

上水道事業者における
アセットマネジメントの合理化
に関する研究

2010年

田 中 尚

目次

目次	v
図目次	ix
表目次	xi
第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 緒言	1
1.1.2 社会資本とアセットマネジメント	3
1.1.3 リスクマネジメントと内部統制	7
1.1.4 地方公共団体と内部統制	10
1.2 研究目的	12
1.3 本論文の構成	13
第2章 上水道における資産形成とアセットマネジメントシステム導入に向けた課題	15
2.1 本章の目的	15
2.2 上水道における資産形成	15
2.2.1 水道法における水道施設の位置づけ	15
2.2.2 水道の普及	16
2.3 水道施設の変遷	18
2.3.1 浄水施設の変遷	18
2.3.2 送配水施設の変遷	20

2.3.3	上水道施設の耐震化の変遷	23
2.4	水道事業経営面での課題について	24
2.4.1	水道事業と地方公営企業法	24
2.4.2	水道事業の財政状況	25
2.4.3	料金決定の原則	25
2.4.4	水道事業経営の現状	26
2.4.5	水使用量の減少	26
2.5	これまでの水道への投資額	28
2.6	社会基盤全体におけるアセットマネジメントの取組みと水道分野の課題	30
2.6.1	劣化予測手法	31
2.6.2	会計システム	33
2.6.3	国内における上水道分野での取組み状況	33
2.7	上水道におけるアセットマネジメント適用に向けた課題	34
2.8	結語	36
第3章	上水道へのアセットマネジメントシステム導入の考え方	37
3.1	本章の目的	37
3.2	水道アセットマネジメントシステムの導入	37
3.3	事業目標の設定	39
3.3.1	土木構造物	39
3.3.2	設備	40
3.3.3	管路	41
3.4	水道施設の診断・評価	41
3.4.1	構造物	42
3.4.2	設備（更新基準の設定）	50
3.4.3	管路	51
3.4.4	ライフサイクルコスト分析	54

3.5	事業計画	54
3.5.1	構造物	54
3.5.2	設備	55
3.5.3	管路	57
3.6	財政収支見通し（更新財源確保）の検討	58
3.6.1	財政収支算定の条件設定	59
3.6.2	財政収支の算定，財源確保方策の検討	61
3.7	結語	61
第4章	加速劣化ハザードモデルのコンクリート中性化予測への適用	63
4.1	本章の目的	63
4.2	本章の基本的考え方	64
4.2.1	既往研究の概要	64
4.2.2	アセットマネジメントと劣化予測式	66
4.2.3	ベースラインモデルと比例性	68
4.2.4	浄水場施設のリスクマネジメント	69
4.3	加速劣化ハザードモデル	70
4.3.1	劣化ハザードモデル	70
4.3.2	ハザード関数の推計	73
4.3.3	ルート t 則の統計的検定	76
4.3.4	リスクマネジメント指標	77
4.4	適用事例	80
4.4.1	概要	80
4.4.2	推計結果	81
4.4.3	リスクマネジメント指標の算定結果	83
4.5	考察	88
4.6	結語	88

第5章 上水道管路の最適予防取替えモデル	91
5.1 本章の目的	91
5.2 本章の基本的な考え方	92
5.2.1 既往の研究	92
5.2.2 布設管路の材質の変遷	93
5.2.3 最適取替え政策の考え方	94
5.3 最適取替えモデルの定式化	95
5.3.1 モデル化の前提条件	95
5.3.2 劣化過程のモデル化	95
5.3.3 リスク因子の定式化	97
5.3.4 共変量	98
5.3.5 ワイブルパラメータのための評価アプローチ	98
5.3.6 ライフサイクルコスト最小化モデルの定式化	99
5.3.7 最適取替え期間の計算方法	101
5.4 管路の異質性を考慮した最適取替えモデル	102
5.4.1 モデル化の前提条件	102
5.4.2 定式化	102
5.5 実証分析	104
5.5.1 対象管路網と管路情報管理システムの概要	104
5.5.2 ハザードモデルの推計結果	107
5.5.3 期待ライフサイクル費用と最適取替え期間	111
5.5.4 感度分析	112
5.5.5 割引率に関する検討	115
5.6 考察	117
5.7 結語	118

第6章	上水道管理会計の試行的作成	121
6.1	緒言	121
6.2	厚生労働省によるアセットマネジメントに関する手引きの策定	121
6.2.1	水道ビジョンフォローアップ検討会における議論	121
6.2.2	水道事業へのアセットマネジメント導入に際し留意されている事項	122
6.2.3	水道事業におけるアセットマネジメント(資産管理)に関する手引きについて	124
6.3	「手引き」を用いたアセットマネジメントについての考察	126
6.4	会計制度の上の課題	127
6.5	「手引き」を用いた実証分析	128
6.5.1	適用する水道事業体概要	128
6.5.2	適用結果	129
6.5.3	考察	130
6.6	結語	130
第7章	結論	133
	参考文献	135
	謝辞	147

目 次

1.1	関西 8 事業体における法定耐用年数で更新する場合の施設別更新事業費予測（関西水道事業研究会） [3],[4]	2
1.2	関西 8 事業体におけるこれまでの更新ペースで更新する場合の施設別更新事業費予測（関西水道事業研究会） [3],[5]	3
1.3	社会資本のストック額 [7]	4
1.4	社会資本の内訳 [7]	4
1.5	社会資本ストックの更新；維持管理投資推計 [7]	5
1.6	アセットマネジメントとそのシステム [7]	6
2.1	水道施設全体イメージ（大阪市水道の例）	16
2.2	水道普及率の推移	17
2.3	管路の変遷（大阪市水道の事例） [22]	23
2.4	総括原価の構成 [25]	26
2.5	収益的支出に占める各費目の割合（全国平均） [25]	27
2.6	資本的支出に占める各費目の割合（全国平均） [25]	27
2.7	上水道事業の 1 日最大給水量及び 1 日平均給水量の推移 [26]	28
2.8	水道への投資額 [26]	29
2.9	投資額と更新需要（除却額）の推移	30
2.10	わが国の人口の推移 [6]	30
2.11	水道資産の内訳（平成 17 年度） [6]	31
2.12	分野別に見た維持更新投資額の推移 [11]	34

3.1	アセットマネジメントシステムフロー図	38
3.2	アセットマネジメント(資産管理)の実践により期待される効果 [6]	39
3.3	重点投資の考え方の事例(大阪市水道局) [22]	40
3.4	全国上水道管種別管路延長(平成19年度) [56]	41
3.5	コンクリート構造物の劣化の分類	42
3.6	鉄筋コンクリートの劣化現象の分類	44
3.7	中性化(鋼材の腐食,膨張)による劣化メカニズム	45
3.8	鋼材の腐食メカニズム	46
3.9	中性化と鉄筋腐食の状況	47
3.10	鉄筋コンクリート構造物の劣化要因 参考)「鉄筋コンクリート構造物の寿命予測」 (柿崎正義,1991)をもとに加筆作成	49
3.11	鋳鉄管の劣化要因	51
3.12	ボルト腐食の進行イメージ	52
3.13	管路の維持保全方法の体系	53
4.1	ルート t 則に基づく中性化曲線	69
4.2	中性化深さの確率分布(30年後)	84
4.3	期待中性化深さ	85
4.4	リスク管理水準5%の中性化深さ	85
4.5	期待中性化深さ(ルート t 則: $\alpha = 2.0$)	86
4.6	余寿命分布 ($T_i = 10$ 年, $\bar{X} = 50$ mm)	88
5.1	管路の劣化水準のモデル化	96
5.2	延長を説明変数とする場合としない場合の比較:管種C(普通鋳鉄管)の場合	108
5.3	延長を説明変数とする場合としない場合の比較:管種F(高級鋳鉄管(ライニングなし))の場合	108

5.4	延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 FL（高級鑄鉄管（ライニングあり））の場合	109
5.5	延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 A（ダクタイル鑄鉄管）の場合	109
5.6	管種ごとの生存曲線	111
5.7	期待ライフサイクル費用と最適取替え期間（管種変更のない場合）	112
5.8	期待ライフサイクル費用と最適取替え期間（管種 A に改良される場合）	113
5.9	割引率に対する感度分析	114
5.10	社会的損失に対する感度分析	115
5.11	取替え費用に対する感度分析	115
5.12	社会的損失と取替え費用を変数とした場合の感度分析（ $\rho = 0$ ）	117
6.1	水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）の構成要素と実践サイクル [6]	124
6.2	取得年度別帳簿原価	129
6.3	管路更新費用（法定耐用年数）	131
6.4	管路更新費用（第 5 章を基にした管路の更新周期）	131

表目次

3.1	コンクリート構造物の変状の種類と概要	43
3.2	設備の更新基準（大阪市水道局の事例）	50
3.3	収益的収支・収入	60
3.4	収益的収支・支出	60
3.5	資本的収支・収入	60
3.6	資本的収支・支出	61
4.1	対象データ	82
4.2	推計結果	82
5.1	対象管路の種類と延長	105
5.2	ワイブル関数のパラメータの算定（ケース1）	110
5.3	ワイブル関数のパラメータの算定（ケース2）	110
5.4	期待ライフサイクル費用および最適取替え期間（管路の異質性を考慮した場合，しない場合）	111
6.1	適用事例の管路延長	129
6.2	法定耐用年数による管路の更新周期（年）	130
6.3	手引きの事例による管路の更新周期（年）	130
6.4	第5章を基にした管路の更新周期（年）	130

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 緒言

水は酸素と共に、人間の生命維持になくてはならない物質であり、人間の体の約 2/3 は水でできている。この水分は、体温の調節を行ううえで必要不可欠なものであり、また、血液等として栄養分を運搬し、老廃物を排泄する役目を負っている。成人男子が比較的安静にしていたときの水収支は、1 日では、2.5 リットルとされ、尿や便で 1.3 リットル、呼吸や汗で 1.2 リットルが体外に排出されるのに対し、食事で 1 リットル、飲み水から 1.2 リットル、これに体内で作られる 0.3 リットルでこれを確保している [1]。こうしたことから、生命を維持するためには、1 日約 3 リットルの水が必要とされる [2]。

水道は、こうした飲み水をはじめとする生活用水はもとより、商業用水、工業用水などの都市用水や、消火用水などの機能を果たしており、今やなくてはならない都市基盤の一つである。阪神淡路大震災をはじめとする地震時において、早期復旧が最も求められるライフラインの一つであり、蛇口を捻れば水が出るのが当たり前とされる昨今においては、災害時における減・断水が社会的不安を生じさせることから、その機能をいかに持続的に発展させるかが問われている。水道事業運営は、水道法により、原則市町村が経営することとされており、水道料金収入をもとに独立採算の経営が行われているが、その収入のもととなる給水量は、水道施設整備が進められた高度経済成長期においては増加傾向にあったものの、近年は漸減傾向にあり、厳しい経営を迫られている。

日本の水道施設は、1887 年（明治 20 年）に横浜市で最初に通水して以降、高度経済成長期の急拡大を経て、現在では、その資産価値は約 40 兆円に達し、今後、これらの施設の大規模更新が迫ってくることが想定されるが、施設投資状況の内訳を見れば、これまで新設する施設への投資が中心で、今後増大が予測される更新への投資が低い水準にあるという課題を抱えている。筆者は、

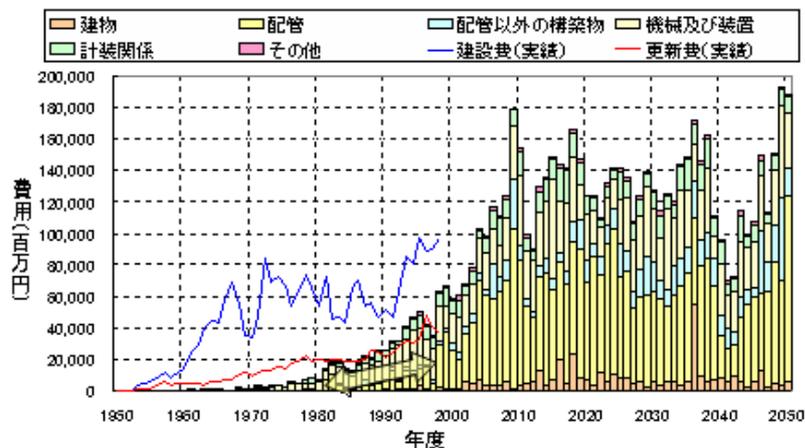


図 1.1: 関西 8 事業体における法定耐用年数で更新する場合の施設別更新事業費予測（関西水道事業研究会）[3],[4]

1999 年（平成 11 年）から 2001 年（平成 13 年）度にかけて，関西の主たる 8 つの水道事業体，用水供給事業体から構成される関西水道事業研究会にて，こうした問題意識を持って将来の更新需要の推計に取り組んでいる [3]．その中で，8 事業体の水道施設に関する固定資産情報から，法定耐用年数及びその時点での更新実績を基にした周期で施設更新を行った場合の将来の更新費用予測を行い（図 1. 1, 図 1. 2），当時の実績に基づく更新周期で更新したとしても 20 年後には，必要な更新費用が現状の 2 倍に達するなどの試算結果の報告を行っている．

その一方で，水道施設の実際の耐用年数をどのように見極めるのか，また，水道事業経営とどのようにリンクさせながら，必要な更新費用を確保していくのかといった課題が残った．こうした課題は，水道に限ったものではなく社会基盤全般に共通のものあり，その後，社会基盤分野全体において，今後の維持管理のあり方に関する知見が集積され，アセットマネジメントシステムやこれを事業経営面とリンクさせるための管理会計などの取組みが進められてきている．水道界においても，厚生労働省が 2009（平成 21 年）7 月に「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」[6] を策定するなど，いよいよ維持管理に着目した事業の推進が図られる機運が高まってきたと言える．こうしたことを踏まえ，本書では，上水道事業に望ましいアセッ

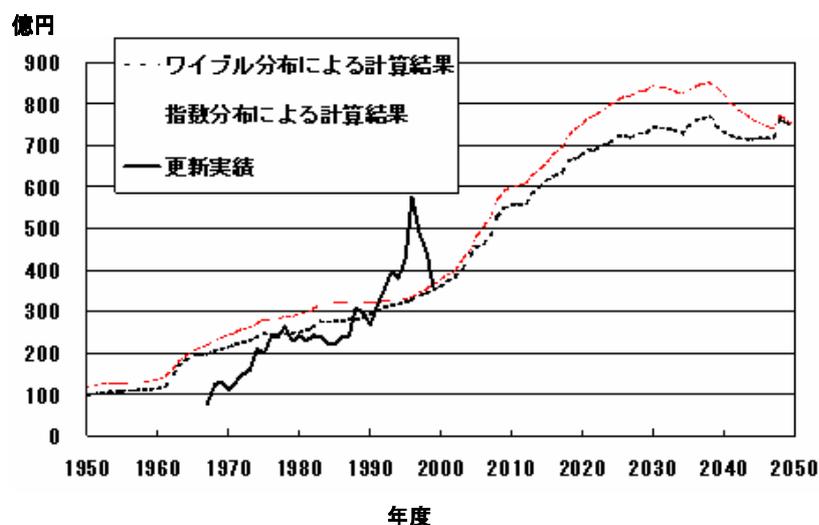


図 1.2: 関西 8 事業体におけるこれまでの更新ペースで更新する場合の施設別更新事業費予測（関西水道事業研究会）[3],[5]

トマネジメントを導入する，すなわちハザード関数を用いて，主な水道施設の内，コンクリート構造物と管路設備について適切な更新時期の解明を行うと共に，水道事業経営において，いかに更新費用を適切に確保しながら，かつ，持続的に事業運営を図るかといった，今後，水道事業体が直面するであろう課題に対する提案を行うものである．

1.1.2 社会資本とアセットマネジメント

我が国の社会資本ストックの状況

我が国では戦後の国土復興を目指して，次々と社会資本整備が行われてきた．その後，急激な経済成長を背景にした高度成長期には，「国土の均衡のある発展」を目標とした我が国の社会基盤整備が推進され，地域格差は残っているものの，一定水準の社会資本整備が達成されている．なお，社会資本の総ストック額は 1998 年（平成 8 年）において約 603 億円を超えている（図 1.3）．

我が国の社会資本整備は，戦後の国土復興を目指し，社会整備が勧められ，1960～1970 年代の高度経済成長期をピークとして，以降は減少傾向にあり，全体として社会資本のストックの高齢化が進みつつあり，これから数十年後には，社会基盤の大半が更新期を迎えるため，その維持，管

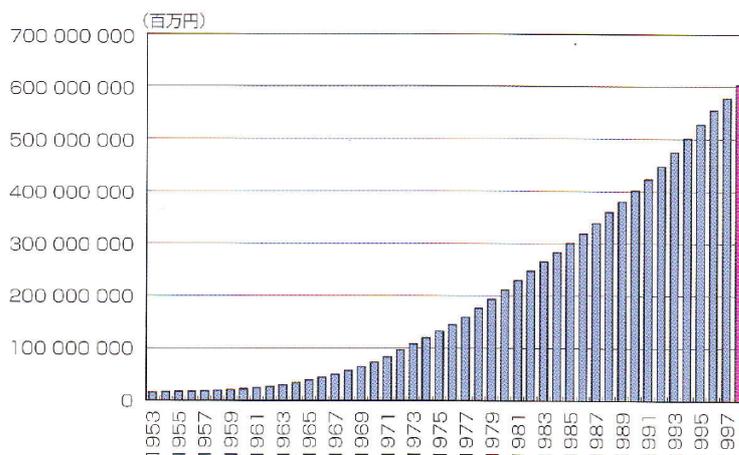


図 1.3: 社会資本のストック額 [7]

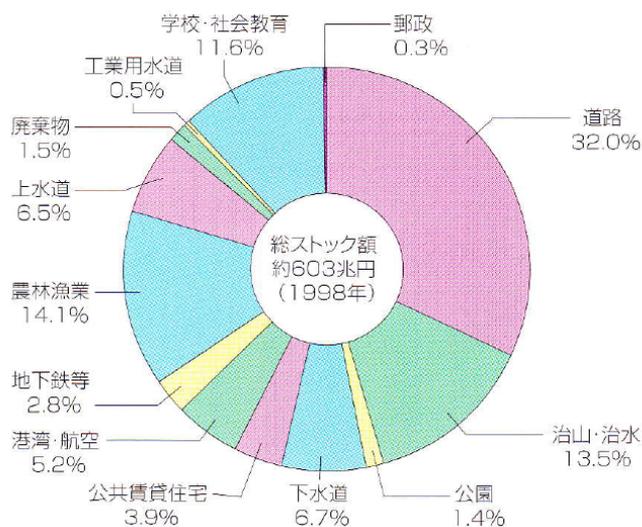


図 1.4: 社会資本の内訳 [7]

理，更新費用が急激に増加することが予想される．社会資本のストック額の分野別内訳は，図 1.4 に示すとおりである．

国土交通省では，我が国の社会資本に対する将来の維持更新費についての将来推計を行っており [7]，これによれば，国土交通省所管分野の社会資本においても，維持管理費の規模は，2000 年（平成 12）度以降の総投資額に増減がないと仮定しても 2025 年（平成 37 年）度には維持・更新費が約 50 % を占めることとなる．実際には，国・地方自治体とも社会資本関係の支出は減少を続け

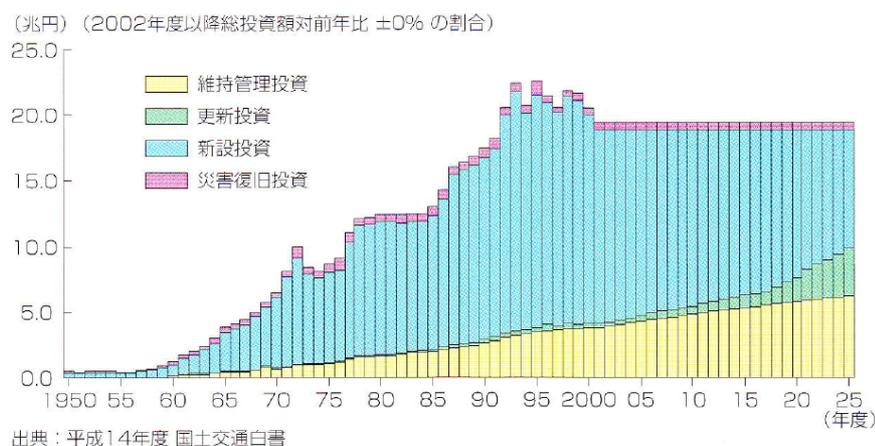


図 1.5: 社会資本ストックの更新；維持管理投資推計 [7]

ており，維持更新費の問題がより早期に顕在化することが懸念される．

アセットマネジメントとは

維持管理費用の確保における，こうした危機感から，我が国では先に社会資本の老朽化を経験した欧米等の先進国に学ぼうという機運が高まった．

1970年代後半のアメリカでは，1930年代のニューディール政策により大量に建設された道路構造物の高齢化が進んでいる中で，経済状況は1973年（昭和48年）のオイルショック以降，経済成長率が鈍化，停滞が続いていた．こうした状況を反映して，維持管理費を含む公共事業への投資は減少の一途をたどり，その結果，橋梁の崩落事故が多発を始め，公共施設の破損が老朽化し，「荒廃するアメリカ」と呼ばれる社会問題となった！「荒廃するアメリカ」には，社会資本に関連して発生している問題には，公共事業への過小投資，社会資本の優れたマネジメント精度の欠如，社会資本の適切な維持管理の長期的な重要性に関する認識不足，公共事業予算の削減，老朽化した社会資本の更新の遅れ，社会資本の不足が国民に与える深刻な影響の認識不足といった原因が考えられる．この経験から，アメリカではアセットマネジメントの必要性が強く認識され，社会資本投資において，アセットマネジメントが導入されている．

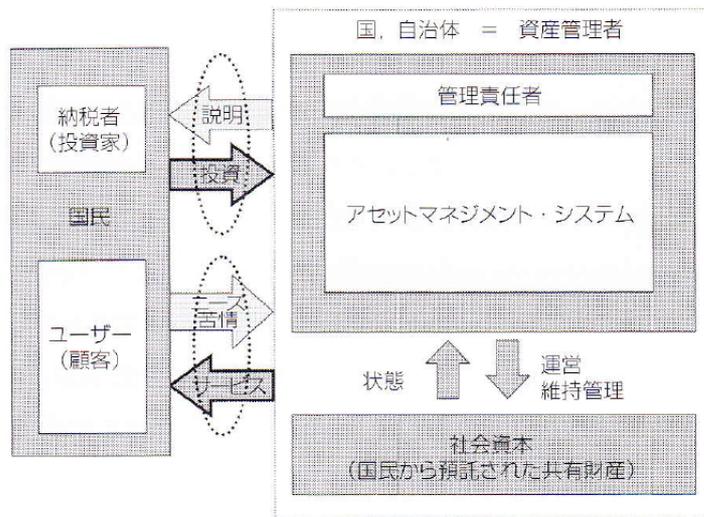


図 1.6: アセットマネジメントとそのシステム [7]

欧米では、社会資本のストックを「資産」(アセット)とみなして民間の企業経営等で用いられるマネジメント手法を活用している [8]。一般に、アセットマネジメント(資産管理)とは、「国民の共有財産である社会資本を、国民の利益向上のために、長期的視点に立って、効率的かつ効果的に管理運営する体系化された実践活動である」とされている [7]。アセットマネジメントは、以前は、もっぱら、金融、不動産分野で使われてきており、投資家から預金、株式、不動産などの資金(アセット)を預かり、これをリスク、収益性などを勘案して、適切に管理・運用を図る(マネジメントすること)により、利益を最大化させる活動である。近年、この考え方を社会資本に適用することが注目されており [9]。わが国においても様々な取組みが行われており、国、地方公共団体等における行政マネジメントの仕組みは、従来、決められた政策を実行するための管理に主眼がおかれ、マネジメント(経営)の視点は弱いものであったが、先進的な地方自治体において公共経営(パブリックマネジメント)の観点から、効率性の高い行政マネジメントの仕組みを導入している事例もある [10]。構築すべきアセットマネジメントの仕組みは、同じコンセプトに基づくものである。

アセットマネジメントの定義は必ずしも定まっているものではなく、例えば、アメリカ連邦政府交通省では、「限られた予算を社会資本に最適に配分することにより、今後新たに整備される社会資本を含め各社会資本に求められている価値及びサービスレベルを維持及び向上させる」として

いる。また、「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会」の提言によれば、「道路を資産としてとらえ、構造物全体の状態を定量的に把握、評価し、中長期的な予測を行うとともに、予算制約の中で、いつどのような対策を行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメント」と定義している [7]。一方、欧米等諸外国のアセットマネジメント先進事例として、米国連邦道路庁（FHWA）ではアセットマネジメントを、「コスト効率よく、物理的資産（Physical Asset）を維持し（maintaining）、機能を向上し（upgrading）、運用する（operating）、体系化したプロセスである。それは工学的な考え方を、しっかりした実務の手法や経済的な理論と組み合わせ、そして、意志決定に向けた組織的、論理的なアプローチを容易にするツールを提供する。このようにして、アセットマネジメントは、短期計画、長期計画の両方を取り扱うフレームワークを提供する」と定義している。

1.1.3 リスクマネジメントと内部統制

リスクマネジメントの概要

リスクマネジメントは、もともと災害の発生に対する対応や金融面における不確実性の管理という観点から生まれ発展してきたものであるが、現在では、経済社会における不確実性を管理する必要性が高まってきている中で、事業に関連する内外の様々なリスクを適切に管理する活動として理解されるようになってきている。企業は、その目的に従って事業活動を行っていくうえで、社外の経営環境等から生じるリスクのみならず、社内に存在するリスクにも直面している。企業が、その価値を維持、増大していくためには、このようなリスクに適切に対処することが必要である。リスクマネジメントにおいては、最初に、企業の目的や目標の達成に関連して、どのようなリスク要因があるかを発見し、リスクとして特定することが必要となる。リスクの発見及び特定は、明示されていない企業の目的や目標に関連するものを含めて、重大な影響を及ぼす可能性のあるものを漏らすことのないよう、包括的に行われなければならない。特定されたリスクは、それぞれのリスクが顕在化した場合の企業への影響度と発生確率に基づき、企業にとっての重要度が算定されなければならない。また、必ずしも全てのリスクについて定量的に算定することができるわけではないが、リスクの算定は、関係者が納得できる合理的な指標を用いて、統一的な視点で相対的な比較が可能となるよう行われることが望ましい。

内部統制論

最近では、企業の違法行為がそのまま企業の破綻に繋がる事例が増えているが、利益を追求するだけでなく社会的な責任を果たすことが求められるようになったことが原因と考えられる。このため、企業が社会的責任をふまえて自らの企業価値を向上させるためには、企業リスクマネジメントのプロセスが要請される。このプロセスこそが内部統制であり、企業がその業務を適正かつ効率的に遂行するために、社内に構築され、運用される。その構築、運用の水準は、業務の適正かつ効率的な遂行に合理的に保証を与えることのできるものでなければならない。内部統制は、市場経済社会において、企業法制が形成するシステム全体が成立するための前提であるが、同時に企業が事業目的の達成に係るリスクを低減させ、持続的に発展していくためにも不可欠である。内部統制は、企業が事業を行う上で欠かすことのできないものであり、各企業の中で個別に発展してきたが、不正な財務報告に関する事件などを契機として、概念の整理が行われ、1990年代以降、米国において、「内部統制の包括的フレームワーク」、いわゆる COSO レポートが公表され、2002年（平成 14 年）7 月には財務内容の透明性や正確性を高めることを目的として、上場企業会計改革及び投資家保護法（米国企業改革法または米国版 SOX 法）が制定された。その内容は、財務報告の信頼性のみならず、コンプライアンスや業務の効率性をも包含するものとなっており、今日における内部統制のあり方に関して、世界標準と見なされている。一方、わが国においても 2000 年代に入って有価証券報告書虚偽記載事件や粉飾決算事件が続発した。これに対し、金融商品取引法改正によって経営者が内部統制の整備状況や有効性を評価した内部統制報告書を作成し、公認会計士等がそれを監視する二重責任の原則に基き不正や誤りを防止する仕組みとして 2007 年（平成 19 年）9 月に旧証券取引法が金融商品取引法（J-SOX 法：日本版 SOX 法）が整備された。内部統制の考え方は、企業の不祥事を契機としたものであるが、現在では、企業が業務執行に係る考え方やプロセスを明確化、効率化することにより、ステークホルダー等への責務を果たしつつ、企業価値を維持・増大するために必要なシステムとして評価され、適時見直しが行われている。

リスクマネジメントと内部統制構築の必要性

内部統制はリスクマネジメントを適切に行うために不可欠であり、一方で、内部統制が有効であるためには、それがリスクマネジメントによる総合的なリスクの評価等を踏まえて、構築、運用される必要がある。適切なリスクマネジメント及び内部統制は、経営者が各ステークホルダーに対する責務等を果たしつつ、企業価値を維持、向上するために不可欠なものである。この意味で、適切なリスクマネジメント及び内部統制を構築することは、経営者が経営者たるための前提であるといえることができる。強固なリスクマネジメント及び内部統制が構築されることで、経営者はより適正で大胆な経営判断を行うことが可能となる。また、リスクマネジメント及び内部統制は、それぞれが異なる背景を持ち、違った経路を経て発展してきたが、企業を取り巻く様々なリスクに対応し、企業価値を維持、向上するという観点からは、共通の目的を有している。内部統制が適切に機能するためには、経営管理プロセスに、内部統制の基盤である「健全な内部統制環境」及び「円滑な情報伝達」が存在していることが必要である。また、内部統制環境とは、企業がその目的を達成するために、企業活動を適正かつ効率的に運営するための価値観、組織、規則等であり、企業構成員の様々な行為の基礎となる。企業構成員の事業活動、それらに関連する指揮監督は、この環境下で行われる。それゆえ、内部統制環境は、事業目標等の策定、経営組織の組成やリスクマネジメント等、広範な範囲に影響を及ぼすとともに、内部統制のその他の構成要素である円滑な情報伝達、コントロールやモニタリングの実行にも影響を及ぼす。企業は、企業構成員等によって構成される集合体であり、企業構成員が必要な情報を識別、収集、処理し、かつ関係する企業構成員に伝達することによって、初めて企業目的を達成するための業務執行を行うことができる。従って、企業が事業活動を適正かつ効率的に遂行するためには、情報の識別、収集、処理及び伝達が円滑に行われることが不可欠である。円滑な情報伝達における情報には、社内で作成された情報だけでなく、社外から得られる業界、経済や規制等に関する情報も含まれる。伝達は、通常、確立された指示命令経路及び報告経路によって行われるが、文書によるもののほか、会議、打合せ等の口頭による情報交換等も含まれる。例えば、業務執行を行ううえで、円滑な情報伝達は、経営者の指示、または権限委譲に基づき、管理者が計画を立て、その実施を担当者に指示し、管理者は担当者から受けた報告を評価したうえで、経営者に報告するという、階層間を跨いだ大

なマネジメントサイクルと、上位の階層からの指示に基づき、各階層内において行われる小さなマネジメントサイクルの組合せにより行われる。また、円滑な情報伝達のためには、コンピュータシステムやインターネット、イントラネット等のネットワークも重要である。企業規模が大きくなり、業務処理量が多くなればなるほど、コンピュータシステムによる業務データ処理の必要性が高まる。さらに、ネットワークの活用により、電子メール等による社内外の情報伝達も、内部統制上の重要な位置付けを持つようになってきている。今日の企業は、その規模如何にかかわらず、多かれ少なかれその業務処理がコンピュータシステムやネットワークに依存していることから、情報処理及び伝達のためのコンピュータシステムは、内部統制環境、コントロール・モニタリング等にも重要な影響を及ぼす [11]。

1.1.4 地方公共団体と内部統制

本研究で取り扱う水道事業は、水道法第2条にあるように、地方公共団体がこれを整備し、適性かつ能率的にこれを運営するとされている。ここでは、水道事業を営む地方公共団体と内部統制について触れる。上述した内部統制の考え方や枠組みにおいて挙げられた目的は、すでに地方公共団体の法制度上義務付けられているのである。例えば、業務の有効性及び効率性であれば、最少経費で最大効果を挙げる事務処理の原則（地方自治法第2条第14項）が当てはまり、法令等の遵守であれば、法令等遵守義務規定（地方公務員法第32条）、信用失墜行為の禁止（同法第33条）が当てはまる。ただし、具体的取組方法については地方公共団体に委ねられている。そこで、現在地方の置かれた状況、地方の抱える課題への対応策として、首長をはじめとする職員の意識改革の下、リスクの事前統制への着目や、組織マネジメントに関するPDCAサイクルの実現といった視点に基づく「内部統制」がそれらの目的を実現するための有効な手法の一つであると考えられる [12]。

地方公共団体の内部統制において対象とするリスク

内部統制を整備・運用するに当たっての一つのキーワードは、これまで述べてきたように「リスク」であり、まずは、地方公共団体を取り巻くリスクについて組織的に把握することから始めなければならない。地方公共団体にとってのリスクというと、一般的には災害などの危機事象、あるいは、契約業務、公金管理、法令遵守などが認識しやすいと考えられる。およそ、災害といった

危機事象は、危機管理（クライシスマネジメント）の範疇であると考えられる。クライシスとは、単に危機ではなく、組織全体の存在に関わり、回避できない損害を得るリスクと解すべきであり、主に事後的に対応せざるを得ないものである。内部統制において対象とするリスクは、そのような危機管理で想定される事後対応が必要なリスクではなく、事前統制の対象となしうるリスクである。内部統制は、リスクを事前に統制することを目的として、対象を洗い出し、リスク内容を影響度と頻度で分析し、リスクごとに、回避・低減・移転・受容等の統制内容の判断を行うことに特徴がある。

地方公共団体への内部統制の目的

内部統制の目的は、業務の有効性及び効率性、財務報告の信頼性、資産の保全、法令等の遵守の4つが挙げられており、これら目的別に、地方公共団体に関わる意義について述べる。地方公共団体の場合は、住民の税を基本として住民サービスを実施する性格を踏まえると、地方公共団体の事務の原則である業務の有効性及び効率性の追求が重要であり、その前提として、公平性・公正性が求められることから、法令等の遵守に基づく合法性や合規性の確保がその基礎となる。また、住民サービスの財政的な裏付けとなる財務報告の信頼性や資産の保全を適切に確保することが重要となる。

1. 業務の有効性及び効率性

行政評価の質を高めるためにも、行政評価システムの中でアウトプットデータを正しく集計する内部統制が求められている。

2. 財務報告の信頼性

財務報告を行うプロセスに内部統制の考え方を取り入れ、組織的にこれまでの財務に関する業務プロセス全体を再点検、整理・合理化していくことが一層求められている。

3. 資産の保全

資産・債務の把握等を通じて、資産・債務改革の方向性や具体策を打ち出すことにより、自らが抱える個々の資産・債務の現状や問題の所在を明らかにし、組織として問題点や危機

意識を共有することがまず重要である。資産は財産としての側面だけではなく、保有コストがかかるものであり、この点からも資産の把握・管理は重要である。現に保有し活用している資産について、その管理の質を一層高めていくことも重要である。

4. 法令等の遵守

地方公共団体の業務に携わる者は、その職務を遂行するに当たって、地方自治法や地方公務員法により関連する法令等を遵守する義務を有するが、これこそ適正な職務の実施を担保しており、地域住民からの信頼を得ることにもつながるため、地方公共団体の内部統制の目的として重要となってくる。

1.2 研究目的

上記において、一般的な民間企業が企業の持続性を発揮するためにリスクマネジメントに取り組んでおり、そのためのプロセスとして内部統制を活用していることについて述べたが、一方、水道事業においては、これを地方公共団体が担い、水道料金収入を基に独立採算事業を行っていることから、この内部統制の実施にあっては、一般企業の場合と異なる独自の課題が存在する。基本的に現在の内部統制は、管理会計を用いることもあるものの、財務会計によるもので、その基本となるのはキャッシュフローとバランスシートを用いた経営情報の把握であり、これを毎年度の短期的展望により把握している。これに対して、水道事業では、一般的な民間企業以上の持続性が求められることから、短期展望が望ましくても、長期的にも維持できるのかといった展望が求められ、必ずしも短期的な展望の枠組みに収まるものではない。また、民間企業の場合は、いわゆる不動産など全てにおいて、市場価値として明確化され、仮に瑕疵などの劣化があれば、減損会計においてこれが反映される。こうしたことから、内部統制に組み込まれる収支バランスの情報や会計情報の中に、市場の情報を通じて、短期の枠組みの中でも長期の動向を一定限度評価できる仕組みになっている。これに対して、社会基盤の場合はその更新周期がさらに長期間に及ぶにもかかわらず、必要となる情報が逆に不足しているため、自らで内部統制の仕組みを作る必要があり、そのためには管理会計を用いたシステム構築が必要不可欠となる。この必要となるシステムこそがアセットマネジメントシステムであり、その導入が水道事業継続の鍵となる。もとより、

水道事業においてアセットマネジメントは緒についたばかりであり、現時点で利用できる解析手法やデータが十分に蓄積されているわけではない。しかし、内部統制の問題は事業全体が問われる話であるから、ある一つのサブシステムを作って、これで良いというわけにはいかない。現時点では、仮に、不十分なモデル、不十分なデータであったとしても、システム全体を把握して、包括的に将来のアセットの動向を検討していくシステムを構築して行くことが大切である。将来において、優れたデータや技術が出てくれば、これらを取り込んでアセットマネジメントシステムをより優れたものにバージョンアップすれば良い。そのような意識の下で、現時点でコンクリート構造物及び管路に関するデータが、それ自体はアセットマネジメントのために取ったデータではなかったが、これらを用いることで先進的に水道に関するアセットマネジメントシステムを開発することができた。こうした内容を本論文の第4章、第5章に盛り込んでいる。もっとも、これらによって全ての水道システムを網羅するわけではないが、今後、水道のアセットマネジメントシステムを動かすために、どのようなシステム、データが必要かを提案していることに本論文の意義があると言えよう。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は、以下に示すとおりである。第2章において、本研究で取り扱う、水道事業においてアセットマネジメントを導入していく背景や現在置かれている状況を明らかにする。その際には、水道事業創設から現在に至る資産の形成状況や現在の資産状況について述べる。第3章では、水道事業において取り入れるべきアセットマネジメントシステムについて記述する。水道施設について、構造物、設備、管路に大別しながら、現状把握、整備目標の設定、計画策定や財政見通しによるチェックなどについて触れる。第4章では、第3章で記述した水道事業のアセットマネジメントの内、構造物に関する資産状況の分析について詳細に取り組む。特に、コンクリート構造物の内、中性化について、加速ハザードモデルを用いた劣化予測について述べる。第5章では、水道事業のアセットマネジメントの内、構造物に資する資産状況の分析について詳細に取り組む。第6章においては、厚生労働省が取りまとめた「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」について触れながら、第5章で扱った要素技術のシステム全体への

影響について述べる。最後に第 7 章においては、本研究の知見を整理するとともに、本研究で残された課題をとりまとめる。

第2章 上水道における資産形成とアセットマネジメントシステム導入に向けた課題

2.1 本章の目的

本章では、上水道においてアセットマネジメントを適用するに当たって、まず、上水道施設の資産形成について述べ、現在の資産の特徴を明らかにした後、他の社会基盤分野や海外でのアセットマネジメントの取り組み状況について触れる。これらを踏まえて、上水道にアセットマネジメントを導入する上での課題を明らかにする。

2.2 上水道における資産形成

2.2.1 水道法における水道施設の位置づけ

1890年（明治23年）に、水道条例が公布された。この条例は、水道は市町村が布設すること、給水を受けるものは水質水量の検査を市町村長に請求することができること、市町村は共用栓、小河川を設置することなどを定めた水道に関する初めての法律であった。以後、数度にわたる改正を経ながら、今日の水道法が制定される1957年（昭和32年）まで存続する。1958年（昭和33年）には、現在の水道法が制定されている。水道法によれば、その目的は、「水道の布設及び管理の適正かつ合理的ならしめ」、「水道を計画的に整備」し、「水道事業を保護育成する」ことによって、「清浄にして豊富低廉な水の供給を図る」ことで、「公衆衛生の向上と生活環境の改善に寄与する」ことにあり、その達成のためには、国、地方公共団体、そして国民それぞれが一定の責任を負うことが必要となる。国や地方公共団体においては、「水道が国民の日常生活に直結し、その健康を守るために欠くことのできないもの」であり、かつ「水は貴重な資源である」ことから、「水源の清潔保持」に努めなければならない。また、国民は上記の施策に協力し、自らも水源等の清潔保持に努める責務がある [13]。

