

第1章 個別の研究成果

1.1 気候変動に適応する治水方策に関する研究

1.1.1 流域一体となった浸水被害軽減方策に関する研究

1.1.1.1 研究の背景・目的

従来より、河道改修、洪水調節施設の整備などの治水対策を整備してきたが、依然として整備率は低く、また治水対策への投資も減少し続ける状況にあるとともに、将来は気候変動による外力の増加とそれに伴う治水安全度の低下が想定されている。

こうした状況を踏まえ、これまでの計画において目標としてきた流量に対し、河道改修や洪水調節施設の整備等を基本とする「河川で安全を確保する治水施策」で対処することに加え、増加する外力に対し「流域における対策で安全を確保する治水施策」を重層的に行うべきであるとの提言（水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方）が、平成20年に社会資本整備審議会にてなされている。

気候変動適応策として期待される流域治水施策としては、霞堤、二線堤、輪中堤などの氾濫流制御施設の整備・保全、土地利用や建築の規制などが挙げられるが、その1つとして、遊水機能を有する土地の保全ということがあげられる。具体的には、河道に流れ込む前の雨水の一部を貯留し、または洪水時に河川水があふれ洪水の一部を貯留し、自然に洪水を調節する作用を有する土地のことを言い、河川や周辺の土地の地形等によって、河道のピーク流量を低減させる効果が期待されている土地である。このような土地は基本的には現況を保全することによって、遊水機能を保持させておくことが可能であるが、保持するための具体的な手法や制度はまだ確立されておらず、また、定量的な洪水軽減効果や流域全体の被害軽減への寄与度の評価について研究された事例は少ない。

そこで、本研究では、既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例について調査を行うとともに、その事例の中からモデル河川を選定し、気候変動による外力増加も含めたケーススタディに基づき遊水機能の定量的評価を試み、気候変動適応策としての検討の方向性や課題を抽出・整理することを目的に実施したものである。

1.1.1.2 遊水機能を維持・活用した施策事例調査

a) 調査対象事例

既存の遊水機能を有する区域を維持・活用した施策事例について、関係機関等からの協力が得られた6事例について、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングにより、施策の背景・経緯、現在の状況等を中心に調査を実施した（図-Ⅱ.1.1.1.1参照）。

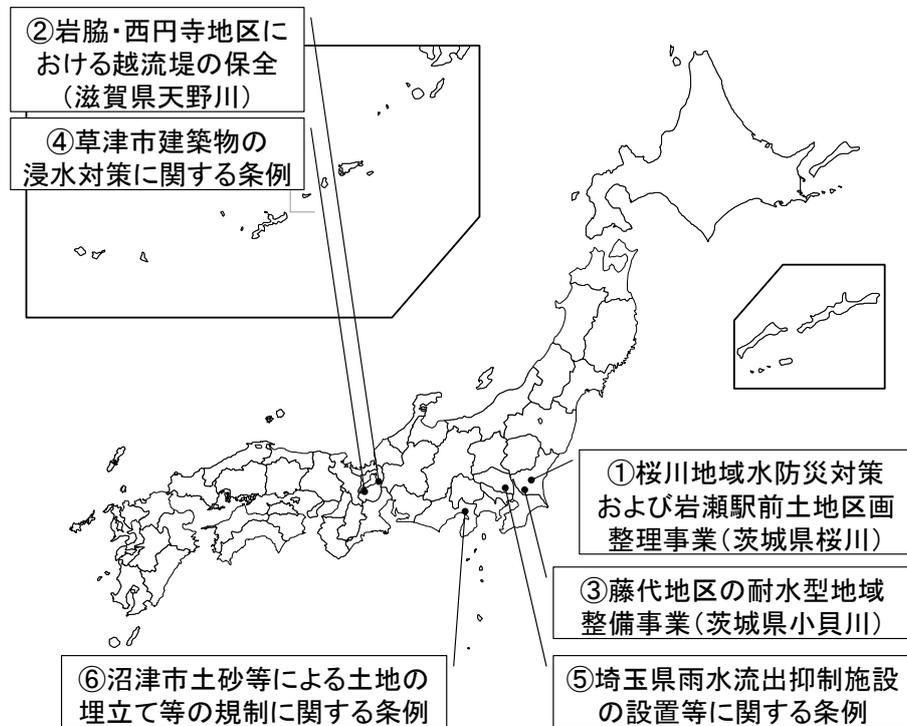


図-Ⅱ.1.1.1.1 対象事例の位置図

①-2 北太田・君島地区水防災対策特定地域

桜川においては、昭和 61 年 8 月台風 10 号により、床上床下あわせて約 1,500 棟の大規模な浸水被害が発生した。この水害を契機として、桜川地域水防災対策計画が平成 7 年に策定された。同計画において、水防災対策特定地域は「計画高水時に浸水する区域」として定義付けられており、氾濫解析結果をベースに、現地の地形状況等を踏まえて設定されている。本調査においては、最下流部に位置する北太田・君島地区（図-Ⅱ.1.1.1.3）を対象に、特に同計画策定時の経緯や現在の土地利用状況等に着目し、文献・現地調査やヒアリング（関係機関、地元住民）を行った。

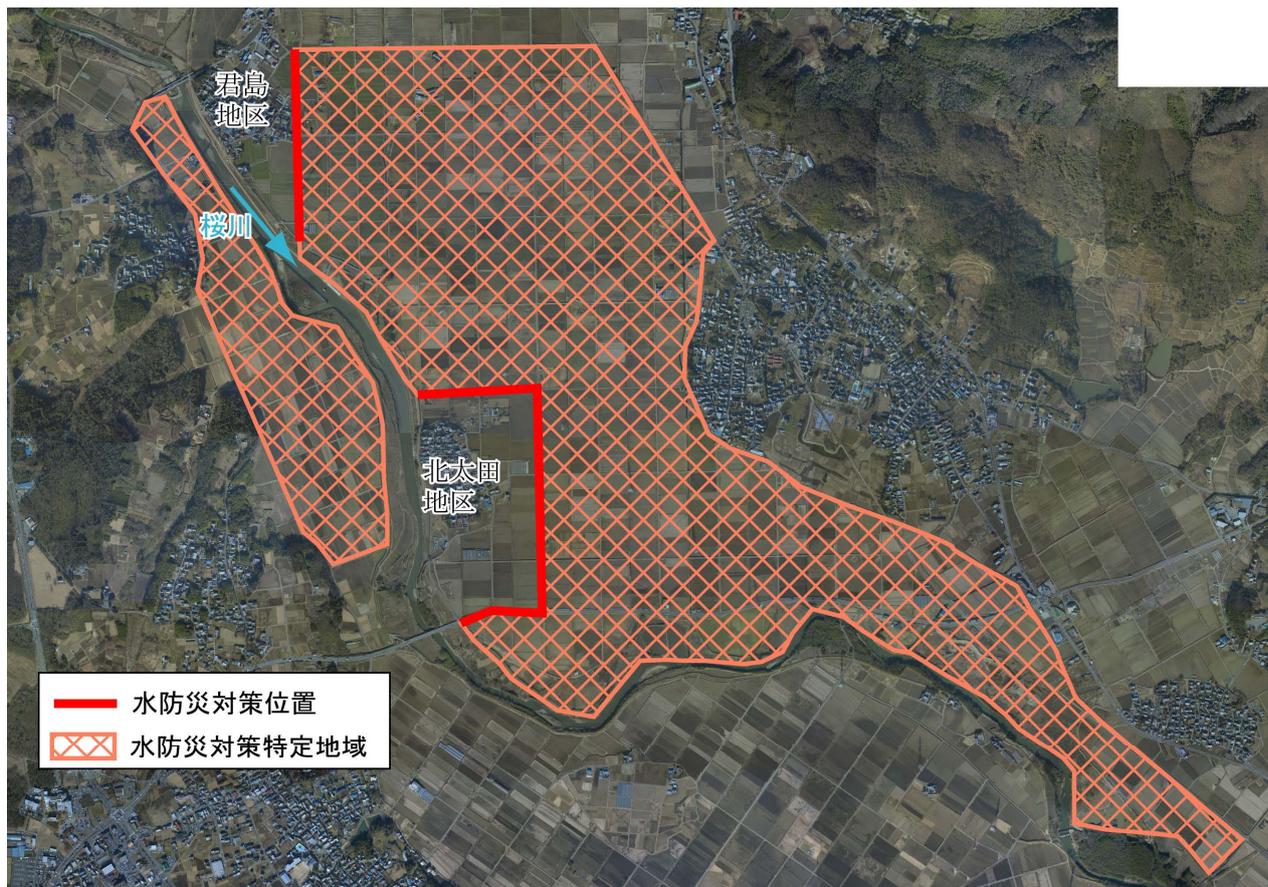


図-Ⅱ.1.1.1.3 北太田・君島地区水防災対策特定地域位置図（茨城県資料をもとに作成）

①-3 岩瀬駅前土地区画整理事業

旧岩瀬町（現桜川市）は茨城県の北西部に位置し、土地区画整理事業の対象地区の岩瀬駅前地区は JR 岩瀬駅の北方約 200m に位置し、昭和 52 年に都市計画法に基づいて市街化区域に指定された地域である。国道 50 号バイパスに伴うスプロール化を防ぐために道路、公園、緑地水路等の公共施設の整備・改善、宅地整備や住み良い市街地の形成を目的とする土地区画整理事業が昭和 53 年に計画・立案され、平成 4 年に事業が完了した。同事業においては、防災調整池が計 3 箇所設置されたが、2 箇所は通常の調整池として市街地に整備され（図-Ⅱ.1.1.1.4 岩瀬調整池」箇所）、残る 1 箇所については通常の調整池を整備する代わりに、水田を調整池と見なしている。本調査においては、特に水田を調整池と見なした経緯等に着目し、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングを行った。

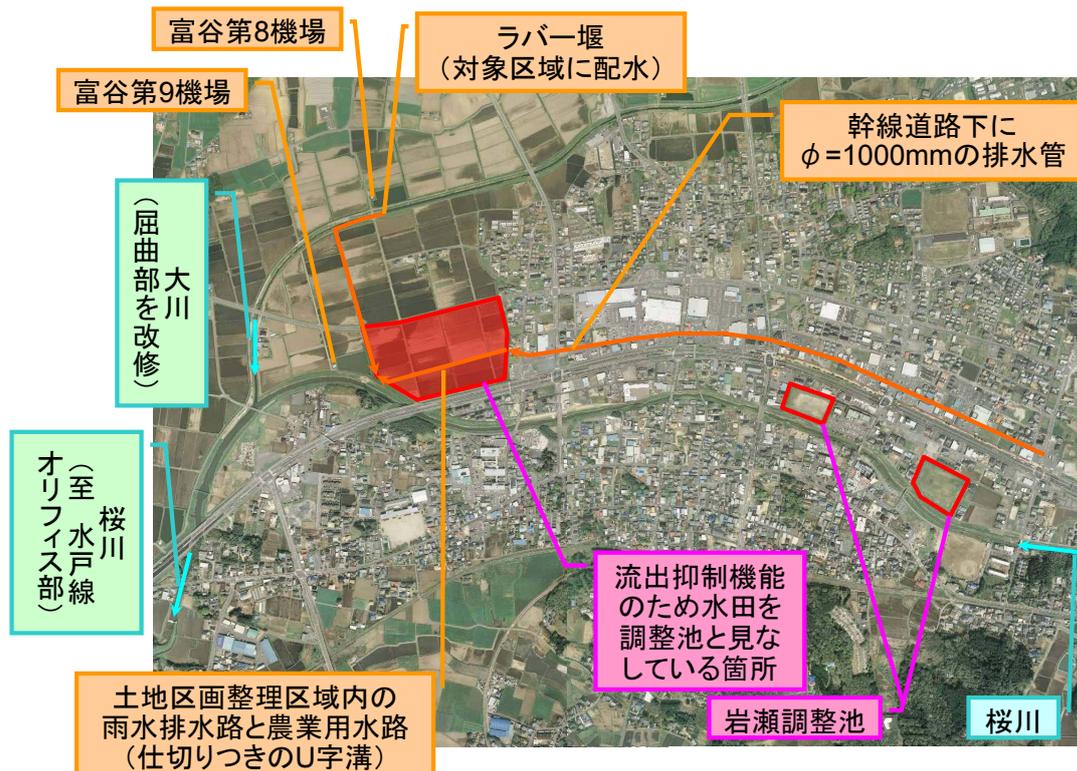


図-Ⅱ.1.1.1.4 岩瀬駅前土地区画整理事業における防災調整池位置図（茨城県資料をもとに作成）

①-4 調査結果概要

【北太田・君島地区】

- 北太田・君島地区の水防災対策特定地域は市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、開発圧力も高くはない。従って、水防災対策特定地域について付加的な規制を実施しなくとも、遊水機能を有する区域が農地として維持されている。
- 中流域の水防災対策特定地域における遊水機能の保全（≒当該地域の田畑の浸水）によって、下流域の洪水時の被害が軽減されるという状況は地元住民も認識している。ただし、現在以上に浸水リスクが上昇することまでは受け入れられてはいない。従って現状では、期待される遊水機能は当該地域で現在有する規模が上限であると考えられる。
- 水防災対策事業による輪中堤の整備によって、田畑における遊水機能の維持を可能とするとともに、地先集落の被害軽減も可能としている。また、輪中堤の整備に伴う湛水面積の減少（=遊水機能の低下）による下流域のリスク上昇分は、河道掘削等の河道改修によって回避されている。これらのことより、本事例では水防災対策事業の実施による浸水リスクの転嫁はなく、流域全体における浸水リスクは事業実施前と後で変わっていない。

【岩瀬駅前地区】

- 土地区画整理事業において調整池と見なされた水田がある地区は、桜川と大川との合流点付近に位置するため、元来出水時には地域一帯が湛水する浸水常襲地域であるとともに、市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、開発圧力も高くはない。また、当該水田の地権者も、このような特性を有する土地であることを十分に認識していた。
- あわせて、土地区画整理事業で別途調整池を設置することになった場合、公共減歩が大きくなってしまうため、可能限り公共減歩を小さくしたいという事業者の意図もあった。
- 計画時には湛水による水田における減収も懸念されたが、排水用のコールゲート管の設置等で湛水量の増加を防ぐ対策をしており、従前の浸水リスクを必要以上に上昇させないことが地権者に容認されたため、実現に至ったものと考えられる。

②岩脇・西円寺地区越流堤（滋賀県天野川）

②-1 天野川の概要

天野川は米原市内を流れ、流域面積 111.6km²、幹川流路延長 19.0km の河川である。流域は伊吹山や霊仙山などの起伏のある山を抱いているが、天野川流域は古来より河道周辺に広がる土地を開拓するなど、勾配の緩やかな水田が広がっており、主に農地と宅地で構成されている（図-II.1.1.1.5）。



図-II.1.1.1.5 天野川流域図（滋賀県資料を元に作成）

②-2 岩脇・西円寺地区越流堤

岩脇地区（宅地）と西円寺地区（農地）は 3.6k 左岸付近に位置し、西円寺地区に面する近江橋から箕浦橋までの区間の堤防の高さが低く事実上の越流堤となっているため、国道 8 号と東海道本線に囲まれている低地が自然遊水地となっている（図-Ⅱ.1.1.1.6）。本調査においては、特に越流堤が保全されている背景・経緯等について着目し、文献・現地調査及び関係機関へのヒアリングを行った。

岩脇地区上流(越流堤直下流)には護岸有



箕浦橋から下流区間は堤防(道路:ガードレール部)の標高が低く、事実上の越流堤になっている



図-Ⅱ.1.1.1.6 岩脇・西円寺地区位置図（滋賀県資料をもとに作成）

②-3 調査結果概要

- 遊水機能を有している西円寺地区は、市街化調整区域、農振農用地区域となっており、開発が抑制されている。また、西円寺地区の水田は、元来から良田では無く、営農者もその状況を認識している。
- 西円寺地区で遊水機能を維持することで、直下流の岩脇地区や対岸の箕浦地区の宅地における浸水リスクが軽減されている。また西円寺地区の営農者（兼業農家）は箕浦地区や岩脇地区の住民であることから、西円寺地区の浸水リスクとともに、当該地域が有している遊水機能についても認識した上で、営農を続けている。
- よって、「営農上の制約を受ける代わりに宅地の浸水被害軽減を図る」という利害衡平について、当該地区全体では十分に認識されているとともに、そのバランスが適切な状態にあると判断されているため、越流堤が現在でも保全されていると思われる。

③-2 藤代地区耐水型地域整備事業

完全閉塞貯留型氾濫による被害を受けやすい地域である藤代地区では、水害に強いまちづくりと一体となって浸水被害の防止・軽減を図る観点から氾濫流制御施設の整備を行う耐水型地域整備事業が平成4年から平成16年まで実施された（図-Ⅱ.1.1.1.8）。

耐水型地域整備事業の目的は、氾濫時の水位を考慮に入れた既存道路の嵩上げを行い、氾濫を一時滞留させて被害を軽減するとともに、洪水到達時間を遅らせ、避難時間の確保を図るものである。本調査においては、特に道路嵩上げに伴う浸水リスク変化等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

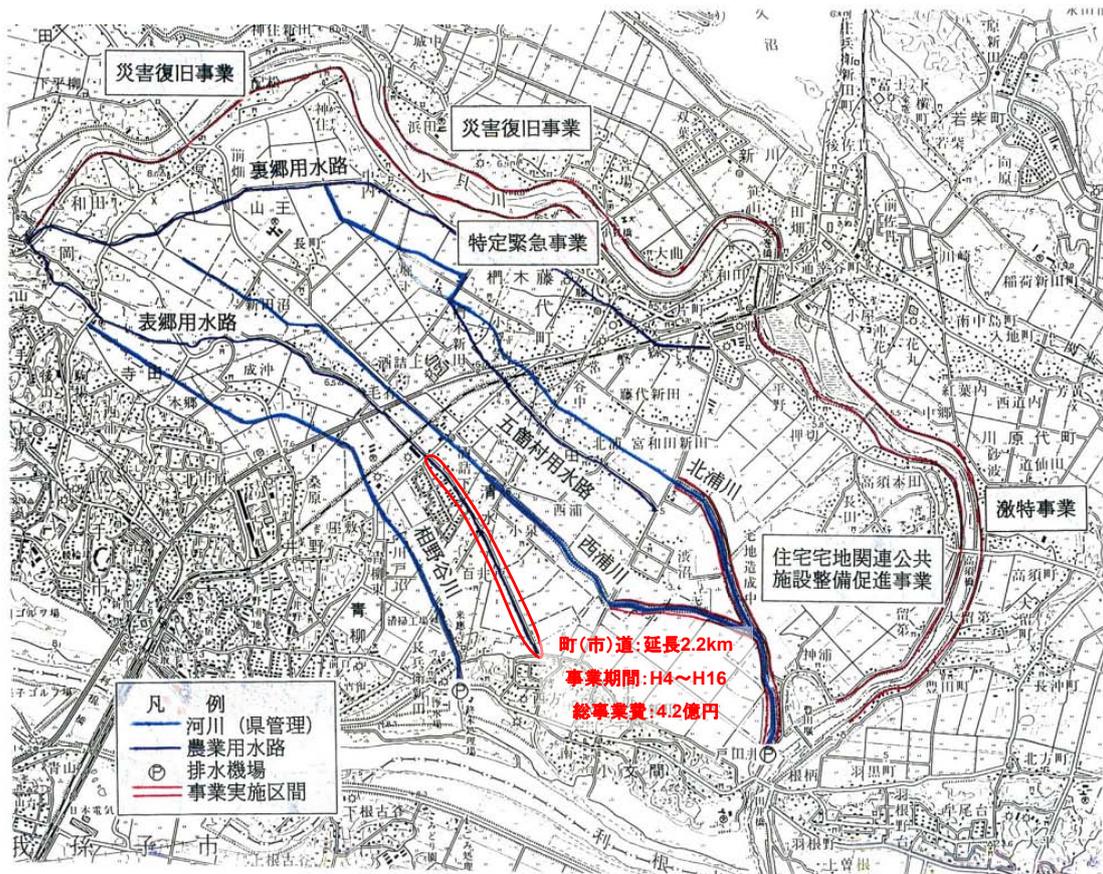


図-Ⅱ.1.1.1.8 藤代地区耐水型地域整備事業位置図（茨城県資料を元に作成）

③-3 調査結果概要

- 水害常襲地区であるため、浸水が想定されている地域の大部分は市街化調整区域となっており、遊水機能が保全されている。
- 当事業の目的の一つは、地区全体における被害を軽減させること（水深低下区域の面積が水深上昇区域の面積を上回ること）であった。しかし、地元等との調整を経た結果、最終的には、嵩上げ盛土による浸水リスクの変化（盛土により上流側は従前以上に被害を受ける）を回避するために嵩上げは行わず、避難路としての機能を高める整備（歩道拡幅）に留まった。このことから、水害常襲地区である当該地区においては、地先レベルにおける既存のリスクバランスの維持が極めて重要視されていることが判明した。

④建築物の浸水対策に関する条例（滋賀県草津市）

④-1 草津市の概要

草津市は滋賀県の南東部、いわゆる湖南地域にあり、北は守山市、東は栗東市、南は大津市、そして市の西側は琵琶湖に接している。市の地形的特徴の一つとして天井川があり、沖積低地を流下する主な河川（葉山川、草津川、伯母川、北川、狼川）の殆どが堤内地よりも高いところを流れる天井川である。そのうち、市の中央を流れている草津川については平成 14 年に放水路が完成しているが、それ以外の天井川や沖積低地を流下する小河川の排水能力は低いため、梅雨期や台風時には田畑や道路が冠水し、住宅の一部が浸水する等の内水氾濫がしばしば発生している。

④-2 建築物の浸水対策に関する条例

市街地での浸水対策を推進するために、草津市では「建築物の浸水対策に関する条例」を平成 18 年から施行した。この条例は集中豪雨等による建築物及びその利用者の被害を未然に防ぐために、市と市民および事業者の責務を明らかにするとともに、建築物の浸水対策に関する必要な事項を定め、もって市民が安心して暮らすことができる安全なまちづくりに寄与することを目的としている。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

④-3 調査結果概要

- 一般的に人命への影響等を及ぼすリスクが非常に高いというわけではないことから草津市では建築基準法の災害危険区域の指定が困難である。しかし、浸水頻度や今後予想される水害規模の増大を踏まえて、災害危険区域が指定されない結果規制がなされない建築物についても浸水対策を推進する観点から条例が制定された。
- 条例の施行によって浸水対策の情報提供や整備指針の指導が行われている。これに当たって、法的根拠を持つ水害リスクの情報として（水防法に基づく）浸水想定区域図を基にした「浸水のおそれのある区域」を示すとともに、民間の建築物も対象に含め浸水対策の規制・指導を行うための条例となっている。
- 公表されている琵琶湖、草津川、金勝川と野洲川の浸水想定区域図を重ねることによって示される「浸水のおそれのある区域」内の建築物のうち、水害時に防災活動拠点、避難所となる施設を特定建築物として位置づけている。特定建築物の新築・改築にあたり、「浸水のおそれのある区域」に示されている想定浸水深を考慮した浸水対策の実施が義務づけられており、既存の特定建築物の浸水対策は努力義務とされている（図-Ⅱ.1.1.1.9）。
- 特定建築物以外では、「浸水のおそれのある区域」において地下室あるいは非常用エレベーターを設置する場合は届出対象の建築物と位置づけ、建築確認申請時に浸水対策内容の届出を求めている（図-Ⅱ.1.1.1.9）。
- 高い開発圧力を背景に、農家の分家住宅等農地の宅地化も散見されており、市街化調整区域・農振農用地区域の開発規制や災害危険区域の設定による建築規制といった既存制度で規制が困難なものに対する対象となる建築物の追加設定という上乘せ・横出しの規制の役割を担っていると考えられる。

	浸水のおそれのある区域内	浸水のおそれのある区域外
<ul style="list-style-type: none"> ・特定建築物 ・防災活動拠点施設 (市役所・消防署・警察等) ・避難所 (学校等) 	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> <p>区域内外共 基準適合義務</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気設備関係は想定水位を考慮して設置 ・地下を設ける場合は、可能な限り浸水しない構造 </div>	
<ul style="list-style-type: none"> ・一般建築物 	<ul style="list-style-type: none"> ・高さ31m以上で非常用EVを設ける ・地下室を設ける建築物 →届出義務 → 基準適合は努力義務 	<ul style="list-style-type: none"> ・その他の建築物 → 基準適合は努力規定

図-Ⅱ.1.1.1.9 草津市建築物の浸水対策に関する条例の仕組み

(草津市都市建設部：草津市における地域防災の取り組み「草津市建築物の浸水対策に関する条例」：「洪水ハザードマップ」より抜粋)

⑤雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（埼玉県）

⑤-1 埼玉県の概要

埼玉県では、高度成長期以降に急速に都市化が進展したことにより、特に地形的に浸水しやすい中川低地や荒川低地を中心に、甚大な水害が幾度となく発生している。このような状況に対し、水害の都度、災害復旧事業による再度災害防止対策を実施するとともに、予防保全的な治水対策が強力に推進されてきた結果、浸水戸数は着実に減少してきているものの、その整備水準は低く、依然として河川改修が進んでいない流域では浸水被害が頻発している。

⑤-2 雨水流出抑制施設の設置等に関する条例

近年、突発的・局所的な集中豪雨が発生していること、その発生が今後増加すると予想されることより、流域における浸水被害対策を一層強化する必要がある。そこで、雨水流出量を増加させる恐れのある行為及び過去の洪水状況を基に湛水することが想定される土地での盛土行為に関し、雨水流出抑制施設の設置等の必要な規制を行うことにより、浸水被害の発生及び拡大を防止し、もって県民の生命、身体及び財産の安全の確保に寄与することを目的として、埼玉県は平成 18 年から「雨水流出抑制施設の設置等に関する条例」を施行した。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯等に注目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

⑤-3 調査結果概要

- 昭和 43 年から 1ha 以上の開発行為などを行う者を対象に雨水流出抑制施設を設置するよう行政指導が行われ、流域での浸水被害対策の一層の推進のため、行政指導の内容をより明確にし、公平性、厳格化を図るとともに、浸水被害の発生、拡大を抑制するために条例を制定した。
- 規制内容は、1ha 以上の開発行為などで、雨水流出抑制施設を設置しないと雨水流出量を増加させる恐れのある行為（「雨水流出増加行為」）をしようとする場合や湛水想定区域に盛土をする場合、雨水流出抑制施設の設置等の設置により浸水被害の発生・拡大を抑制するものである（図-Ⅱ.1.1.1.10）。
- 湛水想定区域とは、「現在の河川整備状況を踏まえ、過去における洪水の状況を基に、湛水することが想定される区域として知事が指定する区域」（条例第 10 条）とされ、区域及び想定湛水深を表示した「湛水想定図」が公表されている。

1 1ヘクタール以上の開発行為などをする場合には、**雨水流出抑制施設の設置（知事の許可）が必要です。**

- 開発する区域の面積が1ヘクタール以上の開発行為などであって、雨水流出量を増加させるおそれのある行為をしようとする方は、あらかじめ知事の許可を受ける必要があります。
- 知事の許可を受けるには、雨水を一時的に貯留する機能などを有する施設（※雨水流出抑制施設といいます。）を設置する計画が必要になります。
- 許可に係る工事が完了、または工事を廃止したときは、知事への届出が必要です。
- 工事完了の届出後、その届出に係る工事についての検査を実施いたします。

2 1ヘクタール以上の開発行為などで、**湛水想定区域に盛土をする場合には、雨水流出抑制施設の設置（知事への届出）が必要です。**

- 開発する区域の面積が1ヘクタール以上の開発行為などであって、知事が指定する湛水想定区域内の土地に盛土をしようとする方は、当該行為に着手する日の30日前までに知事に届け出なければなりません。
- 届出には、雨水流出抑制施設を設置する計画が必要になります。
- 届出に係る工事が完了、または工事を廃止したときは、知事への届出が必要です。

3 雨水流出抑制施設の完成後は、その機能を維持していただきます。

- 上記許可及び届出に係る雨水流出抑制施設の工事が完了したときは、雨水流出抑制施設が存する旨を表示した標識を設置していただきます。
- 雨水流出抑制施設の所有者及び使用する権利などを有する方は、当該雨水流出抑制施設の雨水を一時的に貯留する機能などを維持するよう努めていただきます。
- 雨水流出抑制施設を改修するなど、雨水流出抑制施設の機能を阻害するおそれのある行為をしようとする方は、当該行為に着手する日の30日前までに知事に届け出なければなりません。

