博士論文

応答曲面法によるため池破堤リスクの簡易評価に関する研究

Simplified Method for Estimating Risks due to Earth-dam Breaches Using Response Surface Method

2016 年 3 月

水 間　啓 慈

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

- 目　次 -

第 1 章　序　論 …… 1
1.1　研究の背景と目的 …… 1
1.2　リスク評価の基礎となる概念や考え方 …… 4
1.2.1　リスクの定義 …… 5
1.2.2　自然災害に対するリスク評価 …… 7
1.2.3　狭義のリスクと広義のリスク …… 11
1.2.4　リスクと重要度 …… 13
1.3　既往の研究と研究動向 …… 14
1.3.1　ため池や河川等の破堤時の洪水被害額の算定に関する研究と動向 …… 14
1.3.2　社会資本整備のリスク評価に関する研究と動向 …… 15
1.3.3　複雑な手法の簡略化に応答曲面法を用いる研究と動向 …… 17
1.4　本論文の構成 …… 19
1.5　本論文における用語の定義 …… 20

第 2 章　研究に適用した基礎理論 …… 23
2.1　氾濫解析手法 …… 23
2.2　実験計画法 …… 26
2.2.1　実験計画法の概要 …… 26
2.2.2　直交表に基づく感度解析 …… 27
2.2.3　一様計画を用いた応答曲面の推定 …… 29
2.3　擬似降雨の作成方法 …… 32
2.3.1　降雨の連続性に関する条件 …… 32
2.3.2　正規乱数の生成と実降雨分布に基づく乱数への変換 …… 34
2.3.3　極値分布関数を用いた総降雨量の調整 …… 36

第 3 章　資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定 …… 39
3.1　緒　論 …… 39
3.2　被害額算定手法 …… 39
3.2.1　被害額算定に用いる資産データと適用方法 …… 39
3.2.2　資産データの適用例 …… 41
3.3　被害額算定手法の適用例 …… 43
3.3.1　モデル地区の概要 …… 43

3.3.2　氾濫解析結果･･･ 44
3.3.3　被害額算定結果･･ 46
3.4　資産データの適用方法の比較と実用化に向けた留意点･････････････････････ 48
3.4.1　資産データの適用方法の比較･････････････････････････････････ 48
3.4.2　実際に想定被害額を比較する際の留意点･････････････････････････ 49
3.5　結　論･･･ 49

第 4 章　応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定･･･････････････････････ 51
4.1　緒　論･･･ 51
4.2　影響因子の候補の選定･････････････････････････････････････ 52
4.2.1　因子選定の考え方･･････････････････････････････････････ 52
4.2.2　検討対象とする因子････････････････････････････････････ 52
4.3　因子の感度解析と応答曲面の作成･････････････････････････････ 53
4.3.1　実験計画法の適用方法･･････････････････････････････････ 53
4.3.2　感度解析結果･･･ 54
4.3.3　応答曲面の作成方法と結果･･･････････････････････････････ 55
4.4　応答曲面の他地区への適用と修正･････････････････････････････ 67
4.4.1　応答曲面の適用結果････････････････････････････････････ 69
4.4.2　応答曲面の修正結果････････････････････････････････････ 69
4.5　結　論･･･ 72

第 5 章　応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価･･････････････････････････ 75
5.1　緒　論･･･ 75
5.2　破堤確率の算定･･･ 75
5.2.1　擬似降雨の作成･･･････････････････････････････････････ 75
5.2.2　破堤確率の算定方法････････････････････････････････････ 76
5.3　破堤リスクの簡易評価･････････････････････････････････････ 76
5.3.1　リスク評価手法･･･････････････････････････････････････ 76
5.3.2　リスク評価結果･･･････････････････････････････････････ 78
5.4　応答曲面を用いたリスク評価の実用化に向けて･････････････････････ 80
5.4.1　応答曲面を用いたリスク評価の精度向上に向けて･････････････････ 80
5.4.2　応答曲面を用いたリスク評価の適用に向けて･････････････････････ 80
5.5　結　論･･･ 81

第 6 章　結　論･･ 83

6.1　資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定(第3章)・・・・　84
6.2　応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定(第4章)・・・・・・・・・・・・・・・・・　85
6.3　応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価(第5章)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　85

参考文献・・・　87

Abstract・・　95

摘　要・・・　97

参考論文(基礎となる学術論文)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　99

その他の論文・・　101

謝　辞

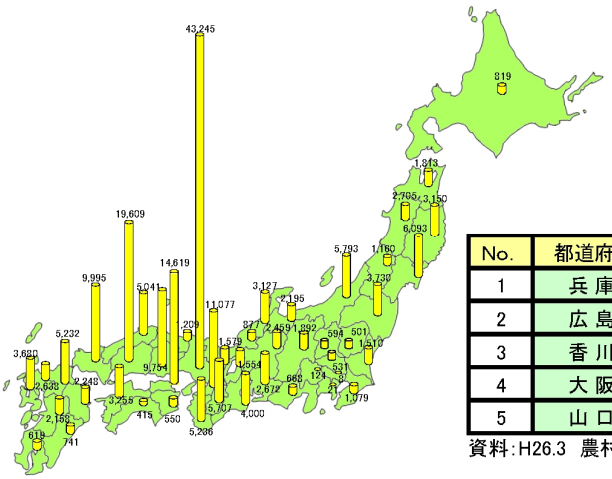
第 1 章　序　論

1.1　研究の背景と目的

我が国の農業用ため池は全国に約 20 万箇所存在し，西日本を中心に全国に分布している．特に瀬戸内地域は年間を通じて降水量が少ないことから，古くからため池が築造され全国の約 6 割が偏在する．兵庫県の約 4 万箇所をはじめとして，広島県に約 2 万箇所，香川県, 大阪府, 山口県, 岡山県にもそれぞれ約 1 万箇所のため池が存在している（**Fig.1-1**）．また，受益面積が 2ha 以上のため池は約 6 万箇所存在するが，このうちの約 7 割は江戸期以前に築造されたものである（**Fig.1-2**）．

ため池が密に存在する状況として岡山平野のため池の分布を例示する（**Fig.1-3**）．この図は国土地理院発行の基盤地図情報（縮尺レベル 25,000）を背景図とし，農業基盤情報基礎調査（農林水産省農村振興局整備部設計課計画調整室，2010）のため池等の位置情報を表示させたものである．

このように，特定の地域にため池が密集するとともに，その多くが老朽化し，大雨や地震を契機に決壊等の災害発生の危険が生じている．さらには，ため池の維持管理は，水利組合や集落など受益者を主体とした組織により担われてきたが，農村地域の高齢化，農家戸数の減少や土地利用の変化などによる管理および監視の体制の脆弱化や地域の防災力の低下が懸念されている．山口県では受益面積が 0ha や受益戸数が 0 戸のため池が 1 割を超



No.	都道府県名	箇所数	No.	都道府県名	箇所数
1	兵 庫 県	43,245	6	岡 山 県	9,754
2	広 島 県	19,609	7	宮 城 県	6,093
3	香 川 県	14,619	8	新 潟 県	5,793
4	大 阪 府	11,077	9	奈 良 県	5,707
5	山 口 県	9,995	10	和 歌 山 県	5,236

資料：H26.3　農村振興局調べ　　全国合計　197,742

Fig.1-1　全国のため池の分布状況

（農林水産省 HP/http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/）

えるとの報告（橋本ら，2014）があるなど，十分な管理や見回りが行われず老朽化の急速な進行が危惧される事態となっている．東日本大震災におけるため池の決壊被害の発生や，近年の記録的な集中豪雨の頻発等を背景として，ため池の機能を保全するための遅滞ない対策の実現が急務とされている．

このような状況に対し，平成 27 年 3 月に国が決定した食料・農業・農村基本計画では「混住化が進行する農村地域において，集中豪雨の増加や大規模地震の発生等、災害リスクの高まりに対応し，国土強靱化基本計画（平成 26 年 6 月閣議決定）等を踏まえ，洪水被

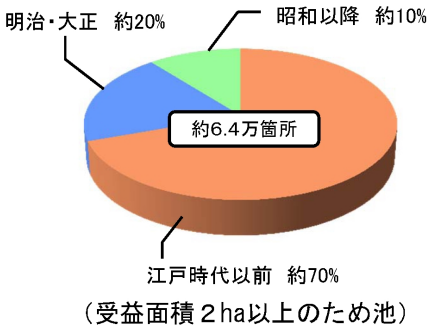


Fig.1-2　ため池の築造年代
（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会，2014）

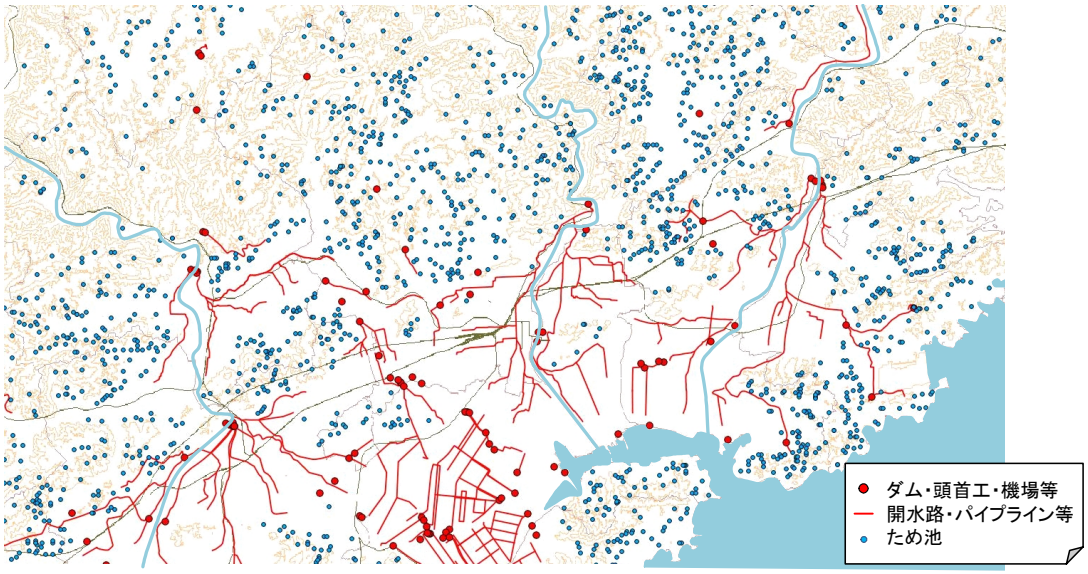


Fig.1-3　岡山平野のため池の分布

害防止等のハード対策とため池管理体制の構築等のソフト対策を適切に組み合わせて農村地域の防災・減災対策を推進する」ことが計画的に講ずべき施策に位置づけられている．具体的には，地域の実情やリスク評価に応じた施策の重点化や優先順位付けを行いつつ，効率的に対策を推進することとされている．ここで対策の拠り所とされる「国土強靱化基本計画」の基本的な進め方には，予めリスクを特定，分析した上で，脆弱性を評価し，リスクに対する対応方策の検討，重点化・優先順位を付けた対策の計画的実施，その結果の評価へと続く PDCA サイクルの徹底が明記されている．

このような考え方を踏まえ，国は「農村地域防災減災事業」を創設し，地震・集中豪雨等による災害を防止し，地域が策定する計画に基づき，優先順位に応じて農村地域の防災力の向上を図るための総合的な防災・減災対策を推進している．このなかで農業用ため池については，災害の未然防止を図るための防災重点ため池を対象とした豪雨対策や地震対策等のハード整備のほか，ため池の一斉点検結果を踏まえた防災・減災対策として，監視・管理体制の強化やハザードマップの作成等の減災対策，ハード整備を促す権利関係の調整等が進められている．

しかし，その実現には様々な課題が存在する．毛利（2013）は，老朽化は全ての施設にいつの間にか忍び寄る「緩やかな震災」であるとした上で，膨大な数の老朽ため池を直ちに全面改修することが事実上不可能であると考えると，リスクを可能な限り低減し，レジリエンスを高めるために地域住民が主役となってため池を取り巻く地域の減災を進める活動がますます重要であると指摘している．そこで，減災対策に取り組む上で有用なツールの一つとなるのが「ため池ハザードマップ」であり，その作成に資する簡易な氾濫解析ツール（谷，2005）をもとに，より高い精度で被害想定範囲が算定できるようにシステムが改良（川本ら，2013）され，「ため池ハザードマップ作成の手引き」とともに都道府県等に提供されている．ハザードマップを作成する基礎となる氾濫解析結果を用いて対策の優先度を評価しようとする取り組みも一部で見られるようになっており，たとえば，山口県では，ハザードマップにより氾濫区域を想定し，その結果をもとに決壊時の下流域への影響度を数値化することによって防災・減災対策の優先度を評価する試みが行われている（阿武ら，2013）．

また，これ以外にも，ため池のリスク管理に係る既往の研究において，地震や豪雨による決壊時の氾濫流の拡がりを予測する解析手法は数多くの提案（例えば，堀ら，2010）がなされている．しかしながら，解析結果をもとに被害額を算定するプロセスについては，

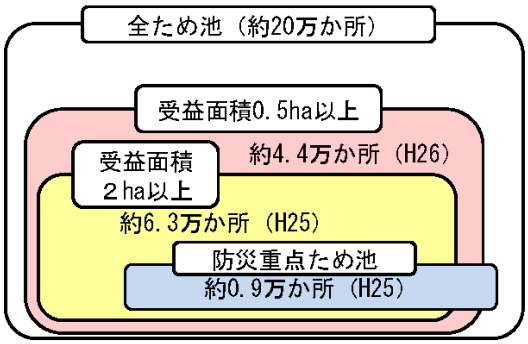


Fig.1-4　ため池の分布（食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会，2014）

対策の概略検討段階で解析結果をもとに決壊時の被害額を簡易に算定し，優先度の高いため池を絞り込むための実用的な手法は提案されていない．農林水産省農村振興局整備部（2015）が規定する災害防止効果の算定手法は，詳細な調査等を要することから，行政機関の担当職員自らが担える労力のみで実施することが求められる概略検討への適用は現実には困難である．決壊した場合に下流域への影響が大きいとされる防災重点ため池のみでも，その数は約 9 千箇所にものぼり（**Fig.1-4**），これらを対象に実際に充てられる費用や労力の限度を勘案しながら，対策の優先度を簡易に評価できる実用的な被害額算定手法が求められている．

以上のような背景を踏まえ，本研究では，農業水利施設に関する災害のなかで最も甚大な被害を生じさせる事象の一つである農業用ため池の破堤に焦点を当て，想定される被害額やリスクを推定し，これに基づき機能保全対策の対象地区を決定するプロセスの効率化に資する実用的な手法の構築を目的として，以下の研究を行う．

①資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定

②応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

③応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価

1.2　リスク評価の基礎となる概念や考え方

本研究ではリスクの簡易評価を対象としていることから，まず，リスクの定義，国内外のリスクに関連する規定，本研究で対象とする自然災害に関するリスク評価の基礎となる概念や考え方等について概括し，本研究で取り扱うリスク評価との関係について簡単に述べる．

1.2.1　リスクの定義

従来，一般的に用いられてきたリスクの定義を以下に示す（野口，2009）.

米国原子力規制委員会：リスク＝発生確率 × 被害の大きさ

マサチューセッツ工科大学（MIT）：リスク＝潜在危険性 / 安全防護対策

ハインリッヒの産業災害防止論：リスク＝潜在危険性が事故となる確率 × 事故に遭遇する可能性 × 事故による被害の大きさ

これらのうち，特に米国原子力規制委員会の定義が広く知られており，リスクを好ましくない影響と発生確率の積，すなわち数学的な期待値であるとの定義が一般によく用いられている．本研究におけるリスク評価も，この定義に基づいている.

一方，我が国で「リスク」は元来なじみのない言葉であり，分野や対象によって様々な使われ方をしてきた．そのため，リスクの定義も曖昧であり，例えば，武井（1987）は，「リスク」とは，少なくとも①損失の可能性，②損失の確率，③損失の原因（ペリル），④危険な状態（ハザード），⑤損害や損失にさらされている財産・人，⑥潜在的損失，⑦実際の損失と予想した損失の変動，⑧不確実性という異なった意味を持っているとしている.

その後, 阪神淡路大震災を契機に危機管理システムの検討が進められ, 2001 年 3 月に JIS Q 2001「リスクマネジメントシステム構築のための指針」が定められるに至った．そこには，リスクマネジメント活動を組織的に実行していくためのマネジメントシステム（Risk Management System : RMS）の枠組みと諸要素を提示する指針が示されている．中嶋（2005）は，JIS Q 2001 に基づき，リスクマネジメント業務の各要素間の関係を **Fig.1-5** のように整理している．なお，この図からもわかるように，JIS Q 2001 にはリスクの管理のほか、緊急事態の対応や復旧についても位置づけられている.

これと時期を同じくして，国際的な規格の標準化も進められてきている．ISO（国際標準化機構）/IEC（国際電気標準会議）によって，多分野で使用されるリスクマネジメントについて共通の理解を促すための用語の標準化が 2002 年に行われ，ガイド 73：2002 として取りまとめられている. そのなかで, リスクは,「事象の発生確率と事象の結果の組合せ」と定義され，その備考に「結果は好ましいものから，好ましくないものまで変動することがある」と記述されており，リスクが必ずしも危険等の好ましくない影響をもつものだけに限定されない概念であることが示されている．その後，さらに検討が加えられ，2009 年に発行されたガイド 73：2009 では，リスクは,「目的に対する不確かさの影響」と定義されている．これについて，野口（2009）は，目的の達成に対して，何らかの原因（原因の

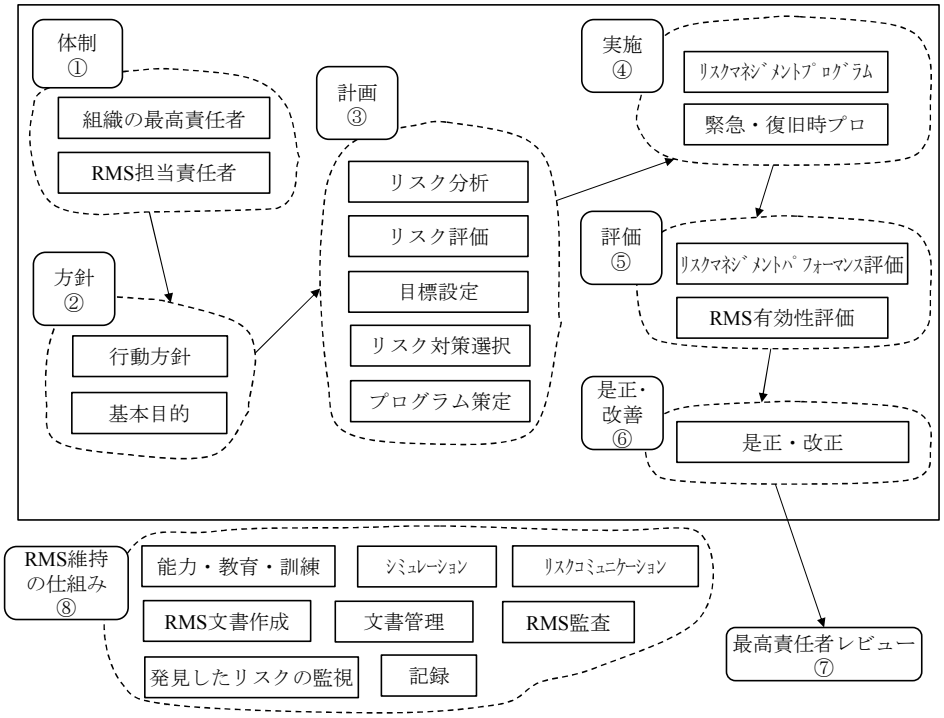


Fig.1-5　JIS Q 2001 のリスクマネジメントシステムの概念図（中嶋，2001）

不確かさ）が，何らかの条件下（起こりやすさや顕在化シナリオの不確かさ）によって起こる何らかの影響（影響の不確かさ）の可能性をリスクとして定義したものと説明している．

国際的なリスクマネジメントの標準化は，以上のように，まず用語を対象に開始された後，2009 年 11 月にリスクマネジメントの指針規格である ISO31000 が発行されている．そのなかで，リスクマネジメントの原則について次のように記述されている．

- 価値を創造し，保護するものである．
- 好ましくない影響を管理するプロセスにとどまらず，組織のあらゆるプロセスにおいて不可欠な部分であり，意思決定の一部である．
- 組織に合わせて作られ，人的及び文化的要因を考慮に入れることが重要である．
- 組織の継続的改善を促進するものとして位置づけており，透明性があり，かつ，包括的であり，周辺状況によって変化するリスクに対応することが重要である．

ISO31000 に示されているリスクマネジメントプロセスを **Fig.1-6** に示す．

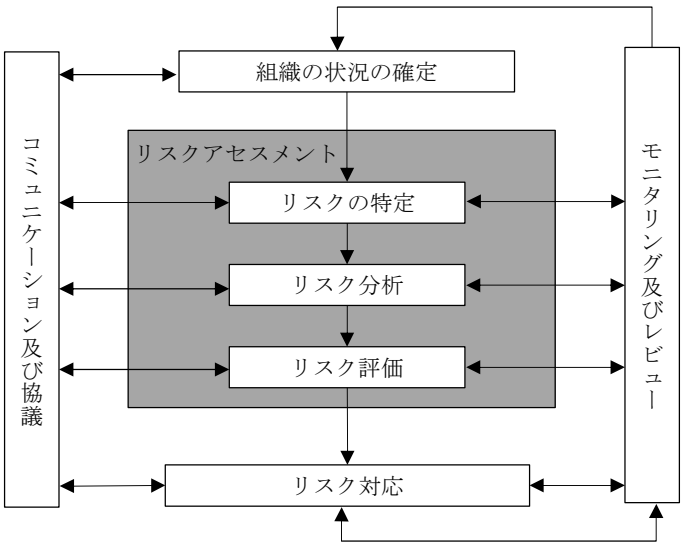


Fig.1-6　ISO31000 のリスクマネジメントプロセス（内田，2011）

この図に照らせば，本研究は，豪雨によるため池の破堤事象をリスクとして予め特定した上で，そのリスクが顕在化した場合の被害の大きさ（影響）や起こりやすさ（発生確率）を簡易に定量化するための分析手法を考案し，ため池の管理者や所有者等の対策を選択する意思決定者がリスクを評価し対策の優先度等を検討するための情報として提示することを目指すものと言える．

なお，ISO31000 の発行を受けて，その内容に即して JIS Q 2001 は改定され，JIS Q 31000 として 2010 年 9 月に公開されている．前述のように緊急事態の対応や復旧についても記述されていた JIS Q 2001 に対し，ISO31000 や JIS Q 31000 は，リスクを組織運用の一部として管理することに重点が置かれていることが特徴的である．

1.2.2　自然災害に対するリスク評価

治水事業における効果を体系化した図を **Fig.1-7** に示す（宮田ら，1984）．治水経済調査マニュアル（案）（国土交通省河川局，2005）では，このうち主に有形資産被害軽減効果を便益とし，氾濫解析を通じて得られる洪水規模別浸水深をもとに被害軽減額の年期待値を算出し，事業完了後に毎年その効果が発現するとして，事業の総便益を算出することとされている．これはすなわち，期待総費用そのものを便益としてとらえる考え方を採用していることを意味する．本研究で対象とするため池整備による災害防止効果の算出方法は農

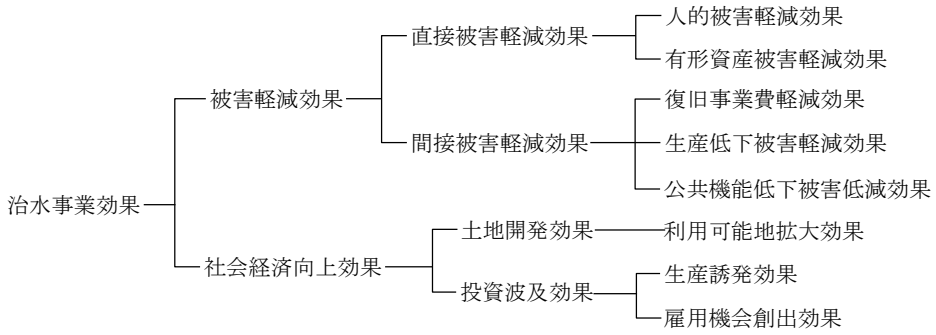


Fig.1-7　治水事業における効果体系（宮田ら，1984）

林水産省によって定められている（農林水産省農村振興局整備部，2015）が，その規定も，これに準拠している．このような国が定める事業便益算定の考え方に即して，洪水リスク評価にも，事業を実施することによる期待被害軽減額を指標とする手法が一般によく採用されている．国が規定する老朽化したため池整備を行う事業実施前後の想定被害額の算定項目と算定手法の概要を **Table1-1** に示す．この表のとおり，ほとんどの項目の被害額は，最大浸水深の区分ごとに定められている被害率や，対象となる資産の評価額等の値と，氾濫解析から得られる最大浸水深の各区分に該当する世帯数や従業者数，農地面積等をもとに算出することとされている．本研究の第 3 章以降で被害額を積み上げて算出する際にも，**Table1-1** に示す手法に基づいて被害額を計算している．

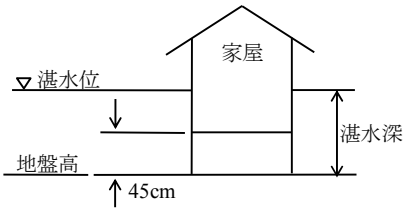
一方，地震リスク評価における被害形態の分析や発生確率及び損失の定量化にはイベントツリーがよく用いられている．地震リスクマネジメントの流れを整理したフローチャートの一例（水谷，2003）を **Fig.1-8** に，地震リスク評価に用いるイベントツリーの一例（星谷ら，2002）を **Fig.1-9** にそれぞれ示す．ここで，**Fig.1-8** は ISO31000 の公開前の文献に掲載されたものであるため，フローチャートの構成要素をリスク評価とリスクマネージメント（リスクマネジメント）に区分する考え方が ISO31000 と異なるが，原文のまま引用している．**Fig.1-9** のイベントツリーは，地盤崩壊の発生確率が 0.2 から 0.1 に，振動被害の発生確率が 0.4 から 0.3 に，それぞれ予防対策により軽減され，その結果，損失期待値 R が 35.2%から 22.83%に減じられるケースを示している．

なお，先に述べた洪水リスク評価における期待被害軽減額の算出手法についても，**Fig.1-10** のようにイベントツリーを用いて表現することができる（谷口ら，2006）．