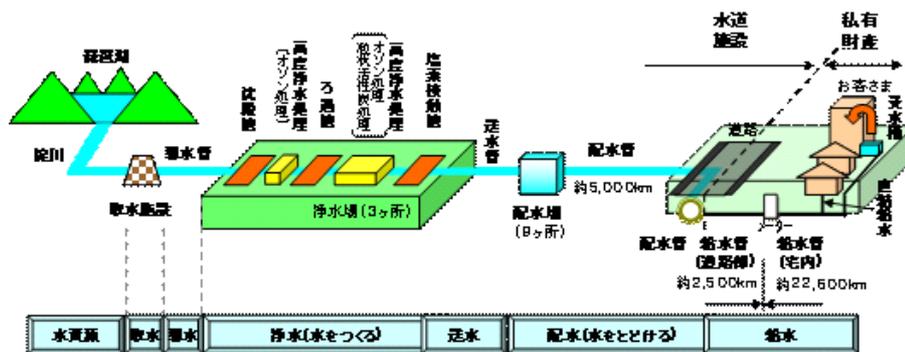


図 2.1: 水道施設全体イメージ (大阪市水道の例)

水道法第 3 条では、この法律で使用される用語を定義している。それによると、水道とは、「導管及びその他の工作物により、水を人の引用に適する水として供給する施設の総体をいう。ただし、臨時に施設されたものを除く。」と定められている。このその他の工作物としては、取水施設、貯水施設、導水施設、浄水施設、送水施設、配水施設がある。

(参考) 水道法第 3 条 (用語の定義) (抜粋)

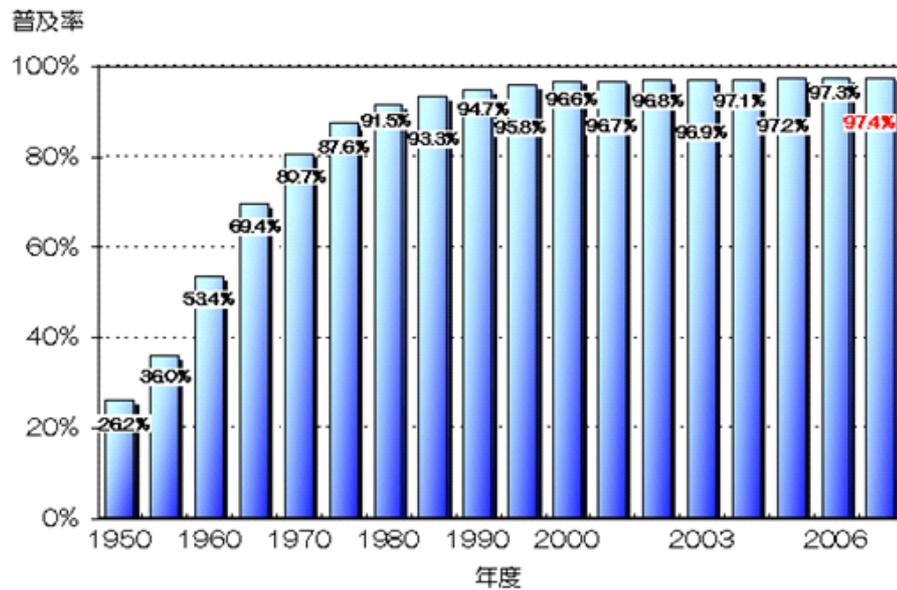
第三条 この法律において「水道」とは、導管及びその他の工作物により、水を人の飲用に適する水として供給する施設の総体をいう。ただし、臨時に施設されたものを除く。

第 2 項 この法律において「水道事業」とは、一般の需要に応じて、水道により水を供給する事業をいう。ただし、給水人口が百人以下である水道によるものを除く。

第 8 項 この法律において「水道施設」とは、水道のための取水施設、貯水施設、導水施設、浄水施設、送水施設及び配水施設 (専用水道にあつては、給水の施設を含むものとし、建築物に設けられたものを除く。以下同じ。) であつて、当該水道事業者、水道用水供給事業者又は専用水道の設置者の管理に属するものをいう。

2.2.2 水道の普及

1887 年 (明治 20 年) に横浜市が日本で最初に給水を開始した頃には、我が国の総人口 3,870 万人に対して計画給水人口は 7 万人で、普及率は 0.2 % でした。その後、函館市、長崎市、大阪において水道事業が創設された 1897 年 (明治 30 年) には計画給水人口は約 90 万人となり、さらに



(厚生労働省健康局水道課調べ)

水道普及率=総給水人口/総人口
ただし、総給水人口=上水道人口+簡易水道人口+専用水道人口

図 2.2: 水道普及率の推移

1907年(明治40年)には176万人、そして1911年(明治44年)には418万人と急増する。しかし、それでも当時の総人口4,985万人に対して普及率はわずかに8.4%に過ぎなかった。大正時代に入ると給水人口、普及率も大幅に増え、1914年(大正3年)には12.7%、同14年には普及率20.7%、昭和に入っても水道の普及は顕著で1936年(昭和11年)には31.5%となる。しかし、この頃を境に、第2次世界大戦などの影響もあり、水道事業も伸び悩み終戦時の1945年(昭和20年)には普及率は34.8%であった。戦後に入ると我が国の復興とともに再び上昇傾向が急激に早まり、1957年(昭和32年)には給水人口2,882万人、普及率40.7%となり、1960年(昭和35年)には給水人口4,991万人、普及率53.4%と国民の半分以上が水道を利用することとなる。とりわけ1960年(昭和35年)以降、1979年(昭和54年)までの20年間の水道の伸びはまざましく、給水人口で約5,565万人、普及率で約38%の上昇となった。このため、1980年(昭和55年)には給水人口1億1,686万人、普及率91.5%に達した。2007年(平成19年)度現在の普及率は、97.4%に達している(図2.2)。

2.3 水道施設の変遷

2.3.1 浄水施設の変遷

凝集沈殿・急速ろ過池

我が国の近代水道の目的の第一は伝染病の予防であったので、横浜市をはじめとして、創設期の水道は全て普通沈殿・急速砂ろ過方式を備えていた。この方式は今日でも対象水量が少なく、水源がきれいな場合には使われている。1912 年（明治 45 年）京都市蹴上浄水場に初めて凝集沈殿・急速ろ過法が採用され、戦後になってからは、新たに作られる浄水場は凝集沈殿・急速ろ過方式になった。その原因は、以下の理由が考えられている。

- 戦後、浄水場用地の取得が極めて困難となり、用地占用面積の少なくて済む急速ろ過方式が好まれたこと
- 塩素消毒が義務付けられ、急速ろ過方式で十分安全な浄水が得られるようになったこと
- 計装化、自動化が進み、緩速ろ過よりも人手が少なくてすみ、運転操作が容易になったこと
- 水源難から濁った河川も水源とせざるを得なくなり、むしろ急速ろ過方式の方が浄水処理法として適していること

このため、新たに建設された浄水場に加えて、それまで用いられてきた普通沈殿・緩速砂ろ過方式にあっても、水源水質の悪化、水需要の急増などを理由に、既設構造物の劣化いかんに関わらず、凝集沈殿・急速ろ過法への改造がなされている。その結果、現在の普通沈殿池の使用は約 2.9 %、緩速ろ過池の使用は約 5.1 % とどまっている [13] , [14].

排水処理施設

浄水処理過程で発生する沈殿池排泥やろ過池洗浄水も河川の水質汚濁の一つの原因として位置づけられ、1976 年（昭和 51 年）6 月、水質汚濁防止法によってある一定規模以上の浄水場では、

排水処理が義務付けられた。具体的には、浄水処理能力1万 m^3 /日以上浄水場の「沈殿施設」及び「ろ過施設」は、水質汚濁防止法の「特定施設」に指定されており、これらの施設を備えた浄水場からの排水は、1977年（昭和52年）6月以降、その水域にかかる排出基準に関して全面規制を受けることとなった。浄水場では、沈殿池やろ過池で取り除かれたスラッジ（汚泥等）を、それまで排泥水や洗浄排水として近くの河川に放流していたが、法の施行後は、これらの排水は排水処理施設で水と泥に分離処理している。2002年（平成14年）度に国が行った調査では、水質汚濁防止法特定事業に該当する浄水場は、521箇所、全国の浄水場の16%であり、年間給水量の64.8%、年間排水量の13.7%になっている。当該施設は、昭和51年の水質汚濁防止法によるものであるから、その建設時期が集中しており、したがって更新時期も全国的に集中するものと考えられる。

高度浄水処理施設（活性炭処理，オゾン処理，生物処理）

オランダのロック [15] は、1974年（昭和49年）6月、自然水中の色素成分であるフミン質が、水道の消毒に用いる塩素と反応してハロホルムを形成すること、またその後、米国環境保護庁（EPA）も1974年（昭和49年）に塩素処理した後の水道水中にクロロホルムが存在することをそれぞれ発表した。当時、米国のニューオリンズ地域では、水道水と発がん性物質の関係が問われており、水道界に大きな波紋を投げかけることとなった。我が国では、厚生省（当時）が研究班を設置して検討を行った結果、1981年（昭和56年）にトリハロメタンに関する制御目標レベルを年間平均値0.1mg/l以下とする監視方法及び低減化手法を定めた暫定指針を通知している。その後、世界保健機構（WHO）の飲料水水質ガイドラインの改訂に対応して、厚生労働省は水質基準の見直しを2003年（平成15年）5月公布している。これは、近年新たな消毒副生成物、微生物による感染症、新しい化学物質等による問題が提起されたものとなっている。

また、このトリハロメタン問題と同時期に、琵琶湖などで発生したかび臭が淀川下流にまで影響を及ぼしたため、飲料水に不快な臭いを与えると共に、トリハロメタン等の微量有機物に関する問題が多く報道され、市民の水道に対する関心が高まることとなった。このように、近年、人口の増加、生活様式の向上、社会構造の変化により、水需要は増加する一方で、水道の水源水質

を取り巻く環境は極めて複雑化している。その結果、地域によっては家庭や事務所ビル工場等からの雑排水の河川への流出により、通常の凝集沈殿・急速ろ過法による浄水処理だけでは十分に対応できない臭気物質、色度、トリハロメタン前駆物質、アンモニア性窒素、陰イオン界面活性剤等を含む水を水道の原水として使用せざるを得ない状況にある。これらの物質の除去を目的とした浄水施設を高度浄水施設といい、これらの浄水処理方法には、活性炭処理、オゾン処理、生物処理等がある。1988年（昭和63年）3月に厚生省生活衛生局水道環境部監修の下、「高度浄水施設導入ガイドライン」（（社）日本水道協会）、1990年（平成2年）、1992年（平成4年）には厚生省委託費による「高度処理施設の標準化に関する調査報告書」（（社）日本水道協会）が、さらに2000年（平成12年）には水道技術研究センターにより「浄水技術ガイドライン」が取りまとめられるなど、高度浄水処理に関する様々な知見が集積されたことを受け、高度浄水処理の導入が図られた。これらの施設は、既設の凝集沈殿・急速ろ過法に付加する形で新たに建設されており、用地難からコンパクト化が図られており、水道施設としては、最も新しい部類になる [16]-[19]。

2.3.2 送配水施設の変遷

配水池

配水池は、浄水場から送られてきた水を受け、平常時にあっては、その貯留量（有効容量）を利用して、配水区域の需要変動を吸収し、取水あるいは浄水施設の事故や水質事故などで浄水場から水が送られてこない異常時にあっては、水源としての役割を果たしている。特に地震等の災害時において、飲み水が貯えられている応急給水活動の拠点としての重要性から、新設、増設が行われている。水道では、配水池の有効容量を決める目安として、計画一日最大給水量の12時間を標準として、これに浄水場等の突発事故に対応できる余裕容量と消火用水を加算するように定められている。全国の上水道事業における配水管有効容量は、1965年（昭和40年）度の450万 m^3 から年々増加の傾向にあり、1981年（昭和56年）度には2,000万 m^3 、1997年（平成9年）度には3,000万 m^3 を超え、2007年（平成19年）度には3,466万 m^3 となっている。

管路

浄水処理された水を配水池まで送る送水管，配水池から需要家まで水を送る配水管の役割は，安全な水を，必要な量，必要な圧力で，必要な場所に送り配ること．送配水施設は，水の安全性を保持するために，浄水施設から受け取った清浄な水が輸送中に汚染されるような危険性を確実に排除し，また輸送中に水が変質することがないようにしなければならない．管路施設は，その大部分が地中，主として道路の路面下に埋設されるため，管路周辺環境は衛生面での安全性が常に確認できる状況にない．このため，管路内の衛生を確保するため，水道水中に常に適正な濃度の残留塩素が確保できるように塩素注入量の管理をすると共に，水質劣化を避けるために，管路内で長期間水を滞留させることのないよう，口径を設定し，管網の構成に配慮し，必要に応じて排水作業を実施する．管路内で水質劣化の要因としては，管路内面の汚れや挟雑物によるもの，管内面の塗覆装の劣化・不良等による錆の発生や，管材料や塗覆装自体の成分の問題，塩素注入によるトリハロメタンの生成のように水源水質の汚染と水道として必要な処理過程との関係で発生する問題等がある．こうした旧管種に起因する問題の解決には，基本的に管路の更新等が必要となるが，そのためには多大な費用と時間を要することから，できるだけ早期から更新計画を策定し，その推進を図る必要がある．

管路延長

日本全国に布設されている水道管の総延長は 59 万 9000km で，これは地球をおよそ 15 周する長さに匹敵し，その総資産価値は水道資産全体の約 7 割に相当する．配水管延長は 1997 年（平成 9 年）度以降 16.1 % 増加し，一日平均給水量あたりの配水管延長については 1997 年（平成 9 年）度以降 22.6 % 増加し，給水量の伸びが鈍化している中で依然として配水管の増強整備が行われていることを示している．

管種の変遷

配水管として，従来から用いられているのは，普通鑄鉄管，高級鑄鉄管，石綿セメント管，遠心力鉄筋コンクリート管，プレストレスコンクリート管，硬質塩化ビニル管であり，近年はダク

タイル鑄鉄管，鋼管，ポリエチレン管が用いられている．これらの管材料の内，使用量の多い，普通鑄鉄管，高級鑄鉄管，ダクタイル鑄鉄管について，以下に述べる．我が国の水道施設は，1885年（明治18年）起工の横浜をもってはじめとし，函館，長崎，大阪，東京など，開港都市から順次大都市へと水道が起工されていった．これらの水道に使用された主要材料である鉄管の調達については，いずれの都市でも，国産か輸入かについて議論されたが，当時の我が国の鉄管工業が発達していなかったこともあり，横浜，函館，長崎の場合は，外国品によるしかなかった．

その後，間もなく大阪，東京などの大都市水道が着工されたが，当時，国内の鉄管工業の発達状況から見て，多量の鉄管を納期と品質に不安なく供給契約できる製造工場がなく，輸入品に頼らざるを得ない状況であったが，国内世論や市議会方面からの主張から，国産品使用のを決定する．しかし，その後，明治30年代までは鉄管調達を一部国内，一部輸入の両面に頼る都市が多かった．その後，国内生産の増強に伴い，明治40年代には外国製は全く姿を消す．いずれにしてもこれまでの管材料は，現在，普通鑄鉄と呼ばれるもので，引張強さ 125 N/mm^2 である，1931年（昭和6年）には，高級鑄鉄管が導入される．これは，銑鉄に適量の鋼を配合するもので，引張強さは 250 N/mm^2 となり，これまでの普通鑄鉄と比べると2倍の強度を有していた．高級鑄鉄管は，普通鑄鉄管に比べ，強度が大きいことから，管圧が2～3割り程度薄く設計されているが，当時の品質管理が不十分なこともあり，一部に所定の強度を欠いていたことや製造技術上の問題等から，戦前は事故が多発した管路もあったが，戦後になると，製造技術の向上や，品質管理，検査方法の向上で破損する鑄鉄管は少なくなった [20],[21]．

1954年（昭和29年）になると，鑄鉄管としては画期的なダクタイル鑄鉄管が登場する．ダクタイル鑄鉄管とは鋼のような耐力性と鑄鉄本来の耐食性を兼ね備えた管材料である．ダクタイル鑄鉄管は溶湯の中にマグネシウムを添加することによって，球状黒鉛を有する鑄鉄として製造される．その引張強さは 420 N/mm^2 に達し，1995年（平成7年）1月の阪神淡路大震災をはじめとする大震災においても，K型継手など，一般継手管路における継手抜け出しは見られるものの，抜け出し防止機能を有するS，NS型などの耐震型継手管路では，被害は見られない．

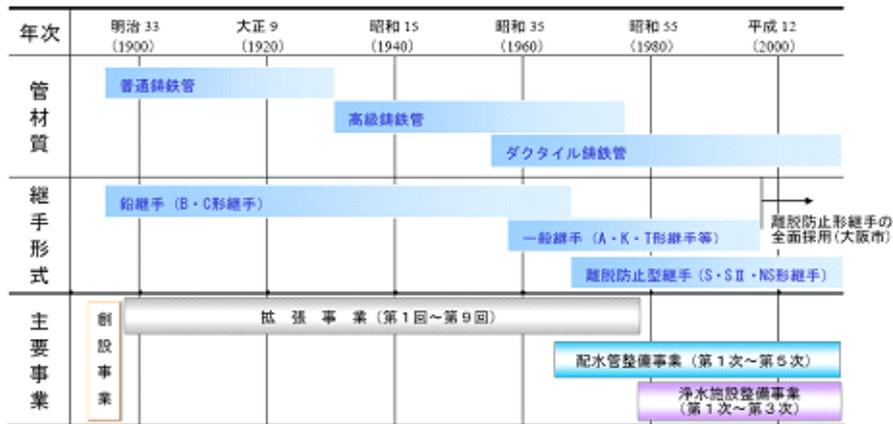


図 2.3: 管路の変遷 (大阪市水道の事例) [22]

2.3.3 上水道施設の耐震化の変遷

水道施設の施設更新を考える場合、既存の施設の有する耐震性能が大きく影響する。これまでの大規模地震発生時の状況を見るまでもなく、水道は、震災直後に最もその機能回復が求められるライフラインであり、耐震性能確保のため、施設劣化が進んでいない場合においても、優先的に更新する場合もある。現在の水道施設を形作る各施設は、それが建設された各時代において、当時の耐震設計の考え方を踏まえて建設されており、こうしたことも踏まえながら資産管理を行う必要がある。

構造物

我が国における耐震工学は、過去に経験した大震災を契機として、その都度、耐震基準や耐震思想が改善されてきた。地震研究の発端は1891年(明治24年)の濃尾地震であり、1923年(大正12年)の関東大震災を契機に、近代的耐震設計法が取り入れられた。以後、1948年(昭和23年)の福井地震、1968年(昭和43年)の十勝沖地震、1995年(平成7年)の兵庫県南部地震等を契機にその見直しが図られてきた。水道施設についても、これに準じた耐震設計を行ってきたが、

特に、福井地震以降、1953年（昭和28年）の水道施設の耐震工法及び1966年（昭和41年）の改定において、設計水平震度を地域別、地盤別、施設別に0.1～0.3と定め、その後、1979年（昭和54年）の水道施設耐震工法指針・解説では、修正震度法を加味し、設計水平震度を地域別、地盤別に0.13～0.24とした。日本の水道施設における土木・建築構造物についても、こうした一連の動向と連動して、耐震設計の強化がなされてきている。[23]。

管路

管路の管種別の耐震性に関する評価としては、普通鋳鉄管及び高級鋳鉄管は、基幹管路はもちろん配水支管として備えるべき耐震性能を管体そのものが有していないとされている。一方、ダクタイル鋳鉄管は、その継手構造により基幹管路として備えるべき耐震性能において差があるものとされ、S形、NS形継手など、いわゆる抜け出し防止機能を有しているものは、いかなる地盤にあっても耐震性能があるものとされるが、K形では地盤によってレベル2地震動を満足しないとされ、それ以前のA形などは、地盤によらずレベル2地震動を満足しないとされている[23]、[24]。このため、こうした耐震性の無いとされている管種から、耐震性のある管種への早期の取替えを進める必要がある。

2.4 水道事業経営面での課題について

2.4.1 水道事業と地方公営企業法

水道法により、水道事業は、原則、市町村が経営することとされており、地方公営企業法が全面的に適用される地方公営企業として、事業執行や財務などにおいて地方公共団体のその他の事務とは異なる特別の制度を設けている。地方公営企業には、管理者が置かれ、管理者は地方公共団体の長、いわゆる首長の補助職員でありながら、独自に職員の任用、財務会計行為等を行う権限を付与される。また、地方公共団体の一般会計とは別に特別会計（公営企業会計）を設置することとされ、一般会計が官庁会計方式を採用するのに対して、公営企業会計では企業会計方式を採用し、損益計算や財務諸表の作成が義務付けられるなど、首長の部局の事業運営とは大きく異なっている。地方公営企業の事務を執行するために、管理者の下に企業独自の補助組織と補助職員が置かれる。この補助職員は企業職員と呼ばれ、管理者が任免を行い、指揮監督を行い、事業

の運営体制という面からも独立性を有している。財政面では、特別会計を設け、独立採算の原則により経営を行うこととされている。経理の方法として、全ての経費及び収益をその発生の事実に基づいて計上しかつ、その発生した年度に正しく割り当て、その経営成績を明らかにすると共に、すべての資産、資本及び負債について、その増減及び異動を発生の事実に基づき、かつ、適当な区分等により整理し、その財政状況を明らかにするとされ、企業会計方式を採用している。

2.4.2 水道事業の財政状況

水道事業は、独立採算による経営を原則としており、安定的、持続的な事業運営のため適切に事業収入を確保しなければならない。水道事業では企業会計方式を採用しており、収益はサービスの提供時など収益の原因が発生した年度に一旦帰属させ、施設整備など複数年度に亘って効用を発揮する支出については、一旦資産に計上した上で、効用を発揮する年度に減価償却という方法で費用として割り振ることで、収益と費用を対応させている。これにより、各年度の収益と費用を比較することとなり、経営成績を明らかにすることができる。また、資産のみならず借入金などの負債についても、損益収支とは区別して累積して経理することにより、資産、負債の内容や金額など当該地方公営企業の財政状況を明らかにしている。

2.4.3 料金決定の原則

地方公営企業は独立採算を原則とし、その経営に要する費用は負担区分に基づき一般会計が負担する経費を除き、経営に伴う収入を持って当てなければならないとされる。この収入の中心をなすのが料金収入であり、料金のあり方が地方公営企業の財政状況を左右する。

公営企業の料金規制の方法としては、総括原価主義による料金設定方式を原則としている。総括原価主義とは、損益収支の原価に事業報酬を加えたものを料金の基礎とするものである。事業報酬は事業用資産の額に一定の率を乗じた金額であるが、民営公益企業においても、事業報酬の全てが株主や債権者等への利益配分となるのではなく、一部は内部留保され、施設更新など事業の持続的経営に必要な原資になっている。公営公益事業では利益配当は必要ないとしても、一定の内部留保は持続的な事業経営のために不可欠といえる。今後、施設更新需要の急増が見込まれることを勘案すると、更新需要等に備え財政の健全性の向上を図る必要がある。また、企業債発

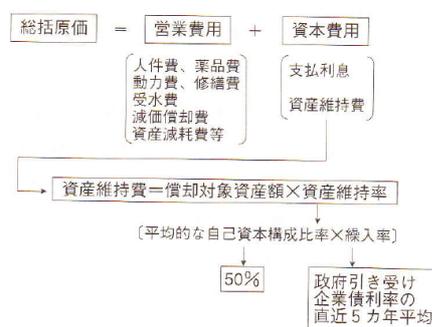


図 2.4: 総括原価の構成 [25]

行を抑制し、必要な財源を料金に求めることで、資産維持費に相当する額を確保するなど、財務体質の強化を図る必要がある。

2.4.4 水道事業経営の現状

水道事業の支出費目別に総支出に占める割合は、図 2.5、図 2.6 に示すとおりである（「地方公営企業年鑑」（平成 16 年度版）及び「水道統計」等から宮脇ら [25] による）。これまでの施設整備に要した費用である企業債償還金と金利の占める割合が高いことが分かる。平均すれば、資本的支出の 60 % を占める施設整備に要した費用を除いた事業収支が赤字であれば、事業運営としても成り立たないことになる。建設改良費を含めた給水事業損益計算では、全国水道事業体の 41 % を占める 705 事業体が赤字となっている。さらに、総費用に対する総収益比が 100 % 以上でも収益の若干の減少により赤字となる可能性もあることから、この比率の境界線を 105 % とすると全体の 835 事業体が何らかの対応がなければ、水道事業継続の危険性をはらんでいる。

2.4.5 水使用量の減少

1997 年（平成 9 年）1 月の国立社会保障人口問題研究所が発表した将来推計人口は、わが国の人口減少に対し、大きな関心を集める契機となった。2002 年（平成 14 年）1 月発表の将来推計人

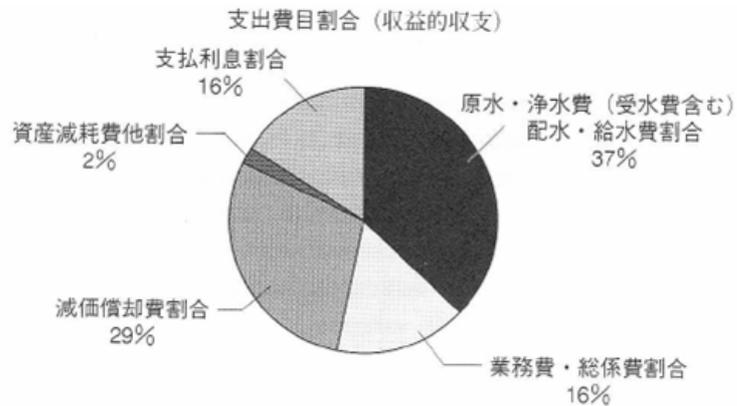


図 2.5: 収益的支出に占める各費目の割合（全国平均） [25]

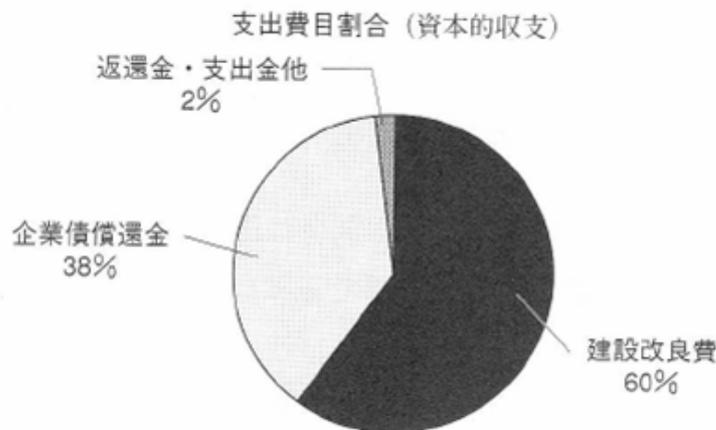


図 2.6: 資本的支出に占める各費目の割合（全国平均） [25]

口によれば、日本の総人口は2006年（平成18年）に1億2,774万人でピークに達した後、減少に転じるものと予測された。生活用水の使用量は、水道施設の整備が推進された高度経済成長期を通じて増加傾向にあったが、近年は漸減傾向に転じている。特に1994年（平成6年）度からの給水実績を見ると、図2.7に示すように、1日最大給水量は概ね減少傾向にあり、1日平均給水量も漸減傾向にある。これら人口減少、水道使用量の減少は水道事業の運営財源である水道料金収入の減少に直結する問題であり、今後、水道事業者はますます厳しい経営環境の下で事業運営を担っ

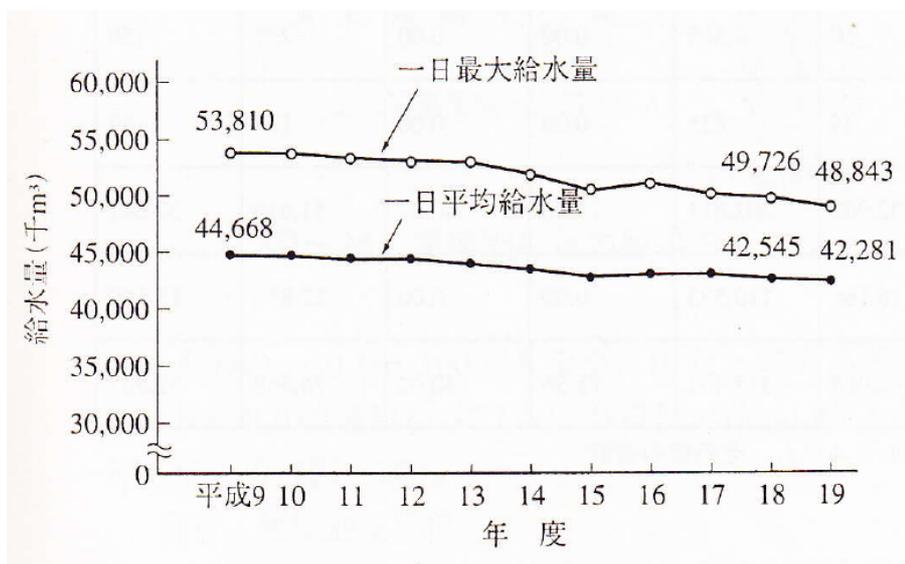


図 2.7: 上水道事業の1日最大給水量及び1日平均給水量の推移 [26]

ていく状況にある。

2.5 これまでの水道への投資額

厚生労働省は2004年(平成16年)6月に水道ビジョンを策定し、今後の水道に関する重点的な政策課題とその課題に対処するための具体的な政策及び方策等を包括的に明示した。2007年(平成19年)にそのレビューを行うための水道ビジョンフォローアップ検討会が設置され、2008年(平成20年)7月に改定されている。この水道ビジョンフォローアップ検討会において、運営基盤の強化見直しの中で、わが国の水道施設は、1975年(昭和50年)前後と1998年(平成10年)前後をピークに整備されており(図2.8)、現在の水道施設の資産額をこれまでの投資額の蓄積として評価すると約40兆円と推計され、水道事業者は、将来にわたって安定的な給水が確保されるよう、この資産を有効かつ適切に活用していかなければならないとしている。

また、この検討会において、現有施設の更新需要は、年間約5,500億円(2005年(平成17年)度末)と見積もられている。今後、1975年(昭和50年)前後に集中的に整備された水道施設の経年化が進むことから、1955年(平成30年)代にはその更新需要が約1.5倍になると推計される

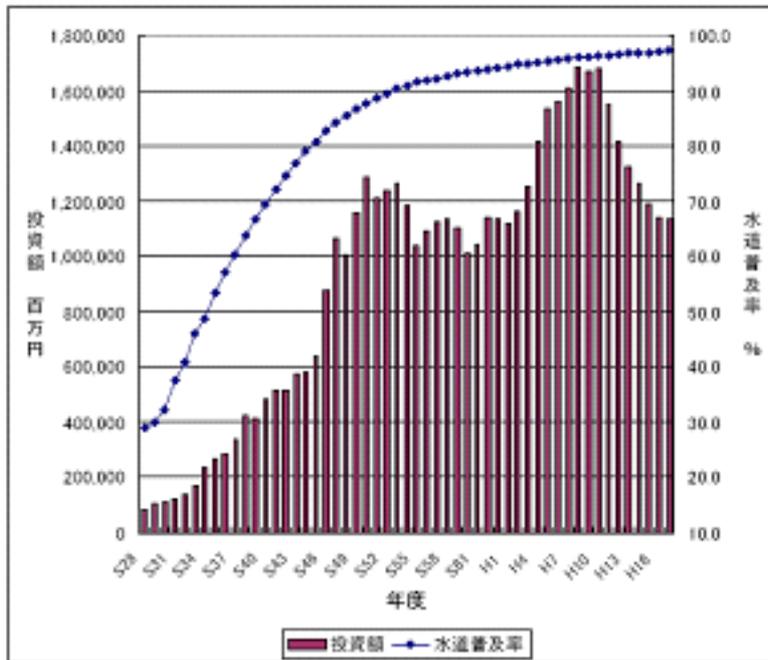


図 2.8: 水道への投資額 [26]

が、その一方で、水道への年間投資額は近年減少傾向にある。この傾向が続いた場合には、いずれ更新需要が年間当たりの投資額を上回り、施設更新に必要な資金が確保できなくなる。今後の水道施設への投資額が対前年度比マイナス1%で推移すると仮定してシミュレーションした場合、約15~20年後以降は更新需要が投資額を上回ると試算される(図2.9)。

一方、我が国の総人口は、国立社会保障・人口問題研究所による将来人口推計(2006年(平成18年)12月公表)における中位推計の結果に基づけば、既に長期の人口減少過程の局面に入り、2055年(平成67年)には約9,000万人にまで減少するものと予測されており、水需要の増加による料金収入の増加もこれまでのように見込めない状況にある(図2.10)。

水道資産約40兆円の内訳を見ると、図2.11の通りであり、送配水施設が24.6兆円を占めているが、送配水施設の多くが、管路施設である。このため、水道施設の約半分は地中であって見えない資産ということになる。

今後、これまでに整備された施設が更新時期を迎えて更新需要への投資額が大幅に増大していくことが想定されるにもかかわらず、料金の増収がこれまでのように見込めない状況では、更新に必要な資金を確保することが、今まで以上に厳しいものとなる。

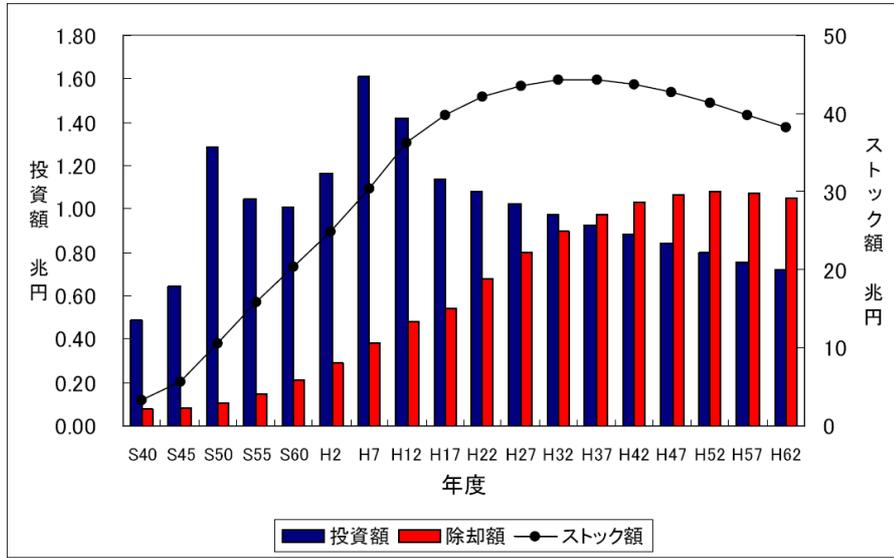


図 2.9: 投資額と更新需要 (除却額) の推移

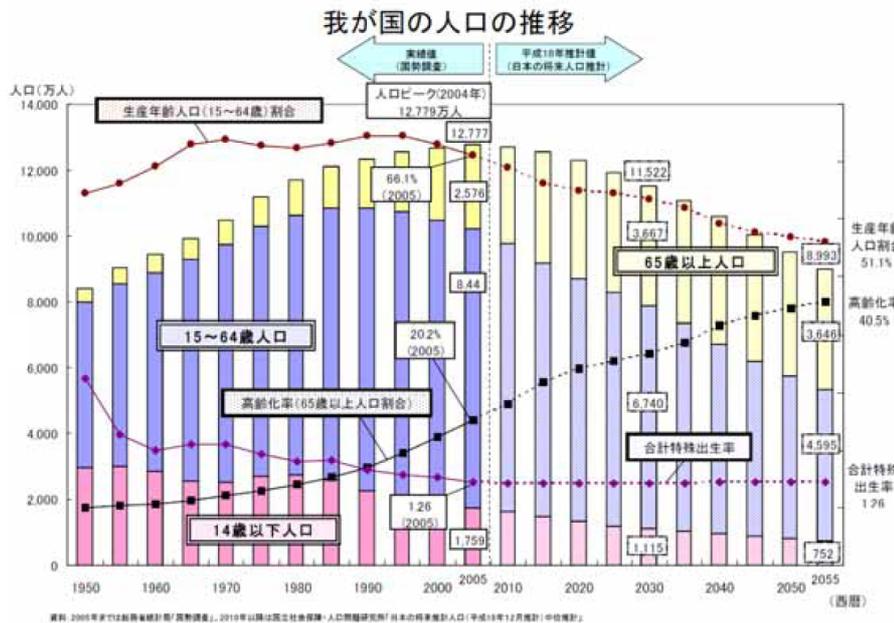


図 2.10: わが国の人口の推移 [6]

2.6 社会基盤全体におけるアセットマネジメントの取組みと水道分野の課題

本章ではこれまでに、水道施設の資産形成過程や独立採算で行っている水道事業経営について触れた、引き続き、社会基盤全体におけるアセットマネジメントの取り組み状況を踏まえ、水道

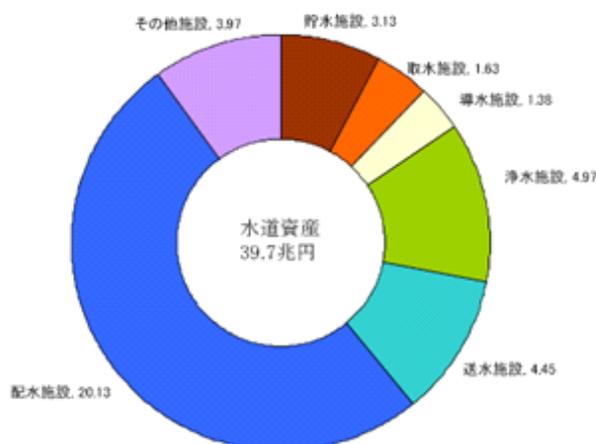


図 2.11: 水道資産の内訳 (平成 17 年度) [6]

事業にアセットマネジメントを適用するための課題について述べる。

2.6.1 劣化予測手法

アセットマネジメントにおいては、劣化予測が極めて重要な役割を占める。これは、その精度が全体マネジメントにおける事前評価や事業計画を策定する上で大きく影響を与えるためである。これまで、高度成長期に大量に整備された社会基盤施設の長期的な性能確保と品質保証については、ほとんど主眼が置かれることなく半世紀近くが経過したといえる。そのため、施設の維持修繕に活用できるデータの蓄積と保存には注力されてこなかったことから、精度の高い将来予測が困難になった原因と考えられる。しかし、近年、社会基盤整備は新設から更新あるいは補強、補修へと移行してきており、補強、補修を支える要素技術である劣化予測の研究も盛んになりつつある [7]。

土木施設の劣化予測に関しては、数多くの事例がある。土木施設の劣化モデルとして、1) 過去の目視検査結果に基づいた統計的な劣化予測メカニズム [27]-[33]、2) 土木施設の力学的メカニズムに着目した劣化予測モデル [34]-[39] が提案されている。劣化箇所の詳細な余寿命や具体的な補修戦術を求める場合、2) の力学的な劣化予測モデルが有効である。しかし、使用環境などの不確定なパラメータが支配的な場合、劣化メカニズムの予測が困難になる。また、個々の劣化現象に関する詳細な情報が必要となる。このため、数多くの土木施設を同時に管理する場合、力学的予