注 条例の内容に違反した場合には、**罰則等を科すことがあります。**

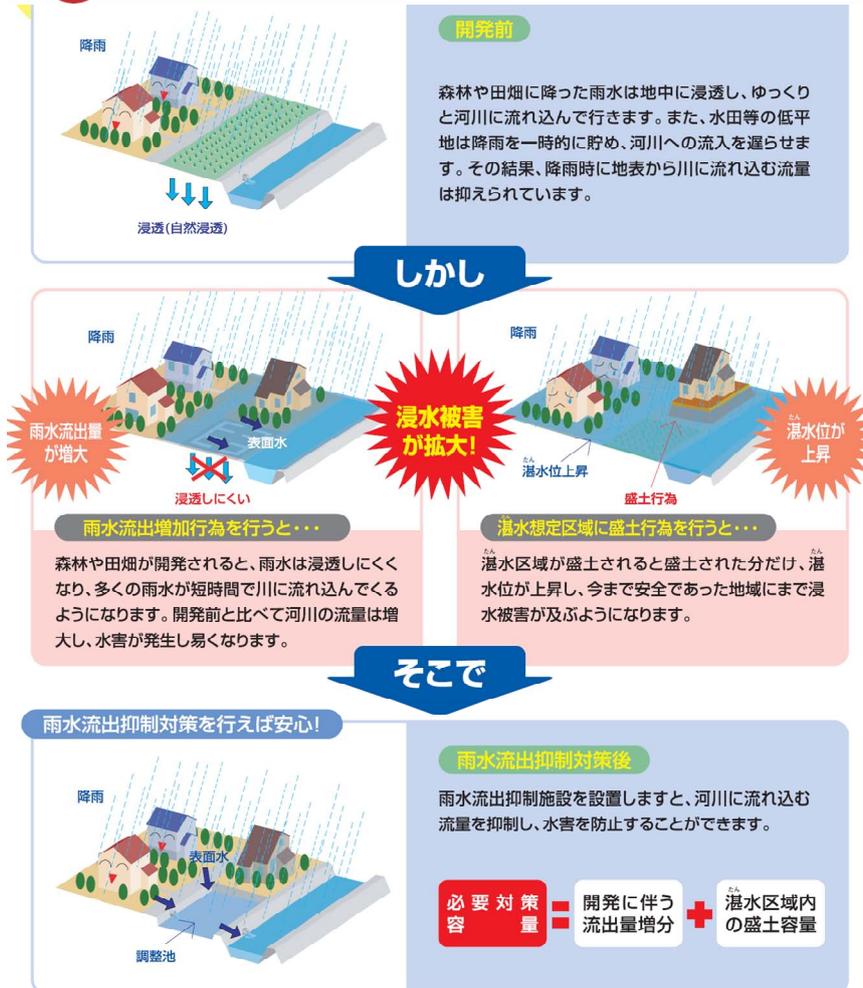


図-Ⅱ.1.1.1.10 埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例の主な内容
 (埼玉県：安心・安全な暮らしのために 埼玉県雨水流出抑制施設の設置等に関する条例（パンフレット）より抜粋)

⑥土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例（静岡県沼津市）

⑥-1 沼津市の概要

沼津市は静岡県の東部に位置し、東に清水町、三島市、西に富士市、南は駿河湾に面した伊豆半島に連なり、北には愛鷹山を擁している。特に市西部地区は、富士川などからの流出土砂により形成された海岸砂丘の内側にできた低湿地帯であり、広大な流域を持つ愛鷹山を背後に抱えていることから、河川の勾配が極めて小さいうえ、流出する雨水量が多く、低地部の浸水が発生しやすいという地形的特性があり、近年では平成 19 年 7 月の台風 4 号で沼川が氾濫し、家屋被害が発生している。

⑥-2 土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例

平成 15 年ごろから市西部の浮島地区の農地（休耕地・耕作放棄地）で建設残土の不適切な埋立て盛土が見られるようになった。元々、市街化調整区域で農振農用地規制を外した区域において、国道からのアクセスが良いことなどを理由に農地における盛土がなされるようになり、結果周辺の土地の隆起による水の流れの変化や、盛土崩壊、農地の荒廃地化等による影響が生じるようとともに、浮島沼にしか存在しない植物の保全を図る必要があった。そこで、土砂等による土地の埋立て、盛土等について必要な規制を行うことにより災害の防止及び環境の保全を図り、もって安全で良好な生活環境を確保することを目的として、沼津市は平成 22 年から「土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例」を施行した。本調査では、特に条例制定に至った背景・経緯、治水施策への効果等に着目し、文献・現地調査、関係機関へのヒアリングを行った。

⑥-3 調査結果概要

- 条例としては、盛土による周辺地盤の隆起等や耕作放棄地・休耕地等、荒廃地化等を防止する農地保全が主旨であり、県が既に規制している盛土よりも小規模なものも対象としていることから、実態上は既存規制に対する上乘せ・横出し規制としての位置づけとなっている（表-Ⅱ.1.1.1.1）
- 元来が農地対策であるため、直接的に水害リスクを考慮して遊水機能の維持を図ったものではなかったが、盛土の規制を行うことで、従前遊水機能を有していた水田が保全されることとなり、結果的に遊水機能を維持する施策としても機能している（図-Ⅱ.1.1.1.11）。
- 条例の主目的ではないが、対象地域周辺に存する低地帯の浸水被害対策である「沼川（高橋川）流域豪雨アクションプラン」における流出抑制対策（農地等の遊水機能の保全）にも寄与する結果となっている。

表-Ⅱ.1.1.1.1 沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例の概要

目的	土砂等による土地の埋立て、盛土等について必要な規制を行うことにより災害の防止及び環境の保全を図り、もって安全で良好な生活環境を確保することを目的とする。
適用範囲	(1) 事業区域の面積が 500 平方メートル以上かつ盛土の高さが 1 メートル以上の事業 (2) 土砂等の量が 500 立方メートル以上の事業 (3) (1)(2)に該当しない事業であって、当該事業区域と一団と認められる区域において事業の許可に関する市長への申請の前 3 年以内に事業が行われ、又は行われている場合は、当該事業区域及び当該事業区域と一団と認められる区域における事業に係る面積又は土砂等の量の合計が、(1)(2)のいずれかに該当する事業
適用外事業	(1) 国、地方公共団体その他規則で定める公共的団体が行う事業 (2) 他の法令の規定による許可、認可等に基づき行う事業。ただし、農地法第 4 条第 1 項又は同法第 5 条第 1 項の許可を受けて行うものを除く。 (3) 非常災害のため必要な応急措置として行う事業

【事例】静岡県沼津市～雨水の一時貯留機能の保全

- ・沼津市では、市街化調整区域に工事残土が埋立てられ、市街化調整区域の雨水の一時貯留機能の能力が低下。
- ・市街化調整区域での不適切な埋立てを防ぐため盛土条例を制定し、規制することにより雨水の一時貯留・浸透機能の保全が図られる。

沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例 (平成22年7月施行)

■ 条例の目的

市街化調整区域における、農地や山林への、埋立てや盛土が引き起こす、周辺への土砂流出や環境破壊の防止。

■ 規制の対象・範囲

土砂の埋立てや盛土を行う事業主は、申請書及び添付書類を市長に提出し許可が必要。

- ・対象行為 : 土砂による土地の埋立て、盛土
- ・対象区域 : 市街化調整区域
- ・適用範囲 : 事業区域の面積が、500㎡以上かつ盛土の高さが1m以上
- ・土砂等の量が、500㎡以上 等



一時貯留機能を有する水田

沼津市写真提供



不適切な盛土

沼津市写真提供



写真の
区域



市街化区域

図-Ⅱ.1.1.1.11 沼津市における雨水の一時貯留機能保全状況の概要

(社会資本整備審議会 都市計画・歴史的風土分科会 都市計画部会 安全・安心まちづくり小委員会資料を元に作成)

表-Ⅱ.1.1.1.2より、各事例の特徴の類似点について整理すると以下のようなことが挙げられる。

今回調査を行った事例は、遊水機能を有する土地が維持され、その機能の活用をした上で、さらに遊水機能を有する土地やそれに隣接する宅地等の被害軽減のための各種施策が実施されているものであると考えられる。

そもそも遊水機能を有する土地が維持されている地域は、従来からの浸水常襲地域である場合が多い。その中で、今回調査を行った事例は、遊水機能を存置した上で、さらに必要に応じ輪中堤整備や避難路確保等住宅や人命の被害軽減策が取られているものである。なお、ここで遊水機能を有する土地が維持されている地域においては、当該地域が浸水常襲地域であることが地元で認識されていることでその機能が維持されているようである。

また、調査した事例においては、遊水機能を有する土地が維持されている地域は市街化調整区域、農振農用地区域に指定されており、宅地化等の開発が抑制されているとともに、開発圧力自体も低い地域であった。このことから、付加的な土地利用規制が無くとも、開発が抑制され、結果的に遊水機能が維持されているものと考えられ、逆に、開発圧力が高い地域や市街化区域に指定された地域等では、遊水機能を有する土地の維持は困難であることが示唆される。

さらに、営農上の事情から水田を維持する方が有利であったり、土地区画整理事業に際し防災調整池を整備するより既存の遊水機能を活用した方が公共減歩が少なく済んだりというように被害軽減以外のメリットが存在する場合、遊水機能を有する土地が維持されやすくなる事例が見られた。

この他、遊水機能を有する土地が維持されている地域で、被害軽減策が講じられる場合、遊水機能の維持によって発生する湛水で従前より農業生産上の減収とならないことや氾濫流制御施設の整備による被害軽減額が負とならないこと等、現状のリスクより悪化しないことが条件となっているものが見られた。また被害軽減策として氾濫流制御施設の整備等が行われる場合、施策の実施によって当該箇所以外のリスクが上昇することがないように代替措置が実施されたりすることから、既存の治水バランスのリスクの大小の順序が入れ替わらないことも条件となっているようである。

つまり、今回調査を行った事例においては、既存の遊水機能を有する土地での新規の開発が少ない状況を前提に、既存の遊水機能を保全することで、既存の宅地での新たな浸水被害を回避することとしており、追加的に氾濫流制御施設が整備される場合においても、その整備によって従前の浸水危険性を上回らない範囲で既存の遊水機能を活用するものであることと解することができる。

次に、条例に関する事例を表-Ⅱ.1.1.1.3に整理した。

表-Ⅱ.1.1.1.3 流域一体となった浸水被害軽減方策の事例（条例）

事例	実施主体	施行年月	概要	追加的土地利用規制等の対象区域の設定	土地利用・建築等に関する規制の内容	浸水被害軽減の上で期待する規制効果
草津市建築物の浸水対策に関する条例	草津市	H18.9施行	<ul style="list-style-type: none"> ・「特定建築物（水害時に防災活動拠点、避難所などなりうる施設）」の新築に際し「浸水のおそれのある区域」の指定浸水深を踏まえて、浸水・雨水対策を実施しなげなければならない（義務付け）。既存施設については、浸水対策の実施は努力義務となる。 ・それ以外の建築物については地下室あるいは非常用エレベータを設置する場合には、届出を義務とするとともに、浸水対策を努力義務とする。 	<p>○浸水のおそれのある区域 草津市建築物浸水対策に関する条例では、公費で指定している琵琶湖、草津川、金勝川と野洲川の浸水想定区域図を重ねることによって示される「浸水のおそれのある区域」内の建築物（公共建築物および一般建築物）を対象としている。</p>	<p>建築基準法の災害危険区域の対象とならないものに対しては建築物の浸水対策の義務付けまたは指導。</p>	<p>「浸水のおそれのある区域」や浸水対策の整備指針等の情報提供により建築物の整備主体に自衛策を取らせることで被害等を防ぐ。</p>
埼玉県雨水流出抑制施設等の設置等に関する条例	埼玉県	H18.10施行	<ul style="list-style-type: none"> ・1ha以上の開発行為などに対する、雨水流出抑制施設の設置等義務付け。 ・1ha以上の開発行為などに対する、浸水想定区域での盛土時の雨水流出抑制施設の設置義務付け。 ・雨水流出抑制施設の完成後の機能の維持。 	<p>○浸水想定区域 浸水想定区域とは「現在の河川整備状況を踏まえ、過去における洪水の状況をもとに、浸水するところが想定される区域として県知事が指定する区域」とされている。</p>	<p>開発行為などにおける雨水流出抑制施設等の設置義務付け。</p>	<p>雨水流出抑制対策後、河川に流れ込む流量を抑制し、水害を防止する。</p>
沼津市土砂等による土地の埋立て等の規制に関する条例	沼津市	H22.7施行	<ul style="list-style-type: none"> ・土砂の埋立てや盛土を行う事業主は、申請書及び添付書類を市長に提出し許可が必要。 ・対象行為：市街地調整区域 ・対象区域：市街地調整区域 ・適用範囲：事業区域の面積が、500㎡以上かつ盛土の高さが1m以上 ・土砂等の量が、500㎡以上 	<p>○なし 条例の主目的は元々農地の対策であるため、水害リスクにおける記述はない（結果的に水害対策として寄与）。</p>	<p>県条例で盛土規制の対象とならない小規模な盛土に対しての届出し・上乗せでの実施規制。</p>	<p>結果的に対象地域周辺の低地帯の浸水被害対策である「沼川（高橋川）流域豪雨アクションプラン」における流出抑制対策にも寄与している。</p>

表-Ⅱ.1.1.1.3より、各事例の特徴の類似点について整理すると以下のようなことが挙げられる。

条例による対策としては、草津市、埼玉県为例から見られるように、浸水の危険性が高い箇所での開発等の可能性が出てきたことに対して、追加的な土地利用規制等を行うものである。ただし、沼津市の盛土条例に関しては、主たる目的は農地のための対策であるが、これが結果的に遊水機能の維持に貢献することになったものである。

また、草津市、埼玉県のように、浸水被害への対策を目的とした条例では、浸水の危険性について、浸水範囲等を制度的に根拠ある情報として提供して、対策実施の対象範囲を示している。既存の都市計画法等では規制の対象範囲を十分明確には示せないため、追加的な規制等を行う場合には、被害発生可能性の観点から対象範囲を明確に示した追加的情報の提供が必要であることによるものである。なお、土地利用等の規制に当たっては、草津市、沼津市では、既存の制度等では対象とならないものに対する付加的規制を行っており、既存制度の横出し・上乘せによる対応がされたものとなっている。

ただし、草津市、沼津市の条例においては、遊水機能を有する土地で開発を行う場合には、被害軽減もしくは流出抑制等の対策を実施することで、開発を可能にしておき、開発に要する費用等の面から開発の抑制を誘導するものとなっている。このことは同時に土地利用規制によって地先での自衛策を促すものとなっており、その重要性が再確認されるものである。

1.1.1.2 モデル河川における遊水機能の分析・評価

a) ケーススタディ対象河川・地区の選定

2.1.3.2において、事例調査を行った河川のうち、ダム等の洪水調節施設が存在せず、遊水機能と被害軽減効果の関係が比較的把握しやすい流域特性を有する桜川をケーススタディ対象として選定した。

桜川は、流域面積349km²、流路延長64kmの一級河川であり、田畑が広がる上流部は無堤区間、小集落が散在する中流部は有堤区間と輪中堤、市街地を有する下流部は有堤区間となっている（図-Ⅱ.1.1.1.12）。目標としている治水安全度は1/30であるが、現在の治水安全度は1/10程度となっている。

桜川においては昭和61年8月台風10号により、床上床下あわせて約1,500棟の大規模な浸水被害が発生した。この水害を契機として、中流部の北太田地区においては輪中堤が整備されているとともに、輪中堤周辺の田畑が有する遊水機能により、下流市街地に対しての洪水軽減効果を発揮している。本研究では、北太田地区周辺の田畑が有する遊水機能に着目して検討を進めることとした。北太田地区の概要を図-Ⅱ.1.1.1.13に示す。

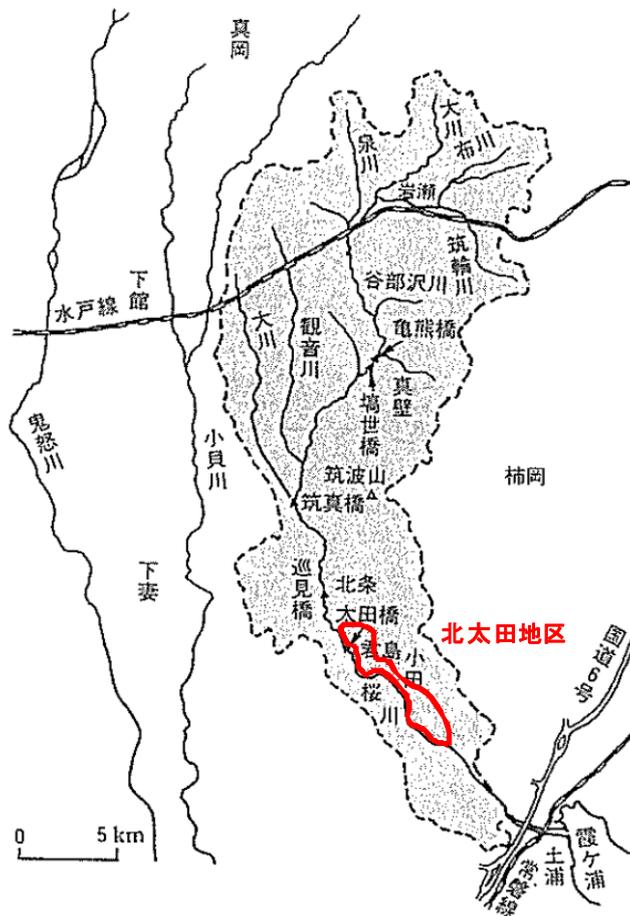
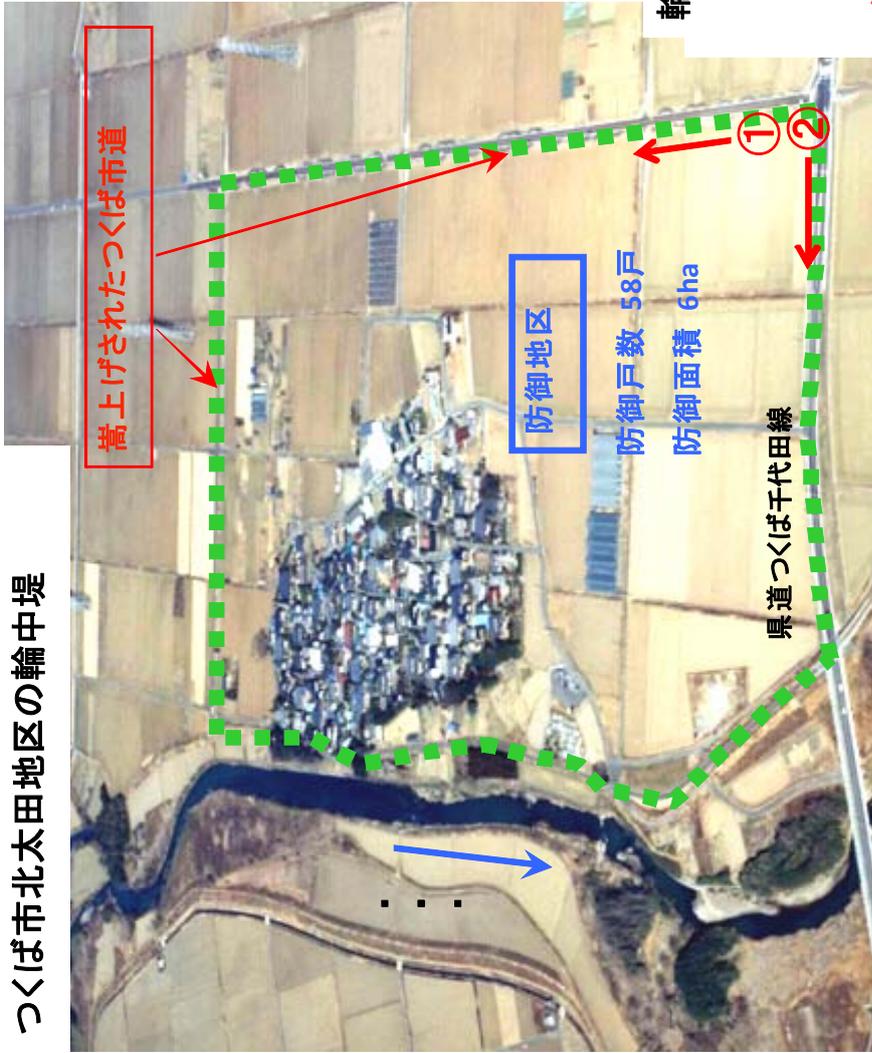


図-Ⅱ.1.1.1.12 桜川流域図（茨城県資料をもとに作成）

つくば市北太田地区の輪中堤



- ・事業期間：平成7年度～平成10年度
- ・事業箇所：つくば市北太田地先
- ・事業費：2億4千万円
- ・事業概要：既存道路高上げL=1,490m



輪中堤横断面図

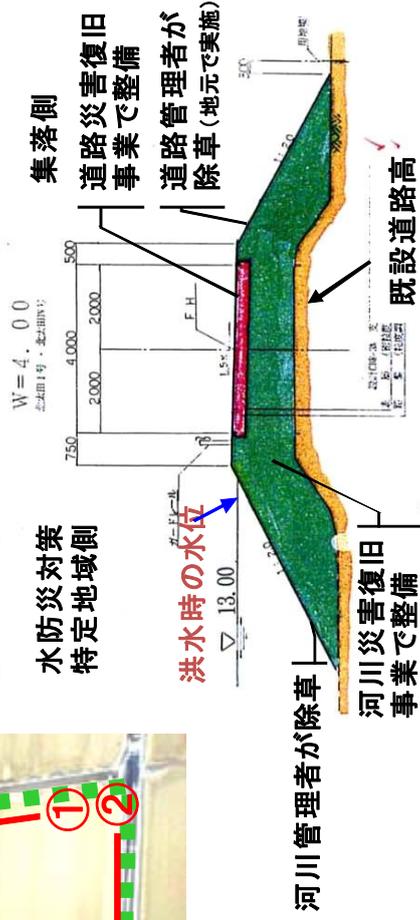


図-II.1.1.1.13 北太田地区の概要

b) 気候変動による降雨量変化の推定

気候変動による降雨量変化については、「21世紀気候変動予測革新プログラム」において、気象庁・気象研究所が開発した20kmの水平分解能を持つ高解像度全球気候モデル（GCM20）による後期実験の計算結果（現在1979～2003、将来2075～2099）から、降雨量変化率を推定した。推定手順については、柏井らの手法を用いた。データ処理及び推定手順を図-Ⅱ.1.1.1.14、地域区分を図-Ⅱ.1.1.1.15に示す。

本研究で対象としている桜川の治水計画は2日雨量に基づいていることから、現在と将来の変化率（年最大降雨量平均値の比）は、図-Ⅱ.1.1.1.16より、関東地域における降雨継続時間48hの50%タイル値を採用し、1.126倍となる。この変化率を、現治水計画における計画対象降雨(1/30規模)に乗じた降雨を気候変動による降雨として設定した。なお当該降雨の確率規模は、現治水計画に基づいて確率評価を行うと1/50程度となる。

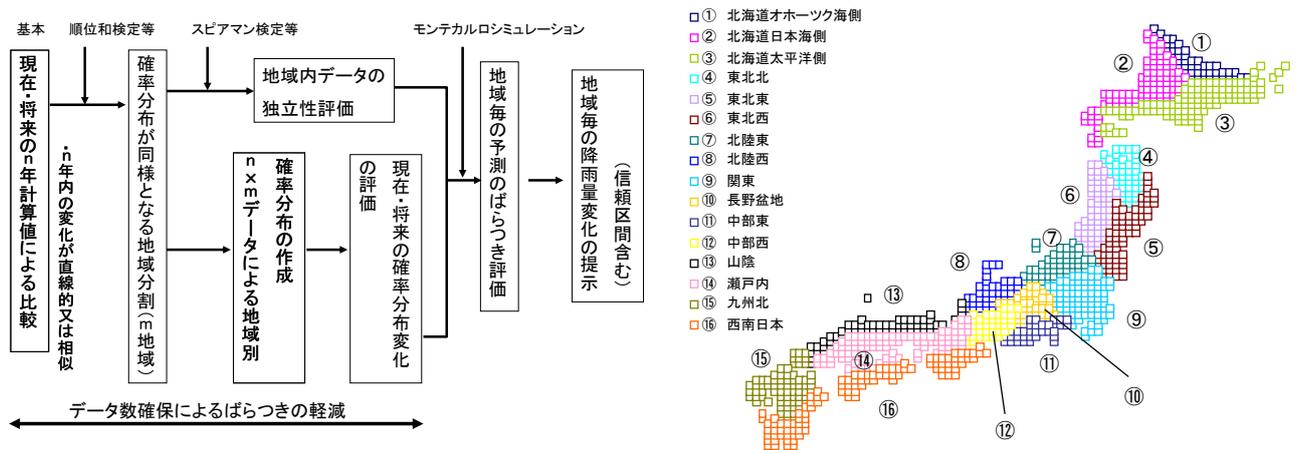


図-Ⅱ.1.1.1.14 将来の年最大降雨量変化のデータ処理及び推定手順

図-Ⅱ.1.1.1.15 地域区分と GCM20 格子点

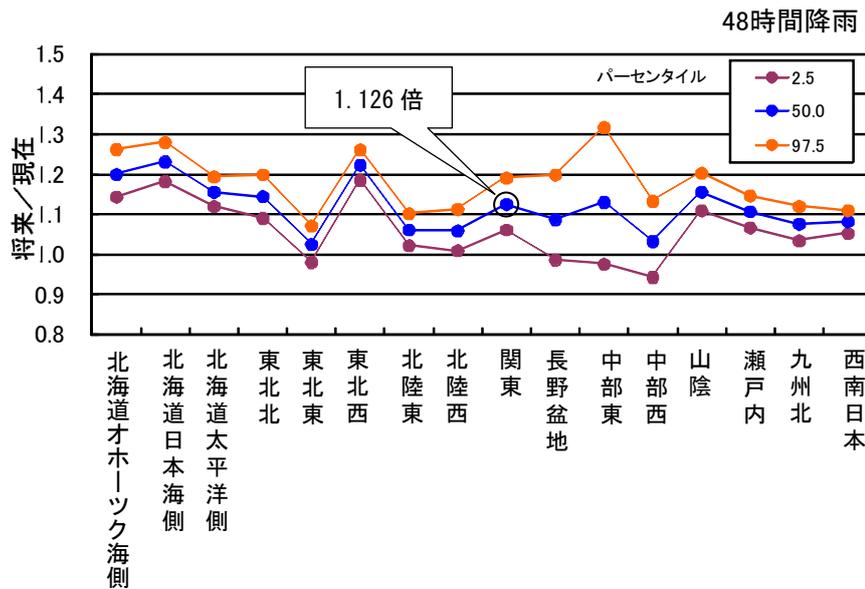


図-Ⅱ.1.1.1.16 各地域における年最大降雨量平均値の将来と現在の比（降雨継続時間：48時間）

c) 現況における遊水機能の分析・評価

北太田地区の遊水機能を評価するために、現況ケース（ケースA）、北太田地区を現計画堤防高による連続堤で整備したケース（ケースB）の2ケースを設定した。ケースBの設定条件を図-Ⅱ.1.1.1.17に示す。

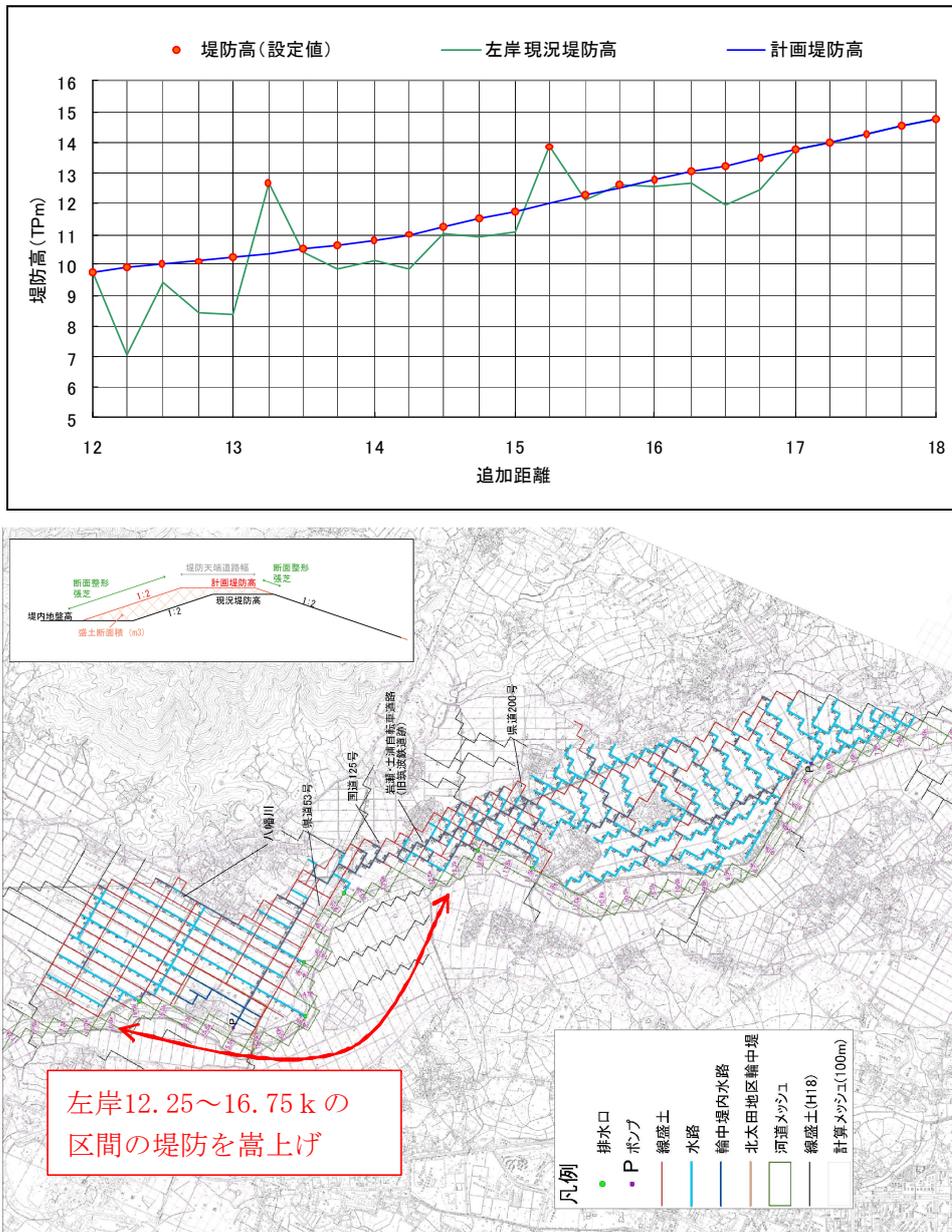


図-Ⅱ.1.1.1.17 ケースBの設定条件

外力設定は、降雨波形は現治水計画における昭和22年9月洪水型とし、確率規模は1/10、1/20、1/30及び気候変動規模(1.126倍)とした。治水経済調査マニュアル(案)に準じて、流域全体の浸水被害額(一般資産被害額)を氾濫ブロックごとに計算・整理を行い(表-Ⅱ.1.1.1.4)、ケースA、B間の比較分析(被害額の増減比)を行ったものを図-Ⅱ.1.1.1.18に示す。図中のL1~L5は左岸域、R1~R3は右岸域の氾濫ブロックを示している。なお、現況の流域特性(地形、氾濫形態、リスクバランス等)と被害軽減効果の関係をまずは把握するため、破堤地点を想定せず、越水(溢水)による被害額にて評価を行った。

