

海岸河川防災計画における経済学的 手法の適用：土木技術者Dupuitの分析を 現在に活かす

東北大学 教授

河野 達仁

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

海岸河川防災計画における経済学手法の適用： 土木技術者Dupuitの分析を現在に活かす

Economics in Coastal and River Disaster Prevention: Application of the Economic Analyses of Civil Engineer Jules Dupuit

河 野 達 仁
Tatsuhito Kono

1. はじめに

平成8年に橋本首相が所信表明演説で「公共事業の投資効果を高め、その効率化を図る必要があり、公共事業の建設コストの低減対策、費用対効果分析の活用等を計画的に推進されたい。」と表明し、費用便益分析の実施が平成13年の「行政評価法」により義務付けされた。それを受けて、各省庁でインフラごとに費用便益分析手法のマニュアル整備がなされている。しかしながら、費用便益分析がベースとする経済学の考え方がインフラ整備の現場や土木工学研究に浸透しているわけではない。本稿では、海岸河川の水害対策に焦点を当てて経済学の利用方法とその価値について検討を行う。

水害対策に限らずインフラ整備の影響の範囲は空間的に限定されるため、異なる空間の住民に異なる影響を与える。また、仮に同じ影響を与えたとしても人によってその影響の評価が異なる。このような状況でも、創られるインフラはただひとつである。そのため、どのようなインフラを造るべきかを、社会全体に与える影響を評価しながら検討することが必要である。また、同じ構造物を造るにも現場ごとに状況が大きく異なる。そのため状況に応じて、建設方法のみならずインフラの水準や各種性能をその都度検討する必要がある。

このような状況依存の整備において有用なのは、科学的手続きである。すなわち科学的にインフラ整備の影響メカニズムを把握し、その状況にあった最適整備を演繹する方法が示されれば、プロセスにおいて議論が必要な場合でも明快に議論を進めることができる。インフラ整備の影響分析を科学的に行う研究は、経済学や社会心理学といった社会科学分野で数学や統計を用いて行われている¹。一方、インフラ整備や管理の現場では、科学を駆使するというよりは、マニュアルで画一的に計算する方法や法律による整備のルール化や公聴会による承認などが行われている。

実は、19世紀にインフラ整備や管理の社会経済的影響を科学的に捉えようとして学問的に大成功した土木技術者達がいた。彼らは、交通網の整備や公共事業の負担方法などの検討を通して現在の公共経済学や厚生経済学の基礎を作っている。その中でもパリの上下水道整備事業を指揮したJules Dupuit (1804 -1866) が第一人者としてあげられる。彼が開発した消費者余剰は、現在でもすべてのミクロ経済学の教科書に示されており、この概念がなければ厚生分析が不可能である。Dupuitは、公共事業の効用の測定を研究する中で消費者余剰の概念を生み出している。他にこの分野で同時期に活躍した学者として、ナヴィエ=ストークス方程式の開発者のNavier (1785-1836) がいる。DupuitもNavierもフランスのÉcole nationale des ponts et chaussées (訳：国立土木学校) の教授であった。この土木学校には、経済学の必要性を実感した土木エンジニアによってフランス全体で4番目の開講となる経済学講座が1847年に設置されている²。

¹ インフラを対象に科学的な分析を行った研究の一部を集めた「インフラを科学する一波及効果のエビデンス」（柳川編、2018）という題名の本もある。経済学者と土木計画学者の研究が紹介されている。

² ジュール デュピュイ 著、栗田啓子 訳（2001）において栗田先生が書かれた解題パートの情報に基づく。また、Wikipediaによると、現在の École nationale des ponts et chaussées は次のように紹介されている。フランスの理工系高度職業人養成のための高等教育機関で、グランゼコールのひとつ。最も歴史のある

Dupuitは土木インフラを対象に経済学の研究を進めた。そこで本稿では、Dupuitが論文で展開した議論のうち、現在の水害対策を考えるうえで利用可能なものを抽出して、現在のわが国のインフラ整備計画に関する手続きや海岸河川工学研究との比較を行う。その結果、19世紀のフランスでも現在の我々とほぼ同様の議論が展開されていたことがわかる。そのうえで、Dupuit以降の経済学理論や海岸堤防の費用便益分析に関する研究を活用しながら、海岸河川の防災に関する経済分析の今後の展望を議論する。

2. 土木技術者Dupuit（1804-1866）の消費者余剰と水害対策に関する経済学的考察

Dupuitが1844年にAnnales des Ponts et Chaussées（訳：土木年報）で発表した論文『公共事業の効用の測定について』の最初の段落には、

経済学から見た公共的効用の有無は、法的観点からする問題より、はるかに重要である。いくら公聴会を繰り返そうとも、また法律や政令をどのように定めようとも、それだけでは、道路や鉄道あるいは運河を有用なものにすることはできない。それらの交通路が現実には有用でなければ、なにをしても、その事実を変えることはできないのである。法は経済学が証明した事実の追認だけをすべきだ、と言ってよい。」（ジュール デュピュイ 著、栗田啓子 訳（2001））

と書かれている。Dupuitは、この論文において、公共的効用の有無を数値で示すことができる「消費者余剰」という厚生指標を、需要関数の導出とともに理論的に生み出している³。

Dupuitは、その後、消費者余剰による厚生評価をインフラ整備や管理の設計に適用した研究を、経済学雑誌であるJournal des économistes（雑誌名訳：エコノミスト誌）や、経済学辞典であるDictionnaire de l'économie politique: contenant l'exposition des principes de la science（1852）（書籍名訳：政治経済学辞典：科学原理の解説）の担当箇所を示している。経済学辞典への執筆依頼もあることから、土木技術者であるDupuitが経済学者としても認められていたことがわかる。彼が具体的に消費者余剰を適用したプロジェクトは多岐に渡り、運河、通行税、上水、河川、道路などである。また、消費者余剰の最大化に通行税の論文で言及しており、厚生最大化も意識していたと考えられる。消費者余剰のほかにも、現在の経済学用語では限界費用、固定費用と可変費用、生産者余剰、モラルハザード、死荷重損失を指す概念を用いて議論を展開している。

本節では、Dupuitが議論した経済学的考察を現在のわが国の状況に適用して、19世紀のフランスの状況と比較してみたい。まず、本節の冒頭で引用したDupuitの文章を要約すると、「公聴会や法律や政令の設定よりも、プロジェクトを有用なものに設計することが重要である。そもそも法律は、経済学が証明した事実の追認をすればよい。」と言える。ここで、我が国の現在の公共プロジェクトの評価手続きを見てみると、プロジェクトの規模や内容は評価以前に決定しており、その決定したプロジェクトのB/C（便益/費用）が1を超えるか否かのチェックを行うだけである。具体的に、海岸堤防と河川堤防の規模決定に関する法令や技術基準をみると、

<海岸堤防> 海岸法に基づく海岸保全基本方針（H27.2告示）で、「数十年から百数十年に一度程度発生す

最難関名門国立グランゼコールの一角であり、理工系グランゼコールの中でもエコール・ポリテクニクやパリ国立高等鉱業学校と並び、トップ校の一つとして君臨している。入学難易度が日本の東京大学よりも高く、トップクラスのエリート校と認識されている。そして、6つの学部、土木工学・建築学部、交通・都市計画・環境学部、機械工学・物質科学学部、応用数学・コンピュータサイエンス学部、経済・ファイナンス学部、産業工学・経営学部で構成されている。

³ 消費者余剰は現在でも最も基本的な厚生指標である。しかしながら、欠点がないわけではなく、現在では、他にも指標が考えられており、等価変分や補償変分、アレー余剰などが代表例である。なお、費用便益指標は仮説的補償原理との関係が求められることが多く、それらの間の必要十分条件などが議論されている（例：空間経済を明示的に扱ったものとしては Kono and Kishi（2018））。

る比較的頻度の高い津波に対して防護することを目標とする。」と示されている。また、高潮については、「設計高潮位を過去の最高潮位などを参考に決定してから余裕高を考慮して、最終的な堤防高を決める。」とある。

＜河川堤防＞ 河川砂防技術基準（H30.3版）によると、「対象降雨（計画降雨）を河川の重要度とは、洪水防御計画の目的に応じて流域の大きさ、その対象となる地域の社会的経済的重要性、想定される被害の量と質、過去の災害の履歴などの要素を考慮して定める。その後、対象降雨に基づいて基本高水を計算して堤防高を決定する。」とある。

これらの海岸堤防や河川堤防のレベルの決定において、経済学は一切使われていないことがわかる。すなわち、Dupuitが約180年前に提案した公共プロジェクト設計における経済学の利用は、水害対策の政策現場では未だ行われていない。

海岸や河川の堤防高さ決定後に初めて経済学の利用がある。ただし、経済学の利用はかなり限定されており、費用便益分析マニュアルに基づいて計算された便益Bと費用Cから $B/C > 1$ や $B - C > 0$ を確認するだけである。しかし、 $B - C > 0$ のみのチェックは次の問題がある。まず財源調達において死荷重が発生していることを考えると、 $B - C > 0$ のみのチェックは実際には純便益がマイナスになる非効率なプロジェクトも認める基準である⁴。そして、公共事業が社会にとって最も有用なものになることを目指すならば、純便益である $B - C$ が最大になるように堤防高さを修正するべきである。純便益の最大化を行うと、現在のルールで $B - C < 0$ となるプロジェクトも、堤防高さを変更することで $B - C > 0$ に変る可能性もある。そして、社会厚生最大化を図るのであれば、そもそも現在の防災計画設計の最初の手続きである「堤防レベルを経済評価せずに法令や技術基準により決定」するステップが全くの無駄である。さらに、場合によっては不効率な防災対策を生む原因となるステップである。この無駄なステップを即刻取り除き、Dupuitが指摘した経済学に基づく計画プロセスにすべきである。本稿の3節で、純便益 $B - C$ の最大化による防潮堤高さ決定方法の一例を示す。