Table 1-1　ため池整備に係る被害額の算定項目と算定手法の概要

項目		計上する被害と算定方法の概要
①農地	耕土流出	堤体決壊部の直下にあり最大浸水深が 1.0m 以上の区域を対象とし，平均耕土流出深の標準を 0.3m として復旧に要する費用（流出した耕土に代わる購入耕土等で復旧する費用）及び収穫が皆無となる農業粗収益額を被害額として計上
	土砂埋没	堤体決壊部及び耕土流出区域の直下にあり，最大浸水深が 0.5m 以上の区域の土砂埋没被害（ただし，耕土流出被害発生区域とは重複しない）について，想定される復旧費用（流出した耕土等の土石を近隣の土捨場に搬出し復旧する費用）及び収穫が皆無となる農業粗収益額を被害額として計上
	浸水した農地の作物被害	上記の耕土流出区域と土砂埋没区域のいずれにも属さない浸水区域（水稲は 30cm で 24 時間までの湛水を許容、畑作物は無湛水（標準的な畑作の場合には，ほ場面に不陸があること等から排水解析上 5cm 未満を含めて無湛水という））で発生する減収被害について，国が規定（農林水産省農村振興局整備部，2015）する作物単価や減収率をもとに計上
	水源を失うことによる受益地の干ばつ被害	ため池の受益地であって，上記の浸水による被害区域のいずれにも該当しない区域の干ばつ被害について，国が規定（農林水産省農村振興局整備部，2015）する作物単価や減収率をもとに計上
	農業用施設の損壊	農道，用水路，排水路等の洪水による全壊又は一部損壊した場合の復旧に係る費用を計上
②建物	農業用納屋	最大浸水深の区分ごとの被害率[注)]と農漁家 1 戸あたりの償却・在庫資産評価額[注)]を掛け合わせた値に，浸水農漁家戸数を乗じて農漁家償却・在庫資産の被害額を算出し計上
	住居	農家、非農家に関わらず，最大浸水深の区分ごとの被害率[注)]に延べ床面積あたりの家屋評価額[注)]や 1 戸あたりの家財評価額[注)]を掛け合わせた値に，浸水家屋の延べ床面積や浸水戸数の値をそれぞれ乗じて被害額を算出し計上
	事業所・公共建物	最大浸水深の区分ごとの被害率[注)]と産業分類別の従業者 1 人あたりの償却・在庫資産評価額[注)]を掛け合わせた値に，浸水事業所の従業者数の値を乗じて事業所償却・在庫資産の被害額を算出し計上
③間接被害	営業停止損失	最大浸水深の区分ごとの営業停止日数[注)]と産業分類別の従業者 1 人 1 日あたりの付加価値額[注)]を掛け合わせた値に，浸水事業所の従業者数の値を乗じて営業停止損失額を算出し計上
	家庭における応急対策費用	最大浸水深の区分ごとの清掃日数[注)]に 1 戸あたりの清掃労働単価[注)]と浸水戸数を乗じて算出する清掃労働対価及び最大浸水深の区分ごとの飲料水の購入等の 1 戸あたりの代替活動の単価[注)]に浸水戸数を乗じて算出する代替活動等の出費に係る被害額を計上
	事業所における応急対策費用	最大浸水深の区分ごとの事業所あたりの被害単価[注)]に浸水事業所数を乗じて代替活動等の出費に係る被害額を算出し計上（事業所の清掃労働対価は営業停止損失との重複評価を避けるため計上しない）
④道路・鉄道	復旧に要する経費	洪水により全壊または一部損壊した場合の復旧に要する費用を計上

注) 最大浸水深は，床下浸水を湛水位－地盤高＜45cm，床上浸水を湛水位－地盤高≧45cm に区分した上で，さらに床上浸水を床上 50cm 未満，床上 50～99cm，床上 100～199cm，床上 200～299cm，床上 300cm 以上に区分するとの考え方や，区分ごとの被害率，対象となる資産評価額等の値が，治水経済調査マニュアル（案）（国土交通省河川局，2005）に示されている．



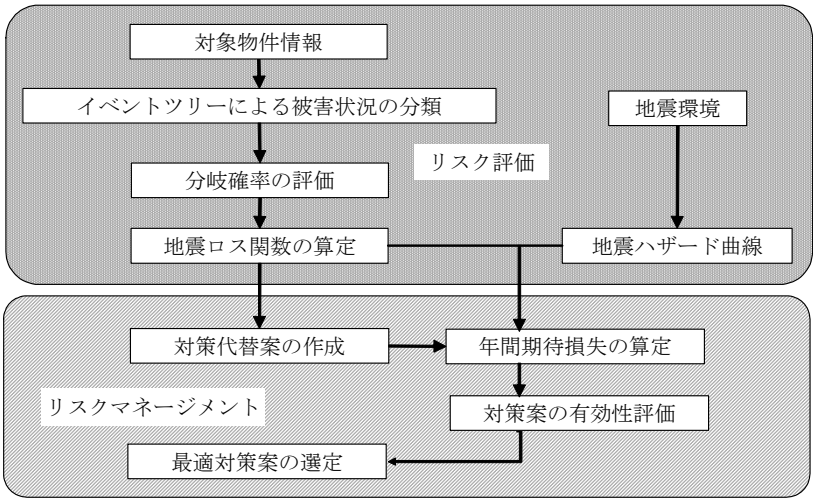


Fig.1-8　地震リスクマネジメントのフローチャートの例（水谷，2003）

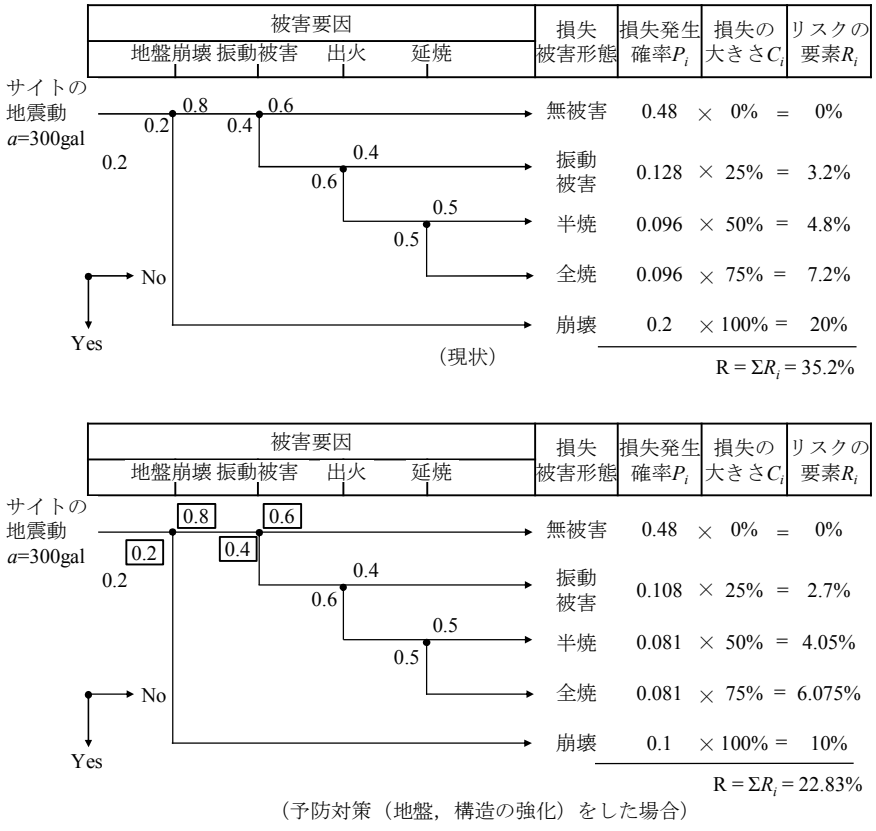


Fig.1-9　地震リスクマネジメントのイベントツリーの例（星谷ら，2002）

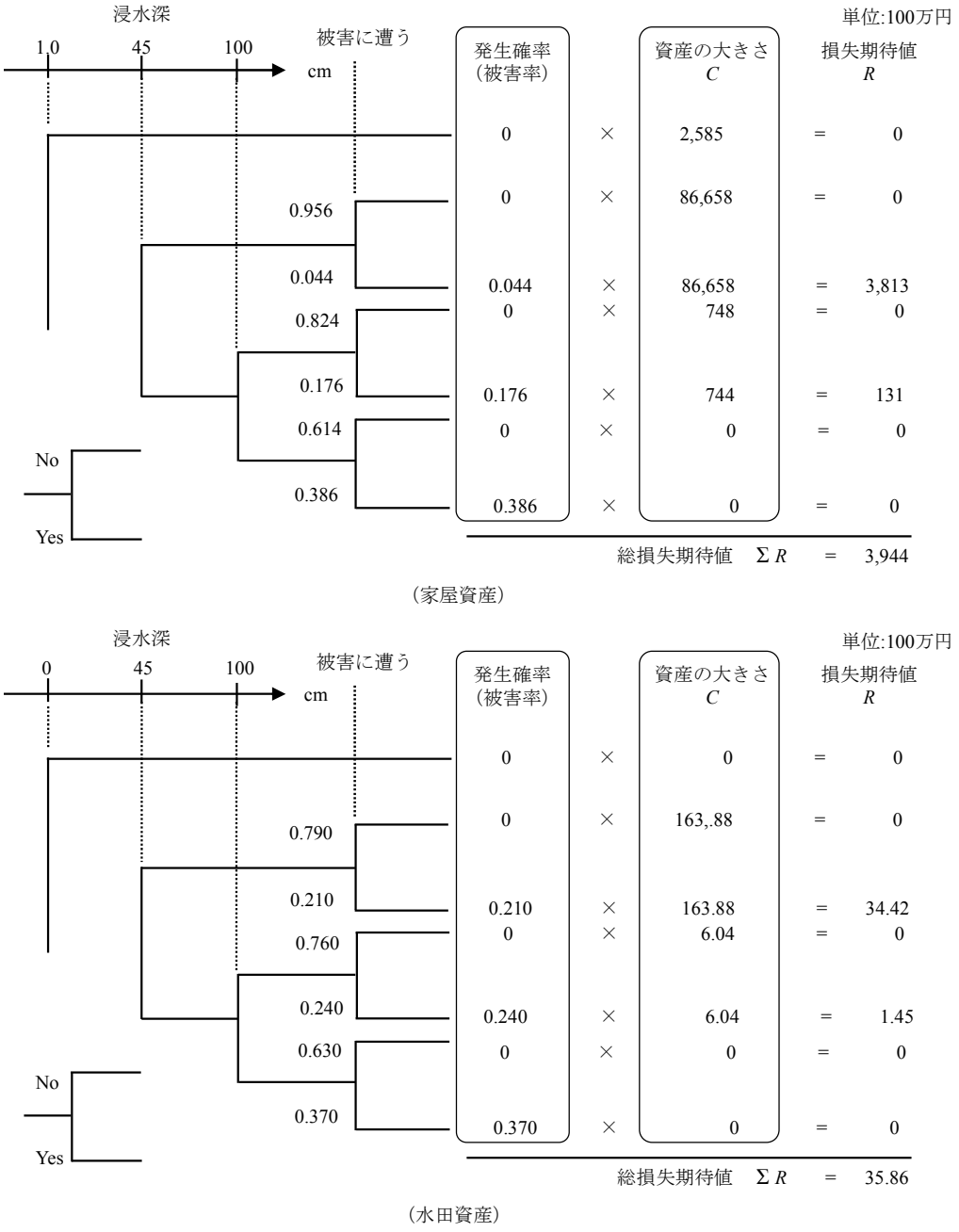


Fig.1-10　洪水リスクマネジメントのイベントツリーの例（谷口ら，2006）

1.2.3　狭義のリスクと広義のリスク

1.2.1 に述べたように，一般にリスクは期待値で評価されることが多いが，リスクマネジメントではリスクの期待値が等しければリスクの重要度が同じであるとは一概に言えないとされることに留意する必要がある．

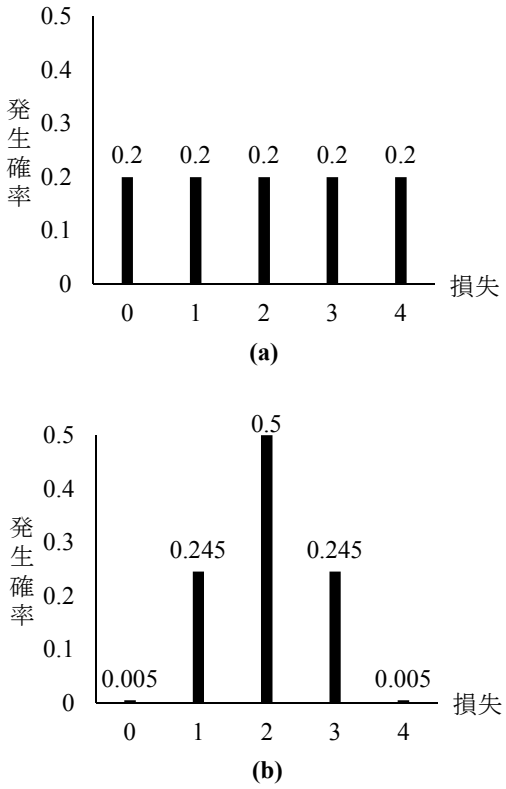


Fig.1-11　損失の確率分布（星谷ら，2002）

星谷ら（2002）は，損失期待値（損失の発生確率（P）× 損失（C））で算出されるリスク（R）を「狭義のリスク」と呼び，「発生確率が付与された損失」を「広義のリスク」と呼んでいる．

狭義のリスクは，一般には，それぞれの被害形態に対応して，複数の損失が考えられるため，次式のように，それぞれのリスク $R_i = P_i \times C_i$ を合算することにより算出される．

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} P_i \times C_i \tag{1-1}$$

この式のとおり，リスクは確率 P_i を起こりやすさの重みとみなして，C_i，i=1,2,…,n を重み付きで平均したものである．

一方，広義のリスクについて，星谷ら（2002）は，**Fig.1-11** を例にわかりやすく説明している．**(a)**と**(b)**では両者の損失期待値は同じ 2 であるが，発生確率の分布が異なり，たとえば損失が大きな 4 の確率を見ると**(a)**は 0.2 と大きいのに対し**(b)**は 0.01 以下と小さいため，

リスクを総合的に，あるいは細かく認識するためには，分布のばらつきや形状を知ることが重要であることを指摘している．

本研究は，豪雨によるため池の破堤事象を対象とし，同一の都道府県内に存在する同一の形態（谷池（山池））のため池間のリスクの大小を比較することを目的としている．このため，ため池間で破堤被害の発生確率の分布が大きく異ならないケースが対象となる．また，多くのため池から対策の対象とするため池の候補を一次スクリーニングする際への適用を想定しており，簡便な評価手法とする観点にも留意して，期待値を指標とする「狭義のリスク」の概念を用いて評価することとしている．

1.2.4 リスクと重要度

ため池の重要度は，土地改良事業設計指針「ため池整備」（農業農村工学会，2015）に定義されている．そこには，下流の土地利用や地形状況等を調査し，被害想定範囲や被害対象を明らかにした上で決定するとの考え方が明記されているが，これは主に異なる耐震性能区分を適用するための規定として設けられたものである．

一方，ため池を含む全ての農業水利施設を対象とした重要度については，農業水利施設の機能保全の手引き（食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会，2015）（以下，手引きと呼ぶ）のなかで，リスク管理の観点から，ストックマネジメントの各プロセスの取組を効率的に行うため，施設の重要度を評価し，重要度は，農業と農業以外に与える影響等を総合的に勘案し定めることとされている．具体的にリスク管理を行う場合は，**Fig.1-12** をもとに，施設の劣化による損傷等の事象の発生確率を健全度評価に，その事象の結果による損失を重要度評価に置き換えて，両者を組み合わせることで相対的に考えることができるとの考え方が示されている．また，「リスクが大きい施設（重要度が高い施設）については，高い管理水準の設定により早めの予防保全対策を実施する一方で，重要度の低い施設については，対応コストも考慮し，予防保全ではなく，ある程度事後対応となってもやむを得ないと整理していくことが考えられる」との記述がある．この記述は，同等の健全度を有する施設について説明されたものと解されるが，これと同様にリスクと重要度を同義とする概念は，耐震対策を考える際の構造物の重要度に関する議論にも用いられた経緯（例えば，青木，1998）がある．

本研究で目的とするリスク評価の活用方法は，上述の手引きに示される考え方に即して，ため池間のリスクの大小（重要度の高低）を簡易に評価し，対策の検討対象とするため池

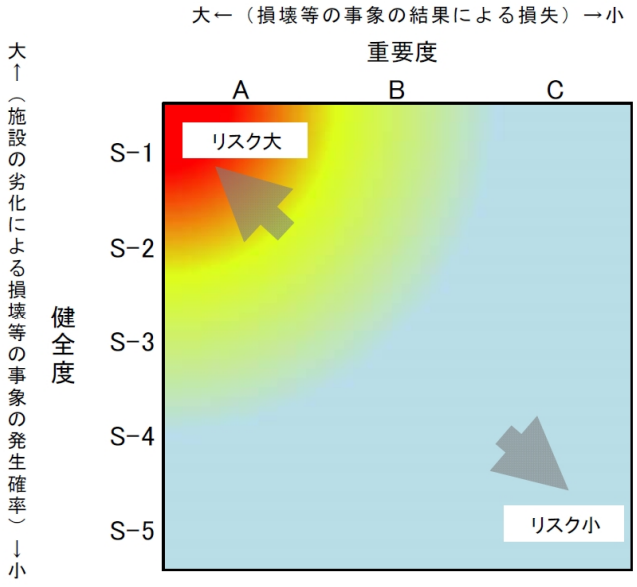
を一次スクリーニングする際に適用することを想定するものである．

1.3　既往の研究と研究動向

ここでは，ため池や河川等の破堤時の洪水被害額の算定，ため池を含む社会資本整備分野におけるリスク評価，応答曲面法の適用による複雑な手法の簡略化に関する既往の研究の成果と動向を示す．

1.3.1　ため池や河川等の破堤時の洪水被害額の算定に関する研究と動向

ため池破堤時の被害想定に係る既往の研究においては，地震や豪雨時の氾濫解析手法は簡易なツール（谷，2005）から精緻なモデル（堀ら，2010）まで数多くの提案がなされている．しかしながら，解析結果に基づく被害額は，類似地区の被害額が参考として記載されたもの（谷ら，2009）が一部に見受けられるものの，対策の概略検討段階で解析結果をもとに決壊時の被害額を簡易に算定し，優先度の高いため池を絞り込むための実用的な手法は提案されていない．また，**1.2.2** に述べた農林水産省農村振興局整備部（2015）が規定する災害防止効果の算定手法は，農地一筆ごと，家屋一棟ごとの詳細な調査等を基礎とす



注）施設の健全度としてＳ－１～Ｓ－５の評価、施設の重要度としてＡ、Ｂ、Ｃの評価を用いた場合のイメージ

Fig.1-12　健全度・重要度とリスクの関係（イメージ）
（食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会，2015）

ることから，行政機関の担当職員自らが担える労力のみで実施することが求められる概略検討への適用は現実には困難である．

一方，ため池と同様に氾濫解析結果に基づき被害額の算定を行う治水事業の費用便益を計測する手法については，治水経済調査要綱（建設省河川局，1970）が策定され，その後に，これを見直す形で **1.2.2** に述べた治水経済調査マニュアル（案）（国土交通省河川局，2005）が策定されている．近年，これらの基本的な考え方に準拠しつつ，氾濫時の経済被害の評価を組み込んだ総合的な被害軽減対策を検討するシミュレータの開発（秋山ら，2012）や，河川管理の方向性を考察する研究（長坂ら，2012）なども進められている．一方，ここで用いられる被害率は全国的な資料をもとに作成されることから，被害が集中する都市部を対象とする場合には精度上問題があるとされ（荒尾ら，1995），実際に発生した典型的な「都市型水害」である 2000 年 9 月の東海豪雨を事例に被害額が過小に算出されるとの指摘（木村ら，2007）などが一部でなされている．また，普及が進む地理情報システム（GIS）を基本ツールとして洪水氾濫による経済被害を推定する手法（小林ら，2010，2011）が提案されているが，この手法の適用対象は，詳細なベクトル型のポリゴンデータが存在する地域に限定されるなど，農村地域への適用には課題が残る．

このように，ため池や河川の氾濫時に想定される被害を評価しようとする研究は，様々な目的とそれに応じた精度で進められているものの，全国に数多く存在するため池を対象に対策の優先度を簡易に評価できる被害額算定手法は未だ確立されていない．

1.3.2　社会資本整備のリスク評価に関する研究と動向

「リスク」については，**1.2.1** に述べたように数多くの文献に様々な定義や分類が記載されている．社会資本整備のリスクに関する研究成果の記述を一例として紹介すると，牛島ら（2009）は，リスクを「何らかの原因によって，損害を被る可能性」と定義し，ここでの損害について①損失，②不測の事態（ペリル）の発生，③ペリルを生じさせる危険な状態（ハザード），④財産や生命が損害や損失にさらされる状況，⑤潜在的損失，⑥実際の損失と予想した損失の変動，⑦行為の結果の不確実性，などに分類している．構造物を対象としたリスクに関する研究では，これらのうち，破損による直接的な人的損害や物的損害，破損した構造物の機能が発揮されないことによる間接的な損害等が主に対象とされてきている．原子力発電施設等の設備やプラントなどの設計や保全にかかわる分野には，すでにリスクの概念が幅広く適用されるようになっており（小林，2007），これに追随するように

社会基盤整備の分野においても導入が進みつつある．

国土交通省国土交通政策研究所（2001）は，道路事業とダム事業を例に，事業のプロセスを，計画・調査段階，事業実施段階，運営や維持管理段階に区分した上で，各段階に共通するリスク（自然災害等の不可抗力のリスク，制度変更によるリスク，社会経済状況の変化のリスク等）と，地質調査ミス等の計画・構想段階のリスク，工事スケジュール遅延等の事業実施段階のリスク，劣化等の運営や維持管理段階のリスクなど，それぞれの段階に固有のリスクに分類している．本項では，これらのうち，本研究で取り扱う社会資本整備分野の機能保全対策に関連するリスクとして，自然災害や劣化によるリスク評価に関する研究の動向の一端を紹介する．

自然災害のリスクに関する研究は，様々な工種を対象とした地震リスク評価に関する事例が数多く報告（例えば，星谷ら，2001；一井，2002；吉川ら，2007；平田ら，2008；今井ら；2011）されている．また，自然災害の一つである渇水対策や道路網整備計画に関係する諸問題に着目したリスク分析的アプローチ（岡田ら，1993）も試みられている．一方，劣化によるリスクに関する研究は，コンクリート橋梁の劣化機構の推定等と併せた研究が一部で進められている（例えば，張ら，2005）．

海外においても自然災害のリスクに関する研究は，各国で進められており，本研究で取り上げる洪水被害のリスクに関する研究成果について，次に数例紹介する．イギリス国内を対象とした研究では，イングランドとウェールズの全域規模で洪水リスク評価を行い，主に海面上昇と降雨の増加，経済的な脆弱性の複合作用によって，2080 年には 2002 年の約 20 倍のリスクの増大が予測されるとの報告（Hall et al.,2005）のほか，ブリッジウォーター湾やパレット川の流域の洪水防御施設を対象に地理情報システムを用いてリスクを評価した結果（Hall et al.,2003），テムズ川の河口域を対象にフラジリティ・カーブを用いて水位上昇に対する洪水防御施設の破損確率を考慮したリスク評価を行った結果（Gouldby et al.,2008）など，国内の特定の地域を対象とした規模の研究成果も数多く報告されている．米国では，ミシシッピー川の中流部を対象に，一次元の水理モデルを用いて洪水被害額を評価するモデルを作成し，堤防を後方に引き下げた場合のリスク低減効果を検証した研究（Dierauera et al.,2012）などがある．ドイツでは，ケルン下流のライン川流域を対象に，降雨，流出，洪水防御施設の破損，氾濫から経済的な被害の発生に至るプロセスの連鎖を，モンテカルロ法のフレームワークを用いて，偶然に依存する不確実性と認識できる不確実性の 2 つの層にモデル化してリスクを評価した研究成果（Apel et al.,2004）などが報告され

ている．中国においても，上海を含む太湖盆地を対象に，堤防，水門，ポンプ場などから成る洪水調節システムの信頼性解析を行い，リスクを評価した研究（Jiabi et al.,2013）などが行われている．

一方，農業水利施設についても，我が国では，近年，次のような研究が進められているが，実際の計画策定や施設の設計への成果の活用は極めて限定的であり，実用性の高い研究は十分になされているとは言えない状況にある．

農業用水路については，老朽化した管水路の漏水事故を対象として，リスク管理の在り方やリスク低減に向けた維持管理方法を検討した事例が報告（中ら，2004；馬場ら，2005）されている．大久保ら（2014）は，頭首工と開水路で構成される典型的な幹線用水路施設を対象に，震災時の災害対応を阻害するリスク源を特定している．

多くの工種からなる農業水利施設群を対象とした研究では，モデル地区内の施設を対象に，リスクとライフサイクルコストを試算し最適な改築計画について検討した事例（静間ら，2006）や，受益地への配水機能の復旧期間に着目しシステム信頼性理論によって耐震補強対策の対象施設を選定する手法の適用事例（静間ら，2011），マルチイベント地震モデルに基づいたリスク評価手法の有効性を検証した報告（中嶋，2013）などがある．

これらのほか，農業用揚排水機場を対象としたリスク管理の基礎研究として，ポンプ設備の整備補修記録をもとに，ポンプの突発的な運転停止を発生させる要因の変動傾向を分析した報告（水間ら，2014）や，干拓堤防の液状化確率を計算しリスク評価を行った上で地盤改良の期待総費用を最小化する信頼性設計に関する報告（西村ら，2004，2011）などがある．

ため池を対象とする研究は，豪雨リスクに関するもの（例えば，西村ら，2009，2015a；堀ら，2010）と地震リスクに関するもの（例えば，谷ら，2009，2010）のほか，地震と豪雨を同時に考慮したリスク評価（例えば，西村ら，2015b）も一部で試みられはじめている．

1.3.3　複雑な手法の簡略化に応答曲面法を用いる研究と動向

複雑な手法の簡略化に応答曲面法を用いる研究は様々な分野で進められている．

精密工学の分野では，ソーラーカーのボディ寸法・形状及び部材径等の設計に応答曲面を用いて最適化する研究成果（樺山ら，2003）などが報告されている．原子力工学の分野では，沸騰水型原子炉の炉心設計の最適化システムの開発に応答曲面法を用いる報告（佐藤ら，2004）などがある．航空宇宙分野では，先進複合材料の優れた機械的特性を引き出

すための積層構成の最適設計の問題に応答曲面を用いる研究（平野ら，2007）などが進められている．機械工学分野では，ディーゼルエンジンを適切に制御するために必要となる燃費や排ガス成分の予測に応答曲面を用いたモデルを用いる研究（陸ら，2011）など，特に数多くの試みがなされている．造船工学の分野では，船体構造設計の最適化問題への応答曲面法の適用性について，油槽船隔壁構造を例に検討した報告（荒井ら，2000）などがある．計算工学分野では，短時間で材料選定を行うために通常の材料のシミュレーションに代替して応答曲面法を利用して材料探索を行う技術が開発（野中ら, 2012）されている．鉱物資源調査に関する研究分野でも，花崗岩体中の亀裂密度の空間分布の推定に応答曲面を用いた報告（栗原ら，2008）などがある．

以上のような調査や設計に関するもの以外にも応答曲面を用いた研究は様々な分野で行われている．芸術科学の分野においても，大容量画像から類似部分画像を高速で抽出するために応答曲面法を用いて類似度が最大となる最適部分画像の出力を可能とした成果（五味ら，2007）が報告されている。人間工学の分野でも，筋負担と関節角度に基づく作業負担の総合評価に応答曲面を用いた最適化手法を適用する研究成果（茅原ら，2012）などがある．食品工学分野でも，しょう油の味の好ましさに与える核酸系調味料と人工甘味料の効果について応答曲面を用いて評価し，両者の最適添加量を求める研究（山口ら，1968）が約 50 年前になされている．

