

木曽川流域における明治期以降の堤防整備が市街化に及ぼした影響の分析

松川 涼¹・中居 楓子²・中村 晋一郎³・秀島 栄三⁴

¹学生会員 名古屋工業大学 工学部社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: r.matsukawa.440@stn.nitech.ac.jp

²正会員 名古屋工業大学助教 工学研究科社会工学専攻 (同上)
E-mail: nakai.fuko@nitech.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: shinichiro@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋工業大学教授 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: hideshima.eizo@nitech.ac.jp

明治期以降、日本における不連続堤防は、近代治水事業により連続堤防へと変化を遂げた。これにより、堤内地では洪水の頻度が減り、人口や資産が氾濫原に立地するようになった一方で、ひとたび洪水が起こると大きな被害に至る状況となった。このような社会水文現象は「堤防効果」と呼ばれている。本研究では、堤防効果において仮定される堤防整備と市街化の関係性について、木曽川流域を対象に検証した。各地点における上流と下流の連続堤防整備が市街化に及ぼす影響を、固定効果モデルで推定した結果、下流の連続堤防の整備が市街化を進めることが明らかになった。また、ラグ変数を用いた分析により、「堤防整備による安全度の向上が市街化を進める」というよりも「市街化を進めた地域に、その後堤防が整備される」という時間的前後関係が確認された。

Key Words: levee, urbanization, infrastructure, flood, watershed management, Kiso River Basin

1. はじめに

人間は、古代四大文明の時代より川の近くで生活していた。日本では、弥生時代の海岸線の後退により出現した湿地や沖積平野において、稲作を中心とした集落ができたことが始まりである。また江戸時代には、舟運による物流が当時人口約 120 万人を超える世界最大都市の江戸を支えるなど、川は社会、経済の発展において重要な役割を担っていた¹⁾。一方で川の付近では洪水が起き、氾濫原では人間に大きな被害を与えていた。そこで用いられた治水構造物の一つが堤防であった。19 世紀後半まで、堤防は輪中堤や霞堤などの不連続堤防であったため、氾濫原では洪水の頻度が高かった。しかし、日本では開国、明治維新を経て、西洋から連続堤防の技術が導入された。これにより、堤内地で洪水の頻度が減った結果、人口や資産が集中し、堤防を超過する洪水がひとたび発生すると大きな被害が生じる状況となった。このような一連の社会水文現象は「堤防効果²⁾」と言われる。

Baldassarre et al.³⁾は、洪水を避けるために流域の人口密度を減らすことで対策する緑の社会と、堤防高を上げる

ことで対策する技術の社会を定義したうえで、堤防効果を緑の社会から技術の社会への変遷として表現した。そして、堤防の嵩上げ、治水安全度、人口や資産の量、河川からの距離、洪水への認知のダイナミクスとして、概念的にモデル化している。実証的な例として、Collenteur et al.⁴⁾によるアメリカを対象とした研究では、洪水による大規模な被害が発生している地域では、人口増加率が高いことを回帰分析によって明らかにしている。また、伊藤・中村⁵⁾は、日本の木曽川流域を対象におよそ 120 年間の堤防整備の経緯と土地利用の変化を分析し、洪水の頻発地域や堤防付近の都市化の圧力を受けやすい地域で都市開発が進んだことを明らかにした。しかし、人口や資産の立地変化の背景には、堤防整備による安全度の向上だけでなく、その他のインフラ整備なども絡んだ複合的な要因がある。したがって、堤防効果を実証的に検証するためには、それらの複合的要因を分離させることが必要である。そこで、本研究では伊藤・中村⁶⁾の検証に加え、市街化に影響を与えるその他の要因（駅の整備や工場などの産業立地）を考慮した統計分析を行い、堤防整備が市街化に与えた影響を明らかにする。

2. 分析対象地域

(1) 木曾川流域の概要

木曾川水系は、木曾三川と呼ばれる木曾川、長良川、揖斐川の3河川を幹川として、それぞれ濃尾平野を南流し、伊勢湾に流れ込む流域面積9100 km²、流域内人口 190 万人の大河川である⁷⁾ (図-1)。

木曾三川の水害におけるもっとも古い記録としては、645 年の西濃粕川の大洪水があり、その後も数多くの水害が発生した。特に近年の大きな被害としては昭和 34 年 9 月洪水 (伊勢湾台風) が挙げられる。伊勢湾台風では長良川上流部及び牧田川右岸根古地地先で堤防が決壊し、東海三県で 5000 人あまりの被害が発生した。また、昭和 51 年 9 月洪水では、長良川平野部での記録的降雨と 70 時間を超える出水により、堤防が軟弱化したことによる長良川右岸、安八町大森地先での破堤に加え、いくつかの支派川で内水氾濫が起きた^{8)⑩⑪)}。

木曾川の堤防の歴史は 1609 年の木曾川左岸の尾張の国を取り囲む約 50 kmにもわたる御囲堤を始まりとして、輪中が形成された。さらに近代以降、1887 年から 1912 年には Johannis De Rijke の助けもあり、木曾川下流改修による木曾川三川の完全分流が開始され、木曾川上流改修などの改修を経て現在に至る^{8)⑪)}。

木曾川流域の人口 (図-2) は、1890 年代から 1940 年代にかけては、基本的には増加が続き、第二次世界大戦後は敗戦後の経済の回復と発展により、さらに増加した。

