

インダス川における 流量減少問題

大沼あゆみ研究会 13 期

開発・途上国班

奥本慶士郎 谷本航佑 山田駿介 若山みりあ

目次

序章

第 1 章 パキスタンについて

1-1 パキスタンの概要

第 2 章 インダス川について

2-1 流域概況

2-2 基本情報

2-3 流量について

第 3 章 灌漑農業について

3-1 灌漑農業とは

3-2 灌漑農業

3-3 河川水灌漑農業に対する実際の農業開発上の対策

3-4 パキスタンでの実態

3-5 パキスタンにおける灌漑農業による主な生産物について

3-6 パキスタンにおける 4 作物の生産量の動向

第 4 章 デルタ地域の現状

4-1 インダスデルタの概要

4-2 被害の現状

第 5 章 先行研究

5-1 過去の政策について

5-2 先行研究

第 6 章 政策提言

6-1 問題意識

6-2 政策の具体的な方法

第 7 章 モデル分析

7-1 分析の目的

7-2 分析の前提

7-3 総便益最大化

7-4 シミュレーション

7-5 政策の分析

7-6 政策の意義・限界

終章

参考文献

序章

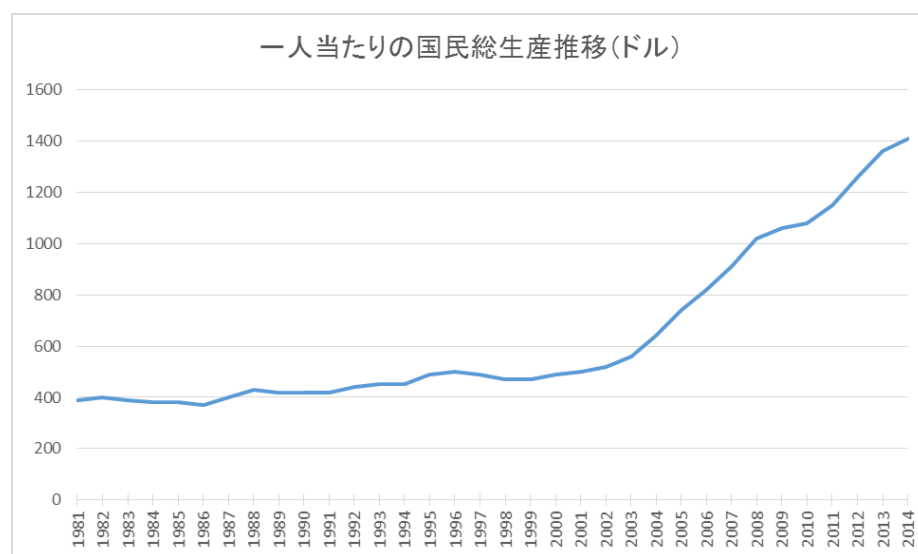
水は、人間の体の約 60% が水分で構成されているように、我々が生活していく上で必要不可欠なものである。農作物を育てる、調理する、衛生を保つなど、挙げればきりが無いほどに水が使われていることはいうまでもないであろう。古代、人間は大河川のほとりに都市を構築し農作を行っており、現在それらを我々は四大文明と呼んでいる。しかし水という資源には限りがある。川は上流から下流へ水が流れるという条件の下では、上流で大量に取水すれば下流で取水できる量が減ってしまうのである。当然、現実には世界中の河川で水の量に関する問題は発生している。かつて四大文明の一つとして繁栄する源であったインダス川も例外ではない。本論文では、世界有数の穀倉地帯であるインダス川流域で発生している水量配分問題について、現状についての分析とそれに対する政策提言・モデル分析を行っていく。

第 1 章 パキスタンについて

1-1 パキスタンの概要

a. 概要

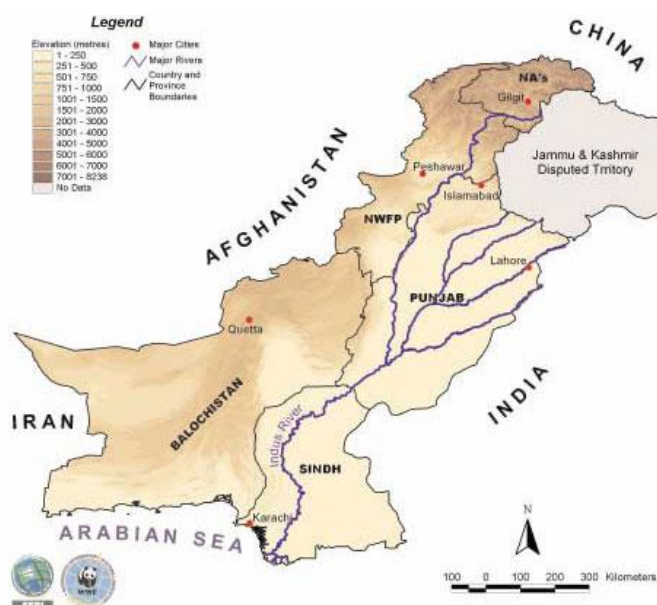
パキスタンの人口は 1 億 8,802 万人で世界第 6 位、年人口増加率は 1.95% となっている。面積は 79.6 万平方キロメートルであり、日本の約 2 倍を誇っている。パキスタンの首都は南部カラチの一極集中を避回避するために建設された都市であるイスラマバード (Islamabad) である。実質経済成長率は 4.1% となっており、主要産業が農業や繊維産業であるためにさらなる経済発展が期待されている。



図は 1981 年から 2014 年までにおけるパキスタンの国民一人あたりについての国民総生産 (GNI) の推移である。このグラフの始まりである 1981 年から 2000 年代前半までは 500 ドルを下回る程度であった。しかし、2004 年ごろから成長が始まり、2014 年には 1410 ドルに達している。

b. 地理条件

パキстанは、西をイラン、北をアフガニスタンと中国、東をインド、南をアラビア海に囲まれている南アジアの国である。北東方面から南西方面へインドの北西部を覆うように伸びており、北部には世界の屋根たるヒマラヤ山脈・カラコルム山脈があり巨大な氷河地帯を抱え、インダス川の源流として機能している。インダス川の右岸、パキスタンの西部はバローチスタン(Balochistan)州というパキスタン最大の面積を誇る州であるが、山がちな地形であることと水不足から人口は少ない。パキスタン中流域左岸、パキスタン東部はパンジャブ(Punjab)州である。パンジャブとは、ペルシャ語で 5 つのという意味の“punj”と水という意味の“ab”を合わせたもの(punj-ab)であり、インダス川とその支流である 4 つの川(シエナブ川(Chenab River、ラーヴィー川(Ravi River)、サトレジ川(Sutlej River)、ジェーラム川(Jhelum River))を合わせた「5 つの川」という意味である。その名の通り水量が増加する地域であり、同時に大量に水が使われている地域である。インダス川左岸下流部はシンド(Sindh)州であり、パンジャブ州と並んで農業生産が盛んである。また、インダス川河口部右岸にある都市カラチ(Karachi)はかつて首都であったほどの栄えた港湾都市であり、現在でもパキスタン最大の経済・金融都市である。

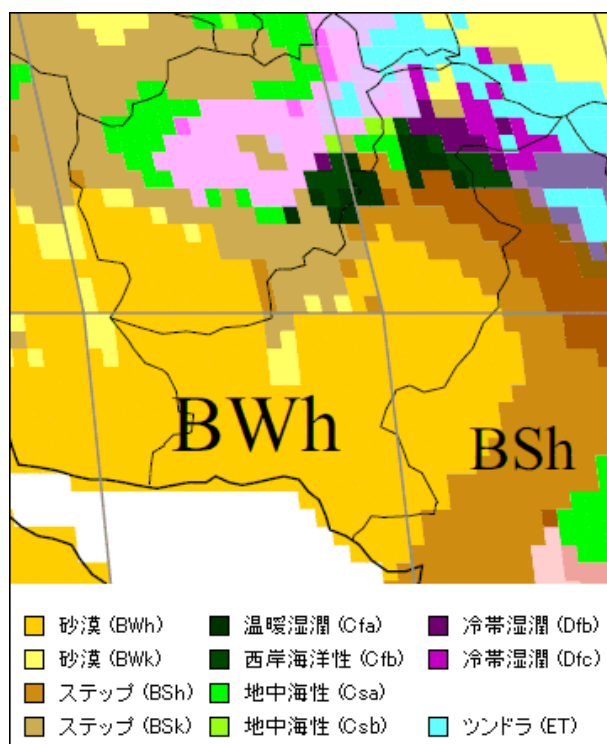


出典：Wildlifeofpakistan

各州のうち特に重要な 2 州がパンジャブ州とシンド州である。この 2 州は、農業生産の中心となる州であり、この論文でも主にこのパンジャブ州とシンド州を取り上げていくことになる。

c. 気候

北部の山岳地帯は、ケッペンの気候区分でいうとツンドラ気候（ET）に区分されており、アリソフの気候区分では高山気候（H）に区分されている。南に下ると温暖冬季少雨気候（Cw）に区分され、首都イスラマバードはここに含まれている。パンジャブ州北部、ラホール（Lahore）と同緯度（北緯 30 度）付近はステップ気候（BS）に分類されている。これより南の地域は砂漠気候（BW）に含まれている。これからわかるように、パキスタンの大部分は乾燥した気候であり、降雨量は限られている。



第 2 章 インダス川について

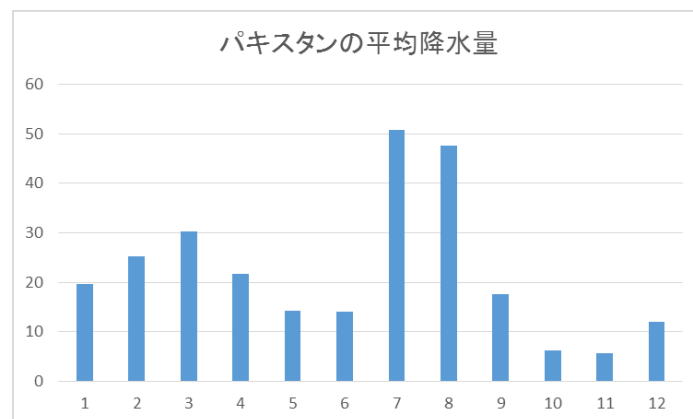
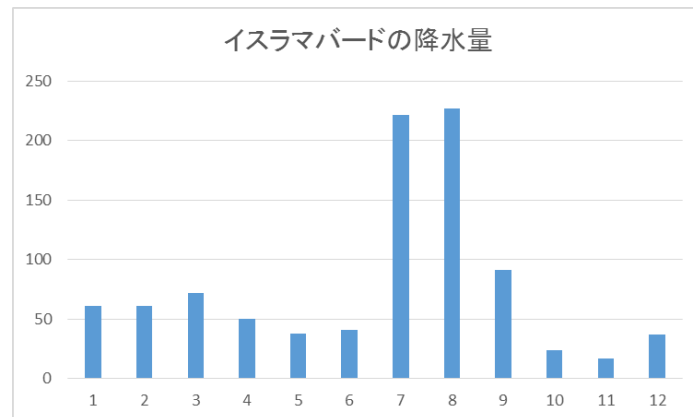
2-1 流域概況