本研究と同様に構造物に関する問題を対象に応答曲面を適用する研究も，近年，進展が見られる．ため池と同様に公共工事で建設される構造物を対象とするものとしては，地盤構造物の設計の特性を考慮した簡易で実用的な信頼性設計法の提案（大竹ら，2012）に応答曲面が効果的に利用されているほか，応答曲面を用いて発電パネル容量と蓄電池容量の設計関数を求めることにより独立型太陽光発電システムのコストを最適化する手法についての報告（赤尾ら，2014），直杭式桟橋の骨組み解析結果をもとに応答曲面法を適用して信頼性指標を評価した報告（長尾ら，2008）などがある．また建築構造物の設計においても，構造部材の耐力がばらついても崩壊荷重への影響が少ない骨組構造物を設計するために，応答曲面法を用いて弾塑性骨組構造物のロバスト最適化を行った研究（曽我部, 2009）や，構造物の性能規定型耐震設計を目的として応答曲面を用いた設計用地震動設定手法を提案する研究（大渕ら，2011）などの成果が報告されている．

海外においても，構造物の解析や設計の問題に応答曲面法を適用する研究成果は数多く報告されている．本研究で対象とするため池と同様の土構造物に関する近年の研究にも，

斜面の安定解析に地盤特性の不確実性を考慮するためにシステム信頼性解析法に基づき階層化した応答曲面を用いて盛土斜面の破壊確率を評価する手法を提案するもの（Jian et al.,2012）や，応答曲面法とモンテカルロ・シミュレーションを組み合わせた手法を用いた堤防の浸透解析手法を提案するもの（Rice and Polanco,2012）などがある．

1.4 本論文の構成

本研究では，農業用ため池の破堤に焦点を当て，想定される被害額やリスクを推定し，これに基づき機能保全対策の対象地区を決定するプロセスの効率化に資する実用的な手法の構築を目的として，以下の研究を行った．

①資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定

②応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

③応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価

本論文は，これらの研究成果をまとめたものであり，第 1 章の序論から第 6 章の結論まで全 6 章で構成されている．各章の内容を以下に示す．

第 2 章では，本研究で適用した，氾濫解析手法，実験計画法，擬似降雨の作成方法のそれぞれについて説明する．これらは，第 3 章以降で実施する数値実験に適用する手法の基礎となる理論である．

第 3 章では，ため池破堤時の被害額の算定に用いられる氾濫想定域内の家屋や事業所，農地等の資産データを簡易かつ効率的に適用する手法を考案し，国の規定に準ずる適用法（詳細法）との比較を行う．ここで詳細法を適用するために必要とされる資産データを得るには相当の費用や労力を要するが，本格的な検討に着手する前段で破堤時の想定被害額を簡易に比較しようとする際に，これらをすべて入手することは現実的ではない．このことから，詳細な調査を行わずに入手可能な資産データのみを用いて，土地利用が混在する農村地域の特性に即した被害額の簡易推定手法を提案する．

第 4 章では，第 3 章の提案をさらに発展させ，実験計画法に基づき作成する応答曲面（回帰式）を用いて氾濫解析を行わずに被害額を簡易に推定する手法を提案する．この手法により応答曲面を作成すれば，適用条件を満たす多くの地区の被害額推定に要する作業の大幅な簡略化が可能となる．ここで被害額の推定に用いる因子は貯水量や世帯密度等の候補から感度解析をもとに選定し，その因子と被害額との関係を示す応答曲面を重回帰分析によって作成する．因子の被害額に対する感度や応答曲面は，実在する 3 つのモデル地区の

データをもとに多くのため池データを作成し，氾濫解析や被害額算定を繰り返す数値実験により求める．この数値実験を効率化するため，ここでの被害額の算定には第 3 章で述べる筆者らが提案する簡易推定手法を用いる．

第 5 章では, 第 4 章で提案する応答曲面を用いた被害額算定手法をリスク評価に応用し，実在する 5 地区に試行的に適用する．さらには試行により得られた結果をもとに本研究で提案する手法を実用化するための課題等について考察を加える．

第 6 章では，本研究における成果を総括し，結論を述べる．

1.5 本論文における用語の定義

本論文では，土地改良の効果算定マニュアル（農林水産省農村振興局整備部，2015）や土地改良事業設計指針「ため池整備」（農業農村工学会，2015）などを参考に，論文中で用いる用語を以下のように定義する．

作業コスト：作業に要する時間や労力に応じた費用

詳細法：土地改良の効果算定マニュアルに基づく被害額算定手法

簡易法：本研究で提案する簡易な被害額算定手法

機能保全対策：性能指標や健全度指標に基づいて管理水準と，それを維持するための中期的な手法について定めた機能保全計画に基づき行われるメンテナンスや工事等の対策の総称

資産データ：家屋，家庭用品，事業所償却・在庫資産等の資産に係る被害額や農業被害額の算定に用いる世帯数や従業者数，農地面積等のデータ

利用可能区域：土地利用種別が「森林」や「湖沼」等以外の「建物用地」「田」「その他の農用地」等の区域の面積

世帯密度：利用可能区域の単位面積（1km^2 等）あたりの世帯数

谷池（山池）：立地形態によるため池区分の一つであり，山間や丘陵地で谷をせき止めて造られたため池（これ以外の区分に「皿池」がある）

一次スクリーニング：詳細な調査や検討を行う前段で，その対象とする候補を簡易な手法で選定する行為

ストックマネジメント：施設の管理段階から，機能診断を踏まえた対策の検討・実施とその後の評価，モニタリングまでをデータベースに蓄積された様々なデータを活用しつつ進めることにより，リスク評価を行いながら施設の長寿命化と LCC

（ライフサイクルコスト）の低減を図るための技術体系及び管理手法の総称

防災重点ため池：ため池下流に人家や公共施設等があり，施設が決壊した場合に影響を与えるおそれがあるため池

期待総費用低減効果：改修後の期待総費用（改修費と被害額の総額の期待値）から改修前の期待総費用を差し引いて得られる値

第 2 章　研究に適用した基礎理論

2.1　氾濫解析手法

本研究では，基礎方程式には，鉛直方向の等速度分布，非圧縮性流体，静水圧分布，底部傾斜を条件とする平面 2 次元浅水方程式を用い，近似リーマン解法を用いた有限体積法により解析（Toro，1999；Yoon and Kang，2004；西村ら，2009）を行う．

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}=\mathbf{S} \tag{2-1}$$

$$\mathbf{U}=\begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{pmatrix} uh \\ u^2h+gh^2/2 \\ uvh \end{pmatrix},\ \mathbf{G}=\begin{pmatrix} uh \\ uvh \\ v^2h+gh^2/2 \end{pmatrix} \tag{2-2}$$

$$\mathbf{S}=\mathbf{S}_{\mathrm{o}}+\mathbf{S}_{\mathrm{f}}=\begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{ox} \\ ghS_{oy} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix} \tag{2-3}$$

ここで，t：時間，h：水深，u，v：x-y 直交座標 x，y 方向の流速，g：重力加速度，S_{ox}，S_{oy}：x，y 方向の河床勾配，S_{fx}，S_{fy}：x，y 方向の摩擦勾配である．河床勾配 $\mathbf{S}_{\mathrm{o}}$ は基準水平面からの河床高 z_b から次式で得られるものとし，河床勾配は下りの傾きを正とする．

$$S_{ox}=-\frac{\partial z_b}{\partial x},\qquad S_{oy}=\frac{\partial z_b}{\partial y} \tag{2-4}$$

また，摩擦勾配はマニング式を用いる．

$$S_{fx}=\frac{n^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}},\quad S_{fy}=\frac{n^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \tag{2-5}$$

n：マニングの粗度係数である．

有限体積法は積分形の方程式に基づく数値解析法で，解領域を有限個の隣接するコントロールボリュームに分割する．**Fig.2-1** に代表的なコントロールボリュームの定義を示す．計算の対象セルを L とし隣接セルを R とする．この定義に基づき，近似リーマン解法によ

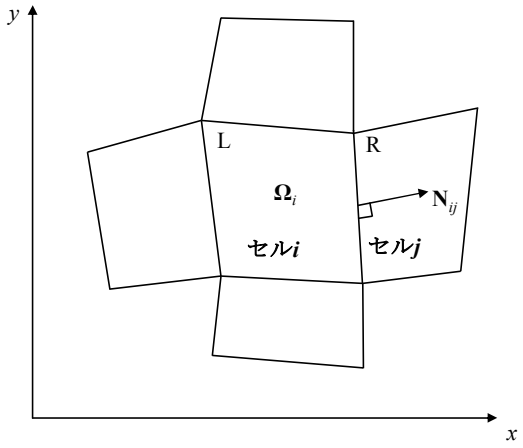


Fig.2-1　コントロールボリュームの定義

る支配方程式は次式で与えられる．

$$\frac{d\mathbf{U}_i}{dt} = -\frac{1}{\mathbf{\Omega}_i}\sum_{j=1}^{4}\mathbf{E}\cdot\mathbf{N}_{ij}\Delta\mathbf{\Gamma}_{ij} + \mathbf{S}_i \tag{2-6}$$

ここで，**E=F+G**，$\mathbf{N}_{ij}$：セル i とセル j の境界線に対する単位法線ベクトル，$\Delta\mathbf{\Gamma}_{ij}$：セル i とセル j の境界線の長さ，$\mathbf{\Omega}_i$：セル i の面積，$\mathbf{U}_i$ と $\mathbf{S}_i$：セル i の中心に与える平均量，**E**：境界線の流束ベクトルである．

本研究では HLL リーマン解法（Harten et al.,1983）を用いて，コントロールボリュームの表面の法線フラックスを次式で計算する．

$$\mathbf{E}\cdot\mathbf{n} = \begin{cases} (\mathbf{E}_L)_{ij}\cdot\mathbf{N}_{ij} & if\ S_L \ge 0 \\ \dfrac{S_R(\mathbf{E}_\mathrm{L})_{ij}\cdot\mathbf{N}_{ij} - S_L(\mathbf{E}_\mathrm{R})_{ij}\cdot\mathbf{N}_{ij} + S_R S_L\left[(\mathbf{U}_\mathrm{R})_{ij} - (\mathbf{U}_\mathrm{L})_{ij}\right]}{S_R - S_L} & if\ S_L \le 0 \le S_R \\ (\mathbf{E}_\mathrm{R})_{ij}\cdot\mathbf{N}_{ij} & if\ S_R \le 0 \end{cases} \tag{2-7}$$

ここに$(\mathbf{U}_\mathrm{L})_{ij}$と$(\mathbf{U}_\mathrm{R})_{ij}$はそれぞれ左右の側面上で **U** を再構成した値であり，S_L と S_R は波の伝播速度の計算値である．S_L と S_R を求めるにはいくつかの方法があるが，本研究では Toro（1992）によって提案されているアプローチを用いる．

$$S_L = \begin{cases} \min(q_L\cdot\mathbf{n} - \sqrt{gh_L}, u_* - \sqrt{gh_*}) & \text{両側が湿潤状態の場合} \\ q_L\cdot\mathbf{n} - \sqrt{gh_L} & \text{右側が乾燥状態の場合} \\ q_R\cdot\mathbf{n} - 2\sqrt{gh_R} & \text{左側が乾燥状態の場合} \end{cases} \tag{2-8}$$

$$S_R = \begin{cases} \max(q_R \cdot \mathbf{n} - \sqrt{gh_R}, u_* + \sqrt{gh_*}) & \text{両側が湿潤状態の場合} \\ q_L \cdot \mathbf{n} + 2\sqrt{gh_L} & \text{右側が乾燥状態の場合} \\ q_R \cdot \mathbf{n} + \sqrt{gh_R} & \text{左側が乾燥状態の場合} \end{cases} \tag{2-9}$$

$$u_* = \frac{1}{2}(\mathbf{q}_L + \mathbf{q}_R) \cdot \mathbf{n} + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \tag{2-10}$$

$$\sqrt{gh_*} = \frac{1}{2}(\sqrt{gh_L} + \sqrt{gh_R}) + \frac{1}{4}(\mathbf{q}_L - \mathbf{q}_R) \cdot \mathbf{n} \tag{2-11}$$

ここで，$\mathbf{q}=[u\ v\ ]^{\mathrm{T}}$ である．また，h：水深，u：流速の鉛直方向の平均値の x 成分であり，添え字の $*$，L，R は，それぞれ境界線上，左側，右側の値を意味する．

2.2 実験計画法

2.2.1 実験計画法の概要

実験計画法は，イギリスの農事試験場の技師として働いていた遺伝学者・統計学者フィッシャー（R.A.Fisher，1890-1962）が創始した学問で，取り上げる対象の結果とそれに影響を与えると思われる要因の関係を調べるために，時間面，経済面等の制約を考慮しながら実験によりデータを得て，それを解析するための方法（山田，2004）である．

農事試験では，天候，圃場，温度，水分等結果に影響を与える因子が多数存在するため，これらの条件を厳密に一定に保つことは現実的には不可能である．このため，実験結果にばらつきが存在することを認めざるを得ないが，他方で，品種や育成方法等複数の処理の中から収穫高の高いものを見出すことが求められる．このような要請が，実験計画法が生まれるきっかけになったとされている．

実験を成功させるために気をつけるべきことを整理したフィッシャーの 3 原則とは

・反復（replication）

・ランダム化（無作為化）（randomization）

・局所管理（local control）

である．

反復とは，実験結果の変動が偶発的な誤差によるばらつきなのか，あるいは，処理の違いによって生じているかを定量的に評価できるようにすることを指す．

ランダム化とは，目的要因以外の要因が一定の偏りを持って実験データに影響を与えないよう，実験を無作為に行うことを指す．

局所管理とは，目的となる要因以外の要因を制御するため，実験環境（時間や空間）を小分けにすることを指す．

実験計画法は，何らかの形で結果を表現する指標を設定する．その結果をあわらす指標を，応答（response），あるいは，特性と呼ぶ．応答が決まると，次にそれに影響を及ぼすと予想される変数を決める．このうち，実験に取り上げるものを因子（factor）と呼ぶ．因子は，重さ，長さなどの定量的な量的因子（quantitative factor）と，機械の種類，原料のタイプなどを識別するために用いる質的因子（qualitative factor）に分けられる．因子についての具体的な設定値（条件）を水準（level）と呼ぶ．因子を変えたときに応答が変化する量を効果（effect）と呼び，ある因子単独での効果を主効果（main effect）と呼ぶ．また，複数の因子が組み合わさることで現れる効果を交互作用効果（interaction effect）と呼ぶ．

本研究では，コンピュータ上でのシミュレーションに対して実験計画法を適用している．数値実験の大きな特徴は，因子 $x_1,\ldots,x_p$ の水準を指定すると，その応答の y は同じ値となることである．すなわち，測定値に繰返しによる誤差 ε は含まれず，次式で表現される応答値と近似関数の差は近似の当てはまり誤差であり，その誤差には再現性がある．

$$e(x_1,\ldots,x_p) = \mu(x_1,\ldots,x_p) - \hat{\mu}(x_1,\ldots,x_p) \tag{2-12}$$

ここでは真の応答関数 $\mu(x_1,\ldots,x_p)$ を近似する関数 $\hat{\mu}(x_1,\ldots,x_p)$ を求めることが問題となる．

数値実験において多数の因子を候補として最適化を行うには

ⅰ) 多数の候補となる因子から少数の因子に絞り込むためのスクリーニング実験

ⅱ) 一様計画を用いて絞り込まれた少数の因子と応答の関係を調べる実験

というように 2 段階で問題をアプローチすることが有効になる（山田 2004）．

ここで，一様計画とは，取り上げた因子の空間に，一様に実験点が配置されることを狙いとする計画をいう．本研究においても，上記の手順に従って応答曲面を作成する．

2.2.2 直交表に基づく感度解析

本研究では，スクリーニング実験として直交表に基づいた感度解析を適用し，多数の候補となる因子の被害額に対する感度を求め，感度の高い因子を絞り込む．

ここで，多数の因子の感度を求めようとする場合には，実験回数は膨大なものとなる．例えば，2 水準の因子が 7 つあると，その実験回数は 2^7＝128 となる．このような場合には，一部のみを実施することが有効であり，その方法の一つに直交による構成方法がある．

列の直交性を定義すると，「因子の水準をあらわす 2 列が直交するとは，全ての水準組合せが同数回出現すること」となる．因子を割付けた 2 列間に直交性があれば，一方の因子の主効果を推定するのに，他因子の主効果の影響を取り除くことができる．このようにすることで，たとえば A，B，C の 3 つの因子が存在するとき，全ての組合せが 2^3=8 の半分の実験回数である 2^{3-1}=4 回で，B，C の主効果の影響を取り除きながら A の主効果を推定できることになる．

このように因子が応答に及ぼす影響を調べる要因計画の一部を実施する計画を，一部実施要因計画と呼ぶ．

Table 2-1　$L_8(2^7)$直交表の例

No	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
成分	a	b	a b	c	a c	b c	a b c

因子間が直交する計画を構成するためのテンプレートが，直交表として用意されている．直交表とは，互いに直交する列からなる．**Table 2-1** に $L_8(2^7)$直交表の例を示す．直交表を用いて実験を行うには，直交表の列に因子を対応させて実験の水準組合せを決める必要がある．このことを，「直交表に列を割付ける」と呼ぶ．

本研究では，互いに独立である因子を候補として取り上げる．互いに独立である因子どうしの交互作用が数値実験の結果として現れる可能性もあるが，そのような場合には，得られた応答曲面の物理的な意味合いが説明出来ないことから，本研究では因子の交互作用は考慮しないこととしている．

取り上げた因子の交互作用を考慮しない場合には，これらの因子を直交表に任意に割付けることで 2 水準一部実施要因計画が構成できる．その手順は次の①～③のようになる．

①取り上げた因子数が割付け可能な直交表を選ぶ

②取り上げた因子を選んだ直交表の任意の列に割付ける

③実験全体をランダム化して実験順序を決定する

例えば 6 因子を取り上げた場合には，推定すべき効果の個数は 6 となる．交互作用を考慮する必要がないということは，6 つの因子を任意の列に割付けてよいことになる．すな

わち，6 つの列が確保される計画で，効果の推定という意味で十分となる．以上のことから，$L_8(2^7)$なら全部で 7 列あるので，実験回数が少なく効果が推定できる．ただし，この場合の推定精度は，誤差の自由度が 1 しかなく不十分になることに留意が必要である．たとえば，山田（2004）は，経験的には推定の結果が安定するためには，誤差の自由度は少なくとも 3，可能であれば 5 以上は欲しいとしている．

線形回帰には次式の重回帰モデルを用いる．

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{2-13}$$

ここに，**y** は出力ベクトル，**X** はパラメータマトリックス，**β** は回帰係数，**ε** は誤差を表す．この回帰係数がパラメータの感度を表現し，係数が大きければ感度が高く，係数が小さければ感度があまりないことを意味する．

回帰係数 **β** を求めるためには最小二乗法を用いる．

$$\boldsymbol{\beta} = \left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{X}\right)^{-1}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{y} \tag{2-14}$$

ここで T は転置を表す.

2.2.3　一様計画を用いた応答曲面の推定

応答曲面法（response surface method）とは，応答と量的な因子の関係について，実験計画にしたがってデータを収集し，それを解析することで応答と因子の関係を探索する一連の方法である．応答と因子の関係には，通常，1 次モデル（first order model），あるいは，2 次モデル（second order model）が用いられる．応答と因子との関係は応答曲面と呼ばれ，最小二乗法で求める．1 次モデルは概略的な解析に役立ち，2 次モデルは，より精密な解析に役立つとされている．

応答曲面法は，具体的にどのような水準で実験を行うのかを計画する応答曲面計画（response surface design）と，既に収集されている実験データをもとに最適とみなしうる操作条件を求めたり，次の実験領域を選んだりする応答曲面解析（response surface analysis）から構成される．応答曲面計画では，応答と因子の関係を，できるだけ正確に効率的に推定する計画を構成することが課題となる．また応答曲面解析では，推定した応答の y と因

子 $x_1,\ldots,x_p$ の関係をもとに最適とみなしうる条件を正確に推定することが課題となる．データ解析には，応答と因子について，１次モデル，あるいは，2 次モデルを用いて最小二乗法により母数を推定する．

応答曲面を推定するための計画として，実験点が興味のある領域内に合理的に配置されていることが望ましいとされている．

このため，本研究では超一様分布列を用いた一様計画を用いて応答曲面を作成する．

超一様分布列は，k 次元単位立方体内の無限点列であり，それを $X_0,X_1,\ldots$ と表わすとき，先頭の N 点からなる集合（$X_0,\ldots X_{N-1}$）がすべての $N>1$ に対して次式を満足するものである．

$$D_N^{(k)} \le C_k \frac{(\log N)^k}{N} \tag{2-15}$$

ここで，C_k は次元 k のみに依存する定数である．

本研究では，超一様分布列の具体的な構成法として，van der Corput 列を k 次元に拡張した Halton 列を用いる（手塚，2003）．van der Corput 列は 1 次元点列であり次式で定義される．

$$x_n = \Phi_b(n), \quad n = 0,1,2\cdots \tag{2-16}$$

ここで $b>1$ を整数とし，整数 $n \geqq 0$ に対し $m=[\log_b n]$（[ ]はガウス記号）として，基底逆関数 $\Phi_b(n)$を次式で定義している．

$$\Phi_b(n) = \frac{a_0}{b} + \frac{a_1}{b^2} + \cdots + \frac{a_m}{b^{m+1}} \tag{2-17}$$

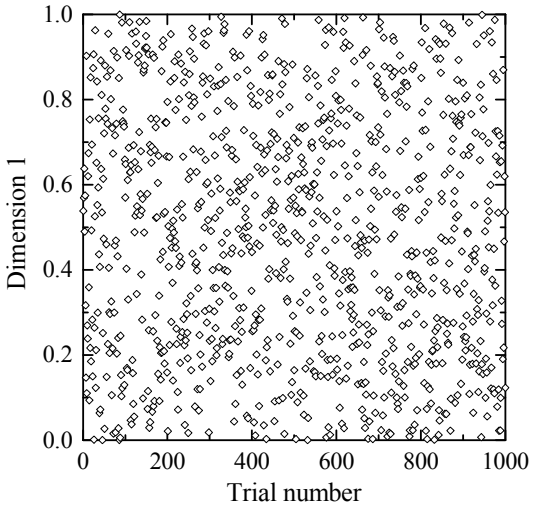
van der Corput 列を k 次元点列に拡張したものが Halton 列とよばれ，次式で定義される．

$$X_n = (\Phi_{b1}(n),\cdots,\Phi_{bk}(n)), \quad n = 0,1,2\cdots \tag{2-18}$$

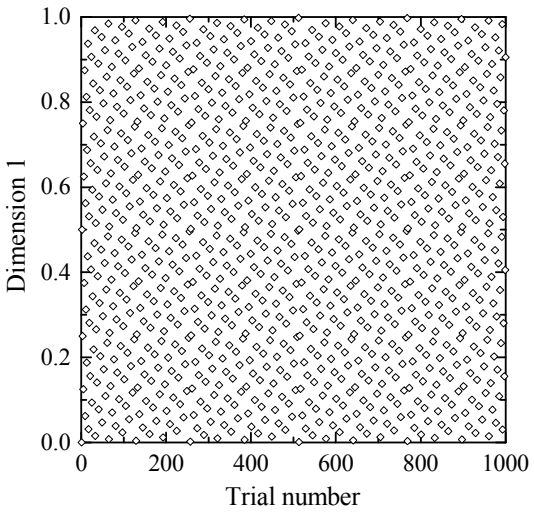
ここで $b_1,\ldots,b_k$ はどの 2 つも互いに素な正整数とする．

Halton 列によるパラメータの構成例（若林ら，2013）を **Fig.2-2** に示す．図の縦軸がサン

プル（因子の値：実現値）であり，横軸が試行回数である．このように超一様分布列によるパラメータは空間上に一様に分布するように構成される．



(a) 一様乱数



(b)超一様分布列

Fig.2-2 Halton 列によるパラメータの構成例（若林ら，2013）

2.3　擬似降雨の作成方法

ため池の破堤は頻繁に発生する事象ではなく，数十年間の実降雨の観測結果の最大値を用いても，観測期間以前に発生した降雨や今後発生する降雨のパターンの多様性を加味して破堤リスクを評価することは困難である．このことから，本研究では，ため池への流入量の算定に用いる集水域の降雨には，実降雨データをもとに設定する降雨の連続性等の条件を満足するように擬似降雨を作成して用いることとする．

2.3.1　降雨の連続性に関する条件

ため池の破堤は降雨後 24 時間以内に発生することが多いとされているが，発生する可能性のある全てのケースを対象とするため，ここでは 72 時間連続降雨を用いる．ここでは最小単位として 1 時間降雨データを用いるが，各データは 72 時間内で独立ではなく，例えば，降り始めの降雨強度は小さく，徐々に降雨強度が大きくなった後に，降り止むといった連続性を有する．この連続性を表現するために，降雨後の経過時間が異なる 2 つの時点間の降雨強度を比較して相関係数を求め，相関係数マトリックスを作成する．作成するマトリックスはコレスキー分解が可能となるよう，降雨量の確率分布に従う値から正規分布に従う値に変換する．

降雨強度 x（mm/h）の降雨開始からの経過時間 k=1,2,･･,72 の累積分布関数 $F_k(x)$は平均ランク法により次式で得ることができる．

$$F_k(x) = m_k(x)/(N+1) \tag{2-19}$$

$m_k(x)$は降雨開始から k 時間後に降雨強度が x を上回らない回数を，N は元となるデータの年数（ここでは 44 年）をそれぞれ意味する．

累積確率分布に従う降雨強度 x（mm/h）は，次式により標準正規分布を用いた確率変数 y に変換できる．

$$y = \Phi^{-1}(F_k(x)) \tag{2-20}$$

Φ は標準正規分布関数であり，次式で定義される．

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \tag{2-21}$$

Fig.2-3 に累積確率分布の一例を示す.

次に 1 時間差，2 時間差，・・・，72 時間差に対する降雨強度の相関を調べる．*i* 時間後の *y* の平均値と標準偏差をそれぞれ μ_i, σ_i とすると，これらは（2-22）(2-23）より求めることができる.

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} y_m \tag{2-22}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N} (y_m - \mu_i)^2} \tag{2-23}$$

理論的には *y* はすべて標準正規分布に従うため，$\mu = 0$，$\sigma = 1$ に限りなく近づくものと考えられる．ここで，$N = 44$ とすると全ての *i* において $\mu_i \approx 0$，$\sigma_i = 0.926108815$ と算出された.

2 つの確率変数 *a*，*b* の相関係数 ρ_{ab} は式（2-24）で定義される.