表-Ⅱ.1.1.1.4 氾濫ブロックごとの一般資産被害額（単位：百万円）

ケースA

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	370	529	562	607
L3	337	794	879	973
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	0	1,108	3,733	9,284
R2	401	1,238	1,431	1,876
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	3,164	9,705	13,817	22,146

ケースB

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	0	0	0	0
L3	0	214	267	343
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	23	6,507	8,464	31,251
R2	771	1,706	1,824	2,168
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	2,850	14,463	17,767	43,168

ケースC

	1/10	1/20	1/30	1.126倍
L1	0	0	0	0
L2	361	531	562	607
L3	333	716	783	876
L4	0	57	115	198
L5	1,117	2,678	2,985	3,732
R1	0	2,601	5,687	13,665
R2	401	1,298	1,447	1,876
R3	938	3,301	4,112	5,476
全流域	3,150	11,183	15,691	26,430

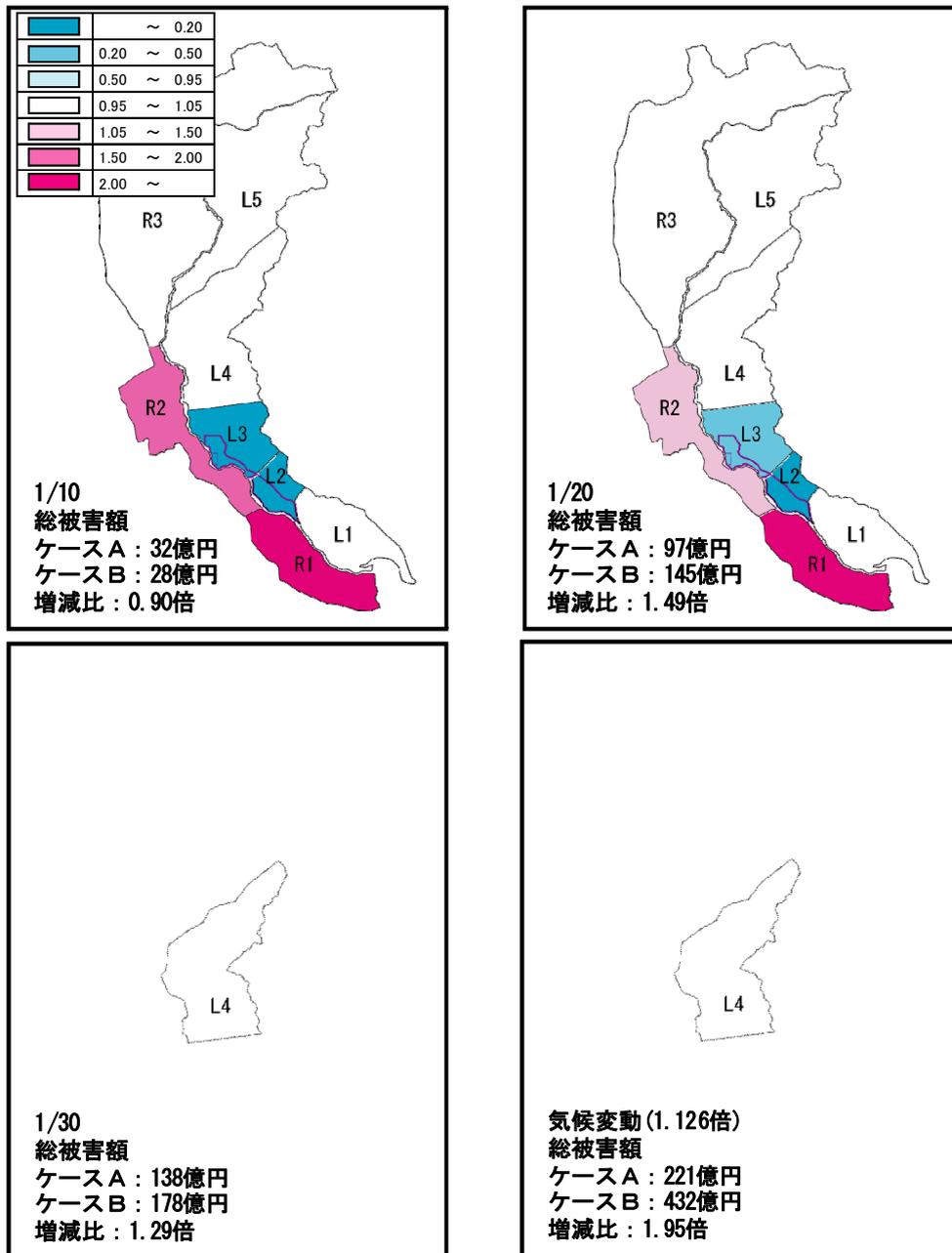


図-Ⅱ.1.1.1.18 氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースB／ケースA）

現状の治水安全度と同等の1/10規模では、R1・R2で被害額が増加しているが、L2・L3の減少額が大きいため、流域全体としては被害額が減少している。つまり、連続堤整備（ケースB）の方が有効であることが分かった。

一方、1/20規模、1/30規模及び気候変動規模においても、1/10規模と同様な傾向が見られるが、R1・R2の増加額がL2・L3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加している。つまり、現況（ケースA）の方が有効であることが分かった。

d) 浸水許容条件を設定した場合の遊水機能の分析・評価

遊水機能を保全することは、一方で氾濫による被害リスクが存在し続けてしまうという側面もあるため、例えば、地域の合意形成等において、大きな課題となることも考えられる。

そこで、「宅地の被害を皆無にするとともに、田畑の被害リスクを最低限に抑える」ことを目標としたケース設定（ケースC）を行い、3と同様の分析を行った。

具体的には、北太田地区の輪中堤のかさ上げに加え、田畑が存する区域に対しては、土地改良事業計画設計基準に基づき、「浸水深30cm以上が24時間以内」という浸水許容条件を満たすように排水路や樋門等を設定した。確率規模別の排水路、樋門の設定条件を図-Ⅱ.1.1.1.19に示すとともに、ケースB、C間の比較分析（被害額の増減比）を行ったものを図-Ⅱ.1.1.1.20に示す。

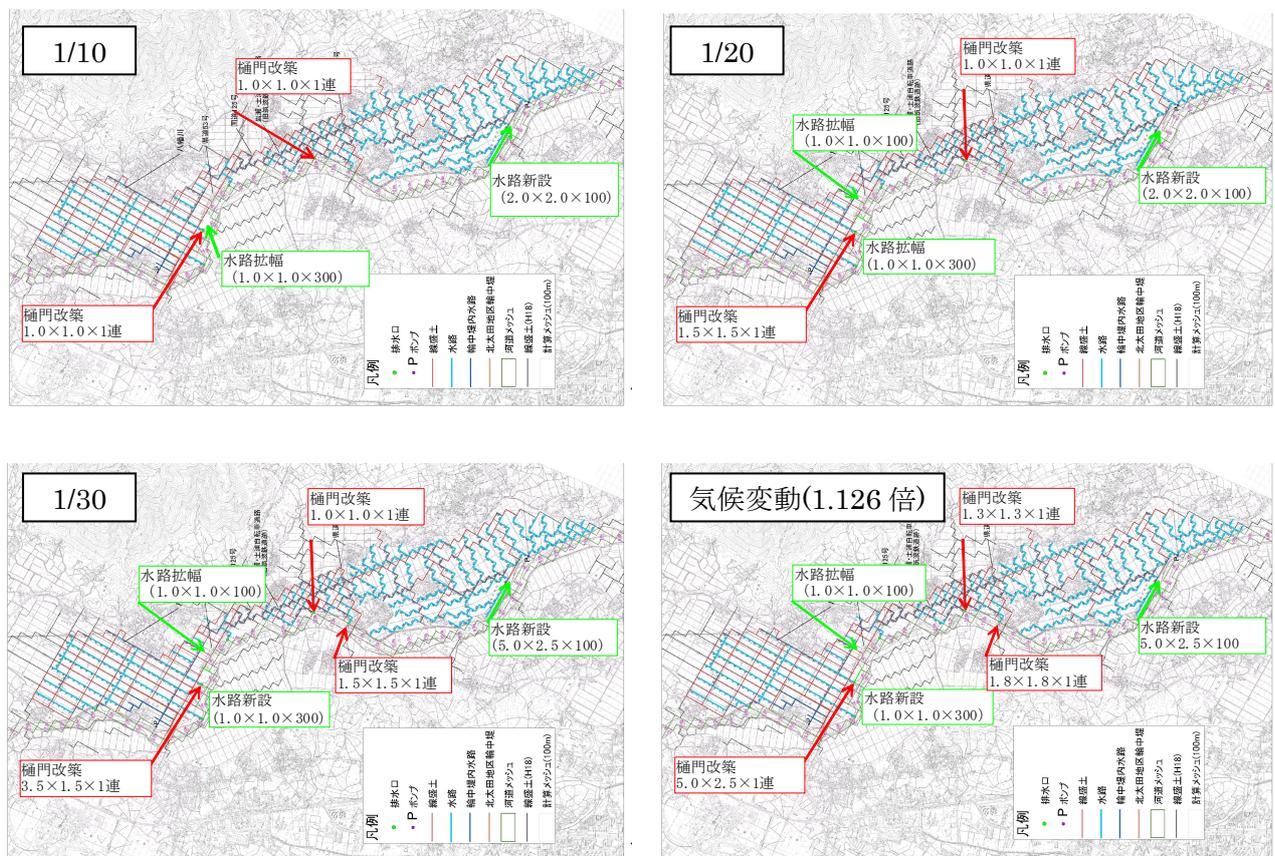


図-Ⅱ.1.1.1.19 ケースCの設定条件

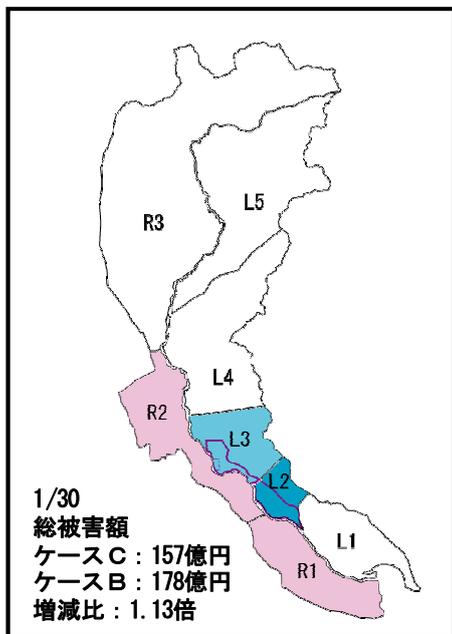
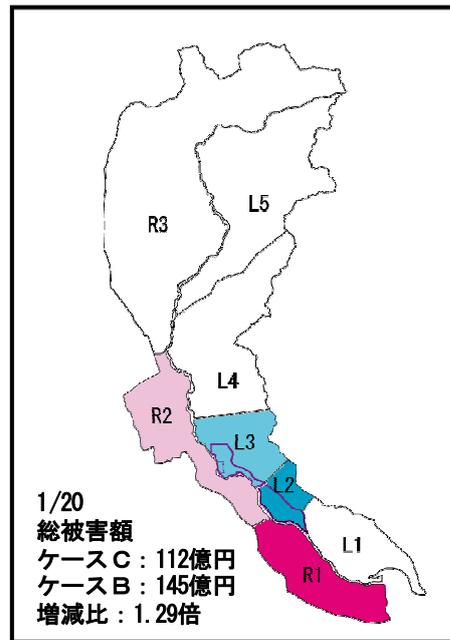
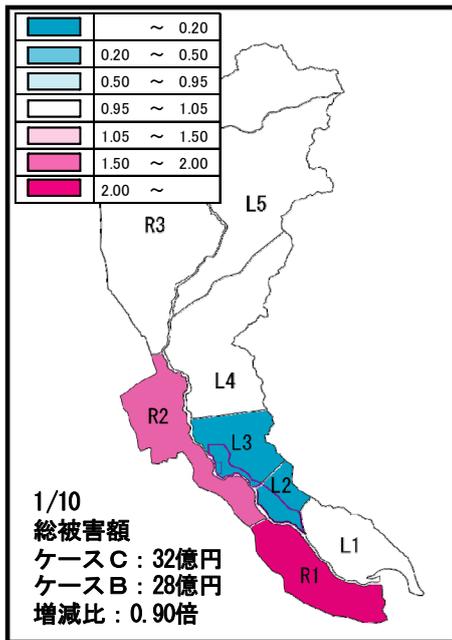


図-Ⅱ.1.1.1.20 氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースB／ケースC）

図-Ⅱ.1.1.1.10より、現状の治水安全度と同等の1/10規模では、R1・R2で被害額が増加しているが、L2・L3の減少額が大きいので、流域全体としては被害額が減少しており、連続堤整備（ケースB）の方が有効であることが分かった。

また、1/20規模、1/30規模、気候変動規模においても、1/10規模と同様な傾向が見られるが、R1・R2の増加額がL2・L3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加しており、連続堤整備（ケースB）より浸水許容条件設定（ケースC）の方が有効であることが分かった。

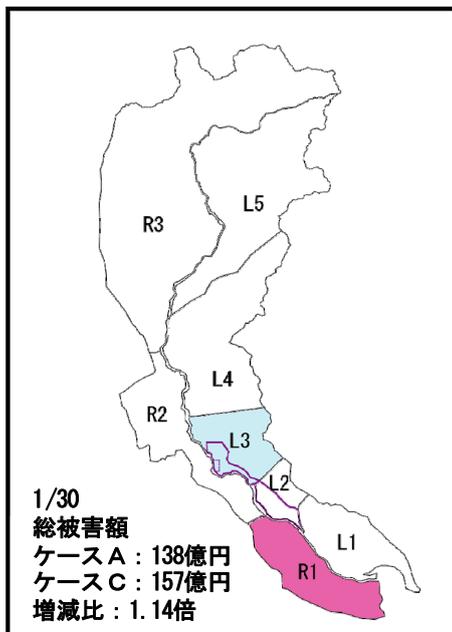
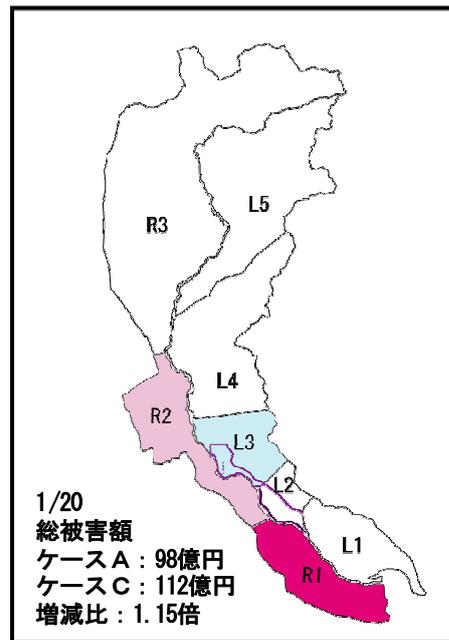
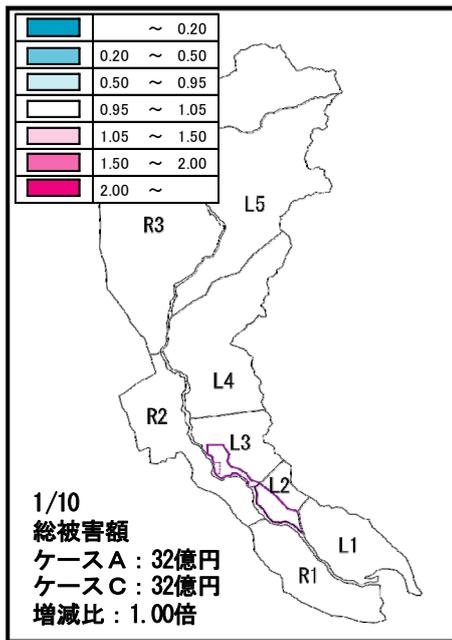


図-Ⅱ.1.1.1.21 氾濫ブロック別の被害額増減比（ケースC／ケースA）

さらに、ケースA、C間を比較分析（図-Ⅱ.1.1.1.21）してみると、1/10規模においては、流域全体及び氾濫ブロックごとの被害額が同程度となっている。この要因としては、浸水許容条件として設定した排水路等が、結果として、河道のピーク流量を軽減するバイパスの機能を果たし、L1やR1・R2へのリスク転嫁がなされていないことによるものである。

なお、1/20規模、1/30規模、気候変動規模においては、図-Ⅱ.1.1.1.20の傾向と同様に、R1・R2の増加額がL3の減少額を上回っているため、流域全体としては被害額が増加しており、浸水許容条件設定（ケースC）より現況（ケースA）の方が有効であることが分かった。

e)まとめ

以上より、1/20、1/30並びに気候変動規模の降雨に対しては、北太田地区の遊水機能の保全により、流域の総被害額が軽減されることが確認できた。

一方で、気候変動適応策としての有効性・実現性の検証を進める上では、外力設定について課題が見出された。具体的には、気候変動による降雨の変化率は、各気候モデルにより異なるとともに、想定された変化率を超える超過外力も発生する可能性もある。さらに本研究では降雨波形は現治水計画に基づく1波形のみの検討に留まっている。

従って、将来予測の不確実性への適応度を評価するためには、より高解像度化された最新の気候モデルによる計算結果を採用するとともに、例えば、複数の降雨波形を設定するなどし、外力の設定ケースを可能な限り増やした上で検証をさらに積み重ねる必要がある。

1.1.2 沿岸環境の変化現況と気候変動に向けた外力設定

1.1.2.1 はじめに

沿岸の外力は、潮位（水深、海面高さ）、波浪、地形によって決定される。これらは、相互的な関係となっている。本項では、気候変動によって一次的に影響を受ける潮位と波浪について、変化傾向もしくは兆候を把握し、近い将来に向けた外力設定の方向性を検討することが狙いである。

海面高さの変化は、海岸構造物の性能、砂浜の侵食、河川の出発水位、塩水の土壌侵入、サンゴ・有孔虫の生息域等の様々な分野に影響を及ぼす重要な現象である。特に、気候変動への適応を考慮した海岸保全施設等の計画・設計を導入しようとする際に、現在まで(既上昇量)と将来へわたる海面上昇量を設定することは避けて通れない。海面の上昇量については気象庁による値が出ているが、事業への反映においては全国一律設定を基本とし沿岸毎の違いによる修正とするのが妥当である。これには、各沿岸の海面変化を把握するために潮位データをより綿密に補正しつつ大胆な設定を設けた解析が必要である。その際、各験潮場のデータを扱うと地盤変動の除去という大きな課題が生じた。

波浪の変化は構造物の安定設計に関わるだけでなく砂浜の漂砂環境にも関わる影響である。波浪は、主として風を起源として生じるがその風は季節風や台風等と発生原因が多様で発生位置も同時多発的で面的に生じることから、ある地点で観測される値は統合的であるとも平均的であるとも言える。このため、兆候をいかにして捉えるかが課題であった。

地形の変化としては、砂浜の侵食と考えられる。砂浜の侵食は、沿岸の外力である海面高さや波浪が作用した結果であるが、海岸構造物にとっては砂浜の侵食により前面水位や砕波点から構造物までの距離が減る等の条件変化となり設定外力の変化の原因となる重要な要素である。しかしながら、砂浜の地形変化の予測は、気候の変化が生じないとした現在においても、過去の変形をお手本とするモデル化による手法が採られている。同時に実態把握として気候変動の影響を既存の地形モニタリング情報から得ることは難しい。したがって、砂浜の地形変化については、種々の外力変数が変化の中で将来の砂浜がどのように変化するかを解析的に予測することは困難であるのが現状である。砂浜の地形変化については、本研究では当面は直接扱わないこととされている。

また、海岸構造物の計画・設計との外力の変化の関係を模式的に示したのが、図-Ⅱ.1.1.2.1 となる。それぞれ、海岸法政令で示された項目によって表現している。地形の変化は、構造物前面の水深が変化することとなり構造物へ作用する外力を変化させるが、煩雑となること、増加と減少の両方の可能性があることからこの図には表現していない。

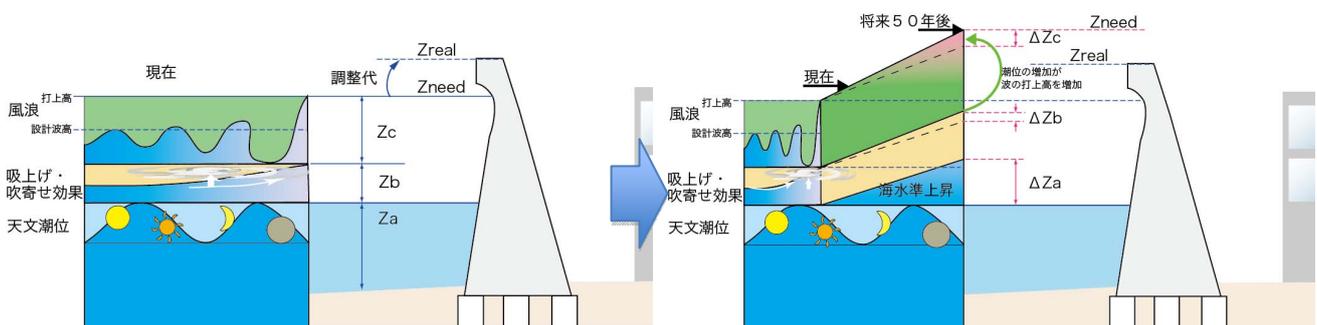


図-Ⅱ.1.1.2.1 気候変動と海岸保全施設（海岸堤防）の設計要素への影響の考え方

1.1.2.2 及び 1.1.2.3 では潮位の変化モニタリングについて、図-Ⅱ.1.1.2.4 では波浪の変化モニタリングについて、1.1.2.5 ではこれらのまとめとして記述する。また、巨大なエネルギーを持ち、大きな災害をもたらす高潮の予測については、第2章 2.1.4 に記述する。

1.1.2.2 験潮場・検潮所の観測データの補正と海面変動の状況

日本沿岸の海面水位は、験潮場および検潮所によって観測されている。験潮場は海面を一定として地盤の変動を観測するために、検潮所は潮位の変動を観測するために設置されている。したがって、国内のどの験潮施設も地盤の変動を除去しなくては海水面の変化を求めることは出来ない。そこで、本研究では、平均海面高さについて岩崎ら（2002）に倣った手法による地盤変動を除去した中長期の験潮場データの解析を行っている（野口ら 2010）。岩崎らとの違いは、岩崎らが独自に全国の水準網の解析を行わざるを得なかったのに対して本研究では「2000 年度平均成果」（国土地理院 2003）を用いることが出来た点である。図-Ⅱ.1.1.2.2 は、1906 年に観測が開始された輪島における東京中等潮位に対する観測基準面の変化を示したものである。この図から地盤面が大きく変動していることが分かる。これを除去して潮位の変化として解析したのが図-Ⅱ.1.1.2.3 である。

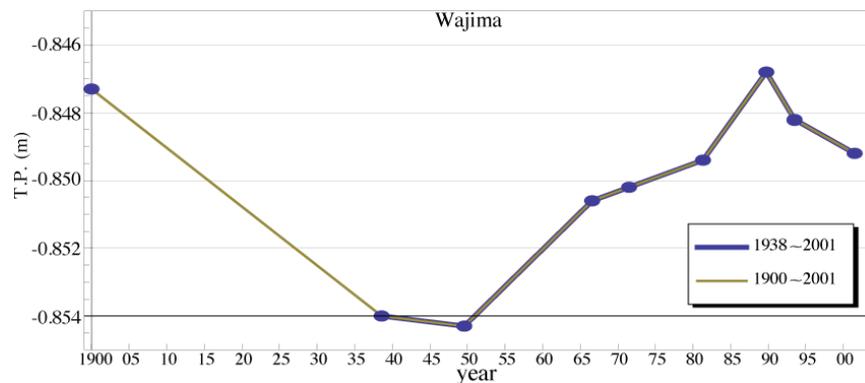


図-Ⅱ.1.1.2.2 輪島験潮場の観測基準面の変化（T.P.基準）

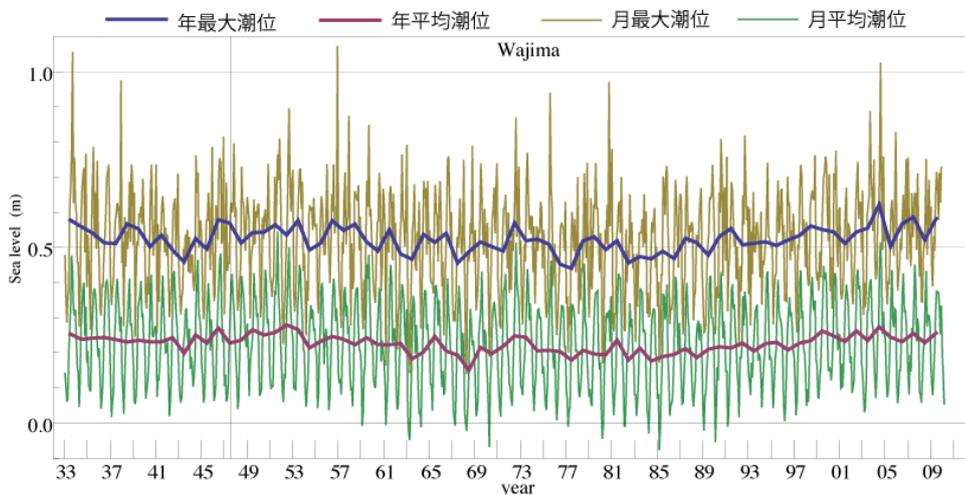


図-Ⅱ.1.1.2.3 観測基準面変化補正後の潮位変動（輪島験潮場）

全国 151 験潮場から 14 験潮場を選定し詳細な解析を行った。各験潮場の状況を表-Ⅱ.1.1.2.1 に示す。長い期間（40 年を目安）のデータを活用できる験潮場を抽出した。ただし、洲本については球分体から取付け水準点までの比高値の変化にばらつきが多く、安定的な期間を十分に確保できず地盤補正後の海面上昇量の算出を断念した。このように、取付水準測量の経緯を追うと水準網では海面上昇を追うにはばらつきが大きすぎる箇所が存在する。これに対して導入されているのが電子基準点であるが、その期間は短く既上昇量の算定には使えない。ただし、2000 年成果とそれ以前ですりつかない箇所、近年の変化量を電子基準点を用いることで外挿することは可能である。その場合でも電子基準点データ自身の

ばらつきが多く平均値を用いて標高を求めることになる。

表-Ⅱ.1.1.2.1 詳細解析を行った験潮場・検潮所のデータ連続性の状況

番号	験潮場名	所属	観測開始年	験潮場移設(最近年)	球分体再投	その他変更	設置以降年数	毎時データの開始年次	データ解析最終年	解析可能年数	地盤変動調整後の解析年数
1701	忍路	国土地理院	1905	1963			95	1933	2009	46	76
1605	浅虫	国土地理院	1954				46	1954	2009	55	55
1603	柏崎	国土地理院	1955		2007	新潟県中越沖地震	45	1955	2007	52	52
1602	輪島	国土地理院	1894	1938	1986	水準点再投	106	1933	2010	24	77
1401	海南	国土地理院	1953				47	1954	2009	55	55
1403	細島	国土地理院	1894		1936	当初検潮儀へ取り付け	106	1933	2009	73	76
2304	岡田	気象庁	1953		1961	1986噴火のため地盤不連続	47	1963	2009	48	46
2401	串本	気象庁	1895		1961		105	1961	2009	48	48
2405	洲本	気象庁	1936		1995	兵庫県南部地震水準点移転	64	1965	1995	30	—
3702	大湊	海上保安庁	1952		1972		48	1952	2008	36	56
3401	呉	海上保安庁	1962		1985	1957-1961欠測	38	1952	2008	23	56
3402	徳山	海上保安庁	1950	1968			50	1950	2008	40	58
3503	巖原	海上保安庁	1947	1984			53	1947	2008	24	61
3405	西之表	海上保安庁	1965				35	1965	2008	43	43