次に海岸・河川研究分野における経済学利用についてみる。海岸工学研究における経済学利用のチェックのためにJ-STAGEの論文全文検索（2021年6月検索）で「消費者余剰」あるいは「費用便益」を検索ワードとすると、海岸工学論文集で17件/5,182論文、土木学会論文集B2（海岸工学）で20件/3,403論文である。次に河川工学についてみると、水工学論文集で11件/3,683論文、土木学会論文集B1（水工学）で12件/2,819論文である。それぞれ少ないものの、海岸工学や河川工学分野で査読される研究においても、厚生評価の観点を受け入れられていることがわかる。

土木工学研究における厚生分析の必要性について考えてみると、インフラ供給サイドの議論のみで行える研究については、厚生議論は必要がない。例えば、整備コストの削減技術などである。一方、インフラの需要サイドの条件が必要になる議論の場合、消費者余剰などを使った厚生議論は欠かせない。堤防を例にすると、水害が住民や企業に及ぶケースが存在する場合は、堤防の需要者が影響を受けるため堤防設計にお

⁴ $B/C > 1$ が基準になっていることは、かなり由々しきことである。例えば、 $B/C = 1.05$ 程度のプロジェクトがあったとする。これは、そもそも費用に対して1.05倍しか便益がない。費用を払う人と便益を被る人は多くの場合異なるので、これはほぼ所得移転のみのプロジェクトである。つまり、公平性の観点からそのプロジェクトの妥当性を別途検討する必要がある。さらに実は効率性の観点からも、このプロジェクトはほぼ間違いなく非効率である。一般に費用調達には税金やプロジェクト関連料金が用いられる。これらの課税の際には、課税する市場の需要あるいは供給が非弾力的でない限り、課税による死荷重が発生する。すなわち、財源調達において、一般に1億円の財源は1億円以上かけて調達されていることになる。例えば、所得税に関しては、税収入のおよそ1.0～1.2倍の費用がかかっていると推計されている（別所・赤井・林（2003））。道路料金については道路混雑がないケースでは1.3～2.5倍、燃料税の限界費用は1.1～1.3倍と推計されている（森杉・河野（2012）、河野（2017））。これらの公的資金の限界費用は費用Cを割り増しすることになるため、 B/C 基準も割り増しが必要である。実際、フランス(1.3)、スウェーデン(1.3)、フィンランド(1.3)、ノルウェー(1.2)の道路整備の費用便益分析マニュアルでも、公的資金調達の限界費用（上記かつこの値）とその取り扱いが記述されている。

いて厚生評価は欠かせない。

住民や企業への被害を厚生評価するためには、消費者余剰などの厚生評価指標の設定のみならず、インフラ整備に関わる市場や物理的メカニズムの特徴を把握しモデル化する必要がある。そのモデルに基づいて政策の有無が消費者余剰に与える影響を捉えることで厚生評価が行える。実際、Dupuitは、インフラ毎にそのメカニズムについて深い考察を行っている。そこで、本稿では、海岸や河川防災に関しての彼の経済学的考察をみるために、Dupuitが水防災について記述しているDictionnaire de l'économie politique（1852）の一節を一部省略しながら以下に引用する。

「^(a)河川の洪水は、季節によっては、大地の肥沃度を高めることに貢献するが、他の時期には瓦礫だらけの惨状をもたらす原因となる。．．今日、^(b)このような大災害の襲来が以前より増えているのは、本当だろうか。山での森林伐採がその原因だというのも本当だろうか。．．．川の流れについていえば、その被害を押し留める手段は、谷における特別な工事であり、堤防であり、護岸用突堤である。．．．我々からすれば、^(c)洪水の危険にさらされている土地を特別な法律の対象とすることが必要だと思われる。その法律は、土地所有者の組合か企業が、全体の工事を自分たちの費用で実施し、工事の結果増加した所有地の価値によって、費用を払い戻すことを許可するという内容にすべきである。．．．大災害が流域を襲い、その地域が悲嘆に暮れたときに、国庫からしばしばかなりの額になる保証金を与えたこともあった。．．．だが、^(d)特別な工事を行ったり、保険を掛けたりして、土地所有者が自分自身で避けられたかもしれない災害のすべてに、国が救いの手を差し伸べるとしたら、将来に対する配慮の精神や協力の精神が発展することはないだろう。」（ジュール デュビュイ著、栗田啓子訳（2001））

この河川洪水に関するDupuitの考察だけでも、彼の経済学的洞察が深く幅広いことがわかる。本稿で関連する経済メカニズムを解説する箇所に下線を引いてローマ字の番号を付けた。Dupuitの考察に現代の経済学の考え方も加えながら、ひとつずつ以下で考察してみる。

下線(a)：塩分を含む海水の氾濫は農業やその他の経済活動に害にしかならないのに対して、河川の氾濫は農業にとって有益に働くことがある。現在でも、カンボジアではコルマタージュという水利システムで計画的に河川を氾濫させて農業の生産性を向上させている。しかしながら、氾濫が続いていると、高度な土地利用ができず、経済発展が遅れる。このため、現世代と将来世代の厚生トレードオフが生じる。このようなトレードオフの分析は、経済学では動学モデルを用いて行うことができる。特に、世代間の公平性を論じる枠組みとしては世代重複モデルが有用である。カンボジアのコルマタージュを世代重複モデルの枠組みでKazama et al. (2009)が経済発展をモデル化して、コルマタージュ政策が与える世代間の厚生に関する公平性議論を行っている。

下線(b)：19世紀のフランスにおいて森林伐採が災害を生んでいると危惧されている。河川については、雨水が直に河川に流れ込み、洪水の原因となっている。堤防と森林側の対策と複数対策の効果を分析して比較する必要がある。これについては、Corderi-Novoa et al. (2020)で行われており、森林への植樹対策と河川堤防や遊水地対策の期待被害額減少の比較がボリビアの河川整備政策を対象に行われている。結果としては、植樹対策は小規模の降雨に対しては効率よく期待被害額を相対的に減少させるものの、大規模の降雨に対しては効果が限定的であった。海岸については、河川からの砂流出が減り、砂浜がやせ細り、海岸域での水害を起しやすくなっているといわれている。

下線(c)：この工事費負担の考え方は、開発利益還元という方法で、交通整備などでも財源確保と受益者負担という点で利点がある政策である。しかしながら、我が国では、インフラ整備にこの方法は利用されていない。現在、発展途上国で交通プロジェクトを進める際に有力な財源確保政策として提案されている。現在の水害対策事業の費用負担は、受益者が負担するのではなく、広く集められた税金によって行われ

ている。そのため、住民は、わざと地価の安い危険地域に住んで防災整備を期待することで、自分の効用を上げることが可能になる。これは、Kydland and Prescott (1977)が示した動学的不整合問題の構造を持つ。実際、彼らは、河川沿岸における氾濫域に住宅を建てることに関する動学的不整合問題を問題の一例にあげている。以下に、その例を一段落にまとめると以下のようになる。KydlandとPrescottは「経済政策の時間的整合性及びビジネスサイクルの背後にある推進力」への貢献が評価されて2004年のノーベル経済学賞を受賞している。

＜河川氾濫域への住宅建設に関する動学的不整合問題（Kydland and Prescott (1977)）＞ 洪水が発生する川があり、政府は堤防を建設するかを考える。住民は、地価が安いので堤防があればそこに住みつく。堤防がなければ危険なので住むことはない。この時、最適政策は、住民が川の近くに住まずコストのかかる堤防を建設しなくて済む状況とする。しかし、現実には起こることは、住民が、政府は洪水による被害を恐れて必ず堤防を建設すると合理的に予想し、地価の安い川の近くに住み始める。その結果、政府は堤防を建設する。最適政策の変化が、住民の住宅建設前後において堤防の便益が変化することで発生している。こういったなんらかのタイミング（あるいは単に時間経過）前後での不整合を動学的不整合問題という。

本稿の第3節で扱う堤防整備に関する動学的不整合に関する分析あるいはKono and Notoya (2012)をみるとわかるように、費用負担が受益者負担で行われれば、この問題は発生しない。現在の防災の現場では、この動学的不整合問題を避けるために、「住宅建築禁止地区」の設定や、「危険地域」の設定などを行っている。しかし、そもそも受益者負担による水害インフラ整備システムを構築すれば、これらの設定が必要なく、危険情報のみを示せば十分となる。なお、効率性のみならず公平性も経済学は分析対象としており多くの議論がある。ただし、こういった個別のプロジェクトでは効率性のみを指標として、公平性の議論については所得分配政策に任せるという「マスメリット主義」という考え方を多くの場合、経済学者は採用する。

下線(d)：土地所有者らが共同で、自らその土地の価値を高めることが重要である。土地には様々な外部性や市場取引されていない財が含まれる。この時、ある程度広い面積の土地所有者が土地の価値を高めるように計画をすると最適が達成させるというデベロッパー定理が使える。土地所有者が共同で広い地域の計画を考えても同様にこの定理が使える。デベロッパー定理とは、「多数の競争的なデベロッパーが、それぞれある程度広い土地を有して、その土地内の公共財や市場取引のない財（例、景観）を土地収益が最大になるように開発すれば、公共財や市場取引のない財の規模が社会的にも最適になるという都市経済学の理論」である⁵（参考、金本（1997））。つまり、民間の経済動機のみで堤防高さが最適化される状況もある。そして、こういった状況あるいは近い状況を、インフラ整備の財源調達システムの変更で作ることも可能である。その意味で、経済学的観点からの財源調達システムの検討が必要である。

3. Dupuitの消費者余剰の海岸堤防整備への適用例：純便益最大化と動学的不整合⁶

第2節で示したように、Dupuitが約180年前に提案した公共プロジェクト設計における経済学の利用は、水害対策の政策現場では未だ行われていない。Dupuitや当時の土木技術者たちは、インフラ整備レベルは厚生最大になるように設計すべきと考えていた。現在の経済学でも、その方式は、ベンサム流厚生関数と呼ばれ、