測モデルを用いてすべての施設の劣化を予測することは困難となる。一方、1)の統計的な予測モデルは、多くの劣化サンプルから、劣化過程の背後に存在する規則性をモデル化することを目的とする。統計的劣化予測モデルは数多くの土木施設で構成される土木施設システムのアセットマネジメントにおいて、補修戦略や予算配分の問題を検討するのに必要となる。ハザードモデルは、信頼性解析の分野で施設や機械の寿命を予測するモデルとして開発され、信頼性解析のみならず多くの分野で適用事例が報告されている。また、ハザードモデルの推計方法に関する研究成果が蓄積されており、その結果は、いくつかの成書 [40],[41] に詳しい。アセットマネジメントの分野においても、ハザードモデルを用いた劣化予測モデルがいくつか提案されている [27]-[31]。例えば、Shin 等 [29] は、道路舗装のひび割れ開始時刻を予測するためのワイブルハザードモデルを提案している。また、青木等 [27] はトンネル照明を対象として、ワイブルハザードモデルの有効性について実証的に検証している。さらに、ワイブル劣化ハザードモデルを拡張した多段階指数劣化ハザードモデル、多段階ワイブル劣化ハザードモデルを提案している。ハザードモデルは、構造物の構造特性や目視検査の時間間隔等、異なるデータ特性を持つ土木施設の劣化過程を同時にモデル化することが可能となっている。一般に、劣化ハザードモデルを推計するためには、十分なデータ量が必要となる。しかし、データ量が蓄積されるまでには、長時間を必要とするため、先駆的な事前情報の有効利用、追加的データに基づいたモデルの更新を統一的な枠組みの中で実施することが可能であるベイズ推計法を用いる手法もとられている。

道路や橋梁などの分野においては、これらの研究成果を踏まえて、科学的な点検を実施し、劣化予測を導入し、効率的な維持管理を実施している。

水道の分野においても、IWA の研究グループなどによって戦略的なアセットマネジメント研究の蓄積が進められている。例えば、Burn[42] らは、上下水道部門における残余耐用年数の最新の予測手法を幅広く論じ、一方で、現時点ではこれらの手法の選択に決定的な報告が無いとしている。故障率の統計的モデルとしては、Shamir ら [43] は、管の経年数に伴う管路の事故率の増加を 2 つの指数関数で表現しており、Jarrett ら (2001) [44] (2002) [45] は、個々の埋設管の事故率に対しこれとは異なる手法を提案している。物理的決定論モデルとしては、Randall-Smith[46] らが、腐食ピット深さは一定速度で増加するとの仮定の下で、線形腐食モデルを提案し、Rajani ら [47]

は、物理的決定論モデルにより、埋設された鑄鉄管の腐食と事故発生を予測している。また資産管理面では、Shamirら [43] や、Burnら [48] は、リスクコストと管路の更新の間のトレードオフを扱っている。

2.6.2 会計システム

アセットマネジメントの分野においては、こうした劣化予測からライフサイクルコストを最小化するタイミングについて推計しているが、実際に社会基盤の管理者は最適な修繕計画が実施できる予算を毎年確保できるわけではない。そこで、たとえば、道路舗装の分野では、適切なサービスを持続的に維持するための予算を自立的に調達するための会計システム（舗装管理会計システム）の構築が図られている [49]。このほか、下水道の分野においても、下水処理施設のアセットマネジメントの考えに基づき、整備費用を確保するための管理会計システムの提案が行われている [50]。

2.6.3 国内における上水道分野での取組み状況

厚生労働省が2007年（平成19年）に設置した水道ビジョンフローアップ検討会において、水道事業の将来の厳しい状況が見込まれることが確認され、アセットマネジメントの導入による中長期的視点に立った水道施設の維持管理・更新、資金確保策、等について検討が必要とされている。こうした点を踏まえ、厚生労働省が2009年（平成21年）7月に取りまとめたのが「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」（以下「手引き」と言う。）であり、その策定をきっかけとして、全国の水道事業体でアセットマネジメントの取組みが始まったところである。

上述した、他の社会基盤分野や水道部門の海外での取組み状況と比べると、ハザードモデルを用いた劣化予測、これを基にした最適更新時期の推計なども緒に就いたところである。例えば、水道管路を題材にしたものでは、荒木等 [51] が、管路事故データから得られた故障確率密度関数や故障率の分析を行い、赤木等 [52] は管厚に着目した劣化予測手法を用いて、管路更新計画へのアセットマネジメントの導入を提案している、山崎は [53]、水質劣化リスク、地震リスク、漏水リスクによる損失額と更新事業費の合計を最小にする、すなわちライフサイクルコストを最小化する保全更新計画の提案を行っている。

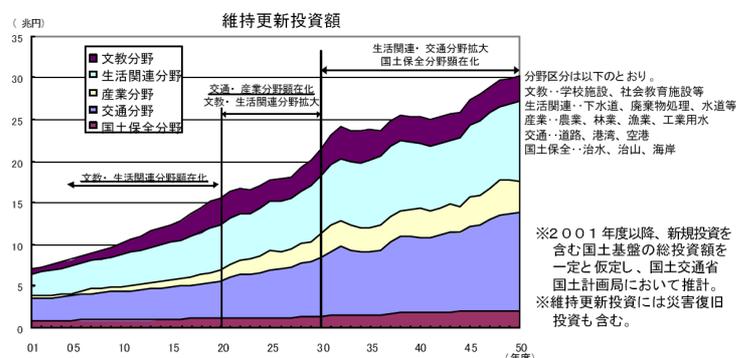


図 2.12: 分野別に見た維持更新投資額の推移 [11]

会計システムについては、「手引き」においても経営上のシミュレーションを扱っているが、上述したような適切なサービスを持続的に維持するための予算を自立的に調達するための会計システムの構築には、取り組むべき余地がある。

2.7 上水道におけるアセットマネジメント適用に向けた課題

国土審議会調査改革部会の資料（図 2.12）によれば、社会基盤の維持更新投資額は、2050年（平成 62 年）時点で年間 20 兆円を超え、2010 年（平成 22 年）から 2050 年（平成 62 年）で約 490 兆円に上るものと推測され、分野別の更新時期としては、文教施設（学校施設，社会教育施設等）から，生活関連施設（下水道，廃棄物処理，水道等），交通（道路，港湾，空港）の順に顕在化するものと推測されている [54]。

このように，上水道は，道路など交通関係の社会基盤よりも，更新時期が迫ってきているおり，対応が急がれる状況にあると言える。

しかしながら，水道施設の更新需要の増大を勘案した場合，現在の更新率は十分な水準にはない。例えば，現在の管路更新率は全国平均で約 1% であるが，現在の更新ペースが変わらなければ，全ての管路を更新するのに約 100 年かかる計算となり，管路の老朽化は今後さらに進むものと懸念される [6]。

我が国の水道事業は、これまで経験したことのない大規模更新・再構築の時期を迎えようとしている。水道事業が引き続きその持続性を維持し続けるためには、中長期的な視点に立って、技術的な知見に基づいた施設整備・更新需要の見通しについて検討し、着実な更新投資を行う必要がある。また、受益者負担を原則とする水道事業においては、施設の更新には相応の負担が必要であることについて水道利用者や議会等の理解を得るための情報提供を適切に行っていく必要がある。

その一方で、将来の施設更新に向けて損益勘定留保資金等（内部留保金）や積立金等の自己資金確保を計画的に行っている水道事業者等は少ないのが実態である [55]。

持続可能な水道事業を実現し、次世代に健全な水道を引き継ぐためには、各水道事業者等において、資産管理の重要性を十分認識し、水道の資産管理が組織的に実行されるとともに、適切な自己診断に基づき資産管理水準の継続的向上を図ることが必要である。

各水道事業者等は、人口減少による料金収入の減少等といった社会情勢の変化に適切に対応すべく、中長期的な視点に立って施設の更新計画を策定し、必要に応じてさまざまな資金調達方法を活用しつつ自己資金確保を計画的に行い、着実に更新投資を行うことが必要不可欠となる。

そこで、まず、課題として挙げられるのが、点検データがほとんど蓄積されていないことである。特に資産の半分以上を占める管路については、定期的な維持管理が行えないメンテナンスフリーとなっており、その一方で、経年劣化により漏水や破損事故の危険性が高まる。他の社会基盤分野で行っているモニタリングについても、現実的な掘削を伴わない手法については、未だ開発途上にある。

構造物については、管路ほどでないものの施設休止を伴う調査が必要となることから、点検データは限られている。こうした状況にあっても施設の劣化予測を行える手法が求められている。

最後に、アセットマネジメントの導入となれば、劣化予測や最適更新周期の推計に止まることなく、適切なサービスを持続的に維持するための予算を自立的に調達するための会計システムの構築が望まれるところであるが、現時点では、「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」に示されているように、事業計画の経営収支面からの確認・フィードバックに止まっている。

2.8 結語

わが国の近代水道は、土木、電気、機械、建築、化学などの様々な技術分野の融合によって支えられながら、嘗々と技術革新を行い、その積み上げで形成されている。

水道資産の半分以上を占める管路においても、使用材料が技術革新の中で変化してきており、経年化という観点だけではなく、耐震化の観点から更新が求められている。また、浄水施設では、水源の変化、水質基準の強化など、経年化以外の要因で施設建設や更新が進められた場合もある。

また、わが国の水道事業は戦後の経済成長期に水需要が急増し、それに対応すべく急激に整備された歴史を有しており、今後まさにこうした施設が経年化する、これまでに経験したことない大規模更新・再構築の時期を迎えようとしている。これを地方公共団体による独立採算事業で賄ってきた水道事業が、いかに持続性を保持しながらこれを達成して行くのかが問われている。このように、水道事業は今まさにアセットマネジメントの導入が求められている環境にあると言える。

続く第3章では、第2章で述べた水道事業の資産形成や、水道事業経営の実態、あるいは、他の社会基盤と比べた課題を踏まえながら、水道事業へのアセットマネジメントの導入について述べることとする。

第3章 上水道へのアセットマネジメントシステム導入の考え方

3.1 本章の目的

これまで、第1章では、社会資本へのアセットマネジメント導入について述べ、その中で、アセットマネジメントとは内部統制を通じたリスクマネジメントであるとしている。また、第2章では、水道事業の資産形成と事業経営の状況について触れた後、他の社会資本との比較を行いながら、上水道へアセットマネジメントを導入する上での課題について述べた。

現時点では、第2章で述べたように、水道事業ではアセットマネジメントに必要なデータが不十分であることから、いきなり十分なモデルの構築とは行かないものの、システム全体を把握して、包括的に将来のアセットの動向を検討していくシステムを構築して行くことが大切である。将来に優れたデータや技術が出てくれば、これらを取り込んで、よりすぐれたものにバージョンアップする礎をまず築き上げることが大切である。こうした観点から、第3章では、水道事業に導入すべきアセットマネジメントについて記述する。

水道施設は大きく分けて、構造物、設備、管路から成り立っており、これらを含めた形でアセットマネジメントのフロー及び各段階で必要となる取組み事項について記述する。

3.2 水道アセットマネジメントシステムの導入

上述したように、水道は一定の給水収益の範囲内において、効率性と安定性の双方の視点が求められる事業であり、とりわけ施設更新時代を迎える中においては、将来あるべき水道像を展望しつつ、近年の厳しい財政制約のもとで、当面する水需要に見合った費用対効果の高い施設整備手法を適用する必要がある。そのため、今後の施設更新にあたっては、事業経営に寄与する効果的な施設整備手法の一環として、「水道アセットマネジメントシステム」を構築し、施策を推進

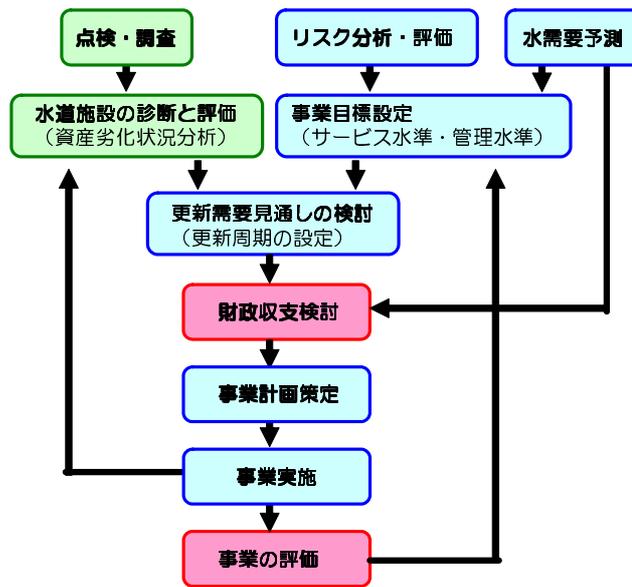


図 3.1: アセットマネジメントシステムフロー図

する必要がある。その結果，維持管理部門における点検データを基に、計画部門から設計・施工部門に至る一連の流れの中で，客観的指標に基づく定量的評価を実施し，リスク並びにコスト分析に基づく明確な意志決定が図られるものとする。図 3.1 に水道事業におけるアセットマネジメントシステムのフローを示す。

水道事業にアセットマネジメントを導入することで期待できる効果は，以下の通り。

- まず，現有資産について適切な点検調査を実施し，技術的な知見に基づいて資産の診断を行うことにより，水道資産の老朽化の状態を把握することができる可視化を図る。すなわち，その情報やデータを収集・整理しデータベース化することにより，必要な情報を必要なときに入手でき，資産管理が効率化される。
- 診断や評価に基づいて水道資産の状態を踏まえた更新時期を設定することにより，劣化が進行している資産は前倒して更新し，健全性が維持されている資産は更新時期を延ばすことができ，事業経営面からも健全性を維持しつつ，中長期的な視点から見て資産管理に要する費用の適正化につながる。

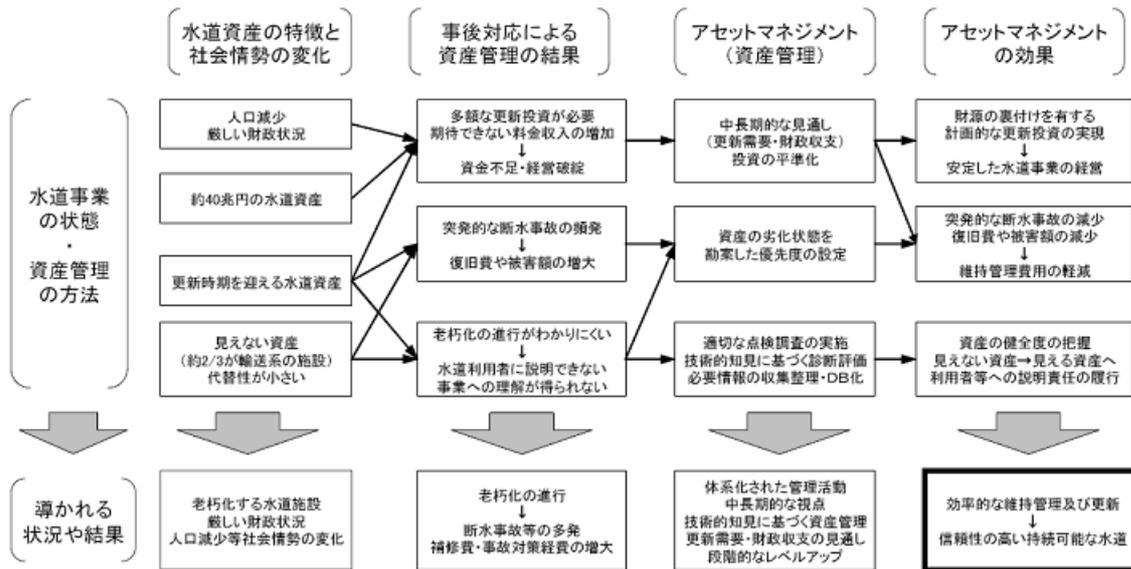


図 3.2: アセットマネジメント (資産管理) の実践により期待される効果 [6]

- また、事後対応型の資産管理に比べて、老朽化に伴う突発的な断水事故や震災時の被害等の頻度が減少することが期待できるため、この点でも、中長期的な視点で見た資産管理に要する費用の軽減につながる。
- さらに、資産の診断結果や健全度評価結果は、更新投資の必要性を説明するための有効な情報となり、水道利用者等に対するアカウンタビリティを果たして行く上でも重要である。

以下に水道アセットマネジメントシステムの各要素について述べる。

3.3 事業目標の設定

3.3.1 土木構造物

土木構造物はその更新周期が長く、その更新は将来を見据えた手戻りのないものでなければならない。このため、投資の優先順位付けを行い、重点的に投資する施設を抽出する。具体的には、

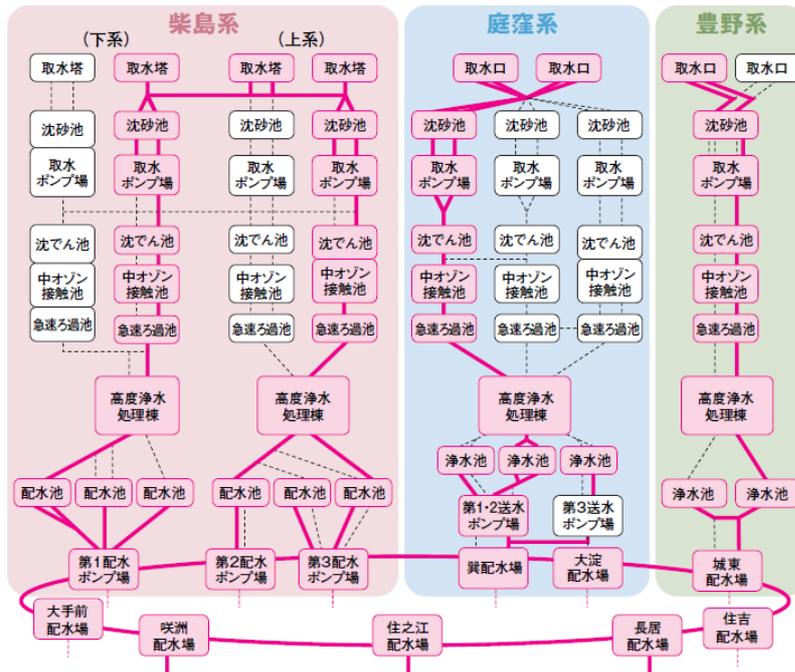


図 3.3: 重点投資の考え方の事例 (大阪市水道局) [22]

耐震性能の確保などの視点も加味し、水道システム全体の耐震性能を確保する観点から、重点的に投資する浄水場、あるいは、システムをしばり、これに属さないものについては、投資を後送りさせ、重点施設更新時に、需要動向を見ながら判断するといった、リアル・オプションの考え方を適用する。

図 3.3 にこうした考え方に基づいて優先的な投資システムを抽出している事例を示す。

3.3.2 設備

電気・機械設備の劣化は、同一設備であっても、その使用状況や運転時間等により、大きく異なることから、日常の運転状況や目視点検等に加えて、定期的な停止を行い、劣化状況の把握を行うことが重要である。

このため、安定給水の確保の観点から設備の適正な機能維持を目的として、電気及び機械設備の点検整備基準を定め、これに基づく維持管理を実施しており、点検記録、測定データ等を勘案し、劣化状況に応じた機器の補修、部品交換等を行うことで、経済的に機器の機能を継続して発揮させ、概ねの機器について、法定耐用年数を超える長期使用を図る。

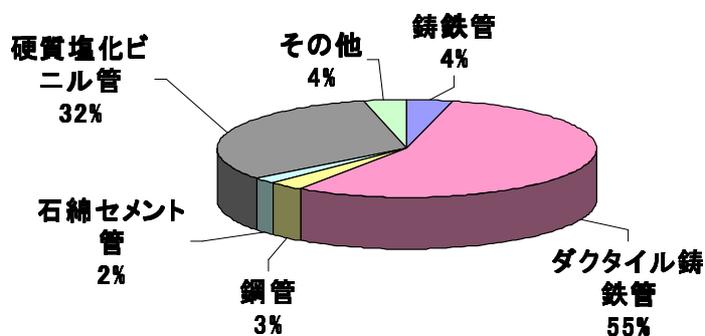


図 3.4: 全国上水道管種別管路延長 (平成 19 年度) [56]

3.3.3 管路

水道管路には、普通・高級鑄鉄管、ダクタイル鑄鉄管、鋼管など、種々の材質が用いられているが、水道施設耐震工法指針などでは、鑄鉄管は耐震性がないものと明示されており、耐震化に当たっては、経年更新がすなわち管路の耐震化と直結するため、水道システム上の重要性から優先順位を図る。

3.4 水道施設の診断・評価

アセットマネジメントでは、事業目標を踏まえ現状分析、すなわち、資産の劣化状況から余寿命を推定するが、その手法の具体的事例については、コンクリート構造物については第 4 章で、管路については第 5 章でそれぞれ扱う。本章では、劣化予測の手法ではなく、水道施設の劣化特性について述べることにする。

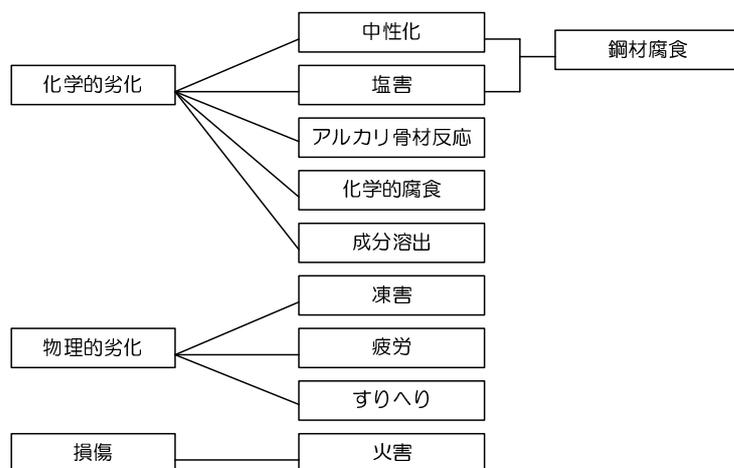


図 3.5: コンクリート構造物の劣化の分類

3.4.1 構造物

まず、上水道に関する施設の内、浄水処理を担う浄水施設と配水施設における配水池に多く使用されているコンクリート構造物の劣化分析について述べる。

コンクリート構造物の変状を大別すると、初期欠陥、経年劣化、構造的変状に分類できる。コンクリート構造物の変状について、それぞれの変状の概要と発生原因と発生しやすい場所などを、表 3.1 に示す。

コンクリート構造物の劣化は、図 3.5 に示すように、化学的劣化と物理的劣化の 2 つに大別することができる。

化学的劣化とは、物質そのものが変化する形態の劣化であり、化学的劣化の結果、物理的にも劣化することが多い。性能低下の原因となるのは、劣化要因の強さと作業時間の影響である。

一方、物理的劣化とは、物質の状態が変化する形態の劣化。性能低下の原因となるのは、劣化要因の強さと繰り返し回数の影響である。

また、鉄筋コンクリート構造物の劣化を、コンクリートの劣化と鉄筋の劣化に分けた場合、図 3.6 のように劣化現象を分類することができる。

コンクリート構造物における劣化とその原因、メカニズム、劣化を促進する条件等をまとめる。

表 3.1: コンクリート構造物の変状の種類と概要

変状の種類	概要	発生要因と発生しやすい箇所	
初期欠陥	ジャンカ	打設されたコンクリートの一部がセメントペースト、モルタルの廻りが悪く粗骨材が多く集まってできた空隙の多い構造物の不良部分。	埋め込み金物や配管など開口部の下部、開口の高い柱・壁脚部など
	コールドジョイント	コンクリートの打重ね時間の間隔が長くなり重ねて打ち込まれたコンクリートが一体化しない状態で、不連続な面が生じること。	まえに打ち込まれたコンクリートの効果程度が最大の発生要因。
	内部欠陥	コンクリート背面の空隙などコンクリート構造物の内部に生じたジャンカや空隙	コンクリート内部に生じるジャンカや空隙は施工不良に主な原因があり、鉄筋腐食や水密性への影響がある。
	砂すじ	せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート中の水分が分離して上に流れ出す場合に生じ、コンクリート表面に細骨材が縞状に露出したもの。	フリージングの多いコンクリートの浮き水を取り除かないで打ち足した場合や、角の締め固めた場合に発生する。
	表面気泡(あばた)	せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート打込み時に巻き込んだ空気あるいはエントラップドエアがなくならずに残って露出し、硬化したもの。	主に傾斜面を有する場合に発生しやすい。
経年劣化	ひび割れ・浮き・剥離	ひび割れの発生原因は、コンクリートの材料、配(調)合、施工、使用・環境、構造、外力又はその組汗など様々である。コンクリートは本質的にぜい性材料であり、鉄筋コンクリート構造物のひび割れは宿命的なもので、現在の技術では完全に防止することはできない。	
	錆汁	コンクリート表面の美観上の問題を生じさせるが、鉄筋の腐食により発生している場合が多く、注意しなければならない変状。鉄筋の発錆には、コンクリートの中酸化野猿分の浸透、ひび割れの有無、水分の供給などさまざまな要因が関連している。	
	エフロレッセンス	白華現象とも称され、コンクリートの表面の析出物や析出することを示す。エフロレッセンスそのものが構造物の信頼性を損なうことは少ないが、エフロレッセンスの発声は水の異動と関連が深いため、初期欠陥やひび割れについて、検討する必要がある。	
	汚れ(変色)	コンクリートの汚れは、表面の荒れ具合に関わるもの、表面の付着物によるもの、コンクリートそのものの変色によるものがある。汚れは、美観上の問題を生じるが、汚れの原因によっては強度特性などその他コンクリートの性能が影響を受けている場合もある。	
	すりへり	コンクリートのすりへりは、車両走行による舗装路面のすりへり、床面のすりへり、水路など砂礫やキャビテーションによるすりへりなどがある。	
構造的変状	たわみ	道路橋や鉄道橋といった橋梁では過大な載荷重や地盤の変状、構造物の劣化によってたわみが発生する。	
	変形	変形は、コンクリート構造物に何らかな外力が作用して変形する場合と、コンクリートの性質による変形する場合がある。	
	振動	既往の振動に関する研究では、打設中、養生中の振動による影響はほとんど無いものとするものが多い。振動が健全なコンクリート構造物に影響を与えないにしても、ひび割れや耐久性低下が生じている場合は、車両や人が載荷されることで振動が生じ、疲労劣化を助長する可能性もある。	

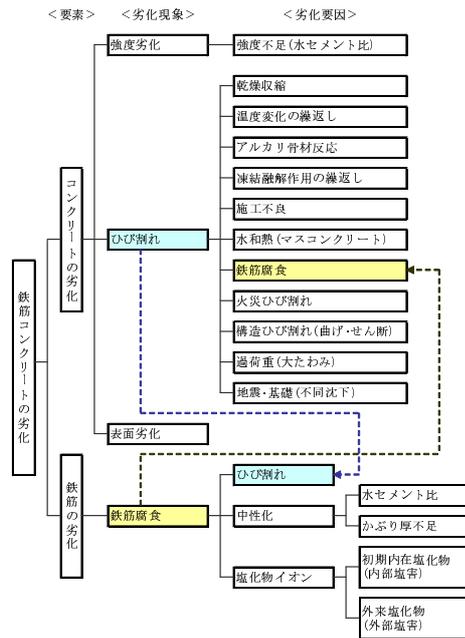


図 3.6: 鉄筋コンクリートの劣化現象の分類

1) 中性化

健全なコンクリートは、pH13～14 程度のアルカリ性物質であるが、大気中の二酸化炭素等の影響を受けると徐々にアルカリ性を失っていく。この現象を中性化といい、中性化したコンクリートは内部の鋼材を腐食から保護する能力を失い、中性化は鉄筋腐食の原因となる（図 3.7）。

中性化の主な劣化要因は二酸化炭素と水である。コンクリートは表面で二酸化炭素等と接触するため、表面から内部に向かって中性化していく。「コンクリート標準示方書（維持管理編）」によれば、この現象は炭酸化反応により引き起こされるものであるから炭酸化と称すべきとも考えられるが、主として問題となるのは炭酸化の結果としての pH の低下による鋼材を保護する性能の低下である。一般的に、中性化は二酸化炭素によるものに限定し、他の酸性物質による中性化は「化学的侵食」として取扱われる。

中性化では、内部の鉄筋が腐食して、かぶりコンクリートにひび割れが発生するまでは肉眼的な変状は認められないが、ひび割れ発生以降はさび汁が発生し、はく落などが生じる。中性化のさび汁は、塩害の場合ほど顕著ではないといわれている。中性化したコンクリートはアルカリ性が失われ、pH が低下し、鉄筋が腐食し、中性化の進行とそれに伴う鉄筋腐食により、コンクリー

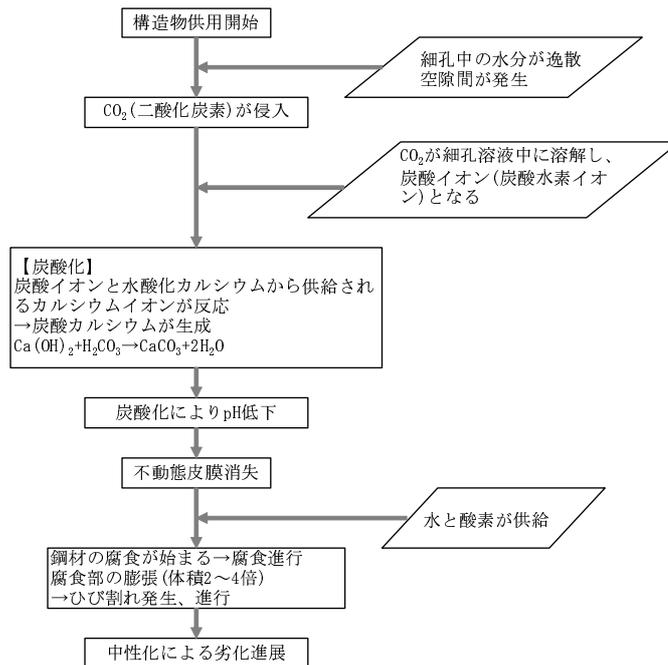


図 3.7: 中性化（鋼材の腐食，膨張）による劣化メカニズム

トの強度は低下する。

中性化の考慮すべき環境条件として、温度、湿度、降雨頻度、日射、交通量（排気ガス）などがある。また、コンクリート表面のひび割れ状況、コンクリートの含水比、鋼材の位置（かぶり厚さ）、鋼材の腐食状況など、コンクリートの状態の影響も大きい。中性化の進行速度は、コンクリート中における二酸化炭素の移動速度と空隙中の水分のpH保持能力によって決まる。液相における二酸化炭素の移動速度は、気相に比べてきわめて小さいため、空隙が水分で満たされている状態では中性化の進行は事実上無視できる。このため、浄水施設で常時接水している箇所は中性化が進行しにくい、逆に乾燥しすぎた場合には、炭酸化反応は起こらない。

2) 塩害

健全なコンクリート中の鋼材は、不動態被膜に保護されており腐食しないが、コンクリート中に一定量以上の塩分（塩化物イオン、及び、化合物を構成している塩素）が存在すると、鋼材は腐食に対して活性となる。塩化物イオンの作用を受けて鋼材が腐食する劣化形態を塩害という。

塩害の劣化要因は塩化物イオンと水である。劣化の主成分が外部環境から供給される塩分である外的塩害と、劣化の主成分が材料（内部）から供給される塩分である内的塩害がある。

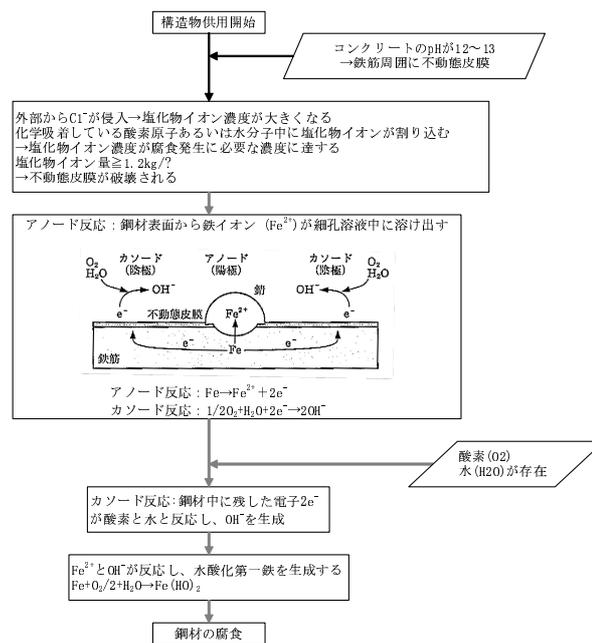


図 3.8: 鋼材の腐食メカニズム

3) 鋼材腐食

pHの低下あるいは塩化物イオンの作用によって、鋼材が腐食する形態の劣化である(図3.8)。健全化コンクリートはpH13~14程度の高いアルカリ性を保持しており、このようなコンクリート中の鋼材は、不動態被膜に保護されており腐食しない。不動態被膜が破壊されていること、鋼材深さ付近まで中性化が進んでいることなどにより、鋼材腐食が発生する。これにより、腐食ひび割れ、さび汁の発生、はく離、はく落などの肉眼的変状が発生する。

中性化が促進される環境であるほど腐食しやすい。ジャンカ・豆板や打継不良などの初期欠陥部ならびにひび割れがあると、その部位において局所的に急速に中性化が進行することがある。ひび割れが存在すると、中性化が鉄筋に到達した後は、鉄筋海界面を沿って中性化が進行し、酸素、水分の侵入も相まって、鉄筋腐食は加速度的に進む(図3.9)。

4) アルカリ骨材反応

コンクリート中の反応性骨材に含まれているある種のシリカ鉱物は、細孔溶液中のアルカリと反応してアルカリシリカゲルを生成する。このゲルは水を吸収して膨張することによって、コン

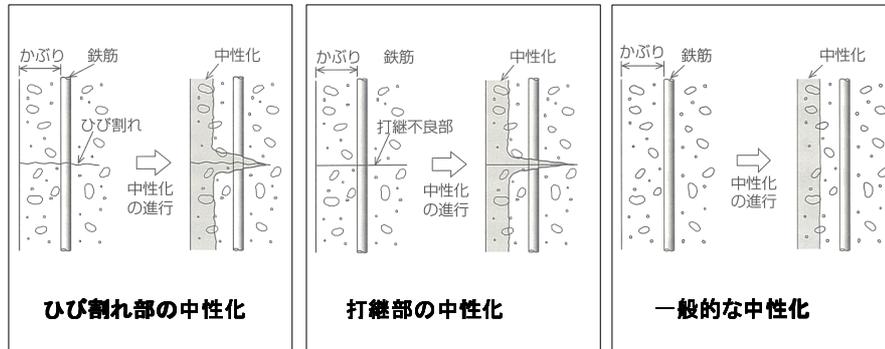


図 3.9: 中性化と鉄筋腐食の状況

クリートに異常な膨張を生じさせる．このような劣化形態をアルカリ骨材反応という．アルカリ骨材反応の劣化要因は，反応性骨材と水酸化アルカリおよび水である．この劣化は，化学反応過程と膨張過程の2つの過程で進行する．

これにより，膨張ひび割れが発生する．ポップアウトが発生することがある．構造物表面に，白色のアルカリシリカゲルが滲出することがある．シリカとアルカリの反応が進むと，局地的にpHが低下し，強度および弾性係数が低下する．鉄筋量が少ない部材では，鉄筋が破断する場合もある．

5) 化学的腐食

コンクリートは酸や硫酸塩などの化学物質の影響を受けて浸食される．このような各種化学物質の作用による劣化を総称して化学的腐食という．コンクリートを浸食する物質として，硫酸塩，酸（塩酸，硝酸，硫酸など），腐食性ガス（硫化水素），脂肪酸を含む動植物油，強アルカリなどがある．

化学的腐食の劣化要因は，酸や硫酸塩などの浸食物質である．コンクリート表面で浸食物質と接触するため，表面から内部に向かって浸食される．

6) 成分溶出

常時水と接触するコンクリート構造物（浄水施設や地下構造物）は、徐々に成分を失って変質していく。このような劣化形態を成分溶出という。成分溶出の劣化要因は水である。コンクリート構造物は表面で水と接触するため、表面から内部に向かって変質していく。この現象は非常に緩やかに進行するため、数百年から数千年レベルで超長期的な耐久性が要求される構造物以外は問題とならないことが普通である。

構造物の劣化分析

こうしたことから、アセットマネジメント導入に際しては、まず、その劣化傾向の分析が必要となる。浄水施設のコンクリート構造物において発生の可能性のある上述した6つの劣化の中で、1) 中性化による3) 鋼材腐食は、既存の調査データを見ても、浄水施設コンクリートの一部において劣化が発生していることが確認されている。この中で、浄水施設のコンクリート構造物において注目すべき劣化の代表的なものは、1) 中性化による3) 鋼材腐食である。また、4) アルカリ骨材反応、5) 化学的腐食、6) 成分溶出などの劣化についても将来発生する可能性があり、経過観察が必要と考えられる。

特に鉄筋コンクリートの共用段階で発生する変状としては、ひび割れがほとんどの劣化現象と関連している。コンクリートのひび割れ進行が、空気や酸などの鉄筋要因の内部に運ぶリスクを高める一方で、鉄筋腐食は鉄筋を膨張させて、そのことがコンクリートのひび割れを促進する要因となる。このようなひび割れ進行と鉄筋腐食進行による劣化のスパイラルが主な原因となり、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化をもたらすと考えられる（図3.10）。

北野ら [57] は、大阪市水道局におけるコンクリート構造物に関する、圧縮強度や、シュミットハンマー強度、中性化深さ、配筋腐食レベルなど、構造調査で実施する各種調査項目をもとに、強度関連の調査項目である圧縮強度やシュミットハンマー強度については、目立った経年変化は認められなかった一方で、中性化深さや配筋腐食レベルについては、調査結果が全体的に経年変化していることを確認している。また、鉄筋コンクリートの劣化に係る既往の知見や浄水施設コンクリート構造物に対する既存の構造物調査の分析結果より、浄水施設コンクリート構造物の劣化

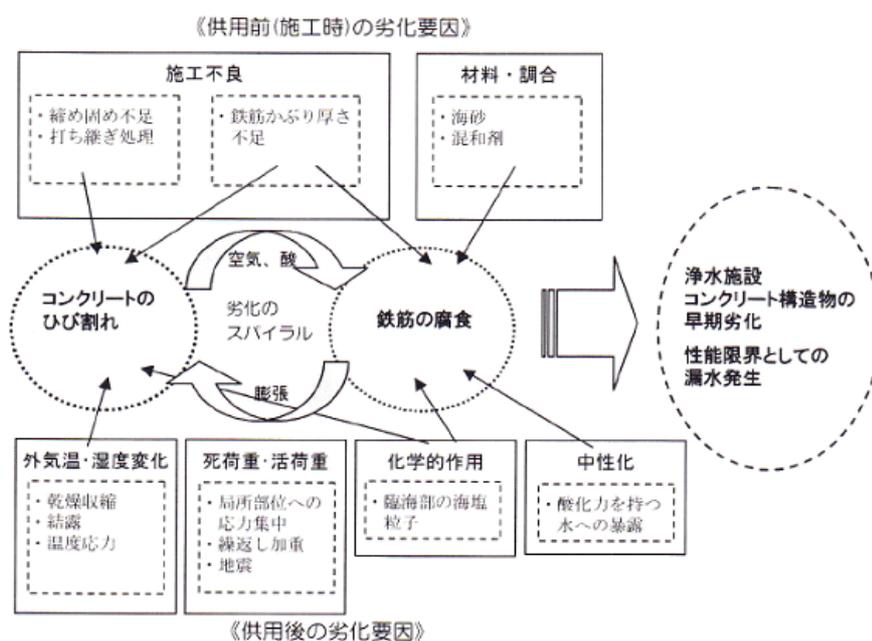


図 3.10: 鉄筋コンクリート構造物の劣化要因 (参考)「鉄筋コンクリート構造物の寿命予測」(柿崎正義,1991)をもとに加筆作成

状況の監視やその将来予測にあたっては、劣化スパイラルの要素である配筋腐食とかかわりの深い、中性化とひび割れの進行の程度を示す測定結果を劣化指標として着目することが有効であることを示している。

中性化深さとひび割れ深さ

水道施設のコンクリート構造物の耐用年数と寿命予測は、表 3.2 のとおりである。地方公営企業法におけるコンクリート構造物の法定耐用年数は 60 年である。一方、「コンクリート標準示方書(設計編)」の耐久性に関する照査において、中性化に対する鋼材腐食に対する照査、塩害に対する照査として、構造物の設耐用年数期間の上限を 100 年としている。上述の研究において、北野らは、大阪市水道における既存データを用いた劣化予測において、超音波による品質から見たコンクリートの寿命、ひび割れ深さから見たコンクリートの寿命、中性化から見たコンクリートの寿命の検討を行っている。これによれば、水道施設のコンクリート構造物の耐用年数は、実績、劣化予測など総合的に判断しても、概ね 100 年以上の耐用年数を持つものとして考えることができる。既存の調査データに基づく劣化予測結果を見ると、ひび割れが平均被り厚に達するのに早期