インダス川は、ヒマラヤ山脈を水源とし、流域の大部分がパキスタン流れ、アラビア海にそそぐ国際河川である。同様にヒマラヤ山脈を水源とし、インド・バングラデシュを通過しアラビア海にそそぐ河川としてガンジス川があり、これはヒンドゥー教における信仰の対象として扱われている。ヒマラヤ山脈北部にある標高約 5,500m のカイラス山脈から発するインダス川は、ヒマラヤ山脈とカラコルム山脈の間を北西方向へ流れ、途中でパキスタンに入ると南方向へ向きを変える。この過程で氷河から流出した水による川と合流している。山間部の終わりに世界最大級の体積量を誇るターベラダムで水がたたえられると、パキスタンの首都イスラマバードの付近を通過する。世界有数の穀倉地帯であるパンジャブ州に入ると多くの堰が設置され、それぞれ灌漑用水として取水されている。パンジャブ州では 5 つの川が合流しており、水量増加により川幅が 20km に及ぶところもある。続いてシンド州に入るとこちらも大規模な灌漑農業が行われている。シンド州には、インダス文明の象徴として世界文化遺産にも登録されているモヘンジョ＝ダロ遺跡や、14 世紀以降の中心都市タッターの文化財などがある。肥沃な土地を抱えるインダスデルタを超えるとアラビア海に注ぐ。

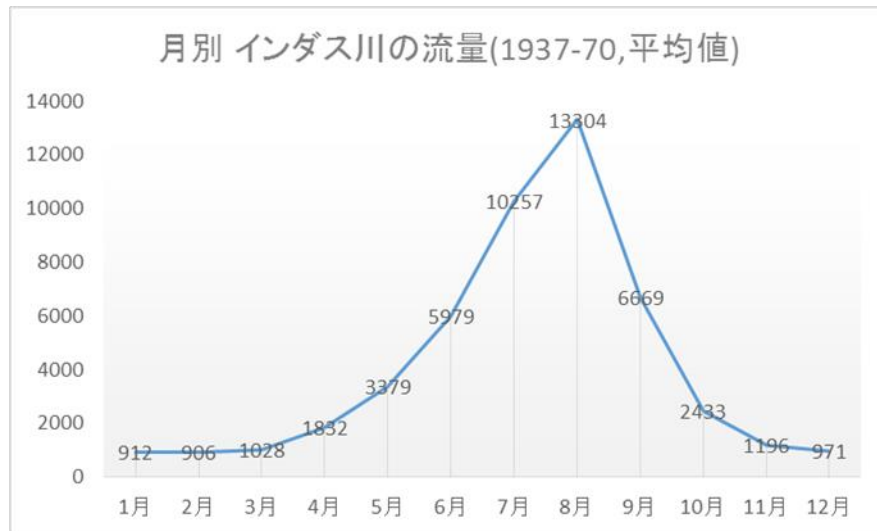
2-2 基本情報

インダス川は、全長約 3000 キロメートル、流域面積約 116 万平方キロメートルを誇る国際河川である。そのおよそ 9 割がパキスタンを流れている。パキスタンの大部分が乾燥地帯であるため、人々は水を求めて川の付近に居を求めており、実に人口の 80% 以上がインダス川流域に住んでいるという。つまり、インダス川の水は、パキスタンの農業・工業・生活用水として欠かせない存在なのである。

第 1 章でも触れたように、パキスタンの大部分は乾燥した気候であり、降雨量は限られている。パキスタンの年間降水量は、およそ 250 ミリメートルと、ステップ気候 (BS) の条件を満たしており少ない。さらに、南西方向からの季節風 (モンスーン) の影響で雨季と乾季の差がはっきりしており、7-9 月に年間降水量の約 80% がまとまって降っている。集中した降雨は、時折インダス川の氾濫を招いており、実際、2010 年の 8 月には 1200 万人が被災するような大洪水が発生しており、それ以前からもたびたび降水は発生している。このため、パキスタンにとってインダス川の治水は必須なのである。



図は温暖湿潤気候であるイスラマバードにおける年間の降水量推移である。10月から6月までは50 mm前後の降水量である一方で、7,8月は200mmを超える降水がある。パキスタンの平均降水量（図）と比較しても、イスラマバードはパキスタンにおいて特別な気候をしているわけではないことが分かる。

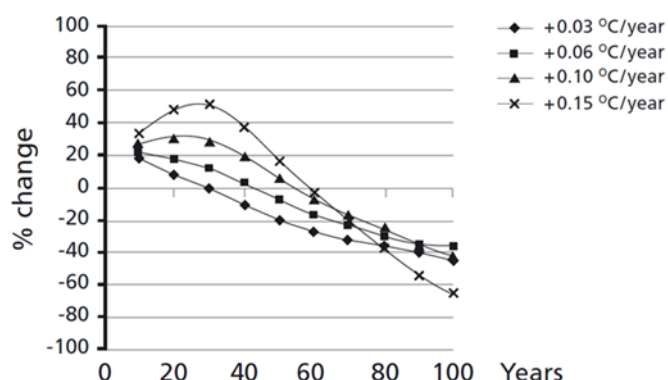


また、図は 1937 年から 1970 年までの 34 年間における、シンド州北部サッカル（Sukkur）での流水量の平均値である。データとしては古いものであるが、春先の 3,4 月から雪解け水によって増水し、雨季に入ると急激に流量が増加していることが分かる。上図を考慮に入れても、降水量と川の流量に相関性があることが分かる。パキスタンは国としても治水事業を行っている。インダス川には全部で 71 ものダムがあり、1970 年から 2000 年までの 30 年間で 50 か所が建設された。ダムは洪水を防ぐためだけでなく、農業用水の安定供給のためにも役立っている。利用できる水量が限られているパキスタンであるが、その一方でパキスタンの主要産業は穀物や綿花などの農業と、それに基づいた繊維産業であり、水の安定供給は国の産業に直結することになる。雨季に降った水を貯蔵しなければ、国民の生活を安定させることはできない。そのため、これほどのダムに加えて、灌漑用水を取水するための堰堤が多くインダス川には設置されている。

2-3 流量について

インダス川は、ヒマラヤ・カラコルム山脈の氷河から流出した水と流域に降った雨が流れているものである。しかし、治水をしていながらコントロールが十分に機能していないという現状がある。以下、地球規模での気候変動と灌漑による水の使用という 2 点について記述する。

前者について、世界中で様々な影響を及ぼしており、インダス川も例外ではなく影響が想定されている、または影響を受けている。具体的に 2 点を例として挙げる。1 点目は、水源となる氷河への影響である。氷河は、暖くなる 3~4 月頃から融けだしインダス川へ流れる。しかし温暖化が進行することによってその流出量が増加する可能性が指摘されている。



Pakistan Country Water Resources Assistance Strategy より引用

上の図は、ターベラダムに流入する水量をグラフ化したものであり、起点となる年は 2005 年となっている。ターベラダムに流入する量とは、上流域での水量を表したものであり、すなわち氷河からの影響を大きく受けた水量であるといえる。4 本のグラフは、1 年あたりの気温上昇を 0.03℃、0.06℃、0.10℃、0.15℃とした場合、それぞれ流量がどのように変化するかを推測したものである。例えば、1 年あたり 0.03℃の気温上昇があった場合、流出量は、30 年後まで変化率は逡減しながら増え、その後減少していくことが分かる。一方、1 年あたり 0.15℃の気温上昇があった場合、30 年後まで流出量の変化率は急激に上がり 50%ほど増加し、60 年後まで逡減しながら流出量が増えていく。その後、急激に流出量は減少していき、100 年後には 2005 年に比べて 60%以上減少することが分かる。以上から読み取れることは、温暖化が進行すれば氷河の融解速度が増加するため、短期的には流出量が増加するものの、長期的には融解進行による氷河の縮小・後退を原因として流出量が減少してしまうということである。

2 点目は、降水への影響である。これまでも述べたように、パキスタンの降水はモンスーンの影響を受けているが、これが気候変動によって、日本で「ゲリラ豪雨」が発生しているのと同じように、パキスタンにおいても激化しているという。例えば 2010 年の洪水も、ダムが各地に設置されていながら、それらの容量を上回る降水があり甚大な被害を及ぼしている。

後者について、パキスタンの主要産業である農業が流量に影響を及ぼしている。これまでに述べたようにパキスタンの大部分は乾燥地帯であり、インダス川から取水することによって人々の生活は成り立っている。そのうち農業による取水の割合が非常に大きい。詳細については次節で記述するが、パンジャブ州やシンド州といった世界的な穀倉地帯における広大な灌漑設備は多大な取水を行っており、その結果、取水されるにしたがって、川を下ればくだるほど水量が減少している。下の表は、1892 年から 1990 年代までのインダス川下流域における真水の流量推移である。1892 年には 1,850 億立法メートルだった水量が次第に減少し、1990 年代にはその 7% 弱となる 123 億立法メートルにまで減少している。この減少理由としていくつか考えられるが、最大の理由は、灌漑農業による取水であると考えられている。次章では灌漑農業について詳しく見ていく。

年	流量(100万m ³ /年)
1892	185,000
1932	105,000
1960	79,581
1970	43,000
1990s	12,300

インダス川下流域における真水の流量

出典：THE LOWER INDUS RIVER: BALANCING DEVELOPMENT AND
MAINTENANCE OF WETLAND ECOSYSTEMS AND DEPENDENT
LIVELIHOODS

第 3 章 灌漑農業について

3-1 灌漑農業とは

灌漑とは外部から人工的に農地へ水を供給することである。目的としては、農作物の増産させること、ランドスケープを維持すること、乾燥地帯や乾期の土壌で緑化する際などに用いられる。他にも農業生産において、作物を霜害から守る、穀物の畑で雑草を抑制する、土壌の圧密を防ぐといった用途もある。農業生産の拡大に役立つが、管理が悪いと塩害など土地の不毛化を招くといった欠点もある。

