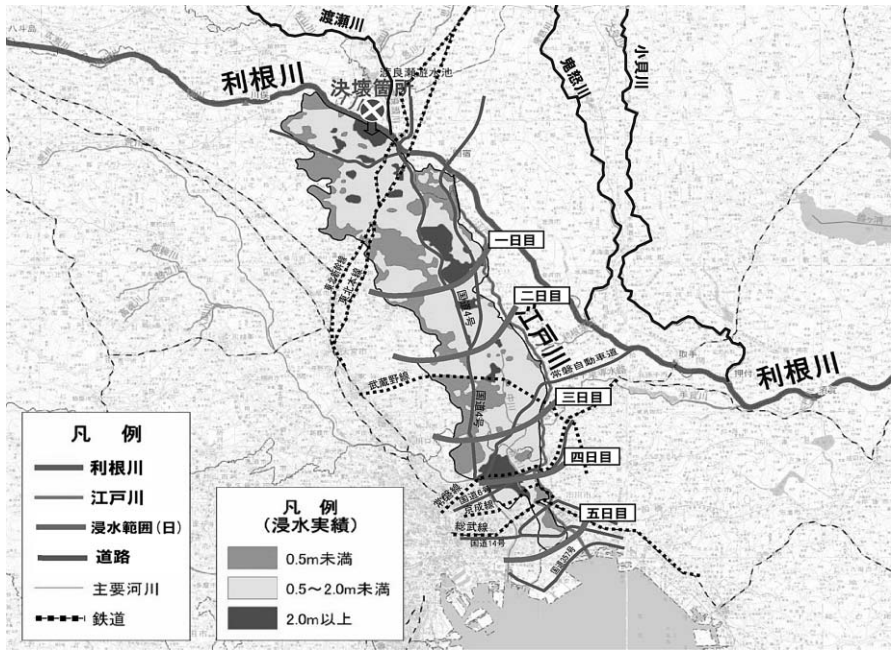


図-1 利根川の氾濫区域の区分  
 Fig. 1 Classification of flood areas around the Tone River.



図ー2 利根川氾濫区域と治水地形との関係

Fig. 2 Relationship between flood areas around the Tone River and their flood-prevention landform.



図ー3 利根川の1947年の氾濫区域，浸水深（建設省（1977）より作成）

Fig. 3 Flood areas around the Tone River and their inundation depth in 1947.  
(created from the Ministry of Construction (1977))



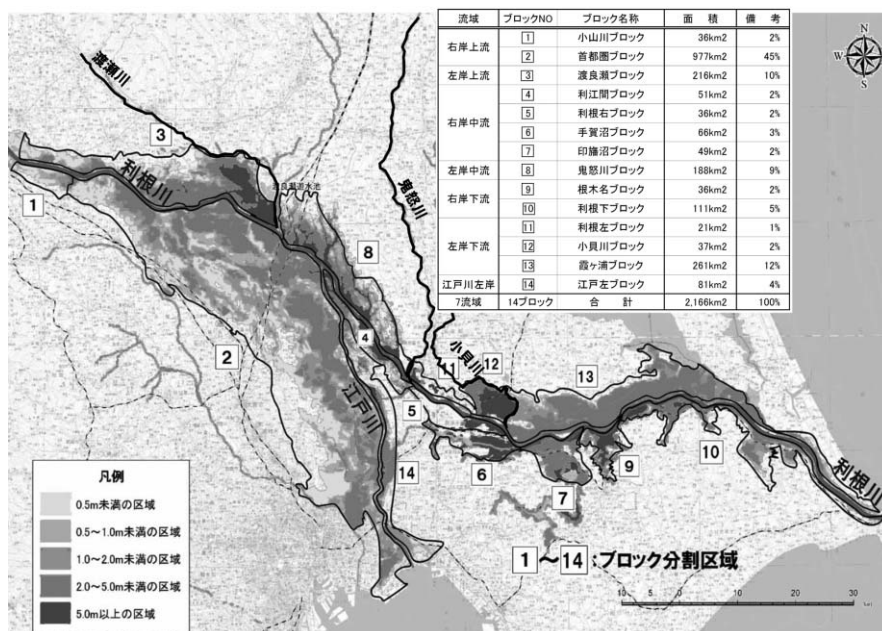


図-4 利根川の想定浸水区域・水深 (建設省 (1977) より作成)  
 Fig. 4 Probable flood-prone areas around the Tone River and their water depth.  
 (created from the Ministry of Construction (1977))

また、この河川の氾濫原の想定氾濫区域と浸水深は図-4に示すとおりである。この想定氾濫区域と水深は、計画高水流量の下で河川堤防があらゆる場所で堤防が決壊したときの氾濫を包絡したものである。したがって、一か所の堤防決壊による氾濫（氾濫区域、浸水深）とは異なっている。想定氾濫についてみると、例えば貯留型の氾濫原区域である渡良瀬川合流点の上流区域や、小貝川合流点の上流区域では、浸水深が5 m以上の水深となる区域があること、拡散・流下型の氾濫区域では概ね2 m未満の浸水深となっていることなどが知られる。

#### Ⅳ. 資産額の分布とその構成（洪水被害ポテンシャル）

氾濫原の資産（洪水被害ポテンシャル）の分布とその構成は以下のとおりである。

図-5には上述の氾濫区域の区分（ブロック）毎の家屋資産額を、図-6には家庭用品資産額、図-7には事業所資産額、図-8には農漁家資産額、図-9には農産物資産額を示した。

これらの資産額は、世界測地系で作成されたメッシュ統計データを用いて算定するモデルを構築し算定した(Nagasaka *et al.*, 2010)。このモデルは氾濫原をメッシュで表示し、各メッシュでの資産額(被害ポテンシャル)を算定し、さらにそのブロックの浸水深から被害額を求めるものであり、基本的に国土交通省の治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省, 2005, 2008)に示される方法で被害額の算定を行うものである。それを利根川の氾濫原全域に対して適用した。

各ブロックの資産額の合計およびその構成（各資産額の占める程度）を図-10に示した。

利根川氾濫原の各ブロックの資産額を合計した資産総額は約52兆円であり、その総額と構成を表-1に示した。資産額の内訳に示すように、家屋・家庭用品・農漁家の資産が総資産額の大半を占めている(約80%)。

ブロック別にみると、上流右岸(No.2 首都圏ブロック)、いわゆる東京氾濫原の資産額が最も大きく、氾濫原全体の総資産額の約72%を占めている。

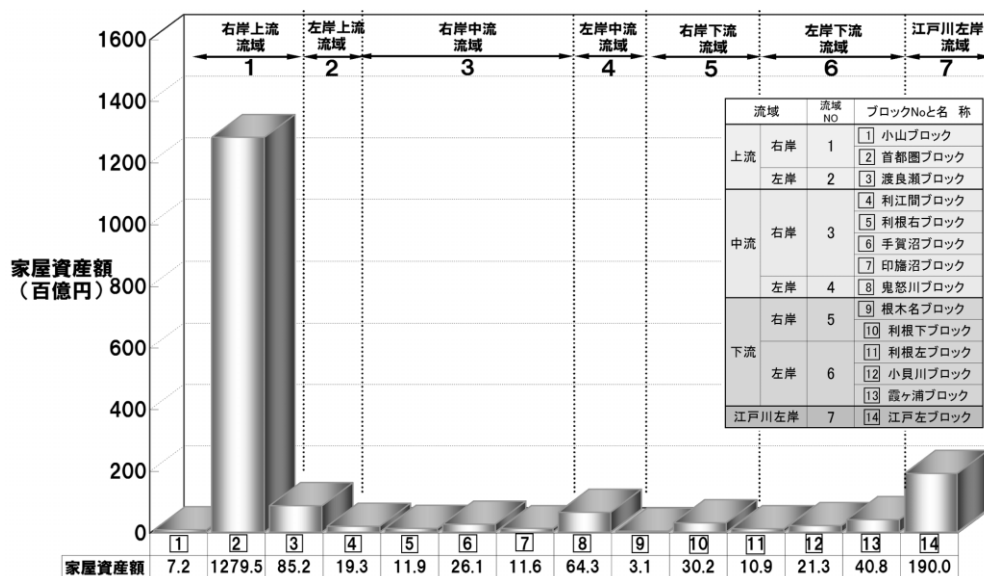


図-5 家屋資産額とその分布

Fig. 5 Residential assets and their distribution.