表 3.2: 設備の更新基準（大阪市水道局の事例）

設備名称	法定耐用年数(年)	更新基準(年)
ポンプ設備（清水用）	15	50
ポンプ設備（清水用以外）	15	30
弁設備	17	30
薬品注入設備（ばんど，かせい，酸）	15	20
薬品注入設備（次亜塩）	10	10
水処理設備	17	25
排水処理設備	17	17
空気源設備	17	25
採水設備	15	30
受配電設備	20	28
自家発電設備	15	40
監視制御設備	10	13
電源設備	6	26
オゾン設備	17	25
計装設備	10	15
水質監視設備	10	15

劣化で 41.9 年としており，他の要因よりも劣化の進行が早い．ひび割れ損傷の中で，水道施設のコンクリート構造物の余寿命に大きく左右するのは，ひび割れ深さである．ひび割れが貫通し局部的な漏水が発生した場合，構造物としての物理的寿命にはならないものの，水道施設として求められる水密性，止水性が確保されない．このため，経過年数 40 年程度を目安として，ひび割れ補修を行うなど計画的補修の実施により，中性化深さから予測される実質的な耐用年数を共用の目標に設定できるものとしている．

3.4.2 設備（更新基準の設定）

長期の設備更新計画の想定にあたっては，これまで機器の劣化状況や更新実績を参考に，法定耐用年数よりも長い各設備の更新基準を設定する．但し，機器の劣化状況は，使用状況や維持管理状況等により，大きく異なり，適正な更新時期は，設備毎に存在することを勘案し，実際の設備の更新時期については，他の施設整備計画との整合を図りながら，精査し決定する．

設備については，構造物や管路と比べる点検可能な施設が多く，また，既に法令に基づく巡視点検が実施されており，現状の把握には比較的優位であるが，更新計画等の際にこれらのデータが十分に活かされていない事例も多いことから，アセットマネジメントシステム構築に合わせて，これら点検データのデータベース化が望まれる．

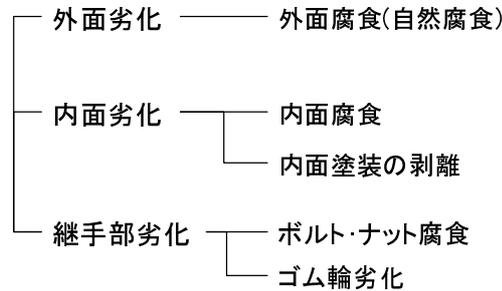


図 3.11: 鑄鉄管の劣化要因

3.4.3 管路

一般に鑄鉄管が劣化する要因は、図 3.11 に示すとおりであり、管路施設全体において経年的変化し劣化進行の目安となる劣化指標としては、外面腐食、内面腐食、ボルトナット腐食等が考えられる。

外面腐食(自然腐食)

埋設管の外面腐食の進行は、管体周辺の環境条件に大きく左右されるが、主としてポリエチレンスリーブによる防食法の実施の有無と管路周辺の土壌条件に左右されるものと考えられる。

ポリエチレンスリーブによる防食性能の経年変化については、これまで継続的に実管路での調査を行い、埋設から 30 年を経過した時点においても、ポリエチレンスリーブの物性面での性能低下や外面腐食が生じていないことが確認されている [58]。加えて、ポリエチレンスリーブが被覆された管路においては、これまで外面腐食が原因となる漏水が発生していないことを踏まえると、今後さらなる経過観察は必要なものの、他の要因と比較して外面腐食の進行が耐用年数を決定付ける要素とはならないと考えられる。

ポリエチレンスリーブによる防食がされておらず土壌条件が悪い区間については、外面腐食の進行により約 40 年で耐用年数を迎える可能性があるものの、土壌条件が良好な区間に関しては、

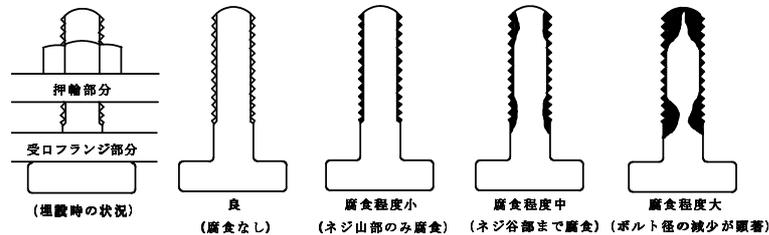


図 3.12: ボルト腐食の進行イメージ

外面腐食の進行は遅く、100年を超えても所要の管厚を維持することが予測されている [53]。

内面腐食

既往の経年化したダクタイル鋳鉄管に係る劣化状況調査において、直管内面でのモルタルライニングの中性化の進行や無ライニングの異形管での錆こぶの発生による有効断面の閉塞などが報告 [59] されているとともに、異形管内面管内水質の保持の観点からも管体内面の状況把握は重要性が高い。

継手部劣化

ダクタイル鋳鉄管の継手部は、ボルトナット、ゴム輪などの部材から構成される。ボルトの腐食については、一般に 図 3.12 のように進行するとされており、ネジ谷部以上まで進行した場合、所要の機能を発揮しないことが懸念される。東京都では、防食性能が低いボルトが使用された区間がダクタイル管路の 1/3 程度の延長で残存しており、既往の経年化したダクタイル鋳鉄管に係る劣化状況調査において、ボルトの欠損や痩せ細った状態のものが約 7 割に達する報告もなされている [60]。

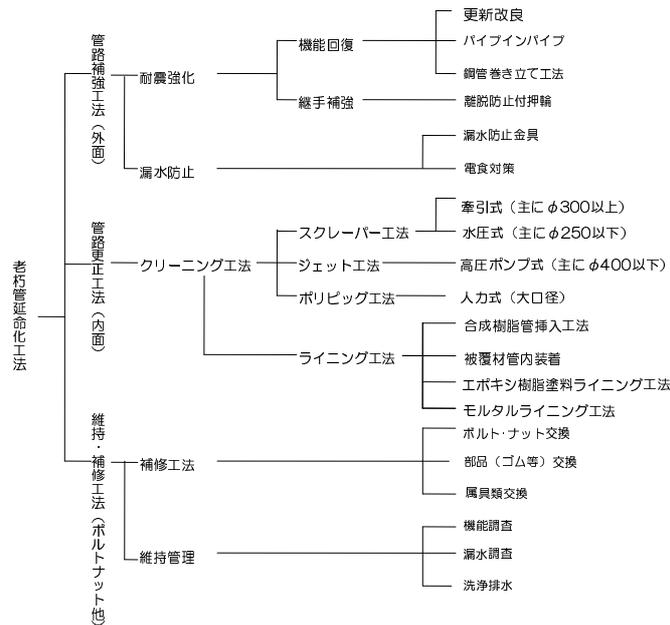


図 3.13: 管路の維持保全方法の体系

ゴム輪の劣化

鋳鉄管のゴム輪は、SBR（スチレンブタジエンゴム）、EPDM（エチレンプロピレンゴム）、NBR（ニトリルゴム）、CR（クロロプレンゴム）の材質のものが使用されており、使用時には数 10 % 圧縮させ、復元する圧力により水密性を保持している。長期間の使用により一部永久変形を起こすことになるが、本市におけるこれまでの調査において 20 年使用後にも新品時の規格値 (JIS K 6353) を満足するなど、顕著な劣化進行は確認されていない [58]。

延命（長寿命）化工法

管路の維持保全方法をまとめると、図 3.13 のとおりである。現在、本市では、計画的なものとして耐震化の観点からの経年管の更新改良や管路内水質の保持の観点からの洗浄排水に取り組んでいるが、更新事業費の平準化低減化の観点から、必要に応じて延命（長寿命）化工法の導入を検討していくことも求められる。

3.4.4 ライフサイクルコスト分析

水道事業は、公共性の観点から施設耐震化をはじめとする安定給水の持続性を達成していく必要がある一方で、水道を取り巻く経営環境は年々厳しさを増しており、企業性の観点から経営効率化を進めていく必要がある。こうした背景を踏まえ、施設の信頼性を維持しながら取浄配水施設の投資削減を図るため、アセットマネジメントに基づく効果的な施設保全手法が求められている。

水道事業では、リスク管理に基づく施設整備の観点と、経営面からの事業費の低減化の観点を計画的に整合させながら、現有施設の能力を最大限に活用した最適な施設整備を推進していくことが重要である。そこで、ライフサイクルコスト分析を行うことにより、妥当投資水準の推定を行う。これについては、第5章で管路を対象として実証分析を行っている。ライフサイクルコスト分析に当たっては、劣化リスク損失費用の算出が必要となる。管路の劣化により生じる各種リスク損失としては、配水管、給水管の物理的な被害はもとより、断水などの機能的被害や社会経済活動への影響なども想定される。そこで、平常時における漏水事故の発生による損失(漏水リスク損失額)、地震時における管路被害による損失(地震リスク損失額)、管路内水質の劣化に起因した損失(水質劣化リスク損失額)、などの観点における劣化リスク損失が考えられる。第5章では、このうち、漏水リスク損失額を用いたライフサイクルコスト分析を行う。

3.5 事業計画

3.5.1 構造物

更新サイクルの長い土木構造物については、個々の施設の機能診断や耐震診断を行った上で、補修、改良、更新といった維持管理手法の中から費用対効果に優れた最適な手法を選択し、更新コストの低減化や平準化を図ることによって、信頼性の高い浄水システムの構築を図る。早期耐震化を目指し重点的に投資するものと位置づけた系統については、法定耐用年数程度で耐震補強等の大規模投資を行う一方で、その他の系統については、実質的な耐用年数まで各施設を供用することとする。浄水施設コンクリート構造物の実質的な耐用年数については、浄水施設の使用実績や既往調査データに基づく劣化予測などを総合的に勘案すると適切な補修、補強を行うことで施設の長寿命化や延命化を図ることが可能であると考えられるため、計画的補修の実施状況等を勘案

し中性化による使用限界を実質的な耐用年数とする。実際には、各施設に求める浄水処理施設としての能力や耐震性能との乖離の解消を目指す。が、財政状況を勘案して、更新、耐震補強、補修を使い分けながら、コストの平準化、低減化に努め整備を行うものとする。このため、アセットマネジメントの適用における浄水施設コンクリート構造物へのライフサイクルシナリオとしては、以下のようなシナリオの使い分けを行い、投資の選択と集中を図る。

- 早期更新を行う（シナリオ1）

重点投資を行う系統の施設において、すでに法定耐用年数を経過しているものについては、実質的な耐用年数を迎える前に、耐震化を目的として全面更新を行う。

- 耐震補強と補修を組み合わせる（シナリオ2）

重点投資を行う系統の施設において、法定耐用年数を経過前に耐震補強すべき施設については、まずこれを実施し、その後、計画的な補修を加えながら実質的な耐用年数まで使用する。

- 計画的補修を行う（シナリオ3）

重点投資を行わない系統の施設において、計画的な補修を加えながら実質的な耐用年数まで使用する。

3.5.2 設備

更新対象設備

電気及び機械設備、計装設備の更新は、次の事項に該当するもので、イニシャルコスト及びランニングコストの削減が有効に図ることができるものについて、計画的に設備更新を実施する。

- 耐用性

- － 維持管理又は調整を頻繁に行う必要が生じ、故障期に達したと考えられるもの
- － 維持管理及び調整を行っても、所定の性能が得られなくなったもの
- － 特性のずれが大きく、性能を維持するのが困難と考えられるもの

- 実際の使用範囲と機器の運転範囲が異なり、近い将来に不具合の発生が懸念されるもの
- 補修性
 - 機器又は構成部品の製造中止等により、補修用部品の調達が困難になったもの
 - 機器又は構成部品の製造中止、技術者の不足等により、補修に必要な費用と時間が過大になるもの
 - 部品交換を行っても、主要部品の残存寿命が短いと考えられるもの
- 経済性
 - 技術の進歩発展により、新方式、新技術の採用に更新を行ったほうが、経済的に有利であると判断されるもの
 - 製品の形式が古くなり、新製品に対して相対的に旧式化、陳腐化してきたもの

今日的視点に立った整備

これまで実施してきた設備更新又は新設事業についても、常にコスト縮減を意識し、実施してきたが、現在の社会情勢を再度認識したうえで、より一層のコスト縮減を推進するとともに、省エネルギー対策に十分配慮した環境負荷の少ない環境共生型・循環型の水道施設の構築を目指す。以下に具体的な施策について示す。

- 大規模工事との整合

耐震化工事又は管理設備改良等の大規模工事における施工箇所及び現場工事時期と整合を取り、仮設物の併用等、施工内容を合理化することにより事業費の縮減を図る。

- 優先順位設定による改良範囲の縮減

設備全体を更新の対象とせず、構成する機器等について、個別に診断することで、必要な部分だけを改良し、安定給水の確保に最低限必要な事業費とする。

- 省エネルギー対策及び環境負荷低減対策

機器構成（仕様，設置台数，制御方法等）について，これまでの実績にとらわれることなく，あらゆる面から検討し，自然エネルギーの有効活用及び高効率運転となるよう努める．また，設備の運転上やむを得なく発生するエネルギー損失で，回収できるエネルギーについては，できるだけ効率よく回収し，環境負荷の低減に配慮する．

3.5.3 管路

管路の実質的な耐用年数を踏まえ，保全更新戦略の基本方針を策定する．当面は耐震化，漏水・破裂事故の未然防止の観点から，管体強度で劣る普通鋳鉄管，高級鋳鉄管の早期解消に向けて，当該管路の更新を集中的に進める．次に，継手部に鉛が用いられ，そこからの漏水の可能性が高い初期ダクタイトイル管を重点管路から順に更新していく．阪神淡路大震災クラスの地震にも耐えうる離脱防止継手のダクタイトイル管については，基本的には80年以上の使用を想定し，更新時期を法定耐用年よりも遥かに長いものとして使用する．

保全更新戦略の基本方針

劣化分析とこれを基にしたライフサイクルコスト分析により，管路はどのように劣化し，どの程度まで供用可能なのかという点（物理的耐用年数）やリスク管理の観点から管路更新事業費をどの程度に設定することが合理的かという点（妥当投資額）が明らかとなり，これをもとに保全更新戦略の基本方針を策定する．

また，管路網は，その機能から見て，浄・配水場と直接リンクしつつ給水区域全体を対象にした広域的かつ一元的な配水運用を担う「幹線ネットワーク」，給水区域分割した「1次配水ブロック」，1次配水ブロックをさらに分割した「2次配水ブロック」といったように，それぞれの階層における管路網は，上層から順に，送水管及び配水幹線，配水準幹線，配水小管で構成する．ライフラインとしての管路網の信頼性を効率的かつ効果的に高めていくためには，こうした階層ごとの管路の役割を明確にしながらこれを行うことが重要であり，管路の保全更新に当たっては，導水管を含め，送水管，配水幹線・準幹線及び2次配水ブロックの骨格を形成する配水小管を「基幹管路」と定め，「その他の管路」と区分する形で保全更新戦略を立案する．

- 配水幹線

中大口径管路からなる配水幹線は、浄・配水場を水源とした基幹管路網「送配水幹線ネットワーク（送水管，配水幹線）」と、1次配水ブロックの骨格を形成する「配水準幹線」の役割を担っており、経年管（普通・高級鋳鉄管）の早期解消に努め基幹施設（浄水施設）と一体となった「耐震スケルトン（骨格）」の形成に努める。特に、浄水場から給・配水拠点である配水場に至るルート上の「送配水幹線ネットワーク（送水管，配水幹線）」は、ひとたび漏水破裂事故が発生すると、給・配水拠点である配水場に至るルートの安定性が低下し、その影響が広範囲に及び市民生活や都市活動に甚大な影響を与えることが懸念されるため、当該管路は特に優先的に高規格耐震管へと更新を進める必要がある。

- 小口径管

小口径管路については、2次配水ブロックを進めることを前提として、管路の役割を明確にし、フレーム管のループ化と配水準幹線からの水源の複数確保など、2次配水ブロック内での配水水圧の均一化に重点をおいた整備を進める。一方で、水需要動向を見ながら、必要に応じて管口径（管容量）のダウンサイジングを行う。水質管理面では、管容量の減少による管路内滞留時間の抑制を図る。

新設費用を含めた整備事業費の算定

これまでは、既存浄水施設及び管路についての更新需要を算定したが、事業計画策定上は新規施設整備費用についても合わせて検討すべきである。全国的に見て水需要動向が減少傾向にあるが、耐震化向上方策や省エネルギー対策、共同溝事業への参画、管理システムの高度化など今後も新設設備の整備も考慮される必要がある。

3.6 財政収支見通し（更新財源確保）の検討

アセットマネジメントを考える上で、中長期的な観点から将来に亘っての財政収支見直しを行い、損益勘定留保資金等（内部留保資金）の推移（資金繰り）や料金水準や起債水準の妥当性を

評価し、施設整備（新設，更新，補修）計画に必要な財政確保方策を検討する。財政収支見通しの検討においては、第2章で挙げた「適切なサービスを持続的に維持するための予算を自立的に調達するための会計システムの構築が望まれる」ところであるが、現時点では、厚生労働省策定の「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」[6]の扱う範囲を目安とする。検討期間としては、水道施設は、共用年数が長いため、財政収支見通しの検討期間もおのずと長くなり、手引きでは、2050年（平成62年）までを検討期間としている。

3.6.1 財政収支算定の条件設定

資金収支・資金残高

- 下記の算式により、資金収支・資金残高を算定する。
 - － 当年度末資金残高 = 前年度末資金残高 + 当年度損益勘定留保資金 - 当年度資本的収支不足額
 - － 当年度損益勘定留保資金 = 減価償却費 + 資産減耗費（現金支出なし） + 損益
- 算定の結果、資金がショートする場合、施設整備計画の修正ないし、料金改定の実施が必要となる。
- この算定に当たって、各年度の収益的収支並びに資本的収支の推計を行う。

年間有収水量

収益的収支の算定に当たって、まず、将来の給水収益に大きな影響を及ぼす年間有収水量の推計を行う必要があるが、基本的には現時点で厚生労働省に提出している認可申請や厚生労働省に提出している水利権申請の際の予測値を基に、将来予測値を付加させる。また、将来予測に当たっては、各事業体のマスタープランにおける人口推計値との整合を果たす必要がある。以上を、踏まえても2050年（平成62年）といった長期の予測は一般的には実施されていないため、独自に推計を行う必要がある。前述の厚生労働省の手引きでは、2030年（平成42年）までは、国立社会保障人口問題研究所による「日本の市区町村別人口推計（2003）」を、2030年（平成42年）以降

表 3.3: 収益的収支・収入

項目	算出方法
給水収益	年間有収水量に供給単価を乗じて算定
その他営業収益等	これまでの実績を平均値化して使用
特別利益	土地売却費用などだが、将来の検討には計上しない

表 3.4: 収益的収支・支出

項目	算出方法
人件費	人員削減計画があれば用いるが、なければ、一定とする
維持管理費	過去の実績から、有収水量あたりの単価を設定し、有収水量に乗じる
支払利息	繰り上げ償還は予定がなければ計上せず、旧起債分と新起債分を分けて算出。償還計画は、政府債、機構債、公募債それぞれの借入れ条件にて算出。
減価償却費	既設分に、新規投資に係る減価償却分を加算。新規投資分の減価償却は、年度別稼働予定額から耐用年数を設定して算出。
その他費	資産減耗費、特別損失等。試算減耗費、特別損失ともに、将来計画があれば、これを計上。それ以外は、これまでの実績額を一定値として計上。

表 3.5: 資本的収支・収入

項目	算出方法
企業債	投資額と財政収支を見ながら、自己財源（損益勘定留保資金等の内部留保金）を活用し、できるだけ起債残高が増加しないように設定
他会計補助金	長期的見通しの上では不確実性があり、独立採算を原則として計上しない
工事負担金	過去の実績の平均値を使用
その他	基金からの繰入等

は、推計結果を延長し、2025年（平成37年）から2030年（平成42年）までの減少比率を基に、対前年度比0.8%の減少としている。

収益的収支・資本的収支

堀ら[50]は、下水道において下水処理施設のアセットマネジメントに資する管理会計システムを提案しているが、現時点においては、各事業者における経理上の取り扱いに準じることとなる。

表3.3から表3.6に厚生労働省策定の「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」で示されている算出方法を記述しておく。

表 3.6: 資本的収支・支出

項目	算出方法
事業費	構造物，設備，管路の更新需要
企業債償還金	繰り上げ償還は予定がなければ計上せず，旧起債分と新起債分を分けて算出．償還計画は，政府債，機構債，公募債それぞれの借り入れ条件にて算出．
その他	基金への繰入等

3.6.2 財政収支の算定，財源確保方策の検討

条件設定にしたがって，収益的収支，資本的収支，資金残高等を算定し，財政収支の算定に当たっては，現行の料金を将来的に据え置き，以下の観点を踏まえつつ，収支への影響・料金収入と資本費の割合・企業債残高等を把握する．

- 一定の必要資金残を確保しながら，更新財源の内訳として自己資金，企業債を設定する．
- 上記の設定から，資金残高を把握し，中長期的な観点から更新需要に対する財源手当てが可能であるかを考察する．

資本的収支・資金残高については，収益的収支の結果及び事業費の推移を見ながら，必要資金残高を維持しつつ，起債を設定する必要がある．

3.7 結語

独立採算経営のもと，水道事業を持続的に発展させて行くためには，アセットマネジメントシステムを用いた資産管理が必要不可欠になる．高度経済成長期に急激に建設された水道施設が経年化し，その更新時期が集中かつ目前に迫りつつある状況にあって，一方で，ユーザーへの説明責任を果たしながら，これを遂行するためには，まず，資産の現状を明確に把握することから始めるべきである．

この資産状況の見える化を踏まえて，様々な投資の削減方策や投資額の平準化に努め，財源に関する検討を行う必要がある．

その上で，安易な料金値上げは当然ながら認められるものではないが，更新需要が経営状況と資産状況に対し，トレードオフの関係にある点をユーザーと共有しながら，水道事業の持続性を担保するべきであり，そのためにも，アセットマネジメントの導入は避けられない．

続く第4章では、資産状況の把握の内、構造物に焦点を当てて詳述する。特に、上水道施設の内、浄水処理を担う浄水施設と貯水機能を担う配水池に多く使用されているコンクリート構造物の寿命に関与する中性化を取り上げる。一方で、こうした施設は、点検のためには、機能を一時停止する必要があり、多くの費用と労力を要求するものである。このため、実際には、より限られたデータによってその状況を把握する必要がある。こうした背景を踏まえ、目視点検結果を基に構造物の劣化過程を予測するもので、多くの研究が蓄積している統計的劣化モデルの要素と、劣化過程を直接モデル化することで、より少ないデータで劣化状況をとらえる力学的劣化モデルの要素を兼ね備えた、ハイブリッド型劣化予測モデルの提案を行う。

第4章 加速劣化ハザードモデルのコンクリート中性化予測への適用

4.1 本章の目的

近年、浄・配水場施設の老朽化が進み、補修時期や更新時期の精査が大きな問題となっている[61]。浄水場施設の劣化・損傷のモニタリングは、多大な費用と時間を要することから、構造物の劣化予測に必要となる点検結果が十分に蓄積されていないのが実情である。しかし、近年のアセットマネジメントの重要性に対する認識の結果、限られた情報ではあるが、浄・配水場施設の劣化過程に関する点検データもいくつか利用可能になってきている。このような現実のデータを用いて、これまで実務において用いられてきた劣化予測式の現象再現性について実証的な検証を試みる事が可能となった。

本章では、浄・配水場施設におけるコンクリート構造物の老朽化の主要な要因の1つである中性化過程 [6],[57],[61] に着目する。コンクリートの短・中期間を対象とした中性化予測では、中性化深さが経過時間の平方根に比例することが定説（以下、「ルート t 則」と略す）であり、ルート t 則に基づく中性化速度式 [62] を用いて構造物の設計が行われている。ルート t 則は、定常状態における炭酸イオンのコンクリート内拡散現象に基づいて導出された力学モデルであり、実験室内での自然暴露試験や促進試験、あるいは短・中期的な現場観測の結果により、その妥当性が確認されてきた [62]-[81]。しかし、アセットマネジメントの対象となる長期間を対象とした中性化過程に関しては十分な知見が蓄積されていないのが実情である。とりわけ、長期間を対象としたアセットマネジメントにおいて、ルート t 則による劣化予測結果に基づいたライフサイクル費用評価が経験的妥当性を有しているかどうかを検討することが必要である。

本章では、現実に観測された中性化深さの測定データに基づいて、コンクリート構造物の中性化

速度式を統計的に推計する方法を提案する。既往の中性化速度式 [62] は確定的モデルであり、現実のデータとの整合性に関して、統計的検証が不可能であるという問題がある。そこで、中性化速度式に対して、1) 加速度パラメータ値（ルート i 則の場合、0.5 となる）に関する制約を緩和する、2) 中性化過程に介在する個別的な環境要因を表現する確率誤差項を付加することにより、統計分析が可能な確率モデル（以下、加速劣化ハザードモデルと呼ぶ）として再定式化する。以上のように定式化した加速劣化ハザードモデルは、既往の中性化速度式を特殊ケースとして包含するような統計的劣化予測モデルであり、このモデルを推計することにより既往の中性化速度式の現象再現性に関して統計的解析を実施することが可能となる。

以上の問題意識の下、本章では、浄・配水場施設におけるコンクリート構造物の中性化判定結果に基づいて、加速劣化ハザードモデルを推計するとともに、ルート i 則による力学的劣化モデルの現象再現性について実証的に考察する。さらに、加速劣化ハザードモデルを用いて、浄・配水場施設のコンクリートに対するリスクマネジメント指標の設定および余寿命の評価に関する手法を提案する。以下、4.2 では、本研究の基本的な考え方を述べる。4.3 で加速劣化ハザードモデルと、それを用いた余寿命の推計方法について言及する。4.4 では適用事例について述べる。

4.2 本章の基本的考え方

4.2.1 既往研究の概要

中性化は、長年の供用に伴って、通常高いアルカリ性を示すコンクリート内に大気中の炭酸ガスが拡散し、水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムを生成することにより、コンクリートの pH を低下させる現象である [66]。中性化そのものにより、コンクリートの物理的、機能的劣化が発生するわけではない。しかし、中性化が鉄筋の位置まで進行すれば、鉄筋の腐食に対する保護性能を失って、鉄筋腐食の原因となる。また、発錆による鉄筋の体積膨張がコンクリートのひび割れやかぶりコンクリートのかい離を生じさせ、コンクリート構造物の耐久性を低下させる [82]。

コンクリート構造物の中性化過程に関しては、実験的および解析的手法により多くの研究が蓄積されている。実験的研究としては、自然暴露試験や促進試験等を通じて、中性化の進行速度に関

する研究が行われている。さらに、中性化深さと経過期間の関係を求めた中性化速度式 [62]-[73] が提案されている。中でも、岸谷は建築物の調査データに基づいて、中性化深さが経過時間の平方根に比例することを指摘し、コンクリート構造物の中性化速度式を提案している [62]。一方、解析的研究として、物理化学的あるいは熱力学的手法に基づいて、コンクリートの pH 変化等の予測を行った事例がある [74]-[81]。コンクリートは、当初は pH13 程度のアルカリ性を呈しているが、大気中に存在する炭酸ガス、水中に存在する炭酸イオン、その他の酸、塩などの作用により、セメント水和物のアルカリ性が中性化していく。大気中の炭酸ガスによるコンクリート表面からの中性化の進行を、定常状態における炭酸ガスのコンクリート中への拡散によって生じると仮定すれば、中性化深さが経過時間の平方根に比例するという理論式を導出することができる。すなわち、中性化深さ x は、経過時間 t の関数として

$$x = A \sqrt{t} \quad (4.1)$$

と表される。係数 A は、中性化速度係数とも呼ばれ、 A の値が大きいほど中性化速度が大きいことを表している。多くの外的・内的要因が中性化速度係数 A に影響を及ぼす。既存コンクリート構造物の調査、供試体の暴露試験や促進中性化試験等を通じて、係数 A に関して種々の提案 [62]-[73] がなされている。このように、中性化深さが経過時間の平方根に比例するという仮定は、定常状態における拡散現象に基づいて導出されたものであり、モデル化の前提となる諸条件が満足する範囲において、理論的な妥当性が保証される。したがって、実験的および解析的研究のいずれにおいても、中性化は一般的にルート t 則に従って進行すると考えられており、実務レベルの研究はルート t 則を基本式としながらも、中性化速度係数にどのような要因を考慮すべきかを検討することによって発展してきた経緯がある [67],[68]。実際に、ルート t 則を用いた中性化速度式は実用的であり、設計段階においてコンクリート構造物のかぶり厚等を決定する拠り所となっている。

その一方で、コンクリートは鋼材とは異なり、材料・施工の質を均一化することは難しい。また、コンクリート構造物の劣化過程は環境依存性が強いことも指摘されている [83],[84]。例えば土木学会コンクリート標準示方書 [85] では、「中性化の進行速度は、コンクリート中における二酸化炭素の移動速度と細孔溶液の pH 保持能力によって決まる。二酸化炭素の移動速度は、セメント

硬化体および骨材の空隙量と空隙構造に影響を受ける。このため、セメント・混和剤・骨材の種類、水セメント比（水結合材比）、結合材の水和度などが問題となる（中略）したがっていずれにしても、中性化速度はコンクリートの含水状態の影響を受けることになり、考慮すべき環境条件として、温度・湿度・降雨頻度・日射等があげられる。一方、細孔溶液のpH保持能力は、水酸化カルシウム量で決まる。このため、セメント・混和剤の種類、水セメント比、単位セメント量、結合材の水和度等の影響を受ける。以上のことから、これらの影響を適切に評価して、予測に取り込む必要がある。」との記述があり、中性化過程には多種多様な要因が介在していることが理解できる。しかし現実的には、実務レベルでこれらの要因を取捨選択することは困難であり、同標準においても、中性化深さの測定値を用いて中性化速度係数を逆算することで、その後の予測に反映させることを提案している [85]。ただし、そのような場合であっても中性化深さの測定結果は、同一構造物、部材においても空間的なばらつきが大きいことが指摘されている [86],[87]。したがって、確定的なモデルによって中性化過程を記述し、その結果をアセットマネジメントに反映させることには限界がある。不確実性を考慮したような確率モデルを用いて中性化過程を記述し、中性化過程に影響を及ぼす要因を統計的に検証することが重要である。ただし、測定データから中性化過程を記述するモデルを構築するには膨大なデータを必要とすることから、ルート t 則に基づく予測式を包括したようなベースラインを設定し、測定データにより統計的に推計することが効率的である。したがって、これ以降で述べるモデルと方法論は確率モデルを採用する等の拡張はあるものの、従来の予測式と方法論を踏襲し、その延長線上に位置していることを断っておく。

4.2.2 アセットマネジメントと劣化予測式

コンクリート構造物の維持補修計画を検討する場合、長期にわたる計画期間を対象として、ライフサイクル費用の最小化に資するような最適補修計画を立案することが主たる目的となる [82]。アセットマネジメントにおいて、ルート t 則に基づいた中性化速度式を用いた場合、ライフサイクル費用評価においていくつかの現実的な問題が発生する。ルート t 則に基づいた中性化速度式は、ライフサイクルの後半において劣化速度が非常に緩慢になることを意味する。その結果、最適な更新間隔を算定しても、非現実的な結果が得られる場合も少なくない。ライフサイクル後半期に

において、定常状態における炭酸イオンの拡散現象以外の原因により、中性化が進展している場合には、ルート t 則に基づいた中性化予測を用いることにより対策時期の判断に重大な遅延をもたらす可能性がある。さらに、のちに図4.1に示すように、中性化速度式のわずかな推計誤差が補修タイミングの決定に多大な誤差をもたらすことになる。

しかしながら、これは既往研究が中性化機構の解明や中性化の誘因・促進要因を特定化することを主たる目的としているのに対して、アセットマネジメントが補修や更新時期の決定を主たる目的としていることが原因である。4.2.1で述べたように中性化過程に影響を及ぼす要因は多種多様であり、機構解明のために記述されたモデルで長期間の劣化予測を行うことや、包括した予測式を定式化することはそもそも現実的ではない。目的（本研究では長期間の中性化予測を行う）に応じた方法論の開発が不可欠である。

既往研究では、数ヶ月から15年程度の短・中期間を対象とした室内実験や現況調査により中性化速度式を検証しており、アセットマネジメントが対象とするような長期間を対象として中性化速度を検討した事例は、筆者らの知る限り存在しない。実際の使用環境で、長期間にわたり供用しているコンクリート構造物の中性化過程に関しては、ほとんど情報が蓄積されていないのが実情である。対策時期に関する判断遅延リスクを避けるためには、現実のコンクリートの中性化過程に関する実データに基づいて、中性化速度式を統計的に推計することが必要となる。本章では、4.1で言及したように、既往研究における中性化速度式に対して、1) 中性化方程式における加速度パラメータ値の制約を緩和する、2) 中性化過程に介在する個別的な環境要因を表現する確率誤差項を付加したような加速劣化ハザードモデルを提案する。加速劣化ハザードモデルの加速度パラメータを0.5に拘束したモデルは、ルート t 則に基づく中性化速度式に確率誤差項を付加した力学モデルに相当する。したがって、加速劣化ハザードモデルを用いて、中性化速度式におけるルート t 則に関する統計的検定を行うことが可能となる。

当然のことながら、本研究で提案する加速劣化ハザードモデルは、確率誤差項の確率分布として、パラメトリックな確率分布関数を想定しており、仮説検定の結果が確率誤差項分布に関する特定化誤差の影響を受けている可能性がある。このため、加速劣化ハザードモデルを用いた仮説検定によりルート t 則に関する仮説が棄却されたからといって、直ちに中性化に関わるルート t 則

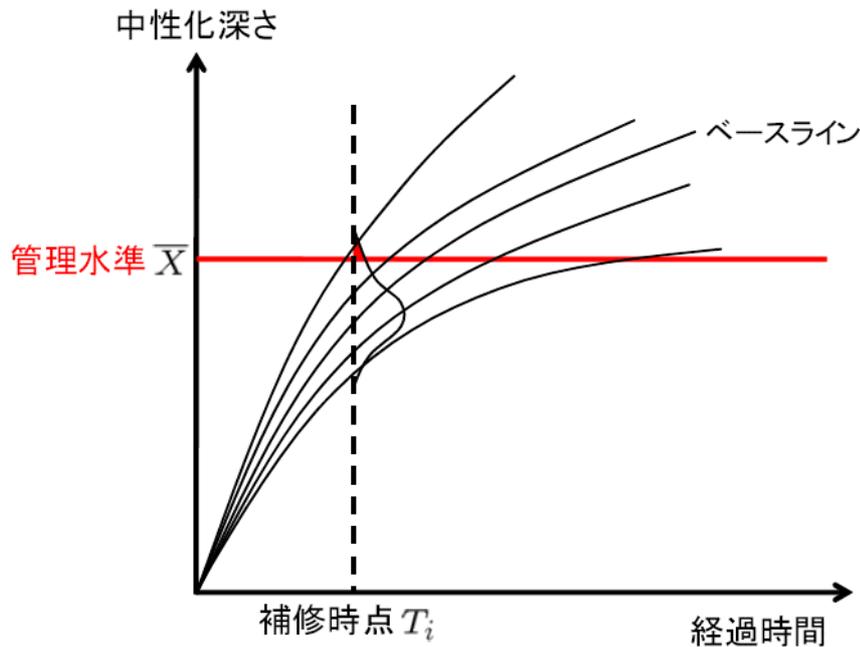
の妥当性が否定されるわけではない。しかし、今後、点検サンプルを蓄積することにより、ルート t 則の経験的有效性に関する経験的研究を積み重ねることが重要である。

4.2.3 ベースラインモデルと比例性

目視点検の結果に基づいて、構造物の劣化過程を予測する統計的劣化予測モデルに関しては、多くの研究蓄積 [27],[29],[30],[88],[89] がある。統計的劣化モデルを推計するためには、一定量のデータの蓄積が必要である。たとえば、津田ら [30] はマルコフ劣化モデルを安定的に推計するためには、2,000 個程度の点検データが必要となるとしている。統計的予測モデルは、劣化過程のベンチマークとなる力学モデルを内蔵していないため、劣化過程を安定的に表現するために、大量のデータが必要となる。これに対して、力学的劣化モデルは、劣化過程を直接モデル化しているため（モデル化が正しい限り）より少ないデータを用いて劣化予測を行うことが可能となる。しかし、現実の劣化過程には多様な要因が介在するため、単一の力学モデルを用いて劣化過程を表現するには限界がある。このため、限られたデータを用いて力学モデルを統計的に推計しようとするハイブリッド型劣化予測モデル [90] も提案されている。

本章は、比例ハザードモデル [91] を用いたハイブリッド型劣化予測モデルの提案について記述する。比例ハザードモデルは、ベースラインの寿命関数（ベースラインモデル）を特定化し、定数やハザード形状パラメータを最尤法により推計する手法である。比例ハザードモデルは、構造物による劣化速度の異質性を表現するが、構造物ごとに定義された損傷発生ハザード関数が交差しないことを仮定する。ルート t 則を用いた中性化速度式 (4.1) も、このような比例性を満足している。すなわち、ベースラインモデルとしてパラメトリックな関数 $x = \sqrt{t}$ を用いるとともに、構造物ごとの中性化速度の異質性を中性化速度係数 A により表現している。比例ハザードモデルは、ベースラインモデルを特定化することにより、パラメータ空間が相対的に絞られるため、限定されたデータによっても推計できる点に利点がある。

本章で提案する加速劣化ハザードモデルは、比例ハザードモデルの性質を満足している。その際、ベースラインモデルとして、加速度方程式（ベースライン劣化速度式） $x = t^{1/\alpha}$ を採用する。ここに、 x は中性化深さであり、経過時間 t の関数として表現される。 α は加速度パラメータであ



注) 中性化曲線と管理水準 \bar{X} の交点が補修タイミングとなる。これらの交点の分布より、中性化曲線のわずかなシフトが補修タイミングの大きな変動をもたらすことが理解できる。また、ある補修時点における中性化深さの確率分布も示しているが、中性化が管理水準以上に進展する超過確率は図中の斜線部分の面積で表される。

図 4.1: ルート t 則に基づく中性化曲線

り、ルート t 則に基づく中性化速度式 (4.1) は、加速度パラメータを $\alpha = 2$ に設定したことに他ならない。さらに、加速劣化ハザードモデルは、ベースラインの中性化速度式として加速度方程式を採用し、中性化係数に確率誤差項を導入することにより、個別構造物の中性化速度の異質性を表現しようとする点に特徴がある。

4.2.4 浄水場施設のリスクマネジメント

図 4.1 は、加速劣化ハザードモデルを用いて作成した中性化の進行プロセス（中性化曲線）を表現している。同図の縦軸は中性化深さを、横軸は経過時間を表している。コンクリート構造物特性や使用環境が同一でも、施工条件や個別的要因等の異質性により、中性化曲線が多様に異なる。この図では、ベースラインモデルとしてルート t 則を採用している。縦軸に中性化深さに関する管理水準 \bar{X} を決定し、横軸と平行に予防的に補修すべき限界ライン（図中の赤線）を定めると、それと中性化曲線との交点から、補修時期を決定することができる。限界ラインの例として、RC コン

クリート構造物の場合、鉄筋位置までのかぶり厚さを管理限界ラインとすると、中性化曲線と管理限界ラインの交点より、補修時期の設定に資する情報が得られる。ルート t 則に基づく中性化曲線は、図4.1に示すように凹曲線として表現される。このため、中性化曲線のわずかな推計誤差が、補修時期の大きな変動に結びつく可能性がある。現実のコンクリート構造物の中性化進行過程には、多大な不確実性が存在するため、補修時期を確定的に決定することができない。しかし、中性化曲線の多様性を支配する異質性分布が推計できれば、補修時期タイミングの確率分布を図のように導出することができる。その上で、現実の中性化が管理水準以上に進展する超過確率（図中の赤色部分の面積）を設定すれば、補修時期を決定することが可能となる。このように加速劣化ハザードモデルは、個別構造物の中性化進行に関する異質性をモデル化することが可能となるため、アセットマネジメントを実施するうえで必要なリスクマネジメント指標を導出することが可能となる。このようなリスクマネジメント指標に関しては、4.3.4で言及する。