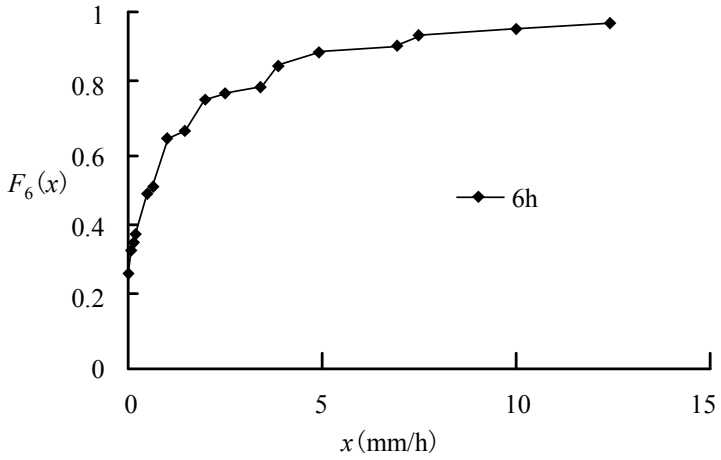


Fig.2-3　6 時間後の降雨強度の累積確率分布

$$\rho_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_i - \bar{a})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(b_i - \bar{b})^2}} \tag{2-24}$$

よって，i 時間後と j 時間後の確率変数 y の相関係数 ρ_{ij}（i,j=1,2,･･,72）は，次式で求めることができる．

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^{44}(y_i - \mu_i)(y_j - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \tag{2-25}$$

この式より，相関係数マトリックス **R** は，72×72 行列の正値対称行列として得られる．

作成した **R** の一部を式（2-26）に示す．この式から，**R** は対称行列であり，1 時間差，2 時間差など，比較する 2 つの時点の時間差が小さいほど相関係数は高く，時間差が大きくなるほど相関係数が小さくなる傾向を確認することができる．

$$\mathbf{R} = (\rho_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0.66 & 0.50 & 0.15 & 0.11 & -0.06 & -0.05 & -0.17 & -0.12 & -0.13 \\ 0.66 & 1 & 0.55 & 0.34 & 0.35 & 0.06 & -0.10 & -0.17 & -0.04 & -0.05 \\ 0.50 & 0.55 & 1 & 0.66 & 0.46 & 0.14 & 0.02 & -0.09 & 0.07 & 0.07 \\ 0.15 & 0.34 & 0.66 & 1 & 0.69 & 0.46 & 0.28 & 0.24 & 0.31 & 0.13 \\ 0.11 & 0.35 & 0.46 & 0.69 & 1 & 0.58 & 0.34 & 0.27 & 0.33 & 0.22 \\ -0.06 & 0.06 & 0.14 & 0.46 & 0.58 & 1 & 0.78 & 0.51 & 0.49 & 0.40 \\ -0.05 & -0.10 & -0.02 & 0.28 & 0.34 & 0.78 & 1 & 0.74 & 0.62 & 0.50 \\ -0.17 & -0.17 & -0.09 & 0.24 & 0.27 & 0.51 & 0.74 & 1 & 0.66 & 0.48 \\ -0.12 & -0.04 & 0.07 & 0.31 & 0.33 & 0.49 & 0.62 & 0.66 & 1 & 0.79 \\ -0.13 & -0.05 & 0.07 & 0.13 & 0.22 & 0.40 & 0.50 & 0.48 & 0.79 & 1 \end{pmatrix} \tag{2-26}$$

2.3.2　正規乱数の生成と実降雨分布に基づく乱数への変換

2.3.1 で得られる相関係数マトリックス **R**= [ρ_{ij}] で表現できる．**R** を正値として，$\mathbf{LL}^{\mathrm{T}}=\mathbf{R}$ を満足する下三角行列 $\mathbf{L}=(l_{ij})$はコレスキー分解によって求めることができる．これを成分を用いて表すと式（2-27）となる．

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^{N} l_{ik} l_{jk} \quad (i, j = 1,2,\ldots\ldots,N) \tag{2-27}$$

R の対称性から$i \geqq j$ についてのみ考えると式（2-27）は以下の式（2-28）と同値である．

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^{\min(i,j)} l_{ik} l_{jk} \quad (1 \leq j \leq i \leq N) \tag{2-28}$$

次に，正規分布に従うボックス・ミュラー法（Rubinstein et al., 1981）を用いて標準正規乱数 z を生成する．使用する一様乱数はメルセンヌ・ツイスタにより生成した．区間[0,1]の一様乱数 U_1，U_2 があるとき，2 個の独立な標準正規乱数は式（2-29）より生成できる．

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{-2\ln U_1} \cdot \cos 2\pi U_2 \\ S_2 &= \sqrt{-2\ln U_1} \cdot \sin 2\pi U_2 \end{aligned} \tag{2-29}$$

乱数 S_1，S_2 は互いに独立であるため，生成した乱数を区別しない．1 セット 72 個の z と行列 **L** によって，式（2-30）より相関係数マトリックス **R** の特性を持つ正規乱数 Y が 1 セット 72 個生成される．

$$Y = \mathbf{L}z \tag{2-30}$$

次に生成した正規乱数 Y を実際の降雨分布に基づく値に再変換し，擬似降雨における 1 時間ごとの降雨強度とする．再変換の手順は，**2.3.1** で降雨の連続性に関する条件を求めた際の手順の逆を辿れば良いことになる．

生成した正規乱数 Y を用いて誤差関数 $erf(Y)$を式（2-31）から求める．正規確率$\Phi(Y)$を導く正規分布の累積分布関数は式（2-21）と同様に式（2-32）で表現できることから，正規確率$\Phi(Y)$は誤差関数を用いて式（2-33）で表される．

$$erf(Y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Y \exp\left(-t^2\right) dt \tag{2-31}$$

$$\Phi(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Y \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \tag{2-32}$$

$$\Phi(Y) = \frac{1}{2} erf\left(\frac{1}{\sqrt{2}} Y\right) \tag{2-33}$$

1 セット 72 個のうち k 番目の Y に対して，式（2-19）から得られる降雨開始からの経過

時間 k の累積確率分布 $F_k(x)$が次式を満足する X を求めることにより，実際の降雨と同様の分布を持つ乱数 X に変換する．

$$X = F_k^{-1}(\Phi(y)) \tag{2-34}$$

2.3.3 極値分布関数を用いた総降雨量の調整

作成した X をそのまま擬似降雨に適用する場合には，豪雨は非常に限られたケースとなり，擬似降雨作成に用いた観測データの特性に支配され，越水が生ずるパターンは固定化される．それを回避するため，ハイエトグラフの形状を変えずに，降雨波形を引き伸ばしたり，あるいは縮めたりして用いる．その方法を以下に示す．

年最大 72 時間総雨量の実測値 T（mm/72h）の分布をグンベル分布に適合させると $F(T)$ は次式に従う．

$$\sum_{i=1}^{72} x_i = T \tag{2-35}$$

$$F(T) = \exp(-e^{-y}), \qquad y = a(T - T_0) \tag{2-36}$$

ここで x_i は i 時間後の年最大 72 時間降雨強度であり，a と T_0 は実測値を理論上の分布関数（岩井ら，1970）に適合させるために用いるパラメータである．

グンベル分布に年最大 72 時間降雨強度の累積分布を適合させた図を **Fig.2-4** に示す．

擬似降雨の 72 時間総降雨量 T'と再配分前の降雨強度 X を用いて，総降雨量を調整した降雨の乱数 X'(mm/h)を次式から求める．

$$X' = (T' / \sum_{i=1}^{72} x_i) X \tag{2-37}$$

得られた X'を再び 72 時間分連続させ，本研究においてため池流入量の計算に用いる 1 セットの擬似降雨を作成する．

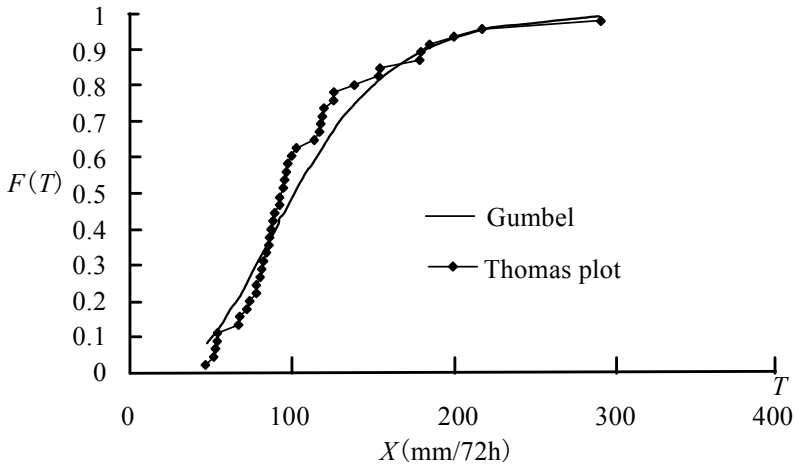


Fig.2-4　最大 72 時間降雨強度の累積分布

第 3 章　資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定

3.1　緒論

1.3.1 で述べたように，ため池や河川の氾濫時に想定される被害を評価しようとする研究は，様々な目的とそれに応じた精度で進められているものの，特定の地域に密集しつつ全国に数多く存在するため池を対象に，対策の優先度を簡易に評価できる被害額算定手法は未だ確立されていない．そこで本章では，ため池を対象に，本格的な検討に着手する前段で対象施設を選定する際などに適用できるよう，詳細な調査を行わずに入手可能な資産データのみを用いるとともに，土地利用が混在する農村地域の特性に則して被害額を算定するための資産データ適用手法を提案するものである．

3.2　被害額算定手法

ため池が破堤する際には農地だけでなく，下流に位置する家屋や商業施設，公共施設などにも被害が及ぶ．

本章では，その被害額を氾濫解析から得られる最大浸水深をもとに算定する．なお，ここでは浸透を考慮しない解析を行っている一方，浸水が微小な区域は地表面からの浸透等により実際には被害は発生しないと考えられることから，最大浸水深が 5mm 未満を「浸水被害無し」とした場合の被害額も算定し結果を比較することとした．

3.2.1　被害額算定に用いる資産データと適用方法

ため池の破堤による被害額は，国が規定する土地改良の効果算定手法（農林水産省農村振興局整備部，2015）に準ずることを基本とし，有償または無償で一般に公開され，誰もが容易に入手可能な 500m メッシュの資産データをもとに算定する．

Table 3-1 に被害額算定に用いる主な資産データを示す．これら以外にも，できる限りコストをかけずに被害額の算定を行う観点から，無償で入手できるデータ（総務省統計局，2010，2014）から算出可能な都道府県の 1 住宅あたりの平均延床面積や市町村の世帯数に占める農林漁家の割合等も利用する．

また，**Table 3-2** に本章で用いた簡易な被害額算定手法と土地改良の効果算定手法との比較を示す．本章においては，資産データの単位である 500m メッシュや，土地改良の効果算定手法で氾濫解析の基本単位とされる 250m メッシュでは，土地利用が混在する農村地域の特性に即した被害量の算定は困難であると考え，100m メッシュ単位に公表されてい

Table 3-1　被害額算定に用いる主な資産データ

項目	データの入手方法等
世帯数･全産業従業者数	政府統計の総合窓口 e-Stat の HP から 500m メッシュの世帯数，全産業従業者数のデータを無償でダウンロード
産業分類別従業者数	「経済センサス地域メッシュ統計」を購入し「産業分類別従業者数」の 500m メッシュデータを入手
農林漁家数	「国勢調査地域メッシュ統計」を購入し「農林漁家数」の 500m メッシュデータを入手
延床面積	モデル地区の存在する都道府県の家屋の平均延床面積に世帯数を乗じて算出 または 「国勢調査地域メッシュ統計」の延床面積が 0～29m^2 から 150 m^2 以上までの 6 区分の世帯数をもとに算出
水田･畑面積	土地利用種別が「田」と「その他の農用地」のメッシュに 100m メッシュの面積 10,603 m^2 を水田・畑面積として与える

Table 3-2　被害額算定手法の比較

	土地改良の効果算定手法 （詳細法）	提案する簡易な手法 （簡易法）
家屋数，産業分類別事業所数等	「国勢調査地域メッシュ統計」「経済センサス地域メッシュ統計」「延床面積 100m メッシュデータ」等から把握する	作業コストを節減しつつ左に準ずる 「延床面積 100m メッシュデータ」は利用しない
被害量の算定	250m メッシュの氾濫解析により浸水深を算定し 500m メッシュの資産データに適用	25m メッシュの氾濫解析により浸水深を算定し 100m メッシュの土地利用種別に即して資産データを配分し適用
資産額，被害額等	資産額，被害額等については「治水経済調査マニュアル（案)」で示している評価額，被害率等を参考にする	左に準ずる
資産以外の被害額	過去の湛水時の都道府県及び関係市町村の衛生部局等の対策費執行予算等から把握する	省略する(都道府県や関係市町村の衛生部局等への個別の聴き取り等は行わない)

る「田」「その他の農用地」「建物用地」等の土地利用種別（国土交通省国土政策局国土情報課，2009）に即して資産データを配分し用いることとした.

ここで，消毒費や怪我・病気等の医療費といった資産以外の被害額について，土地改良の経済効果算定の際には行政機関の衛生部局の対策費用等から把握することとされているが，比較的人口密度の低い農村地域の地区間で，これによる大きな差は生じないと考え，資料収集に多大な労力が必要となることも勘案し，算定を省略することとした．また，地域の自然的，社会的条件による差異を考慮するために行う現地調査等も，同様に概略検討段階での実施は困難と考えられるため，ここでは行わないこととした.

資産データを被害額の算定に適用する方法の概要を **Table 3-3** に示す. 表中の 3 案は資産

Table 3-3　資産データ適用方法（3 案）

	案 1	案 2	案 3
世帯数・従業者数等	世帯数，従業者数はともに氾濫解析対象区域全体の数値を建物用地に該当するメッシュに均等に配分．産業分類別従業者数は市町村全体の構成比率から算出	案 1 の方法を 500m メッシュごとに適用	世帯数は案 2 と同．産業分類別従業者数等は，「経済センサス地域メッシュ統計」の 500m メッシュデータを建物用地に均等に配分
延床面積	総務省の「社会生活統計指標－都道府県の指標－」の都道府県の持ち家比率，借家比率, 1 住宅あたりの持ち家延面積，借家延面積から平均延床面積を求め，これに上で求める各メッシュの世帯数を掛け合わせて算出	案 1 の平均延床面積に，上で求める各メッシュの世帯数を掛け合わせて算出	「国勢調査地域メッシュ統計」の 0～29m^2，から 150 m^2 以上までの 6 区分の延床面積の世帯数をもとに算出
用水路等	農林水産省の「農業基盤情報基礎調査」をもとに氾濫域内の基幹水利施設の再建設費から算出	同左	同左
＜特徴＞			
費用	無料	無料	1 都道府県あたり 6～7 万円
労力	容易	やや煩雑	やや煩雑
整合性	氾濫区域内の資産密度の濃淡が被害額算定に反映できない	事業資産は案 3 に劣る	3 案のなかで最も高い整合性

データを入手し 500m メッシュ単位の基礎データを 100m メッシュに割り振る作業コストに応じて実際の資産分布との整合性が異なる．案 1 は最も作業コストは小さいが実際の資産分布との整合性に劣る．一方，案 3 は容易に入手可能な資産データのみを用いて詳細法にできる限り準じて被害額を算定するケースであり，他の 2 案に比べ作業コストは大きいが実際の資産分布との整合性が最も高い．案 2 は作業コスト，整合性ともに両者の中間的な取り扱いである．

3.2.2　資産データの適用例

資産データの分布が **Fig.3-1** のような氾濫解析対象区域を例に具体的なデータの取り扱い方を説明する．図中の最も小さい四角形は 1 辺が約 100m であり，これが 5×5＝25 個集まって 1 辺が約 500m の太枠の 500m メッシュ区域を構成する．氾濫解析対象区域は①～⑫の 12 個の 500m メッシュから成る破線の区域である．氾濫解析対象区域全体の世帯数は

Fig. 3-1 氾濫解析対象区域の資産データ例

90 世帯，従業者数は 450 人であり，うち①の 500m メッシュ区域の世帯数は 20 世帯，従業者数は 60 人である．黒く塗りつぶした 100m メッシュは主に住宅や事業所等が立地し土地利用種別が「建物用地」に該当する区域である．一方，斜線の 100m メッシュは主に田や畑等に利用され，土地利用種別が「田」または「その他の農用地」に区分されている区域である．白地の区域は，これらのいずれにも該当しない「森林」等の区域である．

次に，この事例の区域に **Table 3-3** の各案を適用して世帯数等を各メッシュに配分する方法を具体的に説明する．

世帯数は，案 1 では氾濫解析対象区域全体の 90 世帯を建物用地の 30 メッシュに均等配分し各 3 世帯とする．案 2 と案 3 では各 500m メッシュの世帯数を当該域内の建物用地に

配分し，①の 500m メッシュの例では 20 世帯を建物用地の 5 メッシュに割り振って各 4 世帯とする．

次に産業分類別従業者数の算出方法について **Fig.3-1** の建設業を例に説明する．案 1 は氾濫解析対象区域の全産業の従業者数 450 人に市町村の建設業の割合 13%を掛け合わせて得られる 58.5 人を建物用地の 30 メッシュに均等に配分し各 1.95 人とする．案 2 は①の 500m メッシュの全産業の従業者数 60 人×市町村の建設業の割合 13%／建物用地 5 メッシュから 1.56 人とする．案 3 は有償データである建設業の従業者数 10 人を建物用地 5 メッシュに割り振り各 2.00 人とする．

農林漁家数は，案 1 及び案 2 では，市町村の農林漁家の割合 30%に上で求める世帯数を掛け合わせて，それぞれ 0.9 世帯，1.2 世帯とする．案 3 は有償データである 500m メッシュの農林漁家数 7 世帯を建物用地 5 メッシュに割り振り各 1.4 世帯とする．

延床面積は，案 1 と案 2 では，都道府県の 1 住宅あたりの平均延床面積 35m^2 に上で求める世帯数を掛け合わせて，それぞれ 105 m^2，140 m^2 とする．案 3 は 0～29 m^2 の中央値 14.5 m^2×2 世帯，30～49 m^2 の中央値 39.5 m^2×7 世帯，・・，100～149 m^2 の中央値 124.5 m^2×3 世帯，150 m^2 の代表値 200 m^2×1 世帯を足し合わせた値（=1,345.5）を建物用地メッシュ数（=5）で除して 269.1 m^2 とする．なお，延床面積の 100m メッシュデータは一般財団法人日本建築情報センターから販売されており，土地改良の効果算定手法においても，その活用が明示されている．しかしながら，この最新データの基準年が平成 22 年と更新頻度は必ずしも高くないことなどから，本章ではこれを用いないこととする．

3.3 被害額算定手法の適用例

岡山県内から，貯水池の規模や下流域の資産密度等が異なる 3 地区をモデルに選んで氾濫解析を行い，その結果に **Table 3-3** の 3 案を適用して被害額を算定する．

3.3.1 モデル地区の概要

モデルとする 3 地区の概要を **Table 3-4** に示す．ここで「用水路等」以外の下流域欄の数値は，設定した氾濫解析対象区域内の人口等を，土地利用種別が「森林」や「湖沼」等に該当しない区域（以下，利用可能区域と呼ぶ）の面積で除して便宜的に求めた各資産等の密度を記載している．なお，この数値の基礎となる対象区域内の総数（総世帯数，総従業者数等）の値は **Table 3-3** のどの案を適用しても同値となる．

Table 3-4　モデル地区の概要

		A 地区	B 地区	C 地区
ため池	形態	複数	複数	単独
	有効貯水量（千 m^3）	上池 216 下池 212	上池 84 下池 96	10
	堤高（m）	上池 11.8 下池 11.6	上池 9.0 下池 9.0	6.7
	堤長（m）	上池 99 下池 111	上池 129 下池 202	5.6
	受益面積（ha）	上池 12 下池 12	上池 12 下池 18	5
下流域	人口（人/km^2）	915	772	368
	世帯数（世帯/km^2）	334	262	121
	従業者数（人/km^2）	862	120	186
	事業所数（事業所/km^2）	42	21	24
	農地面積（ha/km^2）	31.2	57.7	57.0
	用水路等（再建設費 百万円）	－	76	－

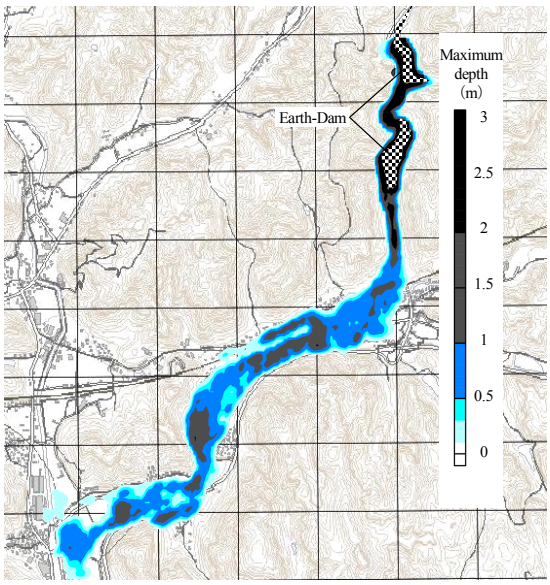
ため池の有効貯水量は A 地区が最も大きく，次いで B 地区，C 地区の順となっている．また，3 地区ともに受益面積が 20ha 未満と小さく，うち A 地区と B 地区は配置形態が複数（いわゆる「重ね池」「親子池」等）である．これらは既往の豪雨被害の報告（福本ら，2007 ; 堀，2005 ; 若林，2005）で決壊の危険性が高いため池とされる条件に合致している．

3.3.2　氾濫解析結果

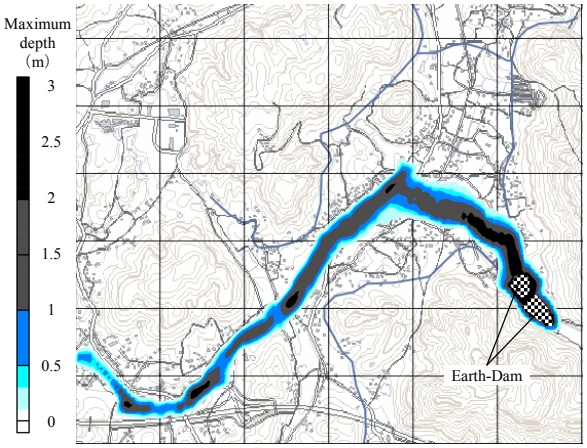
氾濫解析の結果，得られた最大浸水深の分布を **Fig.3-2** に示す．なお，これらの図は，国土地理院発行の基盤地図情報（縮尺レベル 25,000）を背景図とし，同院発行の基盤地図情報（数値標高モデル）の 5m メッシュ（標高）を用いて氾濫域を計算したものである．

Fig.3-2 の比較からわかるとおり，C 地区の浸水面積が最も小さい．これはため池の貯水量が他の 2 地区を大きく下回るためである. 一方, A 地区はため池の貯水量が最も大きく，浸水被害区域は最も広範囲に広がっている．しかしながら，最大浸水深が 1m を超える区域に着目すると，その面積は B 地区に比べて小さくなっている．これは，B 地区の氾濫域が山間の盆地状の地形を呈することから，氾濫流がため池の下流域に停滞するためではないかと考えられる．

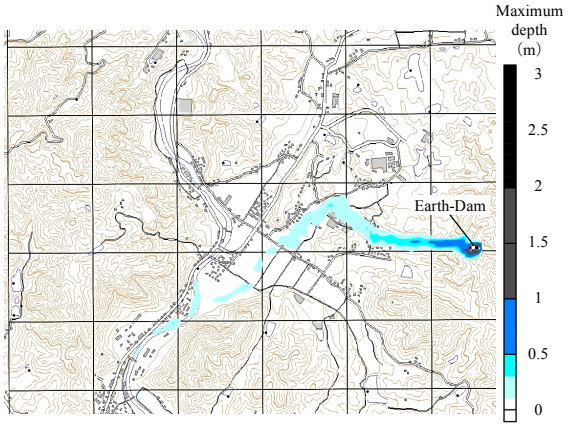
氾濫解析による被害世帯数や農地面積を **Table 3-2** の詳細法で求め, 結果を比較した表を **Table 3-5** に示す．ここでは国の規定（農林水産省農村振興局整備部，2015）により氾濫解析から得られる最大浸水深が 45cm 以上の場合に床上浸水が生ずるものとしている．この結果と **Table 3-2** を対比すると，被害の規模は貯水量や人口，事業所数，農地面積等の密度の大きさに概ね比例する傾向が認められる．



（A 地区）



（B 地区）



（C 地区）

Fig. 3-2　氾濫解析による最大浸水深の分布

Table 3-5　氾濫解析による被害世帯数や農地面積等の概要

	Site A	Site B	Site C
床下浸水世帯数	258 世帯	98 世帯	77 世帯
床上浸水世帯数	126 世帯	68 世帯	0 世帯
床下浸水事業所数	27 事業所	9 事業所	15 事業所
床上浸水事業所数	15 事業所	5 事業所	0 事業所
浸水農地面積	49ha	38ha	47ha
うち耕土流出	31ha	18ha	0ha
被災基幹用水路等	－	1.2km	－

3.3.3　被害額算定結果

被害額の算定結果を **Table 3-6** に示す．案 1-2，案 2-2，案 3-2 は，それぞれ案 1，案 2，案 3 について，**3.2** に述べた考え方を適用し最大浸水深 5mm 未満を「浸水被害無し」としたケースである．

最も精緻な取り扱いである案 3 及び案 3-2 と比較し，最も簡易な適用手法である案 1 及び案 1-2 は A 地区では約 11 億円大きくなっている．土地利用が混在する農村地域にあっては，住居が密集する新興住宅地の開発や，事業所が幹線道路沿い等の特定の区域に偏在していることが多く，浸水深が大きな 500m メッシュ内に住宅や事業所が密に存在する場合には，案 1 及び案 1-2 の被害額は過小となり，その反対の場合には過大となる．これが案 1 及び案 1-2 を適用し算出した場合に，被害額の値が大きく変動する主な理由と考えられる．特に，ため池が 40 万 m^3 を超える規模の総貯水量を有し，氾濫区域が広い範囲に拡がることが想定される A 地区のようなケースにあっては，案 1 や案 1-2 を用いた場合に生ずる誤差は非常に大きなものとなる．

市町村合併等により，近年，市町村の行政区域は拡大している．このため，同一の市町村内においても区域ごとの主たる産業の特色は従前以上に様々である．案 2 及び案 2-2 を適用して被害額を算定する場合，当該メッシュあたりの事業所の産業分類別の構成比率が市町村の平均と大きく異なる場合には，被害額の算定結果に大きな差が生ずることが懸念される．しかしながら，被害額の算定結果を比較する限り，案 2 と案 3，案 2-2 と案 3-2 の事業所に係る被害額の差は必ずしも大きくない．この結果から，3 地区の被害額の大小は無償で入手可能なデータのみによる案 2 や案 2-2 で評価できるものと考えられる．

一方，C 地区の算定結果は，他の 2 地区に比べて案 1～案 3，案 1-2～案 3-2 の差は小さい．**Table 3-5** からわかるとおり，C 地区では床上浸水の発生は想定されていない．このことから，貯水量が 1 万 m^3 程度であり被害の規模が小さなため池間の想定被害額の比較に

Table 3-6 被害額の算定結果

A 地区（複数（親子池）　総有効貯水量：約 43 万 m^3）　［単位：千円］

	項目	案 1	案 1-2	案 2	案 2-2	案 3	案 3-2
農業部門	農地	414,900	414,900	414,900	414,900	414,900	414,900
	用排水路等	―	―	―	―	―	―
	農作物	47,005	46,771	47,005	46,771	47,005	46,771
公共部門	住居（家屋・家庭用品）	3,401,587	3,390,756	3,248,160	3,237,968	3,468,072	3,458,133
	事業所	1,761,826	1,747,520	714,384	704,069	698,873	687,835
	公共建物	41,899	41,593	16,597	16,376	0	0
	農業用納屋	6,122	6,122	6,122	6,122	3,925	3,925
間接被害	営業停止損失	216,229	210,024	154,718	150,246	163,102	158,399
	家庭の応急対策	68,294	66,939	66,731	65,637	66,731	65,637
	事業所の応急対策	37,417	36,786	30,985	30,472	30,985	30,472
	合計	5,995,279	5,961,411	4,699,602	4,672,561	4,893,593	4,866,072