3-2 灌漑農業

「年降水量が 250mm 以下」の土地は乾燥地であり、そのような場所では、灌漑は作物栽培上必須の要件であり、半乾燥地帯で降雨に依存しながら農業が可能な地域でも、灌漑はすべての作物生産の安定増進を図るために非常に有力な手段である。特に野菜類などの耐干性の弱い園芸作物の生産に対しては、ほとんど灌漑が行われている。作物の増収と安定した生産のために、灌漑は極めて有効な手段であり、降雨量に依存する通常の農業と比較して、穀物で 2 倍以上の収量が得られると考えられている。したがって、水資源を開発し灌漑農業の発展を図ることは、乾燥地農業において非常に重要である。

灌漑方法には種々方法があり、一般に、「地表灌漑」「散水灌漑」「マイクロ灌漑」に大別される。地表灌漑には、うね間灌漑、ボーダー灌漑、水盤灌漑などの方法がある。いずれの方法も、水路から重力を利用して圃場に用水を導入して灌漑を行うものである。特別な器具や装置を使用しない安価な方法で散水灌漑には、スプリンクラー灌漑、センターピボット灌漑、サイドロール灌漑、移動式散水灌漑、定置式散水灌漑などがある。いずれも加圧した水を散水するので、ポンプ、配管などの施設と、ポンプを稼動するためのエネルギーが必要である。マイクロ灌漑には、マイクロエミッター灌漑、マイクロスプリンクラー灌漑、点滴灌漑、多孔管灌漑などがある。マイクロ灌漑は、エミッターを通して用水を圃場に灌漑する方法の総称であり、用水を作物の限定された根群域に少量頻繁に供給する灌漑方式である。

3-3 河川水灌漑農業に対する実際の農業開発上の対策

河川水灌漑農業を行う上で、持続的かつ効率的に行うための以下のような対策マニュアルが存在する。

- ・ 灌漑を行う地域で、最も良好なダムサイトの選定を行う。
- ・ 貯水池、水路、タンクなどからの蒸発損失防止のために、特殊皮膜で被覆を施し、水路の上蓋の建設を促進する。
- ・ 水路からの浸透損失防止のために、アスファルトなどによる被覆やライニングを設けることで、パイプラインを建設する。
- ・ 用水路の送水に伴って、周辺圃場の地下水位が上昇するので、土地の湿地化や土壌の塩類化を招く場合がある。そこで、暗渠排水施設や管井の建設を行い、耐塩性樹木の植林をして圃場の地下水面を低下する。
- ・ 用水路と排水路の分離を行い、灌漑の水質を管理する。
- ・ 高塩分濃度の水に対しては、電気透析法（塩素に富んだ塩水に有効）や逆浸透膜法（硫酸に富んだ塩水に有効）などの脱塩処理を施して、低塩分濃度の灌漑水の再利用を行う。

3-4 パキスタンでの実態

パキスタンはインダス川からの取水による灌漑農業、すなわち河川水灌漑農業を行っている。河川水灌漑農業で問題となることは、開水路は管水路と比べて搬送効率が低いということである。土水路では、50%もの水量が、水源から圃場までの途中で蒸発や漏水で失われる。つまり、用水は水面からの蒸発、水路からの漏水によって、末端水路に到達するまでに、25%もの「搬送損失」がある。水路から浸透によって損失した水は、周囲の圃場の地下水位を上昇させる。水路開通直後には、地下水位が地表下14mであったものが、27年、60年、75年後には、それぞれ9m、7.3m、3mとなり、最近では地下水位上昇による「ウォーターロギング（water logging）」が生じ、湿害をもたらしたという報告が多い。また、上流では水が使用できるが、下流では用水が使用できないという問題も発生している。パキスタンにおいては、英国植民地時代に作られた灌漑設備が残るものの、水路の老朽化により水の運搬損失が通常の場合に増して多く、水の実際に農業に使用されている量で考えると、約40%であるといわれている。そうした低い水の使用効率は、過剰な取水の原因となり、結果として川の流水量を減少させている一因となっているのである。

3-5 パキスタンにおける灌漑農業による主な生産物について

パキスタンの食料自給率は 100%を超え、余剰分を輸出に回している。農業は GDP の 21%を占め、就労人口の 45%が農業に従事している。主力作物は米、小麦、メイズ（とうもろこし）といった穀類に加え、サトウキビも多く生産されている。そのほか、きゅうりなどの野菜、マンゴーや杏などの果物の栽培が盛んに行われ、国内の食物自給率は高く保たれている。そのようなパキスタン農業のなかでも、今回論文で扱うのは、パキスタンにおいて特に重要な農作物である綿花、米、小麦、サトウキビである。以下は各農作物を、国別、地域別生産高が高い順に、表に示したものである。

a. 綿花

国別生産量

（単位：千トン）	2007/08 年	2008/09 年	2009/10 年	2010/11 年	2011/12 年
中国	8,056	7,991	6,967	6,641	7,185
インド	5,225	4,921	5,008	5,334	5,879
アメリカ	4,182	2,790	2,654	3,942	3,484
パキスタン	1,872	1,894	2,090	1,916	2,243
ブラジル	1,602	1,193	1,187	2,025	2,025
ウズベキスタン	1,165	1,002	849	914	980
オーストラリア	139	327	386	914	980
その他	3,814	3,198	2,933	3,255	4,040
合 計	26,057	23,314	22,074	24,942	26,814

出典：USDA「World Markets and Trade」

綿花の生産量は中国、インド、アメリカに次いで、世界 4 位を誇り、パキスタンにおいて重要な生産物となっている。食料自給率 100%を超えるパキスタンの中で、綿花は輸出を目的として、外貨獲得の大きな手段である。綿花輸出はイギリス植民地の時代から続くもので、長年行われている。例えば、戦前戦後の日本が繊維産業で成長できたのは、パキスタンからの原綿輸入があったからである。日本との貿易を制限する国が多い中で、パキスタンは、敗戦国日本に原綿を取引していた数少ない国であった。日本はそのおかげで繊維産業を起点として、戦後の高度成長を果すことができたと考えられる。

b. 小麦

(単位：千トン)	2010/11 年	2011/12 年	2012/13 年	2013/14 年	2014/15 年
E U	136,667	138,182	133,846	143,324	147,875
中国	115,180	117,400	121,023	121,930	124,000
インド	80,800	86,870	94,880	93,510	95,850
アメリカ	60,062	54,413	61,671	57,961	54,205
ロシア	41,508	56,240	37,720	52,091	53,000
カナダ	23,300	25,288	27,205	37,500	28,000
オーストラリア	27,410	29,905	22,856	27,013	26,000
パキスタン	23,900	25,000	23,300	24,000	24,500
ウクライナ	16,844	22,324	15,761	22,278	21,000
トルコ	17,000	18,800	15,500	18,000	15,000
カザフスタン	9,638	22,732	9,841	13,941	13,500
イラン	13,500	12,400	13,800	14,500	13,000
アルゼンチン	17,200	15,500	9,300	10,500	12,500
エジプト	7,200	8,400	8,500	8,650	8,950
ウズベキスタン	6,500	6,300	6,700	6,800	6,800
ブラジル	5,900	5,800	4,380	5,300	6,300
その他	48,185	50,437	51,417	56,905	54,694
合計	650,794	695,991	657,700	714,203	705,174

出典：USDA「World Markets and Trade」

c. コメ

(単位:千トン)	2010/11 年	2011/12 年	2012/13 年	2013/14 年	2014/15 年
中国	130,700	140,700	143,000	142,300	144,000
インド	95,980	105,310	105,240	106,290	104,000
インドネシア	35,500	36,500	36,550	37,355	37,700
バングラデシュ	31,700	33,700	33,820	34,590	34,800
ベトナム	26,371	27,152	27,537	28,000	28,200
タイ	20,262	20,460	20,200	20,500	20,500
フィリピン	10,539	10,710	11,428	11,813	12,200
ビルマ	11,060	11,473	11,715	11,957	12,150
ブラジル	9,300	7,888	8,037	8,500	8,500
日本	7,720	7,646	7,756	7,832	7,700
アメリカ	7,593	5,866	6,336	6,115	7,227
パキスタン	5,000	6,200	5,800	6,600	6,700
エジプト	3,100	4,250	4,675	4,880	4,900
コロンビア	4,233	4,268	4,670	4,725	4,900
韓国	4,295	4,224	4,006	4,230	4,150
ネパール	2,680	2,970	3,000	3,361	3,100
その他	37,613	37,603	37,887	38,409	38,706
合 計	449,946	466,920	471,657	477,457	479,433

出典：USDA「World Markets and Trade」

パキスタンはもともとインドから分離した国であるため、食べ物は北インドの食べ物と非常に似ている。その構成は、小麦粉や米を中心とする主食と、香辛料をふんだんに使って料理する副食、そして豊富な各種の肉や乳製品からなる。パキスタンの主食はチャパティかライス。たまにナンである。チャパティというのは、小麦粉を水で練って丸く薄く焼いたパンとクレープの中間のようなものである。チャパティ専用のフライパンもあるもあり、パキスタンの家庭料理といわれている。チャパティはカレーや、シチューと一緒に食べることが多く、手で一口大にちぎったチャパティにそれらをつけて食べるのが代表的な食べ方である。

このように、米と小麦は、パキスタンにおいて欠かすことのできない主食であり、生産高は小麦世界 8 位、稲作世界 12 位となっている。小麦の生産と稲作は、パキスタンにおいて必要不可欠であるといえる。

d. サトウキビ

2015

1 位	ブラジル	768,090,444 t
2 位	インド	341,200,000 t
3 位	中国	128,200,908 t
4 位	タイ	100,096,000 t
5 位	パキスタン	63,749,900 t
6 位	メキシコ	61,182,077 t
7 位	コロンビア	34,876,332 t
8 位	インドネシア	33,700,000 t
9 位	フィリピン	31,874,000 t
10 位	アメリカ	27,905,943 t