各地点のデータについて朔望平均満潮位、平均潮位、冬季平均潮位、台風期平均潮位を算出し、各年の値に対して Mann-Kendall 分析を実施した。ここで、Mann-Kendall 分析は正方向のトレンドか負の方向のトレンドかしか解が得られないので、割合についてはその期間の全データについて一次回帰により変化量を求めた。Mann-Kendall 分析でトレンドを有しないと判定が出た場合には変化量は 0 とした。また、1970 年代後半から地球温暖化の影響が現れていると言われている。このことから 1980 年を地球温暖化の影響が顕著となる期間の境としてその前後についても算出した。年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.4、朔望年平均満潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.5 に示す。岡田を除いて全ての験潮場で年平均潮位、朔望年平均満潮位ともに 1980 年以降は上昇に転じている。ただし、岡田、西之表、巖原はともに離島に設置された験潮場である。離島のため、基準点が移動しているのか、験潮場が移動しているのかの判定は不可能である。各図には、年間 3mm 上昇を破線で入れている。多くの験潮場で 1980 年以降に年間 3mm 程度の上昇が確認できる。

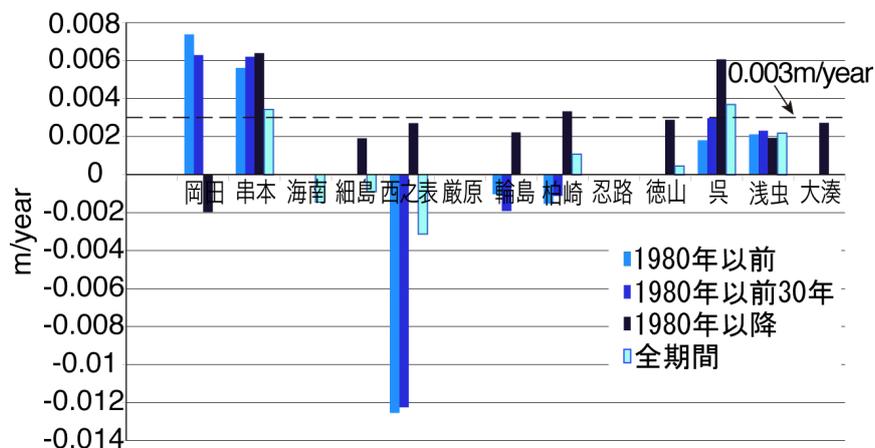


図-Ⅱ.1.1.2.4 年平均潮位

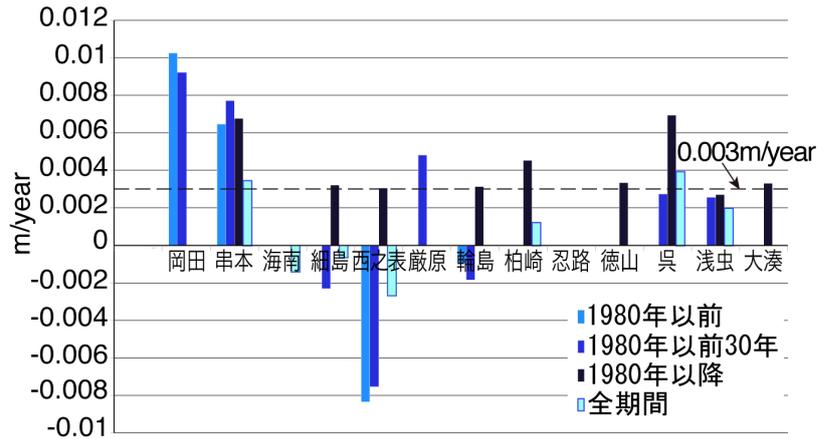


図-Ⅱ.1.1.2.5 朔望年平均満潮位

季節毎の変化を見るために、冬季毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.6 に台風期毎年平均潮位変化を図-Ⅱ.1.1.2.7 にしめす。どちらについても年平均潮位変化と比べて、季節特有として上昇が生じているようには見られない。年間を通じた傾向であることが分かる。ただし、細島については太平洋側に相当するにもかかわらず、冬期に上昇し台風期に上昇が認められない。この点については不明である。

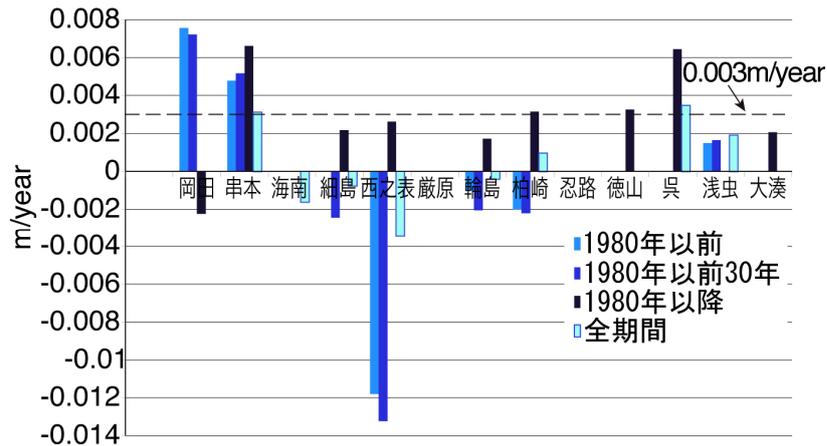


図-Ⅱ.1.1.2.6 冬期毎年平均潮位

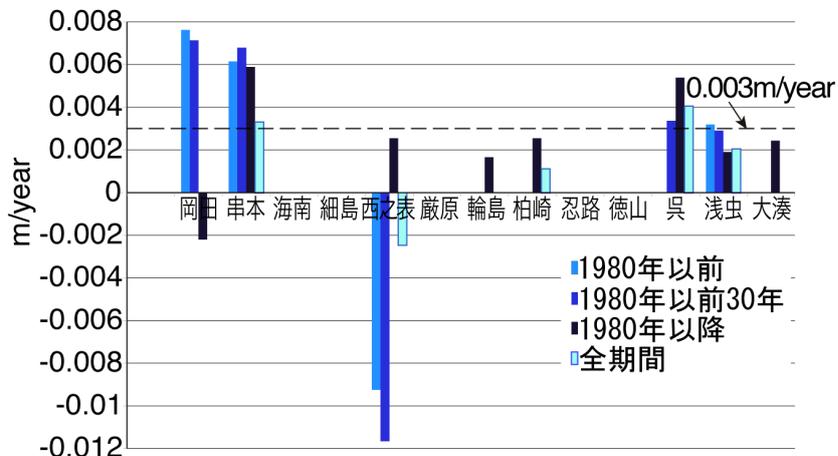


図-Ⅱ.1.1.2.7 台風期毎年平均潮位

1.1.2.3 衛星海面高度計による海面変動の把握

東日本大震災を引き起こした 2011 年東北太平洋沖地震が象徴するように、近年の我が国周辺は地殻の激しい変動期となっている。一方で、全球の海面上昇予測の側面においても、局所的な変化予測は森ら (2011) が示しているように日本海域でばらつきが大きく一定の議論がしにくい状況である。そこで、海面上昇による災害リスクを考える際には現状を正しく把握し、予測計算値を参照しつつ当面の間はその変化が短期的な将来で継続すると仮定して施策を決定せざるを得ない。本報告では、衛星海面高度計による沿岸部の観測期間 (野口ら 2010) に近年のデータを追加するとともに離島部に関する解析結果を示す。

衛星海面高度計とは、TOPEX/POSEIDON、JASON1、JASON2 とは、NASA 及び CNES による海洋観測ミッションで打ち上げられた衛星に搭載されたレーダー高度計データでありデータセットを衛星の名称で呼んでいる。いずれも約 10 日の観測周期で全球における海面高度データを取得している。海面高度の測定精度は最も古い TOPEX/POSEIDON については 4~5cm、最新の JASON2 では 2~3cm 程度と想定されており、近年打ち上げられた JASON2 の方が、精度が向上している。1992 年に TOPEX/POSEIDON が打ち上げられてから現在に至るまで、約 20 年分の海面高度データがデータベースに蓄積され、NASA のホームページ等で公開されている。

JASON1 及び JASON2 の海面高度偏差のデータには、観測機器等の問題により、一定のバイアスが付加されていることが報告されている。そこで、NASA 等による資料 (2011) を参考に、JASON1、JASON2 の海面高度偏差データにそれぞれ -9.1cm、-17.2cm を加えることでバイアスの影響を除去することで解析を実施した。一方、TOPEX のデータにも、観測機器等の問題により、60 日周期の変動成分が混入していることも報告されている。しかし、本検討では長期的変化に着目して検討を行うため、このエラーが解析結果に与える影響は小さいと考え、これに対するバイアス除去を行わずに検討を行った。初めに、沿岸部に測定点を設定してそれらの測定点の平均値を区分毎の値とした。図-II.1.1.2.8 に示すように日本周辺の海域を 5 つに区分した。

図-II.1.1.2.9 に沿岸測定点の海域毎に平均した場合の衛星 1 公転周期 (約 10 日) 毎とそれから得られた年平均の海面高さの変化を示した。海域 C における 2002 年から 2004 年に見られる数値の特異な上昇が生じている。

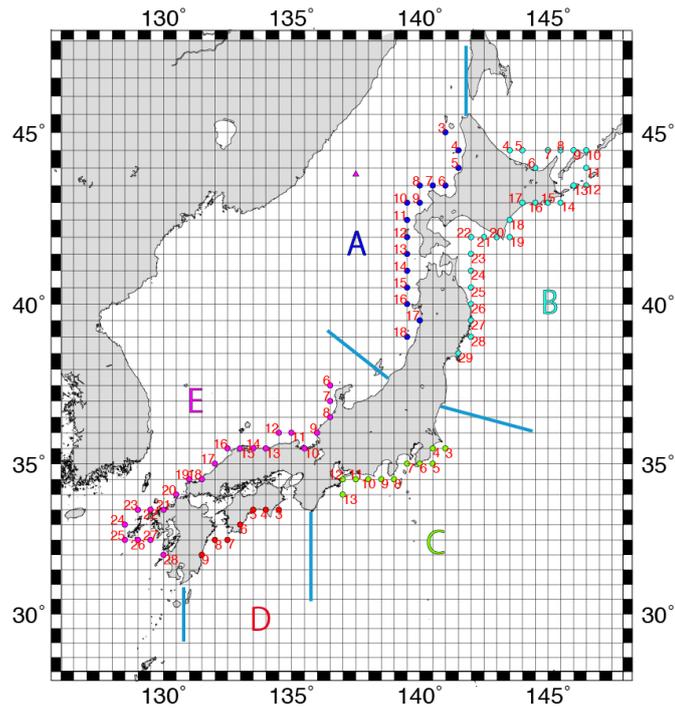


図-Ⅱ.1.1.2.8 衛星海面高度計の解析結果から沿岸部の海面上昇値を調べるための測点配置

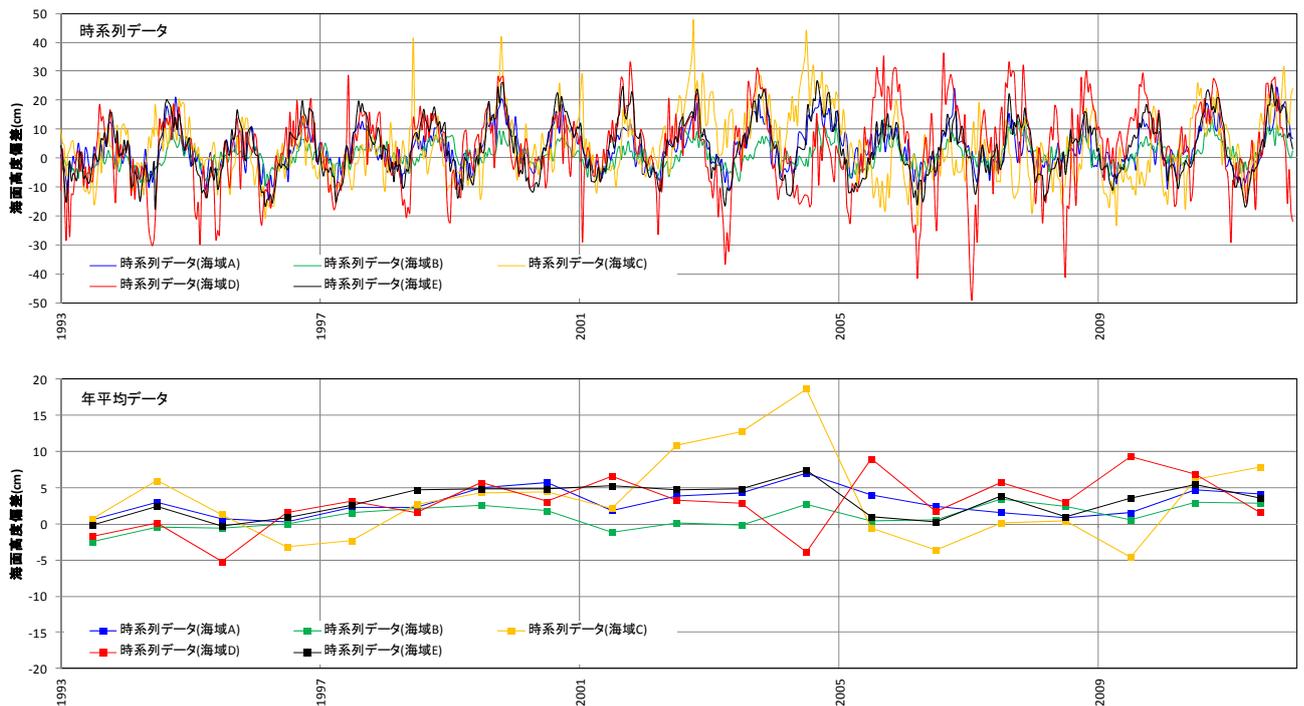


図-Ⅱ.1.1.2.9 沿岸の測定点を沿岸毎に平均した観測時系列値と年平均値

次に、平均する範囲を海域まで広げて上昇量を解析した。図-Ⅱ.1.1.2.10 に各海域の設定範囲を示す。黒潮の蛇行が海域の上昇値とならないように、海域CとDは黒潮領域を含むように設定した。

沿岸測定点の解析では陸域の影響が生じている可能性があり、海域まで平均する範囲を広げて上昇量を解析した。黒潮の蛇行の範囲を網羅できるように、海域CとDは黒潮領域を含むように設定した。図-Ⅱ.1.1.2.11に海域平均の経年変化を示す。海域Cと海域Dは大きく変動しているが、図中の黒潮の最南

下緯度の変動と連動していることが確認できる。一方、沿岸測定点（図-Ⅱ.1.1.2.9）の経時変化と比べると沿岸測定点の経時変化では沖合で生じる海面低下の影響を受けていない。黒潮接岸時には高くなるが、蛇行時に生じる冷水渦は沖に生じることから影響が小さいことが現れている。

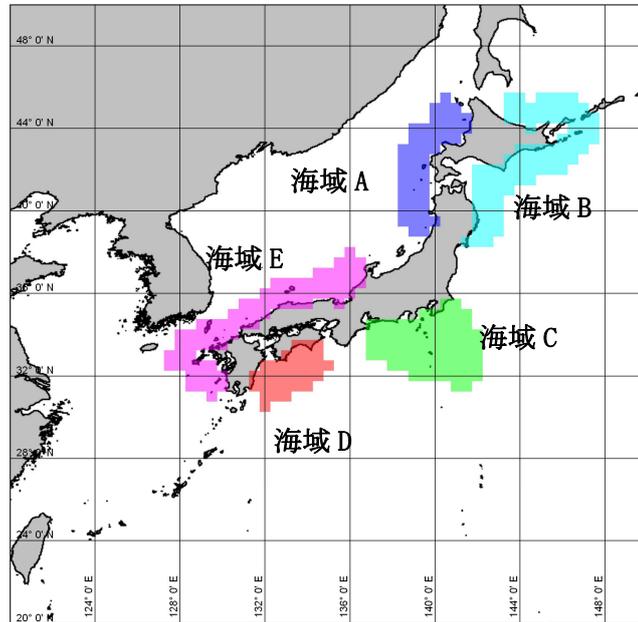


図-Ⅱ.1.1.2.10 海域毎の海面上昇値を求めるための区分(海域CとDは黒潮領域を含むように設定した)

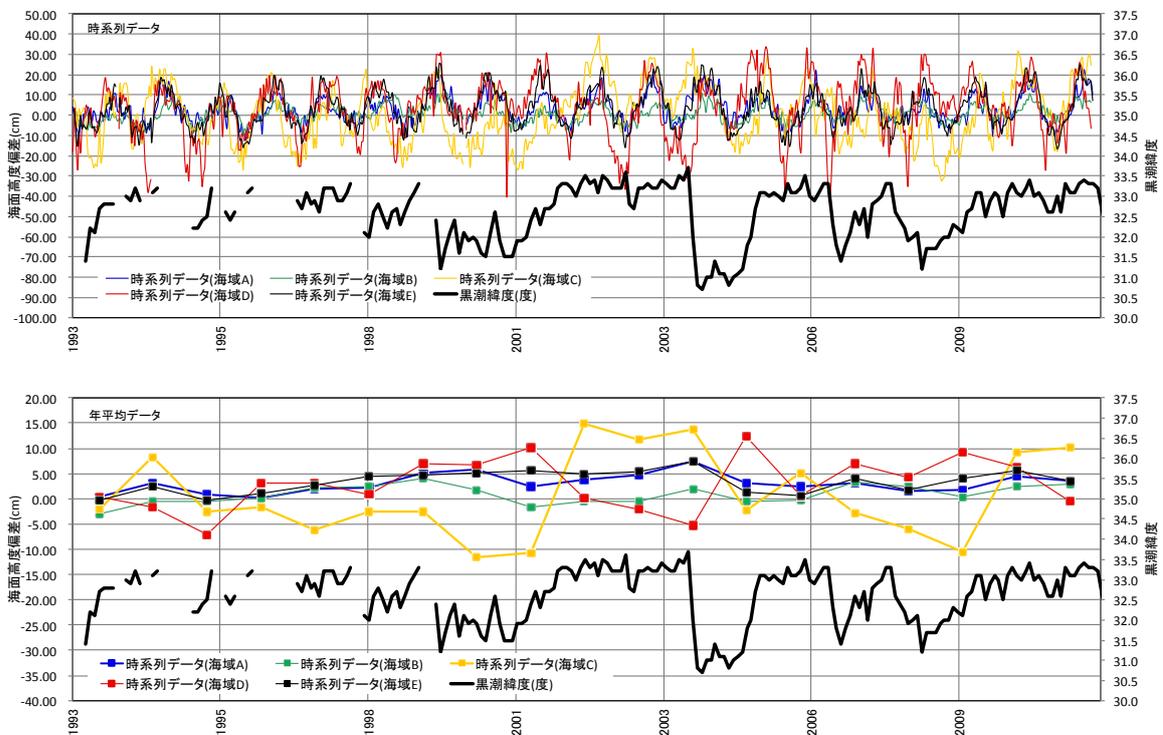


図-Ⅱ.1.1.2.11 衛星海面高度計による海域の海面高さの経時変化

海面高さの変化に関する気象庁の見解は、日本近海では十数年変動が卓越していることから海面上昇

傾向が見られないとしている。しかし、IPCC の 3mm/年は時空間的な平均値であることから何らかの傾向を抽出できるはずである。厳密には周期的変動を除去した後の上昇量を評価すべきであるが、衛星公転周期毎の海面高さの経時変化から単純に一次回帰により変化量として図-II.1.1.2.12 にまとめた。但し、Mann-Kendall 分析により傾向の判定を行い有意な傾向がないと判定された場合には変化量は 0 とした。沿岸と海域では、全体として沿岸部の方が大きな値となっており、海域 D において 1mm/年の違いがある。海域 C と海域 D は全球平均の 3mm/年とほぼ同じになっている。

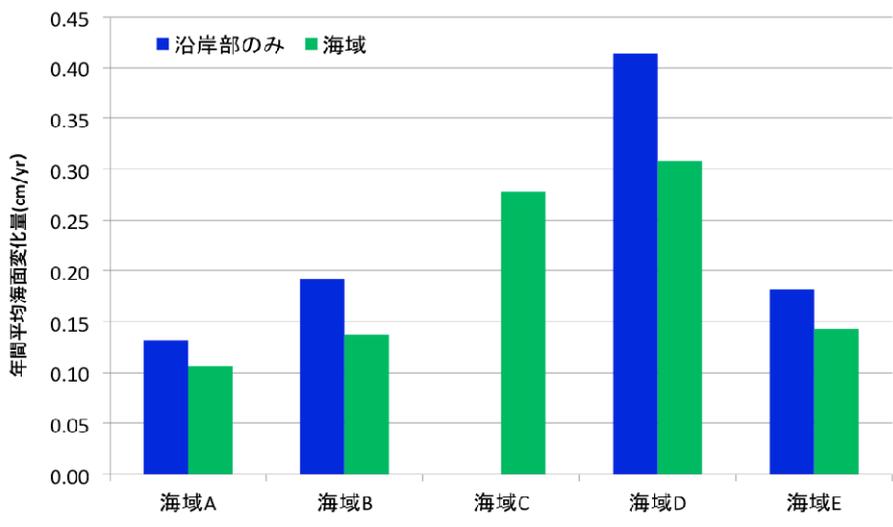


図-II.1.1.2.12 衛星海面高度計による海域別年平均海面上昇量

離島部の海面上昇量の把握には、1.1.2.2 に示した列島との水準網と接続した解析ができない。したがって、電子基準点を用いることが考えられるが、電子基準点の設置年数も十分出ない。このため、衛星海面高度計による把握しかないとと言える。そこで、主な 11 の離島について衛星海面高度計により変化量を解析した。図-II.1.1.2.14 に南西諸島では全球平均の 3mm/年と同等以上の値となっている。沖ノ鳥島、南大東島、種子島については、Mann-Kendall 分析によりドレンドを有しないと判定されたことから変化量は 0 とした。

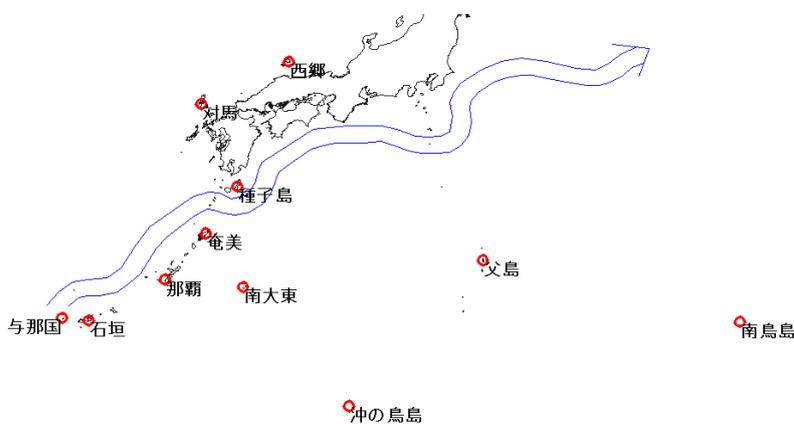


図-II.1.1.2.13 解析を行った離島の位置

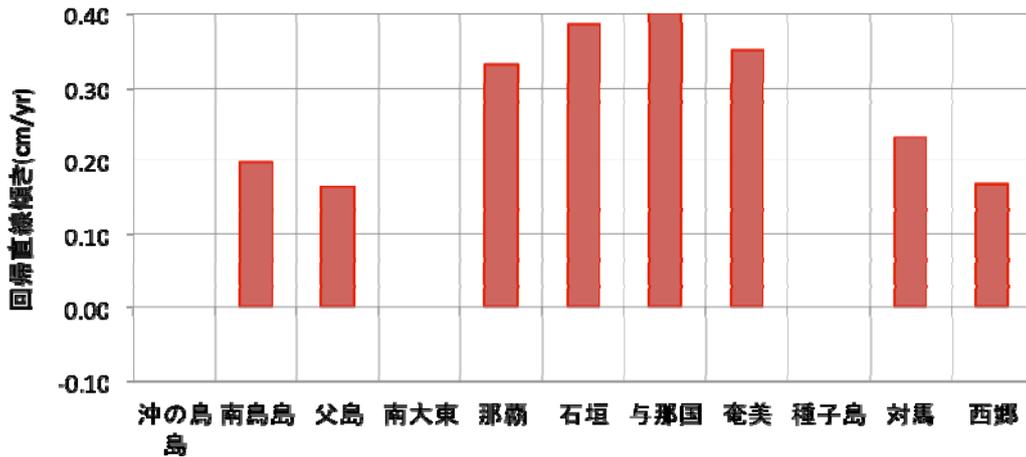


図-Ⅱ. 1. 1. 2. 14 衛星海面高度計による離島の年平均海面上昇量

1. 1. 2. 4 海象観測所データの解析による沿岸波浪の変化

気象が海象を形成するので海象は、そこに来襲する波の発生源の気象現象の積算結果と言える。そこで、本研究では日本周辺の海象を特徴付ける台風・低気圧の移動特性により区分した。台風の経路と日本列島の形状を考慮し、6つの領域に区分した(図-Ⅱ. 1. 1. 2. 15)。南北に2つに区分する線として関東地方から中国地方を縦断する北緯 35 度線を用いた。東側として東北地方と伊豆諸島付近を通過する東経 140 度線を、西側を分けるものとして朝鮮半島から沖縄本島を通過する東経 128 度線により区分した。これにより縦の3列は台風の通過時期や経路の違いを反映でき、南北の2行により低気圧の経路を反映できる。

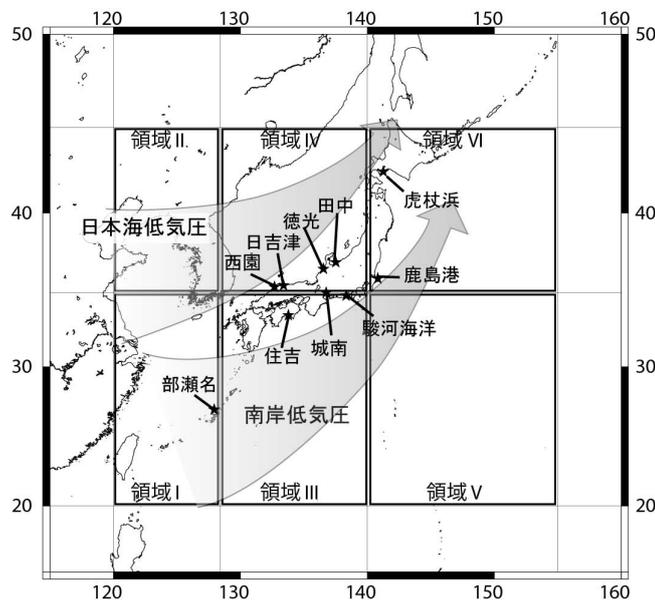


図-Ⅱ. 1. 1. 2. 15 気象外力による日本沿岸の区分

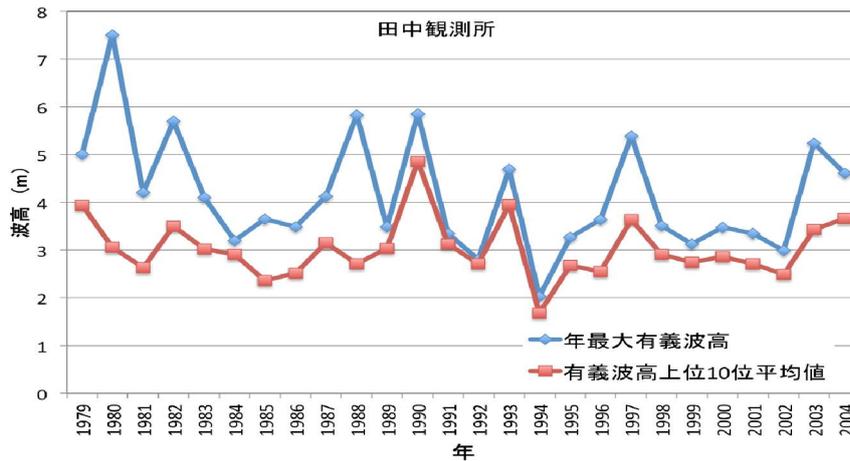


図-Ⅱ.1.1.2.16 田中観測所における年最大有義波高、年上位10位の平均値の変化

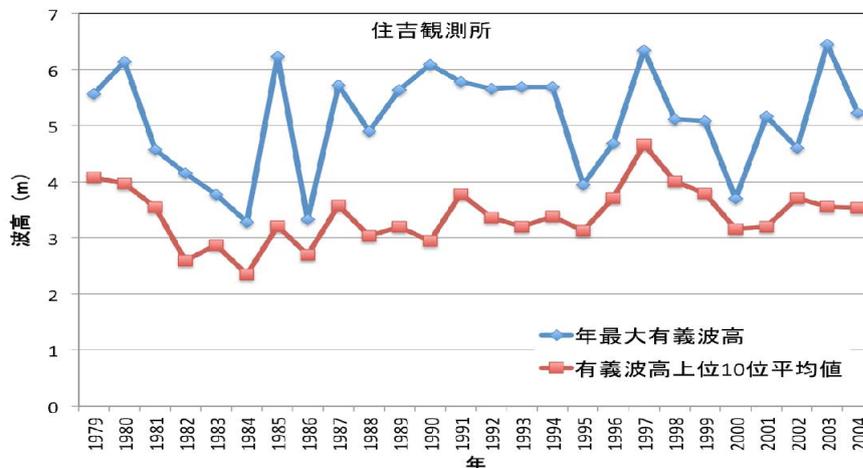


図-Ⅱ.1.1.2.17 住吉観測所における年最大有義波高、年上位10位の平均値の変化

災害発生の再起性を検討する場合には年最大波高から再現の確率年を求める。しかし、これは気象環境が変化しないことを前提条件としており、その条件下で発生する確率を議論するためのものである。さらに、ある年の最大値を以てその年の波浪の概況を代表しているとは言い難い。ここで、2つの代表的な観測所の年最大有義波高と有義波高年間上位10位の平均値の経年変化をまとめたものを図-Ⅱ.1.1.2.16および図-Ⅱ.1.1.2.17に示す。