B 地区（複数（親子池）　総有効貯水量：約 18 万 m^3）　［単位：千円］

	項目	案 1	案 1-2	案 2	案 2-2	案 3	案 3-2
農業部門	農地	275,600	275,600	275,600	275,600	275,600	275,600
	用排水路等	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000
	農作物	30,442	30,133	30,442	30,133	30,442	30,133
公共部門	住居（家屋・家庭用品）	2,331,835	2,316,525	2,443,167	2,427,147	2,702,355	2,684,305
	事業所	186,546	183,768	146,542	144,624	237,547	235,242
	公共建物	5,760	5,681	4,554	4,499	0	0
	農業用納屋	5,327	5,327	5,575	5,575	7,555	7,555
間接被害	営業停止損失	17,637	16,373	15,982	15,106	18,973	18,050
	家庭の応急対策	41,726	40,082	43,567	41,847	43,567	41,847
	事業所の応急対策	17,977	17,476	14,585	14,169	14,585	14,169
	合計	2,923,850	2,901,965	2,991,014	2,969,700	3,341,624	3,317,901

C 地区（単独　総有効貯水量：約 1 万 m^3）　［単位：千円］

	項目	案 1	案 1-2	案 2	案 2-2	案 3	案 3-2
農業部門	農地	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200	4,200
	用排水路等	―	―	―	―	―	―
	農作物	9,495	9,028	9,495	9,028	9,495	9,028
公共部門	住居（家屋・家庭用品）	137,123	117,328	101,646	90,126	118,128	105,000
	事業所	51,358	43,948	51,358	43,948	41,928	35,961
	公共建物	1,873	1,603	1,873	1,603	5,653	4,796
	農業用納屋	0	0	0	0	0	0
間接被害	営業停止損失	24,509	20,972	24,509	20,972	24,124	20,607
	家庭の応急対策	14,720	12,595	10,913	9,675	10,913	9,675
	事業所の応急対策	8,420	7,182	8,420	7,182	8,420	7,182
	合計	251,698	216,856	212,414	186,734	222,861	196,449

は，案 1 や案 1-2 のような簡便な手法を適用できる可能性が示唆される．

最大浸水深 5mm 未満を「浸水被害無し」とすることについては，A 地区と B 地区で約 1%，C 地区で 12～14%とそれぞれ被害額が小さくなる．本章では，地区間の被害額の大小を比較することを目的としていることから，この取り扱いによって地区間の被害額の大小が逆転することは無い．しかしながら，特に C 地区のように被害が小規模なケースにおいては，最大浸水深 5mm 未満の被害を見込むか否かによって被害額の数値の差の割合が比較的大きく変動することに留意が必要である．

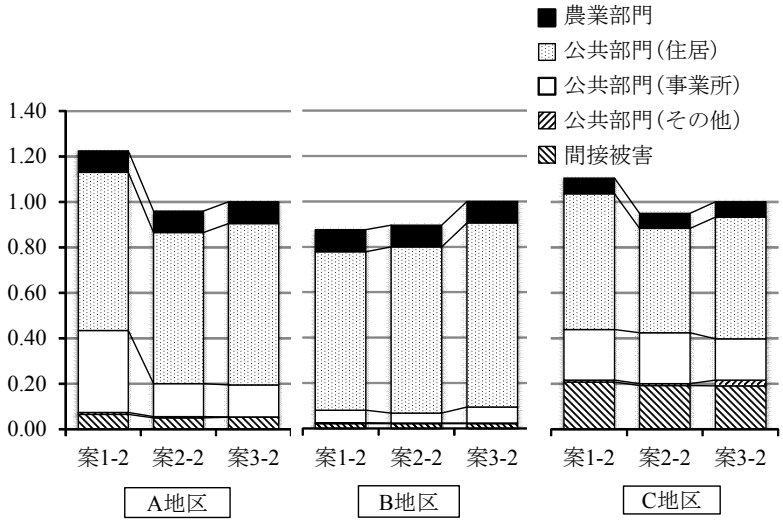


Fig. 3-3　被害額の対比

また，本章では，土水路程度の粗度係数の値として n=0.035 に固定して解析を実施したが，今後，本手法の実用化に向けては，これ以外の数値を適用した解析結果と比較し，その妥当性を検証することが不可欠である．

3.4　資産データの適用方法の比較と実用化に向けた留意点

Table 3-3 の資産データを適用する 3 案を比較し，ため池破堤時の想定被害額を簡易に推定する手法として，何れの案が最も実用的であるか等の観点から検討する．また，提案する手法の実用化に向けた課題や留意点について考察する．

3.4.1　資産データの適用方法の比較

Fig.3-3 に案 3-2 の総被害額を基準(=1.00)として案 1-2 及び案 2-2 と対比した図を示す．

この図のいずれの地区においても，案 2-2 と案 3-2 の差は僅かである．すなわち無償で入手可能なデータのみによる作業コストが小さい案 2-2 を用いた場合においても，案 3-2 と遜色無い精度で地区間の被害額の大小を評価できる結果となっている．

一方，住居の被害額のみについて，案 1-2 を他の 2 案（案 2-2，案 3-2）と比較すると，A 地区の事業所の被害額のように大きな差は見られない一方，その差は C 地区が最も大きくなっている．**3.3.3** で述べた案 1-2 の貯水量が小さなため池への適用性を向上するため，C 地区を例に，総世帯数や延床面積についての取り扱いを改良し適用することによって，

他の 2 案に近い結果が得られれば，最も大きな割合を占める住居の被害額算定に要する作業コストのさらなる軽減が可能となる．本章で試行した資産データの適用方法の中から，実用性の高い組み合わせ方をさらに検討することが今後の課題である．

3.4.2 実際に想定被害額を比較する際の留意点

モデル地区における被害額の規模を比べると，農業部門の被害額の割合は 3 地区ともに比較的小さい．ため池は農業生産を支える施設ではあるものの，機能保全対策の優先順位を効率的に検討するためには，まずは主に公共部門の想定被害額を指標とすることが有効と考えられる．

また，本章では 100m メッシュ単位に公表されている土地利用種別に即して氾濫想定域内や 500m メッシュ内の住居や事業所等が当該区域内に均等に分布しているとの考え方を基本として被害額を算定している．したがって，地域固有の事情等によって住居や事業所が偏在するケースなどには適用することはできない．さらに多くの地区でのケース・スタディを行い，被害額算定の基礎となる資産の分布状況を表現する何らかの指標を導入し，本手法が適用できる地域の条件を明らかにすることが今後の課題である．

3.5 結論

本章では，氾濫解析結果から被害額を簡易に算定する手法を考案し，実際のモデル地区に適用し被害額の大小を比較した．

その結果から得られた知見と本手法を適用する際の留意点等を以下に列記する．

(1) 無償で入手できる資産データのみによる比較的簡便な手法（案 2 や案 2-2）を用いることで，有償のデータを用いた精緻な方法（案 3 や案 3-2）と大差無い結果が得られた．

(2) 貯水量が小さなため池間の想定被害額の比較には簡便な手法（案 1 や案 1-2）を適用できる可能性が示唆された．

(3) ため池の貯水量が小さい地区を対象とする場合には，最大浸水深が僅か（5mm 未満等）な区域を被害額の算定対象から除外するか否かにより結果が大きく変動した．

(4) 地区間の被害額の大小を効率的に比較するには，住宅や事業所等の公共部門の被害額を指標とすることが有効と考えられた．

一方，地形条件やため池の規模等が異なる多くの地区に本手法を適用し，下流の資産密度と浸水面積や最大浸水深の比率との関係を分析することなどにより，破堤時の被害が大

きく検討の優先度が高い地区をより簡便に選定する実用性の高い手法へと発展させることが課題である．この点については，次章で詳しく検討する．

第 4 章　応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

4.1　緒論

筆者らは，前章で述べたとおり，リスク評価のプロセスのうち被害額算定に要する作業の簡略化に着目し，容易に入手可能な資産データのみを用いて国の規定（農林水産省農村振興局整備部，2015）に準ずる方法（詳細法）と大差なく被害額を簡易に算定する手法（簡易法）を提案した．簡易法は，農地一筆ごと家屋一棟ごとといった詳細な調査等を要さずに被害額を概算できるものであるが，氾濫解析を行って最大浸水深を求めるプロセスは必要となる．実際の計画時の意思決定の効率化に資するためには，このプロセスに要する労力を軽減することが有効となる．

ため池は，その形態により「谷池（山池）」と「皿池」に大別される．谷池は山間や丘陵地で谷をせき止めて造成され，皿池は平地や窪地の周囲に堤防を築いて築造される．平成 16～25 年度のため池の被害は約 90%が豪雨によるものとされ（遠藤ら，2015），一般的に集水域は皿池に比べて谷池の方が大きい．このことから，本研究では，潜在する破堤リスクが皿池よりも相対的に大きいと考えられる谷池に着目する．同一の地域内の谷池には，地理的な特性や地形的な特徴に一定の類似性が存在すると仮定し，この類似性に基づき，破堤時に想定される被害の大きさに寄与する何らかの因子を説明変数として，被害額を目的変数とする応答曲面（回帰式）を作成できると考える．

このような着想から，本章では，被害額算定をさらに簡略化するため，**2.2** で述べた実験計画法に基づき作成する応答曲面を用いて，氾濫解析を行わずに被害額を簡易に推定する手法を提案する．この手法により応答曲面を作成すれば，適用条件を満たす多くの他地区の被害額推定に要する作業の大幅な簡略化が可能となる．

ここで被害額の推定に用いる因子は貯水量や世帯密度等の候補のなかから感度解析をもとに選定し，その因子と被害額との関係を示す応答曲面を重回帰分析によって作成する．被害額に対する因子の感度や応答曲面は，実在する複数のモデル地区のデータをもとに多くのため池データを作成し，氾濫解析や被害額算定を繰り返す数値実験により求める．この数値実験を効率化するため，ここでの被害額の算定には前章に述べた筆者らが提案する簡易法のうち案 2-2 の方法を用いる．最後に，作成した応答曲面を用いて実在する地区の被害額を推定し，簡易法を用いた積み上げ計算による被害額との差について評価し，その結果をもとに提案する手法の実用化に向けた課題について考察を加える．

4.2　影響因子の候補の選定

被害額に影響すると考えられる因子の候補を可能な限り多数挙げる．ただし，ここで挙げる各因子間は互いに独立であることを条件とする．したがって，ある因子を候補に挙げようとする場合には，他にその因子との強い相関が推定される因子があれば，ため池や下流域の特性をより的確に表現できるどちらかの因子のみを候補として残すこととする．

4.2.1　因子選定の考え方

被害額は，**2.1** に述べた氾濫解析をもとに①25ｍメッシュごとの最大浸水深を算定し，②その値に各メッシュの世帯数や事業所の従業者数，農地面積等の資産データを適用することによって算出する．ここでは，①と②のそれぞれのプロセスで算出結果に影響する可能性があると考えられる因子を感度解析の検討対象として挙げることとする．

4.2.2　検討対象とする因子

2.1 に述べた氾濫解析手法を用いて最大浸水深を算定する①のプロセスで影響すると考えられる因子としては，a)ため池の有効貯水量，b)氾濫解析エリアの面積に対する貯水池より標高が低い区域の面積の割合，c)主たる氾濫流路の勾配の中央値の 3 つを選ぶ．勾配の因子は，少数の極端な値が影響する平均勾配に比べて，値の頻度分布も考慮される点で氾濫流路全体の特性を表現する因子として有利である中央値を候補としている．b)は氾濫源となるため池よりも標高が低い面積の割合が大きい地区と小さい地区では被害の規模や態様が異なることが想定されるため，その特性の違いを表現する因子として候補に挙げたものである．

被害額を算定する②のプロセスで影響すると考えられる因子としては，d)氾濫解析エリア内の土地利用種別が「森林」や「湖沼」等に該当しない区域（利用可能区域）の面積の割合，e)利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数，f)利用可能区域 1km^2 当たりの従業者数，g)利用可能区域 1km^2 当たりの農地面積, h)利用可能区域内の農作物の平均価格の 5 つを選定した．これら以外に人口や事業所数も被害額に影響する因子であるが，それぞれ e)や f)との相関が非常に強いことが想定され，また e)や f)は被害額算定の際に直接用いられることから，これらを候補とすることとした．

なお，ここで氾濫解析エリアは，ため池及び下流の氾濫想定域が存在する約 500m 四方の 3 次メッシュ（「統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード」（昭

Table 4-1　解析に用いる L16 直交表と被害額

No.	a	b	c	d	e	f	g	h	被害額 (百万円)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,084[121]
2	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	679[57]
3	1	1	-1	-1	1	1	1	1	23,443[931]
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,029[457]
5	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	7,805[365]
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1,494[565]
7	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	18,717[588]
8	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	3,164[854]
9	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1,063[17]
10	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1,428[20]
11	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	2,676[33]
12	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	3,766[26]
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1,496[80]
14	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	826[69]
15	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	862[37]
16	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	499[42]
17	0	0	0	0	0	0	0	0	9,673[743]

注）被害額欄の[ ]内は農業被害額で内数

a(1,0,-1)=(428,126,10)　千 m^3
b(1,0,-1)=(77.5,48.6,30.3) %
c(1,0,-1)=(1.2,0.8,0.6) %
d(1,0,-1)=(71.3,47.0,27.5) %
e(1,0,-1)=(502,268,73)　世帯
f(1,0,-1)=(1293,390,73)　人
g(1.0,-1)=(57.7,49.5,31.2) ha
h(1,0,-1)=(68628,55765,43315)　円

参考：モデル地区の因子の値

a(A,B,C)=(428,180,10)　千 m^3
b(A,B,C)=(30.3,48.6,77.5) %
c(A,B,C)=(0.7,1.2,0.6) %
d(A,B,C)=(27.5,71.3,42.3) %
e(A,B,C)=(334,262,147)　世帯
f(A,B,C)=(862,120,186)　人
g(A.B,C)=(31.2,57.7,57.0) ha
h(A,B,C)=(43315,68628,55352)　円

和 48 年行政管理庁告示第 143 号)）を単位としている.

4.3　因子の感度解析と応答曲面の作成

2.2.1 に述べた実験計画法により次の 2 段階の数値実験を実施する.

ⅰ) 直交表を用いて多数の候補となる因子から少数の因子に絞り込むためのスクリーニング実験（感度解析）

ⅱ) 絞り込まれた因子について一様計画を用いて応答との関係を調べる実験（応答曲面の作成）

4.3.1　実験計画法の適用方法

ここでは L16 直交表に，全水準の中心点を追加して適用した．これにより最大 15 個のパラメータの感度を 16 回の数値実験で調べることができる.

感度解析に用いる直交表と被害額の値を **Table 4-1** に示す.

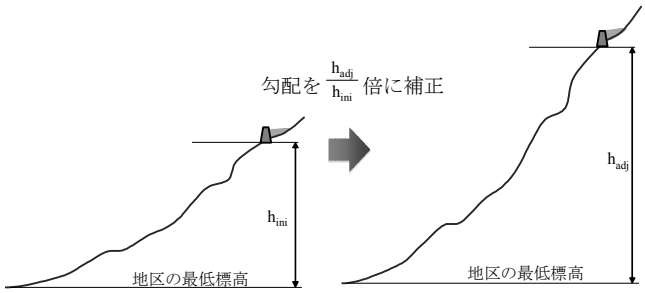


Fig. 4-1　地形データの補正方法の例

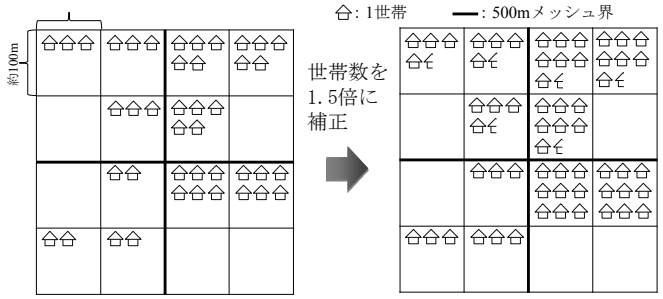


Fig. 4-2　世帯数データの補正方法の例

表中の 1 は最大値，-1 は最小値，0 は中央値であり，たとえば，No.1 のため池地区は全てが 1（最大値）であることから，a が 428 千 m^3，b が 77.5 %，c が 1.2%，d が 71.3%，e が 502 世帯，f が 1,293 人，g が 57.7ha，h が 68,628 円の地区であり，この地区で氾濫解析を行って算定した被害額が 3,084 百万円（うち農業被害額が 121 百万円）となる．

ここで氾濫解析や被害額の算定に用いる No.1～17 の各ため池データは，**Table 3-4** の 3 地区の地形データや土地利用種別，世帯数等を一部補正して作成する．**Fig.4-1** や **Fig.4-2** の例に示すようにのように，たとえば，因子 c は最低標高との標高差に，因子 e は各 100m メッシュ内の世帯数にそれぞれ **Table 4-1** の値となるような一律の倍率を乗じて全地点の標高や世帯数の値を補正する．

4.3.2　感度解析結果

直交表に基づく実験の結果，得られた被害額をもとに，各因子の感度を計算した結果を **Fig.4-3** に示す．この図から，a)ため池の有効貯水量，c) 主たる氾濫流路の勾配の中央値，e)利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数，f)利用可能区域 1km^2 当たりの従業者数の 4 つの因子が被害額に大きく寄与することがわかる．一方，b) 貯水池より標高が低い区域の面積の割合や，d)利用可能区域の面積の割合等は被害額の値にほとんど影響しない結果となった．

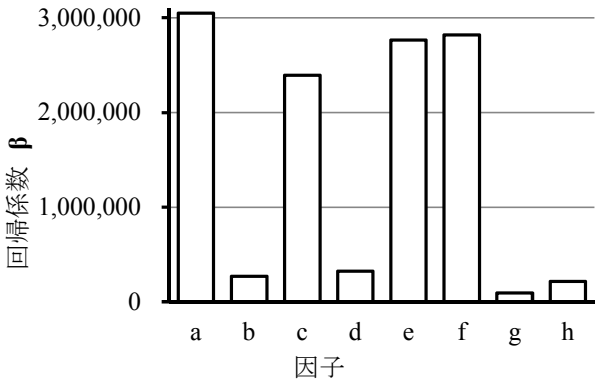


Fig. 4-3　各因子の被害額への感度

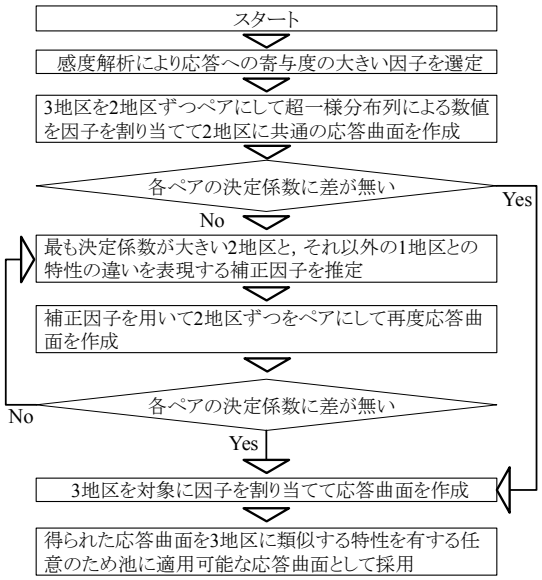


Fig. 4-4　応答曲面作成の手順

これらはモデル地区全体の地形や土地利用を反映する因子ではあるものの，氾濫域に特化したものではないことから，被害額への影響度は限定的であることが一因と推察される．また，g)農地面積や h)農作物の平均価格の被害額への感度も極めて低い結果となった．これは **Table 4-1** に示すとおり各地区ともに被害額のうちの農業被害額が大きな割合を占めていないことによるものと思われる．

4.3.3　応答曲面の作成方法と結果

応答曲面作成のフロー図を **Fig.4-4** に示す. 感度解析において被害額への感度が高いとの

結果が得られた 4 つの因子に実験計画法を用いて 21 パターンの数値を与える．ここでも，地形や世帯数のデータは **Table 3-4** の 3 地区のデータをもとに **4.3.1** で述べた方法で補正して数値に適合させているため，3 地区ごとの地形条件や世帯数の分布特性等の影響を厳密には排除できないことが問題となる．そこで，まずは，このような特性の違いによる地区間の相関の差異の有無を確認することとし，2 地区ずつ 3 パターンの組み合わせで回帰分析を行い．その結果，3 パターンの決定係数に差が無く高い値が得られた場合は 3 地区をまとめて回帰分析を行って応答曲面を求める．

一方，2 地区ずつのペア間の決定係数の差が大きい場合には，最も高い相関が認められる 2 地区に共通し，それ以外の 1 地区では異なる特性が存在すると仮定し検討を進める．地区間の特性の違いを表現する補正因子を推定し，この因子を加えて，再度，2 地区ずつをペアにして回帰分析を行う．その結果，各ペアの決定係数に差が無く，ともに高い値が得られた場合は, 推定が正しいものと判断する. 最後に 3 地区をまとめて回帰分析を行い，得られた回帰式を 3 地区に類似する立地特性を有する任意のため池に適用可能な応答曲面として採用する．

因子に与える 21 通りの数値のセットを乱数により任意に 3 地区に割り当てて被害額を求めた．因子と被害額の関係を **Table 4-2** に，氾濫解析から得られた最大浸水深の分布を **Fig.4-5 (a)～(i)**にそれぞれ示す．なお，**Fig.4-5** は国土地理院発行の基盤地図情報（縮尺レベル 25,000）を背景図とし，国土地理院発行の基盤地図情報（数値標高モデル）の 5m メッシュ（標高）を用いて氾濫域を計算したものである．

これをもとに 2 地区の組み合わせごとに 14 パターンずつ取り出して相関を調べた．その結果，決定係数 R^2 は 0.60 から 0.85 と大きな差が認められ，最も高い相関が得られたのは A 地区と C 地区の組み合わせとなった．

ここまでの結果から，A 地区と C 地区に類似し，B 地区には異なる特性が存在すると推定した．A 地区と C 地区は谷筋に，B 地区は台地上に，それぞれ建物用地が位置する傾向がある．そこで，この特性を表現する補正因子 i として，「氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置（**Fig.4-6**）」を新たに与えることとした．ここで平均値ではなく中央値を採用した理由は，**4.2.2** で勾配の因子に中央値を選んだ考え方と同様に，頻度分布を反映する因子であることによる．これを用いて，再度，2 地区ずつをペアにして回帰分析を行った結果，決定係数 R^2 の差は 0.73 から 0.88 と小さくなり，全て高い値が得られた．そこで，3 地区をまとめて 21 パターンで回帰分析を行った. その結果は **Fig.4-7** と **Table 4-3** に示すとおり

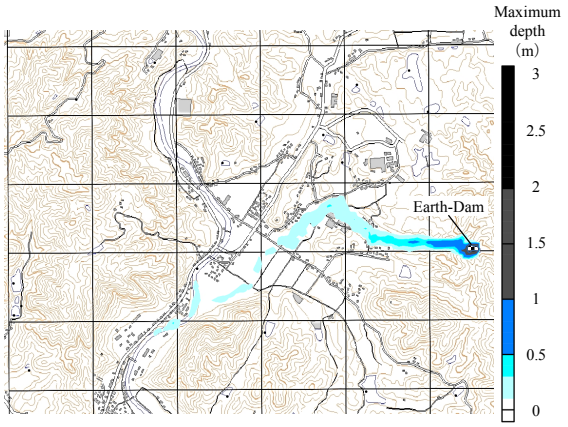
となり，決定係数は R^2=0.79 と高い相関を有する回帰式（式(4-1)）が得られたことから，この式を被害額の算定に用いる応答曲面として採用した．

$$被害額 = 15{,}880 \times a - 3.959 \times 10^8 \times c + 7{,}951 \times e + 1{,}492 \times f + 5.183 \times 10^6 \times i \quad (4\text{-}1)$$

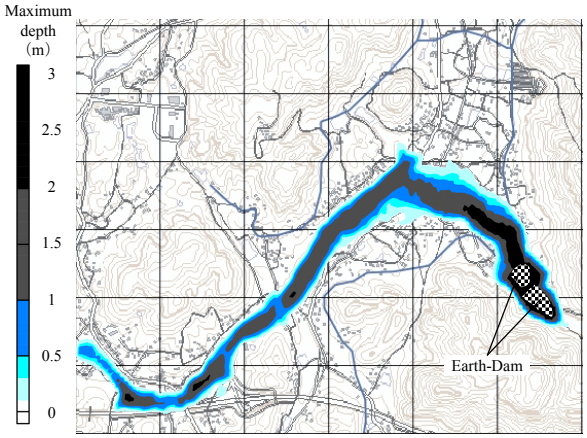
ここに，a：有効貯水量（千 m^3），c：主たる氾濫流路の勾配の中央値（%），e：氾濫域の世帯数の平均密度（世帯/km^2），f：氾濫域の従業者数の平均密度（人/km^2），i：氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置であり，被害額の単位は千円である．なお，説明変数である因子が全て 0 の場合には，被害額は 0 と仮定し，ここでは定数項の無い原点を通る回帰式を採用している．

Table 4-2　因子と被害額の関係

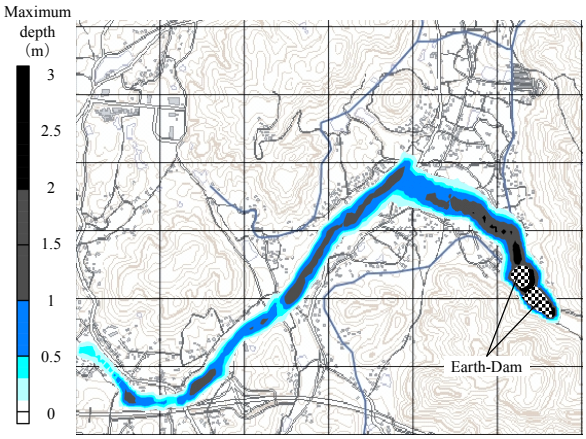
No.	地区	a	c	e	f	被害額
1	C	10.000	0.607	73.000	62.000	49
2	B	219.000	0.820	158.800	237.861	3,507
3	B	114.500	1.032	244.600	413.709	2,793
4	A	323.500	0.678	330.400	589.570	6,873
5	C	62.250	0.891	416.200	765.430	2,026
6	B	271.250	1.103	90.160	941.291	4,673
7	B	166.750	0.749	175.960	1,117.139	4,688
8	B	375.750	0.961	261.760	87.125	7,641
9	A	36.125	1.174	347.560	262.985	643
10	C	245.125	0.631	433.360	438.834	5,517
11	A	140.625	0.843	107.320	614.694	898
12	A	349.625	1.056	193.120	790.555	5,045
13	B	88.375	0.702	278.920	966.403	3,104
14	A	297.375	0.914	364.720	1,142.264	6,880
15	A	192.875	1.127	450.520	112.249	2,960
16	C	401.875	0.772	124.480	288.098	3,680
17	A	23.063	0.985	210.280	463.958	180
18	C	232.063	1.198	296.080	639.819	5,224
19	C	127.563	0.654	381.880	815.667	2,332
20	B	336.563	0.867	467.680	991.528	14,199
21	C	75.313	1.080	141.640	1,167.389	1,869