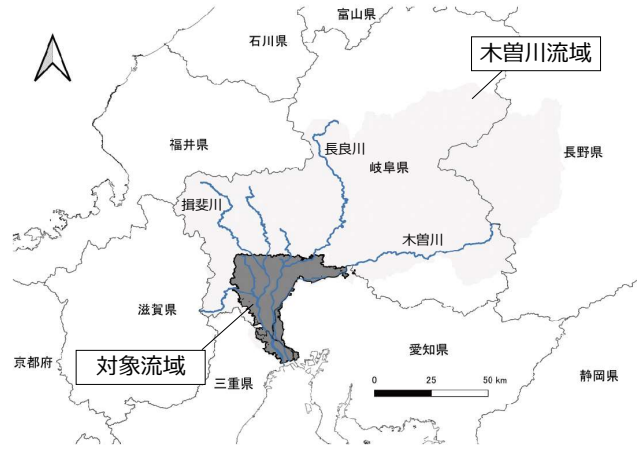


図-1 木曾川流域図および本研究の対象地域

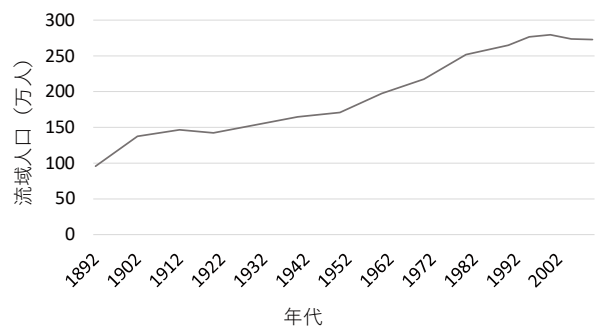


図-2 木曾川三川の流域人口の経年変化⁸⁾⁹⁾

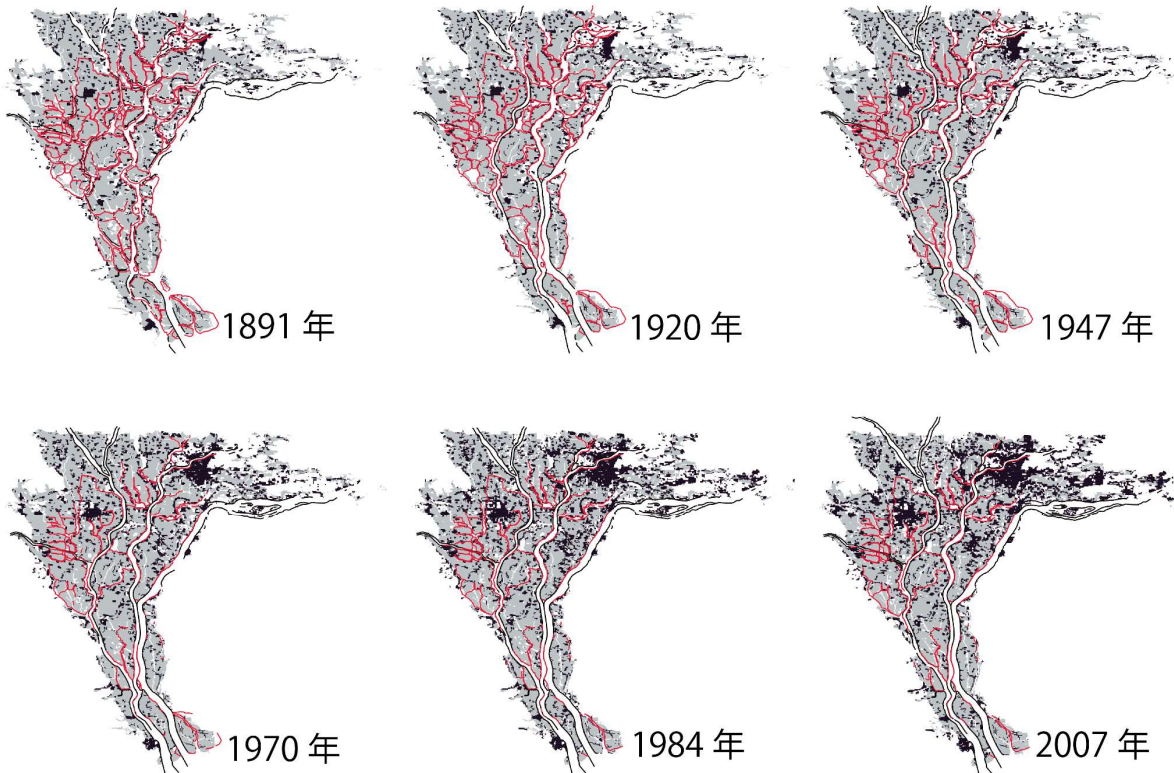


図-3 木曾川流域における堤防と土地利用の変遷

(赤線：輪中堤，黒線：連続堤防，黒メッシュ：市街地，灰色：田)

しかし、2000年以降、日本は少子高齢化社会に突入したため、木曾三川流域でも同様に人口が減少している。

(2) 木曾川の堤防整備と土地利用の変遷

伊藤・中村⁹⁾が作成した土地利用メッシュデータ、岡田・中村¹²⁾が作成した堤防整備の変遷データ（以降「木曾川堤防・土地利用データベース」と呼ぶ）をもとに、木曾川流域における堤防と土地利用の変遷（図-3）を見ると、1891年時点では田の面積が多かったが、徐々に市街地（黒のメッシュ）が増えていることが確認できる。土地利用割合の経年変化を詳しく見た図-4からも、約100年の間に田や森林が減少する一方で、市街地が増加していることが確認できる。また、輪中堤防（赤線）が減る一方で、連続堤防（黒線）が増えており、総延長の経年変化（図-5）から、1960年頃を境に総延長は逆転していることがわかる。

さらに、土地利用データをもとに、各市街地メッシュから水域メッシュまでの最短距離の平均を求めた結果、距離は次第に大きくなることが分かった（図-6）。つまり、流域全体としては人が住む場所と水辺は徐々に離れる傾向にあり、既往研究³⁹⁾が指摘する現象とは異なると言える。これは河川整備により水路や溜池のような小さな水域が減ったことが理由であると考えられる。

3. 堤防整備による市街化への影響の分析方法

(1) 固定効果モデルによる影響の推定方法

本研究では、1891年から2007年までの6つの年代の土地利用に関するパネルデータを用いて、各種インフラ整備と堤防整備が市街化に及ぼした影響を回帰モデルで推定する。ここでは、分析単位を国勢調査⁹⁾の2010年の小地域とする。また、小地域*i*の時点*t*における氾濫原の開発を表す指標 Y_{it} を、市街化を代表させる変数とする。本分析では、 Y_{it} として小地域における市街地面積の割合（以下、「市街地面積割合」と記す）を採用する。さらに、小地域*i*の時点*t*における堤防整備の状況を z_{it} 、各種インフラ整備の状況を X_{it} とする。以上より、基本的な推計式は式(1)のようになる。求める堤防整備の影響は、堤防整備の状況 z_{it} の係数*b*として推定される。

$$Y_{it} = a + bz_{it} + cX_{it} \quad (1)$$

ただし、本研究では、パネルデータとして整備できているインフラ整備データが少なく、市街地面積割合 Y_{it} の変化に影響する要因のうち、いくつかは欠損している可能性がある。そこで、本研究では欠損、つまり未観測のデータの変化の影響を除くことが出来る固定効果モデ