出典：USDA「World Markets and Trade」

パキスタンは世界の主要な砂糖消費国であり、人口増加と経済発展を背景に消費量が増加を続ける一方で、生産量の変動が年によって大きく、その不足分を補うために白糖を中心に輸入を行っている。なぜなら、国内需要が大きいためである。パキスタンをはじめとする中東、アジアのイスラム諸国は、砂糖消費量が増加するラマダン（イスラム教の断食月）の前に在庫を一定量確保するために輸入を増やす傾向がある。また、さとうきびはパキスタン農業において重要な換金作物であり、約 100 万ヘクタール作付けされ、国内 84 カ所の製糖工場へ供給されている。製糖業は繊維産業に次いで国内 2 番目の産出額を誇る基幹産業である。さとうきび生産量は世界で 5 位、砂糖生産量は 15 位に位置している。さとうきびは砂糖生産に加えて、医療用アルコール、燃料用エタノール、パーティクルボード（木材や植物繊維質の小片を板状に成形したもの）などの製造と多用途に利用されるため、サトウキビもまた、重要な要素といえるであろう。

3-7 パキスタンにおける 4 作物の生産量の動向

ここで上記に挙げた 4 作物、綿花、小麦、米、サトウキビについてパキスタン国内での生産量の推移をみていくことにする。



出典：『AGRICULTURAL STATISTICS OF PAKISTAN 2010 – 2011』

グラフから分かるように、各農作物について年々生産高が増加しており、パキスタンにおける農業の重要性が理解できる。またパキスタンは発展途上国であり、年々人口が増加している。人口の増大に伴い、今後ますます主食を中心とした国内需要が増していくことが考えられる。発展途上国が発展していく際には国内の食料自給率が高いことが非常に重要であり、今後も主に穀物についての自給率を高くキープすることはパキスタンの発展にとって必要不可欠であると考えられる。そのうえで産業面でも高い割合を占め続ける農業はパキスタンにおいて守るべき必要な産業であり、持続的な生産を確保するためには、灌漑農業において直面する過剰取水の問題を解決するインセンティブは、十分高いのではないだろうか。

第 4 章デルタ地域の現状

4-1 インダスデルタの概要

インダス川河口部のインダスデルタは降水量が少ないうえに、そのほとんどが雨季に降り、乾燥気候条件のもとにある。インダスデルタは現在 47 万ヘクタールに及び、100 万人もの人口を抱える、世界で 5 番目に大きなデルタである。(Ramsar 2001) インダスデルタはインダス川からの流入によって特徴づけられた典型的な扇状のデルタであり、小川やエスチュアリー、泥、砂、塩干潟、マングローブ、湿地、海峡や岩場で構成されている。そこに住む人たちは直接的または間接的にインダス川に頼り、生活をしている。



出典：Pakistan Paedia

<http://pakistanpaedia.com/wildlife/wetlands/wild-life-sanctuaries-in-pakistan.html>

インダスデルタは生態系にとって重要な地域である。インダスデルタには野生生物保護区が含まれ、生物多様性の観点からもインダスデルタは重要である。

例えばタッターの野生生物保護区である Keenjhar 湖と、Haleji 湖は重要な淡水湖であり、ラムサール条約の下で国際的に重要な湿地に指定されている。

インダスデルタは 10 種の哺乳類、143 種の鳥類、22 種の爬虫類、そして 200 種以上の魚類、多くの無脊椎動物の生息地となっている。(IUCN 2003-2) また、毎年 6 万以上の渡り鳥がインダスデルタを利用している。そのなかには、絶滅危惧 II 類であるニシハイイロペリカン (学名 *Pelecanus crispus*) も含まれる。インダスデルタ自体が、2002 年にラムサール条約の湿地に指定された。

インダスデルタではインダス川の土手に沿って、ギョリュウ(学名 *Tamarix*) やポロソピス属のシネラリア (学名 *Prosopis cineraria*)、アラビアゴムモドキ (学名 *Vachellia nilotica*, 一般的には *Acacia nilotic* で知られる)、サトウキビ属の植物などがみられる。これらの構成する森林には、多様な鳥類、哺乳類、爬虫類、そして両生類の生物の住処が存在する。

魚やエビなど多くの生き物の住処となっているのがインダスデルタのマングローブ林である。その面積は減少しているものの約 13 万ヘクタールに及び、その 95 パーセントはヒルギダマシ (学名 *Avicenna marina*) と呼ばれるマングローブ植物が構成している。インダスデルタのマングローブはパキスタン全体のマングローブの 97 パーセントを占め、世界で 7 番目の大きさである。(Ramsar 2001)



出典：INDUS DELTA A Vanishing Ecosystem

4-2 被害の現状

インダス川における淡水の流入量は 1800 億 m^3 であり、約 4 億トンのシルトと呼ばれる土砂を下流へ運んできた (Meynell and Qureshi 1993)。しかしながら、昨今のインダス川上流における過剰な取水により、下流とりわけ河口部のデルタ地域には被害が出始めている。例えば被害の一つとして、河川によってもたらされる養分の減少があげられる。それまで川の流れによって運ばれてきたシルトがもたらしていた養分が注ぎ込まなくなったことは大きな被害の一つである。その他にもインダス川上流における過剰な取水は、デルタ地域における人々の生活に多大な被害を生み出している。その被害の背景には、多くの場合、インダス川の水量が減少したことによる、海水の遡上がある。インダス川からの淡水の海への流入の減少の結果としての海水遡上は、生態系や人間の経済活動に影響を与えている。この章ではインダス川の流量減少と海水の遡上に伴う被害の現状をいくつか取り上げていく。

a. 農業

被害のひとつとして、デルタ地域が農業に適さない土地となってしまったことが挙げられる。淡水の海への流入量の減少はデルタ地域の深刻な海水浸食を引き起こしている。塩水は 64 キロメートルも内陸に侵入し、広い地域で農地が慢性的に海水流入にさらされることで、主要な生計手段である農業は壊滅してしまったという。作付面積は 1950 年から 2009 年の間に半減した。世界遺産として紹介したシンド州タッターであるが、もう一つの側面としてタッターはインダス川がアラビア海に流れ込む、シンド州の主要な農業地域でもある。そのタッターの三分の一が海水の遡上による影響を受けている。数値としては、50 万ヘクタールのタッターの肥沃な土地とその隣接する土地が影響を受けていると推定されている。(IRIN 2001) また、農作物への損失だけではなく、放牧地や飼料、牧草地の枯渇によって家畜に対しても被害を及ぼしている。

b. 漁業

農業が壊滅したことにより、住民の多くは生計手段が漁業のみになってしまった。しかし、漁業のシーズンは 3 月～6 月までの 4 ヶ月間で、それ以外のシーズンは十分な量が水揚げできない(漁業シーズンでも 200 円～400 円／日程度)。また、流量減少は漁業にももちろん影響する。流量減少によって、季節により増減している得られる水の量や、水質が変化し、魚やエビの繁殖に負荷を与えている。流量が減少し、デルタ地域の水質の塩分濃度が高くなると、淡水魚には適さなくなってしまう。そのような観点から見ると、2010 年のインダス川の洪水は、デルタ地域に淡水をもたらし、生態系にとってはよい出来事であったとする見方もあるほどである。実際、2010 年の洪水のあと、漁獲量が増加したという。

c. 生活

日々の生活用水も、流量減少の影響を受けている。それまで地域住民は生活用水を井戸から取っていたが、利用していた井戸が塩分を含む水につかってしまったことにより使えなくなってしまう、飲料水・生活用水は 10km～20km 離れた場所へ車やバイクで買いに行かなければならない状態が続いているという。

また、農業が壊滅し、漁業で生計を立てることも困難になったことから、都市部のスラムへ移住した家族も多いというデータもあり、昔港町として発展していたカラチなどでは、治安の悪化、一部スラム化するなど住環境をも変化させるほどの問題へと発展した。

d. 生態系



インダスデルタの重要な生態系

『INDUS DELTA A Vanishing Ecosystem』より作成

流量減少による生態系への影響はどのようになっているのだろうか。インダスデルタの特徴のひとつであるマングローブは、乾燥気候のマングローブとしては世界最大面積を誇っている。そして、乾燥地域であり年間降水量が非常に少ないことから、このマングローブは川からの淡水に依存するところが大きい。よって淡水の流量の減少の影響は大きく現れている。インダス川の流量減少によりマングローブ林の面積の減少が確認されている。前述したようにマングローブは多くの魚やエビの生息地であり、また渡り鳥の休息の地としての役割も果たしてきたため、その減少は魚やエビの減少につながる。すでに過去 20 年間で 5 種の生き物が姿を消したという。

このようにインダスデルタでは流量減少により多様かつ深刻な被害が出ている。パキスタンの下流としては早急にこの問題を解決するインセンティブは高いと考えられる。

第 5 章 先行研究

5-1 過去の政策について

この項においては過去にインダス川について流量問題に関する対策が取られたのかという点について述べる。事実、水に関する取り決めというものが過去には存在した。ここでは、代表的な二つについて取り上げる。

一つ目は 1960 年に制定された「**Indus Water Treaty**」である。この協定はインダス川の支流をインドとパキスタンの間で分けたものであり、本質的な水不足問題解決には至っていない。

二つ目は 1991 年に制定された「**Water Accord**」である。これは、パキスタンの四つの地域間での配分を定めた協定となっている。この協定については、1994 年に干ばつと水不足によりパンジャブ州が脱退し、歴史的な使用に基づいたより多くの配分を要求するという事態が起こった。それ以降、効果的な政策がなされていないというのが現状である。

この政策の結果から見えることは河川の分配における数量規制の難しさであり、その原因として我々は、上流地域に現在の便益を保障できなかったことがあると考える。そこで我々の政策では、上流の現在の農作物の収穫を得られる取水を保障したうえで下流への水分配を増加させる方法を考えている。

5-2 先行研究

我々の政策について述べる前に、先行研究を通して我々の意見を今一度述べていくことにする。

The World Bank (2006) は現在の流水からもさらなる価値を生み出せるはずで、ダムを新たに建設することが水による利益を増やす方法の一つであるとしている。大きなダムを建設することは、水の貯蔵量を増やすだけでなく、水力発電によるエネルギーを生み出すことができるという。たしかに、オーストラリアは住民一人に対し 5,000 m³、中国では 2,200 m³の貯えがあり、パキスタンには 150 m³しかないという The World Bank (2006) のデータをみると、貯えは足りないように感じられる。