これらから、年最大有義波高が沿岸波浪の変化概況を示すものと見ることは出来ないことがわかる。また、波高だけの議論では波浪の重要な諸元である周期(波長)について考慮されないことになる。そこで、気候変動による外力の変化を検証しようとする場合には工夫が必要となる。本研究では、長期間のデータが整っている海象統計の波高周期結合頻度表を用いることにした。これは、毎正時に観測した有義波を用いて整理されている。波浪の概況のパラメータとして、結合頻度表の閾値により選択される波高と周期の対についてそれぞれ一波とした時のエネルギーフラックス(H^2T として)を算出して頻度を乗じ、総和をその年のエネルギーフラックスとした。閾値としては、波高、周期、エネルギーフラックスに関して設定した。波高とエネルギーフラックスに関しては1990年から4年間のエネルギー平均波の波高またはエネルギーフラックスの平均値を、周期に関してはうねり性とされている8秒を閾値とした。

これによる経年変化を示したのが図-Ⅱ.1.1.2.18である。日本海に面する徳光、西園の両観測所では、近年来襲する波浪エネルギーが増大していることがわかる。また、田中観測所においても若干の増加傾向がうかがえる。一方、日吉津観測所では大きな変化が見られない。これは、徳光、西園の両観測所は

ともに西に開いた海岸に面するが、田中・日吉津の両観測所はそれぞれ能登半島と島根半島の遮蔽域となっており地形的な特徴による。領域 III に位置する駿河海洋、城南、住吉の各観測所では、高波浪の来襲エネルギーが増大している。

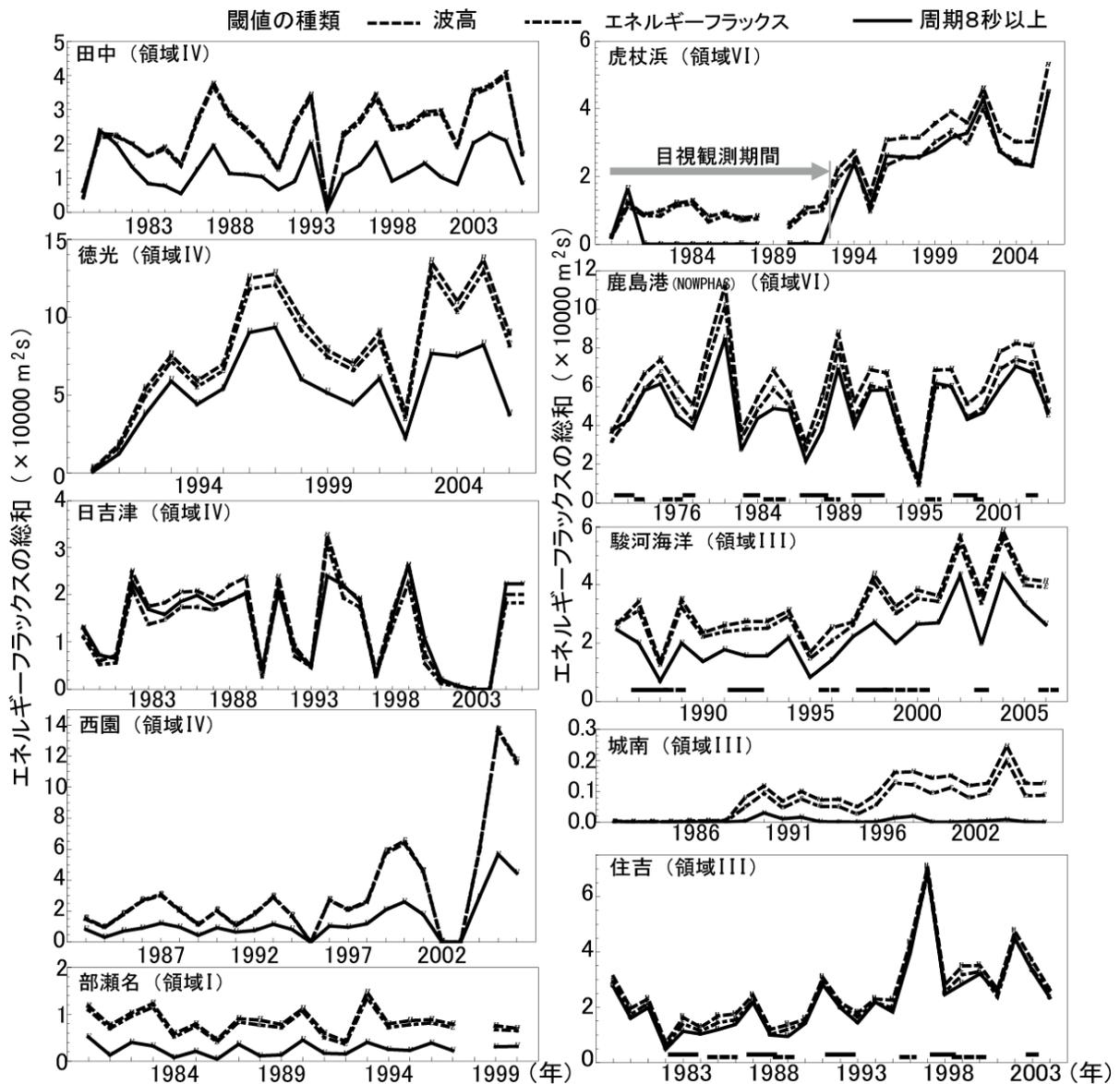


図-Ⅱ.1.1.2.18 閾値設定による波浪エネルギーフラックスの経年変化

次に波浪に影響を与える気象場の変化を見てみる。停滞する冬型の気圧配置や前線等の影響も無視できないが、ここでは天気図から数値化しやすい台風および低気圧を対象として解析した。我が国では1883年より天気図が作成されているが、すべての天気図に緯度線と経度線が表記されるようになったのは1915年からである。そこで、1915年から2007年1月までの印刷天気図を収集し、北緯20度～北緯46度、東経122度～東経153度の範囲で中心気圧が990hPa以下となった台風を含む低気圧を抽出し、中心気圧や位置のデータベースを作成した。なお、1951年以降の台風についてはベストトラックデータを使用した。中心気圧は1hPa単位、中心位置の緯度経度は1度単位とした。1958年8月以降は、現在の印刷天気図形式となっているが、低気圧や台風の中心位置や中心気圧が表示されたのは1965年11月からである。それ以前のものについては、閉じた等圧線の中心付近を中心位置とし、中心気圧は閉じた等圧線の一番低い等圧線の値とした。したがって、1965年以前と以後ではデータ精度が異なることに注意が必要

である。また、台風は天気図上や概況分に中心気圧が表記されている場合はその値を採用した。ただし、初期の天気図では、何mm Hg 以下と表現されているので、その値を中心気圧とした。作成した低気圧データベースでは、1996年以降、天気図の時間間隔が6時間となっており、それ以前は12時間である。

このデータベースから図-Ⅱ.1.1.2.15 で区分した領域毎に台風・低気圧の通過数の経年変化(図-Ⅱ.1.1.2.19 左)とその通過した台風・低気圧が領域内に滞在した時間の年間総計を示した(図-Ⅱ.1.1.2.19 中)。また、各領域を通過する台風・低気圧のその領域内での最低気圧を年毎に総和し平均をまとめた(図-Ⅱ.1.1.2.19 右)。変化も少なく日本への影響が無い領域Ⅱは省略した。

台風の発生域に近い領域Ⅰ、Ⅲ、Ⅴでは長期として見ると、近年は来襲数、滞在時間ともに上昇傾向がないように見える。しかし、図-Ⅱ.1.1.2.18 によると台風の影響を強く受ける領域Ⅲにある住吉観測所や駿河海洋観測所の来襲波浪エネルギーは上昇している。図-Ⅱ.1.1.2.19 (左)の領域Ⅲを詳しく見ると海象観測期間である1979年以降で台風数(左)は増加傾向にあり、通過台風の最低気圧の年平均値(右端)も大きな低下傾向にあり年々台風の勢力が強くなっていることを示している。さらに、1915年に比べ平均値で約40hPa 低下している。これが住吉、駿河両観測所の高波浪の増大として現れている可能性がある。

一方、図-Ⅱ.1.1.2.18における徳光観測所や田中観測所の増加傾向の原因は、図-Ⅱ.1.1.2.19の領域Ⅳから想定できない。しかし、領域Ⅵにおいて低気圧が来襲数、滞在時間ともに増加傾向にあり、2008年2月24日に生じたような大型の低気圧と付随して生じる気圧の谷が強化している可能性を示唆している。

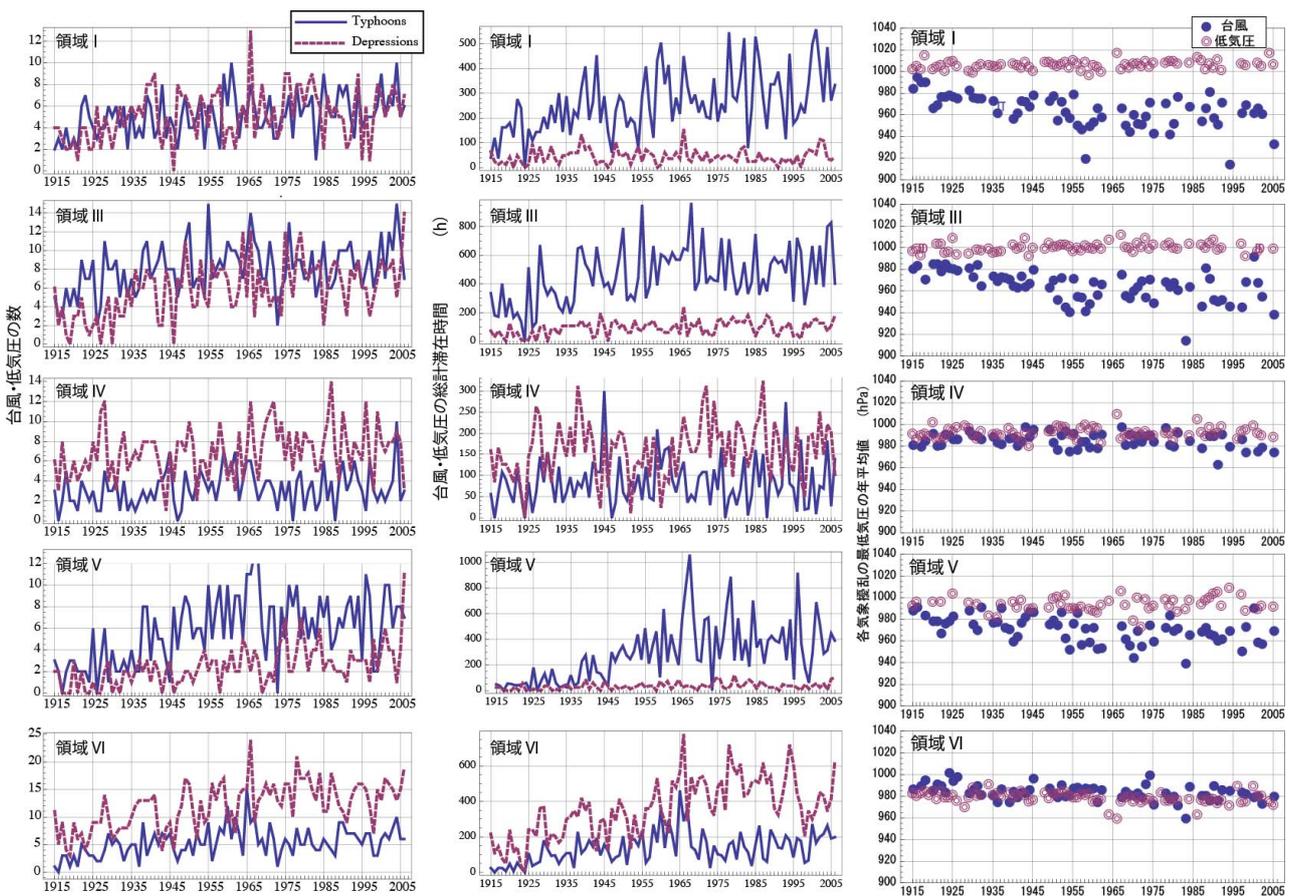


図-Ⅱ.1.1.2.19 台風・低気圧の各領域での通過数(左)、滞在時間(中)、通過期間の最低気圧の年平均値(右)

1.1.2.5 まとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

海面の上昇については、全国規模の既海面上昇量を設定した後に地先海岸毎に値を調整することを念頭に置いて、計画・設計に反映する既海面上昇量を決定するためのデータの解析法を検討した。その際に、科学的な各国合意として存在する最新の気候変動に関する政府間パネル第4次報告書(以下、IPCC AR4)において既上昇量として1993～2003年の間で全球平均として3.1mm/年が示されている。この値を我が国の政策決定時の既上昇量とするとして、沿岸毎に状況に合わせて増減することが妥当であるといえる。海面上昇予測計算は地域精度について問題があることから、特に日本海についてはモニタリングから得られる知見を拡張することが必要となる。黒潮流の影響を受ける南沿岸では、黒潮の将来変化も重要な海面高さ変化の要素となる。

波浪の変化については、異常潮位の傾向は太平洋岸・日本海側を問わず災害リスクが高まる状況があることが示された。また、波浪の原因となる強い風を発生させる停滞・発達する低気圧は、関東地方から北海道南東方で個数・滞在時間ともに、1915年～2006年の期間で増加傾向を示している。

1.1.3 XバンドMPレーダによる豪雨監視の強化について

1.1.3.1 XバンドMPレーダの導入の背景

近年、日本の各地で局地的な大雨や集中豪雨が多発し、それらに起因する浸水被害や水難事故が発生している。気象庁の報告（2007）によると短時間強雨や大雨の発生回数はここ30年間余りで増加傾向にあることが指摘され、1時間降雨量50mm以上の短時間強雨の発生回数は最近10年と30年前を比較して約1.5倍に増加している（図-Ⅱ.1.1.3.1）。日降水量400mm以上の大雨の発生回数についても約2.5倍増加している（図-Ⅱ.1.1.3.2）。また、東京大学など合同研究チームの報告（2004）によると今後の大雨の発生回数が地球温暖化の進行に伴って増加すると予測されている（図-Ⅱ.1.1.3.3）。平成20年度においては、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨（以下、豪雨と呼ぶ）により、石川県金沢市街地を流れる浅野川等や愛知県岡崎市街地を流れる伊賀川等が氾濫し、人的被害や床上浸水等の甚大な被害が発生した。また、兵庫県神戸市を流れる都賀川においては、豪雨による河川水位の急激な上昇により河川にいた5名が流され亡くなるという水難事故が発生した（土木学会2009）。

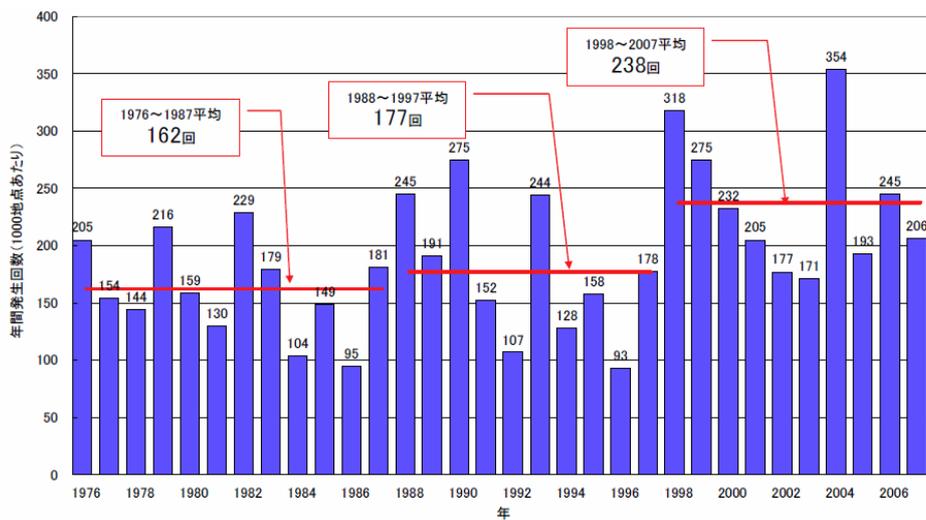


図-Ⅱ.1.1.3.1 1時間雨量50mm以上の降雨の発生回数

（出典：気候変動監視レポート2007より）

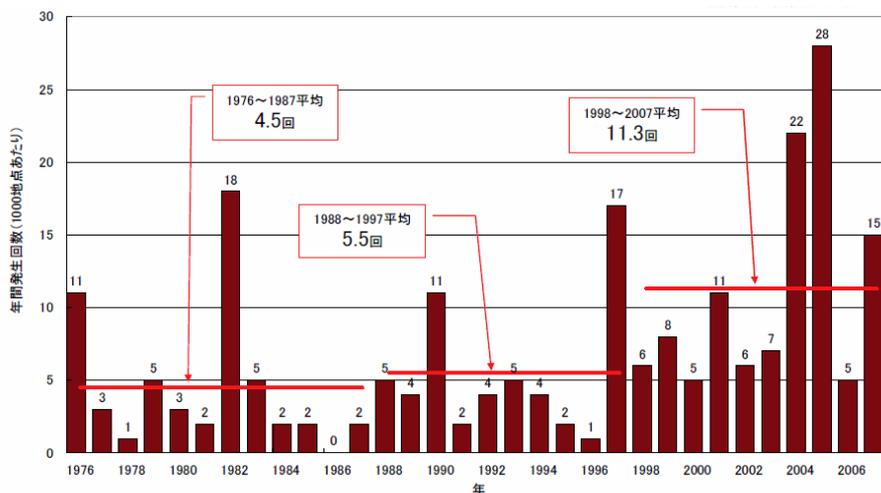


図-Ⅱ.1.1.3.2 日降水量400mm以上の降雨の発生回数

（出典：気候変動監視レポート2007より）

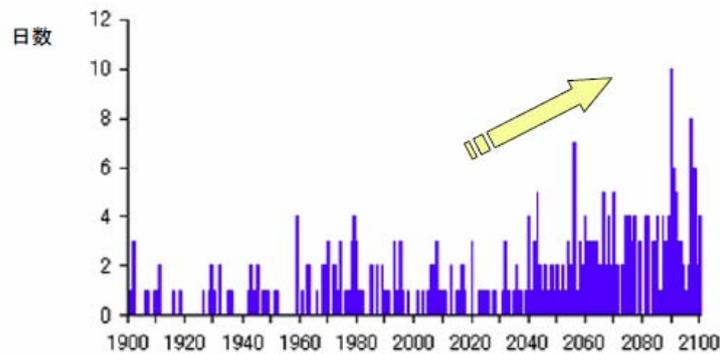


図-Ⅱ. 1. 1. 3. 3 日降水量 100mm 以上の降雨の発生回数

(出典：東京大学など合同研究チーム報道発表より)

こうした豪雨による災害対策のために豪雨の状況を的確に把握する事は重要であり、面的な雨量情報をリアルタイムに得ることができる気象レーダの有効性は高い。

国土交通省水管理・国土保全局は、昭和 51 年に赤城山に C バンド(約 5cm)の波長の電波を使用する気象レーダ(以下、既存レーダ)を設置して以来 26 基のレーダを配置し、雨量データを河川管理や一般向けの防災情報等に活用している (図-Ⅱ. 1. 1. 3. 4)。この既存レーダの面的分解能は、使用する電波の波長帯の関係から 1km メッシュ程度あり、台風や低気圧、前線といった面的スケールの大きい降雨を観測するには十分である一方、局地的な大雨や集中豪雨といった面的スケールが小さい降雨の観測には十分とは言い難い。また、既存レーダは、水平の偏波面を持った 1 種類の電波 (単偏波) を発射し、雨滴に当たって戻ってくる電波の強度(反射強度)を受信するのみの単偏波レーダである。反射強度のみによる雨量換算は様々な誤差要因の影響を受け、定量的な観測は難しいことが知られている (Bringi *et al.* 2001)。そのため、国土交通省はテレメータ地上雨量データを用いて既存レーダから算定される雨量の実時間補正を行っている。この補正に用いる地上観測雨量の観測間隔が 5~10 分間隔であることにより、既存レーダの雨量情報の配信が 5 分間隔となっている。地上雨量計を用いた補正を必要とする既存レーダは、補正処理の時間を必要とするために、配信時間に 5~10 分程度以上を必要とし、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を迅速に配信することが難しい。

既存レーダに代わる気象レーダとして、水平と垂直の偏波面を持った 2 種類の電波 (二重偏波) を送受信する二重偏波レーダの研究開発が、日本では 1980 年代に旧建設省土木研究所を中心に開始された (Yoshino *et al.* 1988)。C バンドの二重偏波レーダが、九州の釈迦岳、八本木、国見山に現業用レーダとして設置された (Matsuura *et al.* 1999)。

その後、S バンド (約 10cm)、C バンドの二重偏波レーダの技術革新が米国 (Alexander *et al.* 2005)、日本 (Nakakita *et al.* 2007) で進められた。また、X バンド (約 3cm) の二重偏波レーダ (X バンドマルチパラメータレーダ (以下、X バンド MP レーダ)) の研究開発が (独) 防災科学技術研究所を中心に進められ、レーダ技術の革新も伴い X バンド MP レーダの降雨観測精度の向上が図られた。防災科学技術研究所は、X バンド MP レーダを製作し (Iwanami *et al.* 2001)、雨量算定に関する研究 (Maki *et al.* 2005b)、雨量算定アルゴリズムの検証 (Park *et al.* 2005) (Iwanami *et al.* 2003) を経て、実用化に向けた観測 (Maki *et al.* 2005a) を行い、地上雨量計との補正を行わなくとも高い精度の降雨観測の可能性を示した。地上雨量計との補正が必要ないということは、地上観測雨量の観測間隔による制約を受けずに短い間隔で観測をすることが可能であり、また、キャリブレーションに要する時間がないことから、観測直後に降雨情報の配信が可能となり、短時間に急激に成長や衰退をする豪雨を時々刻々と捉えることが可能である

ことを意味している。

XバンドMPレーダは、Xバンドの波長帯を使用しているため既存レーダより高い空間解像度での観測が可能であり、面的スケールの小さい豪雨を詳細に捉えるのに十分な解像度を有している。

XバンドMPレーダで局地的な大雨や集中豪雨をリアルタイムで時間空間的に詳細に把握することが可能となったため、国土交通省は、豪雨の監視体制を強化するためにXRRAINと呼ばれるXバンドMPレーダネットワークの構築を開始した。

国土技術政策総合研究所は、レーダデータの処理・配信システムの構築し雨量情報配信の高度化を実現した。また、レーダネットワークを設計し、豪雨時においても高精度な観測を可能としている。また、観測設定やパラメータチューニング等を行い運用に向けて必要な精度の確保を行うと共に、減衰補正、合成処理の高度化等を行い精度向上を実現している。



図-Ⅱ.1.1.3.4 レーダ雨量計（Cバンド）観測網

1.1.3.2 XRRAINの構築状況

XRRAINは、2010年7月より11台で構成されるXバンドMPレーダネットワークで、三大都市圏等の4地域を観測範囲として試験運用を開始した。2011年度には、15台、2012年度には1台のレーダがネットワークに追加され、XRRAINは、現在(2013年1月)、11地域を観測範囲とする27台のXバンドMPレーダネットワークとなっている(図-Ⅱ.1.1.3.5)。現在のXRRAINは主要都市を観測範囲としており都市部における豪雨の監視体制の強化が図られ、また、河道閉塞や噴火活動により土砂災害の危険性が高い地域についても監視体制の強化が図られている。また、2013年度中には、東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下や地震、津波による河川堤防の損壊により、治水安全度が低下している被災地に8台のレーダがネットワークに追加され、被災地の豪雨対策強化が図られる予定である。

1.1.3.4 XRAIN 雨量情報の特徴

XバンドMPレーダは、上記のとおり高い精度の降雨観測が可能であり、地上雨量計により補正を必要としないため、観測後に観測結果を1~2分程度の遅れで配信することができ、短時間に急激に成長や衰退をする雨域を時々刻々と捉えることが可能となる。また、Xバンドの波長を使用しているためスケールの小さい豪雨を捉えるのに十分な解像度を有している。

今回、導入されたXバンドMPレーダの特徴をCバンドレーダと比較して整理すると下記のとおりである。

- ・ 空間解像度の向上

CバンドとXバンドの波長の差によりCバンドの波長を使う現行レーダの観測分解能は1kmメッシュであることに対してXバンドのMPレーダは250mメッシュの分解能で観測が可能となる。このため現行Cバンドレーダの16倍の空間解像度で雨量情報が取得可能になる(図-II 1.1.3.6)。

- ・ 時間分解能

現行Cバンドレーダ雨量計は、水平偏波の反射強度のみから雨量を推定するため、地上観測雨量とキャリブレーションを行い、レーダパラメータを随時修正することによって雨量換算の精度を確保している。この地上観測雨量の観測間隔が5~10分間隔であるため、現行Cバンドレーダでは観測間隔が5分間隔となるが、XバンドMPレーダは、地上観測とのキャリブレーションを行わずとも精度良く観測ができるため、キャリブレーションが不要であり地上観測雨量の収集を待つ必要ないため、1分毎に観測を行うことが可能となる。このため現行Cバンドレーダの5倍の時間分解能で雨量情報が取得可能となる。

- ・ リアルタイム性の向上

現行Cバンドレーダは地上観測雨量のキャリブレーションのために、地上観測雨量の収集、キャリブレーション処理のために観測から配信まで10分程度を要するが、XバンドMPレーダは、キャリブレーションの必要がないため、観測から2分程度の遅れで配信が可能となった。このため、現行Cバンドレーダの1/5の遅れ時間で雨量情報を取得可能となる。

Xバンド帯の波長を使用するレーダの欠点として、観測可能なエリアが狭いほか、降雨による電波強度の減衰(降雨減衰)が著しいため、特に豪雨時には観測精度が低下する。しかし、XバンドMPレーダでは降雨減衰の影響を受けにくい位相情報を用いて雨量推定を行い、さらに複数台のレーダで異なる方向から降雨域を観測することにより、降雨減衰の影響をある程度克服している。また、観測範囲が狭いことについても、複数台のMPレーダをネットワーク化することで克服するようにしている。

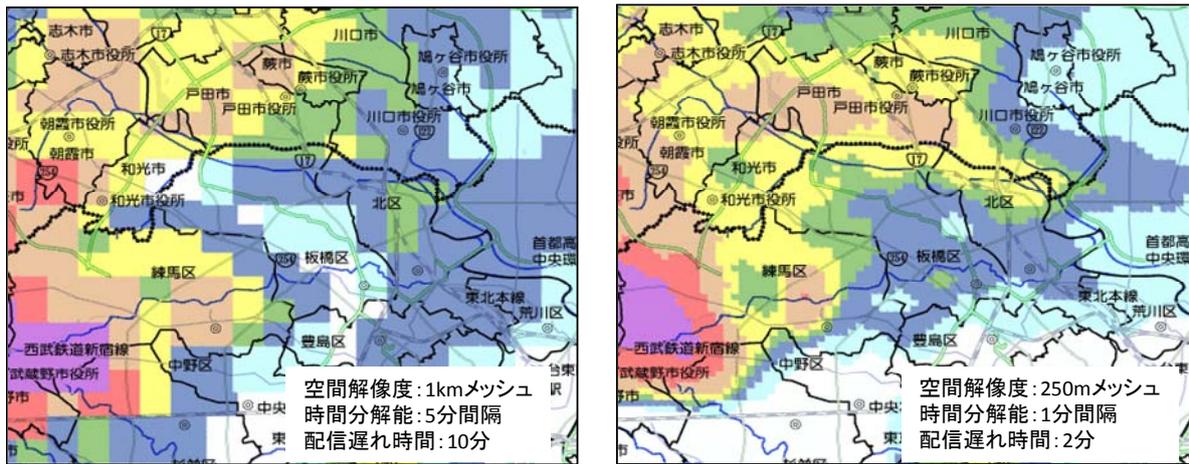


図-Ⅱ.1.1.3.6 現行CバンドレーダとXバンドMPレーダの空間解像度の比較

1.1.3.5 XRAINの観測精度

a) XRAINによる豪雨の観測事例

2010年7月5日東京都北部で局地的な集中豪雨が発生し、浸水被害が発生した。19時30分～20時30分までの1時間に、東京都板橋区役所に設置されている地上雨量計で107mmの降雨が観測された。その時のXバンドMPレーダによる当該豪雨の観測状況を図-Ⅱ.1.1.3.7に示す。板橋や練馬の観測所周辺に1時間あたりに換算して100mmを超える雨域が集中し、南に数km離れると、ほとんど雨域が観測されていないことが明確に把握できる。なお、XバンドMPレーダは、そのレーダの特性から豪雨時に観測不能エリアが発生する場合があります、これを回避するために特定のエリアは複数台で観測するようにレーダネットワークが設計されている。この雨域が観測されたエリアは2台のレーダで観測されていたため、観測不能エリアの発生を回避して観測を継続することができていた。

この豪雨イベントの、XバンドMPレーダ、Cバンドレーダ、地上雨量計で観測した10分間雨量の時系列図を図-Ⅱ.1.1.3.8に示す。レーダ雨量は、地上雨量計の設置場所に対応した1メッシュの雨量値を示したものである。いずれの地点においてもXバンドMPレーダは、Cバンドレーダと比較して地上雨量計で観測雨量の時間変化及び降雨量を精度よく観測できていることが確認できる。