⁵ 厳密には、住民の同質性や移動費用がゼロ、さらには土地が借地であることがデベロッパー定理に必要である。なお、土地分譲の場合の分析は Henderson (1985)に示されている。

⁶ Kono et al. (2016)の和文バージョンである RIETI（独立行政法人経済産業研究所）の working paper である河野他(2013)を一部要約したうえで加筆したものを第3節に示す。

代表的な社会厚生関数の一つである。本節では、B-C（純便益最大化）による防潮堤整備レベルの研究を行う。ただし、合わせて、Kydlan and Prescott (1977)が例示した氾濫域への移住者が引き起こす動学不整合問題についても定量的に分析を行う。

定量分析を行うにあたり、Dupuitの時代と比較すると現在はかなり恵まれていることがわかる。まず、Dupuitの時代より経済学が進展している。本節の分析に使われているモデルは、一般均衡モデルである。Dupuitの分析は部分均衡分析であり、分析する市場が着目市場に限られていた。一般均衡モデルは、すべての市場を対象にしており、すべての財の価格が政策により変化しうる。また、CGEモデル（あるいは都市を対象のCGEモデルとしてCUEモデル）の開発により、モデルのパラメータ推定や計算が簡単である。そして、モデルのパラメータ推定のために必要なデータの多くがDupuitの時代より容易に入手可能である。そして、パソコンや計算アプリケーションが開発されており、大規模な連立方程式を解くことが容易である。

3.1 動学的不整合問題と費用便益分析

近年、日本では公共投資政策に対して費用便益分析が義務づけられるようになり、事業種類別に費用便益分析マニュアルも整備されてきた。費用便益分析は便益が費用を上回るプロジェクトのみを採択するというものであり、無駄な公共事業という政府の失敗を避けるために大変有効な手段と考えられている。しかし、費用便益分析の義務化により住民が費用便益分析に基づく公共投資政策を期待して戦略的に行動することで、最善の社会厚生が達成できない問題、いわゆる動学的不整合問題⁷が生じる可能性がある。

その問題の一例として、Kydlan and Prescott (1977) が例示した「安い地価を背景に、洪水が起こる危険性のある地区に多くの人が移住したために堤防建設が行われる問題」を想定できる。この場合、堤防が建設されることを期待して多くの人が移住してくると費用のかかる堤防建設が行われ、最善の社会厚生を達成できない。この移住の形態としては、住民各々の判断で行われる場合もあればデベロッパーが介在し多くの住民がまとまって移住する場合も想定できる。ここで、費用便益分析の義務化は、住民の堤防建設に関する期待を下支えするもので、動学的不整合問題を助長することになる。

このような問題は、本来公共投資評価を社会システムの外から行う費用便益分析が義務化されることで社会システム内に組み込まれ、住民が費用便益分析を戦略的に利用することで発生する。つまり、住民の戦略的移住行動により住民の居住分布が変化すると費用便益分析による最適政策が異なるという不整合が生じる。実際、費用便益分析では住民の行動（顕示選好）に基づき公共投資の評価を行うため、住民の行動前後で最適と判断される政策が異なってしまう。費用便益分析が住民の行動（顕示選好）に基づくのは、住民の効用変化を政府が直接観察できないからである⁸。すなわち、選好に関して住民と政府の間に情報の非対称性があり、政府は観察可能な経済変量、すなわち住民の行動からしか効用変化を推計することができないのである。

このようにある動学タイミング（ここでは住民行動のタイミング）の前後で最適政策が異なることが、いわゆる動学的不整合問題（または時間不整合問題）である。この問題が起こる一般的構造はKydlan and Prescott (1977)により指摘されている。ただし、堤防の費用便益分析を含め具体的なモデル化および分析は行われていない。

⁷ 動学的不整合問題のメカニズムは、大別して2種類ある。一つはある時期の最適政策が時間の経過だけで最適でなくなるという場合、2つめは複数の主体のシュタッケルベルグゲームにおいてサブゲームパーフェクトの解が社会的最適解と異なる場合である。本研究は後者を扱う。なお、動学的不整合問題は時間不整合問題とも呼ばれる。

⁸ 仮に効用水準を直接測れるとすると、政策当局は最善の投資水準を決定でき、その最適政策をコミットメントすることが可能になる。最適政策をコミットメントできれば、住民の戦略的移住を防ぐことができ、動学的不整合問題は生じないといえる。ただし、その場合でも、移住コストが高ければ、住民の戦略的移住があると政策当局は当初の最適政策を効率的観点からみても変更せざるを得ない。なお、最善の投資水準でなく居住人口を制限しても最善政策を達成することが可能である。しかしながら、居住人口自体を制限する政策は一般には存在せず、土地利用政策では面積規制のみである。そのため、最適居住人口を計算できたとしても政策当局による人口制限は一般に難しい。

費用便益分析の動学的不整合問題の分析は、交通政策を例として分析しているKono and Notoya (2012)に限られる。彼らは、公共政策が固定的な場合（例．道路投資などの固定資本）と可変的な場合（例．バスサービスなどのフローサービス）のそれぞれについて、動学的不整合問題の発生メカニズムとその問題が起こる十分条件を示している。しかしながら、定性的分析にとどまり、その非効率の程度の分析はなされていない。費用便益分析以外をみても、動学的不整合問題については理論研究に比較して定量的分析の蓄積は極めて限定的である(木内, 2005)⁹。

そこで、本研究ではインフラ整備における費用便益分析がもたらす動学的不整合問題の非効率の程度を実証的に示すことを目的として、防潮堤整備を例に分析する。具体的な分析内容としては、東日本大震災で壊滅的な津波被害を受けた陸前高田市を対象地域として町丁目単位111ゾーンに分け、対象地域の立地均衡モデルのパラメータを現実データを用いてキャリブレーションし、防潮堤整備における費用便益分析の動学的不整合問題がもたらす厚生損失の大きさを定量する。立地均衡モデルは上田編著(2009, pp.111-114)やUeda et al. (2013) のComputable Urban Economic (CUE) モデルに防潮堤の整備効果を組み込んだモデルである。以下の2ケースをシミュレーションして、それぞれの立地均衡と防潮堤高さを求めて厚生を比較する。

ケース1：社会厚生が最大となる社会最適ケース

ケース2：住民が戦略的に移住した後に政府が費用便益分析によって防潮堤高さを決定する動学的不整合ケース

ケース1は、防潮堤の高さと件の立地均衡モデルにおいて、その防潮堤高さを社会的余剰最大化にするケースである。一方、ケース2は住民がリーダー、防潮堤の高さを決定する政府がフォロワーのシュタッケルベルグゲームの中で防潮堤の高さが決定される。

なお、本研究はインフラ整備における一般的な動学的不整合問題のメカニズムとその定量分析を目的としており、実際の復興計画の評価を意図していない。実際、陸前高田市で現在策定中の復興計画は、震災前の土地利用計画とは大きく異なったものであり、震災前には住宅地が広がっていた旧市街地エリアに公園や農業地区・産業地区を計画している。こういった復興計画は、従来土地利用に基づきキャリブレーションを行う本研究のモデルでは表現が難しい。ただし、本研究が対象としている動学的不整合問題はほぼ同じメカニズムで生じうる。すなわち、農業地区・産業地区においても、費用便益分析の結果を有利にするために、計画規模や昼間人口を大きく設定でき、必要な防潮堤が最適を超える高さで整備されうる。

そこで、実際の復興計画への本研究の成果の適用範囲としては、定性的なメカニズムについては、同地区の実際の復興計画に起こりうる問題として考えることができる。定量的結果については、震災前の土地利用実態に近い計画が仮に行われたとした時の動学的不整合問題の程度を示している。また、本研究のモデル分析結果を用いて、事後的に震災前の防潮堤の高さの評価や現在計画されている12.5mの防潮堤の妥当性についても検討可能である。本論文の主題ではないものの、これらについても必要に応じて検討結果を示す。

3.2 立地均衡モデル：陸前高田市モデル

本研究のモデルは陸前高田市を対象とし町丁目111ゾーンで構成されるモデルであり、ベースとして上田編著(2009, pp.111-114)およびUeda et al. (2013) のCUEモデルを用いる。これは、財市場のみならず土地の需要と供給が均衡するモデルである。行動主体は住民と不在地主の2主体である。立地主体の住民として、高齢者と高齢者以外の2種類の年齢階層を考慮し、それぞれの所得や選好の異質性をモデル化する。住民は土地、私事トリップ、合成財を消費し、その結果として得られるゾーン別の効用値に基づき居住地選択を行う。なお、長期均衡を求めるために移住費用をゼロと仮定する。また、土地は不在地主に所有されている。一方、

⁹ 実証分析が少ない理由として、木内(2005)は規律性やインセンティブといった変数が多くの場合、観察不可能であるためであろうと述べている。なお、定量分析の例としては Persson and Tabellini(2004) や Klein et al. (2008), Pettersson-Lidbom (2010)があげられる。

企業立地は、東日本大震災以前の立地パターンに固定する。

3.2.1 住民

住民は、私事トリップ x_i^m (トリップ数), 土地面積 l_i^m (宅地消費量), 合成財 Z_i^m を消費する。なお、効用関数は準線形に特定化して、式(1)のように表される。式(2)は所得制約である。

$$V(q_i, r_i, I_i^m) = \max[\alpha_x^m \ln x_i^m + \alpha_l^m \ln l_i^m + Z_i^m] + \tau_i^m \quad (1)$$

$$s.t. \quad Z_i^m + q_i x_i^m + r_i l_i^m = I_i^m - D_i^m \quad (\text{ここで, } I_i^m \equiv w(t^m - s_i^m)) \quad (2)$$

ここで、 i : ゾーンを表す添字, m : 年齢階層を示す添字, q_i : 私事トリップ費用, r_i : 住宅地代, I_i^m : 1人あたりの所得, α_x^m, α_l^m : パラメータ, w : 時間価値, t^m : 拘束時間, s_i^m : 通勤・通学時間, D_i : ゾーン別の年あたり津波被害の期待値, τ_i : ゾーン固有の魅力度 (固定値 $\bar{\tau}_i$ と個人間で異なる値をとる確率変数 ε_i の単純和で構成される。)