その一方で、IUCN (2003-1) によると、インダスデルタで利用される自然資源の価値は 1.2 億ドルと推定され、かつこの数字には生物多様性や生息地の供給、沿岸の保護といった数値化できない価値が含まれていないという。その一方でターベラダムの 25 パーセントの水を放出し、結果として灌漑や発電に使用不可能にしてしまうことによるコストは 3800 万ドル程度であるという。よって、灌漑や発電ができなくなることによるロスはデルタ地域で自然資源からコミュニティが得られる利益によって相殺することは十分可能であるとしている。

我々の考えは、確かに将来のための水資源の管理が必要であるが、そのためのアプローチが The World Bank (2006) とは異なっている。The World Bank (2006) では新たなダムを建設し、水の貯蓄を生み出すとともに電力発電につなげるとしている。しかし第 2 章で述べたように、インダス川には 1970 年から 2000 年までの 30 年間で 50 か所が建設され、すでに全部で 71 ものダムがある。もちろんそれらのダムは洪水を防ぐためだけではなく、農業用水の安定供給のためにも役立っている一方、ダムの建設は生態系を破壊し、インダス川に生息するインダスカワイルカなどの生き物の生息地を分断し遺伝子的な多様性が失われることに繋がる。

我々はインダス川の沿岸地域における持続可能な発展のため、インダス川を農業や漁業といったことに利用し恩恵を受けることで、インダス川を保護するインセンティブを生み出すことができるのではないかと考えている。IUCN (2003-1) の記述はこの考えを裏付けるものであるといえるだろう。

第 6 章 政策提言

さて、この章ではこれまでに記してきた現状から問題意識をまとめ、そのうえでインダス川における水不足の問題を解決するための政策を提案する。

6-1 問題意識

まず、インダス川で起こっていることについてまとめる。いま我々が扱っている当面の問題は「インダス川のデルタ地域で流量が減少している」ということである。では、このような事態はどういった問題を引き起こすのであろうか。また、このことが起こる本質的な理由とは何なのか。以上の点について述べていく。

まずは、インダス川のデルタ地域で流量が減少していることによる問題点について。ここでは大きく三つにまとめて振り返る。

a. 農地の塩化：例としてパキスタン南部にあるシンド州を扱う。この土地はもともと非常に肥沃な土地だった。しかし、インダス川の流域における灌漑農地の拡大等に伴うインダス川の流量減少によって、シンド州内のデルタ地域では、海水の流入が発生した。これによって、デルタ地域付近における農地の塩化が拡大、結果として土地が劣化したことで十分な農作ができなくなった。こうした経緯によって、現在シンド州のデルタ地域はパキスタン国内でも最も貧しい地域のひとつとなっている。

b. 生活用水の劣化：パキスタンの国民は人口の約 8 割がインダス川流域に居住しており、この事実が示すように実に多くの者がインダス川の水に依存している。実際、生活用水を近くの井戸から取って利用している家も多数存在する。しかし、インダス川の流量減少に伴い海水の遡上が起こり、井戸が塩水に浸かってしまうという事態が引き起こされた。これによって、現地の住民の中には生活用水を得るために、10~20km 離れた場所へ車やバイクで買いに行かなければならない状態を強いられた者もいる。

c. 漁獲量の減少：この要因としては汽水域におけるバランスが崩れたことと、マングローブ林の減少が挙げられる。先にも述べたが、インダス川のデルタ地域で流量が減少したことによって海水の遡上が起こった。これによって、汽水域での海水と淡水のバランスが乱された。さらに、海水の遡上はマングローブ林の縮小、ひいてはそこに居住する魚や生態系全般の個体数減少をもたらした。事実、過去 20 年において 5 種の喪失が認められた。

さて、ここまでは流量減少に伴う問題点を列挙してきた。これらは農業、漁業さらには普段の生活までと現地の者にとって甚大な被害をもたらしている。では以上のような人々の生活を困難へと導く事柄をどのように解決していけばよいのか。そのための政策として我々は「灌漑設備の更新」を提案する。このことについて、具体的な政策内容については次節で記すこととする。

6-2 政策の具体的な方法

「灌漑設備の更新」について、まず初めに我々がこの点に着目した理由について述べていく。最大の要因としては、パキスタンが農業大国であること、そして現状では灌漑設備老朽化によるロスが大きいことである。

先に述べたように、パキスタンは農業大国であり、パキスタンは GDP の約 21% を農業が占める。なお綿花、小麦、稲作、サトウキビに関しては世界でも有数の生産国である。さらに、増え続ける人口によって食料需要の増加が予測される今日、農業による作物の持続可能な生産は、ますます重要になっている。つまり、ここでは使用水量を減らして農作物の生産量を落とすという選択肢は現実的でないといえる。しかし、パンジャブ州やシンド州での過剰取水が「インダス川のデルタ地域で流量が減少している」問題を引き起こしているのもまた事実である。

そこで我々が焦点を当てたのが「灌漑設備の更新」だ。3 章で述べたように今日のパキスタン国内における灌漑設備は老朽化によってロスが非常に大きくなっている。具体的にみると灌漑システムの灌漑効率は 35~40% と極めて低く、このことは全体で約 122 億 m³ もの水資源損失につながっている。そこで、政府が出資して各流域の灌漑設備の更新を行い、灌漑効率の向上を図るのが我々の政策提案である。このことの最大の利点は灌漑効率の向上化を実現することによって、取水量を減らしても今までと同じだけの便益が得られるという点である。つまり、今までの農作物の生産量を減らすことなく、取水量のみを抑えることが可能となる。これによりインダス川の上流から下流への流量は増加し、下流における農業生産や漁獲量増加がみこめる。結果として、「灌漑設備の更新」が政府にとって十分に実現する価値のある、つまり国内全体の便益が最大化されるものになることを目指していく。なお、この便益を最大化させる設備更新の割合、水の最適配分に関するモデルについては 7 章のモデル分析にて扱う。

図 政策の概要



第 7 章 モデル分析

7-1 分析の目的

政策を実行するには政府が灌漑設備に対して投資を行わなければならない。この投資が実行されるには、政策を行う前のインダス川流域全体における便益と比べて、政策後のそれが大きくなることが条件となる。灌漑設備の更新率を変化させ、最終的に全体の便益を最大化させる、パンジャブ・シンド両州をあわせた上流とデルタ地域における最適水配分を考えるというのがこの項での目的である。

7-2 分析の前提

モデルの仮定

1. インダス川における地域として、パンジャブ州・シンド州をまとめた上流域と、デルタ地域の下流域という 2 つが存在するものとする。
2. 農作物は、パキスタンで代表的な農作物である綿花、小麦、米、サトウキビから考える平均的なものとする。
3. 一般的に呼ばれるインダス川のデルタ地域では農業生産が行われているが、農業生産が行われている地域を上流域に含め、行われていない地域をデルタ地域と呼ぶことにする。
4. 前提 2 より、すなわち、現在農業が行われているのは上流域だけである。またこれより、取水がある、灌漑設備が存在するのは上流域だけである。
5. 上流域に農業規模縮小を要請することは難しいため、現状の農業規模は保障する。
6. 前提 5 より、配分する対象となる水は、灌漑設備更新によって利用可能となったものである。
7. 水を利用することによって得られる便益は農業生産によるもののみとする。
8. 各主体における便益最大化ではなく、流域全体における便益最大化を追求する。
9. 上流における灌漑による土地の塩化は考えないものとする
10. 灌漑、開拓、塩分浄化費用は農地面積に比例するものとする

* 文字の設定 *

目的と前提に基づいてモデル分析で使用する文字を設定する。

U: 上流域（パンジャブ州・シンド州）

D: 下流域（デルタ地域）

B_U : 現在の上流における純便益

B_D : 現在の下流における純便益（ $B_D = 0$ ）

TB: 現在の流域全体における純便益（ $TB = B_U$ ）

$\overline{B_U}$: 政策後、また水配分後の上流域における純便益

$\overline{B_D}$: 水配分後の下流域における純便益

$\overline{TB}$: 政策後、また水配分後の流域全体における純便益（ $\overline{TB} = \overline{B_U} + \overline{B_D}$ ）

a: 水の農作物生産性（ kg/m^3 ）

p: 農作物価格（ $\$/\text{kg}$ ）

b: 土地の農作物生産性（ kg/ha ）

$S(w)$: w だけ取水したときの耕作面積

W : インダス川全体の流量

W_U : 現在の上流域での取水量

e : 旧灌漑設備における灌漑効率

e' : 新灌漑設備における灌漑効率（ $e' = ne$ ）

n : 灌漑効率変化比（ $n = e'/e$ ）

x : 上流における灌漑設備更新率（%）（ $0 \leq x \leq 100$ ）

$\overline{W_U}$: 設備更新後かつ新規開拓前の上流域における取水量

ΔW : 設備更新によって新たに使えるようになった水量

W_{NU} : 設備更新後に上流が取水する総量

$\overline{W_D}$: 設備更新後、下流域に配分された水量

$\widehat{W_U}$: 上流域が直面する水量（ $= W$ ）

$\widehat{W_D}$: 下流域が直面する水量（ $= W - W_U$ ）

I: 単位面積あたりにかかる灌漑費用

R: 単位面積あたりにかかる農地開拓費用

P: 単位面積あたりにかかる塩分浄化費用

c: 取水にかかる費用

α, β : 政策後の上流域、下流域における水配分比（ $\alpha + \beta = 1$ ）

δ : 割引因子

* パラメータの値 *

各パラメータの値について先に記述しておく。また、この値は文字式の煩雑さを解消するため、適宜代入していく。

$$a = 1.368 \times 10^{-1}$$

$$b = 4.060 \times 10^3$$

$$c = 1.000 \times 10^{-5}$$

$$e = 4.000 \times 10^{-1}$$

$$g = 8.500 \times 10^{-12}$$

$$h = 6.5 \times 10^{-12}$$

$$n = 2.000$$

$$p = 5.000 \times 10^{-1}$$

$$I = 1.000 \times 10^2$$

$$P = 3.000 \times 10^3$$

$$R = 3.000 \times 10^3$$

$$W = 2.000 \times 10^{11}$$

$$W_U = 1.300 \times 10^{10}$$

$$\theta = 5.000 \times 10$$

$$\delta = 0.1$$

これらの値は統計や実際のプロジェクトがあるものについてはその数値から、パラメータや現在のパキスタンでは明確に設定されていない取水費用係数などに関しては、適切に結果に影響するように設定してある。