（No.1）

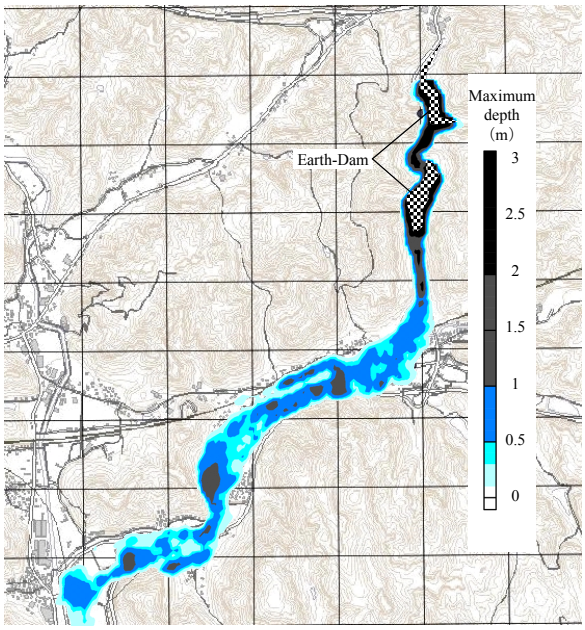


（No.2）

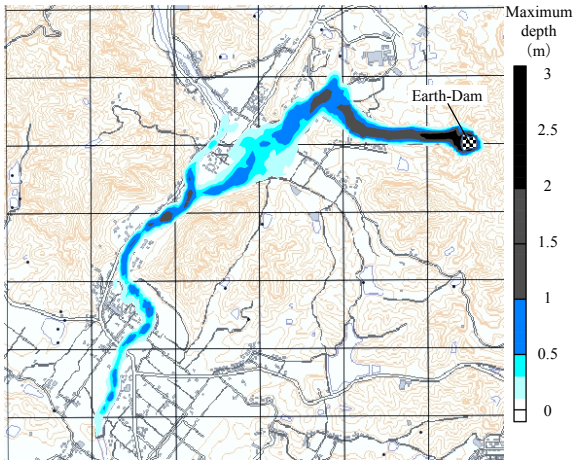


（No.3）

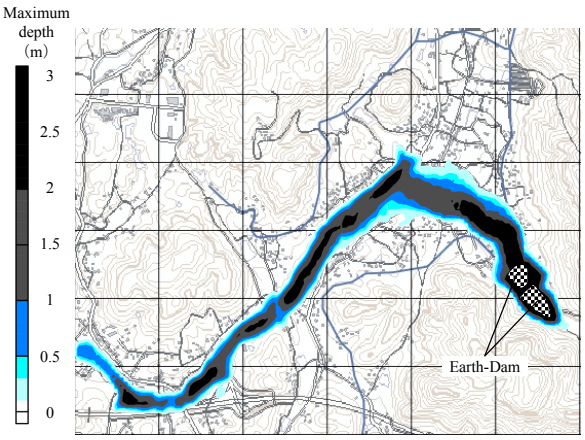
Fig. 4-5 (a)　氾濫解析による最大浸水深の分布



(No.4)

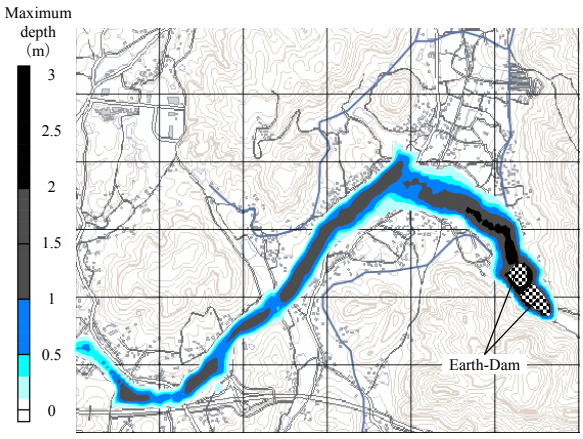


(No.5)

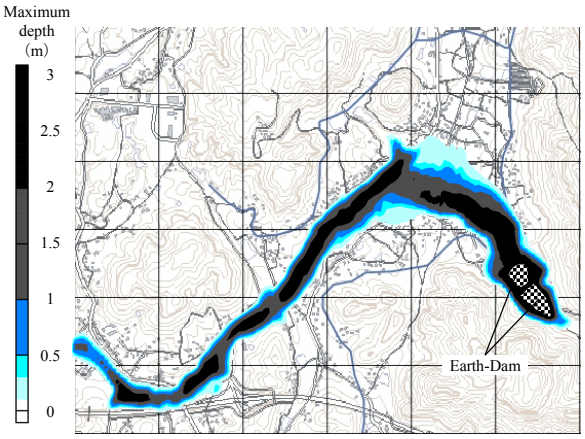


(No.6)

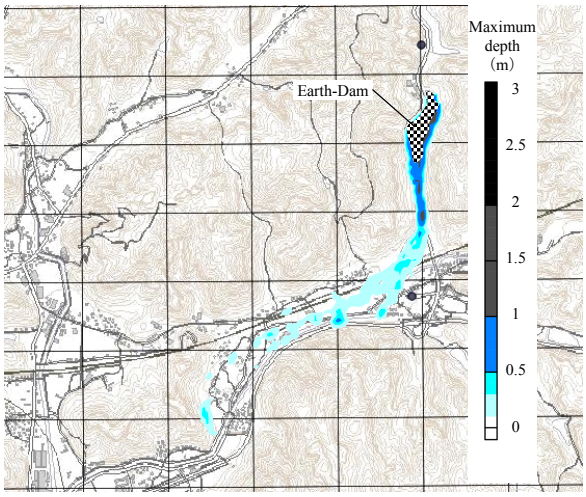
Fig. 4-5 (b)　氾濫解析による最大浸水深の分布



（No.7）

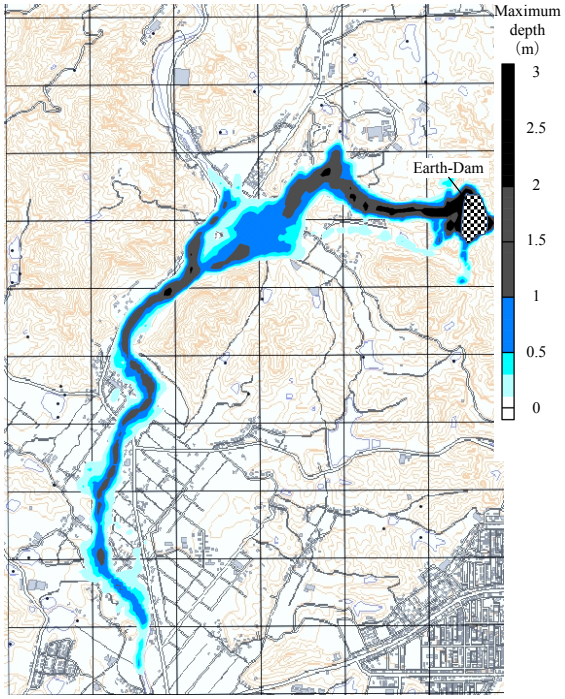


（No.8）

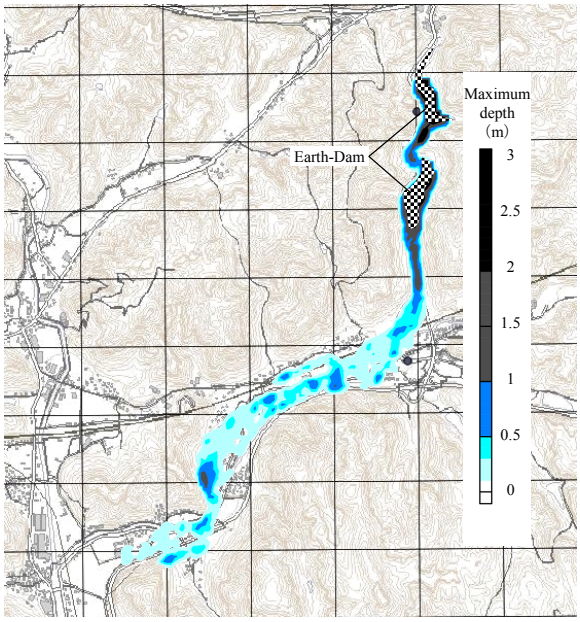


（No.9）

Fig. 4-5 (c)　氾濫解析による最大浸水深の分布

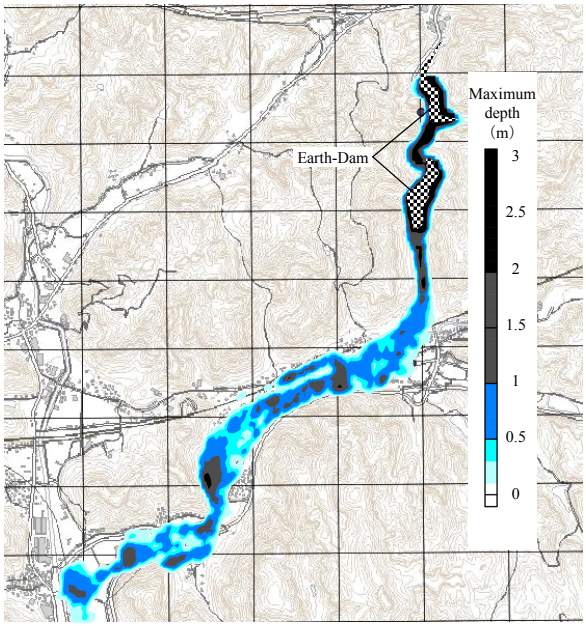


（No.10）

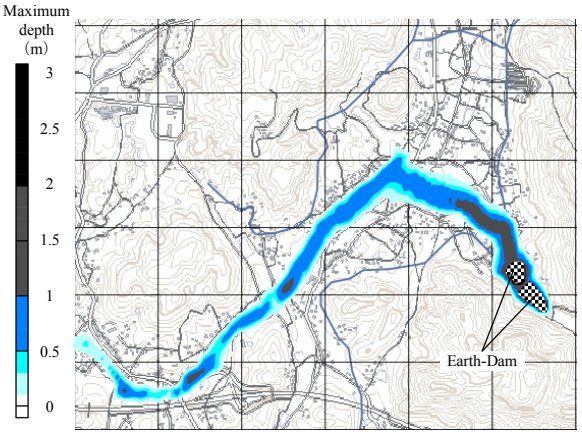


（No.11）

Fig. 4-5 (d)　氾濫解析による最大浸水深の分布

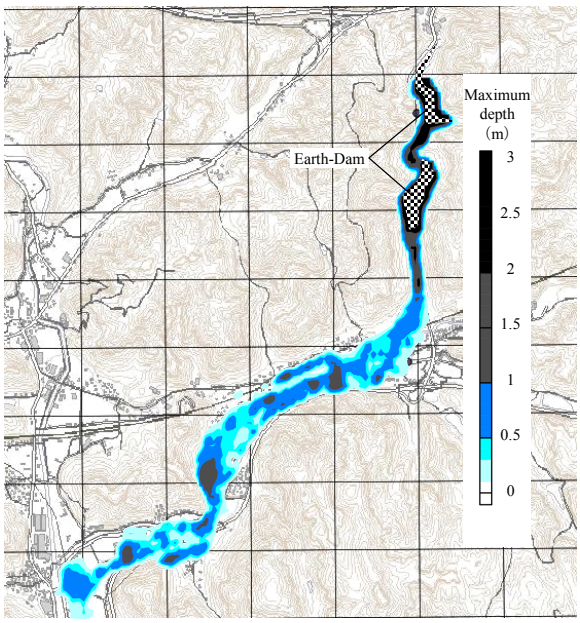


（No.12）

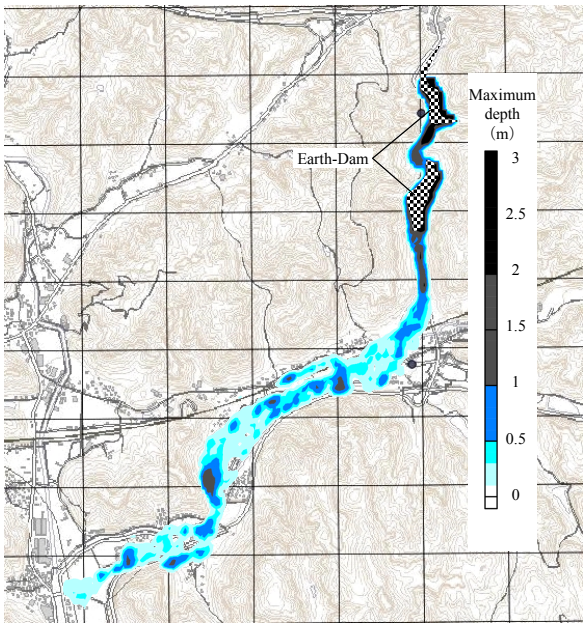


（No.13）

Fig. 4-5 (e)　氾濫解析による最大浸水深の分布

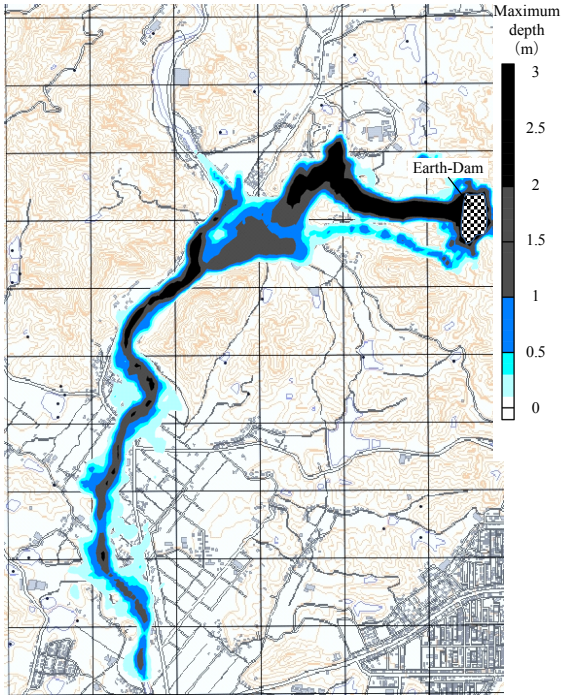


（No.14）

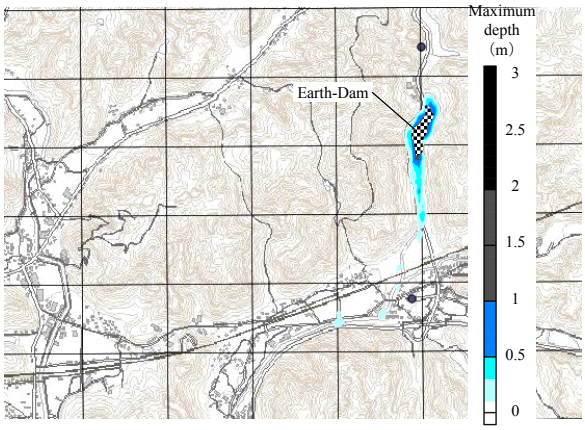


（No.15）

Fig. 4-5 (f)　氾濫解析による最大浸水深の分布

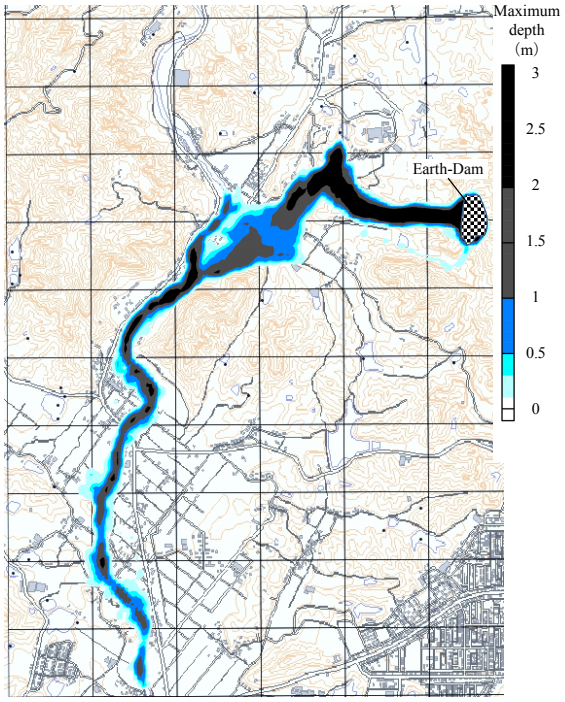


（No.16）

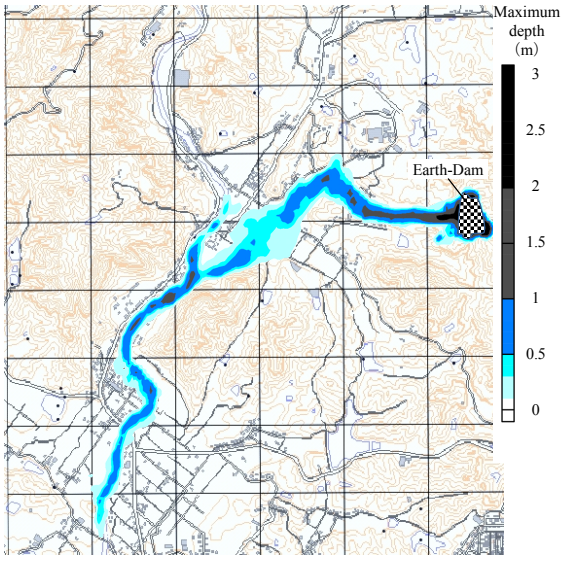


（No.17）

Fig. 4-5 (g)　氾濫解析による最大浸水深の分布

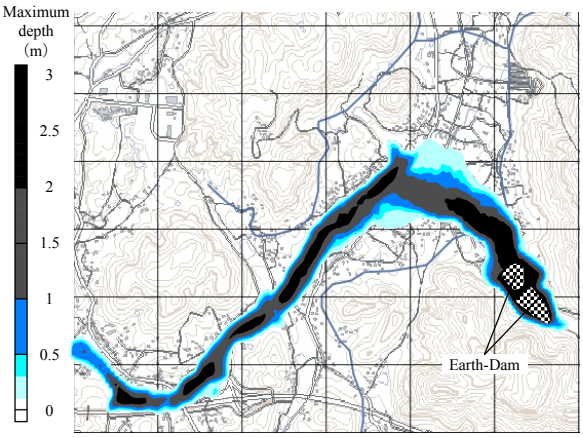


（No.18）

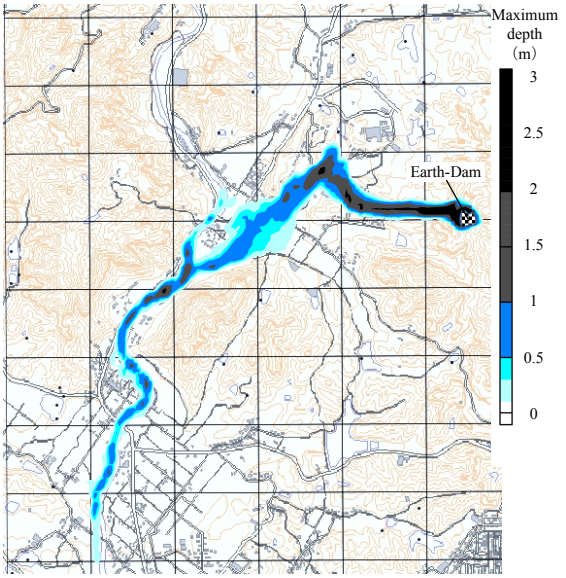


（No.19）

Fig. 4-5 (h)　氾濫解析による最大浸水深の分布



（No.20）



（No.21）

Fig. 4-5 (i)　氾濫解析による最大浸水深の分布

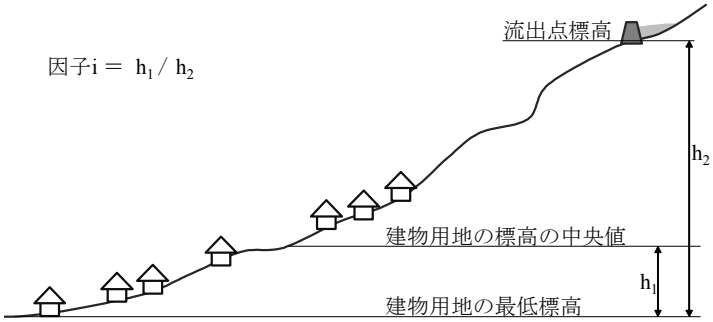


Fig. 4-6　因子 i の定義

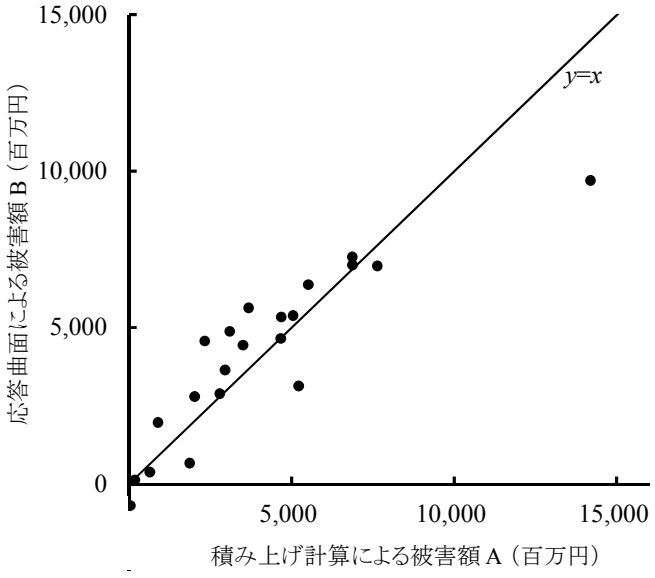


Fig. 4-7　応答曲面の適合度

4.4　応答曲面の他地区への適用と修正

得られた応答曲面をモデル地区以外の地区に適用する．適用対象地区は，岡山県内から 2 池を選定する．ここで，応答曲面作成に用いたモデル地区と同じ市町村の池は，地理的な特性等が類似すると想定されるため除外する．また，実際にリスク評価の対象とされやすい地区を選定する観点から，堤体内部に不確定要素が多いとされる古い年代に築造されたため池であり，受益面積が小さく管理が行き届かない懸念があり，かつ，土地改良事業設計指針「ため池整備」（農業農村工学会，2015）に重要度が最も高いため池の条件として例示されている数値に合致する地区を選ぶ．具体的には，築造年代が不明または江戸時代以前であり，受益面積 30ha 以下，堤高 10m 以上、有効貯水量 10 万 m^3 以上の全てに合致

Table 4-3　応答曲面作成に用いた因子と被害額

No.	a	c	e	f	i	被害額 A	被害額 B
1	10.000	0.607	73.000	62.000	0.17	49	-690
2	219.000	0.820	158.800	237.861	0.50	3,507	4,440
3	114.500	1.032	244.600	413.709	0.50	2,793	2,886
4	323.500	0.678	330.400	589.570	0.25	6,873	7,255
5	62.250	0.891	416.200	765.430	0.17	2,026	2,793
6	271.250	1.103	90.160	941.291	0.50	4,673	4,653
7	166.750	0.749	175.960	1,117.139	0.50	4,688	5,340
8	375.750	0.961	261.760	87.125	0.50	7,641	6,965
9	36.125	1.174	347.560	262.985	0.25	643	378
10	245.125	0.631	433.360	438.834	0.17	5,517	6,375
11	140.625	0.843	107.320	614.694	0.25	898	1,962
12	349.625	1.056	193.120	790.555	0.25	5,045	5,382
13	88.375	0.702	278.920	966.403	0.50	3,104	4,875
14	297.375	0.914	364.720	1,142.264	0.25	6,880	7,004
15	192.875	1.127	450.520	112.249	0.25	2,960	3,647
16	401.875	0.772	124.480	288.098	0.17	3,680	5,626
17	23.063	0.985	210.280	463.958	0.25	180	126
18	232.063	1.198	296.080	639.819	0.17	5,224	3,132
19	127.563	0.654	381.880	815.667	0.17	2,332	4,571
20	336.563	0.867	467.680	991.528	0.50	14,199	9,701
21	75.313	1.080	141.640	1,167.389	0.17	1,869	669

することを条件とする.

Table 4-4 に適用対象とする 2 つのため池の概要と各因子の値を示す.

適用結果は，積み上げ計算による被害額と比較し，応答曲面の作成に用いたデータと同等の精度が得られるかを評価することによって検証する. 具体的には，適用地区の誤差を，次式により求める応答曲面を作成した 21 回の数値実験に適用したデータの不偏分散 MSE（mean square error）と比較することによって評価を行う.

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{N-k-1}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2 \tag{4-2}$$

Table 4-4　適用対象地区の概要と因子の値

		因子	D 地区	E 地区
ため池	形態		単独	単独
	有効貯水量（千 m^3）	a	105	200
	堤高（m）		15.7	12.1
	堤長（m）		93.5	118
	受益面積（ha）		23	30
下流域	主たる氾濫流路の勾配の中央値（%）	c	0.406	0.513
	人口（人/km^2）		1,145	1,269
	世帯数（世帯/km^2）	e	407	454
	従業者数（人/km^2）	f	528	235
	事業所数（事業所/km^2）		67	37
	農地面積（ha/km^2）		27.2	39.3
	氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置	i	0.23	0.14

ここに, $\bar{y}$ は応答曲面（回帰式）による被害額，y_i は各数値実験の結果（積み上げ計算による被害額），N は実験回数（21 回）, k は説明変数となる因子の数（5 個）を表す.

評価の結果，誤差が大きい場合には，適用地区のデータとモデル地区の実データを加えて応答曲面を修正する．このプロセスは，本研究で提案する手法を基本として，さらに各地域の実状に即した応答曲面へと近づけていく際の手順となる.

4.4.1　応答曲面の適用結果

応答曲面を **Table 4-4** の地区に適用し得られた被害額について, 簡易法を用いた積み上げ計算による値との相関を調べるため，応答曲面作成時の数値実験に用いたため池データの値とともに図示した結果を **Fig.4-8** に示す.

この図では，適用地区の応答曲面による被害額 B は，おおむね応答曲面作成データのばらつきの範囲内の値となっているように見える.

そこで，これを数値で比較するため，適用地区の $(y_i - \bar{y})^2$ を計算し，式(4-2)から算出する応答曲面作成データの不偏分散 MSE と比較した結果を **Table 4-5** に示す. 計算の結果, 適用地区の $(y_i - \bar{y})^2$ は 2 地区とも MSE よりも大きくなり，応答曲面による適用地区の被害額推定値の誤差は，応答曲面作成に用いたデータの不偏分散の範囲からやや外れる結果となった．このことから，数値実験をもとに作成した応答曲面をそのまま用いて，実在するため池の被害額を算定する場合には，精度の面で未だ課題が残るものと考えられた.