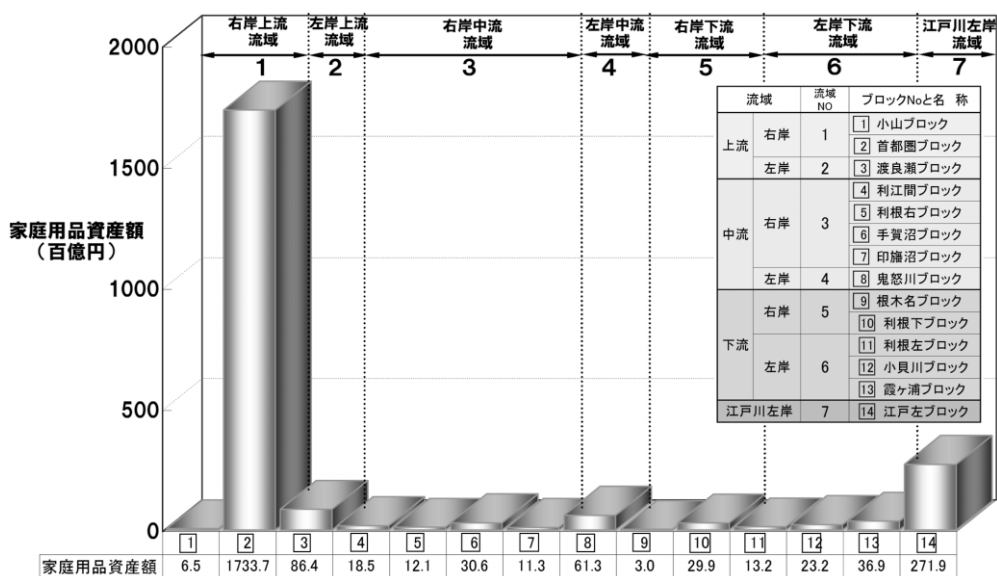


図-6 家庭用品資産額とその分布

Fig. 6 Household supply assets and their distribution.

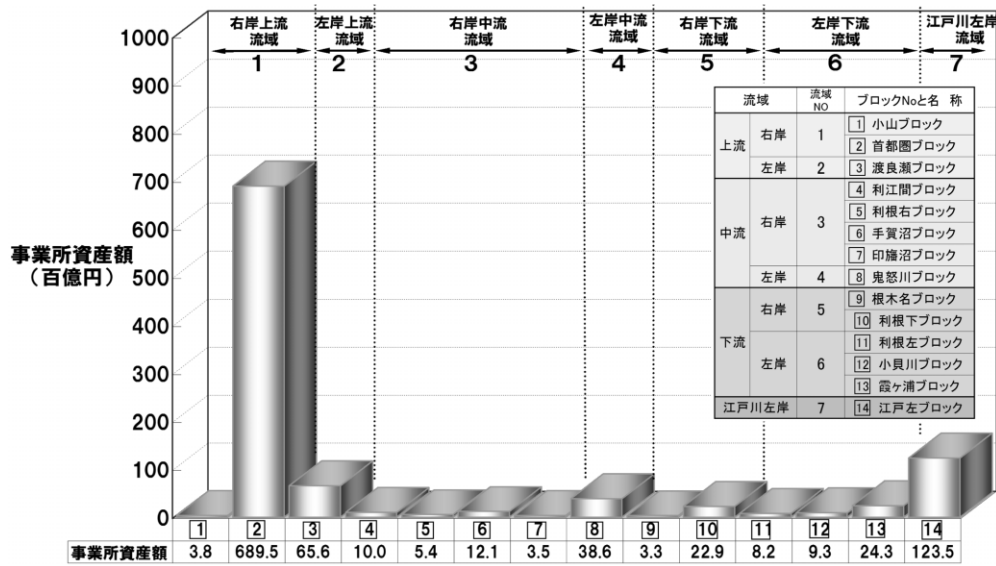


図-7 事業所資産額とその分布  
Fig. 7 Commercial assets and their distribution.

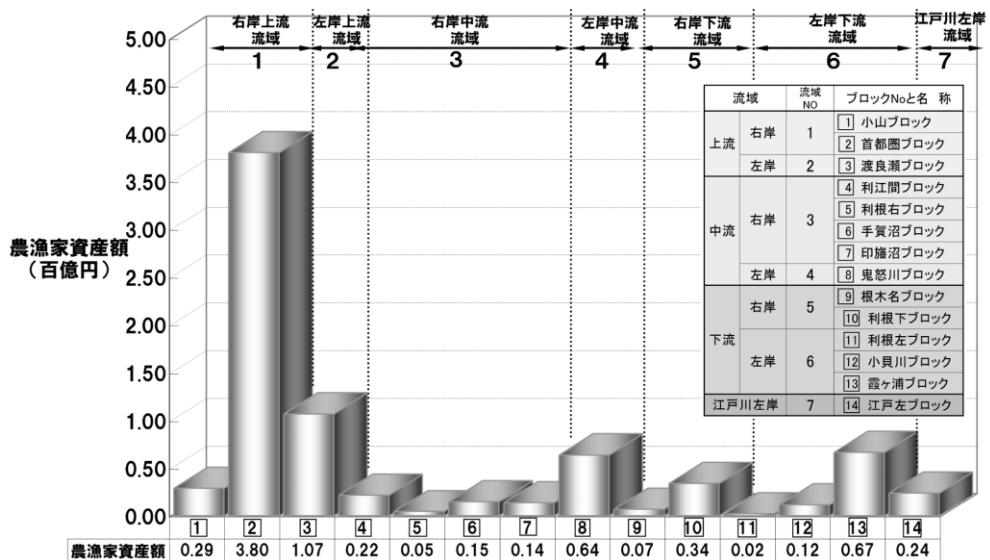


図-8 農漁家資産額とその分布  
Fig. 8 Farmers' and fishery workers' residential assets and their distribution.

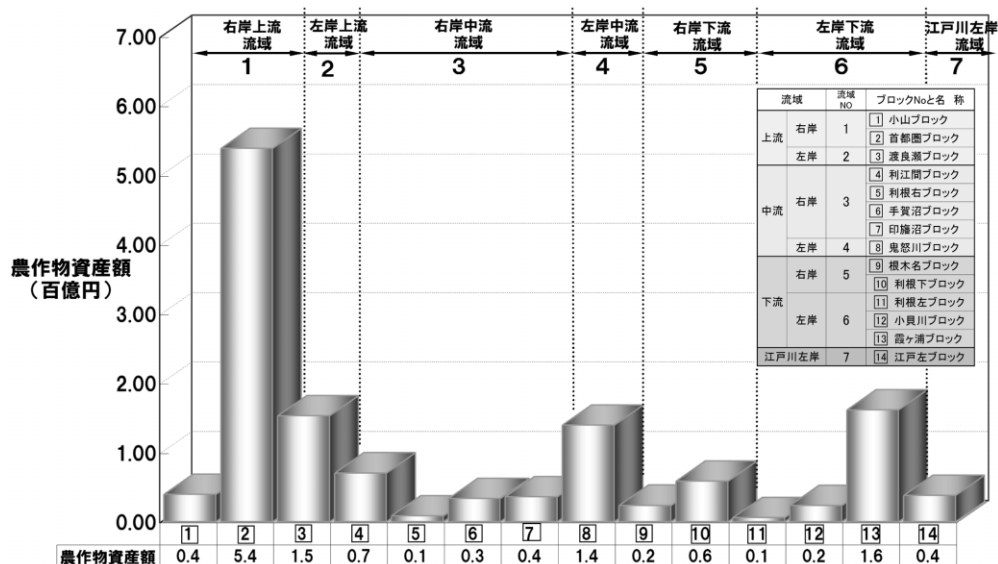


図-9 農作物資産額とその分布  
Fig. 9 Farm product assets and their distribution.