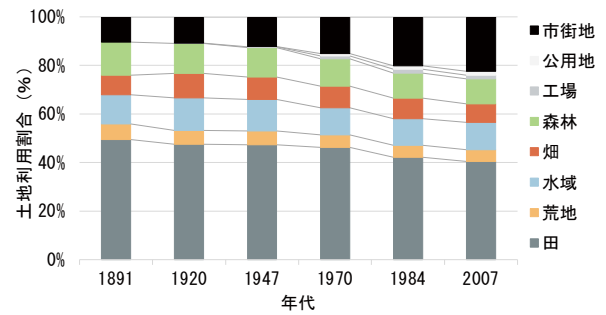


図-4 土地利用割合の経年変化

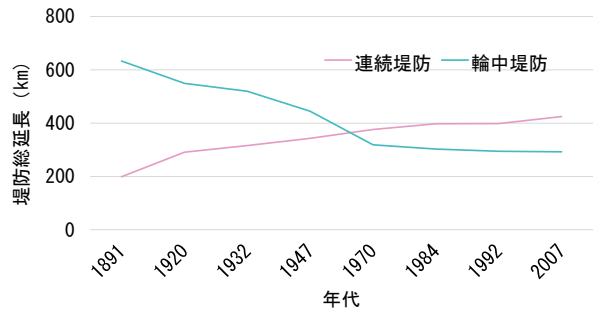


図-5 連続堤防と輪中堤防の総延長の経年変化

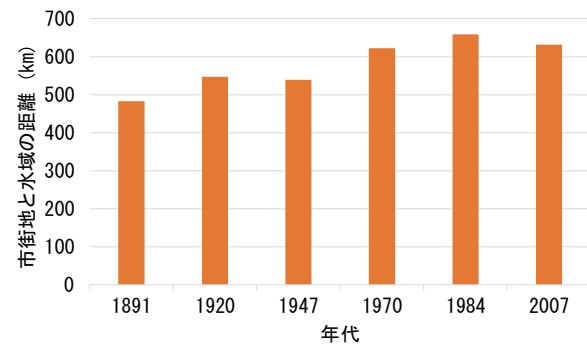


図-6 連続堤防と輪中堤防の総延長の経年変化

ルを用いる。固定効果モデルとは、時間不変の地域固有の影響を表す「固有効果」 F_i と説明変数 X_{it} が独立でないことを仮定したうえで、小地域ごとに期間平均値からの差分を取ることで、「固有効果」 F_i が除去されるモデルである。固定効果モデルとして、式(1)をさらに具体的に書くと次の式(2)のようになる。

$$Y_{it} = a + bl_{it}^u + cl_{it}^d + \gamma_t \delta_t + dX_{it} + v_{it} + F_i \quad (2)$$

式(2)では、堤防整備の状況 z_{it} を上流、下流の連続堤防の総延長 l_{it}^u 、 l_{it}^d とする。また、 δ_t は1891から2007年の6つの年代を表す年ダミー、 X_{it} は小地域*i*の時点*t*における学校、鉄道駅、下水道関連施設、工場、輪中の存在を表すダミー、低位地帯、連続堤防の影響範囲かどうかを表すダミー、平均標高、小地域の面積である。なお、 a は定数項、 v_{it} は誤差項である。求めたい堤防整備の Y_{it}

への影響は、上流、下流の連続堤防の総延長 l_{it}^u , l_{it}^d の係数 b, c として推定される。

(2) 傾向スコアによるサンプル調整

対象地域内では、インフラ整備水準などを含む地域属性が小地域間で大きく異なることが考えられる。また、主に堤防整備の影響を受ける地域群とそうでない地域群の間で、属性に偏りがあった場合、回帰式の推定に影響する可能性がある。そこで本研究では、そのような地域属性の偏りを避けるために、地域属性が似た地域を傾向スコアに基づいてマッチングしたうえで抽出することで、サンプル調整を行う。

傾向スコアとは、 z_i を処置の有無（連続堤防の影響範囲に入っているか否か）として、共変量 X_i を条件づけた時に小地域 i が処置有（ $z_i = 1$ に割り当てられる確率）であり、式(3)で示される。 z_i は、式(4)のロジスティック回帰モデルで算出する。共変量の候補は一般的に処置前のデータとされるが、今回は処置の時期が不明であるため、最も古い 1891 年の学校、鉄道駅、下水道関連施設、工場、輪中、低位地帯を表すダミー、平均標高、小地域の面積、上流、下流の連続堤防の総延長とする。

$$p(z_i = 1|X_i) = \frac{1}{1 + \exp(-z_i)} \quad (3)$$

$$z_i = a_1 X_{i1} + \dots + a_j X_{ij} + \beta \quad (4)$$

(3) 影響の時間的推移の推定方法

堤防整備と市街化の因果関係においては、必ずしも堤防整備が先行して市街化が進むとは限らない。地域によっては、将来的に堤防が整備され、安全度が上がることを前提に市街化が先に進められるケースもあると考えられる。そこで、本研究では、どの時点の堤防整備が市街化に影響しているかを明らかにするため、ある時点の市街地面積割合 Y_{it} に対して、その前後の期の堤防整備状況を説明変数とした場合についても推計する。具体的には、式(2)の上流、下流の堤防の総延長 l_t^u , l_t^d の t の部分について、1期前から4期前、さらに、1期後から4期後に置き換え、それぞれの場合の係数 b_t, c_t を推定する。 b_t, c_t の時間に応じた変化を分析することで、堤防整備の時間的な影響を考察することが出来る。

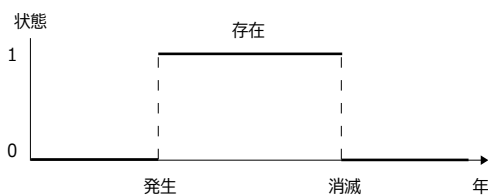


図-7 インフラ整備データの整備方法

4. 本研究で用いるデータ

(1) パネルデータの整備方法

本研究では、国土地理院の旧版地形図、地形図と数値地図 2500 から、1891, 1920, 1947, 1970, 1984, 2007 年の各年代の土地利用を 100m メッシュで電子データ化し、岡田・中村¹²⁾が作成した堤防整備の変遷データと合わせたものを「木曾川堤防・土地利用データベース」とする。本研究では、これと同じ地形図をもとに各種インフラ整備の時系列データを作成し、データベースに加えることで、パネルデータとして拡充する。ここで、堤防整備の変遷データの連続堤防とは、大臣管理区間の堤防を指す。

各期のデータは、図-7に示すように、地物の発生、存在、消滅に関する情報を整備する。該当する年代に存在していれば、ダミー変数または連続値を与えた。

(2) 市街地面積割合

市街地面積割合は、各小地域の面積において、市街地の面積が占める割合として定義する。小地域の空間的な区分は、2010年の小地域データを用いており、「木曾川堤防・土地利用データベース」の各期の土地利用メッシュを重ね合わせることで、市街地面積割合を算出した。

(3) 連続堤防の影響範囲

連続堤防の影響範囲とは、堤防が整備された時に、それによって安全度が高まるなどの影響を受けると考えられる範囲である。本来、このデータは流出計算などにより求めることが望ましい。しかし、入手できるデータの限界等から、本研究では、各年代の連続堤防から半径 1 km の範囲として定義した。なお、範囲をさらに大きな値にしてしまうと、一方の河岸の堤防整備の影響を、もう一方にも影響するものとして推定してしまう恐れがある。これを避けるため、1 km という値を採用した。

(4) 地域属性

本研究では、市街化と堤防整備に影響すると考えられる要因を、インフラ整備や地形などを含む地域属性データとして与えた。インフラ整備に関わるものとして、学校、下水道関連施設、鉄道駅の3つを、また、地形データとして低位地帯、小地域の平均標高の2つを考慮した。さらに工場、輪中範囲、連続堤防の影響範囲も考慮する。

インフラ整備データは、2021年12月時点で公開されている国土数値情報¹³⁾をもとに、図-7に示すように、それぞれの地物が各年代の地形図にあれば年次ダミーに1を、なければ0を与えて整備した。さらに、現在の国土数値情報上では存在しないが、過去に存在していた地物は新たな地物として追加し、同様にダミーを与えた。ただし、2007年のインフラ整備データに関しては公開され