本来は、期待効用関数を用いてリスクプレミアムも考慮すべきである。ただし、データ制約があるため複雑なモデルのキャリブレーションは不可能である。よって、本研究では第1次近似としてリスクプレミアムのない準線形効用関数を用いる。その結果、津波被害の影響を期待値 D_i で表現できる。これは、住民が受ける被害の期待値を毎年蓄積することで、被害に備えていると解釈できる。また、完全保険が存在しており、その保険に加入している場合と解釈することもできる。

式(1), (2)の効用最大化問題を解くと式(3), (4), (5)のように私事トリップ消費量 x_i^m , 宅地面積消費量 l_i^m , 間接効用関数 V_i^m が求められる。

$$x_i^m = \frac{\alpha_x^m}{q_i} \quad (3)$$

$$l_i^m = \frac{\alpha_l^m}{r_i} \quad (4)$$

$$V_i^m = I_i^m - D_i^m - \alpha_x^m \ln q_i - \alpha_l^m \ln r_i - \alpha_x^m - \alpha_l^m + \tau_i^m \quad (5)$$

式(3), (4)よりパラメータ α_x^m , α_l^m は、式(6)のようにそれぞれ年あたりの土地消費額、交通消費額で表わされる。

$$\alpha_x^m = q_i x_i^m \quad \text{and} \quad \alpha_l^m = l_i^m r_i \quad (6)$$

ここで、年齢階層 m の住民は効用水準 V_i^m の高いゾーンへ立地変更する。また、確率変数 ε_i をガンベル分布 (平均ゼロ, 分散 $\pi^2 / 6(\theta^m)^2$) と仮定して、立地選択行動はロジットモデルで表される。ここで、移住費用はゼロである。また、各ゾーンの属性人口 N_i^m はゾーンの年齢階層別総人口 N_T^m に立地選択確率 P_i^m を乗じることによって算出される。

$$P_i^m = \frac{\exp \theta^m (V_i^m + \bar{\tau}_i^m)}{\sum_i \exp \theta^m (V_i^m + \bar{\tau}_i^m)} \quad (7)$$

$$N_i^m = P_i^m \cdot N_T^m \quad (8)$$

ここで、 θ^m は立地選択モデルのロジットパラメータ (1に基準化する) である。

住民の土地総需要量 L_i^m は一人あたり土地消費面積に立地者数を乗じて、式(9)のように表わされる。

$$L_i^m = l_i^m \cdot N_i^m \quad i \in \{1, \dots, 111\} \quad (9)$$

以下、モデルで用いる時間価値、所得、土地・交通パラメータ、通勤・通学時間の推計およびキャリブレーションに用いたデータ出典とその方法を順に示す。

○時間価値 w (=平均労働賃金率) : 2000年NHK国民生活時間調査(全国編)による一人当たり拘束時間¹⁰(時間/日・人)を2005年国勢調査より求めた年齢階層別人口(人)を用いて加重平均し、365(日)と総人口(人)をかけあわせたものを全体の年間労働時間(時間)とし、これで県民経済計算の雇用者所得(円)を割ったものを時間価値 (=平均労働賃金率) とする。データの出典および単位等詳細を表1に示す(表1のNo. 1~5を参照)。

○年齢階層別所得 I_i^m : 推計した時間価値(円/時間)に一人当たり拘束時間から後で作成するゾーン別通勤・通学時間を差し引いたものをかけあわせて作成する(すなわち、 $I_i^m \equiv w(t^m - s_i^m)$)。(表1のNo. 5と6および表2を参照)

○交通パラメータ α_x^m : 交通パラメータは年あたり交通消費額(円/年)を表す。交通消費額は、時間価値に一人当たり私事トリップ(トリップ/人)×一人あたり私事トリップ時間(時間/トリップ)×365(日)をかけあわせて作成する。(表1のNo.5,7,8,9を参照)

○土地パラメータ α_l^m : 土地パラメータは年あたり土地消費額(円/年)を表し、年齢階層別所得に住宅ローン負担率をかけあわせて作成する。(表1のNo. 10と11を参照)

○通勤・通学時間 s_i^m : 非高齢者および高齢者は通勤・通学を行う。通勤・通学時間は発地ゾーン別平均時間である。ゾーン間所要時間を着地の通勤・通学トリップで加重平均したものに一人あたり通勤・通学トリップ(トリップ/人)を乗じて作成する(表2参照)。

表1 時間価値および所得

No.	項目	単位	データ出典または計算方法
1	一人あたり年齢階層別拘束時間	時間/日・人	国民生活時間調査2000(全国編)、平日、全体の平均時間利用、非高齢、高齢者(60代と70歳以上の平均)
2	年齢階層別人口	人	2005年国勢調査
3	年齢階層別総年間労働時間	時間/年	1. 一人あたり年間労働時間×2. 年齢階層別人口×365日
4	雇用者所得	円/年	県民経済計算、雇用者報酬
5	時間価値 w	円/時間	4. 雇用者所得/3. 年間労働時間
6	所得 $I=w(t-s)$	円/年	5. 時間価値 $w \times (1. \text{拘束時間 } t - \text{通勤通学時間 } s)$
7	一人あたり私事発生トリップ数	トリップ/人	推計私事トリップ(補遺2参照)/人口
8	私事トリップ時間	時/トリップ	発ゾーン別期待最小費用
9	α_x^m (=交通消費額)	円/年	365日×5. 時間価値×7. 一人あたり私事発生トリップ数×8. 私事トリップ時間
10	住宅ローン負担率	%	家計調査年報、住宅ローン返済世帯(土地家屋借金返済)の実収入に占める土地家屋借金返済額(全年齢平均: 15.5%※)
11	α_l^m (=土地消費額)	円/年	6. 所得×10. 住宅ローン負担率

表2 通勤・通学時間

No.	項目	単位	備考
1	トリップあたりの通勤時間	時間/トリップ	ゾーン間所要時間を着地の通勤トリップで加重平均
2	トリップあたりの通学時間	時間/トリップ	ゾーン間所要時間を着地の通学トリップで加重平均
3	一人当たり通勤発生トリップ	トリップ/人	通勤発生トリップ/人口
4	一人当たり通学発生トリップ	トリップ/人	通学発生トリップ/人口
5	通勤・通学時間 s	時間/人	1. 通勤時間×3. 一人あたり通勤トリップ+2. 通学時間×4. 一人あたり通学トリップ

¹⁰ 家庭や社会を維持向上させるために行う義務性・拘束性の高い行動と定義される。仕事関連、学業、家事、社会参加からなる。

最終的に、表3に示す時間価値、所得、土地・交通パラメータが得られた。

表3 家計パラメータ

	モデルの記号	65歳未満	65歳以上
時間価値	w	538.0	538.0
交通パラメータ	α^m_x	40.8	41.6
土地パラメータ	α^m_l	18.0	20.2

3.2.2 企業

通勤先は固定とし、ゾーン別の従業者数は東日本大震災前の実データを用いる。

3.2.3 地主

式(10)のように住宅用途の土地供給関数を設定し、実データを用い土地供給関数を作成する。また、地主は住民に住宅地を供給して地代収入を得る。

$$y_i = A(r_i)^\sigma Y_i \quad (10)$$

ここで y_i : 住宅地供給面積, Y_i : 住宅地供給可能面積, σ : パラメータ(住宅地)である。

式(10)に実測データの y_i , Y_i , r_i を用いて回帰分析を行いパラメータ σ , A を求めた。ここで、得られたゾーン別推計土地供給面積 y_i を実際のゾーン別土地供給面積に完全に一致させるためゾーン別定数項 Δ_i をかけあわせて式(11)のような住宅用途土地供給関数が得られる。

$$y_i = \exp(1.508)(r_i)^{0.533} Y_i \cdot \Delta_i \quad (11)$$

3.2.4 均衡条件

土地市場均衡条件は式(12)で表され、人口の制約は式(13)で表される。

$$y_i = \sum_m L_i^m \quad i \in \{1, \dots, 111\} \quad (12)$$

$$\sum_i N_i^m = N_T^m \quad m \in \{1, 2\} \quad (13)$$

3.2.5 防潮堤整備モデル

津波被害のゾーン別年あたり被害額をゾーン別所得から差し引いて、津波リスクを立地モデルに組み込む。

なお、整備防潮堤高を高くするほど津波被害リスクは減少し、年あたり被害額は減少することになる。年あたり被害額の計算は、まず各ゾーンに浸水深を津波高ごとおよび堤防高ごとに設定し、それに津波遡上高別津波発生確率を考慮して、津波被害である家屋の損壊リスクおよび死亡リスクを計算する。

浸水深の設定方法を述べる。ゾーン別浸水深は岩手県が作成・公表した陸前高田市の地震・津波シミュレーション及び被害想定調査¹¹(岩手県, 2003)を陸前高田市の中心部である高田地区¹²(図3参照)の町丁目ゾーンと重ね合わせ設定する。また、岩手県による津波シミュレーション(2003)の高田地区遡上高は明治三陸地震10.4m, 昭和三陸地震6.0m, 想定宮城県沖地震10.2mの3つの遡上高の異なる地震を想定して計算されている。そこで、本研究ではこの津波シミュレーションの想定遡上高 Φ を10mと仮定して、各ゾーンの浸水深の計算に用いる。

防潮堤高さごとにゾーン別浸水深 $\Lambda_i(K, \Phi)$ を設定する。まず、ケースi)として10mまでの遡上高 Φ の津波

¹¹ 明治三陸地震による津波の再来、昭和三陸地震による津波の再来に加え、想定宮城県沖地震による津波の3つの津波を考慮し、予測される最大の浸水深を図示したものである。