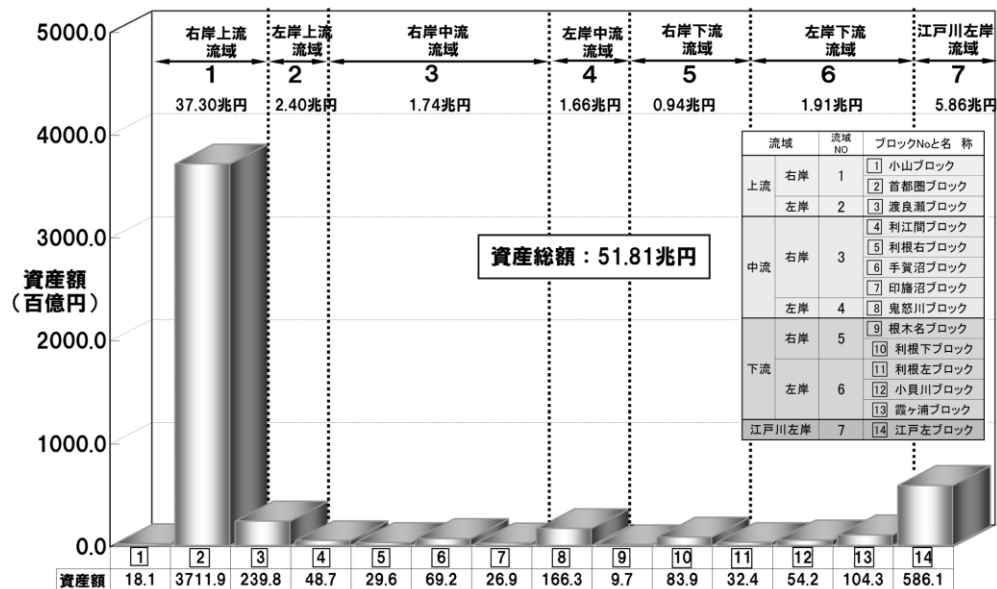


図-10 各ブロックの資産額とその構成  
Fig. 10 Assets of the blocks and their constitution.

表-1 資産額の構成と合計  
Table 1 Breakdown and total assets.

流域	面積 [km <sup>2</sup> ]	浸水区域内 人口 [万人]	浸水区域内 世帯 [万世帯]	1次資産 (家屋+家庭用品+農漁家)	2次資産 (商業+建設業+製造業)	3次資産 (国・小売・金融・保険+不動産+ 運輸通信+電気ガス+ サービス+その他)	農作物	氾濫原資産額 合計 [百億円]
				浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 資産額 [百億円]		
上流	1 右岸	1,014	537.0 5,296人/km <sup>2</sup>	222.3 2,192世帯/km <sup>2</sup>	3,031.0 299億円/km <sup>2</sup>	234.3 23億円/km <sup>2</sup>	458.9 0.6億円/km <sup>2</sup>	3,730.0 367.9億円/km <sup>2</sup>
	2 左岸	216	18.5 856人/km <sup>2</sup>	5.9 273世帯/km <sup>2</sup>	172.7 80億円/km <sup>2</sup>	36.7 17億円/km <sup>2</sup>	28.9 0.7億円/km <sup>2</sup>	239.8 111.0億円/km <sup>2</sup>
中流	3 右岸	202	15.7 777人/km <sup>2</sup>	4.9 243世帯/km <sup>2</sup>	141.8 70億円/km <sup>2</sup>	11.8 6億円/km <sup>2</sup>	19.2 0.7億円/km <sup>2</sup>	174.3 86.3億円/km <sup>2</sup>
	4 左岸	188	14.1 750人/km <sup>2</sup>	4.2 223世帯/km <sup>2</sup>	126.3 67億円/km <sup>2</sup>	16.1 9億円/km <sup>2</sup>	22.5 0.7億円/km <sup>2</sup>	166.3 88.5億円/km <sup>2</sup>
下流	5 右岸	146	7.3 500人/km <sup>2</sup>	2.2 151世帯/km <sup>2</sup>	66.6 46億円/km <sup>2</sup>	6.9 5億円/km <sup>2</sup>	19.3 0.6億円/km <sup>2</sup>	93.6 64.1億円/km <sup>2</sup>
	6 左岸	319	16.3 511人/km <sup>2</sup>	5.0 157世帯/km <sup>2</sup>	147.2 46億円/km <sup>2</sup>	13.6 4億円/km <sup>2</sup>	28.2 0.6億円/km <sup>2</sup>	190.9 59.8億円/km <sup>2</sup>
7 江戸川左岸		81	44.4 5,481人/km <sup>2</sup>	18.4 2,272世帯/km <sup>2</sup>	462.2 571億円/km <sup>2</sup>	21.9 27億円/km <sup>2</sup>	101.6 125億円/km <sup>2</sup>	586.1 723.6億円/km <sup>2</sup>
合計		2,166	653.3	262.9	4,147.8	341.3	678.6	5,181.0

## V. 被害額の推定 (想定被害額)

洪水被害額は、吉川が示したように、以下のように示すことができる。すなわち、堤防決壊によって生じる被害額は、決壊による氾濫で被災する氾濫原の被害ポテンシャルによる (山口ら, 1981; 吉川, 2004, 2005, 2008a, b, 2011)。

$$D = D(F, F_0, S) \quad (1)$$

$$\bar{D} = \int_{F_0}^{\infty} P_r(F) \cdot D(F, F_0, S) dF \quad (2)$$

ここに、 $D$ :被害額、 $F$ :外力 (降雨や流量、水位等と与えられる。被害額との関係では、通常は氾濫水深による)、 $P_r(F)$ :外力 $F$ の発生確率密度、 $F_0$ :治水施設的能力 (無被害で対応できる治水の容量)、 $S$ :被害ポテンシャル (氾濫等の水害により被害を受ける対象物の量)、 $\bar{D}$ :年平均 (確率平均) 想定被害額である。

この式を単純化し、近似して離散量で計算することになると、例えば直接被害額 $D_d$ の算定は次式で与えられる。

$$S_d = \text{SUM} (S_i; i=1 \sim 5) \quad (3)$$

$$D_i = S_i \times R_i (h) \quad (4)$$

$$D_d = \text{SUM} (D_i; i=1 \sim 5) \quad (5)$$

ここに、 $S_i$ :資産額、 $S_d$ :資産額の合計 (被害ポテンシャル)、 $D_i$ :資産別洪水被害額、 $R_i (h)$ :資産・浸水深別の洪水被害率 (浸水深 $(h)$ =氾濫区域の浸水位 $(H)$ -氾濫区域の地盤高 $(Z)$ )、SUM:集計記号、 $i=1$ :家屋、 $i=2$ :家庭用品、 $i=3$ :事業所、 $i=4$ :農漁家・農作物、 $i=5$ :公共土木施設等である。