ている国土数値情報が2010年前後であるため、そのデータを2007年として代用する。

学校は、国土数値情報の学校のポイントデータをもとに作成した。このデータに収録されている学校は、「学校教育法に基づく全国の小学校、中学校、中等教育学校、高等学校、高等専門学校、短期大学、大学及び特別支援学校」¹⁹⁾である(図-8)。

下水道関連施設は、国土数値情報の下水道関連施設のポイントデータをもとに作成した。国土数値情報の下水道関連施設は、処理場施設及びポンプ場によって構成される。処理場施設とは「下水道法にもとづく、公共下水道、流域下水道、特定公共下水道、特定環境保全公共下水道のポンプ場施設(マンホール形式ポンプ場及び処理場内ポンプ施設を除く)」¹⁹⁾である。ポンプ場とは「下水道法にもとづく、公共下水道、流域下水道、特定公共下水道、特定環境保全公共下水道の処理場施設」¹⁹⁾である。地形図には下水道関連施設の地図記号がないため、地形図からは供用開始時期が読み取れないことから、インターネットでの検索¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾、あるいは各県、市への問い合わせによって特定した(図-8)。

鉄道駅は、国土数値情報の鉄道時系列の鉄道駅のポイントデータを使用した。このデータに収録されている鉄

道駅とは「鉄道・軌道(索道は除く)沿いに設置される「一般駅」「旅客駅」「臨時駅(臨時乗降場、仮停車場、仮乗降場)」の乗客が乗降できる駅とし、貨物のみを取り扱うような貨物駅や信号場、操車場は整備対象外とする。また、休止駅は廃止駅ではないため整備対象とする。」¹⁹⁾のことである。国土数値情報には、1950年以降の駅が設置された年と、駅が変更または廃止された年の1年前が記載されているため、それをもとにダミーを作成した。1950年以前の情報は、地形図を用いて存在の有無を特定した(図-8)。

工場は、「木曾川堤防・土地利用データベース」において、工場の土地利用の区分をもつメッシュを用いた(図-8)。工場のメッシュは工場の地図記号をもとに作成されている。

輪中範囲は、小地域が輪中に囲まれているかどうかによって定義される。データの作成にあたっては、「木曾川堤防・土地利用データベース」の輪中堤防の境界線と地形図を重ね合わせ、輪中堤防に囲まれている範囲を目視で確認して作成した(図-9)。もっとも輪中堤防が多い1891年を基準に時間を追って、各年代で輪中がなくなった箇所があれば、その部分を削除した。

低位地帯は「周辺部よりも標高が低く、排水が困難である地帯」¹⁹⁾として定義される。データは国土数値情報より入手し、輪中範囲と同様の方法でダミー変数を作成した。その際、地形は年ごとに変化しないと仮定し、各年代の低位地帯ダミー変数は同じとする。

小地域の平均標高は、国土数値情報の標高・傾斜度3次メッシュデータと小地域データを重ね合わせ、各小地域と重なる面積が最も大きいメッシュの平均標高を各小地域の平均標高を与えた。その際、低位地帯ダミーと同様に地形は年ごとに変化しないと仮定した。

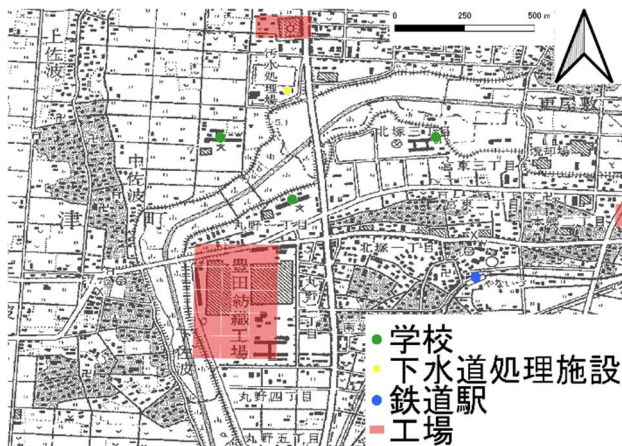


図-8 地形図を用いたインフラ整備データの作成



図-9 輪中範囲の作成

(5) 上流、下流の連続堤防の総延長

本研究では小地域*i*における堤防整備の影響を、小地域*i*より上流の堤防整備と下流の堤防整備の影響に分けて分析する。ここでは、各小地域に対し、それより上流、下流の連続堤防の総延長を用いる。データの作成にあたっては、実際の堤防(図-10左)を、支川の合流点を17個のノードで、河川のつながりを16本のパスで表現した簡易的なネットワーク(図-10右)としてモデル化する。それぞれのパスには、堤防の総延長を重みとして与えておく。そして、各小地域に最も近い合流点(ノード)から上流にある堤防(パス)の重みの総和と、下流にある堤防(パス)の重みの総和をそれぞれ求め、上流、下流の連続堤防の総延長とする。