¹² 本研究独自の呼び方であり、防潮堤を整備することによって影響を受けるゾーンの総称である。図3に地図を示す。

の場合，その遡上高が防潮堤整備高 K を超えるとき，式(14)に示すように浸水深 $\Lambda_i(K, \Phi)$ は津波シミュレーション(2003)による想定浸水深 Ω_i と同一とする．次に，ケースii)として津波の遡上高 Φ が津波シミュレーション(2003)の設定遡上高10mを超す場合，式(15)に示すように，その遡上高が防潮堤整備高 K を超えるとき，津波シミュレーションによる想定浸水深 Ω_i に10mを超した値を足したものを浸水深として設定する¹³．また，整備防潮堤高 K が津波による遡上高 Φ より高い場合は，式(16)のように全ゾーン浸水深ゼロとする．

i) 遡上高 $\Phi \leq 10m$ and 遡上高 $\Phi > \text{防潮堤高} K$

$$\Lambda_i(K, \Phi) = \Omega_i \quad (14)$$

ii) 遡上高 $\Phi > 10m$ and 遡上高 $\Phi > \text{防潮堤高} K$

$$\Lambda_i(K, \Phi) = \Omega_i + (\Phi - 10) \quad (15)$$

iii) 防潮堤高 $K \geq \text{遡上高} \Phi$

$$\Lambda_i(K, \Phi) = 0 \quad (16)$$

ここで Φ : 遡上高， Λ_i : 浸水深， Ω_i : 津波シミュレーション(2003)の浸水深， K : 整備防潮堤高 $T.P.(m)$

本研究では，浸水深を設定するために津波シミュレーション(岩手県，2003)をベースに用いる．次に，1年あたりの遡上高 Φ 別津波発生確率 $T(\Phi)$ を作成する．まず，世界の災害情報を扱う National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) の National Geographical Data Center のホームページ上に整理された地震および津波観測データ(1611~2011の400年分)より三陸に津波被害をもたらしたものを抽出し，その遡上高 Φ 別分布(400年・回数/m)を図1に示した．ここで，規模の大きい東日本大地震(15m)・チリ地震(6m)・昭和三陸地震(6m)・明治三陸地震(10m)・慶長三陸地震(20m)については，個別に対象地域のデータを調査しその値を用いた¹⁴．この実績データから今後の予測分布を推計するために，実績の津波高さ前後2mの津波が同確率で起こると仮定して，実績遡上高 Φ 別到来回数を観測遡上高から前後2mに振り分けた¹⁵．さらに400(年)で割ると1年あたりの遡上高 Φ 別津波発生確率 $T(\Phi)$ が図2のように求められる．

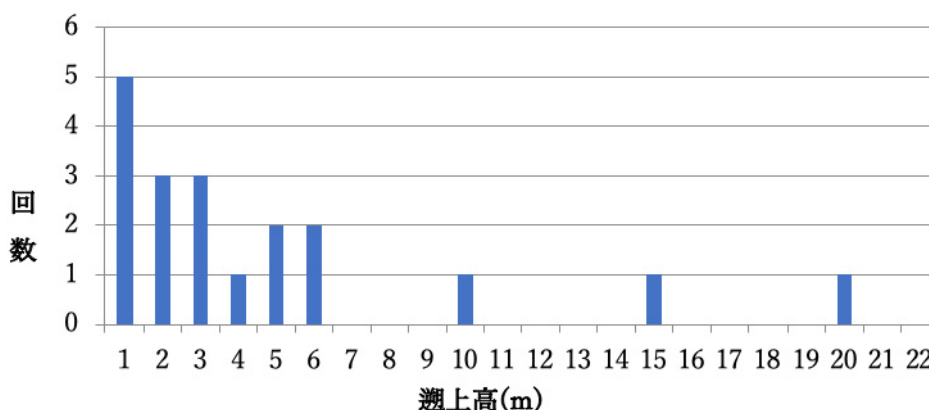


図1 400年あたり遡上高別津波到来回数（実測）

¹³ ここで，シミュレーション時の想定遡上高 10m より規模の大きな津波が起きた際に新たに浸水するゾーンがある．ただし，高田地区は平坦な市街地を山が囲んでいる地形であり，そのようなゾーンは2ゾーンしか存在しない．これらのゾーンについては到来する津波による遡上高が 10m の時を浸水深 0m とし，津波による遡上高が 10m を越した場合は超過した分を浸水深として設定する．

¹⁴ NOAA のデータは，三陸全体のデータであり，対象地域である陸前高田市のものではない．そこで，規模の大きな3つの津波についてのみ，陸前高田市あるいは陸前高田市に近い田老町のデータを用いた．

¹⁵ 3 m 未満の津波については実データそのものとした．なお，後の分析で示すように，最適防潮堤の高さは 10m である．最適な高さは限界便益と限界費用の比較で決定されるため，低い津波についての振り分け方は，被害期待値の変化さえなければ，最適な高さの判断には全く影響しない．

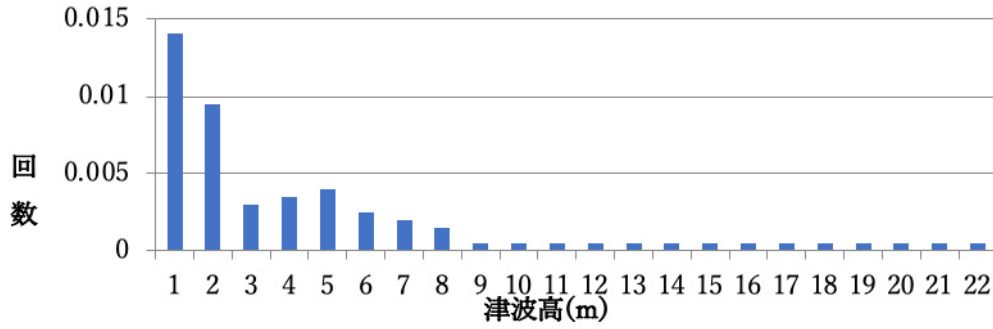


図2 1年あたり遡上高別津波到来回数（推計）

次に家屋被害リスク・死亡リスクの設定をする．今回津波による金銭的被害は家屋の損壊のみとし，木造住宅の損壊基準($\Lambda_i(K, \Phi) \geq 2m$ のとき全壊， $0 < \Lambda_i(K, \Phi) < 2m$ のとき半壊)に沿って各状態ゾーン別に被害状況を設定する．また，家屋の価格一軒当たり2,000万円・陸前高田市の平均世帯人数3.2人(2005年国勢調査)・社会的割引率4%とする．

死亡リスクについては，東日本大地震(2011.3)における陸前高田市の死者数を2005年国勢調査時の陸前高田市人口で割り，これを津波が堤防を越えた時の死亡率（津波死亡率）とする．また，統計的生命価値に内閣府推計（2007年）の26,000(万円/人)¹⁶を用いる．

上記設定を用いて年あたり被害額 $D_i(K)$ を算出する¹⁷．また，各ゾーンに住む居住者が津波による浸水で被る可能性のある被害は1)家屋の損壊および2)自身の死亡の2項目のみとする．

まず，1)家屋損壊による差し引き額を算出する．家屋2000万円を平均世帯人数3.2人で割ったものを浸水した際の家屋損壊による被害額とし，これに津波発生確率 $T(\Phi)$ をかけ足し合わせたものを全壊判断ゾーン($\Lambda_i(K, \Phi) \geq 2$)の1人あたり年あたり差し引き額 $D_i^{Comp}(K)$ とする．なお，半壊判断ゾーン($0 < \Lambda_i(K, \Phi) < 2$)の1人あたり年あたり差し引き額 $D_i^{Half}(K)$ はその半分とする．

遡上高 Φ が設定防潮堤高 K を超す場合において，

$$D_i^{Comp}(K, \Phi) = \sum_{\Phi=1}^{22} \{(2000 / 3.2) T_i(\Phi)\} \quad \text{when } \Lambda_i(K, \Phi) \geq 2 \quad (17)$$

$$D_i^{Half}(K, \Phi) = \sum_{\Phi=1}^{22} \{(1000 / 3.2) T_i(\Phi)\} \quad \text{when } 0 < \Lambda_i(K, \Phi) < 2 \quad (18)$$

ここで， $T(\Phi)$: 遡上高 Φ メートル別津波到来確率．

次に2)死亡リスクによる年あたり被害額を算出する．設定した津波死亡率(R)に内閣府算出統計的生命価値(L)をかけあわせたものを浸水した際の死亡リスクのストックの被害額とし，これに遡上高別津波発生確率 $T(\Phi)$ をかけ足し合わせたものを浸水判断ゾーンの1人当たり年あたり差し引き額 D_i^{Death} とする．(遡上高 Φ が設定防潮堤高 K を超す場合において)

$$D_i^{Death}(K, \Phi) = (R \times L) T_i(\Phi) \quad \text{when } \Lambda_i(K, \Phi) > 0 \quad (19)$$

これらより，ゾーン別年あたり被害額 $D_i(K)$ は算出した家屋の損壊による年あたり被害額と死亡リスクによる年あたり被害額を足しあわせたものとなる．

$$D_i(K, \Phi) = D_i^{Comp}(K, \Phi) + D_i^{Half}(K, \Phi) + D_i^{Death}(K, \Phi) \quad (20)$$

¹⁶死亡損失(2.26 億円)に死亡による金銭的損失(0.33 億円)を加えた．

¹⁷今回，所得から差し引かれる1人当たり年あたり被害額 D は年あたりの費用，すなわちフローの値である．しかしながら， D を求める際，家屋損壊や死亡によるストックの被害額をフローの値に直す必要はない．被害を及ぼす津波は毎年起こる可能性があるため，ストックの被害額に年あたりの被害確率