4.3 加速劣化ハザードモデル

4.3.1 劣化ハザードモデル

中性化過程には多種多様な要因が介在し、中性化速度係数に各種要因が及ぼす影響について実証的に検討がなされ、適宜中性化速度係数に反映されてきた [62]-[73]。しかし、その中には計測が極めて困難な要因、未だ特定化されていない要因などが含まれており、中性化過程に及ぼす影響は大きいものの、データが蓄積されていないケースも少なくない。このような場合にこれまでは、理論的妥当性が保証されたルート t 則に基づき、測定データを用いて中性化速度係数を逆算する、すなわち中性化速度係数に全ての要因の影響を集約させるという方法論が採用されてきた。本研究においても、既往の方法論を踏襲する形で、中性化過程を加速劣化ハザードモデルで表現し、測定データにより確率モデルを統計的に推計する方法論を提案する。さらに、中性化速度係数に加えて、加速度パラメータ値も未知パラメータと考える。実測データとの適合性を高めることで、長期間の中性化予測精度の向上を図る。

いま，対象とするコンクリート構造物群が， n 個の部材で構成されていると考える．対象とする部材 i ($i = 1, \dots, n$) の前回の更新時点からの経過時間を t_i ，コンクリート部材の中性化深さを x_i (mm) と表す．中性化の進行プロセスを

$$x_i = \exp\left(\frac{-B_i}{\alpha}\right) t_i^{1/\alpha} \quad (4.2)$$

$$B_i = \theta' z_i + \sigma w_i \quad (4.3)$$

$$(i = 1, \dots, n)$$

と定式化する．ここで， $\alpha (> 0)$ は加速度パラメータ， B_i は個々のコンクリート部材の構造特性の異質性を反映する係数（中性化係数と呼ぶ）であり，加速要因と誤差項の和で構成される．ただし， $z_i = (1, z_i^1, \dots, z_i^M)$ は部材 i の劣化・損傷の共変量ベクトル， $\theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_M)$ は寿命に関するパラメータベクトル， θ_0 は定数パラメータ， w_i は部材 i に固有な劣化要因を表す確率誤差項， σ は偏差パラメータを表す．ここで， $\alpha = 2$ を仮定すれば

$$x_i = \exp\left(\frac{-B_i}{2}\right) t_i^{1/2} \quad (4.4)$$

を得る．式 (4.4) は中性化深さが経過時間の平方根に比例する既往の中性化速度式に他ならない．すなわち，式 (4.4) は，既往の中性化速度式を特殊ケースとして内包するモデルとなっている．右辺の中性化係数 B_i は，個々のコンクリート構造物の中性化速度が，構造特性 z_i と誤差項 w_i に応じて異質であることを表現している．

加速劣化ハザードモデル [72] では，劣化状態がある管理水準に到達するまでの経過時間（寿命）の対数値を，劣化・損傷の共変量 $\theta' z_i$ と誤差項 σw_i の線形和として表現する．式 (4.2) の両辺の対数をとれば，加速劣化ハザードモデル

$$y_i = \ln t_i = \alpha \ln x_i + \theta' z_i + \sigma w_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.5)$$

を得る．確率変動項 w_i が確率密度関数

$$f_w(w_i) = \exp\{-w_i - \exp(-w_i)\} \quad (4.6)$$

で表現される標準ガンベル分布に従うと仮定する．ただし， $E(w_i) = \gamma$ であり， $\gamma (= 0.57722 \dots)$ はオイラー定数である．式 (4.5) を

$$w_i = \frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.7)$$

と書き直し，確率密度関数 (4.6) の変数変換を行う．その結果，部材 i が構造特性 z_i において中性化深さが管理水準 x_i に到達するまでの所要時間（寿命）の条件付分布を表す確率密度関数は，

$$\begin{aligned} f_y(y_i|x_i, z_i) &= \frac{1}{\sigma} f_w\left(\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\exp\left(-\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right) - \frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

と表すことができる．一方，確率密度関数 (4.6) より，生存関数は

$$\begin{aligned} S_w(w_i) &= 1 - \int_{-\infty}^{w_i} f_w(w) dw \\ &= 1 - \exp\{-\exp(-w_i)\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

と表現される．部材 i が構造特性 z_i において対数時間 y_i が経過した時点で，中性化深さが管理水準 x_i まで到達していない確率は，生存関数

$$\begin{aligned} S_y(y_i|x_i, z_i) &= S_w\left(\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right) \\ &= 1 - \exp\left\{-\exp\left(-\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right)\right\} \end{aligned} \quad (4.10)$$

を用いて表現できる．さらに，変数変換 $t_i = \exp(y_i)$ により経過時間 t_i に関する生存関数は，

$$S_t(t_i|x_i, z_i) = 1 - \exp\{-\lambda_i(x_i, z_i)t_i^{-\beta}\} \quad (4.11)$$

$$\lambda_i(x_i, z_i) = \exp\left(\frac{\alpha \ln x_i + \theta' z_i}{\sigma}\right) \quad (4.12)$$

となる．ただし， $\beta = 1/\sigma$ である．

このように，加速劣化ハザードモデルに対しても，生存関数 (4.11) を導出することができる．伝統的なハザードモデル [40],[41],[92],[93] は，対象物の寿命が確率分布すると仮定しているのに対して，加速劣化ハザードモデルでは，個別部材の中性化速度係数の異質性が寿命分布の原因となっ

ていることに留意する必要がある．また，生存関数は，中性化の進展が所与の中性化深さ x_i に到達するまでの経過時間の分布を示しており，個々の部材における中性化プロセスを示したものである．当然のことながら，確率変動項 w_i の確率分布として，ガンベル関数以外の確率分布（例えば，対数正規分布，ロジスティック分布等）を採用することも可能である．このうち，対数正規分布，ロジスティック分布は，ある時期にハザード率のピークがあるようなハンプ型形状の場合に適している [94]．しかし，対象とする水道施設の場合，のちに考察するように，経過時間とともに劣化が加速しハザード率が増加するような劣化特性を有している．さらに，ガンベル分布は，ハザード率が経過時間に対して一定，逡増，逡減となるような変化過程を表現できるという柔軟な構造を有している．以上の理由により，本章では確率誤差変動としてガンベル分布を採用することとする．

4.3.2 ハザード関数の推計

コンクリート構造物の中性化過程に関するサンプルの利用可能性により，ハザード関数の推計方法が異なる．本章では，以下の2つの異なったタイプのサンプルが入手可能な場合を考える．すなわち，1) 経過時間 y_i と中性化深さ x_i に関する情報が獲得可能な場合（タイプ1），2) 中性化深さが管理水準 x_i に到達したかどうかを表すデータのみが入手可能な場合（タイプ2）という2種類の場合を考える [95]．タイプ1は非破壊検査など詳細な検査を実施した場合，タイプ2は目視点検などを実施した場合を想定している．

タイプ1の場合

本章の適用事例では，浄・配水施設の更新時に，コンクリート版から無作為にサンプルコアを抽出し，各サンプルの中性深さを実測している．経過時間の異なる施設からサンプルを抽出しており，各サンプルの情報を ξ_i ($i = 1, \dots, n$) を $\xi_i = (x_i, y_i, z_i)$ と表すことができる．ただし， $z_i = (z_i^1, \dots, z_i^M)$ はサンプル i の構造特性を表すベクトルであり， z_i^m ($m = 1, \dots, M$) はサンプル i の m 番目の構造特性を表している．サンプル ξ_i が観測される尤度 \mathcal{L}_i は，

$$\mathcal{L}_i = \frac{1}{\sigma} f_w \left(\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma} \right) \quad (4.13)$$

と表すことができる。ここで、浄・配水場施設の布設年次は同一であるとは限らず、異なる場合を含む。浄配水場施設は、構造物の諸元や環境条件が均質でない場合が多い。対象とする単位の浄配水場施設は、それらの劣化・損傷に関して相互に独立であると仮定できる。したがって、すべてのサンプル $\xi = \{\xi_i (i = 1, \dots, n)\}$ を与件とした対数尤度関数は

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\alpha, \theta, \sigma) &= \sum_{i=1}^n \left\{ -\exp\left(-\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right) - \left(\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right) \right\} - n \ln \sigma \end{aligned} \quad (4.14)$$

と表される。タイプ1のデータは、加速劣化ハザードモデルの説明変数に関する情報が直接観測可能である場合を想定している。このようなデータは、適用事例のように施設更新が実施された機会等を利用して、コンクリートのコアサンプルを抽出することが必要となる。しかし、現在使用中の浄水施設に対して、このようなコアサンプルを把握することは容易ではない。

タイプ2の場合

目視点検で、中性化により構造物が限界状態に達成しているかどうかを判定することができる場合を考える。さらに、非破壊試験等により、コンクリートの鉄筋かぶり厚 x_i が測定できると考える。目視点検で、構造物に中性化による損傷・損壊が発見された場合、中性化深さが少なくともかぶり深さ x_i に到達していると考えよう。この場合、目視点検のサンプルが有する情報は $\xi_i = (\delta_i, y_i, z_i)$ として整理できる。ただし、 δ_i はダミー変数であり、

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{管理水準を満足しない場合} \\ 0 & \text{満足する場合} \end{cases} \quad (4.15)$$

と定義する。すなわち、 $\delta_i = 1$ ならば、構造物 i に中性化による損傷・損壊が発生し、中性化が鉄筋の位置まで進行していることを意味している。 $\delta_i = 1$ が生起する確率は、寿命関数

$$\begin{aligned} F_y(y_i | x_i, z_i) &= 1 - S_y(y_i | x_i, z_i) \\ &= \exp\left\{-\exp\left(-\frac{y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i}{\sigma}\right)\right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

を用いて表現される。一方、 $\delta_i = 0$ ならば、管理水準を満足しており、その確率は生存確率 (4.11) を用いて表現される。浄配水場施設をある経過時間 $y_i = \ln t_i$ に点検すると、「すでに、ある限界状態に到達している」か、あるいは「未到達であるか」のいずれかの状態が観測される。したがって、尤度関数は

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\alpha, \theta, \sigma) &= \prod_{i=1}^n \{F_y(y_i|x_i, z_i)\}^{\delta_i} \{S_y(y_i|x_i, z_i)\}^{1-\delta_i} \end{aligned} \quad (4.17)$$

と表せる。さらに、対数尤度関数は次式で表される。

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\alpha, \theta, \sigma) &= \sum_{i=1}^n \delta_i A_i \\ &+ \sum_{i=1}^n (1 - \delta_i) \ln\{1 - \exp(A_i)\} \end{aligned} \quad (4.18)$$

ここで、 $A_i = -\exp\{-(y_i - \alpha \ln x_i - \theta' z_i)/\sigma\}$ である。

なお、多くのコンクリート構造物の場合、タイプ1のデータを入手することが困難であり、タイプ2のデータのみが入手可能な場合が少なくない。しかし、浄配水場施設は、高度なコンクリート管理が必要であり、タイプ2のようにコンクリートの中性化が限界状態に到達していることはありえない。したがって、タイプ1のデータに頼らざるを得ず、このことが浄・配水場施設の劣化状態に関する情報の蓄積が十分でないことの原因となっている。本章の適用事例は、浄配水場のコンクリート構造物に関する詳細調査が蓄積されており、タイプ1のデータが入手可能な場合をとりあげる。

最尤推計問題

パラメータの最尤推計問題は、いずれのタイプのデータを用いた場合も、対数尤度関数最大化問題

$$\max_{\alpha, \theta, \sigma} \{\ln \mathcal{L}(\alpha, \theta, \sigma)\} \quad (4.19)$$

に帰着する。ここで、パラメータベクトルを $(\zeta, \sigma) = (\zeta_1, \dots, \zeta_{M+2}, \sigma) = (\alpha, \theta, \sigma)$ と書き換える。対数尤度関数 (4.14) は σ に関して凸性が保証されない。したがって、 σ に関数する直接探索法と残り

のパラメータに関するニュートン-ラプソン法 [92] を組み合わせた方法によりパラメータ (ζ, σ) に関する最尤推計量を求めることとする。すなわち、 σ の値を $\bar{\sigma}$ に固定した場合、残りのパラメータ ζ の条件付き最尤推計量 $\zeta^*(\bar{\sigma})$ は非線形連立方程式

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\zeta, \bar{\sigma})}{\zeta_i} = 0 \quad (4.20)$$

$$(i = 1, \dots, M + 2)$$

の解として求まる。さらに、分散パラメータ σ の最尤推計量 σ^* は、1次元探索問題

$$\max_{\sigma > 0} \{\mathcal{L}(\zeta^*(\sigma), \sigma)\} \quad (4.21)$$

を解くことにより得られる。さらに、表記の都合上、最尤推計量 $(\zeta^*(\sigma^*), \sigma^*)$ を $\zeta^* = (\zeta_1^*, \dots, \zeta_{M+3}^*) = (\zeta^*(\sigma^*), \sigma^*)$ と書き改めよう。最尤推計量 ζ^* の近傍で対数尤度関数が局所的に凸関数である場合、パラメータの漸近的な共分散行列の推計量 $\hat{\Sigma}(\zeta^*)$ は、

$$\hat{\Sigma}(\zeta^*) = \left[\frac{\partial^2 \ln \mathcal{L}(\zeta^*)}{\partial \zeta_i \partial \zeta_{i'}} \right]^{-1} \quad (4.22)$$

と表すことができる [96],[97]。ただし、上式の右辺の逆行列は $\partial^2 \ln \mathcal{L}(\zeta^*) / \partial \zeta_i \partial \zeta_{i'}$ を要素とする $(M + 3) \times (M + 3)$ 次の Fisher 情報行列 [97] の逆行列である。最尤推計量 ζ^* を求めれば、共分散行列の推計量 $\hat{\Sigma}(\zeta^*)$ を用いて t -検定統計量を推計できる。

4.3.3 ルート t 則の統計的検定

ルート t 則を用いた中性化速度式は、加速劣化ハザードモデルの加速度パラメータを $\alpha = 2$ に設定した特殊ケースに相当する。そこで、2種類の加速劣化ハザードモデル

$$y_i = \alpha_1 \ln x_i + \theta'_1 z_i + \sigma_1 w_i \quad (4.23)$$

$$y_i = 2 \ln x_i + \theta'_2 z_i + \sigma_2 w_i \quad (4.24)$$

を考える。さらに、これら2種類の加速劣化ハザードモデル (4.23),(4.24) のパラメータの最尤推計量を、それぞれ $(\hat{\alpha}_1, \hat{\theta}_1, \hat{\sigma}_1)$, $(2, \hat{\theta}_2, \hat{\sigma}_2)$ と表そう。ルート t 則に関する仮説検定モデルは

$$\begin{cases} H_0 & \hat{\alpha}_1 = 2 \\ H_1 & \hat{\alpha}_1 \neq 2 \end{cases} \quad (4.25)$$

と定式化できる．すなわち，帰無仮説 H_0 を対立仮説 H_1 に対して検定する問題を考える．ここで，尤度比検定法を用いれば，仮説検定統計量 ξ は

$$\xi = 2\{\mathcal{L}(\hat{\alpha}_1, \hat{\theta}_1, \hat{\sigma}_1) - \mathcal{L}(2, \hat{\theta}_2, \hat{\sigma}_2)\} \quad (4.26)$$

と定式化される．ただし， $\mathcal{L}(\hat{\alpha}_1, \hat{\theta}_1, \hat{\sigma}_1)$, $\mathcal{L}(2, \hat{\theta}_2, \hat{\sigma}_2)$ は，それぞれ最尤推計量 $(\hat{\alpha}_1, \hat{\theta}_1, \hat{\sigma}_1)$, $(2, \hat{\theta}_2, \hat{\sigma}_2)$ に対して定義される尤度である．この時，検定統計量 ξ が棄却域 $\xi \geq \chi^2_{(100-\alpha)}(\gamma)$ に入れば有意水準 α で帰無仮説 H_0 を棄却できる．ここに， $\chi^2_{(100-\alpha)}(\gamma)$ は，自由度 $\gamma = M + 2$ の χ^2 分布における有意水準 α % の臨界値を表す．

4.3.4 リスクマネジメント指標

コンクリート部材の中性化速度係数に異質性が存在するため，部材ごとに中性化の進展特性が異なる．したがって，初期時点からある一定の時間 T_i が経過した時点で，中性化深さの確率分布を知ることができる．このように，中性化深さに関するリスク管理指標を「中性化深さ指標」と呼ぶ．一方，加速劣化ハザードモデルを用いた場合，任意の経過時間に対して，中性化深さが管理水準 x_i まで到達していない確率を生存関数 (4.11) を用いて表現できる．生存関数は中性化が所与の管理水準 (中性化深さ) まで到達する経過時間分布を表している．生存関数 (4.11) を用いて，中性化が所与の深さに到達するまでの経過時間に関するリスク管理指標 (余寿命指標と呼ぶ) を定式化できる．本章では，コンクリート部材の劣化特性を表すリスク指標として，1) 中性化深さ指標，2) 余寿命指標をとりあげる．

1) 中性化深さ指標

初期時点から一定の時間 T_i (対数時間 $Y_i = \ln T_i$) が経過した現時点を考える．この時，加速劣化ハザードモデル (4.5) より，中性化深さ x_i は

$$x_i = T_i^{1/\alpha} \exp\left(\frac{-\theta' z_i - \sigma w_i}{\alpha}\right) \quad (4.27)$$

と表される．ここで，確率誤差項 w_i が確率密度関数 $f_w(w_i)$ (式(4.6) 参照) に従うことを考慮すれば，変数変換

$$w_i = \frac{-\alpha \ln x_i + \ln T_i - \boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i}{\sigma} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.28)$$

により，経過時間 T_i における対数中性化深さ $l_i = \ln x_i$ の条件付分布を表す確率密度関数は，

$$\begin{aligned} f_i(l_i|T_i, \mathbf{z}_i) &= \frac{\alpha}{\sigma} f_w \left(\frac{-\alpha l_i + \ln T_i - \boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i}{\sigma} \right) \\ &= \frac{\alpha}{\sigma} \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\alpha l_i - \ln T_i + \boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i}{\sigma} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\alpha l_i - \ln T_i + \boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (4.29)$$

と表すことができる．さらに，変数変換 $x_i = \exp(l_i)$ より，経過時間 T_i における中性化深さ x_i の条件付確率密度関数は，

$$\begin{aligned} f_{x_i}(x_i|T_i, \mathbf{z}_i) &= \frac{\alpha}{\sigma x_i} f_w \left(\frac{-\alpha \ln x_i + \ln T_i - \boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i}{\sigma} \right) \\ &= \frac{\kappa x_i^{\kappa-1}}{\rho_i(T_i)} \exp \left(-\frac{x_i^\kappa}{\rho_i(T_i)} \right) \end{aligned} \quad (4.30)$$

と表すことができる．ただし，

$$\kappa = \frac{\alpha}{\sigma} \quad (4.31)$$

$$\rho_i(T_i) = \left\{ \exp \left(\frac{\boldsymbol{\theta}' \mathbf{z}_i - \ln T_i}{\sigma} \right) \right\}^{-1} \quad (4.32)$$

である．すなわち，中性化深さ x_i はワイブル分布 $W(\mu(T_i), \sigma^2(T_i))$ に従うことになる．ただし， $\mu(T_i)$, $\sigma^2(T_i)$ はワイブル分布の期待値，および分散であり

$$\mu(T_i) = \rho(T_i)^{1/\kappa} \Gamma(\kappa^{-1} + 1) \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(T_i) &= \rho(T_i)^{2/\kappa} \left\{ \Gamma \left(\frac{2}{\kappa} + 1 \right) - \Gamma^2 \left(\frac{1}{\kappa} + 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.34)$$

と表せる． $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である．さらに，中性化深さの確率分布を表す分布関数 $H(x_i|T_i, \mathbf{z}_i)$ は

$$H(x_i|T_i, \mathbf{z}_i) = 1 - \exp \left\{ -\frac{x_i^\kappa}{\rho(T_i)} \right\} \quad (4.35)$$

と表せる．この時，リスク管理水準を $\varepsilon \times 100\%$ とした $VaR(ValueatRisk)$ 指標 $_i(\varepsilon)$ は

$$H(\hat{x}_i(\varepsilon)|T_i, z_i) = 1 - \varepsilon \quad (4.36)$$

を満足するような $\hat{x}_i(\varepsilon)$ として定義できる．すなわち，経過時間 T_i において，それを超えるような中性化深さが出現するような超過確率が ε となるような臨界的な中性化深さを表す．また，経過時間 T_i における期待中性化深さ $E[x_i]$ は，式 (4.33) より

$$E[x_i] = \Gamma\left(\frac{1}{\kappa} + 1\right) \exp\left(\frac{\ln T_i - \theta' z_i}{\kappa \sigma}\right) \quad (4.37)$$

となる．さらに，上式において経過時間 T_i の値を変化させ，経過時間 T_i と期待中性化深さ $E[x_i]$ の関係を表した曲線を「中性化期待値パス」と呼ぶ．中性化期待値パスは，統計的關係を表したものであり，ある特定の中性化曲線を示したものであることを断っておく．

2) 余寿命指標

中性化が鉄筋の位置まで進展すると鉄筋の腐食が始まる．したがって，中性化深さの管理水準として，鉄筋のかぶり厚 \bar{X} を採用することができる．中性化が管理水準 \bar{X} まで到達するまでの経過時間を寿命 η_i と呼ぶこととする．現時点において，部材 i の中性化が管理水準にまで到達せず，寿命 η_i に対して $\eta_i > T_i$ が成立している場合を考える．中性化が管理水準 \bar{X} まで到達していないという条件の下で，今後さらに τ 以上の期間にわたって当該施設を補修しないで使用できる条件付確率（以下，余寿命分布と呼ぶ） $\tilde{F}(\tau|\bar{X}, T_i)$ は

$$\tilde{F}_i(\tau|\bar{X}, T_i) = Pr\{\eta_i \geq T_i + \tau|\bar{X}, \eta_i \geq T_i\} \quad (4.38)$$

と定義できる．すなわち，確率 $\tilde{F}(\tau|\bar{X}, T_i)$ は，経過時間 T_i の部材 i の管理水準 \bar{X} に到達するまでの余寿命が τ 以上となる確率を表している．さらに，生存確率 $S_i(T_i|\bar{X}, z_i)$ を用いれば，余寿命分布 $\tilde{F}(\tau|\bar{X}, T_i)$ は

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(\tau|\bar{X}, T_i) &= \frac{S_i(T_i + \tau|\bar{X}, z_i)}{S_i(T_i|\bar{X}, z_i)} \\ &= \frac{1 - \exp\{-\lambda_i(\bar{X}, z_i)(T_i + \tau)^{-\beta}\}}{1 - \exp\{-\lambda_i(\bar{X}, z_i)T_i^{-\beta}\}} \end{aligned} \quad (4.39)$$

と表される。ただし、 $S_i(T_i|\bar{X}, z_i)$ は、加速劣化ハザードモデルの生存関数であり、式(4.11)で表される。4.2.4で言及したように、中性化が管理水準に到達した時点でコンクリートの補修を実施する場合、余寿命分布は、補修タイミングの確率分布を表している。さらに、中性化が管理水準以上に進展する超過確率(図4.1の斜線部分の面積)を ν に設定すれば、それと対応する補修タイミング τ^* は

$$\tilde{F}_i(\tau^*) = 1 - \nu \quad (4.40)$$

を満足するような τ^* として求まる。なお、期待余寿命(Remaining Mean Distribution)は、部分積分により

$$\begin{aligned} RMD(T_i) &= E[\eta_i - T_i | \eta_i \geq T_i] \\ &= \frac{\int_{T_i}^{\infty} (u - T_i) df_i(u) du}{\tilde{F}_i(T_i)} \\ &= \frac{1}{\tilde{F}_i(T_i)} \int_{T_i}^{\infty} \tilde{F}_i(u) du \end{aligned} \quad (4.41)$$

と表される。初期時点における部材 i の期待寿命は

$$RMD(0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\varepsilon}^{\infty} \tilde{F}_i(u) du \quad (4.42)$$

となる。

4.4 適用事例

4.4.1 概要

大阪市水道局では、過去約20年間にわたって、浄配水場の耐震構造調査に伴い、浄配水場コンクリート構造物の劣化状態に関する詳細調査を実施してきた。これらの調査においては、圧縮強度、中性化深さ、鉄筋腐食、鉄筋引張強度、超音波測定(ひび割れ深さ)、シュミットハンマー調査等を実施している。このうち、圧縮強度、中性化深さに関しては、対象とするコンクリート構造物からコアサンプルを無作為に抽出し、損傷の実態について調査している。対象とする浄配水

場施設は、1910年代から20年代に築造された柴島浄水場、および1940年代から60年代に築造された施設群に大別される。このうち、1945年以降に築造された浄配水場施設は、品質管理が困難な時代背景の中で築造されたため、コンクリート構造物が経過年数に伴い早期劣化する可能性がある。大阪市水道局が蓄積した詳細調査の中で、表4.1に示すような調査結果を用いて加速劣化ハザードモデルを推計することとした。推計に用いたデータ数は $n = 236$ である。コンクリートコアサンプルの構造特性を表す変数として

$$\delta_i^1 = \begin{cases} 0 & \text{ろ過池以外の場合} \\ 1 & \text{ろ過池の場合} \end{cases} \quad (4.43)$$

$$\delta_i^2 = \begin{cases} 0 & \text{1945年以前の築造物} \\ 1 & \text{1945年以降の築造物} \end{cases} \quad (4.44)$$

という2種類のダミー変数を用いることとした。したがって、推計に用いた加速劣化ハザードモデルは

$$y_i = \alpha \ln x_i + \theta_0 + \theta_1 \delta_i^1 + \theta_2 \delta_i^2 + \sigma w_i \quad (4.45)$$

$$(i = 1, \dots, 236)$$

と表される。ただし、 θ_0 は定数項である。

4.4.2 推計結果

以上のデータベースに基づいて加速劣化ハザードモデルを推計した。その結果を表4.2に示している。同表の括弧内の数値は t -値を示している。いずれのパラメータも各説明変数が説明力を有さないという仮説は有意水準95%で棄却される。以上の推計結果より、中性化の進行プロセスは式(4.2)より、

$$x_i = \exp\left(\frac{-B_i}{0.6791}\right) t_i^{1.47} \quad (4.46)$$

$$B_i = 1.553 + 0.3138\delta_i^1 - 0.9383\delta_i^2 + 0.1603w_i \quad (4.47)$$

$$(i = 1, \dots, 236)$$

と表される。以上の推計結果より、ろ過池施設であるかどうかを表すダミー変数 δ_i^1 の係数は0.3138であり、ろ過池施設の方が他の施設より中性化速度が遅い。1945年(昭和20年)以降に建設され

表 4.1: 対象データ

施設	調査年次	築造年次	経過年数	データ数	δ^1	δ^2
A	1993	1967	26	66	0	1
B	1996	1969	27	9	0	1
C	1988	1967	21	30	0	1
D	1989	1955	34	7	0	1
E	1989	1962	27	7	0	1
F	1989	1922	67	33	0	0
G	1986	1914	72	2	0	0
H	1986	1914	72	1	0	0
I	1986	1949	37	2	0	1
J	1990	1962	28	8	1	1
K	1996	1967	29	13	0	1
L	1985	1958	27	12	0	1
M	1985	1955	30	2	0	1
N	1993	1963	30	3	0	1
O	1993	1963	30	0	1	1
P	1991	1964	27	0	1	1
Q	2007	1958	49	15	0	1
R	2007	1958	49	20	1	1
S	2007	1960	47	3	0	1
T	2007	1958	49	3	0	1

注) δ_1 は、ろ過池の場合は 1 を、そうでない場合は 0 をとるダミー変数である。 δ_2 は、1945 年以降の築造物の場合は 1 を、そうでない場合は 0 をとるダミー変数である。

表 4.2: 推計結果

α	θ_0	θ_1	θ_2	σ
0.6791	1.553	0.3138	-0.9383	0.1603
(5.804)	(3.383)	(9.552)	(-31.32)	(-)

た施設であるかどうかを表すダミー変数 δ_i^2 の係数が -0.9383 となっており、戦後の復興過程で建設された浄・配水場コンクリート施設の中性化過程は、戦前の浄・配水場コンクリートより中性化速度が早いことが理解できる。一方、中性化過程がルート t 則を満足する場合、加速度パラメータの推計値は $\alpha = 2.0$ となる。しかしながら、分析対象として用いた浄・配水場コンクリート施設のサンプルに関しては、加速度パラメータの推計値は $\alpha^* = 0.6791$ であり、ルート t 則を満足していない。実際に、式 (4.26) で評価される仮説検定統計量は $\xi = 126.7$ となり、その一方で、自由度 $\gamma = 5$ の χ^2 分布における有意水準 95 % の臨界値は $\chi^2_{(100-95)}(5) = 11.07$ となる。したがって、明らかに条件式 $\xi \geq \chi^2_{(100-95)}(5)$ を満足するために、統計的検定においてもルート t 則は棄却される。

以上は、あくまでも限られた長期のサンプルを対象とした分析結果であり、このことにより直

ちにコンクリート中性化過程のルート t 則の妥当性を否定するものではない。しかし、現実のコンクリート中性化に関する長期的進行過程は、炭酸イオンのコンクリート内拡散理論だけでなく、多様な要因が関連していることが推察できる。コンクリート中性化過程に対しては、力学的進行プロセスに関して、さらに知見を蓄積することが必要である。本章に示す研究の1つの成果は、コンクリートのかぶり深さの設計指針として用いられてきた中性化過程のルート t 則の統計的妥当性に関する仮説検定の方法を開発した点にある。今後、コンクリート中性化過程のモデル化に関しては、継続してサンプル数を蓄積することにより、ルート t 則に関する統計的妥当性に関して検討を積み重ねることが必要である。

4.4.3 リスクマネジメント指標の算定結果

中性化深さ指標

初期時点から T_i 年が経過した時点における中性化深さ x_i は条件付確率密度関数 (4.30) を用いて表すことができる。表 4.2 の推計結果を用いれば、具体的な中性化深さの条件付き確率分布は、

$$f_{x_i}(x_i|T_i, z_i) = \frac{4.235x_i^{3.235}}{\rho_i(T_i)} \exp\left(-\frac{x_i^\kappa}{\rho_i(T_i)}\right) \quad (4.48)$$

と表すことができる。ただし、

$$\kappa = 4.235 \quad (4.49)$$

$$\rho_i(T_i) = \left\{ \exp\left(\frac{\Theta_i - \ln T_i}{0.1603}\right) \right\}^{-1} \quad (4.50)$$

$$\Theta_i = 1.553 + 0.3138\delta_i^1 - 0.9383\delta_i^2 \quad (4.51)$$

である。また、期待値、および分散は、

$$\mu = 0.9093\rho(T_i)^{1/4.235} \quad (4.52)$$

$$\sigma^2 = 0.05870\rho(T_i)^{2/4.235} \quad (4.53)$$

と表せる。図 4.2 は、初期時点から一定の時間 30 年が経過した時点 ($T_i = 30$) における中性化深さ分布を図示した結果である。実際に、大阪市においては、表面被覆工事の頻度、メーカー保証期間、点検実績などを勘案した上で、補修頻度を約 30 年と想定している。同図は、横軸に示し

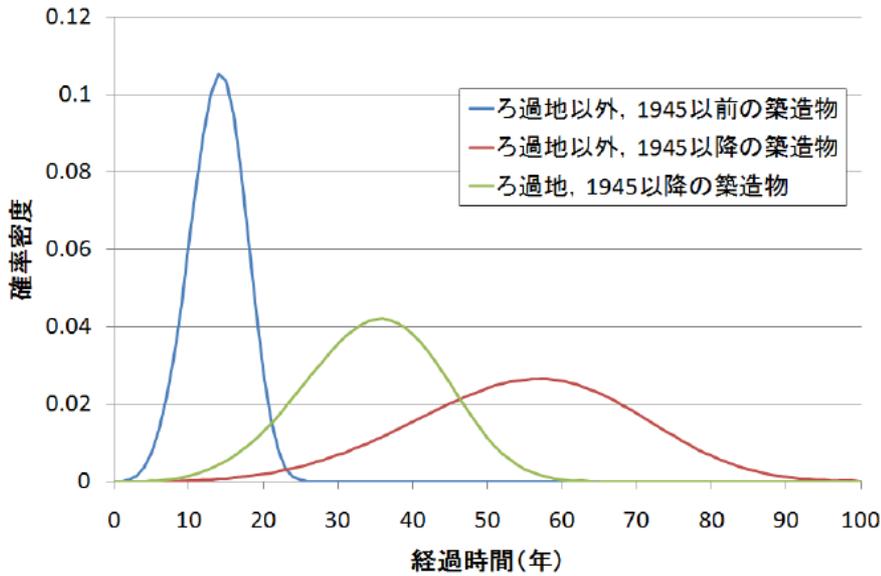


図 4.2: 中性化深さの確率分布 (30 年後)

た任意の中性化深さを対象として、30 年を経過した時点で、その中性化深さを超えない確率を図示している。図から明らかなように、中性化の進行が最も遅いのは 1945 年（昭和 20 年）以前のろ過池以外であり、ついで 1945 年以降のろ過池、1945 年（昭和 20 年）以降のろ過池以外の順となっている。これは当然ながら 4.4.2 の推計結果と整合的である。また、式 (4.52) より、それぞれの 30 年経過時点における中性化深さの期待値はそれぞれ 13.8mm、34.7mm、55.0mm である。

リスク管理水準を 5% とした中性化深さに関する VaR (Value at Risk) 指標 $\hat{x}_i(0.05)$ は、式 (4.35)、(4.36) より、

$$1 - \exp\left(-\frac{x_i^k}{\rho(T_i)}\right) = 1 - 0.05 \quad (4.54)$$

を満足するような $\hat{x}_i(0.05)$ として定義できる。一方で、上述した期待値は、VaR (Value at Risk) 指標 $\hat{x}_i(0.50)$ に他ならない。ただし、このことは 30 年経過時点で全体の 50% が管理指標を超える中性化深さに到達していることを意味する。期待値は概念的に理解しやすく、設計においては重要な指標となり得るが、現実の構造物における中性化速度の分散の大きさを考慮すれば、維持管理の実務においては有用な管理指標であるとは思えない。具体的に、図 4.2 の 1945 年（昭和 20 年）以前のろ過池以外（青色）、1945 年（昭和 20 年）以降のろ過池（緑色）、1945 年（昭和 20 年）

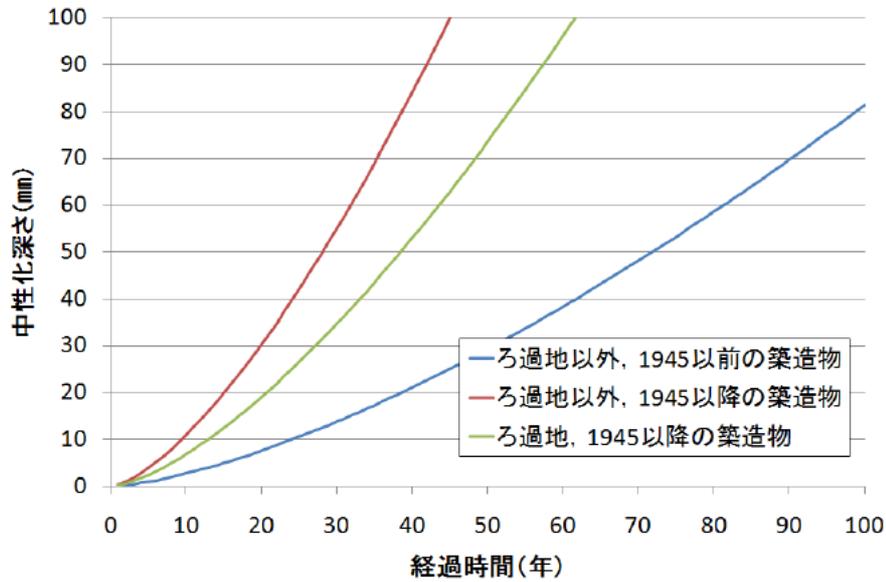


図 4.3: 期待中性化深さ

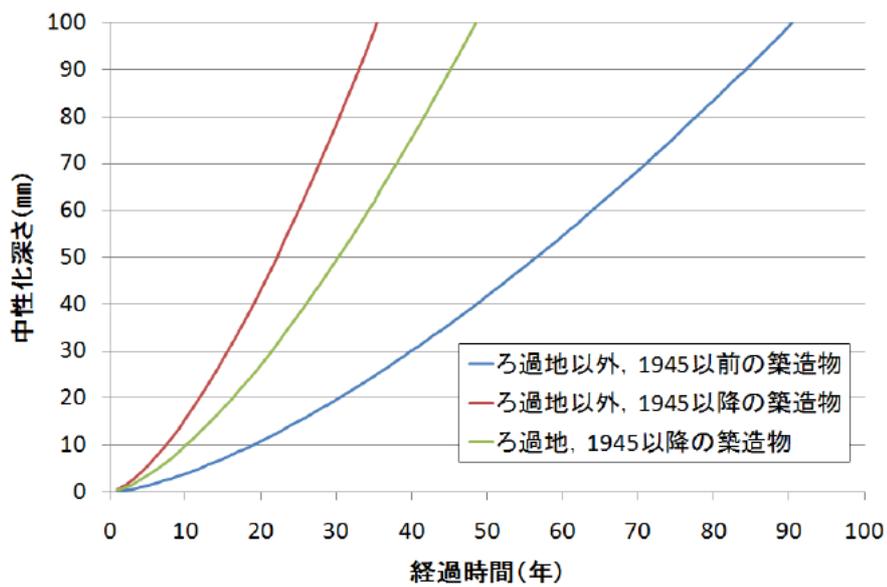


図 4.4: リスク管理水準 5 % の中性化深さ

以降のろ過池以外 (赤色) に対して、 $\hat{x}_i(0.95)$ を算出すると、それぞれ 19.7mm、49.4mm、78.4mm となる。なお、これらの値は図 4.2 のそれぞれの確率分布の上限 5% の面積を与える中性化深さに対応する。

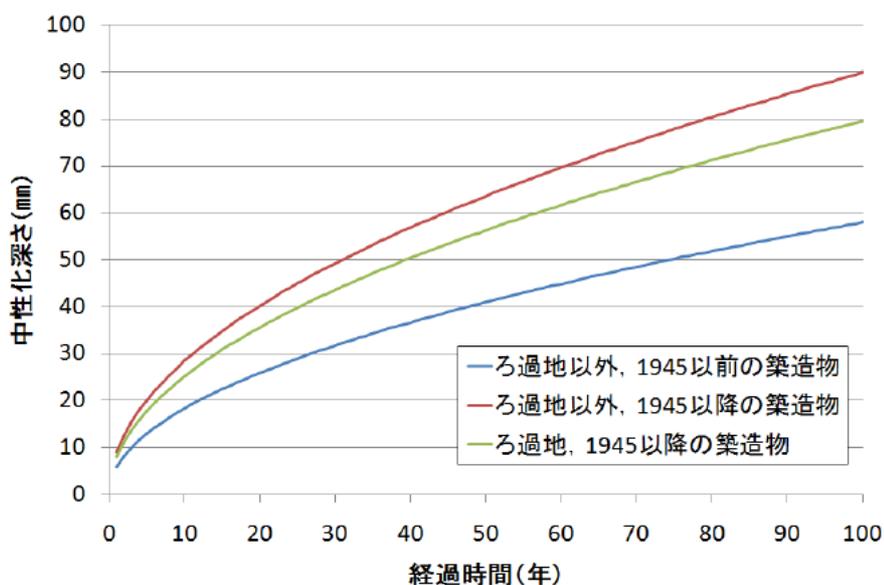


図 4.5: 期待中性化深さ (ルート t 則 : $\alpha = 2.0$)