* 定性的な分析 *

一つの川において地域が N あると仮定する。各地域では、水を取水・投入することで同一の生産物に関する生産活動が行われるとする。ここで、各地域における生産関数を次のように定式化する。

$$Y^i = f^i(W_{Ni}), i = U, D$$

ここで、 Y^i , W_{Ni} はそれぞれ地域 i における生産量、取水量である。

$$\frac{df^i(W_{Ni})}{dW_{Ni}} \geq 0,$$

と仮定すると、水の限界生産性は正であることが分かる。また、水の限界生産性は逓減するものと仮定すると、

$$\frac{d^2 f^i(W_{Ni})}{dW_{Ni}^2} < 0$$

となる。

また、水の取水費用関数 C^i は次の関数で表されると仮定する。

$$C_i = C^i(W_{Ni}, \widehat{W}_l)$$

$\widehat{W}_l$ は、地域 i が直面する水量である。

$$\frac{\partial C^i(W_{Ni}, \widehat{W}_l)}{\partial W_{Ni}} = 0, \frac{\partial C^i(W_{Ni}, \widehat{W}_l)}{\partial \widehat{W}_l} < 0$$

と仮定する。

さらに、各地域において灌漑整備・開墾・土壌浄化費用がかかるとし、

$$K_i = K^i(W_{Ni})$$

とおき、

$$\frac{dK^i(W_{Ni})}{dW_{Ni}} = 0$$

である。

生産物の価格を p とおくと、各地域における便益関数 B_i は

$$B_i(W_{Ni}, \widehat{W}_L) = pf^i(W_{Ni}) - \{C^i(W_{Ni}, \widehat{W}_L) + K^i(W_{Ni})\}$$

となる。地域 D における便益は、上流である地域 U の取水量に対してネガティブに依存することになる。上流と下流の便益を合計した総便益 TB は

$$\begin{aligned} TB &= B_U + B_D \\ &= p \sum_{i=U,D} f^i(W_{Ni}) - \sum_{i=U,D} \{C^i(W_{Ni}, \widehat{W}_L) + K^i(W_{Ni})\} \end{aligned}$$

となる。以上のモデル式をもとに、以下分析を進めていく。

* 各関数の設定 *

〈取水費用〉

上流, 下流それぞれにおいて ($L = U, D$)、取水費用は、その地域で実際に取水する量 (W_L) と、

直面する流入量 (w_L) に依存する。

取水量に依存する費用： $C(W_L) = cW_L$

直面する川の水量に依存する費用： $C(\widehat{W}_L) = -\theta \log \frac{\widehat{W}_L}{w}$

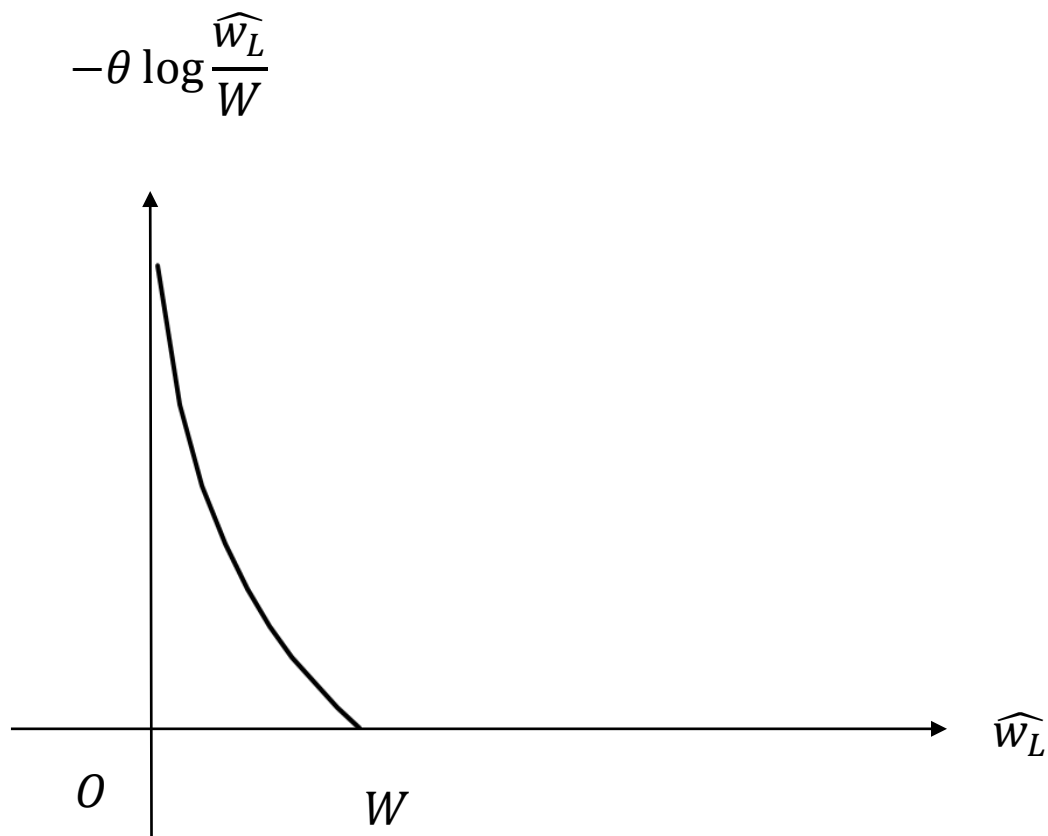
この直面する川の水量に依存する費用 $C(\widehat{W}_L)$ は、下のようなグラフを描き、直面する水量が多いほど、この費用は小さい値をとる。

また、上流の直面する水量はほかの地域の取水量の影響を受けず、常にインダ

ス川の総流量 W であるため、 $c(\widehat{w}_U)$ は0になっている。

直面する水量はその地域よりも上流の地域での取水量を引いたものであり、各地域の取水量はインダス川全体の水量よりも小さい ($0 \leq w_L < W$) ため、直面する水量は

$0 < \widehat{w}_L \leq W$ の範囲を動く。よって $0 < \frac{\widehat{w}_L}{W} \leq 1$ である。



〈生産関数〉

$$\text{上流： } Y_U = -g(Ew - W)^2 + g(W)^2$$

$$\text{下流： } Y_D = -h(Ew - W)^2 + h(W)^2$$

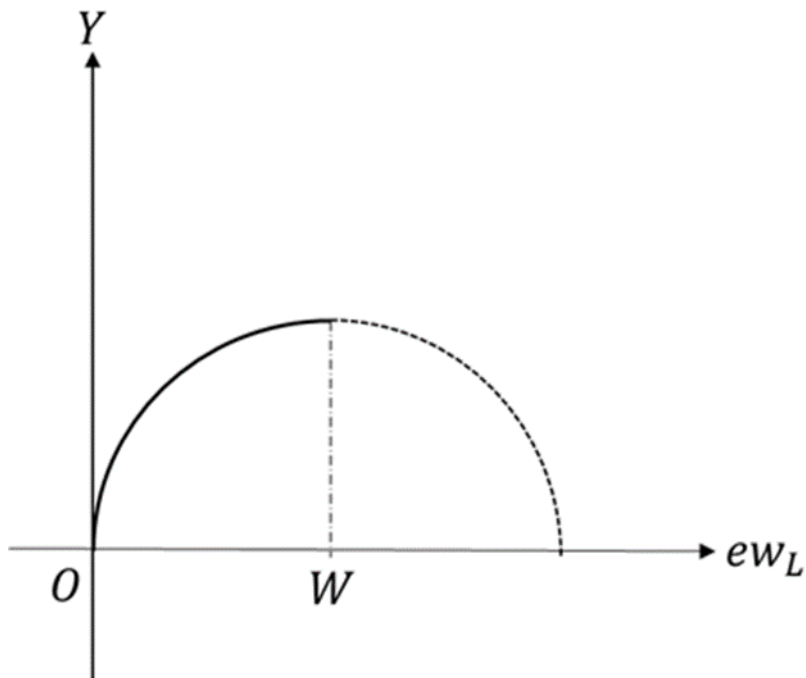
ここで Ew は便宜上の表現であり、ここには灌漑効率の更新割合と取水配分に
応じた農業に使われた水量が入る。

すべての灌漑効率 E について $0 \leq E \leq 1$

すべての取水量 w について $0 \leq w \leq W$

以上より $0 < Ew \leq W$

この範囲で生産関数は以下の実線のような形をとる。



g, h, θ : パラメータ、正の定数

＊流量、取水量について＊

灌漑効率更新を $x\%$ だけ、 e から e' に更新したとき、更新前に W_U 取水していた時と同じだけ耕作するのに必要な取水量 $\overline{W_U}$ は以下のように求められる。

$$\overline{W_U} = \frac{x}{100} W_U \times \frac{1}{n} + \frac{100-x}{100} W_U = W_U - \frac{W_U}{100n} (n-1)x$$

$x\%$ だけ灌漑効率を更新した後に、灌漑効率の向上により新たに使えるようになった水量の増加分を zW_U とすると、

$$\begin{aligned} zW_U &= \Delta W = (W_U - \overline{W_U}) \\ &= \frac{(n-1)x}{100n} W_U \end{aligned}$$

よって係数 z は

$$z = \frac{(n-1)x}{100n}$$

となる。この z を使うと、政策後に政策前と同じ農業規模を維持するための取水量 $\overline{W_U}$ は、

$$\overline{W_U} = (1-z)W_U$$

$x\%$ の灌漑設備更新で新たに使える水の増加分は、

$$\Delta W = zW_U$$

と表せる。そのうち上流と下流へは $\alpha : 1-\alpha$ で配分される。

7-3 総便益最大化

a.政策前

政策前において生産を行っているのは上流だけであるので、政策前の流域全体における純便益は以下のようになる。

$$\begin{aligned} TB &= B_U \\ &= p\{-g(eW_u - W)^2 + gW^2\} - cW_u \end{aligned}$$

b.政策後

次に、政策後の各地域における便益を求める。

〈上流〉

上流の既存の灌漑設備の更新率は政府が決め、その費用も政府負担であるため、上流における追加的な費用は、新しく農業をする土地の灌漑と開拓にかかる費用だけである。

$$\begin{aligned} \overline{B}_U &= pY - \{C(w_{NU}, \widehat{w}_U) + I \times S(\alpha \Delta W) + R \times S(\alpha \Delta W)\} \\ &= p\{-g(Ew_{NU} - W)^2 + g(W)^2\} - \left\{Cw_{NU} - \theta \log \frac{\widehat{w}_U}{W} + (I + R) \times S(\alpha \Delta W)\right\} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} W_{NU} &= \overline{W}_U + \alpha \Delta W \\ &= (1 - z + \alpha z)W_U \end{aligned}$$