ある。

被害額は、前述の資産額に浸水深に対応した被害率を掛けて算定される。被害率は、洪水後の被害額と浸水深の調査の結果から求められる。本研究ではその被害率として、定常的な調査により平均的な値として公表されている治水経済調査マニュアル (案) (国土交通省, 2005, 2008) に示された値を用いた。他の被害額 (間接被害額、公共土木施設等の被害額<一般資産被害額に一定の率を掛けて算定>) の算定も、同マニュアル (案) に示される方法、被害率等を用いて行った。すなわち、治水経済調査マニュアル (案) は、洪水被害の主要なものとして、家屋、家庭用品、事業所、農漁家、農作物が浸水することによって生じる一般資産被害額、間接被害額として事業所の営業停止等の被害額、および公共土木施設等 (道路、橋梁、下水道、都市施設、公益施設、農地、農業用施設) の被害額を算定するものである。これらの被害項目以外の各種の被害も想定することはできるが、このマニュアル (案) では算定されない。そして、その被害額の算定において、各項目の一般資産被害額は、それが存在する場所の浸水深に対応した被害率 (被害率=被害額/資産額<被害ポテンシャル>) を資産額に掛けることで求める方式をとっている。本論文では、治水経済調査マニュアル (案) に示される被害項目について、同マニュアル (案) に示される被害率を用いて、被害額の算定を行った。また、同マニュアル (案) では、公共土木施設等被害額は、一般資産被害額に上述の道路から農業用施設それぞれについて一定の比率を



掛けて求めるとしている。本論文では、その比率を用い、一般資産被害額にその比率を乗じて公共土木施設等被害額を算定した。ただし、公共土木施設等の被害額は、同マニュアル（案）では一般資産被害額の1.694倍としている（そのうち0.658倍は農業用施設に対するものとしている）が、大河川の氾濫の場合を適切に示しているかどうかという問題もあり、以下では、ほぼ農業用施設に対するものを除いた場合に相当する1.00倍と仮定して推計を行った。これは、利根川右岸の東京氾濫原等の都市化が進んで市街化率が高い地区では、土地利用の状況から都市型の氾濫域と農地等からなる氾濫原に区分されるが、都市型の氾濫域では、実際には農業用施設がないのにも係わらず被害額が加算されることを避けることにも配慮した仮定である。なお、この仮定を置かず同マニュアル（案）の値を用いると、公共土木施設等被害額は本論文の値よりも一般資産額に

0.658（農業用施設の比率）を乗じた値だけ大きなものとなる。

同マニュアル（案）の被害率、公共土木施設等の被害額推計にはいくつかの限界（例えば流速の考慮、公共土木施設等被害額の推計が超大規模な氾濫時の値として妥当性があるか等）もあると思われるが、そのような誤差も念頭に置きつつ、大まかに被害特性を理解する上で利用することにした。将来的には直接被害、間接被害、被害率、公共土木施設等の被害などの被害の構成や被害率等の調査・研究も行いたい、それには膨大な人的・費用的投資が必要であり、今後のテーマとしたい。

利根川氾濫原の被害額を、上記の資産額、被害率を用い、図-4に示した浸水深を用いて各ブロックの被害額（公共土木施設等被害額を含む）を算定すると、図-11のようである。

図-11に示したように、図-4に示す想定氾濫に

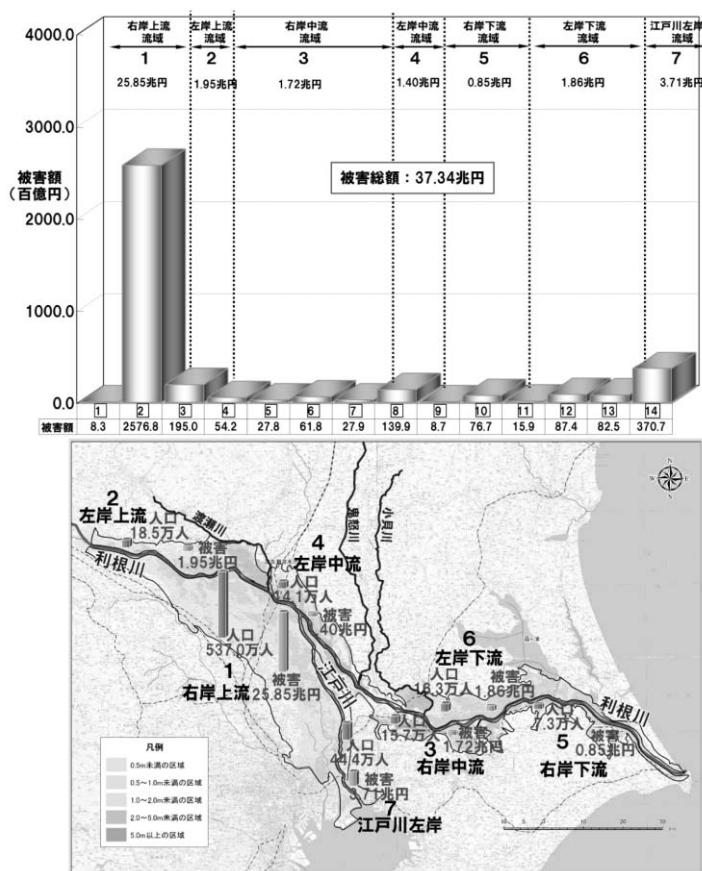


図-11 各ブロックの想定洪水被害額

Fig. 11 Assumed values of flood damage in the blocks.

表-2 洪水被害額の構成と合計  
Table 2 Breakdown and total value of flood damage.