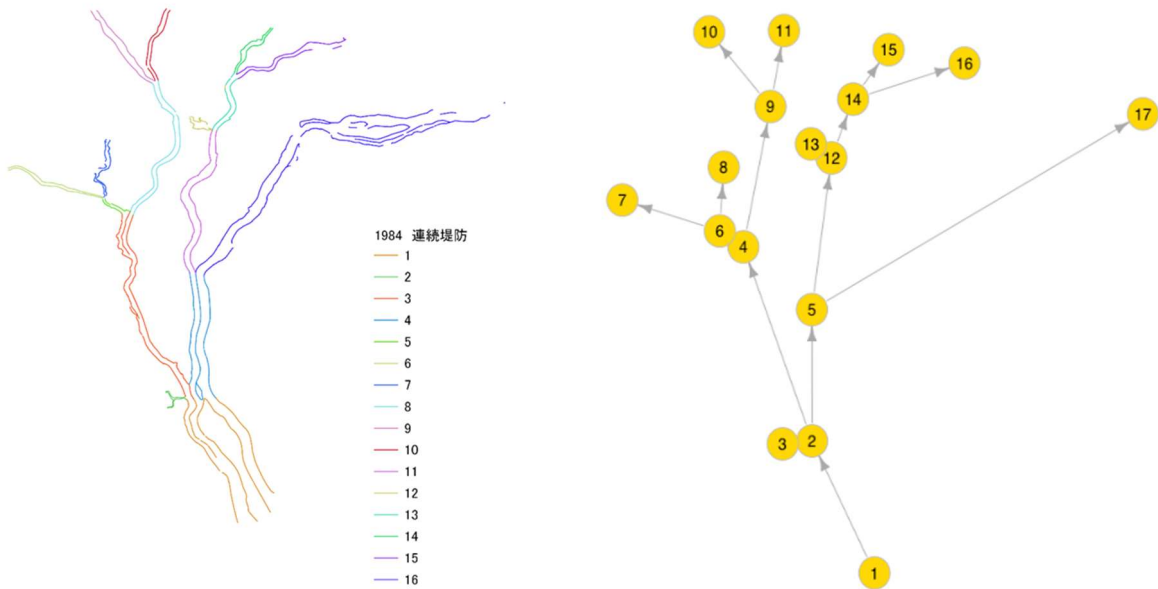


図-10 連続堤防データの区分け（1984年）（左）と連続堤防のネットワークモデル（右）

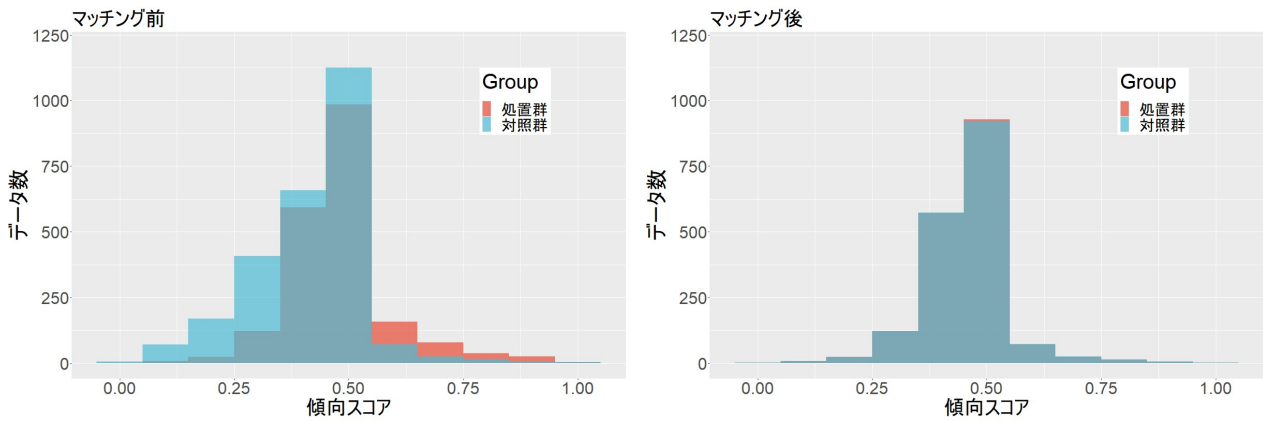


図-11 マッチング前後の傾向スコアの分布

5. 分析結果と考察

(1) 傾向スコアマッチングによるバランス調整の結果

4 で作成した共変量を用いて、傾向スコアの算出のために推定したロジスティック回帰の結果を表-1に示す。この結果から求めた傾向スコアをもとに、傾向スコアの差が0.05未満の小地域を非復元抽出でマッチングした。その結果、処置群と対照群のペアは1765組作成された。傾向スコアの分布は、マッチング前は対照群に比べて処置群の傾向スコアが小さい値に偏っているが、マッチング後はその偏りがなくなった（図-11）。

(2) 固定効果モデルの推定結果

傾向スコアマッチングでバランス調整したサンプルを用いて推定した結果（以下「調整有モデル」と表記）と、調整せずそのまま全てのサンプルを用いて推定した結果（以下「調整無モデル」と表記）を、各々表-2に示す。調整有モデルでは、下流の連続堤防の総延長は、1 m

整備されると市街地割合が0.00472%増加することが分かった。一方、上流の堤防の総延長は、有意ではないが、1 m伸びると市街地割合が0.00019%減少することが分かった。また、係数が有意で（今回はp値が0.05以下とする）、正のものは、2007年ダミー、鉄道駅ダミーであった。一方、係数が負であるものは、1920、1947、1970年ダミーと学校ダミー、工場ダミー、輪中ダミーであった。

調整無モデルでは、下流の連続堤防の総延長は、1 m整備されると市街地割合が0.00382%増加することが分かった。一方、上流の堤防の総延長は、有意ではないが、1 m伸びると市街地割合が0.00018%減少することが分かった。また、有意な値を取り、係数が正のものは、2007年ダミー、連続堤防の影響範囲ダミーであった。一方、係数が負であるものは、1920、1947、1970年ダミーと学校ダミー、工場ダミー、輪中ダミーであった。

調整有モデルと調整無モデルを比べると、上流、下流の連続堤防の総延長の係数は、どちらも調整有モデルの方が大きかった。またほかの係数に着目すると、調整無

表-1 傾向スコア算出における回帰モデルの推定結果

	係数	
切片	-6.089×10 ¹ (1.930×10 ²)	*
1891 年学校ダミー	-4.269×10 ¹ (4.302×10 ¹)	
1891 年鉄道駅ダミー	-	-
1891 年下水道関連施設ダミー	-	-
1891 年工場ダミー	-	-
1891 年輪中ダミー	-2.596×10 ² (3.450×10 ⁴)	***
低位地帯ダミー	-1.840×10 ¹ (8.769×10 ³)	**
平均標高	-2.318×10 ¹ (2.000×10 ¹⁶)	***
小地域の面積	1.133×10 ⁶ (2.000×10 ¹⁶)	***
1891 年上流の連続堤防の総延長	-1.914×10 ³ (1.327×10 ¹)	
1891 年下流の連続堤防の総延長	1.089×10 ² (1.227×10 ²)	*

※p 値の有意水準, *** : 0.001 以下, ** : 0.01 以下, * : 0.05 以下, . : 0.1 以下

モデルで有意であった連続堤防の影響範囲ダミーが調整有モデルでは有意ではなくなり, 調整無モデルで有意でなかった鉄道駅ダミーが調整有モデルでは, 有意だった。

(3) 固定効果モデルの考察

下流の連続堤防の総延長の係数が正となった理由は, 一般的に河川整備は下流から整備が行われるためであると考えられる。一方, 上流の連続堤防の総延長が負である理由については, まだ十分な解釈に至っていない。現段階では結論づけることは出来ないが, 上流, 下流の連続堤防の総延長のデータは堤防の接続関係を簡易的なネットワークでモデル化したうえで算出しているため, 上流部端点付近の小地域では, 上流の堤防の総延長が 0 となっていることが反映されている可能性がある。

2007 年ダミーの係数が正である理由は, 木曾川流域の市街地割合が, 基準年である 1891 年よりも 2007 年の方が高いためである。木曾川流域は時代が進むにつれて市街地割合が増加するため, 本来は, 年ダミーの係数は正になると考えられる。しかし, 1920, 1947, 1970 年ダミーの係数は負となっており, その理由はわからなかった。断定は出来ないが, これはデータの作成方法に起因していると考えられる。本研究では, 2010 年の小地域データを用いており, 研究対象時期内で小地域の統廃合が行われているため, 個々の地域の小地域の変化を見ることで