となり、更新後の農業に利用する水量 Ew_{NU} は

$$\begin{aligned} Ew_{NU} &= E\overline{W}_U + e' \alpha \Delta W \\ &= eW_U + ne \times \alpha z W_u \\ &= (1 + \alpha zn)eW_U \end{aligned}$$

$A = 1 + \alpha zn$ とおくと、政策後の上流の便益は

$$\overline{B}_U = p\{-g(AeW_U - W)^2 + gW^2\} - \left\{c(1 - z + \alpha z)W_U + (I + R) \frac{\alpha aez}{b} W_U\right\}$$

と整理することができる。

〈下流〉

下流においては、政策後は土地塩分浄化と灌漑設備投資の費用が掛かる。

$$\begin{aligned}\overline{B_D} &= pY - \left\{ C(w_{ND}, \widehat{w_D}) - \theta \log \frac{\widehat{w_D}}{W} + (I + P) \times S(\beta \Delta W) \right\} \\ &= p\{-h(Ew_{ND} - W)^2 + h(W)^2\} - \left\{ C(w_{ND}, \widehat{w_D}) - \theta \log \frac{W - w_{NU}}{W} + (I + P) \times (\beta \Delta W) \right\}\end{aligned}$$

下流において、モデルの前提より政策前の取水は無く、新たに取水できる水量がそのまま政策後の取水量となるため、

$$\beta \Delta W = W_{ND} = (1 - \alpha)zW_U$$

であり、そのうち農業に利用できるのは灌漑効率 ($e' = ne$) をかけて

$$Ew_{ND} = (1 - \alpha)nezW_U$$

ここで、 $B = (1 - \alpha)nz$ とおくと、政策後の下流の便益は

$$\begin{aligned}\overline{B_D} &= p\{-h(BeW_U - W)^2 + hW^2\} \\ &\quad - \left\{ c(1 - \alpha)zW_U - \theta \log \frac{W - W_{NU}}{W} + (I + P) \times \frac{(1 - \alpha)aezn}{b} W_U \right\}\end{aligned}$$

と、まとめることができる。

よって、以上の上流と下流の便益を使って政策後の流域全体における純便益 $\overline{TB}$ を表すと、

$$\begin{aligned}\overline{TB} &= \overline{B_U} + \overline{B_D} \\ &= p\{-g(AeW_U - W)^2 + gW^2\} - \left\{ c(1 - z + z\alpha)W_U + (I + R) \frac{\alpha aez}{b} W_U \right\} \\ &\quad + p\{-h(BeW_U - W)^2 + hW^2\} - \left\{ c(1 - \alpha)zW_U - \theta \log \frac{W - W_{NU}}{W} + (I + P) \times \frac{(1 - \alpha)aezn}{b} W_U \right\}\end{aligned}$$

となる。

以下この総便益 $\overline{TB}$ のうち、変数となるのは x と α のみであるため、 $\overline{TB} = f(x, \alpha)$ として進めていく。

初めに、我々のモデル分析の目的はいくつかの灌漑更新率 x を定めて、そのときの最適な配分比 α を求めることであるが、その前に上流とまたは下流どちらか一方に新たに利用できる水量をすべて配分することになる灌漑更新率 x を求めるため、 α について f の最大化を行う。

$0 \leq \alpha \leq 1$ のもと

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 0$$

を満たす α を α^* と表す。

そして、 $f(x, \alpha^*)$ を最大化する x を x^* とする。

ここで各パラメータと $\alpha^* = 0, 1$ を代入すると

$\alpha^* = 0$ のとき

$$x^* = 75.451$$

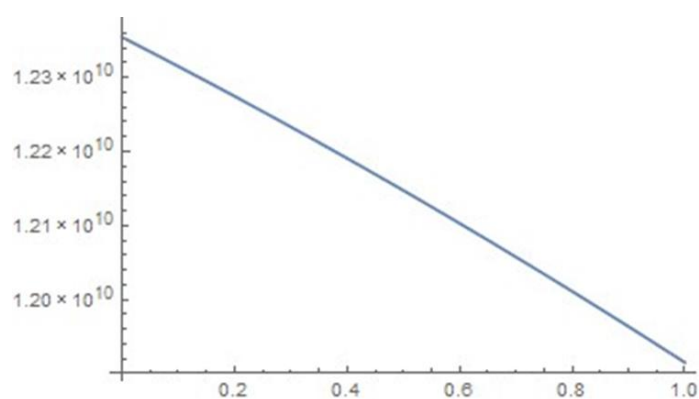
$\alpha^* = 1$ のとき

$$x^* = 101.066 > 100$$

したがって、

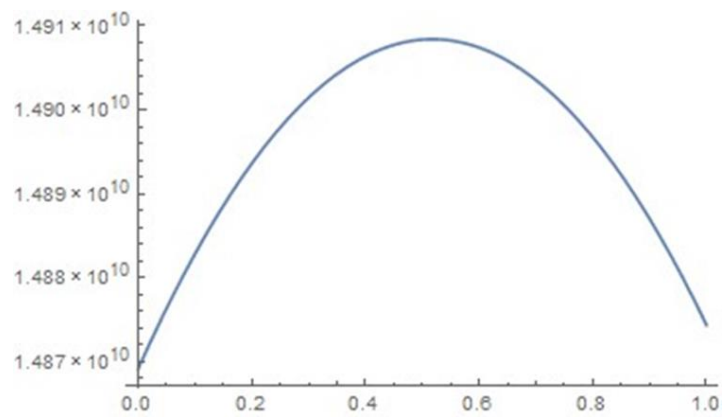
$0 \leq x \leq 75.451$ のとき

$$\max f = f(x, 0)$$



$75.451 \leq x \leq 100$ のとき

$$\max f = f(x^*, \alpha^*)$$



となる。

＊動学的分析への移行＊

すでに挙げた $\overline{TB}$ を第 0 期とすると、第 1 期以降は灌漑設備更新・開拓・土地浄化費用が不要になる。この時の流域全体における純便益を $\overline{TB}'$ とすると

$$\overline{TB}' = p\{-g(AeW_U - W)^2 + gW^2\} - \{c(1 - z + z\alpha)W_U\} + p\{-h(BeW_U - W)^2 + hW^2\} - \left\{c(1 - \alpha)zW_U - \theta \log \frac{W - W_{NU}}{W}\right\}$$

とすることができる。

また、政府による支出 G を確認すると

$$G = I \times \frac{aeW_u}{b} \times \frac{x}{100}$$

で求められることが分かる。

本論文における政策が実行されるには、年数 y 期後に「政策後に得られる純便益の合計」が「政策を行わずに得られる便益と政府支出の合計」を上回れば良い。

すなわち、

$$\begin{aligned} \overline{TB} + \frac{\overline{TB}'}{1 + \delta} + \frac{\overline{TB}'}{(1 + \delta)^2} + \cdots + \frac{\overline{TB}'}{(1 + \delta)^y} \\ > TB + \frac{TB}{1 + \delta} + \frac{TB}{(1 + \delta)^2} + \cdots + \frac{TB}{(1 + \delta)^y} + G \\ \Leftrightarrow \overline{TB} + y\overline{TB}' \sum_{k=0}^y \left(\frac{1}{1 + \delta}\right)^k > TB + yTB \sum_{k=0}^y \left(\frac{1}{1 + \delta}\right)^k + G \\ \Leftrightarrow (\overline{TB} - TB) + \frac{y(\overline{TB} - TB)}{\delta} \left\{1 - \left(\frac{1}{1 + \delta}\right)^y\right\} + G > 0 \end{aligned}$$

この式の左辺を $g(y)$ として

$$g(y-1) < 0 \quad \text{かつ} \quad g(y) \geq 0$$

をみたす y を求めていくことにする。

7-4 シミュレーション

これまでに整理してきた式を利用して、灌漑更新率 x に値を代入してシミュレーションを行う。なお、 $x=50, 75.451, 85, 95$ という 4 つのシナリオを考えることとする。