4.4.2　応答曲面の修正結果

式(4-1)の応答曲面について，実在する地区のデータとして 3 つのモデル地区と 2 つの適

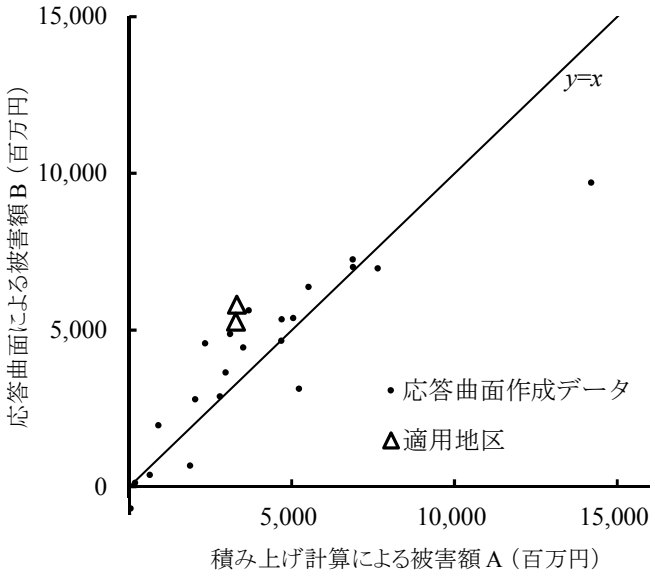


Fig. 4-8　応答曲面の他地区への適用結果

用地区のデータを用いて再度重回帰分析を行って修正した応答曲面は次式となる．

$$\text{被害額} = 13{,}275\times \mathrm{a} - 2.913\times 10^{8}\times \mathrm{c} + 5{,}278\times \mathrm{e} + 1{,}325\times \mathrm{f} + 5.582\times 10^{6}\times \mathrm{i} \tag{4-3}$$

この式を用いて算出した被害額 B を，積み上げ計算により算出した被害額 A と比較した結果を **Fig.4-9** に示す．この図から，実在する 5 地区のうち，最も被害額が大きい 1 つのモデル地区（A 地区）を除き，4 地区の被害額 B は被害額 A に近い値が得られていることがわかる．これを数値で比較するために $(y_i - \bar{y})^2$ を計算した結果は，**Table 4-6** に示すとおりとなり，最も被害額が大きい A 地区を除き，$(y_i - \bar{y})^2$ の値は **Table 4-5** の数値実験データの MSE よりも小さいことが確認できた．このように一様計画による数値実験から得られた応答曲面をそのまま適用できない場合には，実在する地区のデータを加えて修正を続けることで，各地区が存在する地域の実状に即した応答曲面に近づけることが必要と考えられる．

なお，被害額 A と被害額 B の差が大きい A 地区の有効貯水量（因子 a）は応答曲面を適用した実在地区のなかで最大である．本研究で実施した数値実験で与える因子 a は 3 つのモデル地区の有効貯水量の最小値と最大値の範囲内に一様に分布するように与えた．その結果，**Table 4-3** に示す応答曲面作成時の数値実験に用いたため池データの因子 a には，どれも A 地区の有効貯水量 428 千 m^3 よりも小さい値を与えている．A 地区のように数値実

験に用いた数値の範囲から外れる因子の値を持つ地区に応答曲面を適用する場合には，適合度が悪くなる可能性があることに留意が必要と考えられる．

Table 4-5　応答曲面の実在地区への適用結果

	No.	y_i 被害額 A（千円）	$\bar{y}$ 被害額 B（千円）	$(y_i-\bar{y})^2$
応答曲面作成時の数値実験に用いたため池データ	1	49,079	-690,147	546,455,463,515
	2	3,507,350	4,440,460	870,694,901,876
	3	2,792,695	2,886,150	8,733,926,420
	4	6,872,925	7,255,382	146,273,135,288
	5	2,025,957	2,793,221	588,694,663,630
	6	4,673,130	4,653,437	387,814,967
	7	4,687,606	5,339,684	425,205,067,791
	8	7,640,662	6,965,360	456,033,285,112
	9	642,680	377,510	70,315,033,045
	10	5,516,681	6,375,932	738,312,761,020
	11	897,962	1,961,895	1,131,954,322,757
	12	5,045,087	5,382,255	113,681,926,839
	13	3,103,990	4,874,840	3,135,908,908,834
	14	6,879,856	7,003,515	15,291,455,178
	15	2,960,405	3,646,623	470,894,526,474
	16	3,680,380	5,626,481	3,787,309,014,988
	17	180,067	126,562	2,862,789,333
	18	5,224,025	3,132,315	4,375,249,280,089
	19	2,332,088	4,570,692	5,011,348,307,265
	20	14,198,599	9,701,300	20,225,701,034,994
	21	1,868,779	669,147	1,439,115,811,328
			計	43,560,423,430,744
			不偏分散 MSE	2,904,028,228,716

	No.	y_i 被害額 A（千円）	$\bar{y}$ 被害額 B（千円）	$(y_i-\bar{y})^2$
適用地区	D	3,279,482	5,275,268	3,983,163,419,693
	E	3,314,806	5,815,053	6,251,235,120,073

Table 4-6　修正後の応答曲面の適用結果

	No.	y_i 被害額 A (千円)	$\bar{y}$ 被害額 B （千円）	$(y_i-\bar{y})^2$
モデル地区	A	4,672,561	7,997,972	11,058,358,650,740
	B	2,969,700	3,094,007	15,452,334,828
	C	186,734	199,743	169,227,830
適用地区	D	3,279,482	4,343,181	1,131,456,583,655
	E	3,314,806	4,632,453	1,736,192,438,479

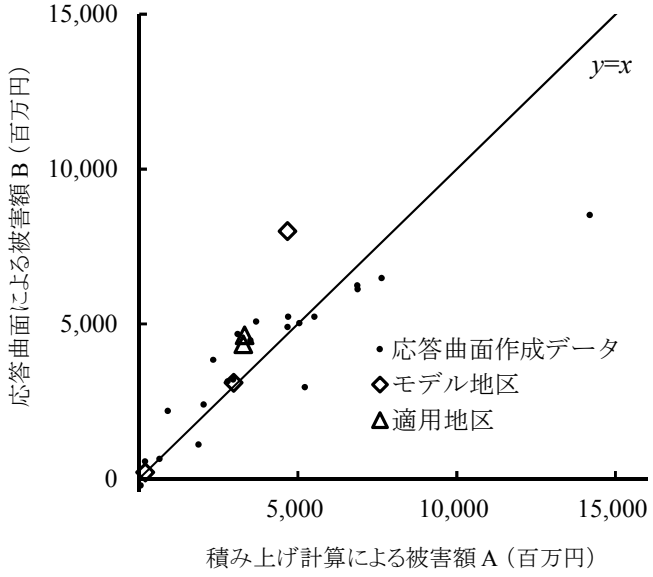


Fig. 4-9　修正後の応答曲面の適用結果

4.5　結論

本章では，実験計画法を用いて，貯水量や氾濫域の地形条件・世帯密度等のうち被害額の算定結果に対する感度が高い因子を抽出するとともに，その因子を用いて被害額を算定する応答曲面を作成する手法を提案し実際に適用を試みた.

その結果から得られた知見を以下に示す.

(1)　有効貯水量，主たる氾濫流路の勾配の中央値，利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数及び従業者数の 4 つの因子が被害額の算定結果への感度が高くなった.

(2) これらの因子に，氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置を表現する因子を加えた5つを用いて被害額を推定する応答曲面を作成したところ，積み上げ計算による被害額の算定値との高い相関が得られた．

(3) 数値実験により作成した応答曲面を適用して他の実在地区の被害額を推定したところ，誤差は数値実験時の不偏分散からやや外れる結果となった

(4) 実在地区のデータを追加して修正した応答曲面による被害額は，有効貯水量が数値実験で与えた値の範囲外の1地区を除き，積み上げ計算による被害額に近い値が得られた．

なお，本研究で提案する手法で作成した応答曲面を適用できるため池は，5 つの因子が一定の範囲内であるほか，谷池（山池）であること等の基礎的な特性が検討に用いたモデル地区と乖離しない地区であるといった制約が存在することに留意が必要である．

近年，記録的な集中豪雨が頻発するなかにあって，西日本の瀬戸内海沿岸を中心に存在する膨大な数のため池の保全管理を効率化するためには，本章で提案する手法により推定する氾濫時の想定被害額に応じて効果的に対策を講ずることが有効な方策の一つになるものと考えられる．

第 5 章　応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価

5.1　緒論

本章では，前章で述べた筆者らが提案する応答曲面法による被害額の簡易推定手法をリスク評価に応用し，実在する地区に適用する．対象地区は，前章で応答曲面の修正に用いた岡山県内の 5 地区（3 つのモデル地区と 2 つの適用地区）とし，リスク評価を試行するとともに，得られた結果をもとに提案する手法を実用化するための課題等について考察を加える．

5.2　破堤確率の算定

破堤確率の算定には，今後発生する降雨パターンの多様性を表現するために実降雨データをもとに作成する擬似降雨を用いる．擬似降雨は 1 時間あたりの降雨データが 72 個連続するデータを 1 セットとして作成し，そのうちの降雨強度が最大となるデータからピーク流出量を合理式によって算出する．ピーク流出量が洪水吐の設計洪水流量を上回る場合に破堤が生ずるものとして，破堤確率を計算する．

5.2.1　擬似降雨の作成

擬似降雨は，**2.3** に述べた手順で作成する．

本研究では，県内の代表地点として岡山市を選び，44 年間の降雨データから得られる年

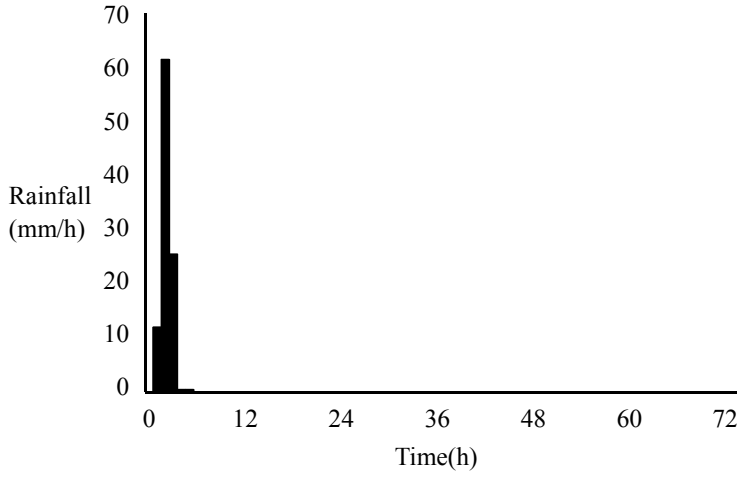


Fig. 5-1　岡山地方気象台における 1 時間降雨強度の最大値を観測した降雨

最大 72 時間連続降雨データをもとに解析を行う．この中には，**Fig.5-1** に示す岡山地方気象台の 1 時間降雨強度の最大値を観測した降雨のデータも，その年の年最大 72 時間連続降雨に該当することから含まれている．

作成された擬似降雨波形の例を **Fig.5-2(a)〜(c)**に示す．**Fig.5-2(a)**は，作成された 10 万個の擬似降雨のなかで，最大級の降雨強度を持つものの一例である．**Fig.5-2(b)**は，弱い強度で長時間降り続く降雨であり，このような降雨も擬似降雨には含まれている．**Fig.5-2(c)**は，72 時間連続降雨の総降水量が 600mm を超える降雨であり，解析対象とした 44 年間における 72 時間連続降雨の最大値の約 1.5 倍に相当する．

5.2.2 破堤確率の算定方法

ここでは，ため池への流入量が増大し，洪水吐の設計洪水流量を洪水時のピーク流入量が上回った場合に越流による破堤が生ずるものと仮定する．流域からため池への流入は，式(5-1)で与えられるものとする

$$Q_{in} = f_p r A / 3.6 \tag{5-1}$$

Q_{in}：洪水流入流量(m^3/s)，r: 降雨強度(mm/h)，A：流域面積(km^2)，f_p: ピーク流出係数（0.7~0.8 の一様乱数で与える）．

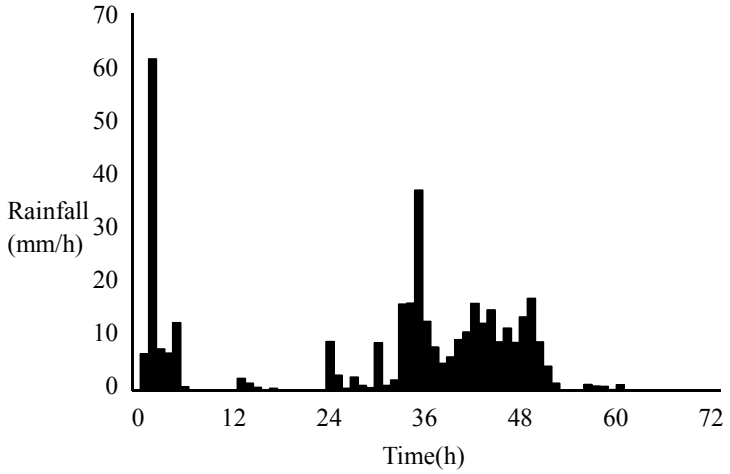
ここで，乱数による降雨と f_p の不確定性を考慮して連続降雨 72 時間中のピーク流入量 Q_p を求め，越流確率 P_f= Prob[$Q_p > Q_d$]を求める．ここで，Q_d : 洪水吐の設計洪水流量(m^3/s)である．越流確率 は，$Q_d < Q_p$ を満足する回数を総シミュレーション回数（10 万回）で除した値とする．

5.3 破堤リスクの簡易評価

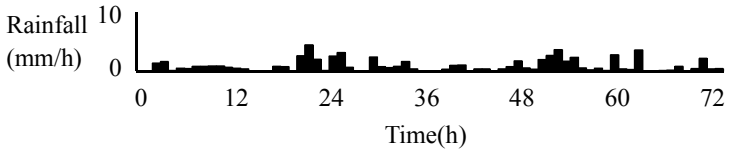
破堤リスクは，改修費と被害額を合計して算出する総費用の期待値を指標として，改修前後での低減効果を算出することによって評価を行う．

5.3.1 リスク評価手法

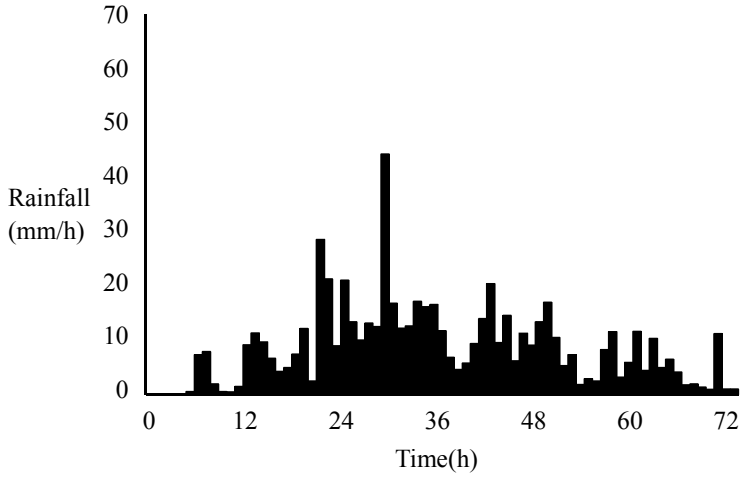
越流が生じた場合には，ため池の堤体は徐々に天端から浸食された後に破堤に至るものと考えられる．しかしながら，このような浸食過程を再現するには多くの不確定要素を明



(a) 最大級の降雨強度を持つ擬似降雨の例



(b) 弱い強度で長時間降り続く擬似降雨の例



(c) 72 時間連続降雨の総降水量が最大の擬似降雨の例

Fig. 5-2　擬似降雨波形の例

らかにするための詳細な調査が必要となる．一方，本研究は，そのような詳細な調査を行う前段で，検討対象とするため池の候補を一次スクリーニングする手法を提案することを目的としている．したがって，同じ条件でため池間のリスクの大小を比較し改修の優先度を評価できる手法であるとともに，行政機関の職員等が自らの労力で簡易に実施できる取

り扱いとする必要がある．このことから，ここでは，堤体の浸食過程を解析には組み込まず，越流と同時に破堤が生ずるとの条件で比較を行うものとした．

ここで，堤体の改修前後の越流確率 P_i を，それぞれ，P_{bi}, P_{ai} とすると，供用年 t（本研究では 50 年とする）における，越流回数 n_c の期待値は式(5-2)から求めることができる．これに基づいて，期待総費用 C_T を式(5-3)から求めることができる．堤体の改修費用は文献（農業水利施設研究会，2009）に記載されている完了地区の実績データをもとに算出するアースダムの堤体積 1,000m^3 あたりの工事費に支出済換算係数（農林水産省農村振興局整備部，2015）を乗じて現在価値化し，この値に各ため池の堤体積を掛け合わせて求められる概算額を用いる．

$$E[n_c]_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{t} \left[P_{b_i} \left(1 - P_{b_i} \right)^{k-1} \left\{ 1 + (t-k) P_{a_i} \right\} \right] & \text{（未改修）} \\ t \cdot P_{a_i} & \text{（改修）} \end{cases} \tag{5-2}$$

$$C_T = C_0 + \sum_{i=1}^{M} C_{f_i} \cdot E[n_c]_i \tag{5-3}$$

C_0: 堤体の改修費用　C_{fi}:氾濫解析の対象セル i（セルの大きさは約 25m 四方）の想定被害額　M はセルの個数

次に，信頼性設計の概念に基づき集中豪雨時におけるため池堤体の越流リスク評価を行う．

5.2 の計算結果から得られるため池の破堤確率に **4.4.2** で応答曲面によって算出される被害額を乗じて期待損失を計算し，全面更新にあわせて洪水吐を所要の規模に改修する場合の期待総費用を算出する．これらの計算結果から求められる期待総費用低減効果を指標として，優先順位の設定と改修費用の妥当性評価を試行する．ここで，期待総費用とは総費用（改修費と被害額の総額）の期待値であり，期待総費用低減効果とは，改修後の期待総費用から改修前の期待総費用を差し引いて得られる値を指す．たとえば，この効果の値がマイナスとなれば，改修が妥当であると評価できないことを意味する．

5.3.2　リスク評価結果

応答曲面を用いたリスク評価と，積み上げ計算による被害額を用いた評価とを比較した結果を **Table 5-1** に示す．

Table 5-1 リスク評価の試行結果

		A 地区	B 地区	C 地区	D 地区	E 地区
越流確率	改修前	0.02262	0.00516	0.00895	0.02239	0.00664
	（順位）	（1）	（5）	（3）	（2）	（4）
	改修後	0	0	0	0	0
改修費用=改修後の期待総費用 B（千円）		387,009	469,940	55,287	129,003	285,650
積み上げ計算による手法	被害額[注)]（千円）	4,672,561	2,969,700	186,734	3,279,482	3,314,806
	期待総費用（千円） 改修前 A	3,184,135	676,856	67,609	2,222,453	939,106
	期待総費用低減効果 A-B	2,797,126	206,916	12,322	2,093,450	653,456
	（順位）	（1）	（4）	（5）	（2）	（3）
応答曲面による方法	被害額[注)]（千円）	7,997,972	3,094,007	199,743	4,343,181	4,632,453
	期待総費用（千円） 改修前 A	5,450,249	705,188	72,319	2,943,305	1,312,404
	期待総費用低減効果 A-B	5,063,240	235,248	17,032	2,814,302	1,026,754
	（順位）	（1）	（4）	（5）	（2）	（3）

注）被害額は改修前

A～E の各池はすでに改修済であり，洪水吐は 200 年確率に相当する設計洪水流量を流下できる規模が確保されている．ここでは，それを改修後の状態とし，現在の洪水吐の流下能力を 2 分の 1 に減じて改修前の状態を仮定している．

Table 5-1 のとおり改修後の越流確率は全ての地区で 0 となり，現在の洪水吐の流下能力が十分な規模を備えていることを示している．一方，改修前には越流が生ずる結果となり，その確率は A 地区が最も高く，D 地区，C 地区，E 地区，B 地区の順となっている．

改修費用は全て供用年を 50 年とした場合の積み上げ計算による期待総費用を下回っている．この結果によると，仮に洪水吐の規模が現在の 2 分の 1 程度であった場合には，リスク評価を行った 5 池ともに洪水吐を含む堤体の全面改修を行うことは妥当となる．

応答曲面による期待総費用低減効果は，最も効果が大きい A 地区から順に D 地区，E 地区，B 地区，C 地区となり，積み上げ計算による効果と同じ序列となる結果が得られた．このことから，予算や人員等の制約下において，行政機関が詳細検討の対象地区の優先順

位を設定しなければならない場合に，応答曲面による期待総費用低減効果の簡易推定結果の序列は，参考となる指標の一つとして活用が期待されるものと考えられる．

なお，**4.4.2** に述べたとおり，A 地区のように応答曲面による被害額の推定精度に問題がある地区については，別の指標による評価と組み合わせて改修費の妥当性や優先順位を検討することに留意が必要である．

5.4 応答曲面を用いたリスク評価の実用化に向けて

5.3 に述べたとおり，改修を検討するため池を選定する際の優先度を考える際に，応答曲面を用いて期待総費用低減効果を簡易に推定した結果は，参考となる指標の一つとして期待される結果が得られたが，その実用化に向けた課題は少なくない．本節では，それらのうち，リスク評価の精度向上に向けた課題と，提案する手法を実際に行政機関が適用するために必要となる課題について考察を加える．

5.4.1 応答曲面を用いたリスク評価の精度向上に向けて

簡易法で算出する被害額を用いてリスク評価を行うためには，ため池ごとに地形データを取得して氾濫解析を行った後に，その結果をもとに世帯数や従業者数，農地面積等の資産データを適用し被害額を積み上げるプロセスが必要になる．一方，本章で提案する手法は，5 つの因子を求めるだけでリスクを概略で評価することができる．したがって，**5.3.2** に示すようにリスクの大小に着目して，優先順位を検討する場合には，提案する手法を用いることにより，リスク評価に要する時間や労力を大幅に軽減することが可能となる．

しかしながら，得られた **Table 5-1** の期待総費用低減効果の値を比較すると，本章で提案する応答曲面による手法は，積み上げ計算による手法を代替できる十分な精度を有しているとは言い難い．このため，特に，応答曲面によって得られた数値そのものを単独で意思決定に用いることは難しく，たとえば参考値としての位置づけに留めるなど取り扱いに配慮が必要である．

また，本研究でリスク評価に用いる破堤確率の算定には，洪水吐の設計洪水量と合理式から得られるため池へのピーク流入量との比較から簡便に算出する方法を用いている．これは，ため池台帳等に記載されている諸元のみから確率を算出できるよう採用したものであるが，より精度の高いリスク評価を行うためには，洪水吐の形状等を調査した上で，ため池の貯留効果を考慮することが望ましいと考えられる．このことによって，擬似降雨の

ピーク値のみならず，その前後の降雨波形の影響もリスク評価に反映することが出来る．本稿で提案するリスク評価手法の精度のさらなる向上に向けて，このような改良を加えることと併せて，より多くの実在地区のデータを追加し，応答曲面に修正を加えていくことが不可欠である．

5.4.2 応答曲面を用いたリスク評価の適用に向けて

農林水産省は，下流に人家や公共施設等があり、施設が決壊した場合に影響を与えるおそれがある等のため池を「防災重点ため池」と定義し，優先的に一斉点検を行うとともに，耐震照査や防災・減災対策を総合的に推進している．さらには東日本大震災の教訓を踏まえ改定された，土地改良事業設計指針「ため池整備」（農業農村工学会，2015）には，AA 種，A 種，B 種の重要度区分の定義や，各ため池の重要度を決定する際の基本的な考え方等が明記されている．

また，ため池のみならず，頭首工や用排水路等を含む全ての農業水利施設を対象とする機能保全の取り組みについては，手引き（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会, 2015）が改定され，リスク管理の概念が明示的に導入されることとなった．具体的には,「リスク管理の観点からストックマネジメントの各プロセスの取組を効率的に行うため，施設の重要度を評価する」こととされたところである．

本研究で提案する応答曲面を用いた簡易なリスク評価手法が，実際の防災・減災対策や機能保全対策において効果的に活用されるためには，上記の「防災重点ため池」の選定や，重要度の区分・評価の取り組みのなかで有用との認識を得る必要がある．たとえば，破堤リスクが大きなため池は，防災・減災の観点から重要であることから，提案する簡易評価手法を，地域のため池を対象とする重要度の概略評価などに活用されるよう，関係行政機関の協力を得ながら具体的な適用方法を検討し明らかにすることが今後の課題である．

5.5 結論

本章では，応答曲面法によって作成する回帰式を用いて，貯水量や氾濫域の世帯密度等の値から氾濫解析を行わずに被害額を推定し，破堤リスクを簡易に評価する手法を提案し，実際のため池地区への適用を試みた．

その結果から，応答曲面をいて推定した実在地区の期待総費用低減効果の値の序列は，積み上げ計算による値と同じ序列となり，優先順位を設定する際の指標の一つとしての活

用が期待される結果が得られた.

本章で提案する応答曲面によるリスクの簡易評価手法を実際のため池の保全管理に適用する具体的な手順等を明確にし，行政機関等に提示することによって，機能保全対策の意思決定の最適化に役立つツールへと発展させることが今後の課題である.

第 6 章　結　論

我が国は度重なる自然災害に見舞われてきたが，そのたびに，そこから得た教訓がその後の対策に活かされてきた．その発端は，台風災害のなかで明治以降最多の死者・行方不明者数 5 千余名に及ぶ被害を生じさせた 1959 年の伊勢湾台風である. この災害を契機として，それまでの防災体制の不備を改めるとともに，災害対策全体を体系化することなどを目的として，今日の防災対策の原点となる「災害対策基本法」が制定された．その後の大きな転機となったのが, 観測史上最大の震度 7 の直下型地震が大都市を直撃した 1995 年の阪神・淡路大震災である．高速道路の高架橋が倒壊するなどの当時は想定が困難であった事態に直面して,「絶対安全はありえない」という視点で構造物を見なければならないとの意識が広く浸透した．これをきっかけとして，構造物を強化することのみに着目するのではなく，稀に起きる大震災では多少の被害は容認する，すなわち，リスクの存在を肯定する考え方を取り入れて，合理的な施設の性能評価や，効率的な対策のあり方についての議論が活発に行われるようになった．さらには，最大の遡上高が 40m を越える大津波が発生した 2011 年の東日本大震災を踏まえて,「防護」という発想によるインフラ整備中心の防災対策だけでは限界があることを教訓として「国土強靭化基本法」が制定され，ハザードマップの作成・活用や避難訓練の実施などのソフト対策をこれまで以上に重視した重層的な防災・減災対策が現在進められている．リスク評価結果を参考にしながら，数多くの対策の中から有効な手段を選択し適切に組み合わせて講ずることは，もはや努力目標ではなく，意思決定者にとって具体的に実行に移さなければならない喫緊の課題の一つとなっている.

このような中，農業水利施設が地震や豪雨により被災するリスクについても看過できない差し迫った状況となっている．南海トラフを震源とする M8～9 クラスの大地震が今後 30 年以内に 60～70%の可能性で発生すると想定されているが, この地震に対する防災対策の推進指定地域には，全国の基幹的な農業水利施設の実に約 3 割が集中して存在している（食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会，2014）．ため池の被災リスクは，さらに顕在化しており，平成 16 年から 25 年までの 10 年間の年平均の決壊ため池数は 53 箇所にのぼると報告され，その被災原因の約 9 割が豪雨とされている（遠藤ら，2015）．老朽化が進行するこれら施設の機能を持続的に保全していくためには，自然災害によるリスクの存在を許容した上で，適切にそのリスクを管理していく必要があり，それを実行するための手法や技術の確立が強く求められる状況となっている.