表-2 固定効果モデルの推定結果

	調整有モデル	調整無モデル
上流の連続堤防の総延長	-1.885×10 ⁴ (2.144×10 ¹)	-1.847×10 ⁴ (9.781×10 ²)
下流の連続堤防の総延長	4.718×10 ³ (2.200×10 ¹⁶)	3.823×10 ³ (2.200×10 ¹⁶)
1920 年ダミー	-1.838×10 ¹ (2.200×10 ¹⁶)	-1.320×10 ¹ (2.200×10 ¹⁶)
1947 年ダミー	-1.768×10 ¹ (2.200×10 ¹⁶)	-1.154×10 ¹ (2.799×10 ¹³)
1970 年ダミー	-1.203×10 ¹ (2.491×10 ⁷)	-5.347×10 ² (5.457×10 ³)
1984 年ダミー	-4.109×10 ² (9.269×10 ²)	3.432×10 ² (8.938×10 ²)
2007 年ダミー	2.287×10 ³ (9.275×10 ¹)	7.480×10 ² (3.417×10 ⁴)
学校ダミー	-5.700×10 ² (2.426×10 ⁵)	-5.969×10 ² (3.299×10 ⁷)
下水道関連施設ダミー	-2.617×10 ² (6.168×10 ⁴)	-7.055×10 ² (5.002×10 ²)
鉄道駅ダミー	3.458×10 ² (3.604×10 ²)	2.772×10 ² (5.331×10 ²)
工場ダミー	-7.267×10 ² (2.200×10 ¹⁶)	-7.486×10 ² (2.200×10 ¹⁶)
輪中ダミー	-1.587×10 ¹ (2.200×10 ¹⁶)	-9.283×10 ² (1.674×10 ¹¹)
連続堤防の影響範囲ダミー	-2.014×10 ² (1.662×10 ⁴)	2.768×10 ² (2.377×10 ²)
データ数	21,180	27,552

※p 値の有意水準, *** : 0.001 以下, ** : 0.01 以下, * : 0.05 以下, . : 0.1 以下

理由がわかる可能性がある。今後, それらのデータの解析をさらに詳細に進める必要がある。

インフラ整備の状況に着目すると, 学校が市街化に対して負の影響があることが示された。この傾向も, 小地域の区分に起因すると考えられる。市街地面積割合の小さい地方部では, 概して小地域全体の面積が大きい傾向にあり, 小地域内に必ず学校が立地する。一方, 市街地が広がっているエリアでは小地域が細かく区分されており, 必ずしも 1 つの小地域内に学校があるわけではなく, 複数の小地域が集まって一つの学校区を形成している傾向がある。こうした状況により学校があると市街地割合が減少するという結果が出たと考える。また, 工場が市街化に負の影響を与えている理由としては, 公害の問題などから市街化された地域の工場の立地が減ったことが考えられる。さらに, 輪中が市街化に負の影響を与えている理由は, 市街化の進展に伴い, かつての輪中が物理的に解体され, 結果として市街地が輪中範囲外に区分されるようになったことが反映されていると考えられる。

(4) 堤防整備が市街地割合に及ぼす影響の時間的推移

堤防整備が市街地割合に及ぼす影響の時間的推移を明らかにするため、ある時点の市街地面積割合 Y_{it} に対し

て、前後の時期の堤防延長を説明変数とした場合についても推計した(表-3, 表-4)。表-3, 表-4 は、各時期の上流, 下流の連続堤防の総延長の係数を示し、その下の

表-3 調整有モデルの固定効果モデルの推定結果

年代	4期前	3期前	2期前	1期前	$t = 0$	1期後	2期後	3期後	4期後
上流の連続堤防の総延長	-3.747×10 ⁴	-5.992×10 ⁴ **	-1.004×10 ³ ***	-4.508×10 ⁴ *	-1.885×10 ⁴ *	-6.406×10 ⁴ *	-1.535×10 ³ ***	-9.121×10 ⁴ *	-1.333×10 ³ *
下流の連続堤防の総延長	8.123×10 ⁴	5.481×10 ⁵	1.175×10 ³ ***	3.534×10 ³ ***	4.718×10 ³ ***	5.765×10 ³ ***	5.511×10 ³ ***	4.084×10 ³ ***	1.842×10 ³
1920年ダミー	No	No	No	No	-1.838×10 ¹ ***	-3.164×10 ² ***	-2.848×10 ² *	2.952×10 ² ***	3.983×10 ² ***
1947年ダミー	No	No	No	-9.906×10 ² ***	-1.768×10 ¹ ***	-3.910×10 ² **	2.727×10 ²	9.061×10 ² ***	No
1970年ダミー	No	No	6.612×10 ² ***	-2.457×10 ²	-1.203×10 ¹ ***	6.411×10 ² ***	1.405×10 ² ***	No	No
1984年ダミー	No	9.183×10 ² ***	1.493×10 ¹ ***	2.209×10 ²	-4.109×10 ² ***	1.492×10 ¹ ***	No	No	No
2007年ダミー	7.156×10 ³	1.394×10 ¹ ***	1.818×10 ¹ ***	5.834×10 ² *	-2.287×10 ³	No	No	No	No
学校ダミー	-2.017×10 ²	-2.239×10 ²	-4.821×10 ² *	-4.784×10 ² **	-5.700×10 ² ***	-4.826×10 ² ***	-3.706×10 ² *	1.761×10 ²	1.194×10 ²
下水道関連施設ダミー	4.666×10 ³	2.169×10 ²	-1.153×10 ²	-1.806×10 ²	-2.617×10 ²	1.066×10 ²	5.585×10 ²	-1.045×10 ¹	No
鉄道駅ダミー	4.959×10 ²	4.434×10 ²	1.908×10 ³	2.810×10 ²	3.458×10 ² *	2.541×10 ²	3.185×10 ²	4.328×10 ²	4.328×10 ²
工場ダミー	-1.066×10 ¹	-1.092×10 ¹ ***	-9.756×10 ² ***	-8.310×10 ² ***	-7.267×10 ² ***	-5.874×10 ² ***	-5.230×10 ² ***	1.621×10 ²	4.979×10 ²
輪中ダミー	5.212×10 ²	3.311×10 ²	-2.054×10 ¹ ***	-2.045×10 ¹ ***	-1.587×10 ¹ ***	-1.656×10 ¹ ***	-1.641×10 ¹ ***	-1.260×10 ²	-1.417×10 ²
連続堤防の影響範囲ダミー	4.959×10 ²	4.943×10 ²	-7.331×10 ³	-1.189×10 ²	-2.014×10 ²	-2.918×10 ²	-3.697×10 ² *	-1.085×10 ²	7.110×10 ³