流域	面積 [km <sup>2</sup> ]	浸水区域内 人口 [万人]	浸水区域内 世帯 [万世帯]	1次資産 (家屋+家庭用品+農漁家)		2次資産 (鉱業+建設業+製造業)		3次資産 (卸・小売+金融・保険+不動産+ 運輸通信+電気ガス+ サービス+公務)		農作物		氾濫原資産額 合計 [百億円]	氾濫原被害額 合計 [百億円] ※公共土木被害含む
				浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 被害額 [百億円]	浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 被害額 [百億円]	浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 被害額 [百億円]	浸水区域内 資産額 [百億円]	浸水区域内 被害額 [百億円]		
1 右岸 上流	1,014	5,296人/km <sup>2</sup>	2,192世帯/km <sup>2</sup>	222.3	3,031.0	940.4	98.8	458.9	188.6	5.8	3.6	3,730.0	2,585.1
				299億円/km <sup>2</sup>	93億円/km <sup>2</sup>	234.3	10億円/km <sup>2</sup>	45億円/km <sup>2</sup>	19億円/km <sup>2</sup>	0.6億円/km <sup>2</sup>	0.4億円/km <sup>2</sup>	367.9億円/km <sup>2</sup>	254.9億円/km <sup>2</sup>
2 左岸 中流	216	856人/km <sup>2</sup>	273世帯/km <sup>2</sup>	5.9	172.7	63.7	14.5	28.9	15.0	1.5	1.0	239.8	195.0
				80億円/km <sup>2</sup>	30億円/km <sup>2</sup>	36.7	7億円/km <sup>2</sup>	13億円/km <sup>2</sup>	7億円/km <sup>2</sup>	0.7億円/km <sup>2</sup>	0.5億円/km <sup>2</sup>	111.0億円/km <sup>2</sup>	90.3億円/km <sup>2</sup>
3 右岸 中流	202	777人/km <sup>2</sup>	243世帯/km <sup>2</sup>	4.9	141.8	63.8	7.5	19.2	11.1	1.5	1.0	174.3	171.7
				70億円/km <sup>2</sup>	32億円/km <sup>2</sup>	11.8	4億円/km <sup>2</sup>	10億円/km <sup>2</sup>	6億円/km <sup>2</sup>	0.7億円/km <sup>2</sup>	0.5億円/km <sup>2</sup>	86.3億円/km <sup>2</sup>	85.0億円/km <sup>2</sup>
4 左岸 中流	188	750人/km <sup>2</sup>	223世帯/km <sup>2</sup>	4.2	126.3	46.7	9.4	22.5	10.7	1.4	1.0	166.3	139.9
				67億円/km <sup>2</sup>	25億円/km <sup>2</sup>	16.1	5億円/km <sup>2</sup>	12億円/km <sup>2</sup>	6億円/km <sup>2</sup>	0.7億円/km <sup>2</sup>	0.5億円/km <sup>2</sup>	88.5億円/km <sup>2</sup>	74.4億円/km <sup>2</sup>
5 右岸 下流	146	500人/km <sup>2</sup>	151世帯/km <sup>2</sup>	2.2	66.6	27.0	3.4	19.3	10.2	0.8	0.5	93.6	85.4
				46億円/km <sup>2</sup>	19億円/km <sup>2</sup>	6.9	2億円/km <sup>2</sup>	13億円/km <sup>2</sup>	7億円/km <sup>2</sup>	0.6億円/km <sup>2</sup>	0.3億円/km <sup>2</sup>	64.1億円/km <sup>2</sup>	58.5億円/km <sup>2</sup>
6 左岸 下流	319	511人/km <sup>2</sup>	157世帯/km <sup>2</sup>	5.0	147.2	66.9	7.6	28.2	14.5	1.9	1.2	190.9	185.8
				46億円/km <sup>2</sup>	21億円/km <sup>2</sup>	13.6	2億円/km <sup>2</sup>	9億円/km <sup>2</sup>	5億円/km <sup>2</sup>	0.6億円/km <sup>2</sup>	0.4億円/km <sup>2</sup>	59.8億円/km <sup>2</sup>	58.2億円/km <sup>2</sup>
7 江戸川左岸	81	5,481人/km <sup>2</sup>	2,272世帯/km <sup>2</sup>	18.4	462.2	138.3	9.2	101.6	29.4	0.4	0.3	586.1	370.7
				571億円/km <sup>2</sup>	171億円/km <sup>2</sup>	21.9	11億円/km <sup>2</sup>	125億円/km <sup>2</sup>	36億円/km <sup>2</sup>	0.5億円/km <sup>2</sup>	0.4億円/km <sup>2</sup>	723.6億円/km <sup>2</sup>	457.7億円/km <sup>2</sup>
合計	2,166	653.3	262.9	4,147.8	1,346.8	341.3	150.4	678.6	279.5	13.3	8.6	5,181.0	3,733.6

よる被害額の総額は、公共土木被害額を含めると約37兆円となる。東京氾濫原の被害額は約26兆円で、氾濫原全体の被害総額の約70%を占める。

氾濫原全体の想定氾濫に対する被害額のうちの間接被害額は、営業停止損失、家庭および事業所における応急対策費用を上記マニュアル（案）に基づいて算定すると約1.6兆円となる。

なお、同様の推定を1947年洪水による東京氾濫原（右岸上流No.2, 首都圏ブロック）の氾濫の実績浸水区域・浸水深と現在の資産額、被害率を用いて算定すると約20兆円（公共土木施設等の被害額は除く）となる。また、現時点での東京氾濫原の資産と想定氾濫区域・水深を用いて推定した被害額は13.5兆円（公共土木施設等の被害は除く）である。この算定は、いずれも現時点の資産額（被害ポテンシャル）を用いて、1947年洪水時の浸水深と想定氾濫の浸水深を用いたものである。両者を比較すると、後者は前者に対して約6.5兆円、率にして約32%小さい。その理由としては、1954年洪水による氾濫以降の河川や農業用排水路の整備、江戸川や荒川などの域外への排水施設（放水路、ポンプ場）の整備等（吉川, 2006）の効果によるものと推察される。

氾濫区域（ブロック）毎の特性をみると、①上流右岸ブロックの氾濫（想定氾濫）では約537万人が被災し、被害額が約26兆円と大きい、②貯留型の氾

濫となる上流左岸ブロックの氾濫は被災人口約19万人、被害額約1.9兆円で、上流右岸ブロックに比較すると相対的には小さい、③中流域の左右岸、下流域の左右岸からの氾濫による被災人口および被害額は相対的にみるとさらに小さいことなどが分かる。

## Ⅵ. 堤防越水の可能性と氾濫原（各ブロック）の資産、想定被害額からの堤防システムの整備・管理に関する考察

堤防決壊による想定被害額を考慮した河川の整備・管理について、いくつかの視点から考察すると以下のようである。

### 1) 利根川の現況河道における洪水時の河川水位で見た場合

利根川の1982年の洪水時の水位は、図-12に示すとおりである（吉川, 2011）。また、現況において計画洪水流量が流れた場合の水位は図-13に示すようになると推定される（Yoshikawa and Ito, 2011）。図-12からは、昭和57（1982）年洪水の最高水位と計画高水位の差から、中流部（80 km～125 km）に余裕がないことが分かる。図-13からは、江戸川分派点から小貝川合流点（80 km～125 km）までの中流部では、洪水流量が増加するとともに、洪水水位が上流と下流より早く計画高水位を越え、さらには

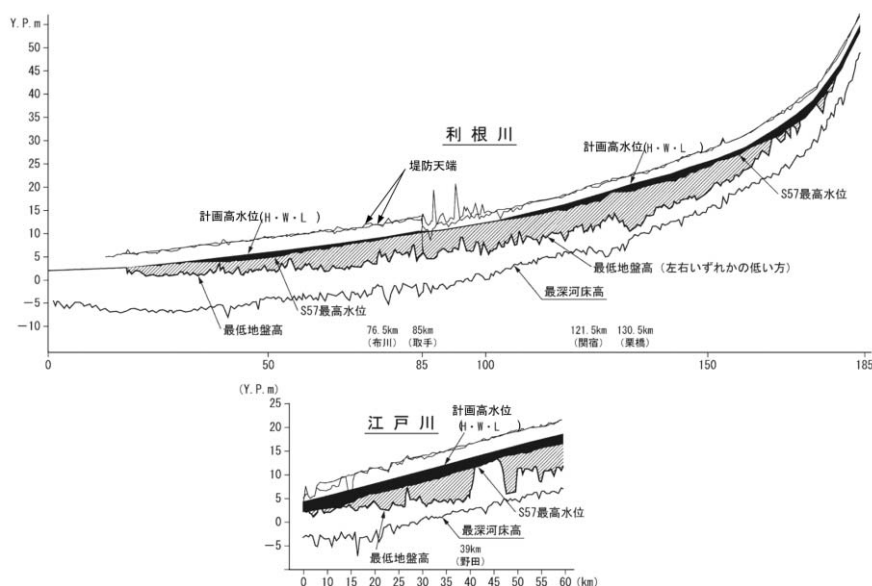


図-12 利根川の実績洪水時の水位  
Fig. 12 Actual water levels of the Tone River.

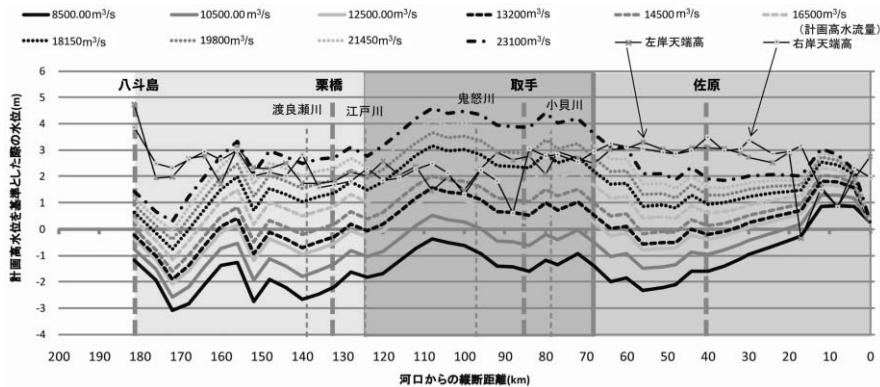


図-13 利根川で計画高水流量等が流れたときの推定水位

Fig. 13 Assumed water level in the event of design flood discharge or other event in the Tone River.