3.2.6 社会的粗厚生の算出

社会的粗厚生は住民の厚生と不在地主の厚生の和によって求める。粗厚生の意味は、防潮堤コストを社会厚生から除く前の厚生という意味である。まず、住民の厚生 W^H は全111ゾーンにおける住民の間接効用のログサムを計算することで求める。

$$W^H = \sum_m N_T^m \text{Exp}\{\max_i (V_i^m + \tau_i)\} = \sum_m N_T^m \ln \sum_{i=1}^{111} \exp(V_i) \quad (21)$$

N_T : 陸前高田市総人口, V_i : ゾーン別効用

不在地主の厚生 W^L は全111ゾーンにおいて不在地主が住民に土地を供給したことによって得た所得を足し合わせることで求める¹⁸。なお、業務用途の地代も上昇するため、厳密には考慮が必要である。しかしながら、シミュレーション結果である表5や図5に示すように、地代収入変化が社会厚生変化に占める割合はかなり少ない。また、企業のモデル化を行っていないため、この業務用途における地代上昇の社会厚生への影響は無視する。

$$W^L = \sum_{i=1}^{111} r_i y_i \quad (22)$$

r_i : 地代, y_i : 住宅用途土地供給面積。

最後に、算出した住民の厚生および不在地主の厚生を足し合わせることで社会的粗厚生を求める。

$$W = W^H + W^L \quad (23)$$

なお、防潮堤を整備した時に変化する社会的粗厚生が整備便益である。なお、ストック変数である防潮堤整備コストと比較するために、社会的割引率4%で現在価値換算して便益を求める。

3.2.7 防潮堤整備コストの算出

高さ別防潮堤整備の費用は、過去の岩手県による防潮堤整備コスト(チリ地震津波災害復興誌)および現段階の岩手県試算防潮堤整備コスト(高田海岸)データをもとに回帰分析により作成する。この際、名目工事費を実質工事費に換算する(金額を現在価値に換算する)ために、建設工事費デフレーターを用いる。また、関数形は以下のように設定する。

$$C(K) = \gamma \exp(\phi \cdot K) \quad (24)$$

$C(K)$: 整備防潮堤高 K 別整備コスト, γ, ϕ : パラメータ

回帰分析により作成したコスト関数および計算した設定防潮堤高ごとの防潮堤整備コストは図6に示した回帰線あるいは表4のような数値となる。回帰されたコスト関数を式(25)に示す。また、今回整備を考える防潮堤は高田地区沿岸に整備される予定の延長1,977m(岩手県策定)の防潮堤である。図4に整備防潮堤の位置を青線で示した。

を乗じたものはフローの期待被害額となる。

¹⁸ なお、弾力的住宅土地供給関数を考慮しているため、住宅土地供給に関わる機会費用が生じている。この機会費用は、住宅に利用できるように森林を伐採するコストや農業などの代替的利用の収入などで構成される。後者の場合には、農地収入が住宅収入に変化するだけであり、不在地主の収入として何らかのコストを減じる必要性はない。ただし、この割合はわからない。そこで、本研究の社会厚生関数では、その機会費用の多くが代替利用による収入(例: 農地代収入)と考えて、この機会費用を控除しなかった。なお、そもそも土地収入は効用に比較してかなり小さい(表5または図5参照)ため、この機会費用分の考慮や無視は、結果に大きな影響を与えない。

$$C(K) = 1977[0.71\exp(0.56 \cdot K)] \quad (25)$$

表4 推計された防潮堤整備コスト

堤防高(T.P.)	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m	12m	13m	14m	15m
整備コスト(億円)	2.3	4.1	7.1	12.5	22.0	38.5	67.5	118.3	207.5	363.7	637.5

3.2.8 基準の作成

東日本大震災 前の防潮堤高T.P. 6m¹⁹の時のリスク D_i (6) を計算し、モデルの均衡を計算し、各ゾーンの人口密度を震災前に一致するように各ゾーン固有の魅力度 $\bar{t}_i$ を求める。このモデルの均衡を基準均衡とする。

3.3. シミュレーション

3.3.1 2ケース別シミュレーション

社会的最適ケース

社会的最適ケースでは、3.2節でキャリブレーションしたパラメータのモデルを用いて、防潮堤高をT.P. 5m～T.P. 15mまで変化させて社会厚生を最大化する防潮堤高さを求める²⁰。なお、シミュレーションは1mごとに行う。

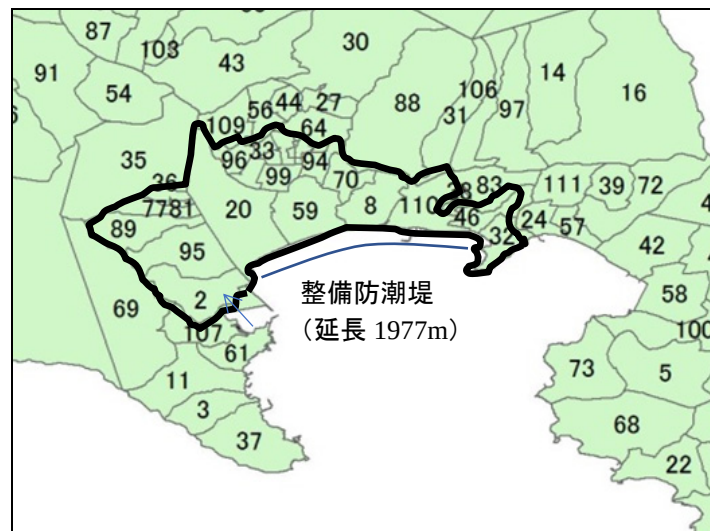


図3 高田地区（太線で囲んだ領域、番号はゾーン番号）

動学的不整合ケース

動学的不整合ケースでは、居住人口（あるいはデベロッパーがアナウンスする計画人口）のもとで最適な高さの防潮堤が整備される。防潮堤によって浸水被害が変化する高田地区（図3参照）とその他のゾーンの2ゾーンに分ける。次に高田地区の人口を震災前の1.0倍～2.0倍（その他のゾーンの人口は陸前高田市の総人口から高田地区の人口を引いたものとする）として、それぞれの人口規模に応じた防潮堤の高さを費用便益分析により決める。ここで、防潮堤の便益は、国土交通省河川局の費用便益マニュアルと同様に、「津波被害額の防潮堤による軽減額」で求める。計算は、防潮堤高さ1mごとに行う。高さKmの防潮堤をさらに1m高

¹⁹ 実際の東日本大震災前の堤防高は 5.5m である。ただし、本研究では、防潮堤高 1 m ごとに計算をするため、震災前の堤防高を 6m とみなす。

²⁰ $dW^H = N_T^m \sum_{i=1}^{111} P_i^m dV_i^m = \sum_{i=1}^{111} N_i^m dV_i^m$ で計算できる。

くすることによる便益の増分 $\Delta \text{Benefit}(K)$ は式(26)のように計算できる．なお，最適な防潮堤高さ K^* のとき，防潮堤高さ1mの追加による便益の増分を費用の増分が上回る．最適条件式は式(27)で示される．

$$\Delta \text{Benefit}(K) = \sum_{i=1}^{111} [D_i(K) - D_i(K+1)] \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{Benefit}(K^*) &\geq \Delta \text{Cost}(K^*) \quad (= C(K^*) - C(K^*-1)) \text{ and} \\ \Delta \text{Benefit}(K^*+1) &< \Delta \text{Cost}(K^*+1) \quad (= C(K^*+1) - C(K^*)) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで D_i :ゾーン別年あたり被害額， K :整備防潮堤高(T.P.)， K^* :最適防潮堤高(T.P.)である．

3.3.2 シミュレーション結果

ここにはシミュレーション過程と結果を示し，考察については社会的最適ケースを3.3節に，動学的不整合ケースを3.3.4節に示す．

社会的最適ケース

高田地区にT.P.5m~15mの防潮堤を整備した際の住民の厚生・地主の収入・住民の厚生と地主の収入の和の変化である便益を表5に示す．なお，基準（防潮堤高さ6m）からの増減で便益および費用を示している．同じものを図4に図示している．便益が水色線で示され，防潮堤整備費用が紺色線で示されている．また，便益から整備費用を差し引いた純便益（＝社会厚生の変化）が赤線で示されている．整備防潮堤が津波高さ8mを超えると，便益の伸びが鈍化する．これは，図2に示したように津波到来回数が8mを超えると減少するからである．純便益をみると，高田地区における社会的最適な防潮堤高はT.P.10mであり，その際の純便益は約114億円である．なお，純便益最大点では，図4からもわかるように，公共財の最適供給条件であるボーエンサミュエルソン条件，すなわち限界便益の総和が限界費用と一致している．

表5 社会的最適ケースの結果（単位：現在価値）

防潮堤高(T.P.)		5m	6m(基準)	7m	8m	9m	10m	11m	12m	13m	14m	15m
便益	家計(億円)	-66.1	0.0	59.3	107.8	124.8	142.2	163.1	185.0	207.3	230.2	253.7
	地主(億円)	-3.1	0.0	2.7	4.7	5.4	6.1	7.2	8.3	9.4	10.5	11.7
	増減額(億円)	-69.2	0.0	62.0	112.5	130.2	148.3	170.3	193.2	216.7	240.7	265.3
費用	増減額(億円)	-1.8	0.0	3.1	8.5	17.9	34.4	63.4	114.3	203.4	359.6	633.5
	純便益(億円)	-67	0	59	104	112	114	107	79	13	-119	-368