表-4 調整無モデルの固定効果モデルの推定結果

年代	4期前	3期前	2期前	1期前	$t = 0$	1期後	2期後	3期後	4期後
上流の連続堤防の総延長	-2.675×10 ⁴	-6.327×10 ⁴ ***	-9.473×10 ⁴ ***	-3.937×10 ⁴ **	-1.847×10 ⁴	-6.414×10 ⁴ ***	-2.007×10 ³ ***	-1.224×10 ³ ***	-1.637×10 ³ ***
下流の連続堤防の総延長	7.711×10 ⁴	2.237×10 ⁴	1.028×10 ³ ***	2.778×10 ³ ***	3.823×10 ³ ***	5.049×10 ³ ***	1.853×10 ³ **	1.810×10 ³ *	1.273×10 ³
1920年ダミー	No	No	No	No	-1.320×10 ¹ ***	-1.644×10 ² *	2.686×10 ² **	4.000×10 ² ***	4.543×10 ² ***
1947年ダミー	No	No	No	-6.129×10 ² ***	-1.154×10 ¹ ***	-1.688×10 ²	9.108×10 ² ***	1.024×10 ¹ ***	No
1970年ダミー	No	No	7.009×10 ² ***	1.748×10 ²	-5.347×10 ² **	8.076×10 ² ***	2.043×10 ¹ ***	No	No
1984年ダミー	No	9.209×10 ² ***	1.625×10 ¹ ***	8.085×10 ² ***	3.432×10 ²	1.726×10 ¹ ***	No	No	No
2007年ダミー	1.180×10 ²	1.396×10 ¹ ***	1.985×10 ¹ ***	1.201×10 ² ***	7.480×10 ² ***	No	No	No	No
学校ダミー	-2.411×10 ²	-2.453×10 ²	-4.310×10 ² *	-4.527×10 ² **	-5.969×10 ² ***	-5.104×10 ² ***	-4.370×10 ² **	2.524×10 ³	-4.216×10 ³
下水道関連施設ダミー	-1.017×10 ²	-2.132×10 ²	-4.256×10 ²	-5.878×10 ²	-7.055×10 ²	1.788×10 ²	5.683×10 ²	-9.278×10 ²	No
鉄道駅ダミー	4.532×10 ²	4.891×10 ²	3.577×10 ³	1.792×10 ²	2.772×10 ²	1.844×10 ²	2.753×10 ²	4.313×10 ² *	2.280×10 ²
工場ダミー	-9.710×10 ² ***	-1.049×10 ² ***	-9.521×10 ² ***	-8.314×10 ² ***	-7.486×10 ² ***	-5.411×10 ² ***	-4.431×10 ² ***	2.571×10 ³	-3.098×10 ²
輪中ダミー	3.240×10 ²	2.994×10 ²	-1.463×10 ¹ ***	-1.375×10 ¹ ***	-9.283×10 ² ***	-1.062×10 ¹ ***	-1.148×10 ¹ ***	5.862×10 ⁴	-5.257×10 ³
連続堤防の影響範囲ダミー	3.579×10 ²	4.791×10 ³	-1.249×10 ²	-9.205×10 ³	2.768×10 ²	1.112×10 ²	-4.487×10 ³	1.112×10 ²	1.184×10 ²

※p値の有意水準, ***: 0.001以下, **: 0.01以下, *: 0.05以下, . : 0.1以下

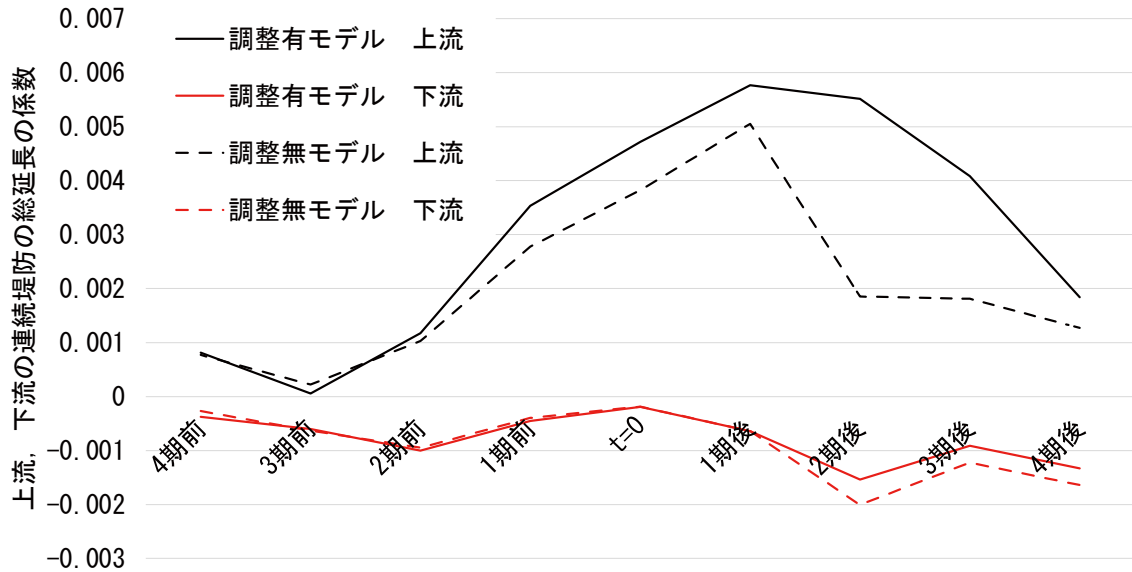


図-12 堤防整備が市街地割合に及ぼす影響の時間的推移

説明変数は、それらがモデルに含まれる場合は YES、含まれない場合は、NO と記載している。

図-12 は上流、下流の連続堤防の総延長の係数の時間的推移を示している。上流の連続堤防の総延長の係数は、全ての期間を通じて負であり、時期ごとの係数の変化は、基本的に 2 期ごとの減少、増加を繰り返している。特に、2 期前、2 期後の係数がもっとも小さいことが確認できた。このことから 2 期前後の上流の連続堤防の総延長の増加が最も市街地を減少させることが分かった。しかし、その理由は現段階ではわかっていない。調整有モデルでは、調整無モデルとグラフの概形は、変わらないが、全体的に係数が小さくなっている傾向であった。つまり、傾向スコアマッチングによるサンプルのバランス調整を行わないと、影響が過小に推定されることがわかった。

下流の連続堤防の総延長の係数は、全ての期間を通じて正であり、時期ごとの係数の変化は、1 期後を頂上とした山形になっている。このことから、1 期後の下流の連続堤防の総延長の増加が最も市街地を増加させると言える。1 期後の下流の連続堤防整備が市街地割合を増加させる理由は、堤防の整備計画が決まってから、実際に施工されるまでのタイムラグがあるためだと考える。ただし、これは、1 期後“まで”には地形図上に反映されているということを意味している。今回のデータの場合、1 期が 20 年から 30 年程度であるが、堤防が整備される前の最大 20 年から 30 年程度前に市街化が進んでいると解釈することができる。調整有モデルでは、調整無モデルとグラフの概形は、変わらないが、全体的に係数が大きくなっている傾向であった。つまり、傾向スコアマッチングによるバランス調整を行うと、下流の連続堤防に

より市街地への影響を大きく見積もることが分かった。

また上流、下流ともに、堤防を 1 km 整備した際の市街地の影響は 1 % も満たない。しかし、実際には連続堤防は一体的に整備されるものであり、堤防 1 km 整備しただけで市街化が進むとは考えられない。そのため、ある程度の距離を整備することで市街化への効果が発現することに注意したい。さらに前の時期よりも後の時期の方が全体的に係数の絶対値が大きいことから、前の時期よりも後の時期の方が市街化に影響を与えていることがわかる。以上の結果から、木曾川流域では、先行研究³⁴⁾で考えられている堤防整備から市街化の進展といった因果の流れとは逆の現象が見られたことになり、市街化が進むことで、その地域に堤防が建設された可能性がある」と結論づけられる。