図 4.3 は経過時間 T_i と期待中性化深さ $E[x_i]$ との関係を示した中性化期待値パス (式 (4.37) 参照) を示している。1945 年以前と以降で中性化深さの進行に大きな差異があること、中性化深さが経年とともに加速的に進行していることが見て取れる。さらに図 4.4 には、経過時間 T_i とリスク管理水準 5 の中性化深さとの関係を示す。土木建造物の維持管理を実行する実務においては、このような期待中性化深さ $E[x_i]$ を念頭に入れながら、経過年数に応じたりスク管理指標 (VAR) 指標 $\hat{x}_i(0.05)$ で補修実施に対する意思決定を行うことが重要である。また、参考までに加速度パラメータの推計値を $\alpha = 2.0$ に設定し、ルート t 則に従う中性化過程を記述したものを図 4.5 に示す。これまで指摘してきた通り、20 年を経過した時点から中性化深さの進行が緩やかになることが理解できる。

余寿命指標

適用事例として取り上げる浄水場施設には、戦前に建設された施設も含まれている。このような施設に関しては、鉄筋までのコンクリートかぶり厚に関するデータが存在しないが、非破壊試験により、かぶり厚を推計することができる。浄・配水場施設を点検するためには、浄・配水場の使用を停止することが必要となる。ただし、点検のために多大な時間を要することは不可能であ

り、中性化の状態を目視点検で判定せざるを得ない。中性化が鉄筋の位置まで進展している場合、コンクリート版の補修を実施する必要がある。それ以外の場合、中性化が発生したコンクリート施設を必ずしも直ちに補修する必要はない。アセットマネジメント上は、補修を行うまでの程度の期間にわたって中性化の進展を許容できるかという判断が重要となる。その場合、式(4.39)で示した余寿命分布 $\tilde{F}(\tau|\bar{X}, T_i)$ が重要なマネジメント情報となる。余寿命指標を再掲すれば、

$$\tilde{F}_i(\tau|\bar{X}, T_i) = \frac{1 - \exp\{-\lambda_i(T_i + \tau)^{-6.238}\}}{1 - \exp\{-\lambda_i T_i^{-6.238}\}} \quad (4.55)$$

$$\lambda_i = \exp\left(\frac{0.6791 \ln x_i + \Theta_i}{0.1603}\right) \quad (4.56)$$

$$\Theta_i = 1.553 + 0.3138\delta_i^1 - 0.9383\delta_i^2 \quad (4.57)$$

と表される。いま、施設の建設年度から T_i 年を経過した時点で、コンクリート版を目視点検したとしよう。その段階で、コンクリート版の中性化の発生の有無がデータベースに記載される。鉄筋の腐食が発生している場合、直ちに補修が実施される。中性化が発生しているが、鉄筋の腐食まで進展していないことが判明したと考える。この時、余寿命指標は、中性化管理水準（コンクリートのかぶり厚）を \bar{X} mm とした場合、この施設が当該時点から、中性化が管理水準までに到達するまでの所要時間（余寿命） τ の確率分布として定義することができる。図4.6には $T_i = 10$ 年、 $\bar{X} = 50$ mm とした場合における余寿命分布を求めた結果を示している。なお、本章の研究で対象としたコンクリートコアサンプルのかぶり厚の平均値は48.2mmである。中性化が管理水準以上に進展する超過確率を $\nu = 0.05$ に設定すれば、1945年（昭和20年）以前のろ過池以外（青色）、1945年（昭和20年）以降のろ過池（緑色）、1945年（昭和20年）以降のろ過池以外（赤色）に対する補修タイミング τ^* は、それぞれ46.5、20.2、12.1年後となる。一方で、期待余寿命に関して同様に算出すると、現時点において、それぞれ65.6、30.5、19.6年であり、とりわけ1945年（昭和20年）以降の建築物に関しては、管理水準に基づく補修タイミングと顕著な差が確認できない（中性化管理水準に到達するまでに、中性化の進行が上位5のサンプルと平均的なサンプルとの間で10年も差異がない）。これは、1945年（昭和20年）以降の建築物の中性化深さが経過年数とともに加速的に進展することに起因するが、補修タイミングの遅延には数年程度の猶予しか許されないことを示唆している。

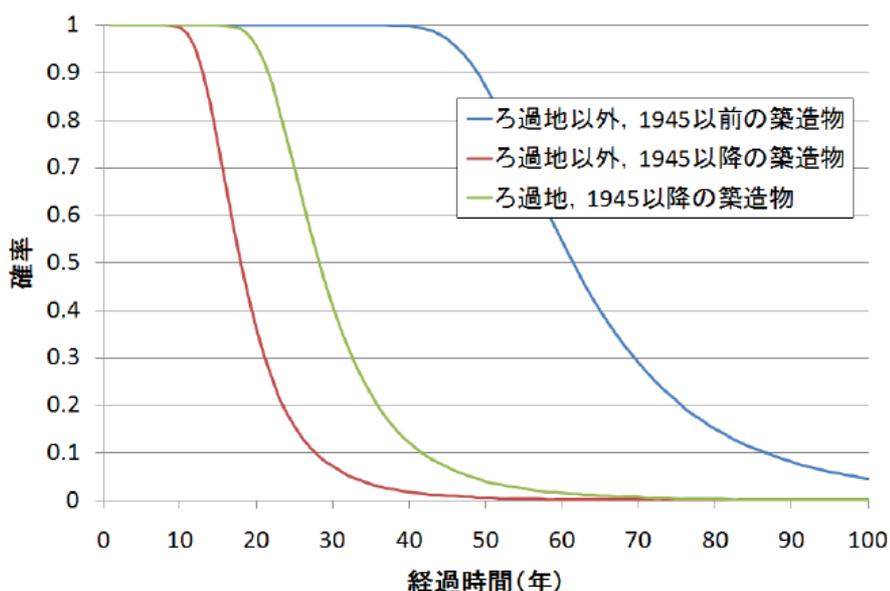


図 4.6: 余寿命分布 ($T_i = 10$ 年, $\bar{X} = 50\text{mm}$)

4.5 考察

本章では、タイトルに「コンクリート中性化予測」との言葉を用いているものの、対象データに関してルート t 則は棄却され、現実の中性化過程はルート t 則より、加速して進行するとの現象は、水酸化カルシウムの溶脱など、実際には別の現象が支配的になっているものと推察されるが、実際の現象については明らかにはなっていない。

しかしながら、わずか 236 個のデータから、力学的モデルと統計的モデルを組み合わせたハイブリッド型のモデルを用いることにより、劣化予測モデルを推計することができた。また、こうした手法の適用は、水道の浄・配水場施設におけるコンクリート構造物に限定されるものではなく、汎用性の高い手法を提案したものとする。

4.6 結語

本研究では、浄水場施設の更新時点に収集されたコアサンプルを用いてコンクリート版の中性化速度を予測する方法を提案した。その際、長期アセットマネジメントにおいて、ルート t 則に基づいた劣化予測式を用いることの問題点を指摘するとともに、中性化深さの測定データに基づい

て、長期的な中性化過程を解析するための加速劣化ハザードモデルを提案した。さらに、ルート t 則に関する統計的仮説検定の結果、少なくとも対象データに関してルート t 則は棄却され、現実の中性化過程はルート t 則より、加速して進行することが判明した。本研究で提案した加速劣化ハザードモデルは、浄水場施設に限定されずに、コンクリート構造物の中性化予測に幅広く適用が可能である。

しかし、加速劣化ハザードモデルの実用性を向上させるために、今後に残された研究課題が存在する。第 1 に、本研究で用いた浄水場施設のデータに関する限り、コンクリートの長期的な中性化予測にルート t 則は適用できないことが判明した。今後は、コンクリートの中性化過程に関するデータを蓄積し、ルート t 則の妥当性に関する知見を蓄積することが必要である。また、中性化が加速化されている力学的メカニズムについて検討する必要がある。第 2 は、比例ハザードモデルを用いたハイブリッド型劣化予測モデルに関して理論的、経験的な展開が必要である。力学モデルをベースラインモデルとするような比例ハザードモデルを開発することにより、力学モデルの統計的推計が可能となる。このようなハイブリッドモデルは、コンクリートの中性化のみならず、さまざまな確定的劣化予測モデルの統計的推計に適用が可能である。第 3 に、加速劣化ハザードモデルにおける確率誤差項の確率分布として、パラメトリックな確率分布関数を想定しており、仮説検定の結果が確率誤差項分布に関する特定化誤差の影響を受けている可能性がある。今後、検査サンプルを蓄積することにより、ルート t 則の経験的有効性に関する経験的研究を積み重ねることが重要である。第 4 に、加速劣化ハザードモデルは、ベースラインモデルを想定しているため、比較的限定されたデータを用いて推計できるという利点がある。

今後、継続的に点検データが蓄積されれば、加速劣化ハザードモデルの推計結果を更新することが必要である。加速劣化ハザードモデルのベイズ更新に関する手法の開発が求められる。

第5章 上水道管路の最適予防取替えモデル

5.1 本章の目的

従来より、土木施設を点検することによって、それらの健全度を測定し、期待ライフサイクル費用を最小にしようとするような最適修繕投資計画を求める方法論が提案されている [98]-[100]。しかし、上水道管路施設は埋設構造物であり、管路の劣化状態を点検すること自体が極めて困難である。管路施設の劣化状態を把握するための先端的なモニタリング技術の開発が急速に進展しつつあるが、現実のところ、管路の健全度を把握するためには地盤掘削が必要となる。道路の掘削費用や道路施設の占有がもたらす社会的費用は一般的に少なくない。このため、敷設された時点から一定期間が経過した管路に対しては、劣化状態の如何に関わらず予防的に新しい管路に取替えられる場合が多い。

管路施設が破損し、道路施設の陥没事故や水道水の噴出事故が一度発生すれば、道路や周辺施設、利用者に多大な損害を与える。さらに、復旧期間中に交通遮断を実施すれば、社会的費用も発生する（本章ではこれ以降、これらの損害や費用を総称して社会的損失と呼ぶ）。このため、管路の取替えを予防的に実施し、管路の破損・損壊による社会的損失を抑制することが必要となる。一方で、管路の取替えを頻繁に実施すれば、取替え費用が増加する。したがって、上水道管路施設のアセットマネジメントでは、破損事故による社会的損失と取替え費用の総和として定義される期待ライフサイクル費用 [101] を最小化するような管路の最適予防取替え政策が求められる。

実際の管路施設では、敷設時点によって耐久性能が異なる管路が用いられている。当然ながら、管路の取替えを実施する場合、取替える前の管路のタイプと、取替えた後の管路のタイプが異なることが起こりうる。したがって、管路の取替え政策を考えるときには、(1) 取替え後における望ましい管路のタイプと、(2) 既存の管路の取替えタイミングを同時に決定することが必要となる。すなわち、異なるタイプの管路の間での最適スイッチング政策を決定することも重要な課題である。

以上の問題意識の下に、本章の研究では期待ライフサイクル費用を最小にするような管路の最適取替えモデルを定式化する。さらに、異なる耐久性能を有する管路間の最適スイッチング政策を分析する方法論を提案する。以下、5.2 では本章の基本的な考え方を示す。5.3 において最適取替えモデルを定式化する。5.4 では、管路の最適スイッチング政策を求める方法論を提案する。5.5 では、大阪市水道局が管理する上水道網を対象として実証的な分析を実施する。

5.2 本章の基本的な考え方

5.2.1 既往の研究

機器や機械の最適な更新政策に関しては、オペレーションズ・リサーチの分野において最適取替え問題として、すでに確立した研究分野となっている [102]。破壊や故障がある定常的な確率過程に従って生起するようなシステムの最適修繕政策に関しては膨大な研究が蓄積されている [102]。特に、劣化状態を離散的な状態変数で記述するマルコフ決定モデル [103] は、劣化過程の記述が簡単であり、数多くの実用モデル [104],[105] が提案されている。土木施設の維持補修問題に関して、すでに研究が蓄積されている。土木施設の取替え問題に限定しても、青木等は照明ランプ、灯具で構成されるトンネル照明システムの取替え問題を対象として、システム全体の点検・補修タイミング政策を決定する方法論を提案し、ライフサイクル費用とシステムの故障リスクのトレードオフの関係を分析している [88],[106]。その際、照明ランプの劣化水準は、故障の有無という2値変数で表される。灯具の場合には、劣化水準は複数の健全度指標で表現され、予防修繕による長寿命化政策を考慮することが必要となる。これらの既往の研究は、点検費用が取替え費用よりも相当程度小さい場合をとりあげ、点検・補修タイミングの最適化を図っている。しかし、上水道管路施設のような地下埋設施設の場合、施設の劣化状態を点検することが容易ではない。したがって、敷設時点から相当時間が経過した時点で、施設の劣化の有無に関わらず管路施設を取替えるような予防保全政策が採用されることになる。しかし、施設の取替え時点に至るまでに管路施設の損壊事故が発生する可能性を完全に防止することは不可能であり、損壊事故による社会的費用と管

路施設の取替え費用の総和として定義される期待ライフサイクル費用を最小にするような管路の取替えタイミングを決定することが必要となる。すでに、小林等は、舗装の劣化過程を確率微分方程式により表現し、舗装の最適補修タイミングを決定するような動的最適化モデル [98],[99] を定式化している。しかし、最適解を解析的に導出することが不可能であり、数値シミュレーションにより最適政策を求めざるをえず、モデルの操作性に限界があった。本章の研究で提案する最適取替えモデルも、基本的には小林等のモデル [98],[99] と同様な再帰構造を有している。しかし、管路の劣化状態を破壊の有無という 2 値変数で表現するため、管路の劣化プロセスをワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現することが可能となる。その結果、最適取替えモデルの構造が簡単になり、モデルの操作性を大幅に改善することができる。さらに、上水道の管路網は、給水人口の増加とともに段階的に発展してきたため、管路網が耐久性の異なる様々なタイプの管路で構成されている。したがって、最適取替え政策を検討する場合、古いタイプの管路から、新しいタイプの管路に移行するタイミング（スイッチタイミングと呼ぶ）を最適化することが必要となる。筆者等の知る限り、このような新技術への移行を考慮した最適取替えモデルに関する研究は見当たらない。

5.2.2 布設管路の材質の変遷

我国の近代水道は、1887 年（明治 20 年）に横浜市に創設されたことに端を発する。その際、導・送・配水管材料として普通鑄鉄管が用いられた。1933 年（昭和 8 年）には銑鉄に 10～20 %の鋼を混入し強度、靱性を増し、管厚を薄くした高級鑄鉄管が登場した。その後、新設管として、高級鑄鉄管が使用されている。さらに、1959 年（昭和 34 年）には、より靱性の強いダクタイル鑄鉄管が規格、製造化された。その後、現在に至るまで新設管にはダクタイル鑄鉄管が使用されている。

ダクタイル鑄鉄管は、現在のレベル 2 地震動において耐えうるものと評価されている。一方、普通鑄鉄管、高級鑄鉄管は、老朽化による漏水事故の他、地震時には管体そのものが破損する可能性が危惧されている。このことより、老朽化した普通鑄鉄管、高級鑄鉄管の取替えが望まれている。また、ダクタイル鑄鉄管においても、地盤変異が大きくなれば継手が離脱してしまう一般継手（T 型継手、K 型継手等）に加え、継手形式の技術革新により、離脱防止機能を有する耐震継手（S 型継手、NS 型継手等）が開発された。耐震継手は、1995 年（平成 7 年）年の阪神・淡路大震災以降

は重要路線への使用事例が拡大している。現在では大阪市水道局のように全面的にこの継手を採用している事業者も多い。こうした鋳鉄管以外にも、鋼管が用いられているケースもあるが、こちらはダクティル鋳鉄管同様にレベル2地震動においても耐えうる耐震性の高い材料ではあるものの、第三者破損等につながる塗装破損の問題から、構造物内や特殊形状の場合等にその使用は限られている。なお、近年においては、新たな耐震管路としてポリエチレン管の使用も広がってきているが、適用事例の対象とした大阪市において当該管路の使用実績が無いことや、全国的に見てもポリエチレン管の経年劣化による漏水データが極めて限られることから、本研究ではとりあげないこととする。

5.2.3 最適取替え政策の考え方

配水管事故は一旦発生すると、水道水が路上に噴出することにより、道路交通の遮断や、施設破損、商業活動などの都市活動に支障をきたす。大阪市における近年の事例でも、2002年（平成14年）の四ツ橋筋朝日新聞社前で発生した漏水では約半日にわたり幹線道路を通行止めにし、2005年（平成17年）年の阿倍野ベルタ前での漏水事故では、付近を走る阪堺電車が事故当日の営業停止に追い込まれるなどの被害を出している。こうした社会的に被害を発生させる管路被害をなくすためには、老朽化した普通鋳鉄管、高級鋳鉄管を耐震継手を有するダクティル鋳鉄管に早期に取替える必要がある。一方で、既設の上水道管路網は膨大な範囲に広がり、取替え費用は莫大になることが想定される。すなわち、事故による損害と取替え費用の間には、トレードオフの関係が成立する。このような観点から、水道事故がもたらす社会的損失と、管路の取替え費用の双方を同時に考慮することにより、水道管路の長期的なアセットマネジメントにおいて発生するライフサイクル費用の最小化に資するような最適取替え政策を検討することが重要である。さらに、前述したように、水道管路の取替え政策を検討する場合には、普通鋳鉄管、高級鋳鉄管をより高機能の耐久性の高いダクティル鋳鉄管に順次置換していくことが求められている。したがって、最適取替え政策を検討する場合、管路の耐久性が異なることを考慮したうえで、長期的なライフサイクル費用の最小化を達成できるような取替え政策を検討することが必要となる。

以上の課題に応えるために、以下、5.3では、同一のタイプの水道管路を半永久的に利用するこ

とを前提として、管路の最適取替え期間を求める最適取替えモデルを定式化する。さらに、5.4では、直近の取替えの段階において、新しいタイプの管路に取替え、それ以降においては新しいタイプの管路を継続して定期的に取り替える場合を想定する。その上で、長期的なライフサイクル費用を最小にするように、現行の管路の取替え時期と、取替え後の管路タイプ、取替え期間を同時に決定するような拡張モデルを定式化する。

5.3 最適取替えモデルの定式化

5.3.1 モデル化の前提条件

施設管理者は、初期時点から無限に続く時間軸上で、期待ライフサイクル費用を最小にするように管路の取替えを行う。ここでは、取替え前後における管路のタイプは同一であり、時間軸に沿って同一タイプの管路が半永久的に繰り返し取替えられると考える。管路の劣化水準は、2つの水準 E_i ($i = 1, 2$) で表される。 E_1 は健全な状態、 E_2 は管路の破損状態を表す。既存の管路が新しい管路に取替えられた場合、常に管路は健全な状態に戻る（図 5.1）。管路が破損した場合、水道水が路上に噴出し、交通の遮断、施設や不動産の損壊等、社会的損失をもたらす。管理者は管路を予防的に頻繁に取り替えることにより、社会的損失の発生を抑制することができる。しかし、頻繁な管路の取替えは、取替え費用の増大を招く。したがって、管理者の目的は、管路の破損に伴って生じる社会的費用と、取替え費用の総和で表現される期待ライフサイクル費用の低減を達成できるような最適取替え期間を求めることにある。

5.3.2 劣化過程のモデル化

劣化状態が2値で表わされるような管路の劣化過程をワイブル劣化ハザードモデルにより定式化する。ハザードモデルの詳細については参考文献 [40],[41] に詳しいが、ここでは読者の便宜を図るために概要を簡潔に述べる。

時点 t_0 において、新しい管路に取替えられ、管路が健全な状態 E_0 に回復したとする。いま、管路の寿命を確率変数 ζ で表し、確率密度関数 $f(\zeta)$ 、分布関数を $F(\zeta)$ に従って分布すると仮定する。

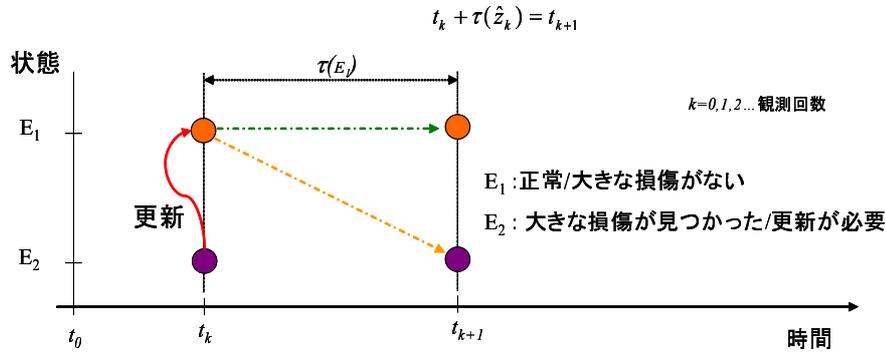


図 5.1: 管路の劣化水準のモデル化

ただし，寿命 τ の定義域は $[0, \infty)$ である．取替え時点 t_0 からある時点 $t = t_0 + \tau$ まで時間が経過したと考える．取替え時点から任意の時点 $t_0 + \tau \in [t_0, \infty]$ まで，管路が破損しないで健全である確率（以下，生存確率と呼ぶ） $\tilde{F}(\tau)$ は，全事象確率 1 から時点 $t_0 + \tau$ までに管路が破損する累積故障確率 $F(\tau)$ を差し引いた値

$$\tilde{F}(\tau) = 1 - F(\tau) \tag{5.1}$$

により定義できる．ここで，管路が時点 $t_0 + \tau$ まで生存し，かつ期間 $[t_0 + \tau, t_0 + \tau + \Delta\tau]$ 中にはじめて破損する確率は，

$$\lambda_i(\tau)\Delta\tau = \frac{f(\tau)\Delta\tau}{\tilde{F}(\tau)} \tag{5.2}$$

と表せる．ここで，劣化ハザード関数としてワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda(\tau) = \alpha m \tau^{m-1} \tag{5.3}$$

を用いる．ただし， α, m は推計すべき未知パラメータである．さらに α が，管路特性，使用・環境条件など，管路の寿命に影響を及ぼすような特性で表現できると考えれば，特性ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$

を用いて,

$$\alpha = \mathbf{x}\beta' \quad (5.4)$$

と表せる．上式中で, $x_n (n = 1, \dots, N)$ は n 番目の特性変数の観測値を表し, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_N)$ は未知パラメータベクトルである． \prime は転置操作を表す．したがって, 管路の寿命に影響を及ぼす上述の特性を考慮する場合には, 未知パラメータ α の推計は β の推計に帰着される．また, 式 (5.3) の m はハザード率の時間的な増加傾向を表す加速度パラメータである．ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合, 管路寿命の確率密度関数 $f(\tau)$, および管路の生存確率 $\tilde{F}(\tau)$ は, それぞれ次式で表される．

$$f(\tau) = \alpha m \tau^{m-1} \exp(-\alpha \tau^m) \quad (5.5)$$

$$\tilde{F}(\tau) = \exp(-\alpha \tau^m) \quad (5.6)$$

5.3.3 リスク因子の定式化

管路の腐食過程は, 主に内外の要因に影響を受ける．以前に言及されているように, 影響力のある要因は具体的には, 降伏応力, 長さ, 半径, パイプ壁厚, 交通荷, 単位土重量, 熱膨張係数, 内圧などでこのほかにも多く要因を含む．これらの要因は, 得られたデータと情報の有効性による標本の平均と分散によって決定論的であるかランダムに変異する．明らかに, これらの要因は, それぞれが異なるレベルで劣化状況に関与している [107], [108]．したがって, 確率値の形式でリスク因子を組み込む．このリスク因子は, 異なる都市, 異なる配水システム分布, 材料などにより異なる値をとる．リスク因子の評価は, いくつかの物理モデルから得ることができる．以下の式により, リスク因子 κ を考慮することで, ハザード関数がよりすぐれたものとして表現される．これにより, 方程式 (5.5) の確率密度関数 $f(\tau)$, 式 (5.6) の生存関数 $\tilde{F}(\tau)$ は次のように示される．

$$\lambda(\tau) = \kappa \alpha m \tau^{m-1} \quad (5.7)$$

$$f(\tau) = \kappa \alpha m \tau^{m-1} \exp(-\kappa \alpha \tau^m) \quad (5.8)$$

$$\tilde{F}(\tau) = \exp(-\kappa \alpha \tau^m) \quad (5.9)$$

注意すべきは、リスク因子 κ を用いるため、データセット中のそれぞれ利用可能なデータが必要となる。

5.3.4 共変量

リスク因子と比べて、特徴のある変数（または共変量）の影響を反映するもう一つの良く用いられる手法は、共変量の付加した形で場所パラメータ α を考慮する。

$$\alpha = \sum_{i=1}^M \beta_i x_i (i = 1, \dots, M) \quad (5.10)$$

ここで、 M は共変量の総数で、最初の共変量の値は 1 である。データベースの有効性により、共変量の値は数値計算で得られる。

5.3.5 ワイブルパラメータのための評価アプローチ

ほぼ全延長に該当する記録データの総数を S とする。その内、各データの記録は s ($s = 1, \dots, S$) で示される。各データの分離状況は、各々の都市の管理上の都合による。方程式 (5.8) と (5.9) は、以下のように定式化される。

$$f(t_s) = \alpha m t_s^{m-1} \exp(-\alpha t_s^m) \quad (5.11)$$

$$\tilde{F}(t_s) = \exp(-\alpha t_s^m) \quad (5.12)$$

セクション s の劣化は、管路の他の部分から相互に独立しているとする。このため、劣化の同時確率密度は、以下の尤度関数で表される。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\alpha, m : t_s) &= \prod_s \left\{ \tilde{F}(t_s^m) \right\}^{(1-\delta_s)} \left\{ f(t_s^m) \right\}^{\delta_s} \\ &= \prod_s \left\{ \exp(-\alpha t_s^m) \right\}^{(1-\delta_s)} \left\{ \alpha m t_s^{m-1} \exp(-\alpha t_s^m) \right\}^{\delta_s} \end{aligned} \quad (5.13)$$

δ_s は、漏出が生じた際には 1、その逆は 0 のダミー変数。数学的な操作の容易さのために、方程式 (5.13) の両対数を求める。以下の方程式は、対数尤度関数である。

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\alpha, m : t_s) &= \\ &= \sum_s \left[\begin{aligned} &(1 - \delta_s)(-\alpha t_s^m) \\ &+ \delta_s \{ \ln \alpha + \ln m + (m - 1) \ln t_s - \alpha t_s^m \} \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (5.14)$$

パラメータ α と m は、最大尤推定法方法を用いて算出する。対数尤度関数 (5.14) を最大にするパラメータ θ の評価値は、 $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ ($\theta_1 = \alpha, \theta_2 = m$) であり、同時に以下の状態を満足しなければならない。

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\Xi, \hat{\theta})}{\partial \theta_i} = 0, (i = 1, 2) \quad (5.15)$$

ここで Ξ は、観測情報 t_s と δ_s を表す。さらに、パラメータの漸近共分散マトリックスの評価値 $\Sigma \hat{\theta}$ は、以下のように表される。

$$\Sigma \hat{\theta} = \left[\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\Xi, \theta)}{\partial \theta \partial \theta'} \right]^{-1} \quad (5.16)$$

$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ の最適値は 2 次元の同時方程式 (5.16) にニュートン方法のような反復計算手法を適用することによって推定される。この章の研究では、ニュートン-ラプソン法を使用する。統計的 t 値検定は、共分散マトリックスの値 $\Sigma \hat{\theta}$ の使用によって計算される。

5.3.6 ライフサイクルコスト最小化モデルの定式化

対象とする管路が破損・破壊した時に発生する社会的損失を c と表そう。社会的損失は時間を通じて一定と仮定する。管路の寿命が τ となる確率密度 $f(\tau)$ は式 (5.5) で表される。管路の取替え期間を z で表せば、取替え期間 $[0, z)$ の間に管路が破壊することにより発生する社会的損失の (初期時点における) 期待被害額の割引現在価値 $EC(z)$ は、

$$EC(z) = \int_0^z cf(t) \exp(-\rho t) dt \quad (5.17)$$

と表される。ただし、 ρ は瞬間的割引率である。一方、取替え費用は時間を通じて一定値 I をとると仮定する。管路は、1) 管路が破損した場合、2) 管路が取替え時期に達した場合に取替えられる。管路が供用中に破損せずに、取替え時期 τ に到着する確率 (生存確率 $\tilde{F}(\tau)$) が式 (5.6) で表現されることに留意すれば、管路の次回の取替えに関わる期待取替え費用の割引現在価値 $EL(z)$ は、

$$EL(z) = \int_0^z If(t) \exp(-\rho t) dt + \tilde{F}(z)I \exp(-\rho z) \quad (5.18)$$

と表される．ここで，管路が時間間隔 z で予防的に取替えられるという政策の下で，管路が取替えられた時点で評価した期待ライフサイクル費用の現在価値を $J(0 : z)$ と表そう．いま，管路の次の取替え時点で評価したそれ以降の期待ライフサイクル費用の当該期価値も $J(0 : z)$ で表されることに留意すれば，管路取替え時点で評価した期待ライフサイクル費用の現在割引現在価値は，再帰的に

$$J(0 : z) = \int_0^z f(t)\{c + I + J(0 : z)\} \exp(-\rho t) dt + \tilde{F}(z)\{I + J(0 : z)\} \exp(-\rho z) \quad (5.19)$$

と表現できる．ここで，2つの関数 $\Lambda(z)$, $\Gamma(z)$ を

$$\begin{aligned} \Lambda(z) &= \tilde{F}(z) \exp(-\rho z) \\ &= \exp(-\alpha z^m - \rho z) \\ \Gamma(z) &= \int_0^z \alpha m \tau^{m-1} \exp(-\alpha \tau^m - \rho t) dt \\ &= - \int_0^z \exp(-\alpha \tau^m - \rho t) d(\alpha \tau^m - \rho t) \\ &\quad - \rho \int_0^z \exp(-\alpha \tau^m - \rho t) dt \\ &= 1 - \Lambda(z) - \rho \int_0^z \Lambda(t) dt \end{aligned} \quad (5.21)$$

と定義しよう．このとき，再帰方程式 (5.19) より，期待ライフサイクル費用の割引現在価値は，

$$J(0 : z) = \frac{(c + I)\Gamma(z) + I\Lambda(z)}{1 - \Gamma(z) - \Lambda(z)} \quad (5.22)$$

と表すことができる．ここで，施設管理者が解くべき最適点検・修繕問題は，

$$\Phi(0) = \min_z \{J(0 : z)\} \quad (5.23)$$

と定式化できる．最適値関数 $\Phi(0)$ は初期時点で評価した最適期待ライフサイクル費用を意味する．

最適化問題 (5.23) の 1 階の最適化条件より

$$\frac{dJ(0 : z)}{dz} = \frac{\psi(z)}{\{1 - \gamma(z) - \Lambda(z)\}^2} = 0 \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} \psi(z) &= (c + I)\Gamma'(z) + \Lambda'(z) + c\{\Lambda(z)'\Gamma(z) \\ &\quad - \Gamma'(z)\Lambda(z)\} \end{aligned} \quad (5.25)$$

を得る．ただし， $\Gamma(z)' = d\Gamma(z)/dz$ ， $\Lambda(z)' = d\Lambda(z)/dz$ である．すなわち，最適取替え期間 z^* は

$$\psi(z^*) = 0 \quad (5.26)$$

が成立するような z^* として与えられる．

5.3.7 最適取替え期間の計算方法

最適化条件 (5.25) を満足するような最適取替え期間 z^* を求めるためには関数 $\Lambda(z)$ を具体的に求めることが必要である．しかし，関数 $\Lambda(z)$ を解析的に求めることは不可能であり，1 階の最適化条件 (5.25) を用いて最適解を求めることはできない．そこで，本章の研究では，数値計算により最適解を求めることとした [109]，[110]．式 (5.21) に着目すれば，式 (5.22) の分母は，

$$1 - \Lambda(z) - \Gamma(z) = \rho \int_0^z \Lambda(t) dt \quad (5.27)$$

と表せることができる．さらに，式 (5.21) と式 (5.27) を式 (5.22) に代入することより，

$$J(0 : z) = \frac{c + I - c\Lambda(z)}{\rho \int_0^z \Lambda(t) dt} - (c + I) \quad (5.28)$$

を得る．すなわち，汎関数 $J(0 : z)$ には $\Lambda(z)$ とその積分項が含まれる．ここで，数値計算により積分項を求めるために，区間 $[0, M]$ を微小区間 Δ を用いて離散分割し $z = k\Delta$ と表現する．ただし， k は整数パラメータ， M は十分大きい実数であり， $M = K\Delta$ が成立する．このとき，積分値 I_k ($k = 1, \dots, K$) を

$$I_k = \int_0^{k\Delta} \Lambda(x) dx \quad (5.29)$$

と定義する．さらに，積分値 I_{k+1} は，

$$\begin{aligned} I_{k+1} &= \int_0^{(k+1)\Delta} \Lambda(x) dx \\ &= I_k + \int_{k\Delta}^{(k+1)\Delta} \Lambda(x) dx \\ &= I_k + \frac{[\Lambda(k\Delta) + \Lambda((k+1)\Delta)]\Delta}{2} \end{aligned} \quad (5.30)$$

と定義される．その上で， $J(0 : Z)$ の最小値を 1 次元直接探索法で求めることとした．

5.4 管路の異質性を考慮した最適取替えモデル

5.4.1 モデル化の前提条件

5.3 で定式化した最適取替えモデルでは、同種の管路を半永久的に用いることを前提としていた。しかし、現実の管路施設は敷設時期が異なる様々な管路で構成されている。さらに、管路網が拡張された歴史的経緯を反映して、様々な材質の管路が混在しているのが実情である。材質が異なれば、管路の劣化特性も異なる。管路のアセットマネジメントを実施する場合、1) 管路を取替えるにあたり、どのようなタイプの管路を新規に導入するのが望ましいか、2) 既設の管路をどの時点で、新しいタイプの管路に取替えることが望ましいか、を決定することが重要な課題となる。以下では、管路施設を導入してから一定の時間が経過した時点で、1)(ステップ1) 新規に導入する管路のタイプ、2)(ステップ2) 管路の最適取替えタイミングを決定するような方法論を提案する [111]。

5.4.2 定式化

まず、新規に導入する管路のタイプを決定する問題(ステップ1)を考える。いま、 N 種類のタイプの管路が利用可能であると考え、現時点において、タイプ i ($i = 1, \dots, N$) の管路を導入し、以下最適な取替え期間で管路を取替えた場合に、現時点以降に発生する期待ライフサイクル費用は

$$\begin{aligned} & J_i(0 : z_i) \\ &= \int_0^{z_i} f_i(t) \{c + I_i + J_i(0 : z_i)\} \exp(-\rho t) dt \\ & \quad + \tilde{F}_i(z_i) \{I + J_i(0 : z_i)\} \exp(-\rho z_i) \end{aligned} \quad (5.31)$$

と表される。このとき、最適な管路タイプ i^* は、期待ライフサイクル費用を最小にするタイプであり、

$$i^* = \arg \min_i \{J_i(0 : z_i) : i = 1, \dots, N\} \quad (5.32)$$

と定義できる。ここに、 $\arg \min_i \{\dots\}$ は、カッコ内を最小にするような i を指示する記号である。

ステップ1において求めた最適な管路タイプ i^* を与件として、既存の管路を最適に取替えるタイミングを決定する問題（ステップ2）を考える。いま、既存の管路タイプが M 種類存在すると考える。そのうち、タイプ j ($j = 1, \dots, M$) の管路に着目する。着目した管路は、直近の敷設、取替え時点から、破損・破壊事故が生起せず、時間 τ_j が経過したと考える。このとき、現時点から時間 t_j 後までに管路が破損する条件付確率 $F_j(t_j|\tau_j)$ は

$$F_j(t_j|\tau_j) = \frac{F_j(t_j + \tau_j) - F_j(\tau_j)}{\tilde{F}_j(\tau_j)} \quad (5.33)$$

と表される。式(5.33)の両辺を t_j で微分することにより、条件付確率密度関数 $f_j(t_j|\tau_j)$

$$f_j(t_j|\tau_j) = \frac{f_j(t_j|\tau_j)}{\tilde{F}_j(\tau_j)} \quad (5.34)$$

を得る。現時点まで管路が破損・破壊しなかった事実を与件として、さらに現時点以降、期間 t_j にわたって破損・破壊せずに、次の瞬間にはじめて破損・破壊する確率は条件付ハザードモデル

$$\lambda_j(t_j|\tau_j) = \frac{f_j(t_j|\tau_j)}{\tilde{F}_j(t_j|\tau_j)} \quad (5.35)$$

を用いて表現できる。ただし、 $\tilde{F}_j(t_j|\tau_j)$ は、現時点 τ_j まで破損・破壊が発生しなかった上に、さらに追加的に時間 t_j の間、破損・破壊が発生しない確率を表し、

$$\begin{aligned} \tilde{F}_j(t_j|\tau_j) &= 1 - F_j(t_j|\tau_j) \\ &= \exp\left\{-\int_0^{t_j} \lambda_j(s|\tau_j) ds\right\} \end{aligned} \quad (5.36)$$

と表記される。ワイブル劣化ハザード関数(5.3)を用いた場合、管路寿命の条件付確率密度関数 $f_j(t_j|\tau_j)$ 、および管路の条件付生存確率 $\tilde{F}_j(t_j|\tau_j)$ は、

$$f_j(t_j|\tau_j) = \alpha m t_j^{m-1} \exp\{-\alpha(t_j + \tau_j)^m\} \quad (5.37)$$

$$\tilde{F}_j(t_j|\tau_j) = \exp\{-\alpha(t_j + \tau_j)^m\} \quad (5.38)$$

と表される。

ここで、直近の敷設時点から時間 τ_j が経過したタイプ j の管路を、タイプ i^* の管路に取替える問題を考える。現時点から時間 z_j 後に管路をタイプ i^* に取替えることにより発生する期待ライフ

サイクル費用 $\tilde{J}_j^*(z_j : \tau_j)$ は

$$\begin{aligned} & \tilde{J}_j^*(z_j : \tau_j) \\ &= \int_0^{z_j} f_j(t_j | \tau_j) \{c + I_{i^*} + J_{i^*}(0 : z_{i^*})\} \exp(-\rho t_j) dt_j \\ &+ \tilde{F}_j(z_j | \tau_j) \{I + J_{i^*}(0 : z_{i^*})\} \exp(-\rho z_{i^*}) \end{aligned} \quad (5.39)$$

と表される。したがって、時間 τ が経過したタイプ j の管路の最適取替え時刻 $z_j^*(\tau_j)$ は

$$z_j^* = \arg \min_{z_j} \{\tilde{J}_j^*(z_j : \tau_j)\} \quad (5.40)$$

と表される。この問題の 1 階の最適化条件は

$$\begin{aligned} & f_j(z_j^* | \tau_j) \{c + I_{i^*} + J_{i^*}(0 : z_{i^*})\} \exp(-\rho z_j^*) \\ &= \{f_j(z_j^* | \tau_j) + \rho \tilde{F}_j(z_j^* | \tau_j)\} \\ & \{I + J_{i^*}(0 : z_{i^*})\} \exp(-\rho z_{i^*}) \end{aligned} \quad (5.41)$$

と表される。

5.5 実証分析

5.5.1 対象管路網と管路情報管理システムの概要

本研究の実証分析で対象とする大阪市の水道管路網は、現在総延長 5,000km を超えており、我国でも有数の布設延長規模となっている。大阪市においては、水道管路網の布設が開始されてからすでに 100 年以上経過しており、水道管路の一部では老朽化が顕在化してきている。さらに、水道管路網は、普通鋳鉄管： C 、高級鋳鉄管： F, FL 、ダクティル鋳鉄管、鋼管などといった種々の材質や継手形式が混在した構成になっている。大阪市では、1997 年（平成 9 年）度以降、普通鋳鉄管、高級鋳鉄管を、耐久性の高い鋼管あるいは離脱防止継手を有するダクティル鋳鉄管（以下、高規格耐震管： A という）に改良することにより、高規格耐震管路網の構築を目指している。表 5.1 に取替え対象となっている普通鋳鉄管 C および高級鋳鉄管 F, FL に関する基礎的な情報を

表 5.1: 対象管路の種類と延長

管種	管材質等	口径 ϕ (m)	総延長 (km)
C	普通鑄鉄管 (~1933)	90, 100, 125, 150, 200, 230, 250, 300	288
F	高級鑄鉄管 ライニング 無 (1933~ 1959)	100, 125, 150, 200, 250, 300	843
FL	高級鑄鉄管 ライニング 有 (1933~ 1959)	100, 125, 150, 200, 250, 300	80
A	高規格耐震 管 (1997~)	100, 125, 150, 200, 250, 300	2,935