注：増減額とは，防潮堤高6mを基準として，そこからの防潮堤増減による差額

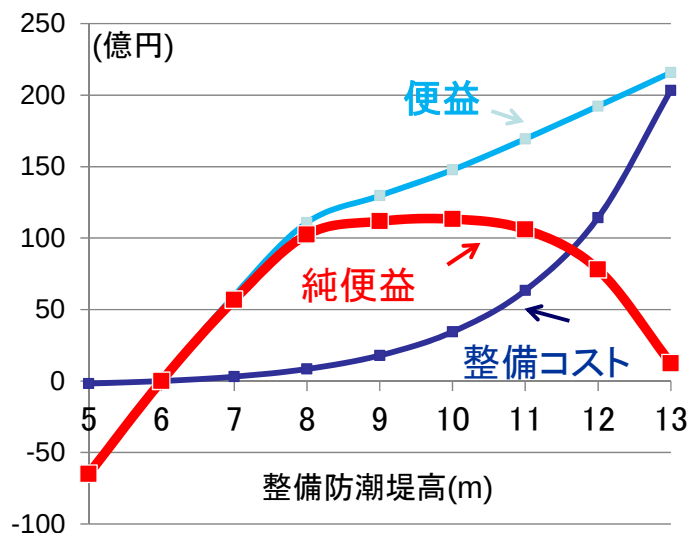


図4 社会的最適ケース結果

動学的不整合ケース

高田地区の人口を震災前人口からその2倍まで変化させて、その時の最適な防潮堤高を費用便益分析により求めたものを表6に示す。高田地区の人口が社会的最適な状態(8440人)から1.5倍程度(13080人)になった時、整備される防潮堤高はT.P. 11mと社会的最適なケースより1m高くなった。

表6 人口を与件として費用便益分析によって求めた防潮堤高

与件: 高田地区人口(人)	費用便益分析による最適 防潮堤高: T.P.(m)	結果: 被害軽減額(億円)
(震災前) 6885	9.5	128.0
7575	9.5	145.0
(Optimal) 8440	10.0	167.9
8950	10.0	181.8
9640	10.0	189.8
10330	10.0	209.8
11015	10.0	223.8
11705	10.5	251.0
12395	10.5	265.8
13080	11.0	289.0
13770	11.0	313.3

3.3.3 考察

社会的最適なケース

シミュレーション結果において便益の増加から防潮堤整備費用を差し引いた純便益をみると、高田地区における社会的最適な防潮堤高はT.P. 10mであり、その際の純便益は約114億円であった。このT.P. 10mという値は震災前の防潮堤(基準)高T.P. 6mよりもかなり高い²¹。このことに加えて岩手県による津波被害想定調査においても市の中心における浸水高が深刻と予測されており、震災前防潮堤T.P.6mは整備不十分であったといえる。また、人口という観点から高田地区を見ても社会的最適な防潮堤高T.P. 10mの時の人口は8440人、震災前(防潮堤高T.P. 6m)の人口は6885人であり、防潮堤高が不十分だったことから、実際に居住していた人口が最適人口と比較し少ない結果となっていた可能性がある。

表7 防潮堤高を与件とした時の均衡人口

与件: 防潮堤高T.P.(m)	結果: 高田地区人口(人)
6.0	(震災前) 6885
7.0	7600
8.0	8095
9.0	8265
10.0	(Optimal) 8440
11.0	8645
12.0	8860

動学的不整合ケース

社会的最適なケースでは、高田地区における社会的最適な防潮堤高はT.P.10mであり、その際の純便益は約114億円であった(表5および図4参照)。ここで、純便益とは便益から防潮堤整備コストを差し引いた値である。動学的不整合ケースでは、デベロッパーが戦略的に住民を移住させ、高田地区の人口が社会的最適な状態から約1.5倍程度(震災前の2倍程度)の13080人になると、整備される防潮堤高はT.P.11mとなることが分かった。

ここで、上記2ケースの比較を図5を用いて行う²²。図5の縦軸は(A)が整備防潮堤高、(B)が高田地区の純

²¹ 2013年4月現在、計画されている整備防潮堤高は12.5mである。この防潮堤高に対する費用便益分析を整備する岩手県では行っていない。

²² この図は、Kono and Notoya (2012)のFigure 2に概ね相当する図である。

便益を表し、横軸は(A), (B)ともに高田地区の人口を表す。また横軸の最小値は震災前高田地区人口、最大値が震災前高田地区人口のおよそ2倍である。曲線(a)は社会的最適ケースの結果であり、整備防潮堤高が決定した後に均衡した人口が住み着いた際の高田地区の人口を示す。曲線(b)は動学的不整合ケースであり、高田地区の人口が決定した後に費用便益分析により決定した整備防潮堤高を示す。また、曲線(c)は整備防潮堤高ごとの被害軽減額を震災前防潮堤高T.P.6mの場合と比較した整備防潮堤高ごとの高田地区における便益の値である。これらの便益は、住民あるいは不在地主に分配できる便益であり、デベロッパーがこの分配を行うことができる。つまり、(a), (b)の差が動学的不整合問題の存在とその程度を表しており、(c)がその動学的不整合の要因となる便益を表している。

なお、高田地区の便益はこの右端の人口13080人を超えても便益は上がり続けていた²³。そのため、政府がより多くの人口がこの地区に居住することが可能と判断して、その人口規模に応じて費用便益により整備するとより高い防潮堤ができる。ただし、政府をデベロッパーあるいは住民が欺くのも限度があるため、ここでは、震災前の高田地区人口の2倍の人口（13080人）が達成されると以下の議論では想定する。

以上のように、デベロッパーにより引き起こされる戦略的移住により、高田地区の人口が最適人口の1.5倍（13080人）のケースの整備防潮堤高T.P.11mを想定すると、社会的最適な防潮堤高T.P.10mを整備する際のコストと比較すると約29億円の差がある。これは税金が無駄な公共投資に注がれることを意味する。また、コスト差を社会的割引4%を用いてフローに直すと約1.2億円となる。ここで、陸前高田市の平成21年度予算は約103億円であるため、この額は、市の毎年予算の1%強に相当する。

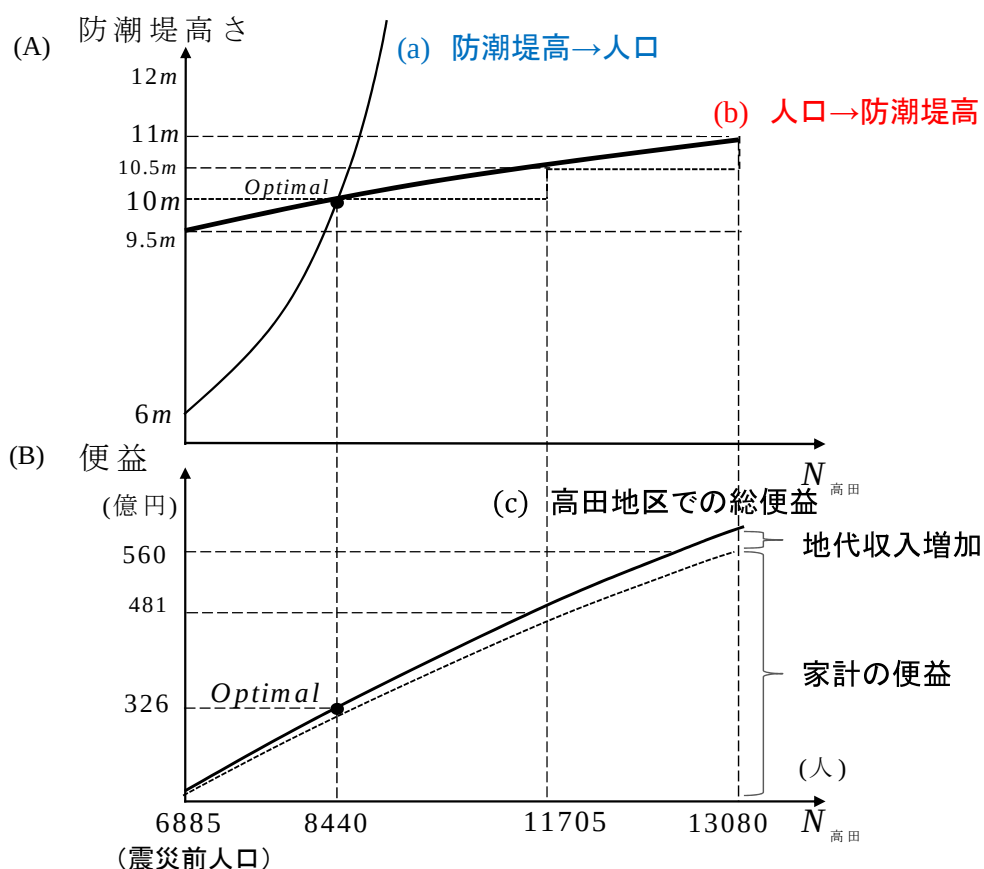


図5 動学的不整合結果

²³ 東日本大震災前の陸前高田市の人口は、およそ 24,000 人である。この人口が全員、高田地区に住んだ場合でも、費用便益分析による最適防潮堤高は 12m であった。

表6, 7 (または図5) より高田地区の人口が13,080人の時, 費用便益分析により決定される整備防潮堤高は11mであるのに対し, 整備防潮堤高11mの際の均衡人口は8645人であることが分かる。これはつまり, 防潮堤整備を利用しようと高田地区に移住した住民を防潮堤整備マニュアルの費用便益分析整備における便益計算に組み込んだ上で防潮堤高を決定したにも関わらず, 均衡後多くの人口が再び高田地区から離れてしまうことを示す。ただし, この均衡を予測するためには, 住民の選好を知る必要がある。本研究では, 住民の効用関数を仮定しているため, この均衡を予測できる。しかしながら一般に政府は住民の選好を知ることはできず, 費用便益分析により便益を計測せざるを得ない。

最後に, 防潮堤のインフラ整備コストと動学的不整合問題の程度を分析して, 防潮堤以外のインフラ整備における動学的不整合問題について考察する。防潮堤整備費用は図4の青線のように整備規模拡大によるコスト上昇が大きくなる特性を持つ。すなわち, 急激な費用逓増のインフラ整備といえる。そのため, デベロッパによる戦略的行動によって多くの住民が高田地区に最適の1.5倍の人口になる程度に移住してきても便益上昇による防潮堤高は社会的最適のT.P.10mからT.P.11mへと変化するにとどまっている。道路整備のように規模拡大による整備費用の上昇が緩やかなインフラ整備においては, 費用便益分析を用いた戦略的行動に対する整備規模増加がより敏感となり, より規模の大きい動学的不整合問題の非効率が生じるといえる。