このような背景を踏まえ，本研究では，農業水利施設の今後の防災・減災対策を考える上で考慮すべき事象の一つである農業用ため池の破堤に焦点を当て，想定される被害額やリスクを推定し，これに基づき機能保全対策の対象地区を決定するプロセスの効率化に資する実用的な手法の構築を目的として，以下の研究を行った．

① 資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定

② 応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

③ 応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価

具体的には，第 3 章では，ため池破堤時の被害額を算定する際に用いられる氾濫域の家屋や事業所，農地等の資産データを簡易かつ効率的に適用する手法（簡易法）を考案し，国の規定に準ずる適用法（詳細法）との比較を行った．ここで詳細法を適用するために必要とされる資産データを得るには相当の費用や労力を要するが，本格的な検討に着手する前段で破堤時の想定被害額を簡易に比較しようとする際に，これらをすべて入手することは現実的ではないことから，詳細な調査を行わずに容易に入手可能な資産データのみを用いて，土地利用が混在する農村地域の特性に即した被害額の簡易推定手法を提案した．

第 4 章では，第 3 章の提案をさらに発展させ，実験計画法に基づき作成する応答曲面（回帰式）を用いて氾濫解析を行わずに被害額を簡易に推定する手法を提案した．この手法により応答曲面を作成すれば，適用条件を満たす多くの地区の被害額推定に要する作業の大幅な簡略化が可能となる．被害額の推定に用いる因子は貯水量や世帯密度等の候補から感度解析をもとに選定し，その因子と被害額との関係を示す応答曲面を重回帰分析によって作成した．因子の被害額に対する感度や応答曲面は，実在する複数のモデル地区のデータをもとに多くのため池データを作成し，氾濫解析や被害額算定を繰り返す数値実験により求めた．この数値実験を効率化するため，ここでの被害額の算定には第 3 章で述べた筆者らが提案する簡易推定手法を用いた．

第 5 章では，第 4 章で提案する応答曲面を用いた被害額算定手法をリスク評価に応用し実在する 5 地区に試行的に適用した．さらには試行結果をもとに本研究で提案する手法を実用化するための課題等について考察を加えた．以下に，これらの研究結果を要約し，本研究の結論をまとめる．

6.1 資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定（第 3 章）

第 3 章では，氾濫解析結果から被害額を簡易に算定する手法を考案し，実際のモデル地

区に適用し被害額の大小を比較した．その結果から得られた知見と本手法を適用する際の留意点等を以下に列記する．

(1) 無償で入手できる資産データのみによる比較的簡便な手法を用いることで，有償のデータを用いた精緻な方法と大差無い結果が得られた．

(2) 貯水量が小さなため池間の想定被害額の比較には最も簡便な手法を適用できる可能性が示唆された．

(3) ため池の貯水量が小さい地区を対象とする場合には，最大浸水深が僅か（5mm 未満等）な区域を被害額の算定対象から除外するか否かにより結果が大きく変動した．

(4) 地区間の被害額の大小を効率的に比較するには，住宅や事業所等の公共部門の被害額を指標とすることが有効と考えられた．

一方，地形条件やため池の規模等が異なる多くの地区に本手法を適用し，下流の資産密度と浸水面積や最大浸水深の比率との関係を分析することなどにより，破堤時の被害が大きく検討の優先度が高い地区をより簡便に選定する実用性の高い手法へと発展させることが課題として挙げられた．

6.2 応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定（第 4 章）

第 4 章では，前章で挙げた課題を踏まえ，実験計画法を用いて，貯水量や氾濫域の地形条件・世帯密度等のうち被害額の算定結果に対する感度が高い因子を抽出するとともに，その因子を用いて被害額を算定する応答曲面を作成する手法を提案し実際に適用を試みた．その結果から得られた知見を以下に示す．

(1) 有効貯水量，主たる氾濫流路の勾配の中央値，利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数及び従業者数の 4 つの因子が被害額の算定結果への感度が高くなった．

(2) これらの因子に，氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置を表現する因子を加えた 5 つを用いて被害額を推定する応答曲面を作成したところ，積み上げ計算による被害額の算定値との高い相関が得られた．

(3) 数値実験により作成した応答曲面を適用して他の実在地区の被害額を推定したところ，誤差は数値実験時の不偏分散からやや外れる結果となった．

(4) 実在地区のデータを追加して修正した応答曲面による被害額は，有効貯水量が数値実験で与えた値の範囲外の 1 地区を除き，積み上げ計算による被害額に近い値が得られた．

なお，本研究で提案する手法で作成した応答曲面を適用できるため池は，5 つの因子が

一定の範囲内であるほか，谷池（山池）であること等の基礎的な特性が検討に用いたモデル地区と乖離しない地区であるといった制約が存在することに留意が必要と考えられた．

6.3　応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価（第 5 章）

第 5 章では，応答曲面法によって作成する回帰式を用いて，貯水量や氾濫域の世帯密度等の値から氾濫解析を行わずに被害額を推定し，破堤リスクを簡易に評価する手法を提案し，実際のため池地区への適用を試みた．その結果から，応答曲面を用いて推定した実在地区の期待総費用低減効果の値の序列は，積み上げ計算による値と同じ序列となり，優先順位を設定する際の指標の一つとして，活用が期待される結果が得られた．

一方，ここで提案する応答曲面によるリスクの簡易評価手法を実際のため池の保全管理に適用する具体的な手順等を明確にし，行政機関等に提示することによって，機能保全対策の意思決定の最適化に役立つツールへと発展させることが今後の課題として挙げられた．

－参 考 文 献－

赤尾聡史，福永剛士（2014）：応答曲面法による独立型太陽光発電システムの設置コスト最適化，土木学会論文集 G（環境），70 (6)，Ⅱ_217-Ⅱ_225.

秋山壽一郎，重枝未玲，草野浩之（2012）：都市域浸水・減災対策検討シミュレータによる飯塚市街地の浸水被害評価，土木学会論文集 B1（水工学），68(4)，Ⅰ_1063-Ⅰ_1068.

青木徹彦（1998）：構造物の重要度に関する２，３の考察，土木学会第 53 回年次学術講演会，Ⅰ-B，732-733.

Apel, H., Thieken, A.H., Merz, B. and Blöschl, G. (2004): Flood risk assessment and associated uncertainty, Natural Hazards and Earth System Science, 4 (2), 295-308.

荒井　誠, 鈴木竜浩, 清水泰斗 (2000) : 船体構造設計最適化への応答曲面法の適用性検討, 日本造船学会論文集，188，545-552.

荒尾慎司，竹下哲也，楠田哲也（1995）：リスク・便益及び費用からみた浸水防除法の評価に関する研究，環境システム研究，23，169-179.

阿武良一, 脇屋和久, 藤本泰三 (2013) : 山口県のため池防災対策, 農業農村工学会誌, 81(3), 226-227.

馬場慎一，堀内孝英，宮石　薫，山田貞夫（2005）：圃場末端管水路の漏水事故実態と維持管理計画の策定手法，農土誌，73(11)，17-20.

Dierauera, J., Pintera, N. and Remo, J.W.F. (2012): Evaluation of levee setbacks for flood-loss reduction, Middle Mississippi River, USA, Journal of Hydrology, 450-451(11) , 1-8.

遠藤知庸，永島善隆，毛利栄征（2015）：ため池管理による地域防災力等の強化，農業農村整備政策（農業農村工学会農業農村整備政策研究部会報），1，7-12.

五味　愛, 伊藤貴之（2007）：代表色領域の位置関係に着目した大容量画像からの類似部分画像の高速抽出，芸術科学会論文誌，6(3)，117-125.

Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M.A.A.M. and Benwell, D. (2008): A methodology for regional-scale flood risk assessment, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 161(3), 169-182.

Harten, A., Lax, P.D., and van Leer, B. (1983): On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation lows, SIAM Rev., 25(1), 35-61.

Hall, J.W., Dawson, R.J., Sayers, P.B, Rosu, C., Chatterton, J.B. and Deakin, R. (2003) : A methodology for national-scale flood risk assessment, Proceedings of the ICE-Water and Maritime Engineering, 156 (3), 235-247.

Hall, J.W., Dawson, R.J. and Sayers, P.B. (2005) : National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales, Natural Hazards, 36 (1-2), 147-164.

橋本　誠, 同前浩司（2014）: 山口県のため池管理手法に関する取組み, 農業農村工学会誌, 82(4)，342-343.

平田和太，中島正人（2008）：地震時残留変形量を考慮したフィルダムの地震リスク評価, 土木学会論文集 A，64(4)，705-720.

平野義鎮，轟　章，八田博志，松崎亮介（2007）：拡張 FBBM を用いた複合材翼の拘束条件付フラッタ動圧最大化，理論応用力学講演会講演論文集，56.

福本昌人，吉村亜希子，島崎昌彦（2007）: 2004 年の台風 23 号による香川県内のため池の決壊の実態，近中四農研報，6，167-176.

堀　俊和（2005）: 農業用ため池の豪雨災害に関する研究, 農業工学研究所報告, 44, 139-247.

堀　俊和，毛利栄征，松島健一，有吉　充（2010）: 豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法，農業農村工学会論文集，270, 57-67.

星谷　勝，中村孝明（2002）：構造物の地震リスクマネジメント，山海堂.

一井康二（2002）：重力式岸壁の地震リスク評価における地盤改良の影響について，第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集，2045-2046.

今井俊雄, 星野真澄, 小池　武（2011）: 次拡張型ライフラインシステムの地震リスク解析, 構造工学論文集 A，57A，308-317.

岩井重久，石黒政儀（1970）: 応用水文統計学，森北出版.

Jiabi, X., Sayers, P., Dongya, S. and Hanghui, Z. (2013): Broad-scale reliability analysis of the flood defence infrastructure within the Taihu Basin, China, Journal of Flood Risk Management, 6(1), 42–56.

Jian, J. and Low, B. (2012) : Stratified response surfaces for system probabilistic evaluation of slopes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(11), 1398-1406.

樺山昌平, 加藤　悟, 木村文彦（2003）: ソーラーカーの初期設計における応答曲面法を用いた最適化，精密工学会学術講演会講演論文集，71.

川本　治，鈴木尚登，福原正斗，吉迫　宏，井上敬資，鈴木智宏（2013）: ため池決壊時の簡易氾濫解析の改善に関して，農業農村工学会誌，83(8)，615-619.

茅原崇徳，肥田拓哉，南　博貴，瀬尾明彦（2012）: 筋電図と関節角度に基づく作業負担の総合評価法に関する基礎的検討，人間工学，48 (5)，244-254.

建設省河川局（1970）: 治水経済調査要綱.

木村秀治，石川良文，片田敏孝，浅野和弘，佐藤　尚（2007）: 都市型水害における事業所被害の構造的特質に関する研究，土木学会論文集 D，63(2)，88-100.

小林英男（2007）: リスクベース工学導入の意義，材料，56(5)，483-488.

小林健一郎，寶　馨，奥　勇一郎（2011）: 全統合型降雨流出・洪水氾濫モデルによる佐用町洪水災害分析と経済被害推定，土木学会論文集 B1（水工学），67(4)，Ⅰ_949-Ⅰ_954.

小林健一郎，寶　馨，中北英一（2010）：全球気候モデル出力と洪水及び経済被害推定モデルを用いた中小河川の水害リスクの将来変動に関する研究，河川技術論文集，16，495-500.

国土交通省河川局（2005）：治水経済調査マニュアル（案）.

国土交通省国土交通政策研究所（2001）：社会資本整備におけるリスクに関する研究，国土交通政策研究第 4 号.

国土交通省国土政策局国土情報課（2009）（参照 2014.2.19）：国土数値情報ダウンロードサービス，(オンライン)，入手先 http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/.

栗原　新，天野健治，劉　春学，小池克明（2008）：花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈，Journal of MMIJ，124(12)．710-718.

宮田　譲，山村悦夫，加賀屋誠一（1984）：治水事業効果の効果体系とその計測方法に関する研究，第 19 回日本都市計画学会学術論文集，391-396.

水間啓慈，國枝正，森　丈久（2014）：農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析，農業農村工学会論文集，292，85-92.

水谷　守（2003）：リスク評価とリスクマネージメント，コンクリート工学，41(5)，29-34.

毛利栄征（2013）：ため池の経年変化と維持管理，農業農村工学会誌，81(8)，609-610.

中　達雄，田中良和，樽屋啓之（2004）：農業用パイプラインの性能とリスク管理，農土誌，72(5)，13-16.

長尾　毅，藤森修吾，築地健太朗（2008）：直杭式桟橋の信頼性指標の応答曲面法等による評価に関する研究，海洋開発論文集，24，201-206.

長坂丈巨，中村要介，吉川勝秀（2012）：連続した河川堤防システムの整備／管理に関する被害の視点からの考察，水文・水資源学会誌，25(4)，226-242.

中嶋秀嗣（2005）：災害リスクのマネジメントシステム，「防災の経済分析　リスクマネジメントの施策と評価」，107-117.

中嶋　勇(2013):農業水利施設群を対象とした地震リスク評価手法,農村工学研究所技報,214，221-240.

西村伸一，珠玖隆行，柴田俊文，藤澤和謙（2015a）：豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，地盤工学会誌，63(5)，30-33.

西村伸一，森　俊輔，藤澤和謙，村上　章（2009）:豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，応用力学論文集，12，89-97.

西村伸一，古宅瑞穂，柴田俊文，珠玖隆行，水間啓慈（2015b）：地震と豪雨によるため池のリスク評価， JCOSSAR2015 論文集，482-487.

西村伸一，清水英良（2004）:コスト最小化理論に基づく液状化対策工の最適設計，農業土木学会誌，72，377-380.

西村伸一,清水英良(2011):条件付きシミュレーションによる液状化対策工の信頼性設計,農業農村工学会論文集，275，13-21.

野口和彦（2009）：リスクマネジメント，日本規格協会.

野中紀彦，岩崎富生（2012）:応答曲面法を利用した材料探索技術の開発，日本計算工学会論文集.

農業農村工学会（2015）：土地改良事業設計指針「ため池整備」.

農業水利施設研究会（2009）:事業誌・技術誌に見る農業水利施設諸元考，(社)農業農村整備情報総合センター.

農林水産省農村振興局整備部（2015）:改訂版 新たな土地改良の効果算定マニュアル，大成出版社.

農林水産省農村振興局整備部設計課計画調整室（2010）:農業基盤情報基礎調査.

岡田憲夫，若林拓史，多々納裕一（1993）:社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ，土木学会論文集，464/IV-19，33-42.

大渕正博，糸井達哉，高田毅士（2011）：構造物の性能規定型耐震設計のための設計用地震動設定手法の提案，日本建築学会構造系論文集，76 (667)，1583-1589.

大久保　天，本村由紀央，中村和正，小野寺康浩（2014）：大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスク源の特定－幹線用水路施設を対象としたリスクマネジメント－，農業農村工学会論文集，290，33-42.

大竹　雄，本城勇介（2012）：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集 C（地圏工学），68 (1)，68-83.

Rice, J. and Polanco, L. (2012) : Reliability-based underseepage analysis in levees using a response surface–Monte Carlo simulation method, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(7), 821-830.

陸　忠，小川雅俊，大貝晴俊（2011）：多段噴射ディーゼルエンジンの応答曲面モデルの構築，自動制御連合講演会講演論文集，54，435-438.

Rubinstein, R. Y. (1981): Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley & Sons.

Santner, T.J., Williams, B.J. and Notz, W.I. (2003) : The design and analysis of computer experiment, Springer.

佐藤　仁，松本一寿, Kropaczek, J. David（2004）：GNF 炉心設計最適化システム（１）最適化モデル，日本原子力学会年会・大会予稿集，310.

静間俊郎，鮫島貴裕，浅野　勇（2011）：配水機能性に着目した農業水利施設の地震対策，土木学会第 66 回学術講演会要旨集，Ⅰ_875-Ⅰ_876.

静間俊郎，中嶋賢二郎，井戸本靖史（2006）：リスクマネジメント計算例－木曽川総合用水上流地区を対象として－，ARIC 情報，81，31-46.

曽我部博之（2009）：応答曲面法を用いた弾塑性構造物のロバスト最適化，理論応用力学講演会講演論文集，58.

総務省統計局（2009）：経済センサス－基礎調査－.

総務省統計局（2010）：国勢調査 職業等基本集計.

総務省統計局（2014）：社会生活統計指標－都道府県の指標－.

食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会（2015）：農業水利施設の機能保全の手引き.

食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会（2014）：平成 26 年度第 2 回配布資料 2-2.

食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会技術小委員会（2014）：平成 25 年度第 1 回配布資料 2.

武井　勲（1987）：リスク・マネジメント総論，中央経済社.

谷　茂（2005）：中山間地域における総合防災システムについて，農土誌，73(8)，25-28.

谷　茂，堀　俊和（2009）：老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した安全性評価法，農工研技報，210，145-167.

谷　茂，瀬下雄一，恒国光義（2010）：地震リスクを考慮した老朽化フィルダムの耐震補強対策と LCC 評価について，ダム工学，20(3)，153-159.

谷口健五，高瀬達夫，小山　健（2006）：長野県浅川流域の水害リスクマネジメントに関する研究，建設マネジメント研究論文集，13，77-86.

手塚　集（2003）：超一様分布列の数理，岩波シリーズ「統計科学のフロンティア　第 11 巻：計算統計Ⅰ」，65-120.

Toto, E.F. (1992) : Riemann problems and the WAF method for solving the two-dimensional shallow water equations. Philos. Trans. R. Soc.London, Ser. A, 338, 43-68.

Toro, E.F. (1999) : Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics -A practical Introduction-, 2 nd Edition, Springer, 315-331.

内田知男（2011）：リスクマネジメントの実務【ISO31000 への実践的対応】，中央経済社.

牛島　栄，山本泰彦（2009）：コンクリート構造物のリスクマネジメントの現状，コンクリート工学，47(6)，11-18.

若林徳朗（2005）：台風第 23 号による淡路島のため池被害について，農土誌，73(8)，7-10.

若林　孝，珠玖隆行，村上　章，田口清隆（2013）：小規模工事を対象にした残留沈下対策の意思決定，農業農村工学会論文集，288，489-501.

山田　秀（2004）：実験計画法－方法編－，日科技連出版社.

山口静子，吉川知子，二宮恒彦（1968）：応答曲面法によるしょう油中の核酸系調味料と人工甘味料の効果の検討，日本醸造協會雑誌，63 (12)，1291-1294.

Yoon, T.H. and Kang, S.-K. (2004) : Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids, Jounal of Hydraulic Engineering, 130, 678-688.

吉川弘道，中村孝明（2007）：土木/建築施設の地震リスク評価とコンクリート構造物への適用，コンクリート工学，45(4)，16-22.

張　青, 野崎真司, 広瀬道夫, 森本博昭（2005）：コンクリート橋梁の劣化リスクの評価について，土木情報利用技術論文集，14，41-46.

- Abstract -

Earth-dam breaches arise from earthquakes and severe rainstorms and sometimes cause downstream floods. Floods have the greatest influential effect on hydraulic structures for irrigation and drainage, and estimating the costs of damage to these structures is important for risk assessment and management in agricultural land improvement projects.

Most small earth dams in Japan were constructed at least 100 years ago and need to be improved because Japan is constantly at risk of severe earthquakes and heavy rainstorms. When improvements of earth dams are planned, small earth dams that have a higher risk of dam breaches should be given priority for improvements. Although a risk is defined as the product of occurrence probability and damage costs, estimating the damage costs using existing methods is very difficult and complicated. Therefore, simplified methods are necessary to select earth dams that must be preferentially improved.

In order to overcome the difficulties in estimating damage costs, this study proposed a simplified estimation method for damage costs of floods due to earth dam breaches using a response surface method (RSM). RSM is a methodology that produces regression equations, called response surface, that quantitatively express the relationships between responses (output) and factors (input) by regression analyses based on experimental designs. Although many factors need to be considered to estimate damage costs of floods due to dam breaches, this study focused on four factors that largely affect the damage costs as based on results from a sensitivity analysis. Then a response surface that can estimate damage costs of floods was created using the four parameters and applicability was examined. As a result, the determination coefficient of the response surface R^2 was 0.79 and the proposed response surface can be easily applied to estimate damage costs of floods due to dam breaches.

We compared the damage costs of four earth dams calculated using RS and existing methods, and the variances between the results of RS and existing methods were smaller than the unbiased variance of RS based on 21 results of flow analysis. Therefore, the proposed method can easily estimate the risks of dam breaches due to rainstorms.

－摘　要－

我が国の農業用ため池は特定の地域に密集しつつ全国に数多く存在するとともに，その多くが老朽化し，大雨や地震を契機に決壊等の災害発生の危険が生じている．しかし，これらを対象に実際に充てられる費用や労力の限度を勘案しながら，対策の優先度を簡易に評価できる実用的な被害額算定手法は未だ確立されていない状況にある．そこで本研究では，農業水利施設に関する災害のなかで最も甚大な被害を生じさせる事象の一つである農業用ため池の破堤に焦点を当て，想定される被害額やリスクを推定し，これに基づき機能保全対策の対象地区を決定するプロセスの効率化に資することを目的として，①資産データ適用手法の効率化によるため池破堤被害額の簡易算定，②応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定，③応答曲面を用いたため池破堤リスクの簡易評価を行うために実用的な手法を提案した．本研究により得られた知見を以下のとおり概括する．

第 3 章では，氾濫解析結果から被害額を簡易に算定する手法を考案し，実際のモデル地区に適用し被害額の大小を比較した．その結果から，得られた知見と本手法を適用する際の留意点等を以下に列記する．

(1) 無償で入手できる資産データのみによる比較的簡便な手法を用いることで，有償のデータを用いた精緻な方法と大差無い結果が得られた．

(2) 貯水量が小さなため池間の想定被害額の比較には最も簡便な手法を適用できる可能性が示唆された．

(3) ため池の貯水量が小さい地区を対象とする場合には，最大浸水深が僅か（5mm 未満等）な区域を被害額の算定対象から除外するか否かにより結果が大きく変動した．

(4) 地区間の被害額の大小を効率的に比較するには，住宅や事業所等の公共部門の被害額を指標とすることが有効と考えられた．

一方，地形条件やため池の規模等が異なる多くの地区に本手法を適用し，下流の資産密度と浸水面積や最大浸水深の比率との関係を分析することなどにより，破堤時の被害が大きく検討の優先度が高い地区をより簡便に選定する実用性の高い手法へと発展させることが課題として挙げられた．

第 4 章では，この課題を踏まえ，実験計画法を用いて，貯水量や氾濫域の地形条件・世帯密度等のうち被害額の算定結果に対する感度が高い因子を抽出するとともに，その因子

を用いて被害額を算定する応答曲面を作成する手法を提案し実際に適用を試みた．その結果から得られた知見を以下に示す．

(1) 有効貯水量，主たる氾濫流路の勾配の中央値，利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数及び従業者数の 4 つの因子が被害額の算定結果への感度が高くなった．

(2) これらの因子に，氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置を表現する因子を加えた 5 つを用いて被害額を推定する応答曲面を作成したところ，積み上げ計算による被害額の算定値との高い相関が得られた．

(3) 数値実験により作成した応答曲面を適用して他の実在地区の被害額を推定したところ，誤差は数値実験時の不偏分散からやや外れる結果となった．

(4) 実在地区のデータを追加して修正した応答曲面による被害額は，有効貯水量が数値実験で与えた値の範囲外の 1 地区を除き，積み上げ計算による被害額に近い値が得られた．

なお，本研究で提案する手法で作成した応答曲面を適用できるため池は，5 つの因子が一定の範囲内であるほか，谷池（山池）であること等の基礎的な特性が検討に用いたモデル地区と乖離しない地区であるといった制約が存在することに留意が必要と考えられた．

第 5 章では，応答曲面法によって作成する回帰式を用いて，貯水量や氾濫域の世帯密度等の値から氾濫解析を行わずに被害額を推定し，破堤リスクを簡易に評価する手法を提案し，実際のため池地区への適用を試みた．その結果から，応答曲面を用いて推定した実在地区の期待総費用低減効果の値の序列は，積み上げ計算による値と同じ序列となり，優先順位を設定する際の指標の一つとしての活用が期待される結果が得られた．

一方，ここで提案する応答曲面によるリスクの簡易評価手法を実際のため池の保全管理に適用する具体的な手順等を明確にし，行政機関等に提示することによって，機能保全対策の意思決定の最適化に役立つツールへと発展させることが今後の課題として挙げられた．

－ 参考論文（基礎となる学術論文）－

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**1 題目（第 3 章）**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：ため池破堤による想定被害額の簡易評価手法

著者名：水間啓慈，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行

学術雑誌名　巻・号・頁：農業農村工学会論文集，第 295 号（第 83 巻 第 1 号），pp.39-46.

発刊年月：2015 年 2 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**2 題目（第 4 章）**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

著者名：水間啓慈，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行

学術雑誌名　巻・号・頁：農業農村工学会論文集，第 299 号（第 83 巻 第 5 号），pp.Ⅰ_147-Ⅰ_153.

発刊年月：2015 年 10 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**3 題目（第 5 章）**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：ため池破堤による想定リスクの簡易評価手法

著者名：水間啓慈，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行

学術雑誌名　巻・号・頁：JCOSSAR2015 論文集，　pp.475-481.

発刊年月：2015 年 10 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**4 題目（第 4 章, 第 5 章）**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：応答曲面法によるため池破堤リスクの簡易評価

著者名：水間啓慈，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行

学術雑誌名　巻・号・頁: 農業農村工学会論文集, 第 301 号（第 84 巻 第 1 号）, pp.Ⅰ_47-Ⅰ_55.

発刊年月：2016 年 2 月

－その他の論文－

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**1題目**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析

著者名：水間啓慈，國枝正，森丈久

学術雑誌名　巻・号・頁：農業農村工学会論文集，第 292 号(第 82 巻 第 4 号)，pp.85-91.

発刊年月：2014 年 8 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**2題目**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：泥炭地開発の中で生まれた鋼製開水路とその状態評価

著者名：水間啓慈，長岡範之，田中秀典，中井博昭，草野久美恵

学術雑誌名　巻・号・頁：農業農村工学会誌，第 82 巻 第 11 号，pp.19-22.

発刊年月：2014 年 11 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**3題目**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：小規模コンクリート水路の漏水を簡易に補修する新技術

著者名：水間啓慈，國枝正，渡嘉敷勝，森充広，桐山招大，綾木長

学術雑誌名　巻・号・頁：農業農村工学会誌，第 83 巻 第 10 号，pp.15-18.

発刊年月：2015 年 10 月

－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－**4 題目**－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－

題目：農業用揚排水機場の補修履歴に基づく機能保全コスト予測手法

著者名：水間啓慈

学術雑誌名　巻・号・頁：農村計画学会誌，第 34 巻 論文特集号，pp.273-278.

発刊年月：2015 年 11 月

－謝　辞－

本論文をまとめるにあたり，懇切丁寧な御指導と貴重な御教示を賜りました，岡山大学大学院環境生命科学研究科教授　西村伸一　博士，同講師　柴田俊文　博士，同助教　珠玖隆行　博士に深甚なる感謝の意を表します．西村伸一先生には，先生が岡山大学に着任されて間もない時期に，筆者も当時の農学研究科修士課程に在籍しておりましたが，研究室が異なることから，直接，ご指導いただく機会に恵まれませんでした．今般，農業水利施設のリスク評価という研究テーマを選択しましたことから，御指導をお願いし快くお引き受け下さいました．重ねて衷心より感謝の意を表します．

本論文の審査をお引き受け下さり，貴重な御教示を賜りました，岡山大学環境生命科学研究科教授　三浦健志　博士，同教授　竹下祐二　博士に深く感謝の意を表します．

農村工学研究所施設工学研究領域　増川　晋　領域長，國枝　正　上席研究員をはじめ領域内の研究員のみなさまには，領域内の研究会等で本論文の内容に関する報告を行いました際に，貴重な御示唆を賜りました．ここに厚く御礼を申し上げます．

農林水参省農村振興局設計課計画調整室　原川忠典　室長には，全国のため池の位置や主な諸元等の情報が網羅されている農業基盤情報基礎調査のデータを御提供いただきました．また，農村工学研究所施設工学研究領域　井上敬資　主任研究員には，ため池データベースに所蔵されているデータに基づいて，貴重なご助言を賜りました．これらのデータは本研究を進めるにあたり不可欠なものでありました．心より御礼を申し上げます．

本論文のを執筆する機会を与えて下さいました，農村工学研究所　小泉　健　所長，山本徳司　企画管理部長，秋田県立大学生物資源学部教授　高橋順二　博士（前農村工学研究所長），茨城大学農学部教授　毛利栄征　博士（前農村工学研究所施設工学研究領域長）に心より感謝の意を表します．また，本論文をまとめるにあたり，様々なご支援を賜りました，農村工学研究所の方々に対して，厚く御礼申し上げます．