示す。なお、*F* と *FL* は同じ高級鑄鉄管ではあるが、*F* は内面にライニングが施されていないのに対し、*FL* は内面にモルタルライニングが施されていることを意味している。

大阪市水道局では、1999年(平成11年)から、管路情報管理システム(マッピングシステム)を活用し、市内の管路図面にリンクする形で管理部署名、管理図面番号、管路種別(配水管、給水管等)、管種(*C*, *F*, *FL*, *A*)、継手形状、口径、布設年次、事故履歴、竣工図面といった管路情報を管理している。これらの情報に基づいて、管路が破損するまでの生存期間をワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現する。一方、管路の破損に伴う社会的損失および取替え費用に関しても、本情報管理システムを利用して以下のような考え方で算定した。はじめに、社会的損失については、谷口ら [112] 及び松下ら [113] の管路の取替え優先順位に用いるデータを使用する。このデータにおける社会的損失の考え方は以下のとおり。

1. 道路交通への被害

(a) 埋設されている場所の交通量

舗装種別(D, C, B, A, L交通)を基にした交通量の判別

(b) 事故による迂回時間、迂回人員の算出

事故発生により、交通車両が事故発生現場を避けて他の道路へ迂回しなければならないので、その迂回に要する時間と人数を算出

(c) 想定被害額の算出

想定被害額は、漏水事故発生が原因で道路交通車両が迂回した損失時間を、金額に換算する。換算に当っては、大阪市の市内総生産を用いる。

2. 市民(通行人)への被害

(a) 地区の分類

通行人が顕著に多くなる地区として、心齋橋難波、JR大阪駅・梅田、天王寺、京橋を抽出

(b) 事故による迂回時間、迂回人員の算出

配水管事故により、迂回を余儀なくさせられるのは、事故発生現場から半径500mの円範囲内を通行する人数と仮定

(c) 想定被害額の算出

想定被害額は、漏水事故発生が原因で市民(通行人)が迂回した損失時間を、金額に換算。換算に当っては、大阪市の市内総生産を使用。

3. 断水被害

使用者側の水が使えない被害額

(a) 断水区間の設定

漏水事故が発生した時の断水区間は、漏水事故が発生した路線の延長に関係なく、制水弁間の間隔に左右され、制水弁間が最小断水区間

(b) 断水による想定被害人数

断水区間に該当する被害者数を給水人口、小口径管路総延長から算出

(c) 断水による想定被害額

断水による想定被害額は、水道事業の費用対効果分析マニュアル[114]に基づく

4. 水道事業者の漏水損失

管路の取替えにより有効率が向上し、給水収益損失を防ぐという考え方に基づき評価

つぎに、管路の取替え費用は、過去の取替え費用の実績値を用いている。なお、以下の実証分析では、管路情報管理システムに情報が収録されている管径 $\phi 300$ 以下の管路を分析対象としたことを断っておく。

5.5.2 ハザードモデルの推計結果

管路情報管理システムに収録された事故履歴データなど、利用可能なデータ ($C:1,944$ 件, $F:6,060$ 件, $FL:548$ 件, $A:10,000$ 件) を用いて、ワイブル劣化ハザードモデルを最尤法により推計した。なお、詳細は参考文献 [88] に譲るが、使用したデータには管路が破損したものだけでなく、当然ながら管路が健全であるものも含まれている。推計に際しては、管路タイプごとにこれらのデータをグループ化し、それぞれに対してワイブル劣化ハザードモデルの推計を行った。

また、未知パラメータ α_i に関しては、式 (5.4) で記述したように、

$$\alpha_i = x\beta'_i \quad (5.42)$$

と定義した。上式中、 x は説明変数ベクトルであり、管種以外の要因が管路寿命に及ぼす影響についても考慮した。複数の説明変数の組み合わせに対して推計を実施した結果、本解析では、説明変数を考慮しないケース (ケース 1): $\alpha_i = \beta_1$ と、説明変数として管路長を採用するケース (ケース 2): $\alpha_i = \beta_1 + \beta_2 x_2$ を採用した。ちなみに、説明変数の候補として交通量や地盤条件などに対しても同様にハザードモデルの推計を行ったが、 t -値や符号条件からその影響が有意ではないと判断するに至った。両ケースの推計結果を管種別 (C, F, FL, A) に、説明変数を考慮しない (説明変数無) ケース (ケース 1) と説明変数として管路長を採用する (説明変数有) ケース (ケース 2) 図 5.2, 図 5.3, 図 5.4, 図 5.5 を示す。さらに、これらを総括したものを表 5.2 と表 5.3 に示す。同表には各推計パラメータに対する t -値, 対数尤度, AIC [115] も併せて示している。推計結果から、両ケースのいずれの管路においても加速度パラメータ m_i が 1 以上となっており、時間の経過とともに破損確率が大きくなるが見て取れる。さらに、両ケースの AIC を比較したところ、どの管路タイプにおいても AIC が小さくなるのはケース 2 であることから、管路延長の影響を考慮したケース 2 を最終的なモデルとして採用した。

ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を用いて、算出した 4 種類の管種 (C, F, FL, A) の

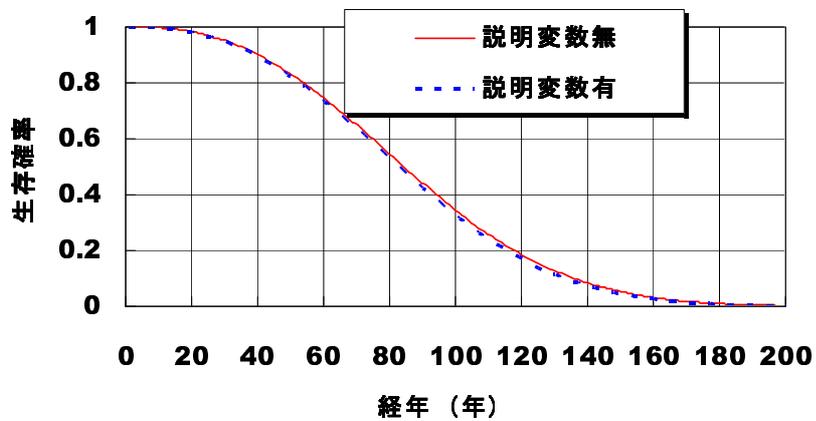


図 5.2: 延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 C（普通鋳鉄管）の場合

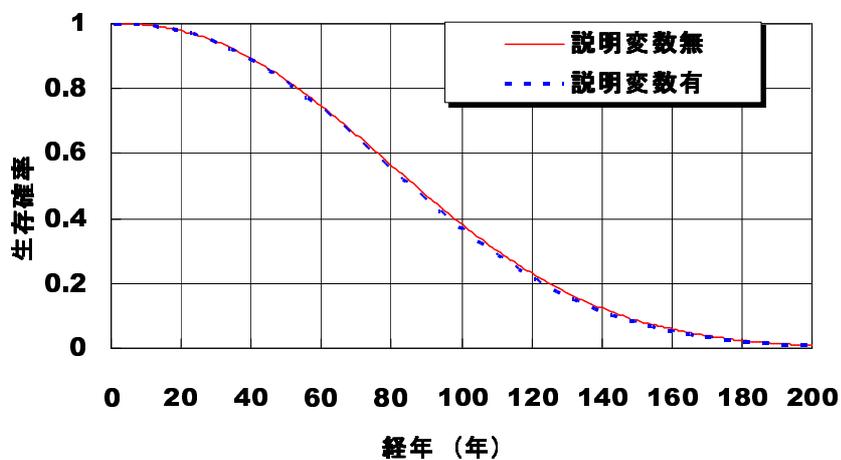


図 5.3: 延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 F（高級鋳鉄管（ライニングなし））の場合

生存曲線を図 5.6 に示す。生存曲線はワイブル劣化ハザードモデルの推計結果に基づき、式 (5.6) によって算出した。同図は、それぞれの管路の経年と生存確率の関係を表している。これら

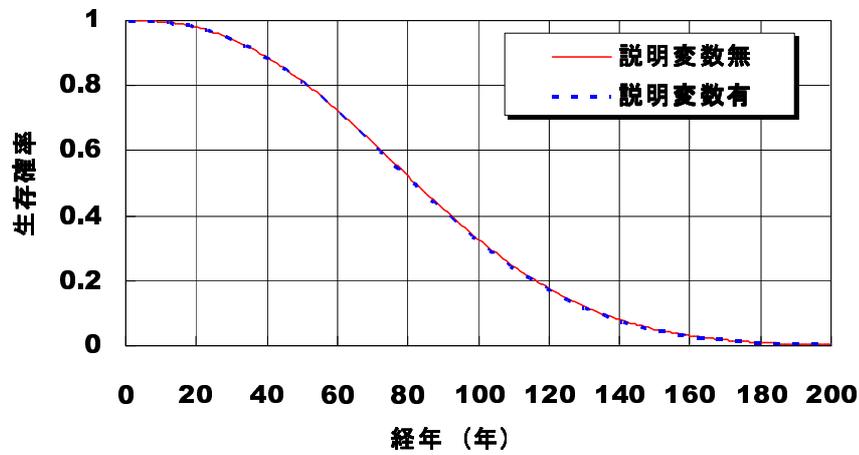


図 5.4: 延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 FL (高級鋳鉄管 (ライニングあり)) の場合

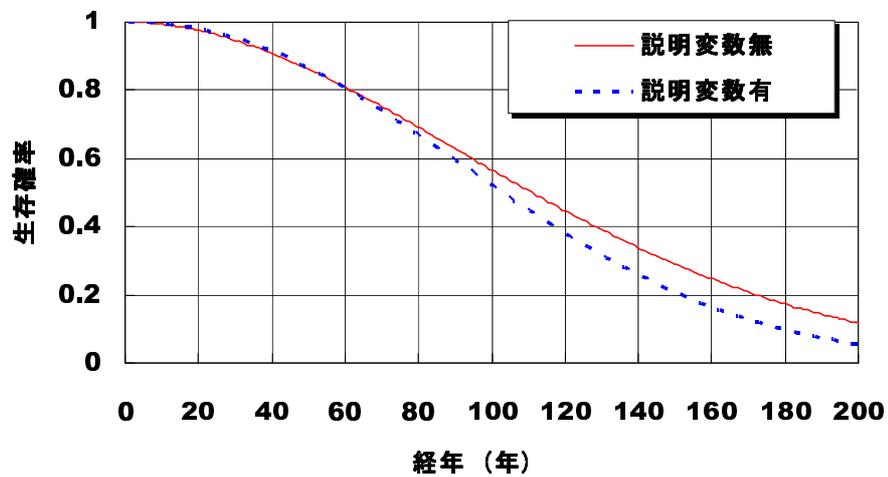


図 5.5: 延長を説明変数とする場合としない場合の比較：管種 A (ダクタイル鋳鉄管) の場合

の生存曲線を比較すると、経年管路の3種類の管種 (C, F, FL) の中では、高級鋳鉄管 FL の破損確率がやや高いものの、それらの生存曲線に大きな差異はない。また、埋設時から 80~85 年程

表 5.2: ワイブル関数のパラメータの算定 (ケース 1)

管種	α_i	m_i
<i>C</i>	1.11E-05 (28.53)	2.50 (30.28)
対数尤度: -2,524.86		
AIC: 5,053.72		
<i>F</i>	2.55E-05 (46.26)	2.29 (48.83)
対数尤度: -6,759.92		
AIC: 13,523.84		
<i>FL</i>	1.81E-05 (14.54)	2.40 (15.43)
対数尤度: -663.99		
AIC: 1,331.98		
<i>A</i>	8.87E-05 (29.42)	1.907 (31.38)
対数尤度: -3,325.27		
AIC: 6,654.54		

注意: 括弧内は t - 値を示す .

表 5.3: ワイブル関数のパラメータの算定 (ケース 2)

管種	β_1	β_2	m_i
<i>C</i>	2.51E-06 (6.40)	1.49E-04 (19.67)	2.48 (34.91)
対数尤度: -2,012.96			
AIC: 4,031.92			
<i>F</i>	4.92E-06 (9.34)	3.25E-04 (32.94)	2.29 (56.61)
対数尤度: -5,574.32			
AIC: 11,154.64			
<i>FL</i>	6.73E-06 (4.38)	1.22E-04 (7.37)	2.39 (17.79)
対数尤度: -554.04			
AIC: 1,114.08			
<i>A</i>	8.27E-06 (10.12)	4.18E-04 (26.64)	2.14 (35.87)
対数尤度: -2,791.14			
AIC: 5,586.27			

注意: 括弧内は t - 値を示す .

度経過した段階で生存確率が 0.5 に到達することが確認できる . 一方で , 高規格耐震管 *A* は , 約 100 年で生存確率が 0.5 となっており , 既設 3 種類の管種よりも 1.2 倍程度耐久性が向上していることが理解できる . したがって , 管種の取替え政策を考える場合 , いずれの管種も管種 *A* に取替えることが合理的であると言える .

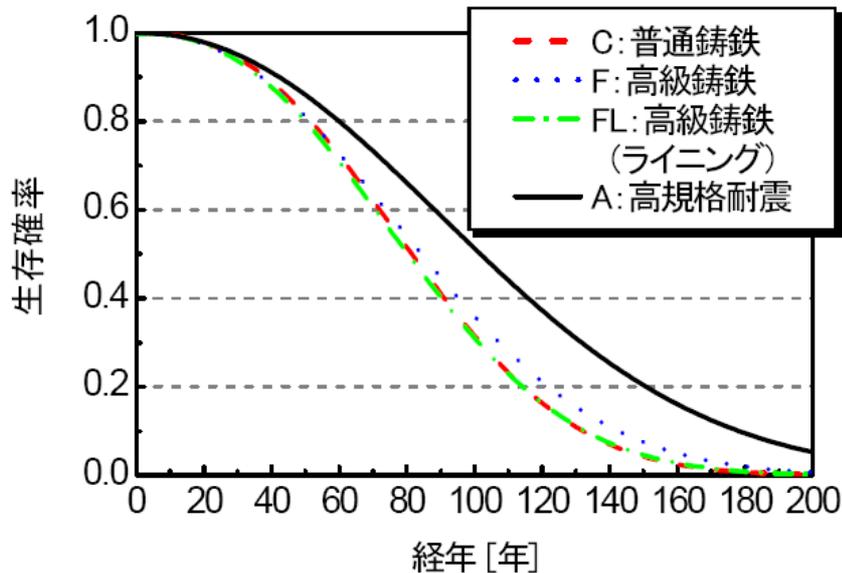


図 5.6: 管種ごとの生存曲線

表 5.4: 期待ライフサイクル費用および最適取替え期間(管路の異質性を考慮した場合, しない場合)

管種	C	F	FL	A
期待ライフサイクル費用(千円)	480.64 (491.33)	497.32 (510.74)	510.36 (526.34)	397.25 ()
最適取替え期間(年)	55 (56)	59 (60)	55 (55)	81 ()

注意: 括弧内は同じ管路で取替えを行った場合を示す。

5.5.3 期待ライフサイクル費用と最適取替え期間

ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果と各種費用に基づき, 期待ライフサイクル費用と管路の最適取替え期間を算出する。

はじめに, 取替え対象となる管路は再び同じタイプの管路へと取替えられるものと考え, 最適取替え期間 t^* を求める。それぞれの管路に対して, 取替え期間を変数として, 期待ライフサイクル費用を試算した結果を図 5.7 に示す。同図より, 管路の破損に伴う社会損失と取替え費用の間にはトレードオフ関係が成り立つため, それらの総和である期待ライフサイクル費用の最小値は唯一に定まることが見て取れる。さらに表 5.4 には, 管路ごとの期待ライフサイクル費用の最小値と, その最小化を達成する最適取替え期間を整理した。最適取替え期間は, C で 56 年, F

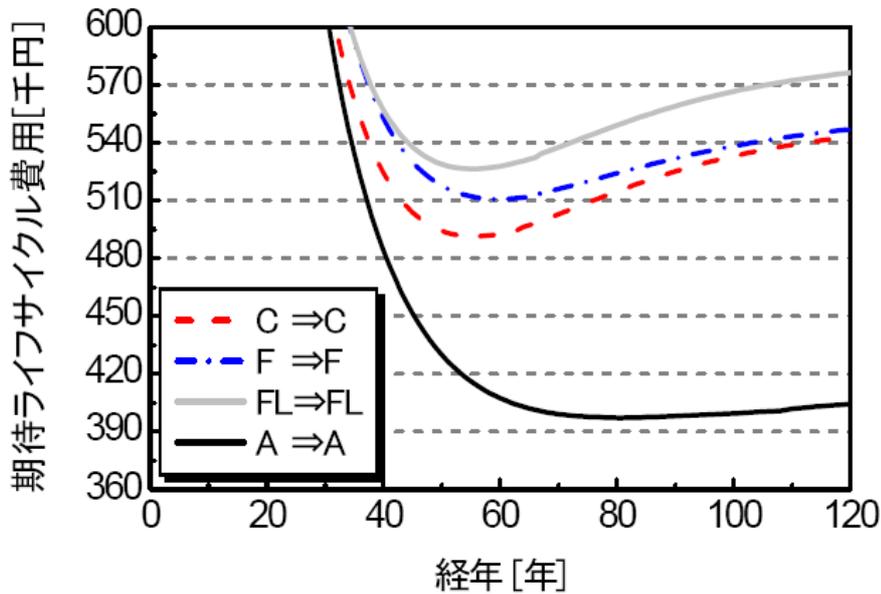


図 5.7: 期待ライフサイクル費用と最適取替え期間（管種変更のない場合）

は 60 年， FL は 55 年であり，さらに， A に関しては期待ライフサイクル費用を最小にする最適な取替え期間は 81 年であった。

つぎに，取替え前後で管路タイプが異なるような最適取替え政策（いずれの管種も管種 A に取替え）を検討する．図 5.8 は，古いタイプの管種を新しいタイプの管種（高規格耐震管： A ）に交換する場合の最適取替え期間を算出したものである．また，管路ごとの期待ライフサイクル費用の最小値と，その最小化を達成する最適取替え期間も先と同様に表 5.4 に示す．同一管路での取替え（図 5.7）との比較を通した全体的な傾向として，新しい管種タイプ A に交換しても取替え期間の延長を期待することはできないが，期待ライフサイクル費用の低減を実現することは可能である．例えば，タイプ C をタイプ A に取替える場合，最適取替え期間は 56 年から 55 年へと 1 年短縮される程度であるが，期待ライフサイクル費用は約 10 千円低減する．

5.5.4 感度分析

管路の最適取替えタイミングおよび期待ライフサイクル費用は，様々な要因によって変動する．ここでは，具体的な変動要因として，割引率 ρ ，社会的費用 c および取替え費用 I に着目し，これらのパラメータ値の変化が最適取替え政策，期待ライフサイクル費用に及ぼす影響を分析する．以

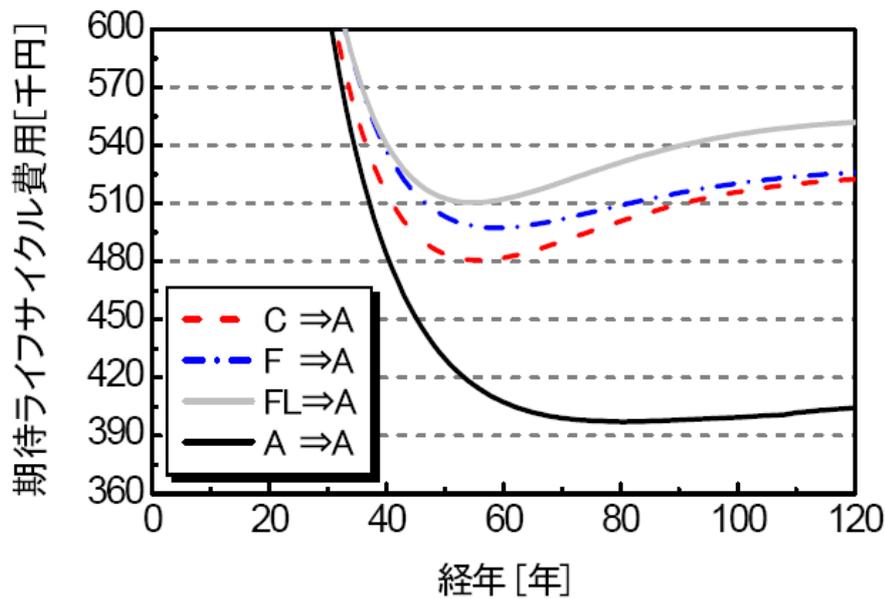


図 5.8: 期待ライフサイクル費用と最適取替え期間（管種 A に改良される場合）

下，社会的損失，取替え費用，割引率の順に感度分析を実施するが，割引率： $\rho = 0.04$ ，社会的損失： $c = 5,000$ 千円，取替え費用： $I = 1,000$ 千円 をベンチマークと設定する．また，取替え政策は，全タイプの管種をタイプ A に取替える政策を採用している．

図 5.9 は割引率 ρ を 0 ~ 0.08 まで変化させた時の管路 C の最適取替え期間の変化を示したものである．最適取換え期間は，同一の割引率のもとで，期待ライフサイクル費用の最小化を達成する取替え期間である．さらに同図には，費用の変化が与える影響についても考察するために，社会的損失を変化させた 3 ケース ($c = 4,000$ 千円， $c = 5,000$ 千円， $c = 6,000$ 千円，ただし取替え費用は $I = 1,000$ 千円に固定) の結果を示している．例えば，ベンチマーク（割引率： $\rho = 0.04$ ，社会的損失： $c = 5,000$ 千円，取替え費用： $I = 1,000$ 千円）と比較すると，割引率が 0.01 増減するだけで最適取替え期間が 10 年程度変動する．さらに，ベンチマークから相対的に社会的損失が 20%（すなわち， $C = 4,000$ 千円）低減することで，最適取替え期間が 10 年程度遅くなることが理解できる．さらに，割引率 ρ が小さくなる（0 に近づく）とき，3 ケースの差はほとんどなくなる．また，割引率が 0.06 までの範囲で，割引率に対する最適取替え期間の変化が顕著となる．

つぎに，社会的損失の変動が最適取替え期間に与える影響を考察する（図 5.10）．同図は，

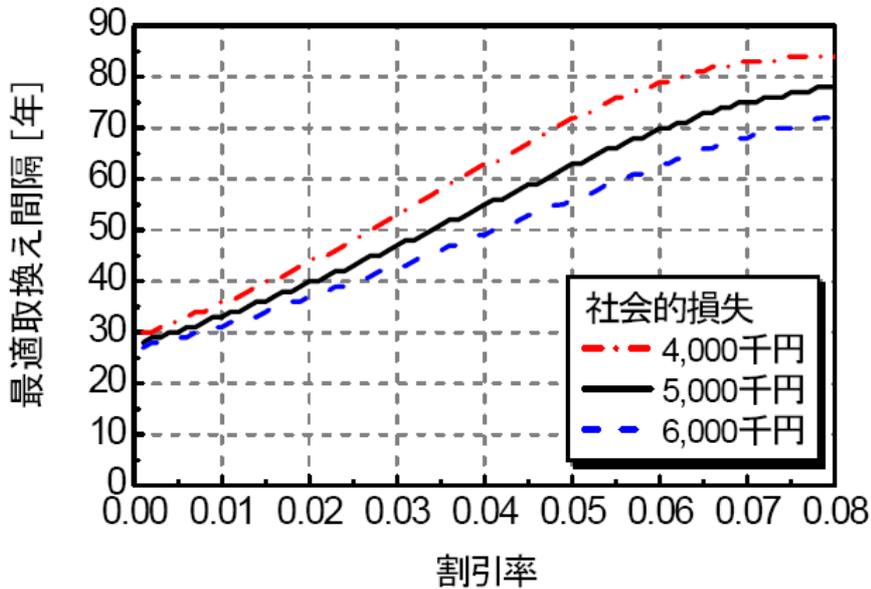


図 5.9: 割引率に対する感度分析

割引率を 0.03, 0.04, 0.05 と設定した 3 ケースに対して, 社会的損失を 3,000 千円から 8,000 千円まで変化させたものであるが, 社会的損失の増加が最適取替え期間を逐次的に短縮させていることがわかる。例えば, 社会的損失をベンチマーク ($\rho = 0.04, C = 5,000$ 千円) よりも 500 千円増加させただけでも, 最適取替え期間が 3 年早まる。

図 5.11 は, 取替え費用 I に着目したこれまでと同様の感度分析の結果である。最適取替え期間は, 取替え費用の増加に対して線形的に変化し, 取替え費用が大きくなるほど, 取替え期間が先送りされることがわかる。ベンチマークケースに対して, 取替え費用が 500 千円増加すると, 最適取替え期間が 7~8 年増加する。

本章の研究では, 管路の最適取替えタイミングおよび期待ライフサイクル費用に影響を及ぼす要因として, 割引率, 社会的費用および取替え費用に着目したが, 勿論その他にも様々な要因に対する分析が必要である。例えば, 今後の技術革新によって実用化される管路, また管路網として水道サービスの接続性を考慮した更新戦略を立案する際にはリアルオプションを用いた検討が不可欠である。

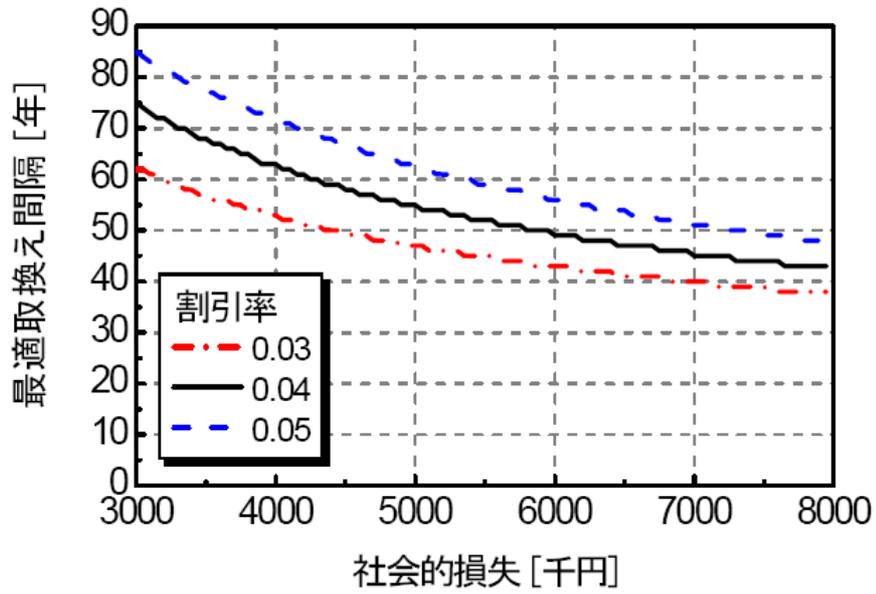


図 5.10: 社会的損失に対する感度分析

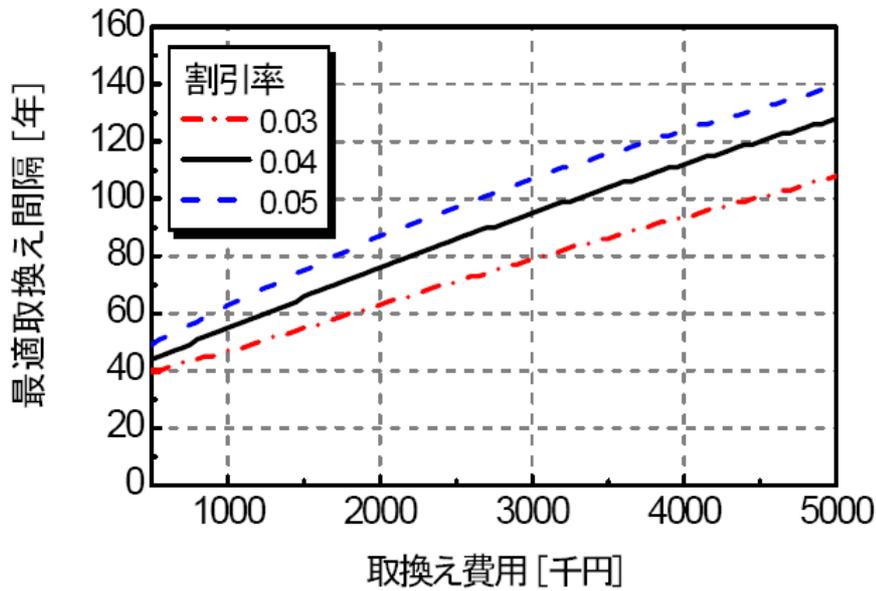


図 5.11: 取替え費用に対する感度分析

5.5.5 割引率に関する検討

瞬間的割引率 ρ を 0 とした極限においては，式 (5.22) の分母が 0 となり，期待ライフサイクル費用を定義できない．そこで，期待ライフサイクル費用の代わりに管路タイプ i ($i = 1, \dots, I$) の平均

費用 (Average Cost) を

$$AC_i(z) = \frac{\int_0^z (c + I_i) f_i(t) dt + \tilde{F}_i(z) I_i}{z} \quad (5.43)$$

で評価する．管路タイプ i に関して，平均費用を最小にするような取替え期間 z_i^* は最適取替えモデル

$$\min_z \{AC_i(z)\} \quad (5.44)$$

を解くことにより求めることができる．つぎに，次回の取替え時点で管路タイプを変更する場合を考える．取替え後における最適な管路タイプ i^* は，年平均期待費用を最小にする管路タイプであり，

$$i^* = \arg \min_i \{AC_i(z_i^*) : i = 1, \dots, N\} \quad (5.45)$$

と定義できる．また，既存のタイプ j の管路を期間 z_j にわたり継続的に利用することによって，次の取替え時期まで平均費用

$$\begin{aligned} \overline{AC}_j^{i^*}(z_j) \\ = \frac{\int_0^{z_j} f_j(t_j|\tau_j)(c + I_{i^*}) dt_j + \tilde{F}_j(z_j|\tau_j) I_{i^*}}{z_j} \end{aligned} \quad (5.46)$$

が発生する．ただし， $\tilde{F}_j(t_j|\tau_j)$ は，現在時点 τ_j まで破損・破壊が発生しなかった上に，さらに追加的に時間 t_j の間，破損・破壊が発生しない確率である．一方，現時点において最適なタイプ i^* が使用されている場合，每期平均費用 $AC_{i^*}(z_i^*)$ が発生する．この時，既存タイプの管路を z_j 期にわたり継続的に利用することにより，追加的に発生する累積追加費用 (Cumulative Additional Cost) は，

$$\overline{CAC}_j^{i^*}(z_j) = \{\overline{AC}_j^{i^*}(z_j) - AC_{i^*}(z_i^*)\} z_j \quad (5.47)$$

と表わされる．したがって，時間 τ が経過したタイプ j の管路の最適取替え時刻 $z_j^*(\tau_j)$ は，

$$z_j^* = \arg \min_{z_j} \{\overline{CAC}_j^{i^*}(z_j)\} \quad (5.48)$$

と表される．

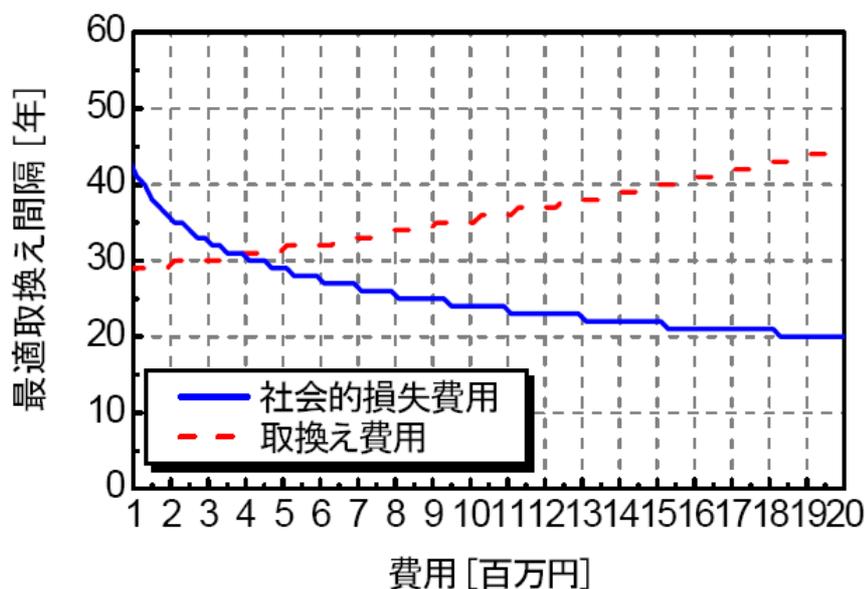


図 5.12: 社会的損失と取替え費用を変数とした場合の感度分析 ($\rho = 0$)

以上の平均費用 ($\rho = 0$) を最小化するような最適取替え期間を算出し、先と同様の感度分析を実施した結果を図 5.12 に示す。同図では、社会的損失と取替え費用を変数とした場合の最適取替え期間の変動を図示している。平均費用法は、施設の永続的な使用を前提とする場合には、期待ライフサイクル費用の最小化を達成するのみならず、水道ネットワーク全体の予算平準化も同時に実現するという性質を有する [100]。また、同図の結果より、現在の社会・経済状況のように、高い割引率を採用することが難しく、かつ社会的損失費用に代表されるように利用者へのサービス向上や第三者への被害防止が重視される状況においては、水道管路の取替え期間を短縮することが望ましい政策といえる。

5.6 考察

第3章で述べたように、管路の劣化には様々な原因が考えられ、本章では、管路の情報管理システムの様々なデータを用いて劣化予測を行ったが、結果的には事故履歴データから予測することが有効であった。逆に、データ管理されている管路情報にあって、区間の管理延長は1施工区間であり、その延長はまちまちであったため、説明変数に入れるか否かの検討を行った結果、上述

したように延長を考慮したケースをモデルとしたが、その影響は、図5.2から図5.5に示すように大きいものではない。これは、同じ管種であっても事故の発生は均一ではないことを示すものであり、埋設場所による偏りを示唆するものである。

このため、物理的現象を説明するには至らなかったが、埋設管路という点検情報の入手できない社会基盤にあっても、漏水事故データから劣化予測が可能であることを示すことができた。

本手法は、漏水事故データと社会的損失額データを加味した管路情報のデータベースの構築を要するが、劣化予測から更新時期の推計まで、いずれの事業体においても導入可能である。また、導入に至らない場合でも、本章で示した感度分析が、各事業体において参照できるものと期待する。

また、管路の更新では、埋設されている旧管種から新管種へ改良するが、こうした新技術の移行を考慮した点で、先駆的な研究になっているものとする。

5.7 結語

上水道管路は地下埋設物であり、点検により劣化水準を把握することが困難である。その一方で、管路が破損すれば多大な社会的費用が発生するため、老朽化した管路を予防的に取替えることが必要となる。本研究では、管路の劣化過程をワイブル劣化ハザードモデルで表現し、破損事故による社会的費用と管路の取替え費用で構成される期待ライフサイクル費用を最小にするような管路の最適取替えモデルを提案した。本研究で提案した最適予防取替えモデルを大阪市水道局が管理する上水道管路のアセットマネジメント問題に適用し、本研究で提案した方法論の有効性を実証的に検証した。

本研究で提案した最適予防取替えモデルに関しては、多方面に拡張が可能である。上水道管路のアセットマネジメント問題に関しても、以下のような重要な研究課題が残されている。第1に、新しい管種であるダクタイル鋳鉄管に関しては、管路の破損に関する情報の蓄積が十分ではない。今後、新しいデータの蓄積により、ワイブル劣化ハザードモデルの精度向上を行うことが望まれる。その際、管路の破損事故のデータが追加された時点で、ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ更新が必要となる。第2に、管路施設は単体で機能するわけではなく、多くの管路群によりネットワークが形成されている。管路取替え費用に予算上の制約がある場合、管路取替えの優先順位

を決定することが必要となる．本研究においても期待ライフサイクル費用に社会的損失を考慮することで優先順位に資する重要性に配慮しているが，このような取替え順位の決定を深度化する場合，管路のネットワーク特性を踏まえた管路の重要性に関する配慮が必要となる．第3に，管路の取替えにより，古いタイプの管種（普通鋳鉄管，高級鋳鉄管）がより耐震性の高い管種（ダクタイル鋳鉄管）に取替えられている．本研究では，地震リスクを考慮していないが，管路施設の耐震性評価を行うためには，地震被害リスクを考慮した最適予防取替えモデルを定式化することが必要となる．

付録

ライフサイクル費用 $J(0 : z)$ を求めるためには，式中のガンマ関数を算出する必要がある．本研究においてはライフサイクル費用を解析的に算出することが困難であるために，数値計算による代用法を述べる．

$$J(0 : z) = \frac{(c + I)\Gamma(z) + I\Lambda(z)}{1 - \Gamma(z) - \Lambda(z)} \quad (5.49)$$

ここで， $\Gamma(z)$ と $\Lambda(z)$ は次式のとおりに定義することができる．

$$\begin{aligned} \Gamma(z) &= \int_0^z f(t) \exp(-\rho t) dt \\ &= \int_0^z \alpha m \tau^{m-1} \exp(-\alpha \tau^m - \rho t) dt \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} \Lambda(z) &= \tilde{F}(z) \exp(-\rho z) \\ &= \exp(-\alpha z^m - \rho z) \end{aligned} \quad (5.51)$$

ガンマ関数は，さらに次のように展開することが可能である．

$$\begin{aligned} \Gamma(z) &= \int_0^z (\alpha m \tau^{m-1} + \rho - \rho) \exp(-\alpha \tau^m - \rho t) dt \\ &\Leftrightarrow - \int_0^z \exp(-\alpha t^m - \rho t) d(-\alpha t^m - \rho t) \\ &\quad - \rho \int_0^z \exp(-\alpha t^m - \rho t) dt \\ &= 1 - \Lambda(z) - \rho \int_0^z \exp(-\alpha t^m - \rho t) dt \end{aligned} \quad (5.52)$$

式 (5.49) の分母は

$$1 - \Lambda(z) - \Gamma(z) = \rho \int_0^z \exp(-\alpha t^m - \rho t) dt \quad (5.53)$$

で与えられる．式 (5.52) と (5.27) を式 (5.49) に代入すると，

$$\begin{aligned} J(0 : z) &= \frac{(c + I) [\Gamma(z) + \Lambda(z) - 1] + c + I - c\Lambda(z)}{1 - \Lambda(z) - \Gamma(z)} \\ &= \frac{c + I - c\Lambda(z)}{\rho \int_0^z \Lambda(t) dt} - (C + I) \end{aligned} \quad (5.54)$$

を得る．上式より明らかなように， $\Lambda(z)$ の積分を算出することが必要となる．このとき，離散級数を用いて積分を拡張したときの一般形は，

$$I_k = \int_0^{kdt} f(x) dx \quad (5.55)$$

となる．ここで， k は繰り返し回数であり， dt は微小時間間隔である．例えば， dt は $d = 0.01$ ，あるいは 0.001 ，さらにはそれら以上に小さい値を取る．本研究の場合には，具体的に，

$$\begin{aligned} I_{k+1} &= \int_0^{(k+1)dt} f(x) dx \\ &= I_k + \int_{k \cdot dt}^{(k+1)dt} f(x) dx \\ &= I_k + \frac{[f(kdt) + f\{(k+1)dt\}]dt}{2} \end{aligned} \quad (5.56)$$

で表わされる．最終的に，積分は数値計算により簡単に算出することができる．以上より，式 (5.54) を直接的に解く代わりに， Z を変数としたときのライフサイクル費用 $J(0 : Z)$ の最小値をニュートン法などを援用して数値的に評価することが可能となる．

第6章 上水道管理会計の試行的作成

6.1 緒言

水道は快適な市民生活や都市活動を営む上で欠くことのできない重要なインフラ施設であり、安全で安心できる水の持続的な供給を確保するため、現状に満足するのではなく、水道の信頼を維持する努力を継続し、将来ともより良い水道サービス水準の提供を目指していくことが求められている。その中でも水道事業を運営管理する水道事業者等の役割は重大である。高度経済成長期に急速に整備された水道施設の老朽化が進行し、大規模な更新ピークを迎えつつある今、水道施設の計画的更新は全国の水道事業者に共通する重要かつ喫緊の課題となっている。