6. まとめ

本研究では、固定効果モデル及び傾向スコアマッチングを用いて、木曾川流域の河川堤防整備による土地利用の変化を上流の連続堤防の影響と下流の連続堤防の影響に分けて定量的に分析した。その結果、上流の堤防整備は市街地を減少させ、下流の堤防整備は市街地を増加させることが分かった。また、堤防整備が市街地割合に及ぼす影響の時間的推移としては、上流は 2 期前後の堤防整備が最も影響を与え、下流は 1 期後が最も影響を与えることが分かった。さらに傾向スコアによるバランス調整を行うと、堤防整備による市街化への影響はわずかに正の方向に大きく推定され、地域属性の偏りが効果をやや過大評価することがわかった。さらに前の時期よりも

後の時期の方が市街化に影響を与えていることから、堤防整備により市街化が進むのではなく、市街化が進むことで、その地域に堤防が整備されたことが分かった。

本研究では、伊藤・中村⁹⁾の検証に加え、市街化に影響を与えるその他の要因（駅の整備や工場などの産業立地）を考慮し、堤防効果の概念的モデルにおいて仮定されている因果の流れ—堤防の整備による市街化の進展、それによる水害の甚大化において、前半部分、すなわち堤防整備と市街化の係性を定量的に明らかにした。しかし、今回の結果からは、木曽川を対象とした分析においては、堤防整備により市街化が進むのではなく、市街化が進むことで、その地域に堤防が建設されたことが分かった。今後は、堤防効果における市街化と洪水の甚大化の過程についても分析することで、堤防効果という社会水文現象の実証的な分析を更に進める予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、一部の下水道施設の供用開始時期に関する情報を、岐阜県都市建築部下水道課、愛知県建設局下水道課、岐阜市上下水道事業部上下水道事業政策課、大垣市役所下水道部下水道課、桑名市上下水道部下水道課よりご提供いただきました。また、データ作成にあたっては、名古屋大学の元学生である岡田銀河氏、伊藤悠一郎氏が作成した土地利用メッシュと堤防データを利用させていただきました。ここに、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省河川法改正20年多自然川づくり推進委員会：川と人のかかわりの歴史、
https://www.mlit.go.jp/river/shimgikai_blog/tashizen/dai01kai/pdf/5-1_kawatohito_rekishi.pdf, 2021.2現在。
- 2) White, G. : Human Adjustments to Floods. Chicago, The University of Chicago, 1945, ISBN9788578110796. <http://arxiv.org/abs/1011.1669>.
- 3) Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J.L., Blöschl, G. : Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 8, pp. 3295–3303, 2013.
- 4) Di Baldassarre, G., Alberto Viglione, Gemma Carr, Linda Kuil, Kun Yan, Luigia Brandimarte, Günter Blöschl : Debates— Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 51, No. 6, pp. 4770–4781, 2015.
- 5) Colletteur, R. A., Moel, H. de, Jongman, B., Baldassarre, G. Di : The failed-levee effect: Do societies learn from flood disasters?, *Natural Hazards* 2014 76:1, Vol. 76, No. 1, pp. 373–388, 2014.
- 6) 伊藤悠一郎, 中村晋一郎：木曽川における長期土地利用データの構築と Levee Effect の定量的評価, *水文・水資源学会 2018年度研究発表会要旨集*, Vol. 31, 2018.
- 7) 日本の川 - 中部 - 木曽川・長良川・揖斐川 - 国土交通省水管理・国土保全局,
https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousu/kasen/jiten/nihon_kawa/0509_kiso/0509_kiso_00.html, 2021.12現在。
- 8) 建設省中部地方建設局：木曽三川治水百年のあゆみ. 1995, 63-88p 120p 453-480p.
- 9) 国勢調査, <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?type=2>, 2021.2 現在。
- 10) 国土交通省中部地方整備局：木曽川上流河川事務所,
<https://www.cbr.mlit.go.jp/kisojo/enkaku/003.html>, 2021.1現在。
- 11) 木曽三川の洪水と治水の歴史—長良川河口堰管理所,
https://www.water.go.jp/chubu/nagara/21_yakuwari/rekishi.html, 2021.12 現在。
- 12) 岡田銀河, 中村晋一郎：木曽川水系における近代以降の堤防空間データベースの構築と分析, *水文・水資源学会研究発表会要旨集*, Vol. 31, 2018.
- 13) 国土数値情報ダウンロードサービス, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2021.12現在。
- 14) 下水道施設の紹介 | 海津市,
<https://www.city.kaizu.lg.jp/kurashi/0000000606.html>, 2022.1現在。
- 15) 下水道事業の概要・沿革 | 岐阜市公式ホームページ,
<https://www.city.gifu.lg.jp/kurashi/suidou/1003348/1003350.html>, 2022.1 現在。
- 16) 各地での取り組み,
<https://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/rocal.html>, 2022.1現在。
- 17) 下水処理場の紹介 | 瑞穂市,
<https://www.city.mizuho.lg.jp/3563.htm>, 2022.1現在。
- 18) 岐阜県 各務ヶ原浄化センター, <https://www.gifu-jyousuikousha.or.jp/pamphlet.pdf>.
- 19) 浄化センターのあゆみ | 大垣市公式ホームページ / 水の都 おおがき, <https://www.city.ogaki.lg.jp/0000002216.html>, 2022.1現在。
- 20) 下水道の処理施設 | 岐阜県揖斐郡池田町,
<https://www.town.gifu-ikeda.lg.jp/0000000513.html>, 2022.1現在。
- 21) 事業の経過 - 岐阜県公式ホームページ (流域浄水事務所) ,
<https://www.pref.gifu.lg.jp/page/4189.html>, 2022.1現在。
- 22) 雨水ポンプ場の概要 - 桑名市～本物力こそ、桑名力。～,
<http://www.city.kuwana.lg.jp/index.cfm/24,84959,223,341.html>, 2022.1 現在。

(Received March 6, 2022)

THE IMPACT OF LEVEE IMPROVEMENTS IN THE KISO RIVER BASIN ON URBANIZATION SINCE THE MEIJI ERA

Ryo MATSUKAWA, Fuko NAKAI, Shinichiro NAKAMURA and Eizo HIDESHIMA

Levees have dynamically changed from discontinuous to continuous levees since the Meiji era in Japan. This has reduced the frequency of flooding within the levees and has allowed populations and assets to locate on the floodplain, but once a flood does occur, it can cause significant damage. This study estimated

the impact of levee improvement on urbanization in the Kiso River basin using panel data since the Meiji era, considering factors other than levee improvement that affect urbanization. In the fixed-effects model, we adopted the length of continuous levee in each area as data representing treatment; we separately developed data as upstream and downstream levee improvement in each area. As a result, upstream levee improvement lessened the urbanization, while downstream continuous levee improvement promoted the urbanization. The analysis using lag-variables also showed that the effect of downstream levees on urbanization is that "levees are improved in areas that have already been urbanized" rather than that "Urbanization is promoted after securing safety by levee improvement".