【シナリオ 1 ($x=50$)】

$f(50, \alpha)$ を最大化する α は端点解を取り、 $\alpha=0$ となる。

$$f(50, 0) = 1.235 \times 10^{10}$$

下流に流れるようになる水量 $\beta\Delta W$ は

$$\beta\Delta W = 3.250 \times 10^9$$

政府による灌漑設備を更新するための支出 G は

$$G = 8.760 \times 10^6$$

ここで政策が実行される条件を確認すると、

$$g(2) < 0 \quad \text{かつ} \quad g(3) > 0$$

となり、3 期後には投資分が国全体として回収されることが分かった。

以下同様にシミュレーションを行う。

【シナリオ 2 ($x=75.451$)】

$f(75.451, \alpha)$ を最大化する α は、 $\alpha = \alpha^* = 0$ となる。

$$f(75.451, 0) = 1.419 \times 10^{10}$$

下流に流れるようになる水量 $\beta\Delta W$ は

$$\beta\Delta W = 4.904 \times 10^9$$

政府による灌漑設備を更新するための支出 G は

$$G = 1.322 \times 10^7$$

ここで政策が実行される条件を確認すると、

$$g(2) < 0 \quad \text{かつ} \quad g(3) > 0$$

となり、3 期後には投資分が国全体として回収されることが分かった。

【シナリオ 3 ($x=85$)】

$f(85, \alpha)$ を最大化する α は、 $\alpha = \alpha^* = 0.518$ となる。

$$f(85, 0.518) = 1.491 \times 10^{10}$$

下流に流れるようになる水量 $\beta\Delta W$ は

$$\beta\Delta W = 2.664 \times 10^9$$

政府による灌漑設備を更新するための支出 G は

$$G = 1.489 \times 10^7$$

ここで政策が実行される条件を確認すると、

$$g(2) < 0 \quad \text{かつ} \quad g(3) > 0$$

となり、3期後には投資分が国全体として回収されることが分かった。

【シナリオ 4 ($x=95$)】

$f(95, \alpha)$ を最大化する α は、 $\alpha = \alpha^* = 0.858$ となる。

$$f(95, 858) = 1.572 \times 10^{10}$$

下流に流れるようになる水量 $\beta\Delta W$ は

$$\beta\Delta W = 8.767 \times 10^8$$

政府による灌漑設備を更新するための支出 G は

$$G = 1.665 \times 10^7$$

ここで政策が実行される条件を確認すると、

$$g(1) < 0 \quad \text{かつ} \quad g(2) > 0$$

となり、2期後には投資分が国全体として回収されることが分かった。

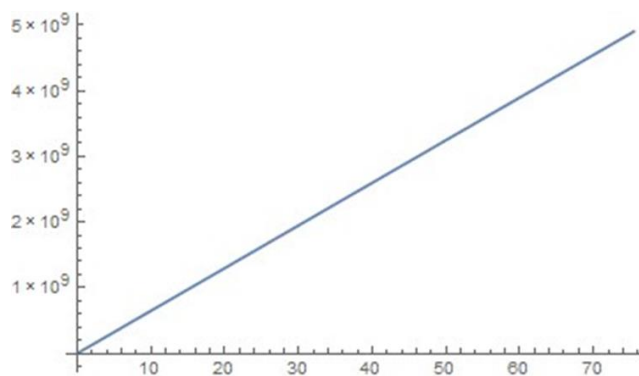
7-5 政策の分析

シミュレーションの結果をまとめると以下ようになる。

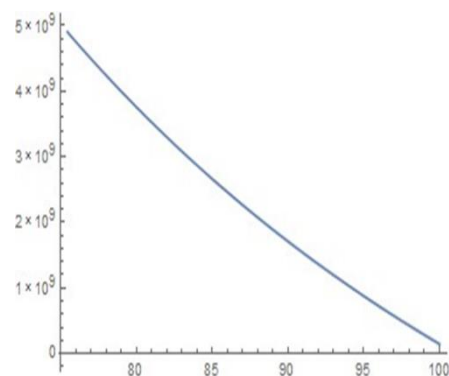
灌漑設備更新率 (%)	50%	75.4514%	85%	95%
新たに使える水量の配分比 (%)	0: 100	0 : 100	70.8 : 29.2	85.8 : 14.2
投資分を増加分が上回る年数($\delta = 0.1$ のとき)	3 年目	3 年目	3 年目	2 年目
政策後下流に流れる水量 ($\beta \Delta W$)	3,250,000,000	4,904,340,000	2,664,200,000	876,640,000
総便益 TB	12,354,600,000	14,118,530,000	14,908,400,000	15,718,400,000

端点解を取らないとき、つまり灌漑更新率 x が $75.451 \leq x \leq 100$ の範囲内に収まっているとき、どちらか一方に配分せずに、設備更新率に対して最適な上流と下流への水配分ができるようになる。

TB においては $0 \leq x \leq 100$ において単調増加であり、更新率を上げるほど総便益は大きくなり、投資分を増加分が上回るのも早いという結果になった。これは、灌漑効率を上げれば水の無駄が減り、有効に使われるということが示された形になる。一方で、下流域に流れる水量に注目してみると、下図のようにまとめられる。シミュレーションやグラフから読み取れるように、下流域に流れ



$0 \leq x \leq 75.4514$ における $\beta \Delta W$



$75.4514 \leq x \leq 100$ における $\beta \Delta W$

る水量が、 $x=75.451$ を境に増加から減少に転じている、つまり、最大化されているのである。さらに、75.451%以上の灌漑設備更新が行われると、急激に下流域へ流れる水量が減少してしまう。私たちは、本論文において下流域へより多くの水を流すことを目的としていた。すなわち、流域全体の純便益は灌漑設備を 100%更新することで最大化される一方で、本来の目的を満たすには、75.451%の更新を行い、それによって新たに利用できるようになった水をすべて下流で利用することが適切であると考えられる。

7-6 政策の意義・限界

政策の目的としては下流への水量を増やすことがあった。しかし、前節のこのモデルでは農業のみで収益を計算しており、漁獲量や生活環境、生物多様性のようなものは含まれていない点に留意してほしい。水によって得られる便益として考えられる、衛生環境の向上や生態系への影響など様々なものが今回は捨象されているのである。また、最終的に海へ流入する水量が変わらずとも、途中で水量が増えていれば、モデル内で扱った取水費用の低下だけでなく、水の浄化なども期待できるのである。それ故に、流域全体における純便益の最大化と条件と、下流へ流れる水量が最大化される条件に差が生まれてしまった。

政策の意義としては必ずしもすべての設備を更新せずとも、75.451%の更新を行えない時には、設備更新によって解放された流水はすべて下流で利用することで、便益は数年で増加するということがある。しかしながら、現実の問題として、現在のパキスタンで灌漑効率の更新が行われない理由として政府の財政状況が悪いことが理由の一つとして挙げられている。このことや宗教対立や反政府組織の存在することも原因として、下流域をはじめとして多くの地域において治安が悪化している。本論文では、政府、上流域、下流域全体において純便益を増加させる分析を行っており、政府の財政状況との比較は行われていない。

この政策においては上流のこれまでの農業規模を保障することによって、上流の裏切りのインセンティブが少なくなるように考慮したものの、やはり各地域での最適化行動を含めていないことが分析の限界となっている。

終章

我々はこの論文において、パキスタンのインダス川における流量減少問題について扱ってきた。インダス川では灌漑設備の老朽化に伴い、上流、下流の各地域において過剰な取水がなされている。そこで、我々は灌漑設備の更新という政策を提案した。確かに、灌漑設備の更新には多大の費用がかかる。しかし、この政策はそれに見合うだけの価値があると考えた。先にも触れたが、パキスタンは農業大国でありその生産量は世界有数となっている。ましてや、人口増加傾向にある今日、食料生産のための取水を抑制させるのは現実的でない。そこで、灌漑設備の更新という政策が非常に有効となる。ここでは今まで通りの生産量を、より少ない取水量で実現することが可能となる。つまり、農業の生産量を維持したままでインダス川の流量増加という目的を果たすことができるのだ。このことは農業が国としても大きな収入源となっているパキスタンにとって非常に重要である。さて我々はこの政策をもとに、より最適な水配分を求めるためのモデル分析を行った。ここでは灌漑設備更新率を変動させ、それにとりあう国内の便益最大化を満たす配分というのを求めた。初年度は初期投資という意味合いで費用がかかるが、次年度以降では総便益が政策以前を上回っていることが示されている。つまり我々の政策が有効であることがみてとれる。さて、ここでの分析においては、あくまでもモデル分析であっていくつもの事象が捨象されたという点については留意していただきたい。たとえば、各個人の行動による便益の最大化などはここでは考慮されていない。あくまで、上流、下流と分けた際の各地域における最適な水配分を求めたという点を理解していただけたらと思う。今回の論文を作成するにあたってインダス川、ひいてはパキスタンにおける様々な資料、文献に目を通してきたがやはり目についたのは途上国の現状というものである。上流での過剰取水がデルタ地域に影響を及ぼしている問題もそうだが、貧しい地域では自己の利益追求が結果として国全体でみるとマイナスで働くという面も持つ。あくまで、一定数の者が利益を得るのではなく全員が享受することを実現するには政府の介入の必要性というのも見取れた。この度の我々による政策提言ならびにモデル分析が、少しでも読者に普段生活している上ではあまり関係ない事だと思われがちな発展途上国の問題の興味関心を引き出し、現状が続くことの危うさへの警鐘となったのなら著者として嬉しい限りである。

最後となりますがこの論文を終えるにあたり、半年以上にもわたってご指導いただいた大沼先生、小村さん、12期生の先輩方、そして同期である13期生のゼミの仲間たちに深く感謝いたします。

参考文献

1. Cotton: World Markets and Trade, United States Department of Agriculture, 2015
<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1486> (最終アクセス 2015 年 12 月 8 日)
2. GOVERNMENT OF PAKISTAN STATISTICS DIVISION
PAKISTAN BUREAU OF STATISTICS ISLAMABAD
『AGRICULTURAL STATISTICS OF PAKISTAN 2010 - 2011』
3. IUCN (The World Conservation Union), 2003-1:
“The Lower Indus River: Balancing Development and Maintenance of Wetland Ecosystems and Dependent Livelihoods”.
4. IUCN, 2003 -2: “INDUS DELTA, PAKISTAN: economic costs of reduction in freshwater flows “
5. IRIN, 2001: “Pakistan: Intruding sea water threatens Indus river”.
UN Office for the Co-ordination of Humanitarian Affairs Integrated Regional Information Networks article:
6. http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/inter/keizai/infra/pdf/pakis2003_06.pdf#search='%E3%82%B7%E3%83%B3%E3%83%89%E5%B7%9E++%E5%9C%9F%E5%A3%8C+%E5%A1%A9%E5%88%86%E6%BF%83%E5%BA%A6' (最終アクセス 2015 年 12 月 7 日)
7. Meynell, P. and Qureshi, T., 1993; “Sustainable management of mangroves in the Indus Delta, Pakistan”
Towards the Wise Use of Wetlands, Ramsar Bureau, Gland Pakistan
Data, World Bank, 2015
<http://data.worldbank.org/country/pakistan?display=default> (最終アクセス 2015 年 12 月 8 日)
8. N. Laghari.; D. Vanham.; W. Rauch., 2012:
“The Indus basin in the framework of current and future water resources management” Hydrol. Earth Syst. Sci
9. Ramsar 2001: Ramsar Sites Information Service,
<https://rsis.ramsar.org/ris/1284>, (最終アクセス 2015 年 12 月 8 日)
10. Spalding, mark. ; Kainuma, mami. ; Collins, Lorna.
“World Atlas of Mangroves” Earthscan, 2010 p.94
11. The Guardian ,
<http://www.theguardian.com/world/2010/oct/05/pakistan-flood-waters-indus-delta> (最終アクセス 2015 年 12 月 7 日)

12. The World Bank (2006): Better Management of Indus Basin Waters
Strategic Issues and Challenges
13. WWF: “INDUS DELTA A VANISHING ECOSYSTEM ”
Indus For All Programme WWF – Pakistan
14. 社団法人 海外農業開発 コンサルタンツ協会(ADCA),2000 :
『インダス水系上流域灌漑水資源開発計画及び流域管理計画 インダス灌
漑システム水管理技術向上計画 バラニ地域における灌漑農業農村開発計
画プロジェクトファイディング調査報告書』
15. 『種々の灌漑方法と灌漑効率』
http://www.geocities.jp/soil_water_mitchy11/2013AffCons_Oct11-3.pdf#search='%E7%81%8C%E6%BC%91%E5%8A%B9%E7%8E%87+%E6%B0%B4' (最終アクセス 2015 年 12 月 7 日)