表-3 河川堤防の計画レベル、安全度の国際比較 (吉川, 2009, 2011)

Table 3 International comparison of design level and safety of river levees (Yoshikawa, 2009, 2011).

堤防計画状況	日本	中国	オランダ	ハンガリー	米国
計画のレベル =安全度	一つの河川では規模等に応じて一様の安全度 ・ $\sim 1/200$ 年	1級 $\geq 1/100$ 年 $\sim$ 5級 $\geq 1/10$ 年	・場所により安全度は変化. ライン川 上流:1/1,250年規模(淡水) 中流:1/2,000 $\sim$ 1/4,000年規模 下流:1/10,000年規模(海水)	・原則1/100年 都市などは1/1,000	・代表的河川の連邦堤防では一般的には1/100,都市域や重要区間は1/500年.山付堤防農地部は1/50年相当. (ただし,自治体の判断により1/200年といったケースもある.)
①堤防の高さ=計画高水位+余裕高. そのうちの余裕高の最低値	200 m³/s $\rightarrow$ 0.6 m $\sim$ 10,000 m³/s $\rightarrow$ 2.0 m	1級:1.0 m $\sim$ 5級:0.5 m	・河川では平均0.5 m ・海岸付近は0.5 m以上	・1.0 m一定	・解析によって必要な高さを設定
②天端幅の最低値	500 m³/s未満 $\rightarrow$ 3 m $\sim$ 100,000 m³/s以上 $\rightarrow$ 7 m	・堤防の高さに応じ変化:3 $\sim$ 5 m	・最低3 m.道路と兼用した場合は道路幅.	・最低4 m $\sim$ 最大 6m	・最低:約3.1 $\sim$ 約3.7 m ※一般道路と兼用した場合,緊急対策などで上記の幅を広くする場合あり.
③法勾配	・原則として法勾配2割	・原則として法勾配3割	・原則として法勾配3割	・原則として法勾配3割	・水防や維持管理の観点から天端幅3.05 m,法勾配2割. (安定性評価から決める場合は2割 $\sim$ 5割程度.)
国の政策・その他	—	・洪水の遊水対策 ・植林等による流出抑制政策	・洪水の貯留による河川水位の低下.	—	・上下流の堤防高は,背後地における資産の大小に対応して設定.

堤防天端を越えることが分かる. なお, 図-13の縦線は, 渡良瀬川, 鬼怒川, 小貝川の合流地点, 江戸川の分派地点, および利根川の主要な地点名を示している. 各ブロックとの関係は, 概ね江戸川分派点より上流が上流のブロックに, 江戸川分派点から小貝川合流点までが中流のブロックに, そして小貝川合流点より下流が下流ブロックに対応している.

これらのことから両図より, 現況河道では, 中流区間(左岸中流No.8ブロック, 右岸中流No.5および左岸下流No.11, No.12ブロック)での越水による決壊の可能性が高いことが分かる. この区間の想定氾濫による洪水被害額は, 東京氾濫原(右岸上流No.2ブロック)に比較してはるかに小さく, 現況河川は, 越水による堤防決壊の場合でみると, 想定被害額が



小さいブロックで決壊の危険性が高いことが分かる。

なお、1947年の堤防決壊は、右岸上流No.2ブロック（東京氾濫原）で生じており、それは、最も想定氾濫被害額が大きなブロックでの決壊であり、最悪の堤防決壊であったといえる。

## 2) 氾濫域の資産に応じた河川の安全度の設定

堤防で国土や地域、資産を守ってきた国々での河川堤防の安全度の設定について調査すると表-3のようである（吉川，2009，2011）。この表には計画のレベルと堤防の規格を示しているが、計画のレベルの設定にあたって、オランダ、中国、ハンガリーでは、同一河川であっても氾濫原の資産、被害額に応じて計画のレベルを変えており、氾濫域の資産に応じて河川の安全度を設定し、既にはほぼその整備が完了している（吉川，2011）。日本では、水系の重要度に応じて河川の安全度の将来目標を設定しているが、同一河川では、安全度は同じとし、氾濫原の資産に応じて安全度を変えることはしていないこと、そしてその安全度の将来目標は、現在は全く達成されていないということが、これら3つの国々とは異なっている点である。

オランダでは、海からの塩水の氾濫に対しては1/10000、ライン川からの真水の氾濫に対しては1/1250、そしてその間は1/4000～1/2000とするなど、被害の深刻さに応じて安全度を変えている。中国の

長江等では、かつては重要堤防、近年では1級堤防からいくつかの等級で、氾濫原の想定被害の程度に応じて安全度を変えている（吉川，2011）。ハンガリーのダニューブ川等では、1/100を基本としているが、重要3都市の氾濫原を守る堤防は1/1000として安全度を設定している。

我が国では、同一河川では、ある確率で発生する計画洪水に対して、計画高水位を設定し、それに流量規模に応じた余裕高を加え、のり勾配も同じで堤防を整備しているのが普通である。すなわち、氾濫による被害の考慮はなく、水文・水理的な確率のみによって堤防を整備し、管理している。

これに対して、上述の国々のように、氾濫域の資産、想定被害額に応じて堤防の安全度（設計のレベル、計画で対象とする洪水の計画高水位、堤防の幅＜天端幅＞、高さ＜計画高水位に余裕高を加えた高さ＞、のり勾配等。）に差をつけることも考えられる。それにより、堤防決壊による想定被害額を少なくすることができ、決壊の可能性のある区間が特定されることから、水防活動や危機管理上の対応もよりの確にできる可能性が高まると想定される。

この面からは、利根川では右岸上流の東京氾濫域側の堤防の安全度を高くすること（これは計画で想定する状態のみならず、現実の河川の実管理においても同様である。以下同じ）、あるいは深い浸水が

表-4 堤防の決壊の可能性が一樣と仮定した場合の各ブロックの堤防決壊の可能性、想定被害額等  
Table 4 Probability of levee collapse, assumed value of damage etc. in the blocks, assuming a uniform probability of levee collapse.

流域	ブロックNO	ブロック名称	河川と接している距離 $L$ (km)	被害額 $D$ (兆円)	$L \cdot D$ (兆円・km)
1 右岸上流	1	小山川ブロック	11.7	0.083	1.0
	2	首都圏ブロック	104.5	25.768	2,692.8
2 左岸上流	3	渡良瀬ブロック	53.0	1.950	103.4
3 右岸中流	4	利江間ブロック	34.8	0.542	18.9
	5	利根右ブロック	19.5	0.278	5.4
	6	手賀沼ブロック	3.0	0.618	1.9
	7	印旛沼ブロック	12.0	0.279	3.3
4 左岸中流	8	鬼怒川ブロック	39.4	1.399	55.1
5 右岸下流	9	根木名ブロック	7.6	0.087	0.7
	10	利根下ブロック	56.1	0.767	43.0
6 左岸下流	11	利根左ブロック	13.1	0.159	2.1
	12	小貝川ブロック	5.2	0.874	4.5
	13	霞ヶ浦ブロック	78.3	0.825	64.6
7 江戸川左岸	14	江戸左ブロック	45.6	3.707	169.0
7流域	14ブロック	合計	483.8	37.336	3,165.6