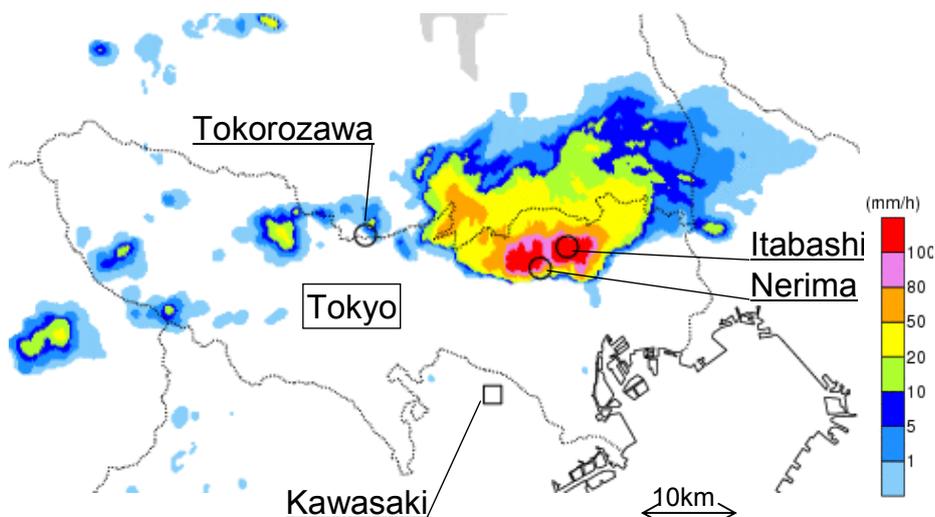


図-Ⅱ.1.1.3.7 XバンドMPレーダによる観測状況（2010年7月5日）

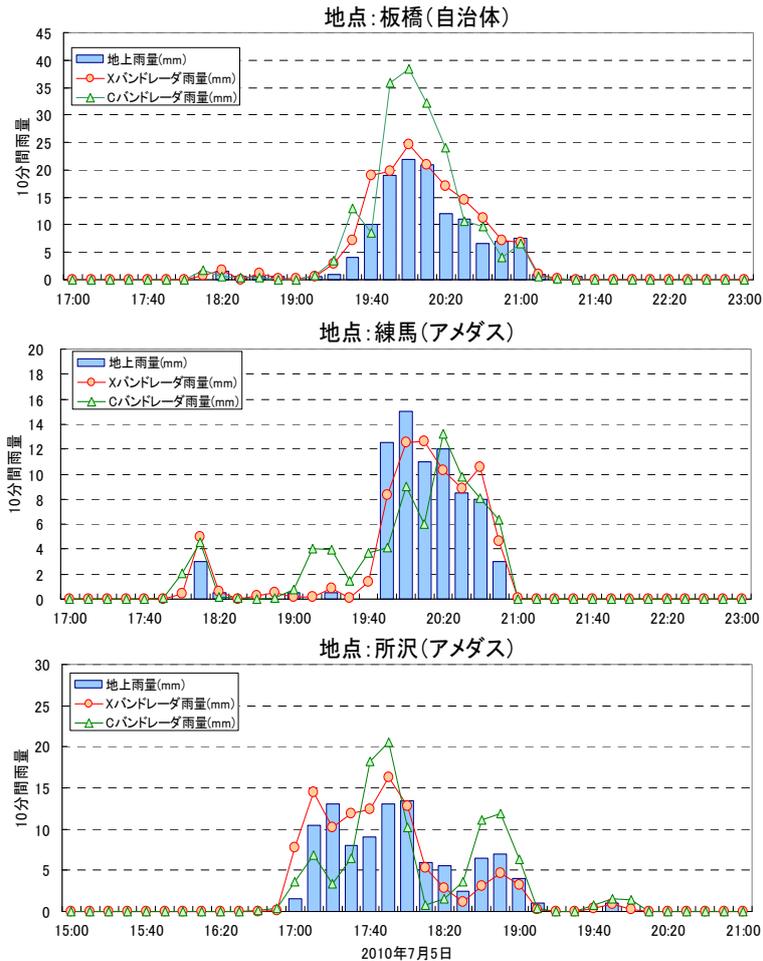


図-Ⅱ.1.1.3.8 XバンドMPレーダ合成雨量と地上雨量の比較（2010年7月5日）

b) 個別レーダの観測精度

2010年7月1日～9月30日までにおいて各地域の地上雨量計で時間雨量が大きい上位10事例を用いて、XバンドMPレーダの雨量観測精度を検証した。各レーダサイトの観測範囲内（半径60km）にある全ての地上雨量計とそれに対応したメッシュのレーダ雨量を10分雨量値で比較した結果を図-Ⅱ.1.1.3.9に示す。XバンドMPレーダの雨量算出は、1分間降雨強度で約14mm/h以上に相当する降雨の場合はKdp-R関係式、約14mm/h未満の場合はZ-R関係式により行われる。図中の黒色で示すプロット点はXバンドMPレーダの10分間積算雨量が全てZ-R関係式で求められた積算雨量を意味し、緑色で示すプロット点は10分間積算雨量の9割をKdp-R関係式で求めた積算雨量を意味する。実線はXバンドMPレーダ雨量と地上雨量の関係の回帰直線を示している。XバンドMPレーダ雨量は、地上雨量に対してある程度の誤差（ばらつき）を有し、いくつかのレーダサイトではやや過小評価傾向を示していることが確認できる。ただし、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量の比較は、地上雨量計を真値と仮定しているため、レーダ観測固有の誤差の他に、レーダ観測と地上雨量観測の空間的的代表性（目標体積中の平均的雨量と点雨量）や時間的的代表性（1分毎の瞬間値の積算と連続積算値）、測定高度（上空と地上の降水）の違い等に起因する誤差を含んだ評価であることに留意する必要がある。

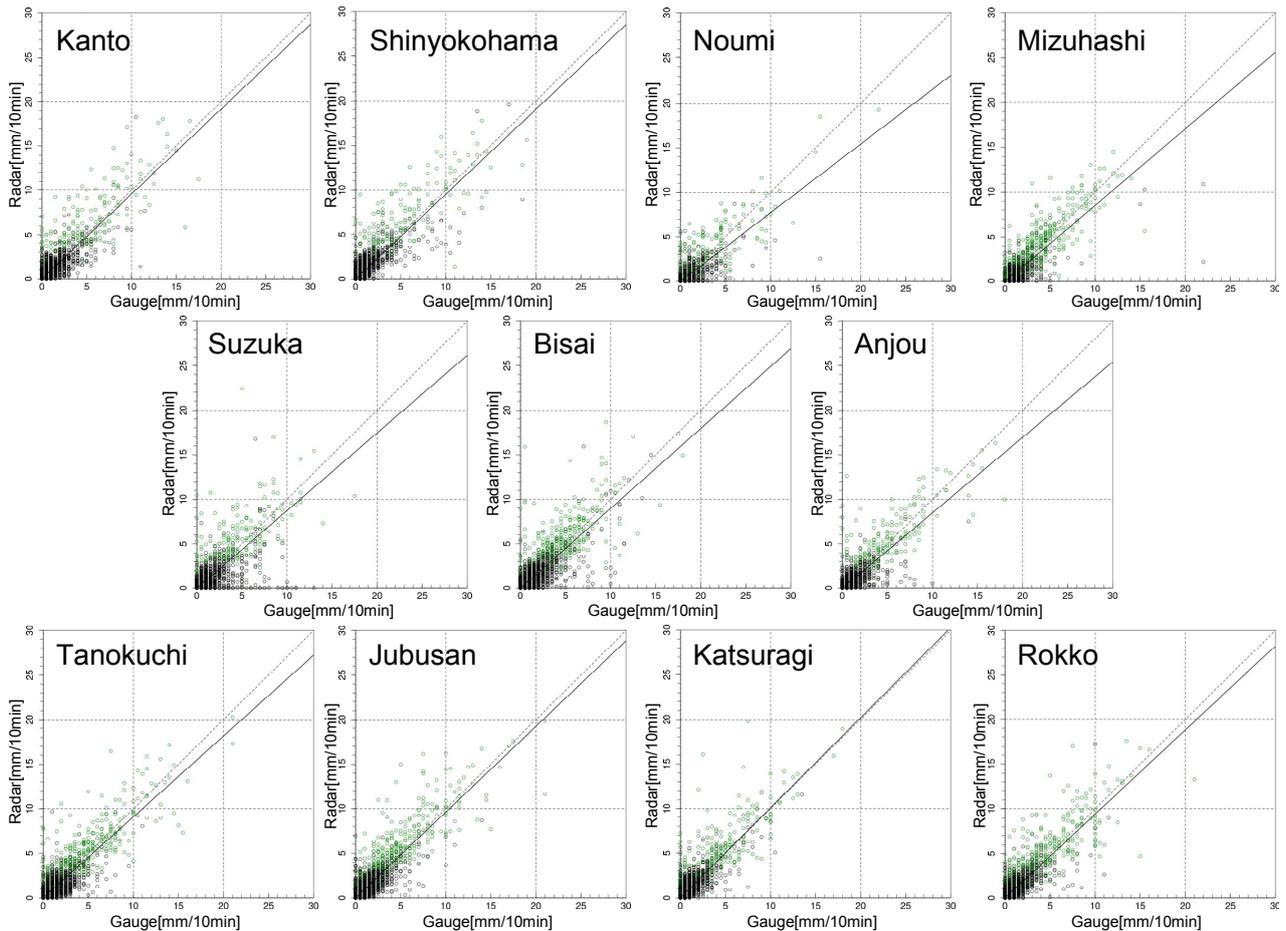


図-Ⅱ.1.1.3.9 XバンドMPレーダの雨量観測精度の検証結果

各レーダサイトの観測範囲内（半径 60km）にある全地上雨量計とそれに対応したメッシュのレーダ雨量を 10 分雨量値で比較したもの

c) レーダの距離別観測精度の特徴

降雨強度の計算は、弱雨時は Z-R 関係式（反射強度による雨量算定）、強雨時は Kdp-R 関係式（位相情報による雨量算定）を使用するコンジット方式を適用している。そこで、レーダからの距離別の観測精度を雨量算定方式毎に整理する。Kdp-R 関係式で求められた雨量と地上雨量の距離別の比較を図-Ⅱ.1.1.3.10 に示す。また、Z-R 関係式で求められた雨量と地上雨量のレーダからの距離別の比較を図-Ⅱ.1.1.3.11 に示す。Z-R 関係式で求められた雨量は、レーダから遠方になるほど過小評価になることが明確に確認できる。これは、減衰補正が遠方になる程不十分になることに起因する。一方、Kdp-R 関係式で求められた雨量は距離による精度の変化は Z-R 関係式を用いる場合に比べ大幅に小さくなることを確認できる。ただし、60～80km になると、レーダー値が地上雨量よりもやや小さくなる。これらの結果から、特に Z-R 関係式を用いる場合、レーダサイトの遠方ではレーダの観測精度は過小評価傾向になることがわかる。

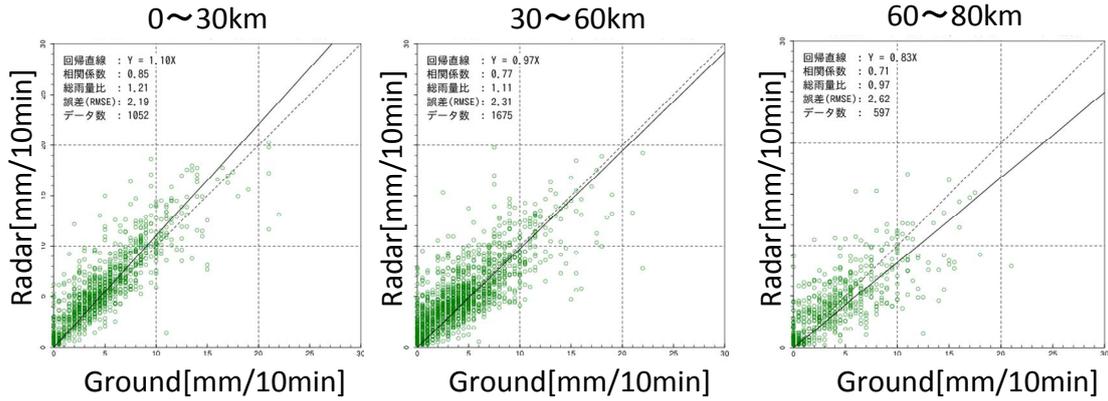


図-Ⅱ.1.1.3.10 Kdp-R 関係式で求めたためられた雨量と地上雨量の距離別の比較

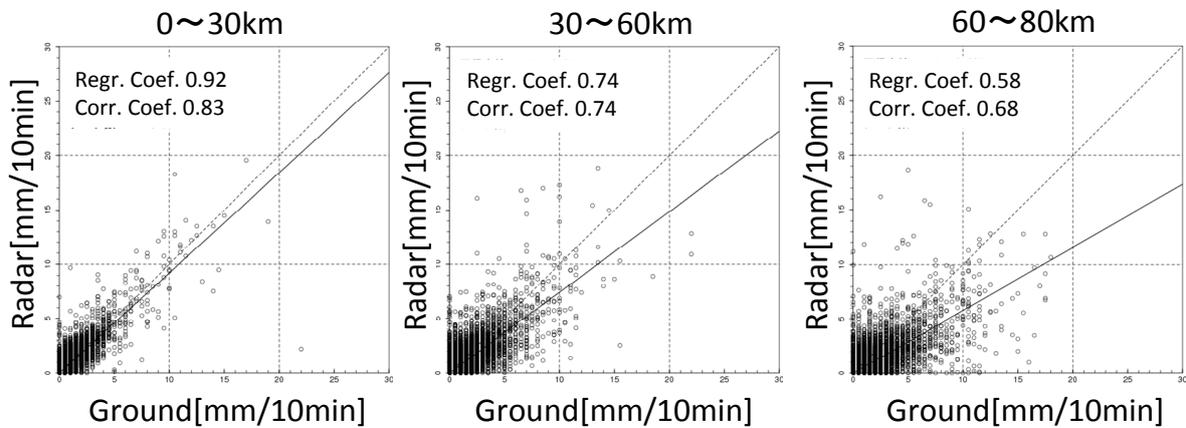


図-Ⅱ.1.1.3.11 Z-R 関係式で求めたためられた雨量と地上雨量の距離別の比較

d) レーダ合成雨量の観測精度の特徴

配信されるデータは、各レーダで観測された雨量値を合成処理しているため、レーダサイト近傍であっても遠方のレーダの雨量値が合成に含まれる領域は、過小評価傾向を示す場合がある。図-Ⅱ.1.1.3.12は、近畿地域のレーダから60km以遠のデータが合成に含まれる領域をピンクで示している。図中の○印はアメダス観測所を示しており○印の色は、2011年の台風12号事例でのXバンドMPレーダ雨量と地上雨量の回帰係数を示している。ピンクで示される領域内では回帰係数が小さく過小評価傾向であることが確認できる。一方で、レーダから60km以内で観測可能な範囲では精度良く観測ができてることが確認できる。

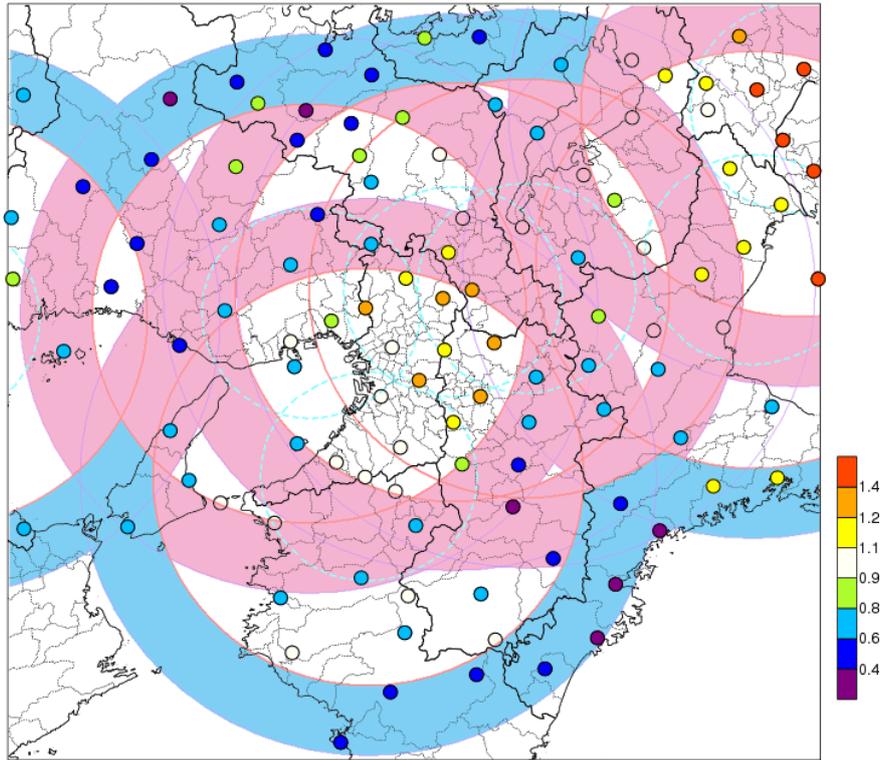


図-Ⅱ.1.1.3.12 レーダから60km以遠のデータが合成に含まれる領域の過小評価傾向

e) 1分雨量の観測精度

図-Ⅱ.1.1.3.7 に示す川崎地点にディストロメータを設置し降雨を観測した。ディストロメータにより観測した1分間雨量とXバンドMPレーダ雨量を比較した結果を図-Ⅱ.1.1.3.13に示す。XバンドMPレーダ雨量は、ディストロメータの設置場所に対応した1メッシュの合成雨量(1分間値)である。実際の降雨は1分毎に大きく変動していることが確認できる。XバンドMPレーダ雨量は、1分毎の降雨の変動をよく捉え、降雨量も高い精度で観測できていることが確認できる。

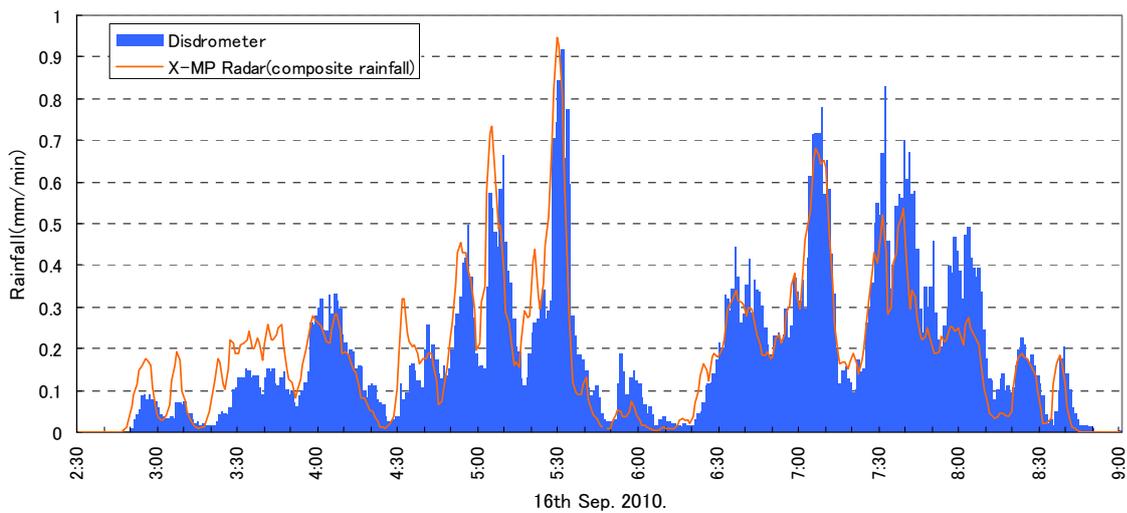


図-Ⅱ.1.1.3.13 XバンドMPレーダ合成雨量とディストロメータ雨量による1分雨量の比較
(観測日時：2010年9月16日、観測場所：川崎国道事務所)

1.1.3.6 XRAIN 雨量情報の利活用

XバンドMPレーダ雨量情報は、水防活動、避難情報の発令のための参考情報として利用され始めている。たとえば、平成23年台風12号による大雨に伴う土砂崩れにより発生した河道閉塞箇所にも雨量計を設置するまでの間の代替の雨量情報として、XバンドMPレーダ雨量情報が河道閉塞の決壊監視に利用された。また、決壊監視を支援するために、集水域内の累積雨量に応じてアラートメールを本省、近畿地整の防災担当、TEC-FORCEメンバーへ配信するシステムが実施された（図-Ⅱ.1.1.3.14）。



図-Ⅱ.1.1.3.14 平成23年新潟・福島豪雨

この他、土嚢積み等の水防活動の指示、避難勧告・指示、交通規制の実施・継続・解除、パトロール及び体制の準備等に、信濃川下流沿川の自治体職員がXバンドMPレーダ雨量情報を利用した実績も報告されている。

1.1.4 豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響評価

近年、日本各地において時間 50mm 以上の豪雨、さらには 10 分間程度の短時間に集中する豪雨の発生が頻繁に見られるようになってきている。各都市においては浸水被害を防ぐための対策が進められているところであるが、長期的に見ると降雨の特性が変化し、5 年や 10 年に一度の頻度で発生する降雨強度が増加傾向を示すと考えられるため、既存の浸水対策のみでは 5 年確率や 10 年確率で発生する豪雨に対応できなくなる可能性がある。そこで、将来的な豪雨の増加が既存の浸水対策に対してどのような影響を与えるのか、浸水シミュレーションを用いた 3 地区のケーススタディで検討した。

1.1.4.1 豪雨の増加傾向の推定と降雨シナリオの設定

豪雨の増加傾向を定量的に推定するため、まずは気象庁の降雨データを整理・分析した。具体的には、1960 年から 2009 年までの 50 年の降雨データを扱い、全国の管区・海洋・地方气象台（全 57 气象台）のデータを収集した。また、データ項目としては気象庁が所有している最大 10 分間降雨強度と、最大 60 分間降雨強度のデータを収集した。

全国 57 气象台における毎年最大降雨強度を用いて、50 年後の 5 年確率の降雨強度の増加率を气象台ごとに算出し、増加率のパーセンタイルを整理した結果を図-Ⅱ.1.1.4.1(a)に示す。これより、全体的には 50 年後の 5 年確率の 10 分・60 分間降雨強度が、現在より 1.1 倍程度（50 パーセンタイル値（中央値））、最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加することが試算された。図-Ⅱ.1.1.4.1(b)に 10 年確率の降雨強度の増加率に関して、同様に整理したものを示す。10 年確率の降雨強度についても 5 年確率の降雨強度と同様な傾向が示された。

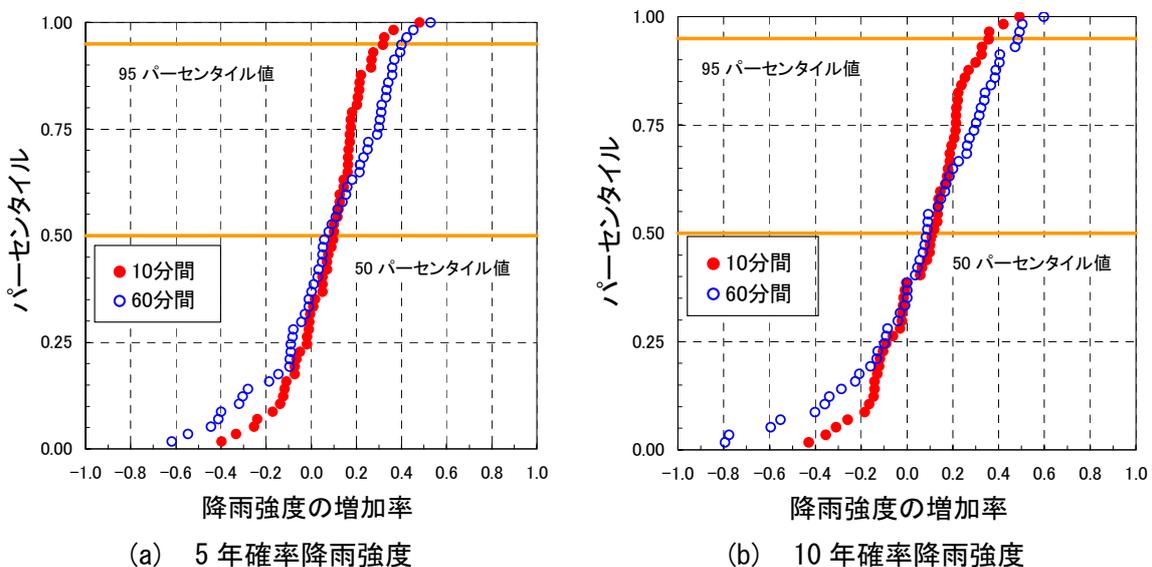


図-Ⅱ.1.1.4.1 全国 57 气象台における 10 分・60 分間降雨強度の増加率

上記の結果を踏まえ、ケーススタディを実施する各都市における既存計画の降雨強度に対し、10 分・60 分間降雨強度が 1.3 倍に増加したときを想定し、図-Ⅱ.1.1.4.2 に示す既存降雨強度式とシナリオ A～C の降雨パターンを設定してシミュレーションを実施することとした。シナリオ A では、降雨強度が強いピークの 10 分間について降雨強度を 1.3 倍とし、ピーク前後の 60 分間の降雨強度が 1.0 倍となるように設定した。シナリオ B では、ピーク前後の 60 分間の降雨強度を 1.3 倍とし、ピークの 10 分間降雨強度については 1.0 倍とした。シナリオ C ではピーク 10 分間、ピーク前後の 60 分間の降雨強度ともに 1.3 倍とした。

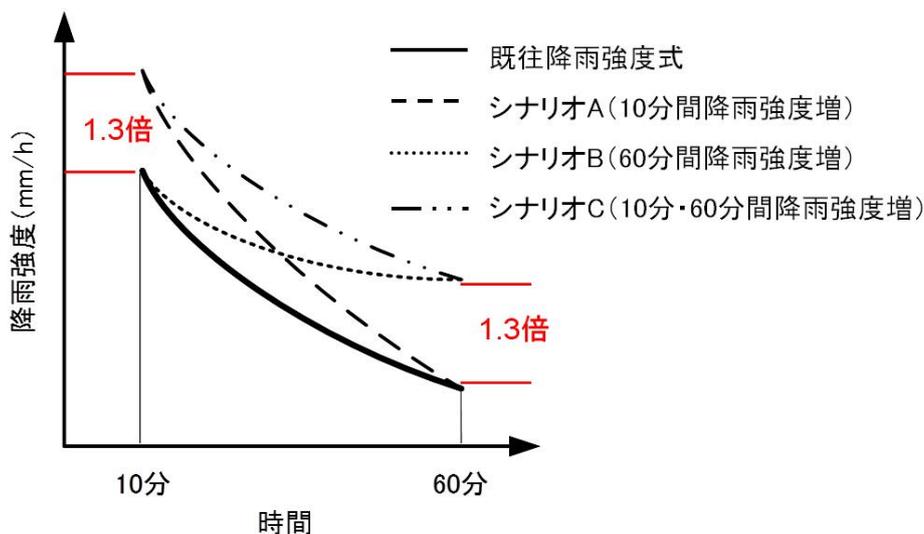


図-Ⅱ.1.1.4.2 降雨パターンの設定イメージ

ケーススタディを実施する対象都市は3都市とし、それぞれの都市における中心市街地を含む地区(X～Z地区)を選定した。対象都市については、地域に偏りが起こらないように選定している。また、シミュレーションに使用したソフトはMOUSEもしくはInfoWorksである。

1.1.4.2 浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区別・シナリオ別にシミュレーション結果(浸水状況)の整理を行った結果を表-2.1.6.1に示す。なお、浸水面積については、浸水深20cm以上(床下浸水相当以上)の箇所を算定対象とした。以下にその概要を示す。

- ① 集水面積が比較的小さいY地区では、既存降雨に対して10分間降雨強度を増加させたシナリオA、シナリオCでの水位上昇が顕著であった。
- ② 集水面積が比較的大きいX及びZ地区では、60分間降雨強度増のシナリオB、シナリオCでの水位上昇が顕著であった。
- ③ 10分間降雨強度と60分間降雨強度を共に増加させたシナリオCにおいては、いずれの地区においても浸水深20cm以上(床下浸水相当以上)の浸水面積が既存降雨の時に対して増加した。

これらの結果より、将来的に豪雨の頻度が増加することが想定される場合においては、追加の浸水対策を検討することが望まれる。シミュレーション結果を踏まえると、Y地区については、上流部の枝線部における能力不足が浸水原因と想定され、短時間雨量における影響を考慮することが重要となる。X及びZ地区については、雨水幹線において流下能力を超えたことが浸水原因と想定され、広範囲で排水機能のレベルアップを図ることが有効と考えられる。

また、流下対策はもちろんのこと、雨水貯留浸透の継続的な取り組みも併せて有効と考えられる。さらに、近年の厳しい財政事情を考慮すると、降雨観測技術や内水ハザードマップ等、ソフト面の対策の充実が重要となってくる。