3.4. インフラの動学的不整合問題と費用負担

防潮堤は, その高さに関して逓増的に費用が増加する。特に10mを超えるとかなり高い。そのため, 多くの人口が戦略的に移住してきてもその最適高さの増分は1mに留まる。仮に, 整備するインフラが道路整備などで, 整備規模の増大によるコストの上昇が緩やかな場合, より規模の大きい動学的不整合問題の非効率が生じることになる。そういったプロジェクトについては動学的不整合問題をより注意する必要がある。

公共プロジェクトにおける動学的不整合問題を避けるためには, 全額の費用負担を受益者である住民が行えばよい。Dupuit (1852) が既に述べていた堤防の受益者が費用を負担する制度であれば, ここで取り上げた動学的不整合問題は起こらない。例えば, 本研究のケースでは, 受益を得る地区の固定資産税で徴収可能である。しかし, 固定資産税率を一部の地域だけ高くすることは世界的にもあまり一般的でない²⁴。受益者負担による整備が不可能であれば, 動学的不整合問題を考慮のうえ, 整備を行うことが必要である。

4. まとめ

本稿では, Dupuitが論文で展開した議論のうち, 現在の水害対策を考えるうえで利用可能なものを抽出して, 現在のわが国のインフラ整備に関する現場と研究についての現状と比較を行った。その結果, Dupuitが提案した経済学理論を用いたインフラ整備手法は, 現在でも我が国に導入されていないことが示された。

津波防潮堤高を経済学モデルで純便益最大化に基づいて決定する方法の紹介も行った。本稿で紹介した方法は連立方程式で経済システムを表し, その均衡が防潮堤高さにより変化することをシミュレーションする方法である。このように経済システムの均衡を解く方法以外に, 津波による浸水の影響だけを見る方法も考えられる。この場合, 内生的に土地利用を解くことはできない。しかし, 本稿で紹介したような連立方程式を解く方法より簡便である。なお, 土木学会減災アセスメント小委員会 (海岸工学委員会と土木計画学研究委員会) が現在最終とりまとめを行っている「津波に対する海岸保全施設整備計画のための技術ガイドライン」(2021)では, この簡易版による経済評価方法となっている。ただし, ガイドラインの津波モデルは, 本稿の簡易モデルとは全く異なり津波発生メカニズムやその発生の不確定性を精緻に反映させたものである。

本稿のみでは, 海岸や河川工学における経済学の有用性を網羅できていない²⁵。例えば, 示さなかったも

²⁴ Kono et al. (2019)の第1章に世界の固定資産税の例を挙げており, 地点別に異なる固定資産税を課すことができる制度の例を示している。また, Kono et al. (2019)は地点別に異なる固定資産税を都市の厚生をあげる課税方法として提案している。

²⁵ そもそも, 著者の浅学から能力的に有用性をすべて示すことは無理である。本稿で指摘した経済学の

のとして、氾濫地域の土地利用設計がある。海岸や河川では生態系を守るエリアと住居エリアの空間最適化が必要である。こういった議論はYoshida & Kono (2020)でロトカボルテラタイプの生態系モデルと都市経済モデルを組み合わせて行われている。また、ビジネスエリアや住居地域など異質空間の最適化も、氾濫域が都市であれば、必要になる（例えば、Kono, Joshi (2019)）。

次に本稿で取り上げなかったものとして計量経済分析がある。本稿では、CGEモデルのパラメータの設定方法については研究事例を通して見た。しかしながら、被説明変数と複数の説明変数で構成される方程式のパラメータを推定する方法も多く利用される。経済システムは連立方程式で表される。そのパラメータを推定するとき、それらの変数にデータを素朴に適用して最小二乗法を行うだけでは、パラメータ値がゆがむことが知られている。経済システムは大規模であり、実験ができないため、考慮している変数以外の要因が現実のデータには含まれる。この考慮していない変数を交絡変数という。この交絡変数の影響を取り除く計量分析が医療分野や経済学分野で比較的近年進んでいる。従来からある操作変数法や二段階最小二乗法に加えて、固定効果モデルや差分の差分や回帰不連続デザインなどの適用事例が増えている。さらに、経済変数の特性の違いを反映する時系列分析の手法も様々開発されている。

実は、こういった経済学分野で利用されている計量経済分析は、海岸や河川工学をはじめ土木工学の研究にも大変有用である。例をあげると、海岸と砂浜と河川の関係を工学的に記述するモデルは、連立方程式になる。このモデルにそのまま変数のデータを用いて、最小二乗法でパラメータ推定することは間違いである。このケースでは、歪んだパラメータしか一般に得られない。海岸と砂浜と河川のシステムは大規模で実験ができないのは、経済システムと同様である。そのため、実験条件を完全に統制した分析はできず、交絡変数がほぼ間違いなく存在している。医学や経済学で発展した計量技術は、このようなケースに適用して歪みのないパラメータを得るために利用可能である。そして、時系列分析でストック変数とフロー変数を別々に考える方法は、海岸河川工学において物理的摩耗や砂浜奥行の時系列変化を計量的に分析する際に有用である。

参考文献

- 岩手県（2003）．岩手地震・津波シミュレーション及び被害想定調査．jpgファイル
<http://www.pref.iwate.jp/~hp010801/tsunami/yosokuzu/rikuzentakada.jpg> （2012.2 閲覧）
- 上田孝行編著（2011）．『Excelで学ぶ地域・都市経済分析』．コロナ社，162pp.
- NHK放送文化研究所(世論調査部)（2011）．2010年国民生活時間調査報告書．pdfファイル
<http://www.nhk.or.jp/bunken/summary/yoron/lifetime/pdf/110223.pdf> （2012.2 閲覧）
- 金本良嗣（1997）．都市経済学，東洋経済新報社
- 木内祐輔（2005）．経済政策における時間非整合性：展望，大阪大学経済学 55: 45-63.
- 河野達仁（2017）．公共政策およびその財源調達，「土木計画学ハンドブック」（分担執筆）5.1.3節，コロナ社，pp.194-197.
- 河野達仁，北村直樹，山崎清，& 岩上一騎（2013）. 防災インフラ整備における動学的不整合の定量分析: 陸前高田市防潮堤整備を例として．RIETI Discussion Paper Series, 13-J-045. <http://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/13e072.pdf>.
- 国土交通省（2011）．建設工事費デフレーター．excelファイル
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001076277> （2012.2 閲覧）
- 国土交通省（1999）．全国都市パーソントリップ調査
- 国土交通省（1998）．東京都市圏パーソントリップ調査
- ジュール デュピュイ 著，栗田 啓子 訳（2001），公共事業と経済学（翻訳），日本経済評論社

土木工学での有用性は著者の研究履歴に基づいた偏ったものである。

総務省・統計局（2005）．国勢調査

千田正（岩手県知事）（1969）．『チリ地震津波災害復興誌』．岩手県．第7章，105-259．259pp.

土木学会減災アセスメント小委員会（2021）．津波に対する海岸保全施設整備計画のための技術ガイドライン．土木学会．

内閣府（2007）．交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究結果について

<http://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/19html/gaiyou.html>（2012.2 閲覧）

別所俊一郎・赤井伸郎・林 正義（2003）．公的資金の限界費用，日本経済研究47号，pp.1-19.

森杉壽芳・河野達仁（2012）．道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究67号，pp.1-20.

柳川範之 編（2018）．インフラを科学する—波及効果のエビデンス，中央経済社

Corderi-Novoa, D., Hori, T, & Yamin, L. E. (2020) The economics of investment and prioritization of flood risk reduction measures in a watershed, Risk Analysis, early view. DOI: 10.1111/risa.13642

Ekelund Jr, R. B., & Shieh, Y. N. (1986). Dupuit, spatial economics and optimal resource allocation: A French tradition. *Economica*, 483-496.

Henderson, J.V. (1985). *Economic theory and the cities*, Academic Press.

Kazama, S., Kono, T., Kakiuchi, K., & Sawamoto, M. (2009). Evaluation of flood control and inundation conservation in Cambodia using flood and economic growth models. *Hydrological Processes*, 23(4), 623-632.

Kono, T., & Notoya, H. (2012). Is mandatory project evaluation always appropriate?: dynamic inconsistencies of irreversible and reversible projects. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 3(1), 1-31.

Kono, T., Kitamura, N., Yamasaki, K., & Iwakami, K. (2016). Quantitative analysis of dynamic inconsistencies in infrastructure planning: An example of coastal levee improvement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(2), 401-418.

Kono, T., & Joshi, K. K. (2019). *Traffic congestion and land use regulations: theory and policy analysis*, Elsevier.

Kono, T., Kishi, A. (2018), What is an appropriate welfare measure for efficiency of local public policies inducing migration?, *Mathematical Social Sciences*, 91, 25-35.

Kono, T., Pines, D., & Yokoi, T. (2019), Spatially-variable property tax and optimal tax composition in congested monocentric cities: George, Pigou, Ramsey and Strotz unified. *Journal of Urban Economics*, 112, 122-132.

Kydland, F. E. and Prescott, E. C. (1977). Rules rather than discretion: The inconsistency of optimal plans. *Journal of Political Economy* 85, 473-492.

National oceanic and atmospheric administration. National Geophysical data center: Natural hazards, Tsunami runup.

<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=167&d=166>（2012. 2 閲覧）

Persson, T. and Tabellini, G. (2004). Constitutional rules and fiscal policy outcomes. *American Economic Review* 94: 25-45.

Pettersson-Lidbom, P. (2010). Dynamic commitment and the soft budget constraint: an empirical test, *American Economic Journal: Economic Policy*, 2: 154-179.

Ueda, T., Tsutsumi, M., Muto, S., and Yamasaki, K. (2012). Unified computable urban economic model, *Annals of Regional Science* 50: 341-362.

Yoshida, J., Kono, T. (2020), Land use policies considering a natural ecosystem, *Regional Science and Urban Economics*, Article 103552.