予想される氾濫区域の堤防の安全度を高くすることも考慮に値するであろう。

また、高規格堤防（堤防越水によっても決壊しない幅の広い堤防）のこれまでの計画では、河川の両側に高規格堤防を整備することとしているが、背後地の資産・想定被害額の大きな片側のみとすることも考えられてよい。更に、背後地の守るべき資産が大都市ほどではない氾濫域については、堤防からの越水を許容するその高さは計画高水位までとし、その上に余裕高に相当する通常の堤防を設けることが望ましい。すなわち、高規格堤防を整備する箇所以外も、計画高水位を念頭に整備されているので、河川整備のバランス上も良い。また、余裕高相当の通常堤防部分の越水による氾濫でも、高規格堤防であれば決壊せず、その越水による水位低下は上下流に及び、整備箇所以外にも寄与するという効果の面からも望ましい（吉川, 2011）。

### 3) 堤防の決壊の可能性が一樣と仮定した場合

連続した河川堤防システムを考える場合、それは河川断面、堤防断面という“点”でみるのではなく、長さ方向に“線”でみる必要がある。その場合、一般的には長さ方向に存する堤防決壊のリスクは、堤防延長が長いほど大きくなる。それは、堤防の洗掘による決壊、堤体浸透による堤防決壊、堤体内の樋管等の構造物周りの漏水による堤防決壊のみでなく、堤防越水による決壊についてもいえることである。

連続した河川堤防システムにおいて、全区間の水文・水理学的な安全率（洪水発生時の超過確率）が一樣で、洪水水位が計画高水位を超える可能性、さらには計画高水位に余裕高を加えた堤防天端を超える可能性が等しいと仮定すると、越水による堤防決壊の可能性は、どの区間でも均等となるといえる。すなわち、連続した河川堤防システムを、洪水外力との関係、堤防の高さや厚さ等の形状と堤体、基盤の土質等を単純化することで、概念的には、対象とする全区間で、計画洪水流量に対応する計画河道が完成している場合に相当すると考えてよいであろう。その場合、越水による堤防決壊の可能性は、各ブロックの堤防延長に比例するとみることができよう。その場合の越水による堤防決壊の可能性と各氾濫区域（各ブロック）の想定被害額、および被害額に堤防決壊の可能性（ブロックの堤防延長で与える）を掛けた値を表-4に示した。表-4より、以上の仮定の下で、東京氾濫原は決壊の可能性が最も高く、か

つ1回の決壊の場合の被害額も最も大きいことが分かる。

以上の考察は、概念を具体化するためのきわめて単純化した一試算であるが、堤防の決壊確率を定量化することは、越水による決壊に加えて、洗掘、浸透・漏水による場合もあり、より複雑な検討が必要である。したがって、この試算は、堤防延長が長くなることで決壊確率が増し、1箇所でも決壊すると表示されているような被害が発生する、ということを概念的に示した検討例である。

### 4) 超過洪水を考慮した場合

超過洪水を考慮した場合は、本論文で着目している被害の視点からの検討が極めて重要となる。

ここで、超過洪水は次のように定義できるものである。すなわち、河川流域で想定している治水施設（上流のダム、中流域の遊水地などの洪水調節施設、河道の整備や堤防整備）が完了し、その状況で計画高水の洪水が流れたときに計画高水位となるが、その計画高水位を超える洪水が計画超過洪水である。さらに洪水の規模が大きくなって、堤防天端を超える洪水は、堤防天端を超える超過洪水である。しかし、計画で想定する治水施設の整備には、これまでの投資水準が超長期にわたり継続できたとしても、数10年から100年以上の年数が必要とされる（吉川, 2011）。このような投資の継続は容易でないこと等を考慮すると、計画に対して施設等の整備が完了した河川を対象とすることは現実的でない。現実には、現況河道、現況の堤防システムで、計画高水位を超える洪水が現況の能力を超える超過洪水であり、堤防天端を超える洪水は、堤防天端を超える超過洪水である。その超過洪水を対象として考察することが適当といえる。以下は、主として現況河道、現況の堤防システムでの超過洪水を対象として考察する。

河川堤防は、河川管理施設等構造令（国土開発技術研究センター・日本河川協会, 2000）に示されるように、河川堤防は計画高水位以下の洪水の通常的作用に対して整備されるものであり、完成した堤防でも計画高水位を超える超過洪水、さらには堤防天端を超える超過洪水が発生すると堤防決壊しても不思議ではない、というものである（吉川, 2011）。堤防が決壊した場合、本論文IV, V, で示したような被害が発生する。その超過洪水での堤防決壊と氾濫、その際に生じると推定される被害額から、長く連続した利根川の河川堤防システムについて考察すると以下のことがいえる。

①計画完成後の河道と堤防システム：利根川長期計画で必要とされる治水施設の整備が完了した後に計画超過洪水が発生した場合、水理・水文学的な確率での氾濫の可能性は一樣となり、いわゆる氾濫発生確率の公平性は確保される。しかし、どこが決壊しても不思議ではなく、被害の小さな氾濫区域での氾濫の可能性も、被害の大きな氾濫区域での氾濫の可能性もあり、被害の小さな氾濫区域と大きな氾濫区域の区別がなく、被害の面では合理的とはいえない。

②現況の河道と堤防システム：現況の河道、堤防システムで超過洪水が発生した場合、現況能力を大きく超える洪水は上流で氾濫すると推察されるが、上流の左右岸で氾濫発生の可能性は同じであり、氾濫が生じた場合の被害額の大小の区別がなく、被害からみた合理性は確保されていない。しかし、現況の能力を少し超える洪水でみると、利根川の上流、中流、下流の洪水を計画高水位以下で流す能力との関係で中流域（そこには鬼怒川の洪水を調節する田中・菅生・稲戸井の遊水地があり、これまでは氾濫区域は主として水田として利用されてきた区域）で氾濫が発生すると想定され、氾濫が発生した場合の被害額は上流での氾濫よりは小さく、被害の面では合理的であるといえる。

③1954年当時の河道と堤防システム：当時の河道と堤防システムで計画高水位、さらには堤防天端を超える洪水で堤防が決壊し、図-3に示した氾濫が発生した。この氾濫は、そもそも計画高水位をこえる超過洪水であり、さらには堤防決壊箇所下流の鉄道橋梁に流木や草が体積して河積を阻害したことで洪水水位が上昇し、堤防が決壊したものであるが、堤防システムとしては、決壊の可能性が高い場所での堤防決壊であったといえる。当時の堤防決壊箇所付近の河川堤防は下流側から堤防の強化がなされてきていたが、左岸側に比較して右岸側（つまり東京氾濫原を抱える側）の堤防が低かった（吉川, 2008b）。結果として、被害の面からみると最悪の氾濫が起こるべくして起こったといえる。すなわち、堤防システムの整備・管理という面で教訓を残した状態であったといえる。

④利根川の堤防システムの整備・管理についての一般的な考察：

- ・上流氾濫域での氾濫は、氾濫による洪水水位の低下により、中流と下流、江戸川の洪水水位を低下させる（Yoshikawa and Ito, 2011）。中流域での氾濫は、

下流の洪水水位を低下させるが、上流および江戸川の洪水水位の低下はそれほど大きくない。下流域での氾濫は、その場所にもよるが、中流域の水位を一部低下させはするが、上流域の洪水水位は低下させない。

- ・左右岸でみると、上流では右岸側での堤防決壊により生じる被害額は、左岸側での堤防決壊による被害額よりはるかに大きい。中流の左右岸、下流の左右岸での氾濫による被害額は、上流右岸側での氾濫による被害額よりは相対的に小さい。ただし、被害額は相対的に小さくとも、浸水の深刻さでみると、上流左岸側、中流域、下流の小貝川合流点上流ブロックでの浸水深は5 mを超え、深刻な浸水となる。