表-Ⅱ.1.1.4.1 浸水シミュレーションによる影響評価結果

地区名		X地区	Y地区	Z地区	
排除方式		合流	分流	合流	
シミュレーション対象面積		約3,350ha	約62ha	約1,900ha	
流出係数		約0.45	約0.60	約0.82	
シミュレーション 対象降雨	60分間降雨強度	34.3mm/hr	50.0mm/hr	53.4mm/hr	
	10分間降雨強度	87.1mm/hr	109.5mm/hr	114.6mm/hr	
浸水対策の形態		流下幹線整備中心	貯留池整備併用	貯留幹線整備併用	
既存降雨強度での 浸水シミュレーション状況		一部開水路確保	一部開水路確保	満管 (管頂レベル超)	
対象降雨 パターン	シナリオA 10分間 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	0.7%	6%	0.4%
		主な浸水集中域	—	上流部	—
	シナリオB 60分間 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	7%	0%	7%
		主な浸水集中域	中流部	—	全体的 (GLの低い箇所)
	シナリオC 10分・60分間 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	9%	6%	4%
		主な浸水集中域	中流部	上中流部	全体的 (GLの低い箇所)

※既存降雨に対する浸水増加面積率 = (既存降雨に対する浸水増加面積) / (対象地区面積)

※既存降雨に対する浸水増加面積 = (当該シナリオによる浸水面積) - (既存降雨による浸水面積)

1.1.5 降雨予測技術を活用したダム洪水調節操作の高度化

1.1.5.1 はじめに

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までにIPCCレポートやその他の研究において多く指摘されている（例えばIPCC2007）。日本国内に対象とし、将来において豪雨の規模が増大する可能性を示唆する既往研究もある（和田ら2005、柏井ら2008）。このように豪雨の降り方が変化するとダムの洪水調節操作にも影響を与える可能性がある。例えば佐山らは、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデルRCM20のデータを用いて分布型流出モデルにより検討を行っており、例えば日吉ダムにおいては計画規模を越えるような超過洪水頻度が多くなる将来気候においてただし書き操作回数が現在気候と比較して増加することを示している（佐山ら2008）。同様の検討結果は森らの研究からも得られている（森ら2008）。大規模な新規治水施設の建設が今後も望めないとすれば、ダムにおいては上述したような増加する洪水外力に対して既設ダムの従来の操作を高度にすることで対応することが重要となる。

既設ダムの治水機能向上の一つの方策として予測雨量を活用した洪水調節が挙げられる。青山は超過洪水に対し大被害を回避するダム操作として、超過洪水発生が予測された段階で洪水調節開始流量から洪水調節を開始しないで洪水調節容量を温存し、下流河川における水位が大被害発生水位（当該水位を超えると大被害が生じる水位）を超えると予測した段階で当該水位を超えないように洪水調節を行うという方法を提案している（青山2007）。水位上昇の予測は予測雨量を利用して行う。以上の操作によりただし書き操作時に発生する大被害を回避することが可能となる。この操作の課題としては、超過洪水の発生を洪水初期の段階で予測する必要があるとともに、洪水調節中にも下流河川の大被害発生水位以上に水位が上昇することを予測する必要がある高い予測雨量の精度が要求される。また、無害流量以上の放流を行うため、中小規模の氾濫の許容が前提となる。

予測雨量の精度が高ければ、青山が提案するような操作を実施することが可能となるが、近年予測精度は日々向上しているものの予測誤差は未だにゼロとなつたわけではないため、ダム洪水調節における予測雨量の定量的な利用は限定的である（鳥居2012）。現在までに行われている予測雨量を活用したダム洪水調節に関する代表的な研究・取り組みとして、洪水調節操作の事前放流操作および後期放流操作における利用が挙げられる。事前放流操作の高度化に関する研究として、秋葉ら、戸谷ら、下坂ら、腰塚らは流入量特性を活用した事前放流量決定手法を提案している（秋葉ら2004）、（戸谷ら2006）、（下坂ら2009）、（腰塚ら2006）。その手法では、過去の洪水データから低減開始時の流入量（または累積降雨量）とそれ以降の総流入量を把握し、実際に洪水が発生した時にその時点の流入量を基にしてその後の総流入量を推定し、その分の利水容量を事前放流するものである。これにより、利水側に支障を来すことなくダムの洪水調節容量を洪水時に一時的に増加させることができる。上記手法は当初は予測雨量を利用せず、実測雨量および実測流量からその後の総流入量を推定していたが、北田らはその手法に予測雨量として気象庁の降水短時間予報（30分間隔で発表される、6時間先までの1時間雨量）を組み合わせ、草木ダムの2007年9月台風9号を対象としてシミュレーションを実施してその効果を確認している（北田ら2010）。

後期放流操作における予測雨量の活用事例として、平成22年7月13日から14日にかけて発生した洪水時の中国地方整備局八田原ダムにおける操作と、平成23年9月の台風15号に伴って発生した洪水に対する三春ダムの操作が挙げられる。八田原ダムにおいてはピーク以降においてはダムの空き容量と比較して予測される雨量が小さいため、規則操作よりも放流量を小さくする（オーバーカット）ことにより、ダムからの放流量を最大約138m³/s低減させることに成功した。この操作によって流入量と放流量の差は約282m³/sとなり、下流の目崎地点において約55cmの水位低下に成功した（国土交通省中国地方整備

局八田原ダム管理所2010)。また三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成23年9月の台風15号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、流入量の全量カットによる洪水調節が実施された。三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約0.5mの水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約0.35mの水位低減効果があったとしている。すなわち、全量カットによる効果は約0.15mの水位低減効果であったとしている（国土交通省東北地方整備局2011）。

上述した流出量特性を活用した事前放流量は、基本的には予測雨量への依存性を極力低下させつつも治水に効果的かつ利水に支障をきたさないことを指向した手法である。この手法は、事前放流を実施することで洪水調節容量を一時的に増やすことができるものの流入量が洪水調節開始流量を超えた後は規則操作に従うため、ダムの計画規模を超えるような大規模出水に対しては効果を発揮するが、流域全体では大きな出水ではあるもののダム流域では中小規模にとどまる洪水などに対しては規則操作と比較して放流量を下げることができず、下流の安全性を高めることはできない。また、洪水後期のオーバーカットについては、予測雨量への依存性自体は低くはないが、予測雨量の精度が十分に高い降り終わりに的を絞って予測雨量を活用する方法であるため、下流の安全性を高めるという点でその効果はまだ限定的である。流域の降雨状況に応じて下流の安全性を高めるための効果的なダム洪水調節手法は未だ提案されていない状況である。

規則操作よりも効果的にダム地点において洪水調節を行い下流の安全性を高めるためには、洪水の全体規模を把握した上で洪水調節終了時において洪水調節容量を100%使い切れるような最適放流量を決定することが求められる。そのためには洪水の全体規模をおおよそ把握することができる予測雨量に対して高い精度が要求される。気象予測技術の進歩により予測雨量の精度は日々改善されているが、その時々々の気象状況に応じて予測の誤差は異なると考えられ、予測誤差が完全にゼロになるのは困難またはかなり遠い未来であると考えられる。このような状況では、予測誤差がゼロになるのを待つよりも「予測雨量とは誤差を含んでいるが、それを用いることでダムの洪水調節効果を高める可能性であるデータ」という認識を持ち、その利用法を考えることが重要である。例えば三石らはWRFで計算された予測雨量に対して起こりうる上限値と下限値をそれぞれ設定し、予測の幅を考慮してダム洪水調節を行うことを提案している（三石ら2011a, 2011b）。この研究事例にも示されるような予測の幅を考慮した上でダム操作をどのように行うかという視点が重要であると。ここでは、三石らや鳥居らで述べられている予測雨量の誤差発生確率を考慮したダム洪水調節手法を基に（三石ら2011a, 2011b）（鳥居ら2012）、現在気象分野で盛んに研究が実施されているメソアンサンブル予測雨量（以下、本章において断りがない限り「アンサンブル予測」は「メソアンサンブル予測」を示すものとする。）から得られる予測の幅を利用した下流の安全性を高めるためのダム洪水調節手法について述べる。1.1.5.2ではアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要、1.1.5.3ではシミュレーション実施条件、1.1.5.4ではシミュレーション結果、1.1.5.5では考察、1.1.5.6ではまとめと今後の課題を述べる。

1.1.5.2 アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節手法の概要

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作方法として、三石らや鳥居らで述べられている予測雨量の予測の幅を考慮した放流量決定手法をベースとし、その手法の概要を述べる。

a) アンサンブル予測雨量

従来、ダム管理の現場においては気象庁のMSM33時間予測に代表されるような確定的な予測雨量が使われてきている。しかし、ダム流域単位で見たときに予測雨量に誤差が含まれていることは様々な調査において指摘されている（例えば和田ら2004、鳥居2012）。そのような中、三石ら、鳥居らは予測

雨量を確定値として扱うのではなく、誤差を持つことを前提として予測雨量の誤差確率分布を把握するための検討を行っている（三石ら2011a, 2011b）（鳥居ら2012）。それらの検討では、気象庁MSMの過去の予測データと観測値を比較することで統計的に予測雨量の誤差確率分布の設定を行っている。しかし、気象予測モデルおよび予測計算の初期値・境界値の改良に伴い予測雨量の精度が日々変化することから、統計解析を実施するに足る同質なデータを蓄積することが難しい。さらに、予測雨量の誤差はその時々々の気象状況に依存するためイベント毎に誤差が大きく異なると考えられるため、過去の予測雨量データの蓄積に基づいて誤差確率分布を設定する場合、適用する洪水によっては誤差の幅をかなり広く見積もってしまう可能性がある。

これらのことから本検討では、データの蓄積を必要とせず、かつその時々々の気象状況に応じて適切な予測雨量の幅を算出するアンサンブル予測雨量を用いることとした。近年気象予測の分野では、予測計算の初期値に対してある程度のばらつきを与えて複数の初期値（アンサンブルメンバー）に対して予測計算を実施し、計算された予測の幅を評価するアンサンブル予測に関する取り組み・研究が盛んに行われている。これは、一つの初期値による予測では気象の不確実性故の予測の時間推移評価が難しいため、幅を持って評価するべきであるという近年の気象予測に関する認識を反映している。気象庁の1ヶ月や3ヶ月といった長期予測においてはすでに長期アンサンブル予測が現業化されているが、豪雨を対象としたような短期予測に関するアンサンブル予測はまだ現業化されていないが研究は多く実施されている（例えば吉野ら2011、Seko et.al.2011）。

b) アンサンブル予測雨量を用いた洪水時のダム操作方法の考え方

上述したアンサンブル予測雨量を用いたダム放流量決定手法を以下に述べる。

- 1) 最大放流量が O_1 から O_N まで異なる N 通りの操作ケースを設定する。
- 2) 境界値の予測が更新されるタイミングでアンサンブル予測雨量の計算を行う。ここではメンバー数を M とし、その各アンサンブルメンバーの予測雨量の結果をここでは $En\ 1$ 、 $En\ 2$ … $En\ M$ とする。
- 3) 得られるアンサンブル予測雨量のメンバー1（ $En\ 1$ ）についてダム流域を含めた流域全体で流出計算を行う。
- 4) 3)においてダム流域について得られる予測流入量に対し、操作ケース1（最大放流量 O_1 ）で操作したときの downstream 基準地点のピーク流量（ $Q_{p_1_1}$ ）を計算する。
- 5) 3)と4)の計算をその他のアンサンブルメンバーについても実施する。
- 6) 各メンバーの発生確率は等しいものとして、操作ケース1で操作した時の downstream ピーク流量期待値（ Q_{p_1} ）を計算する。各操作の downstream ピーク流量期待値は次式で定義される。

$$Q_{p_i} = \sum_{e=1}^M p(e) \times Q_{p_i_e}$$

ここに、 Q_{p_i} : 操作 i による downstream ピーク流量期待値、 M : アンサンブルメンバー数、 $p(e)$: アンサンブルメンバー e の発生確率（全てのアンサンブルメンバーは発生確率が等しいとする）、 $Q_{p_i_e}$: アンサンブルメンバー e から求められる予測流入量に対して操作ケース i で操作した時の downstream ピーク流量

- 7) 全ての操作ケースについて3)～6)の計算を行うことで downstream ピーク流量期待値を計算する。
- 8) 得られた全操作ケースの downstream ピーク流量期待値を最小にする操作ケースがその時点における最適操作とし、次の予測更新までその放流量で操作する。
- 9) 上記計算を境界値の予測が更新されるたびに行い、洪水が終了するまで実施する。

1.1.5.3 シミュレーション実施条件

前節で示したアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作について、実際に発生した洪水事例

を対象としてシミュレーションを行い、その効果を確認する。ここでは対象流域・ダム、計算条件等について示す。

a) 検討対象流域・ダム、対象洪水

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節の検討対象地域として、近年大きな洪水が発生し、洪水調節を実施したダムを含む河川流域を検討対象流域として選定することとした。ここでは平成23年に台風6号、12号および15号により洪水調節操作を実施した蓮ダムを含む櫛田川流域を対象とし、その3つの台風に伴って発生した洪水を検討対象とした。それぞれの台風の対象期間は以下の通りである。

台風6号：7月15日9時～7月20日15時

台風12号：8月29日9時～9月4日15時

台風15号：9月16日9時～9月21日21時

b) アンサンブル予測雨量の計算

アンサンブル予測雨量は、気象庁GSMの84時間予測を境界値として、WRFにより計算した。各台風について上述の対象期間について、GSMの予測が更新（6時間おき）される毎にその予測値を境界値として84時間先までの計算を行う。初期値についてはその時点よりも6時間前に行った予測計算結果を基にHybrid法（Wang2008a, Wang2008b）によりデータ同化による改善とアンサンブルメンバーの発生を行った。ここでアンサンブルメンバーは20とした。また計算領域については図-Ⅱ.1.1.5.1に示し、空間解像度は親領域において15km、子領域において5kmである。また、データ同化に用いたデータとしては、表-Ⅱ.1.1.5.1に示す。

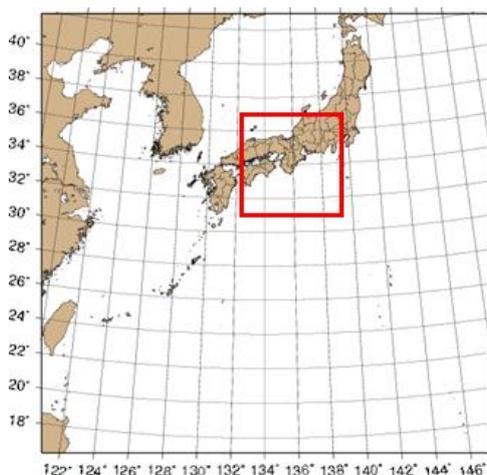


図-Ⅱ.1.1.5.1 計算領域（全体が親領域、赤枠内が子領域）

表-Ⅱ.1.1.5.1 データ同化に用いた観測データ一覧

種別	要素	入手先
気象観測衛星（AMSU-A, B）	気温、水蒸気	NCAR Research Data Archive
衛星大気追跡風	風	
高層実況	気温、風、水蒸気、気圧	
海上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
飛行場実況	気温、風、水蒸気、気圧	
航空機実況	気温、風	
地上実況	気温、風、水蒸気、気圧	
ドップラーレーダ	風、反射強度（雨水）	気象業務支援センター

c) 流出計算モデル

アンサンブル予測雨量を入力として河川流量やダム流入量を計算する流出モデルとして、土研分布型モデルを用いた(鈴木ら1996、猪股ら2007)。パラメータ値については、上記3洪水の観測値からSCE-UA法(Duan1992)を用いて決定した。

d) 設定する放流量の操作ケース

b)において、最大放流量が異なる複数の操作ケースを設定することを述べた。ここでは、蓮ダム工事誌によると、ダム計画時においては洪水調節開始流量が200m³/s、最大放流量1000 m³/s、放流率0.55の一定率一定量操作であったことから(蓮ダム工事事務所1993)、200 m³/sから1000 m³/sの間を10等分し、それに洪水調節流量の200 m³/sを加えた200、280、360、440、520、600、680、760、840、920、1000 m³/sの11通りとした。

1.1.5.4 結果

a) 台風15号計算結果

最初に台風15号の計算結果について示す。降雨が降り始める前から降り終わりにかけて6時間おきに84時間予測計算を行っているが代表的な事例として流入量が洪水調節開始流量に到達する2日前および1日前(図-II.1.1.5.2)の結果を示す。その結果、台風15号はそれほど長期間に渡る洪水ではなく2日程度のものであったため、GSM84時間予測を用いて計算した結果は降雨の降り始めから終わりまでを見通すことができる結果となった。洪水調節開始の2日前の時点で、アンサンブル平均雨量の積算値としては観測値よりも100mm程度小さい値となっている。また図-II.1.1.5.3は洪水調節開始の1日前の結果である。2日前の予測と比較して降雨のピークをより正確に予測できており、積算雨量の値についても、アンサンブル平均値は観測値と相違ない結果となっている。図-II.1.1.5.2および図-II.1.1.5.3には併せてMSM33時間予測の結果も記載しているが、MSM33時間予測では、予測先行時間33時間と短いため降雨の全体規模が見渡すことができず、洪水の始まりから終わりまでを見通した効率的な洪水調節操作を実施することは難しいと考えられる。この点でも今回計算した84時間の予測はダム操作にとって有効な情報を提供しうるものであると言える。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-II.1.1.5.4に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約380m³/sを放ることになり、貯水量の最大時において洪水調節容量の9.2%を使用し、下流の両郡橋地点のピーク流量は1,506m³/sとなった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量200 m³/sの一定量放流となり、貯水量の最大時において洪水調節容量の30.5%を使用し、両郡橋地点のピーク流量は1,321 m³/sまで低減することができ、規則操作と比較して10%程度ピーク流量を低減することができた(図-II.1.1.5.5)。このように、アンサンブル予測雨量から得られる情報を活用することで、その時点における最適な放流量を機械的に算出することができるのが本検討で提案する手法のメリットである。

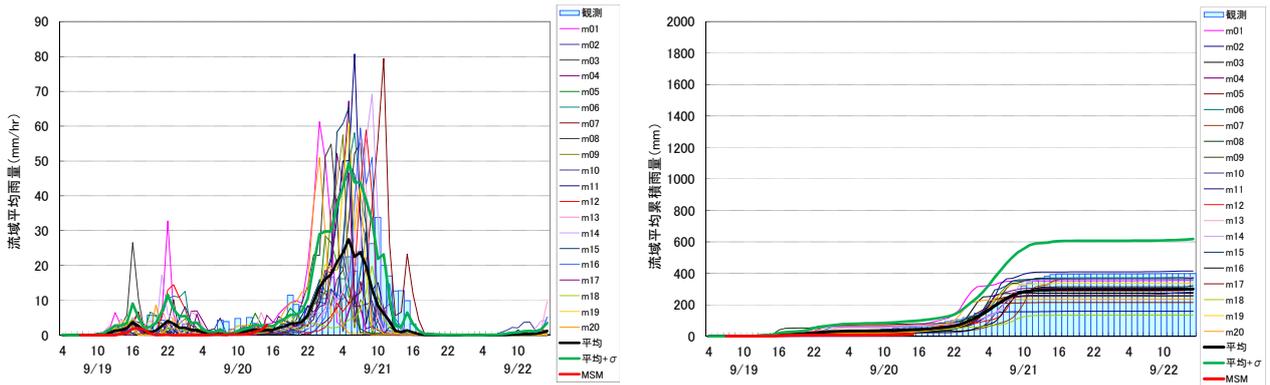


図-Ⅱ.1.1.5.2 9月19日3時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

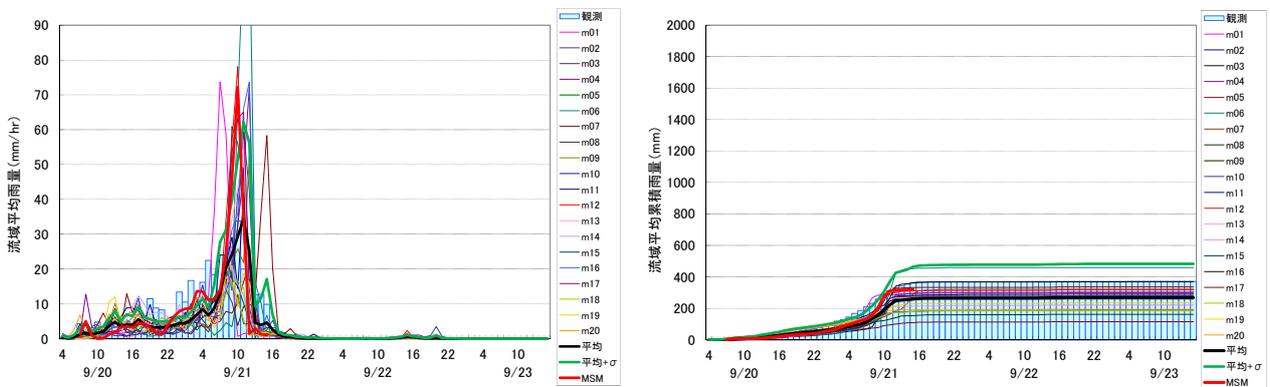


図-Ⅱ.1.1.5.3 9月20日3時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

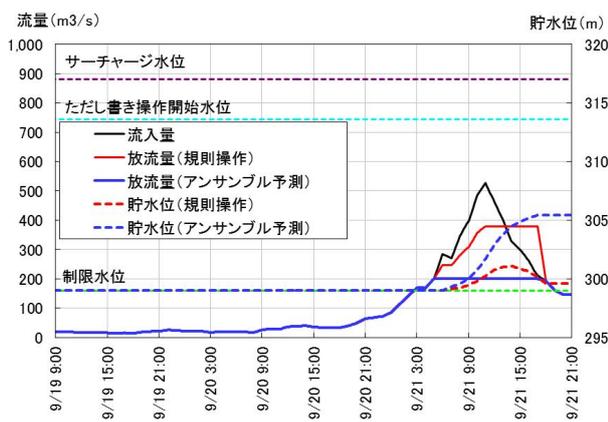


図-Ⅱ.1.1.5.4 台風15号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

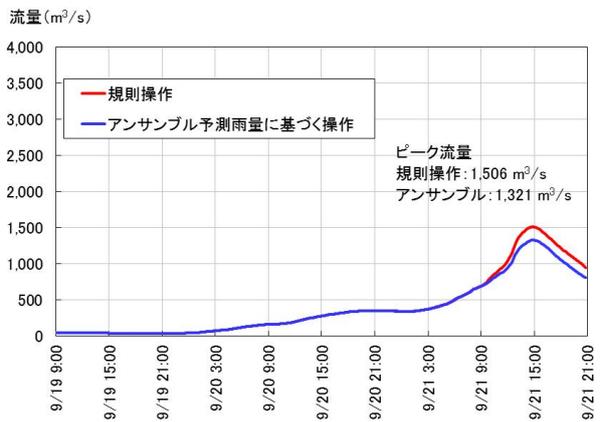


図-Ⅱ.1.1.5.5 台風15号時の両郡橋地点の流量時系列

b) 台風6号結果

図-Ⅱ.1.1.5.6および図-Ⅱ.1.1.5.7は、台風6号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風15号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達する2日前および1日前の時点初期値として予測した結果である。図-Ⅱ.1.1.5.6に示す結果では、降

り始めの直後に発生する40mm/hr程度の雨について予測できていないものの、全体的な傾向は概ね再現されており、ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前から雨の降り終わりまでほぼ見通すことができていることが分かる。その一方で、MSM33時間予測では一山目の終わりまでしか見通すことができている。しかし、7月20日の未明から朝にかけて雨がほとんど観測されていないにも関わらず、アンサンブル予測ではほぼ全てのメンバーが20~40mm/hr程度の予測をしており、過大評価している。図-Ⅱ.1.1.5.7に示すダム流入量が洪水調節開始流量に到達する1日前の予測結果については、84時間の積算雨量としてはアンサンブル平均値と観測値は近い値を示しているが、予測の前半期間でやや過小評価傾向、後半期間で先述の同様の傾向で過大評価傾向となっている。後半部分の過大評価については、次節でその原因について述べる。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅱ.1.1.5.8に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約450 m³/sであり、貯水量最大時において洪水調節容量の10.7%を使用し、2つある下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目および二つ目のピーク流量はそれぞれ1,573m³/sおよび1,893m³/sとなった(図-Ⅱ.1.1.5.9)。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量は7月19日9時~15時にかけての280m³/sであり、その後は200 m³/sまで放流量を落とす結果となった。これは7月19日9時を初期値とした予測では予測雨量が観測値と比較して過大評価であり(図-Ⅱ.1.1.5.10)、放流量を上げて操作していたが、7月19日15時を初期値とした予測では二つ目の降雨ピークが精度良く予測され(図-Ⅱ.1.1.5.11)、過大評価が解消されたことにより放流量を下げることができると判断されたからである。貯水容量の使用率については、貯水量最大時において洪水調節容量の63.5%を使用し、規則操作よりもかなり大きい容量を使用している。下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目のピークは1,480m³/s、二つ目のピークは1,662m³/sとなり、それぞれ6%、12%程度低減することができ、台風15号と同様に規則操作と比較して効果的な洪水調節を行うことができた(図-Ⅱ.1.1.5.9)。

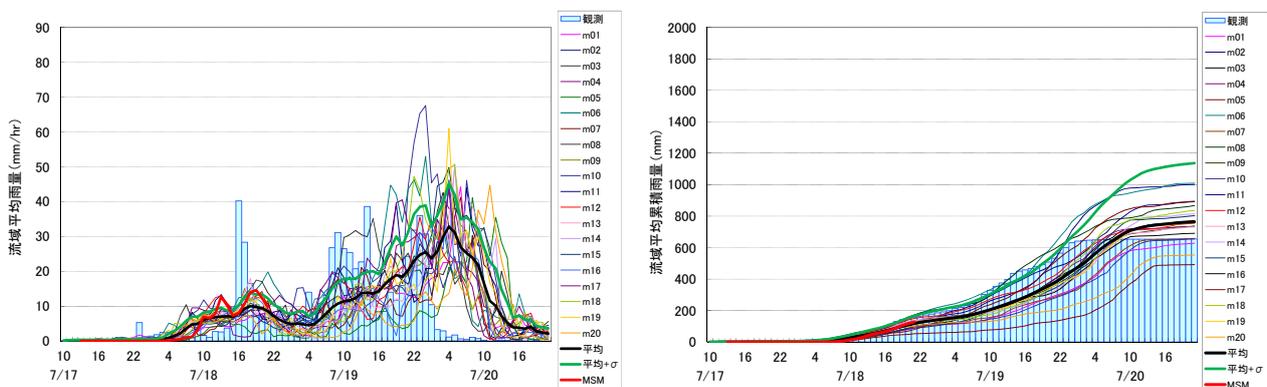


図-Ⅱ.1.1.5.6 7月17日9時(ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前)のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果(左:84時間の時系列、右:積算雨量)

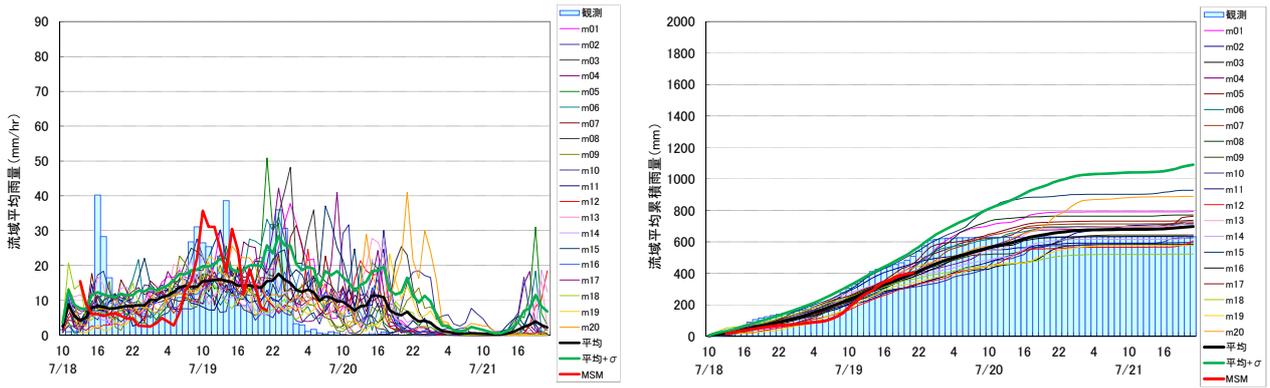


図-Ⅱ.1.1.5.7 7月18日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

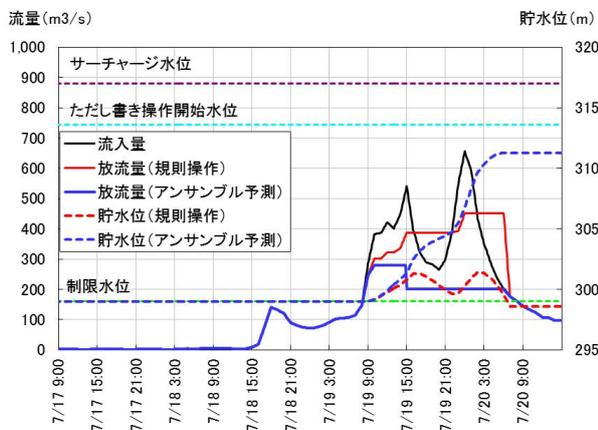


図-Ⅱ.1.1.5.8 台風6号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

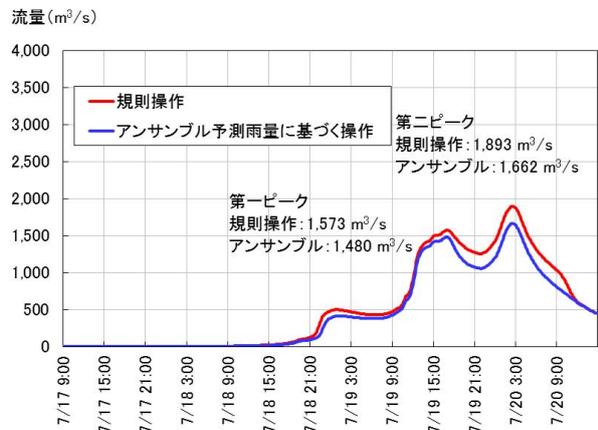


図-Ⅱ.1.1.5.9 台風6号時の両郡橋地点の流量時系列

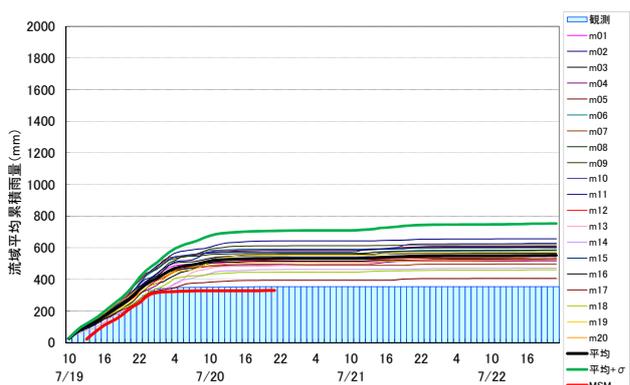
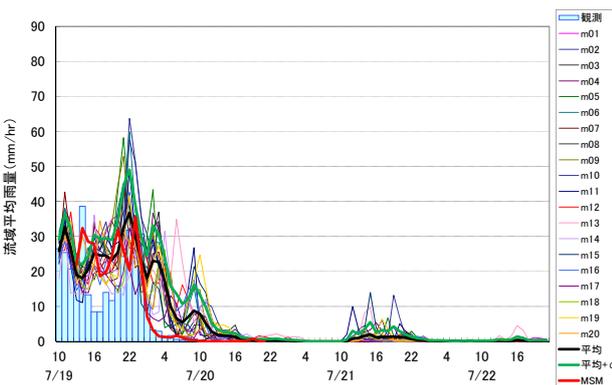


図-Ⅱ.1.1.5.10 7月19日9時（放流量280 m³/sが最適と判断された時）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

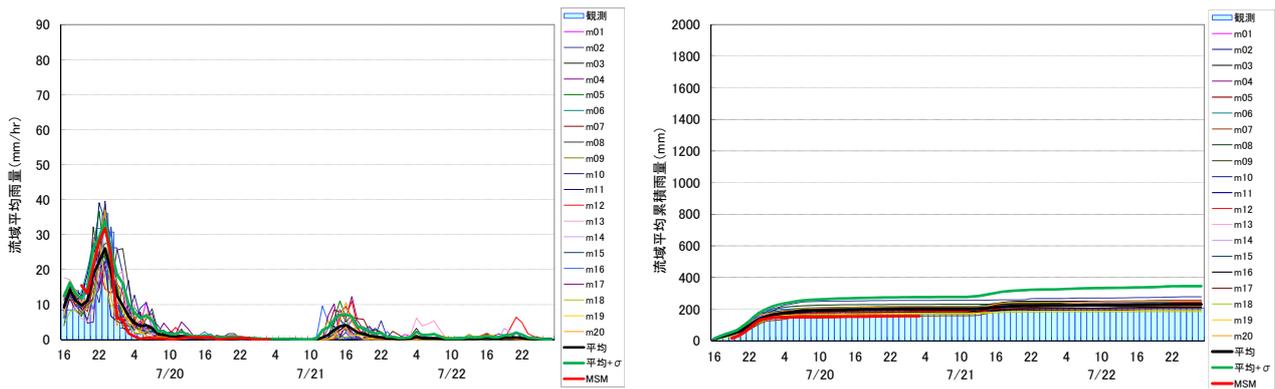


図-Ⅱ.1.1.5.11 7月19日15時（放流量 $200\text{ m}^3/\text{s}$ が最適と判断された時）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

c) 台風12号

図-Ⅱ.1.1.5.12および図-Ⅱ.1.1.5.13は、台風12号について計算されたアンサンブル予測雨量の計算結果の一部である。これらの図も台風15号、6号の結果と同様に、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達した2日前および1日前の時点初期値として予測した結果である。図-Ⅱ.1.1.5.12においては、全体的な傾向としては再現されているが、積算雨量で見るとやや過小評価傾向であることが分かる。また台風12号は非常に長い時間に渡る降雨であったため、84時間の予測であっても8月31日9時の時点では降雨の降り終わりまで見通すことができない。次に図-Ⅱ.1.1.5.13を見ると、一つ目のピークまではタイミング、雨量共に精度良く予測できている。しかし、ほとんどのアンサンブルメンバーが一つ目の山を過ぎたところで雨が降り止むと予測しているのに対し、実際にはそこから一つ目を上回る二つ目のピークが存在しており、その存在をアンサンブルメンバーの全てが予測できない結果となった。結局この二つ目のピークは実際に雨が降る直前の予測である9月3日9時や15時においても正確に予測することができなかった。この原因についても後述する。

次に、このアンサンブル予測雨量を用いてダム洪水調節操作を行った結果を図-Ⅱ.1.1.5.14に示す。この結果、規則操作の場合は洪水時の最大放流量は約 $500\text{ m}^3/\text{s}$ であり、貯水量の最大時において洪水調節容量の35.9%を使用している。下流の両郡橋地点におけるピークは2山あり、一つ目と二つ目のピーク流量はそれぞれ $1,803\text{ m}^3/\text{s}$ および $1,977\text{ m}^3/\text{s}$ となった。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、規則操作より洪水調節容量を多く使っているが、ただし書き操作に入ったことで放流量が上がり、 $580\text{ m}^3/\text{s}$ であった。ただし書き操作を行った結果、下流の両郡橋地点のピークについては、一つ目のピークは $1,548\text{ m}^3/\text{s}$ と規則操作よりも低減させることができたが、二つ目のピークは $2,052\text{ m}^3/\text{s}$ となり、4%程度増加させてしまった（図-Ⅱ.1.1.5.15）。二つ目の山のピーク流量を増加させてしまった理由としては、蓮ダムで二つ目のピーク流入を迎えた時にただし書き操作に入っているからであり、その原因としてはアンサンブル予測雨量で二つ目のピークが予測できていないため、アンサンブル予測雨量に基づく操作では一つ目のピークに対して洪水調節容量を使い切るように操作してしまっているからである。その結果として、両郡橋の結果について一つ目のピークについては規則操作よりも低減させることができたが、二つ目のピークについて規則操作よりも流量を増加させてしまう結果となった。

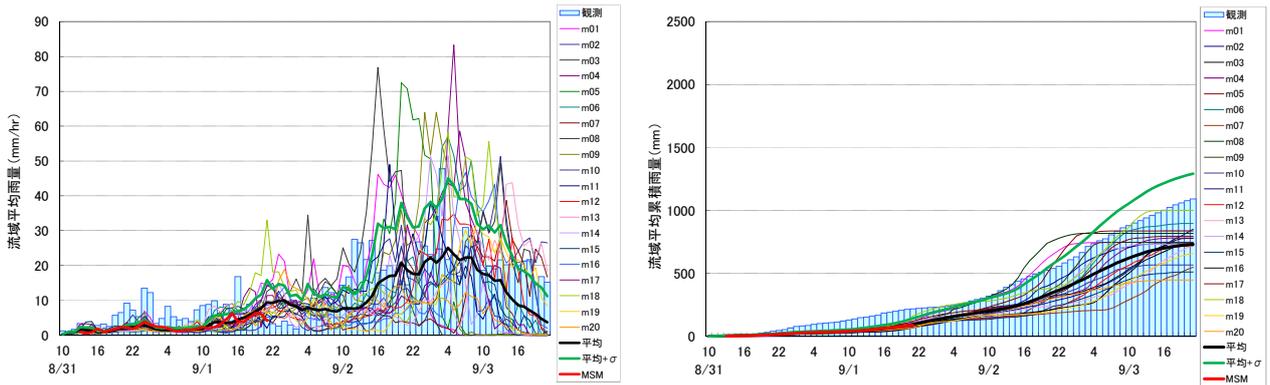


図-Ⅱ.1.1.5.12 8月31日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

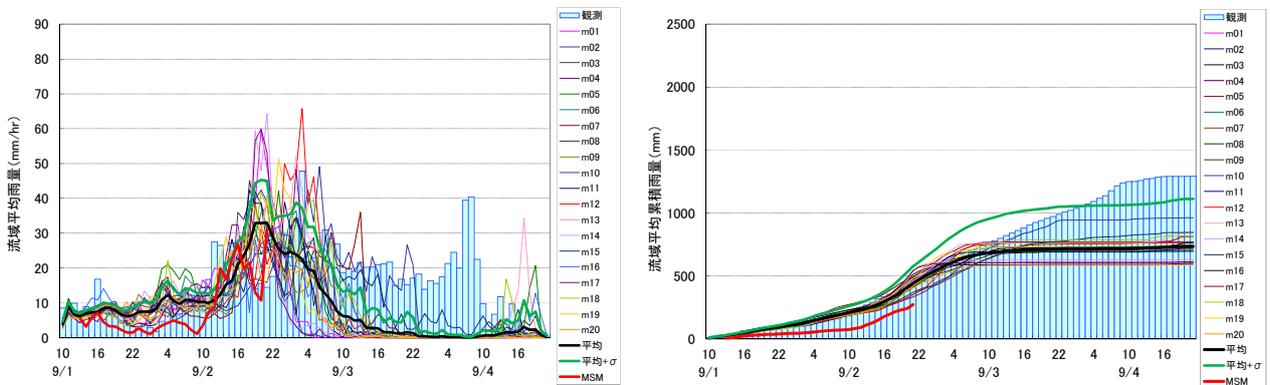


図-Ⅱ.1.1.5.13 9月1日9時（ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約2日前）のGSMを初期値とした蓮ダム流域平均雨量の84時間予測結果（左：84時間の時系列、右：積算雨量）

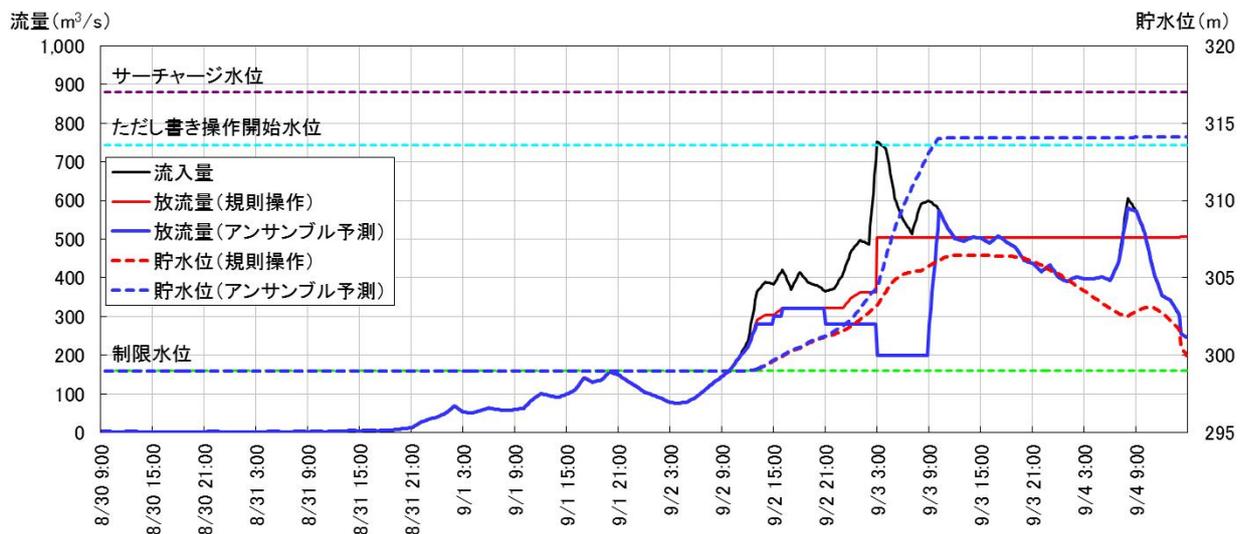


図-Ⅱ.1.1.5.14 台風12号時の蓮ダムの流入量、放流量および貯水位の時系列

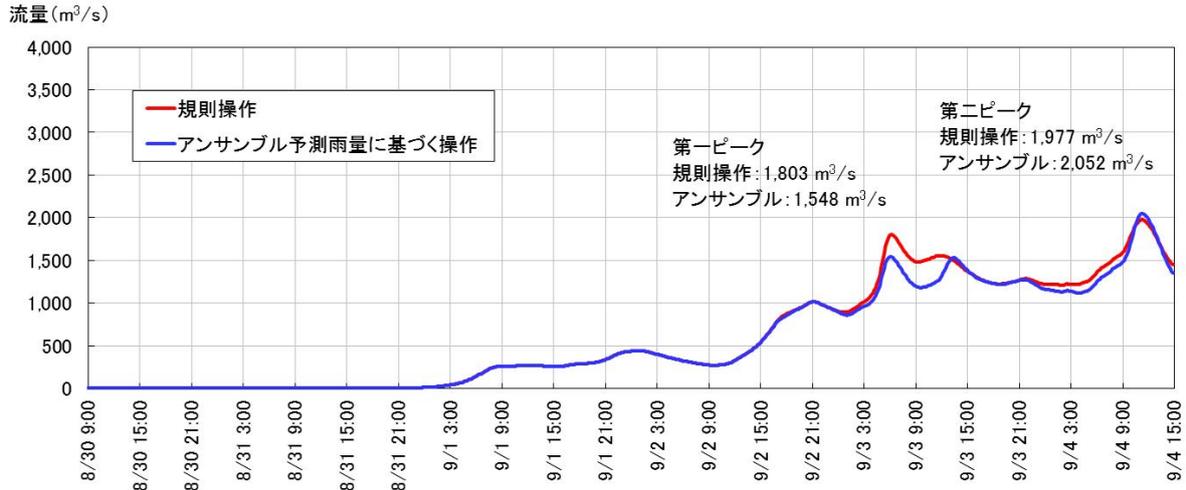


図-Ⅱ. 1. 1. 5. 15 台風12号時の両郡橋地点の流量時系列

1. 1. 5. 5 考察

ここでは、台風の予測進路および速度からアンサンブル予測雨量の精度について定性的な考察を行うことで、アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関して考察を行う。

a) アンサンブル予測雨量の精度と台風進路との関係

1. 1. 5. 4で記載したとおり、アンサンブル予測雨量の誤差の傾向も台風毎に異なることが分かった。台風15号で流入量が洪水調節開始流量に到達する約1日前である9月20日3時を初期時刻とした予測では、図-Ⅱ. 1. 1. 5. 16に示すとおりアンサンブル予測の進路・速さ共に概ね実際に近いことが分かる。その結果として図-Ⅱ. 1. 1. 5. 3に示したように予測の精度が全般的にかなり高い結果となった。次に台風6号の場合、実際の台風は紀伊半島近くまで南から近づいてきた後、一度南東に向けて進み出した。図-Ⅱ. 1. 1. 5. 17に示す7月18日9時を初期値とした予測では、アンサンブル予測は実際の進路よりも北寄りの進路を進み、かつ実際の進路よりも大回りしているため、実際よりも蓮ダム付近を通過するタイミングが遅くなり、かつ通過に長い時間を要したことから観測値よりも予測が大きくなったと考えられる。次に台風12号の場合、台風本体が紀伊半島に近づいてきた9月1日9時を初期値とした予測では（図-Ⅱ. 1. 1. 5. 18）、48時間後の予測においてはほとんどアンサンブルメンバーについて中国地方から日本海側に台風が抜けると予測されているのに対し、実際には48時間後においても四国の室戸岬近辺に位置している。さらに、72時間後の予測では全てのアンサンブルメンバーの予測について台風の中心は日本海に進出して時間が経過しているのに対し、実際には中国地方をわずかに北に出た程度である。よって、実際の台風は予測よりも長い時間をかけて四国地方から中国地方を通過したものと考えられる。これによって雨が予測よりも長時間に渡って雨が降り続ける結果となった。これが先述した図-Ⅱ. 1. 1. 5. 13の二山目の見逃しの原因である。これはアンサンブル予測計算に用いたモデルであるWRFやデータ同化手法というよりは、アンサンブル予測の境界条件として使ったGSM84時間予測がそのような予測を行っているためであると考えられる。

このようにアンサンブル予測雨量の精度は境界条件として用いているGSMの予測精度に依存しており、特に台風12号の二山目の降雨のように、GSMの予測が実際と著しく異なる予測を行っている場合、それを境界条件としたアンサンブル予測も全てのメンバーについて実際とは異なる結果を示す可能性がある。

b) アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作の課題

a)で述べた通り、アンサンブル予測雨量は境界値の予測精度に依存すると考えられ、予測と観測がほ

ば一致する場合、予測が観測よりも大きい場合、小さい場合と豪雨によって予測の精度が異なってくる。特に今回検討した3つの台風の事例の中で、ダム操作の観点から最も避けなければいけないのは台風12号で見られたアンサンブル予測雨量に基づく操作が著しく過小評価した結果として規則操作よりも結果が悪くなる操作である。アンサンブル予測雨量の精度が境界条件に依存し、アンサンブル予測のどのメンバーも実際の現象を予測できていないことが起こりうる。そうすると、実用化にあたっては例えば計算されたアンサンブル予測雨量の平均値よりも $+\sigma$ 程度大きい予測雨量を想定しておき、その予測雨量に対して提案した最適放流量決定手法を適用することが考えられる。この場合、例えば台風12号については洪水の前半から図-Ⅱ.1.1.5.14に示した放流量よりも大きい放流を行うため、洪水調節容量を温存する操作となる。結果として、アンサンブル予測雨量の全てのメンバーが二山目を見逃したとしても、温存しておいた洪水調節容量によって対応できる可能性がある。今後はこのような検討を行い、アンサンブル予測が全体的に予測を外した場合でも規則操作より下流の流量を増やさないように操作するための検討を行う必要がある。

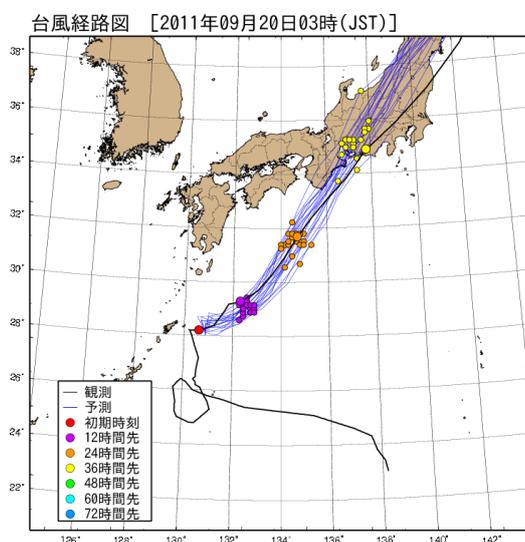


図-Ⅱ.1.1.5.16 アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風15号、9月20日3時予測）

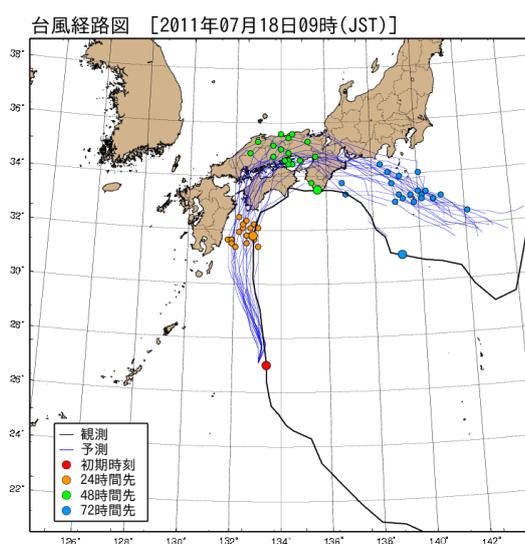


図-Ⅱ.1.1.5.17 アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風6号、7月18日9時予測）

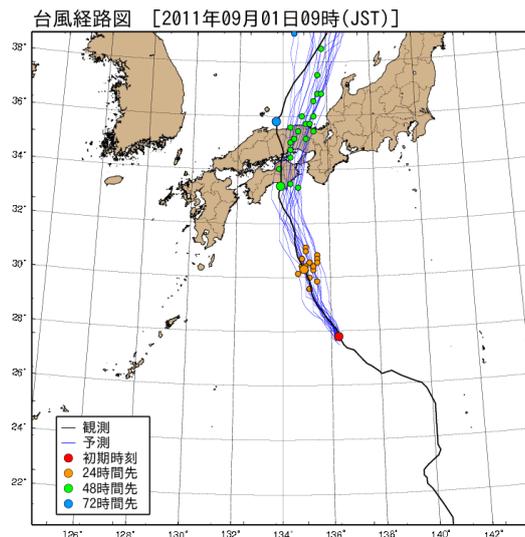


図-Ⅱ.1.1.5.18 アンサンブル予測と実際の台風進路図（台風12号、9月1日9時予測）

1.1.5.6 まとめと今後の課題

本研究のまとめと課題を以下に示す。

アンサンブル予測雨量の計算について

- GSMの84時間予測を境界値としてWRFによりアンサンブル予測雨量を計算した結果、84時間先の雨量についてもおおよそ把握することができる可能性が示唆された。これは、気象庁のMSMの33時間予測と比較して予測先行時間が非常に長く、ダムの洪水調節操作にとって非常に有益な情報となり得る。
- アンサンブル予測の精度は境界値であるGSMの予測精度に依存する。GSMの予測精度が著しく低い場合、アンサンブル予測のほぼ全メンバーが予測をはずすことがある（台風12号の二山目）。

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節操作

- アンサンブル予測雨量を利用することで、下流治水基準地点のピーク流量期待値を最小化する放流量を自動的・機械的に算出することができる。予測雨量に基づいて洪水調節操作を行う場合、現在は属人性が入り込む余地が少なからず存在していたが、この手法により自動的・機械的に放流量を決定することが可能となり、属人性が排除される。
- 台風6号、15号についてはアンサンブル予測雨量を活用した洪水調節操作によって規則操作よりも効果的な操作が行えることが分かり、規則操作と比較して下流基準地点のピーク流量を10%程度低減することができた。
- 台風12号では、アンサンブル予測雨量のほぼ全メンバーが二山目のピーク見逃すことから、一山目の流出に対して洪水調節容量を使い切ってしまう、予測で見逃した二山目についてはただし書き操作を行い、洪水調節できなかった。その結果として下流のピーク流量を規則操作と比較して増加させてしまった。アンサンブル予測雨量が全体として精度が低くなった場合においても規則操作と比較して下流の流量を増やさないような操作を今後検討する必要がある。

また、本研究で実施した内容はリアルタイムでのダム洪水調節操作を指向した手法であるが、リアルタイム運用を行うにはアンサンブル予測雨量の計算に時間を要するため、今後はリアルタイム運用に向けた課題整理を併せて検討する必要がある。

参考文献

- 青山俊樹 2007：大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザーバー、pp.1-2
- 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本守、戸谷英雄、佐藤直良、山田正 2004：流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、pp.89-94
- 飯野光則、伊藤弘之 2012：気候変動を踏まえた河道隣接地域における遊水機能の評価に関する一考察、土木学会第67回年次学術講演会講演概要集、II-049、p. 97-98
- 猪股広典、深見和彦 2007：吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発、河川技術論文集、第13巻、pp.433-438
- 岩崎伸一、松浦知徳、渡部勲 2002：地殻変動を除去した長期海水変動と海面水温の関係 -本州沿岸域-、海の研究、Vol.11(5)、pp.529-542.
- 小野田恵一 2012：流域一体となった浸水被害軽減策の実践例に関する調査、国土技術政策総合研究所資料、第665号
- 柏井条介、土屋修一、石神孝之 2008：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第462号
- 気象庁 2007：気候変動監視レポート
- 北田悠星、菊地慶、岡部真人、山田正 2010：気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案、水工学論文集、第54巻、pp.523-528
- 国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010：平成22年7月14日～14日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成22年7月15日
- 国土交通省東北地方整備局 2011：台風15号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成23年9月23日
- 国土地理院 2003.：「2000年度平均成果」について -全国の水準点の高さ（標高）を改定して1年-、<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/level/2000level.html>、参照 2009-06-03.
- 腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田正 2006：確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会
- 佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也 2008：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、第21巻、4号、pp.296-313
- 下坂将史、呉修一、山田正、吉川秀夫 2009：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集B、Vol.66 No.2、pp.106-122
- 鈴木俊朗、寺川陽 1996：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発、土木技術資料、第38巻、10号、pp.26-31
- 東京大学など合同研究チーム 2004：2004年9月16日報道発表
(<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2004/20040916/20040916-2.html>)
- 土木学会都賀川水難事故調査団 2009：都賀川水難事故調査について、平成20年度河川災害に関するシンポジウム
- 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本守、山田正、吉川秀夫 2006：ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案 土木学会論文集B Vol.62 No.1、pp.27-40
- 鳥居謙一 2012：ダム管理の高度化に向けて、土木学会水工学に関する夏期研修会講義集
- 鳥居謙一、猪股広典 2012：予測降雨を活用したダム洪水調節効果の評価、国総研レポート2012、pp.95
- 蓮ダム工事事務所 1993：櫛田川水系蓮ダム工事誌
- 三石真也、尾関敏久、角哲也 2011a：WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性

- 検討、水文・水資源学会誌、第24巻、2号、pp.110-120
- 三石真也、角哲也、尾関敏久、矢神卓也 2011b：降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究、ダム工学、第21巻、4号、pp.242-250
- 森英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治 2008：ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成20年度土木学会関西支部年次学術講演会、pp.II-59
- 森信人、志村智也、中條壯大、安田誠宏、間瀬肇 2011.：マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測、土木学会論文集B2（海岸工学）、第67巻、pp.1191-1195.
- 吉野純、飯田潤士、安田孝志 2011：モデルアンサンブル予報による2010年7月可児豪雨の予測可能性、水工学論文集、第55巻、S475-S480
- 和田一範、村瀬勝彦、富澤洋介 2004：気象予測データの利用可能性に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第210号
- 和田一範、村瀬勝彦、富澤洋介 2005：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集No.796、II-72、pp.23-37
- Matsuura T., Sato T., Fukami K., Kaneki M. 1999.: 直交二偏波レーダにより観測された雨滴粒径分布の時空間分布特性、Proceedings of 2002 Annual conference, Japan society Hydrology and water resources, pp.18-19.
- Nakakita E., Takehata H., Nakagawa K. 2007: Validation of Rainfall Intensity Estimated using the Latest C-Band Polarimetric Radar, Annual Journal of Hydraulic Engineering, 51, pp.325-330. (in Japanese)
- Yoshino F., Mizuno M., Mizuno H., Igarashi H. 1988.: Observation of Precipitation using Dual-Polarization Doppler Radar, Proceedings of the Japanese Conference on Hydraulics, Vol.32, pp.383-388.(in Japanese)
- Alexander V.R., Terry J. S., Donald W. B., Pamela L. H., Scott E.G. 2005: The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.86, No.6, pp.809-824.
- Bringi VN., Chandrasekar V. 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge University Press, pp.636.
- Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K. 1992: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, 28(4), pp.1015-1031
- Hiromu Seko, Takemasa Miyoshi, Yoshinori Shoji, Kazuo Saito 2011: Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, Tellus, 63A, pp.402-414
- IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- Iwanami K., Misumi R., Maki M., Wakayama T., Hata K., Suto M. 2001: Development of Multiparameter Radar System on Mobile Platform, Preprints 30th Inter. Conf. Radar Meteor., pp.104-106.
- Iwanami K., Le Bouar E., Testud J., Maki M., Misumi R., Park S-G., Suto M. 2003: Application of the Rain Profiling Algorithm “ZPHI” to the X-band Polarimetric Radar Data Observed in Japan, Proc. 31st Conf. Radar Meteor., pp.274-277.
- Maki M, Iwanami K, Misumi R, Park S-G, Moriwaki H, Maruyama K, Watabe I, Lee D-I, Jang M,

- Kim H-K, Bringi VN, Uyeda H. 2005b: Semi-Operational Rainfall Observations with X-band Multi-parameter Radar, *Atmos. Sci. Letters*, 6, pp.12-18
- Maki M., Park S-G., Bringi VN. 2005a: Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimate of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, pp.871-893.
- Park S-G., Maki M., Iwanami K., Bringi VN., Chandrasekar V. 2005: Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X-band Wavelength. Part II: Evaluation and Application, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, pp.1633-1655.
- Report of the 2011 Ocean Surface Topography Science Team (OSTST) Meeting, Edited by J. Willis, Jet Propulsion Laboratory, Organized by NASA, CNES, NOAA and EUMETSAT.
- Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill 2008a: A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part I: Observing System Simulation Experiment, *Monthly Weather Review*, Vol.136, pp.5116-5131
- Xuguang Wang, Dale M. Baker, Chris Snyder, Thomas M. Hamill 2008b: A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part II: Real Observation Experiments, *Monthly Weather Review*, Vol.136, pp.5132-5147

発表論文

- 野口賢二、諏訪義雄、五味久昭、松藤絵理子 2010 : 気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて、*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*、第 66 巻、pp.1256-1260.
- 野口賢二、福濱方哉、竹内一浩、山本享 2008. : 天気図から抽出した擾乱データセットを用いた近年の海岸災害と気象の関係、*海岸工学論文集*、第 55 巻、pp.1336-1340.