- ・これらの特性を考慮した河川堤防システムの在り方としての知見は以下のとおりである。すなわち、超過洪水が発生した場合を考慮すると被害の視点が重要となるが、堤防決壊による被害額の相対的に小さな氾濫区域での氾濫の可能性が高く、被害額が大きな氾濫区域での氾濫の可能性を低くする河川堤防システムの整備・管理が被害の面からは合理性が高い。また、超過洪水の発生を前提として、氾濫の可能性が相対的に高い場所を設定することは、水防活動の備えと洪水時における集中、避難の対応等の面で、危機管理上も合理的といえる。

- ・超過洪水による被害の発生は避けられないものであり、その際に最悪の事態（例えば1947年の利根川の堤防決壊）を避け、被害を最小（可能な範囲で極小）とする、危機管理上の対応を効率的・的確にするためには、被害ポテンシャル、洪水被害の視点が重要であり、利根川においては氾濫ブロックの被害面での特性に応じて河川堤防システムの整備・管理が考えられてよい。

- ・超過洪水に対して、被害の観点からの具体的な対応もいくつか想定される。堤防が決壊した場合に、氾濫原の資産額が大きく、大きな被害が発生する上流右岸の東京氾濫原側の堤防について、中国の長江等で行っているように、資産額が相対的に小さな他の場所の堤防より堤防を高くしておく（余裕高を大きくしておく）、堤防を厚くしておく、あるいは逆にその他の場所の堤防を相対的に低くしておく等の対応である。しかし、これらについては、そのための投資の可能性、社会的な受容性の検討が必要であり、今後の課題である。なお、

あらゆる洪水外力でも決壊しない高規格堤防に関しては、概念上はあり得ても、投資の可能性から河川全川にわたる整備はほぼ不可能と考えられる。しかし、整備区間と未整備区間の安全度が異なることを生かし、背後地に大規模な資産を抱えている区域を守るための高規格堤防化は、それなりに意味を持つものと考えられる(吉川, 2008b, 2011)。

## Ⅶ. 結語

本論文では、利根川流域を対象に、被害の視点からの分析と考察を行った。すなわち、

- (1) 利根川の氾濫原を地形、治水地形、氾濫実績等から区分(ブロック分け)した。
- (2) その区分された氾濫区分(ブロック)の浸水特性を氾濫実績および想定氾濫解析の結果を用いて明らかにした。
- (3) 現況河道の水理学的な視点からの安全性を、実績洪水および水理解析から示した。
- (4) さらに、氾濫区分(ブロック)の被害ポテンシャル(資産額)を明らかにした。
- (5) そして、実績洪水の現況での再現や想定氾濫という氾濫が生じた場合の被害額を算定し、被害額とその分布について明らかにした。
- (6) 以上をもとに、被害の視点から、長く連続した利根川の堤防システム評価を行い、現状の河川堤防システムの特徴等を明らかにした。

これらの検討結果は、水理・水文学的な河川の安全度の評価の視点に加えて、連続した河川堤防システムの管理(整備を含む広い意味での管理)に重要な視点を与えるものである。それは、本文で述べたような、被害の視点から最も安全性を確保すべき堤防区間はどこか、あるいは最悪の被害を回避するためにはどのような河道・堤防の整備・管理が必要か、さらには被害の観点からの河川堤防システムの管理の方向などの知見である。このことは、堤防で国土を守っている国々で実践されている堤防管理との比較検討でも示された知見である。

本論文は、被害の視点からの河川堤防システムの管理に関する論文であり、堤防システム管理の全体的な基本論文(吉川, 2011)、水理・水文学的な論文(Yoshikawa and Ito, 2011)とともに堤防管理の基本となると考えている。

また、今後さらに研究を発展させて、河川堤防システムについての水文確率的な安全性、公平性の視点に加えて、被害額の視点からより具体的、定量的な検討を行うとともに、その社会的受容性、投資の可能性等も含めた検討を進めていきたいと考えている。

## 引用文献

- 広長良一・八島 忠・坂野重信 1954. 低平地緩流河川の治水計画について. 土木学会論文集 20 ; 1-40.
- 国土開発技術研究センター・日本河川協会編 2000. 改定解説 河川管理施設等構造令. 山海堂 ; 106-107.
- 建設省 1977. 昭和22年9月洪水報告書集(カスリーン台風) 建設省関東地方建設局・利根川上流工事事務所 昭和52年10月 ; 13-17.
- 国土交通省 2005. 治水経済調査マニュアル(案)平成17年4月. 国土交通省河川局 ; 44-58.
- 国土交通省 2008. 治水経済調査マニュアル(案)(平成17年4月1日付け国河計調第2号) 各種資産評価単価及びデフレーター 平成20年2月改正. 国土交通省河川局河川計画課 ; 1-20.
- Nagasaki T, Nakamura Y, Yoshikawa K. 2010. Considering estimated damages in management of continuous levee system safety-Empirical study of the Tone River system-. 12th JSCE International Summer Seminar (Chiba, Japan) ; 123-126.
- 山口高志・吉川勝秀・角田 学 1981. 河川流域における洪水災害の把握と治水対策に関する研究. 土木学会論文報告集 313 ; 75-88.
- 吉川勝秀 2004. 人・川・大地と環境. 技報堂出版 ; 185-187.
- 吉川勝秀 2005. 河川流域環境学. 技報堂出版 ; 60-70.
- 吉川勝秀 2006. 低平地緩流河川流域の治水に関する事後評価的考察. 水文・水資源学会誌19 ; 267-279.
- 吉川勝秀 2008a. 流域都市論. 鹿島出版会 ; 171-172.
- 吉川勝秀編著 2008b. 河川堤防学. 技報堂出版 ; 234-237.
- 吉川勝秀 2009. 河川の管理と空間利用. 鹿島出版会 ; 40-41.
- 吉川勝秀 2011. 河川堤防システムの整備・管理に関する実証的考察. 水文・水資源学会誌24 ; 444-459.
- Yoshikawa K, Ito M. 2011. Hydrological evaluation and management of river levee systems. 4th ASCE (American Society of Civil Engineers)-EWRI (Environmental & Water Resources Institute) International Perspective on Water Resources & the Environment (Singapore), in CD-ROM.

(受付：2010年10月25日，受理：2012年4月2日)



## Maintenance and Management of a Continuous River Levee System Discussed from a Damage-Based Viewpoint

Takemi NAGASAKA <sup>1)</sup>    Yousuke NAKAMURA <sup>2)</sup>    Katsuhide YOSHIKAWA <sup>3)</sup>

<sup>1),2)</sup> Mitsui Consultants Co., Ltd.

(1-4-15 Takadanobaba, Shinjyuku-ku, Tokyo 169-0075 JAPAN)

<sup>3)</sup> Department of Transportation Engineering and Socio-Technology,  
College of Science and Technology, NIHON University

(7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba, 274-8501 JAPAN)

Maintenance and management of levee systems in Japan are based on the design flood level, assuming that a design flood might occur. Based on the design flood, the safety of certain zones of a river is regarded as stochastically uniform between the left and right banks and between the upper and lower streams. However, assumptions often differ from reality. River safety often entails differences between upper and lower streams, for instance.

Maintaining and managing such a levee system requires hydraulic analysis of damage to the levee system and additional analysis of the destruction that would result from such damage.

In this study, we analyzed damage-related properties of a river by estimating the damage from levee system collapse. Comparisons with foreign examples and from a damage-based viewpoint supported a basic discussion of the direction of the management of river levee systems. The discussion was focused on the Tone River which is the largest river in Japan and analyzed quantitatively. This approach is also applicable to analysis of other river basins.

**Key words :** river levee, river levee system, flood damage potential, value of damage, international comparison