6.2 厚生労働省によるアセットマネジメントに関する手引きの策定

6.2.1 水道ビジョンフォローアップ検討会における議論

厚生労働省では、水道事業及び水道行政のあるべき姿を指し示した「水道ビジョン」2004年（平成16年）6月に策定した。この中で、「安定」、「持続」を長期的な政策目標として示し、「中長期的な財政収支にもとづく計画的な施設の整備・更新」を水道の運営基盤強化のための施策課題の一つとして位置づけたが、水道事業等における施設更新・資金確保の取組は必ずしも十分ではない状況にあった。引き続き、平成19年度には「水道ビジョンフォローアップ検討会」での検討がなされ、同検討結果を踏まえて2008年（平成20年）7月には「水道ビジョン改訂版」が取りまとめられた。この中で、アセットマネジメントは、重点取組項目として、『アセットマネジメント手法も導入しつつ、中長期的な視点に立った、技術的基盤に基づく計画的・効率的な水道施設の改築・更新や維持管理・運営，更新積立金等の資金確保方策を進めるとともに，改築・更新のために必要な負担について需要者の理解を得るための情報提供の在り方等について，具体的検討を推進する』と記述されている。この「水道ビジョンフォローアップ検討会」では、水道施設の更新・再

構築に関する現状と課題について議論がなされており、受益者負担が原則の水道事業にあって、需要者の理解を得ながら中長期的な視点に立って改築・更新費用を確保しつつ事業を進めることの重要性が指摘されている。すなわち、水道施設の更新・再構築に関する課題としては、全国的に今後の更新需要が増大するのに対して施設の更新率は必ずしも十分な水準にない一方で、将来の施設改築・更新に向けて内部留保金や積立金等の自己資金確保を計画的に行っている水道事業者等は少ないのが実態であり、今後とも持続可能な水道事業を実現させるためには、各水道事業者等が、人口減少・負担能力低下等の社会情勢の変化に適切に対応すべく、長期的な視野に立って、技術的基盤に基づく施設の更新計画を策定し、必要に応じて新しい資金源も活用しつつ自己資金確保を計画的に行うとともに、施設の改築・更新のためには相応の負担が必要であることについて需要者や議会等の理解を得るための情報提供を実施していく体制を早期に築き上げべきとしている。

6.2.2 水道事業へのアセットマネジメント導入に際し留意されている事項

国民の利益向上のために、長期的視点に立って、効率的かつ効果的に管理運営する体系化された実践活動」であり、継続的な活動が重要となる。水道事業へのアセットマネジメント手法の導入にあたっては、他の公共インフラにおけるアセットマネジメントの取組動向、水道システムの持つ特性・特徴を十分勘案する必要があるが、その際、以下の事項に留意すべきとされている [116]。

1. 技術的な知見に基づく資産管理

適切な資産管理を行うため必要となるデータ整理・点検・診断評価・計画策定いずれの局面においても、水道に関する技術的な知見に立脚したものでなければならない。

2. 中長期的な視点に立った計画策定

今後多くの水道事業者等が大量更新期を迎えることから、中長期的なスパンで更新需要量・ピークを把握するとともに、水道システム全体から見た施設の再構築、事業の平準化等の検討も進める必要がある。また、施設整備・更新財源の一部を起債で賄う場合、例えば政府債の償還期間は30年であり、世代間の負担の公平性の観点から、長期的な資金収支の見通しが必要となる。これらを勘案すると、更新事業計画は、少なくとも30～40年程度先まで見

据えたものとするのが重要となってくる。さらに、更新事業計画の実行可能性を担保するため、同じく中長期的視野に立って、事業計画の実施による財政への影響、財政収支や料金水準の妥当性等をチェックし、更新事業計画を遂行するために必要な資金確保方策・財政計画を検討する必要がある。

3. 継続的な管理水準の向上

水道サービスは国民にとって根幹的・基盤的なものであり、水道事業として目指すべき資産管理の理想像は全国共通であるべきだが、その経緯や歴史、施設整備、事業運営は各水道事業によって千差万別であり、所有施設のデータ整備状況、健全度や老朽度の診断・評価実施状況などの実態は事業者によって大きく異なるものと推察される。この点を踏まえ、それぞれの事業体において、その現状にあった制度で将来必要となる更新需要量やそのピーク時期、財政収支への影響度を定量化・視覚化することとしている。その上で、データ整備や診断評価に関する諸課題について実現可能な改善計画を立て随時改善を行うことにより、資産管理水準をステップ・バイ・ステップで向上させるというもの。

4. 管理指標の設定

資産管理が計画的かつ効果的に実施されているかを水道事業者等自らが確認するために、適切な管理指標として内部評価指標を設定し、その推移を定量的に把握し、管理状況を評価することが重要となる。具体的には、施設の状態及び更新等に関する技術的指標として施設の点検状況、施設の健全度（老朽度）、更新需要量等）、財政状況に関する指標として収益性、安定性等が考えられる。また、施設の更新事業の必要性や効果を需要者等に説明し理解を得ることが重要であり、内部評価指標とは別に、わかりやすいアウトカム指標である外部評価指標を設定し、需要者等への情報提供に努めることが望ましい。

5. 資産管理の実践サイクル

資産管理の実践にあたっては、点検調査や施設の診断評価で得られたデータ等を活かし、PDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルを軸としたマネジメントサイクルを構築し、各種改善情報をフィードバックし、より高い水準の資産管理を実践していくことが望ましい。

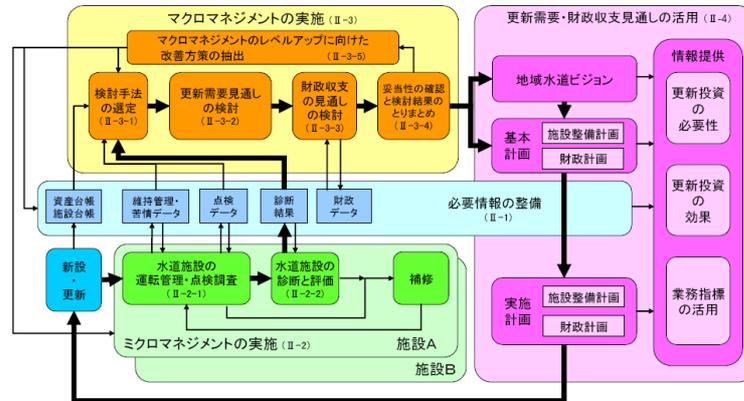


図 6.1: 水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）の構成要素と実践サイクル [6]

6. 実施体制の確立

技術的な知見に基づく資産管理活動を単発・一過性のものに終わらせず，継続的なものとするためには，通常の水道事業運営体制の中で，水道運営上の様々な業務の一環として資産管理活動を継続的に行うことが望ましい。

6.2.3 水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引きについて

厚生労働省では、「水道ビジョンフォローアップ検討会」，「水道ビジョン改訂版」を踏まえ，アセットマネジメントの重要性の認識を広め，さらに，全国の水道事業者に対しアセットマネジメントの実践を進めるため「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」（以下「手引き」と言う。）を 2009 年（平成 21 年）7 月に策定・公表し，全国の水道事業体にその使用を働きかけている [117]。そのアセットマネジメントは，図 6. 1 にあるように，必要情報の整備，マイクロマネジメントの実施，マクロマネジメントの実施，更新需要・財政収支見通しの活用の 4 つの要素で構成されている。

必要情報の整理

「必要事項の整理」とは、すべての水道施設を対象として、アセットマネジメントを実践するに際して必要となる各種情報を収集蓄積整理することであり、手引きでは、資産を「構造物及び設備」と「管路」に分けて扱うこととしている。これは、「構造物及び設備」が目視等で資産の健全度が比較的把握しやすいのに対し、「管路」は埋設されているために、その状態把握が難しく、その数量も膨大となるといった特性の違いによるもの。

水道システムを構成する資産は膨大であり、紙ベースによる管理では、施設の拡張や、経年によるデータ量の増加等により、データ管理が膨大となることや、保管場所の確保や紙質の劣化（データの散逸）等の問題もあることから、電子データによるデータベース化が望ましい。

ミクロマネジメント

ミクロマネジメントとは、水道施設の点検などの日常的な維持管理活動を指し、「運転管理・点検調査」、「診断・評価」、「補修」に細分化される。

「運転管理・点検調査」では、日常的な維持管理活動から得られた情報から施設状況を把握し、定期的な点検によって劣化の進行や故障・事故発生の予兆などを確認し、必要に応じて補修を実施する。「診断評価」では、効率的かつ適正な時期に更新を行うためには、機能診断を行って当該施設の健全度を評価し、その評価に基づいて更新時期を設定する。

マクロマネジメント

マクロマネジメントは、水道施設全体の資産管理のことであり、ミクロマネジメントで得られた情報に基づいて、水道施設全体の視点から各施設の優先順位を考慮した上で、中長期的な観点から、「更新需要見通しの検討」と「財政収支の見通し」について検討する。

1. 更新需要の見通しの検討

具体的には、「更新時期の設定」、「再投資価格の設定」を行う「更新時期の設定」においては、「状態監視保全」と「時間管理保全」の考え方と、施設の「重要度・優先度」がポイントとなる。ここで、「状態監視保全」とは、点検や診断によって、個別の施設の状況に応じて更

新時期を設定する考え方であり、一方「時間監視保全」とは、法定耐用年数等によって、同じ区分に属する施設は、ほぼ一律に更新時期を設定する考え方である。

2. 財政収支の見通しの検討

「更新需要の見通し」の検討結果を活用し、内部保留がマイナスとなる、いわゆる「資金ショート」を生じないように、資本的収支、収益的収支、資金収支についてシミュレーションを行い、適切な財源確保方策について検討する。

6.3 「手引き」を用いたアセットマネジメントについての考察

手引きでは、アセットマネジメント（資産管理）の実践に当たって、理想とするべき資産管理の水準を念頭に置きつつも、現状のデータ整備状況等を勘案しつつ、まずは実施可能な手法で実践することを推奨しており、更新需要見通しの検討手法、財政収支見通しの検討手法それぞれで4つの段階を設定し、当初はできる範囲から、以降、段階的に詳細な検討を行うことを目指して行くこととし、全国の水道事業者に対し、まず、アセットマネジメントに取り組むためのツールに位置づけている。

したがってこの「手引き」により、全国の水道事業においてアセットマネジメントが展開されることとなり、水道事業の可視化とこれを基にした水道事業の更新のあり方について、全国規模の議論が始まることとなる。

本章では、この「手引き」についての考察を行うこととする。

水需要

この手引きによる財政収支を検討する際には、将来の水需要をどれだけ見込むかにおおきく左右されるが、現時点においては、これからの人口減少社会において想定される右肩下がり水需要予測については、現在の2000年版（社）日本水道協会の「水道施設設計指針」等をみてもこれまでの拡張時代の手法の記述にとどまっているなど、今後の知見の集積が待たれる分野となっている。

また、「手引き」にあるように30年から40年というスパンにおいて、水需要の減少を加味する場合、これを基にした財政収支を検討するのであれば、必ず現状維持では収支が悪化することから、何らかの手法、具体的はダウンサイジングや広域化等の効率化を図らなければ、値上げが必要との結論に至ってしまう。

更新積立金

手引きを基に、アセットマネジメントを進め、財政収支を検討すれば、将来に必要な更新費用が算定でき、必要な資金が導かれるが、これを単なる料金値上げの算定ツールとして活用しては意味がないだろう。水道事業は水道料金を原資とした独立採算経営によって成り立つものであるが、人口の減少が顕著になってきた日本においては、今後、水道施設の老朽化が進展し、近い将来に施設の更新時期が集中するものと想定される。このような状況の下、上水道のサービス水準を保つためには、長期的な財務債権計画と整合が図られるような維持管理計画を策定し、効率的な事業運営を図ることが求められる。また、維持補修費、更新費用の縮減、料金の設定の適正化に当たって必要となるアカウンタビリティの確保を目的とする会計システムの構築が望まれる。

すでに、下水道においては、堀ら [50] が、下水道アセットマネジメントにおいて、維持管理計画を最適化し、事業の安定性・継続性を確保していくため、異なる資産管理方式と資金調達方式を同時に考慮したライフサイクルコスト分析を実施し、財務会計と有機的に連携した管理会計を構築している。その中で、現行の公営企業会計基準では適用が認められていない繰延会計原則の適用について検討を行っている。こうした会計処理は、上水道においても有効なものと考えられ、その導入は検討されるべきであろう。

6.4 会計制度の上の課題

水道事業のアセットマネジメントを進める上で、水道事業における会計制度上の課題についても触れておきたい。

総務省は2009年（平成21年）6月「地方公営企業会計制度等研究会」を発足させ、1952年（昭和27年）の公営企業法の施行以降、半世紀に亘って続いた独自の会計制度全体を点検し、民間の仕組みに近づけることを目指すものであった。こうした背景には、現行の公営企業会計は、民間の

場合と比べ、財務状況が分かりにくい点があるためである。そのいくつかを挙げると、まず、「借入資本金」と呼ばれる借金であるが、民間であれば、負債になるが、公営企業では資本に計上できることから、その分、見た目の財務内容が良くなる。減価償却のやり方を変更することは、事務処理を伴い、また、料金で回収すべき部分が増えてしまうといった問題を抱える。しかしながら、現時点では、民間と比べれば、負担が適切かの判断が難しい状況にある。

また、資産では、国からの補助金を当てて建設した施設を減価償却の対象から除く「みなし償却」が認められており、耐用年数を過ぎて資産価値がなくなっても、補助金分だけ資産と資本が残ってしまう。つまり、更新の際に新設と同様の補助が受けられない場合、収支の面からは悪化してしまうこととなる。

こうした課題は、アセットマネジメントの取組み以前から指摘されてきたことであるが、全国の水道時事業体が一斉にアセットマネジメントに取り組むこととなった今日においては、いよいよ避けて通れない問題になりつつあるものと思われる。

「地方公営企業会計制度等研究会」は2009年（平成21年）12月に、報告書[118]を取りまとめているが、その中では、借入資本金の負債としての整理、「みなし償却制度」の廃止、退職給付引当金の引当の義務化等が謳われており、アセットマネジメントの導入と時期を一にして、会計制度についても会計基準の明確化を目指すこととなる。

6.5 「手引き」を用いた実証分析

ここで「手引き」に沿って第5章で行った管路の劣化予測を踏まえ、試算を行うこととする。

6.5.1 適用する水道事業体概要

試算には「手引き」で取り扱われている事例（A市水道事業）を用いることとする。

A市の水道事業は、昭和30年代に創設され、5次にわたる拡張事業を経て現在に至っており、現在は、計画給水人口70千人、計画1日最大給水量35千 m^3 で事業を行っている。

試算を行う管路延長は約320kmであり、そのうち約26kmが法定耐用年数（40年）を経過し、更新時期を迎えようとしている（表6.1）。

表 6.1: 適用事例の管路延長

区 分	延 長 (km)	管路の経過年数別延長(km)		
		40年以上 (経年管)	20～40年	20年未満
取・導水管	3.0	1.2	1.7	0.2
送水管	6.3	0.0	0.8	5.6
配水本管	48.9	7.7	36.6	4.6
配水支管	259.4	17.4	107.9	134.2
計	317.6	26.3	147.0	144.6

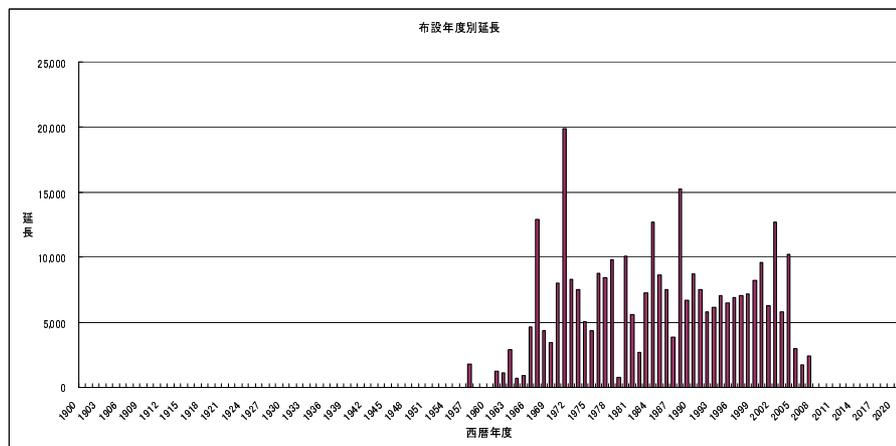


図 6.2: 取得年度別帳簿原価

6.5.2 適用結果

アセットマネジメントを考える上では、施設更新のタイミングが問題となるが、管路の更新周期について、表 6.2 に法定耐用年数によるもの、表 6.3 に手引きの事例によるもの、表 6.4

表 6.2: 法定耐用年数による管路の更新周期（年）

管路種別	法定耐用年数	更新前更新周期	更新後更新周期
取・導水管	40	40	40
送水管	40	40	40
配水管	配水本管	40	40
	配水支管	40	40 (~ 1965)
		40	40 (1966 ~)

表 6.3: 手引きの事例による管路の更新周期（年）

管路種別	法定耐用年数	更新前更新周期	更新後更新周期
取・導水管	40	40	40
送水管	40	60	60
配水管	配水本管	40	60
	配水支管	40	60 (~ 1965)
		40	60 (1966 ~)

表 6.4: 第5章を基にした管路の更新周期（年）

管路種別	法定耐用年数	更新前更新周期	更新後更新周期
取・導水管	40	40	40
送水管	40	40	40
配水管	配水本管	40	40
	配水支管	40	55 (~ 1965)
		40	80 (1966 ~)

に5章での結果を踏まえたものを示す、

これらの結果により、管路の更新費用として図6.3、図6.4を得る。

6.5.3 考察

更新周期が長くなれば更新事業費が抑えられ、経営上有利となることは自明であるが、むしろこうした、より長い更新周期の採用には、客観的裏づけが必要であり、第5章で行った実証分析はその役割を果たすものと期待できる。さらに、状態監視を行うならば、更なる更新事業費の削減が可能となる。

6.6 結語

「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」の登場で、上水道における全国規模での本格的なアセットマネジメント時代が到来した。この手引きは、維持管理に関する技術的な手引きにとどまらず、個々の事業体の資産管理状況や将来の施設更新費用を明らか

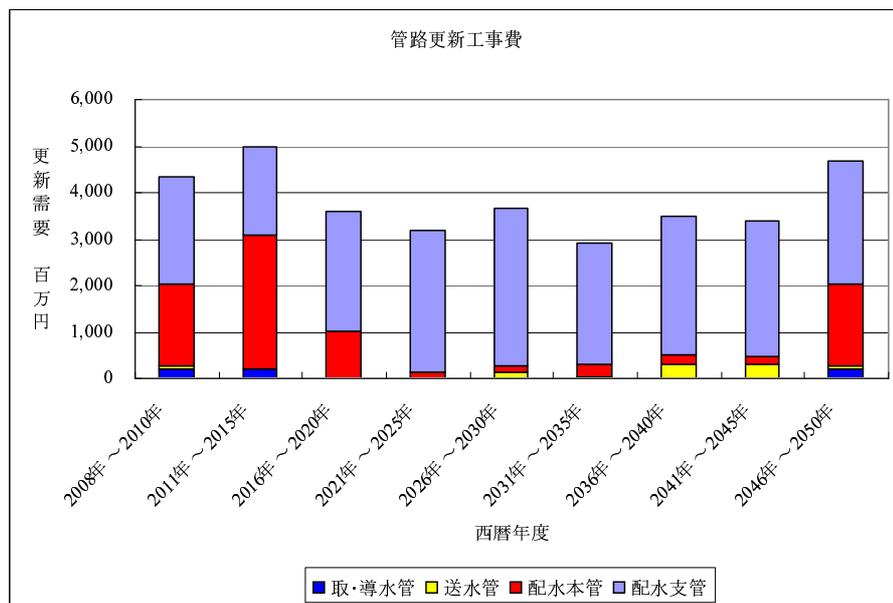


図 6.3: 管路更新費用 (法定耐用年数)

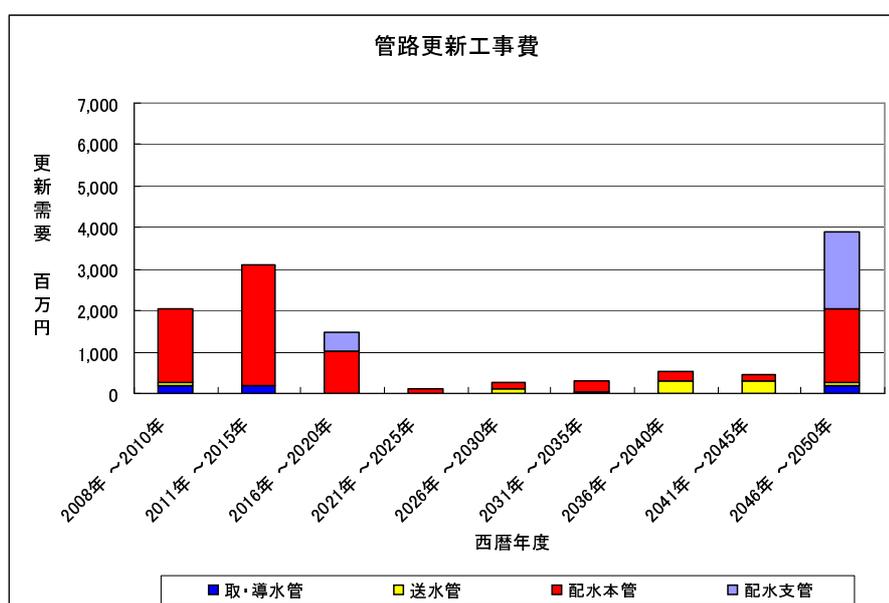


図 6.4: 管路更新費用 (第5章を基にした管路の更新周期)

にし、将来の施設更新の円滑な推進や今後の経営状況のあり方にまで踏み込むものである。さらには、こうした「見える化」の取組みは、水道事業を取り巻く現行制度に対する議論をも巻き起こす可能性を秘めたものである。

水道事業では、資金調達のための借り入れなどは、企業債の自由な借り換えなどに制限があり、アセットマネジメントを実施する場合、支出面である更新費用の低減化、平準化などによる対応に頼るのが現実である。

手引きは、これからは戦略的にアセットマネジメントを推進するためのきっかけをもたらすものであり、今後は必要な情報を効率的に収集、蓄積するシステムが必要となるが、本研究の第4章、第5章で触れた劣化予測や第5章で触れたライフサイクルコスト最小化手法はこうしたものの一助になることが期待されるものである。

第7章 結論

わが国における近代水道は、120年もの歴史の中で、絶え間なくその普及が図られ、その結果、今や全国でほぼ100%の普及率を有しており、現在では、なくてはならないライフラインとなっている。その間、その時代時代の新しい技術を取り入れながら、その導入、改良、更新が進められたため、構成施設の建設年次や更新時期が異なるシステムとなっており、こうしたインフラの更新が立て続けに生じてくる。その一方で、少子高齢社会の到来により、水需要の低下や技術職員確保の問題などに直面しており、水道事業の持続的発展が問われている。このため、水道事業の内部統制を通じたリスクマネジメントが求められており、その手段としてアセットマネジメントが必要となった。

こうした背景をもとに、第2章では、水道事業においてアセットマネジメントを導入していく背景や現在置かれている状況、資産形成過程や現在の資産状況、事業経営に係る公営企業会計等について述べた。第3章では、水道事業へのアセットマネジメントの提案を構造物、設備、管路に分類しながら、その手法を提案した。第4章では、この水道事業におけるアセットマネジメントシステムにおける水道施設の状態把握の内、コンクリート構造物の劣化、特に、中性化の状態把握に着目し、これに加速ハザードモデルを用いた劣化予測と維持管理について提案した。第5章では、水道事業のアセットマネジメントの内、管路の状態把握のための劣化予測手法として、ワイブル劣化ハザード関数の適用し、さらに最適更新時期の推定手法を提案した。第6章においては、昨年に厚生労働省が取りまとめた「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」を踏まえて第5章で得られた結果を踏まえて考察を行った。

特に、第4章、第5章では、水道事業アセットマネジメントとしての要素技術の開発として、アセットマネジメントのために蓄積されたデータではないものの、これまでの点検や維持管理の際に収集されていたデータを基に劣化予測を行った。その際、水道施設の劣化状況を把握する手法

を新たに提案し、著者の勤務する大阪市水道に関するデータを用いながら、実証的検討を行った。

第4章では、浄・配水施設のコンクリートに関する情報は、その休止期間中の収集に限られるため、これらを基に少ない中性化深さの測定データに基づいて、長期的な中性化過程を解析するための劣化予測手法の提案を行った。すなわち、これまで浄・配水場施設の更新時点や耐震診断の際に収集されたコアサンプルを用い、統計的予測モデルと比べより少ないデータを用いて劣化予測できる力学モデルを、多様な要因に対応できるよう統計的に推計しようとするハイブリッド型劣化予測モデルの提案を行っている。力学モデルとしては、比例ハザードモデルを用い、ベースラインの寿命関数を特定化し、定数やハザード形状パラメータを最尤法により推計するもので、構造物による劣化速度の異質性を表現する。本研究で提案した力学モデルをベースラインモデルとするような比例ハザードモデルを開発することにより、力学モデルの統計的推計が可能となる。このようなハイブリッドモデルは、浄配水場施設に限定されずに、コンクリート構造物の中性化予測に幅広く適用が可能であり、コンクリートの中性化のみならず、さまざまな確定的劣化予測モデルの統計的推計に適用が可能である。

今後の研究課題としては、比例ハザードモデルを用いたハイブリッド型劣化予測モデルに関して理論的、経験的な展開が必要である。また、加速劣化ハザードモデルは、ベースラインモデルを想定しているため、比較的限定されたデータを用いて推計できるという利点がある。今後、継続的に点検データが蓄積されれば、加速劣化ハザードモデルの推計結果を更新することが必要である。加速劣化ハザードモデルのベイズ更新に関する手法の開発が求められる。

また、本研究では、加速劣化ハザードモデルを用いて長期アセットマネジメントにおいて、中性化速度式におけるルート t 則に関する統計的検定を行った。その結果、少なくとも対象データに関してルート t 則は棄却され、現実の中性化過程はルート T 則より、加速して進行することが判明した。このため、今後の課題として、今後は、コンクリートの中性化過程に関するデータを蓄積し、ルート t 則の妥当性に関する知見を蓄積することが必要である。仮説検定の結果が確率誤差項分布に関する特定化誤差の影響を受けている可能性があるため、今後、検査サンプルを蓄積することにより、ルート t 則の経験的有効性に関する経験的研究を積み重ねることが重要である。

第5章では、水道資産の半分以上を占め、その適切な維持管理が水道事業の持続性に大きく影

響するが、その大半が道路下に地中埋設され、点検により劣化水準を把握することが困難である。その一方で、管路が破損すれば多大な社会的費用が発生するため、老朽化した管路を予防的に取替えることが必要となる。定期点検データによる劣化予測が行えないことから、漏水事故の発生データに着目したワイブル劣化ハザード関数による劣化予測手法を提案し、さらにこれを基に、管路の更新費用と漏水事故による社会的被害額からライフサイクルコスト最小化による最適更新時期を推定する手法を提案した。本研究で提案した最適予防取替えモデルに関しては、水道管路に関する観測可能な情報を基にしており、今後、多方面に拡張が可能である。

一方、今後の研究課題としては、3点を挙げており、第1に鋳鉄管に比べ管路の破損に関する情報の蓄積が十分ではないダクタイル鋳鉄管に関して、新しいデータの蓄積により、ワイブルハザード劣化モデルの精度向上を行うことが望まれる。第2に本研究では、小口径管路を対象としたこともあり、ネットワーク上の重要度を加味していないが、取替え順位の決定を深度化する場合、管路のネットワーク特性を踏まえた管路の重要性に関する配慮が必要となる。第3に、本研究では、地震リスクを考慮していないが、管路施設の耐震性評価を行うためには、地震被害リスクを考慮した最適予防取替えモデルを定式化することが必要となる。

本論文には、全ての水道システムを網羅できたわけではないが、今後、水道のアセットマネジメントシステムを動かすために、どのようなシステム、データが必要かの提案を行っており、今後の水道事業のアセットマネジメントの推進、さらには、なくてはならない上水道システムを持続的に発展させる上で有益な方法論として貢献できるならば、著者の本望である。

参考文献

- [1] 厚生労働省：健康のため水を飲もう推進運動，環境省熱中症環境保健マニュアル，2009（Exercise Physiology 第4版，1996，53-5）
- [2] たとえば，日本水道協会：水道施設設計指針 p450，2000.
- [3] 関西水道事業研究会：長期的視点から見た設備投資と経営のあり方，2002.3
- [4] 住友 恒，田中 尚，藤谷 光宏，谷口 喜明，松島 雅幸，長塩 大司：施設更新費用の試算と経営への影響の検討，第51回全国水道研究発表会講演集，pp56～57，2000
- [5] 住友 恒，田中 尚，山野 一弥，長塩 大司，山田 健，谷口 喜明：寿命曲線を用いた施設更新費用の試算，第52回全国水道研究発表会講演集，pp48～49，2001
- [6] 厚生労働省健康局水道課：水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き，2009
- [7] （株）土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，p16，2005
- [8] 国土交通省道路局：「道路構造物の今後の管理・更新のあり方」に関する提言，2003-2004
- [9] 高山尚人，竹村雅之：水道事業におけるアセットマネジメントの考え方，第8回水道技術国際シンポジウム講演集，pp525-545，2009
- [10] たとえば，江口 雅祥：ニューパブリックマネジメントによる地方自治体のマネジメント改革への視点，SRIC REPORT vol.5 NO.2，2000
- [11] 国土審議会調査改革部会：グローバル化の進展を生かした活力ある国土形勢と持続的発展のための国土基盤のあり方，2003

- [12] 地方公共団体における内部統制のあり方に関する研究会：内部統制による地方公共団体の組織マネジメント改革～信頼される地方公共団体を目指して～ 2009.3
- [13] 日本水道新聞社：新しい水道の常識，1995
- [14] 日本水道協会水道統計編纂専門委員会：「資料」水道統計の経年分析（平成19年度）水道協会雑誌 第78巻第8号（第899号），p112～150，2009
- [15] Rook, J J : Formation of haloforms during chlorination of natural waters , Wat. Treat. Exam. 23, Pt. 2, 234-243 , no. suppl. 2, pp. 234-243
- [16] (社)日本水道協会（厚生省生活衛生局水道環境部監修）：高度浄水施設導入ガイドライン，1988
- [17] (社)日本水道協会（平成2，4年厚生省委託）：高度処理施設の標準化に関する調査報告書，1991，1993
- [18] 水道技術研究センター：浄水技術ガイドライン，2000
- [19] 大阪市水道局：高度浄水施設整備事業誌 2001
- [20] 荒木貞行，近藤正憲，安田兼一：配水管材料の変遷について（その1 - 鋳鉄管及び鋼管），水道事業研究第120号 p90 - 114，1988
- [21] 荒木貞行，近藤正憲，安田兼一：配水管材料の変遷について（その2-属具類その他）」，水道事業研究第121号 p57-73，1988
- [22] 大阪市水道局：大阪市水道グランドデザイン，2006
- [23] 日本水道協会，水道施設耐震工法指針，2009年
- [24] 厚生労働省：管路の耐震化に関する検討会報告書，2007
- [25] 宮脇 淳，眞柄泰基：水道サービスが止まらないために（水道事業の再構築と官民連携），時事通信社，2007

-
- [26] (社)日本水道協会：平成 16 年度水道総計の経年分析，水道協会雑誌第 75 巻第 8 号，2006
- [27] 青木一也，山本浩司，小林潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計、土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.111-124，2005
- [28] Mishalani, R. and Madanat, S.: Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol.8, No.4., pp.139-148, 2002
- [29] Shin, H. C. and Madanat, S. M. : Development of stochastic model of pavement distress initiation, Jpurnal of Infrastructure Planning and Management, No.744/VI-61-67, 2003
- [30] 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005
- [31] 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブルハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2005
- [32] 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.29-38，2003.10
- [33] Lee, T. C. , Judge, G. G. and Zellner, A.: Estimating the Parameters of the Markov Probability Model From Aggregate Time Series Data, Amsterdam, North-Holland, 1970
- [34] 鍵本広之，佐藤道生，川村満紀：アルカリシリカ反応により劣化した施設の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測，土木学会論文集，No.641/V-46，pp.241-251，2000
- [35] 小林孝一，宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.173-186，2001
- [36] 堤知明，白井伸一，安田登，松島学：塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.33-41，1996

- [37] 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.29-44, 2000
- [38] 元路寛, 関博, 高木言芳: 中性化したコンクリートにおける乾湿繰り返し作用による鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.1-11, 2002
- [39] 佐伯竜彦, 大即信明, 長瀧重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.55-66, 1996
- [40] Lancaster, T.: The Econometric Analysis of Transition Data, Cambridge University Press, 1990
- [41] Gourieroux, C.: Econometrics of Quantative Dependent Variables, Cambridge University Press, 2000
- [42] Stewart Burn, David Marlow and Dung Tran: The Role and Prediction of Remaining service Life in Strategic Asset Management, The 8th international symposium on water supply technology, p86-113, 10-12 2009.6
- [43] Shamir, U. Haward, D. : An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement, journal AWWA, pp248-258, 1979.5
- [44] Jarrett, R., Hussain, O., Veevers, A. and Van der Touw, J.: In Proc. International Conference of Maintenance Societies, Melbourne, Australia.
- [45] Jarrett, R., Hussain, O., and van der Touw J: Prediction of Failures in Water Mains and Prioritisation for Replacements, In CSIRO/AWA 2nd Annual Seminar on Asset Management of Pipelines: Risk Based Performance of Urban Water Pipelines
- [46] Randall-Smith, M., Russell, A. and Oliphant, R.: Guidance manual for the structural condition assessment of trunk mains, WRc, UK, 1992
- [47] Rajani, B. and Y. Kleiner: Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. Urban Water, 3(3), pp151-164, 2001

-
- [48] Burn, S., Marlow D., Moglia, M., and Buckland P.: Asset Management for Water Infrastructure. Water Asset Management International 3.2 pp12-18, 2007
- [49] 慈道充・江尻良・織田澤利守・小林潔司：道路舗装管理会計システムアプリケーション, 土木学会「土木情報利用技術論文集」, 2004
- [50] 堀倫裕、鶴田岳志、貝戸清之、小林潔司：下水処理施設の維持管理会計システム, 土木学会論文集 (投稿中)
- [51] 荒木 康裕, 小泉 明, 稲員とよの, 渡辺晴彦, 藤原 正弘：水道管路の故障率分析に関する研究, 第 8 回水道技術国際シンポジウム講演集, pp432-448, 2009
- [52] 赤木 信雄, 金子 真也, 安野 貴人：管路更新策定におけるアセットマネジメント手法の適用検討, 第 59 回全国水道研究発表会論文集, pp98-99, 2008.5
- [53] 山崎弘太郎：管路整備へのアセットマネジメントの適用について, ダクタイル鉄管 NO.84, p32-43, 2009
- [54] 神尾文彦：新たな段階を迎える社会資本マネジメント, 野村総合研究所「知的資産創造」, 2003.12
- [55] 水道ビジョンフォローアップ検討会 第 5 回検討会配布資料, 2008
- [56] 水道協会雑誌：水道統計の経年分析, 第 78 巻第 8 号 (第 899 号), 2009
- [57] 北野陽一郎、山崎弘太郎、江口勝彦、宮崎博明他：浄水施設整備へのアセットマネジメントの適用, 平成 21 年度土木学会全国大会第 64 回年次学術講演会, VI-232, 2009
- [58] 玉瀬充康：ダクタイル鑄鉄管の各種内外面塗装埋設実験 (その 4 -埋設 20 年後及び追加埋設実験 10 年後の調査結果), 水道事業研究 第 148 号, 大阪市水道局, pp.135 ~ 172, 2004.
- [59] 廣川福美：ダクタイル鑄鉄採用初期の配水管劣化調査 (中間報告), 第 55 回全国水道研究発表会講演集, pp.408 ~ 409, 2004.

- [60] 東京都水道局：初期ダクタイトルの取替事業評価,HP
- [61] 日本水道協会：水道施設更新指針，2004.
- [62] 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設研究所出版部，1963.
- [63] Wierig, H. J.: Longtime Studies on the Carbonation of Concrete under Normal Outdoor Exposure, *Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Exposure*, pp.239-244, 1984.
- [64] 依田彰彦，横室隆：各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，pp.327-332，1987.
- [65] 大賀宏行，長瀧重義：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価，土木学会論文集，No.390/V-8，pp.225-233，1988.
- [66] 佐伯竜彦，大賀宏行，長龍重義：コンクリートの中性化機構解明，土木学会論文集，No.413/V-12，pp.99-108，1990.
- [67] 魚本健人，高田良平：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.442/V-17，pp.109-118，1992.
- [68] 関口司，魚本健人，高田良章，渡辺正：ニューラルネットワークを用いたコンクリート実験のデータ解析に関する研究，土木学会論文集，No.460/V-18，pp.65-74，1993.
- [69] 伊井克，大賀宏行：統計的手法によるコンクリートの中性化深さの評価，土木学会第52回年次学術講演会，pp.752-753，1997.
- [70] 伊代田岳史，矢島哲司，魚本健人：コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，pp.979-984，1998.
- [71] 依田彰彦：40年経過した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.449-454，2002.

-
- [72] 長谷川拓哉, 千歩修: 文献調査に基づく屋外の中性化進行予測, コンクリート工学年次論文
集, Vol.28, pp.665-670, 2006.
- [73] 土木学会 335 委員会: 簡略式を用いた劣化予測, 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能
検証システム研究小委員会成果報告書, コンクリート技術シリーズ, pp.246-266, 2008.
- [74] Papadakis, V. G., Vayenas, C. G. and Fardis, M. N.: Fundamental modeling and experimental
investigation of concrete carbonation, *ACI Material Journal*, pp.363-373, Vol.88, No.4, 1991.
- [75] Saetta, A. V., Schrefler, B. A. and Vitaliani, R. V.: The carbonation of concrete and the mecha-
nisms of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials, *Cement and Concrete
Research*, Vol.23, pp.761-772, 1993.
- [76] Saetta, A. V., Schrefler, B. A. and Vitaliani, R. V.: 2-D model for carbonation and moisture/heat
flow in porous materials, *Cement and Concrete Research*, Vol.25, pp.1703-1712, 1995.
- [77] 長田光正, 植木博, 山崎之典, 村上正明: アルカリ成分に着目したコンクリート部材の炭
酸化シュミレーション解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.793-798,
1997.
- [78] 松本洋一, 植木博, 山崎之典, 村上正明: 炭酸カルシウムの再溶解を考慮した炭酸化反応に
関するモデル解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.961-996, 1998.
- [79] 石田哲也, 前川宏一: 物質移動則と化学平衡論に基づく空隙水の pH 評価モデル, 土木学会
論文集, No.648/V-47, pp.203-215, 2000.
- [80] 吉田浩也, 宮崎慎也, 佐伯竜彦, 大下英吉: セメント系材料における炭酸化による pH 遷移
に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, pp.481-486, 2001.
- [81] 山本耕児, 宮崎慎哉, 大矢英吉: 濃度依存型の炭酸化反応速度定数と pH 遷移に関する研究,
コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.765-770, 2002.
- [82] 土木学会 328 委員会主催: コンクリート構造物のヘルスマニタリング・シンポジウム, 2007.

- [83] 白川敏夫, 鳥添洋治, 麻生実: コンクリートの中酸化と湿度の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.723-728, 1996.
- [84] 小田原暁, 白川敏夫, 鳥添洋治, 麻生実: コンクリート中への酸素ガスの拡散について(空隙の影響について), 日本建築学会学術講演梗概要 A, pp.239-240, 1994.
- [85] 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2001.
- [86] 仁平達也, 曾我部正道, 谷村幸裕, 東川孝治: ドリル法による中性化深さ測定の実構造物への適用の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.2025-2030, 2004.
- [87] 谷村幸裕, 長谷川雅志, 曾我部正道, 佐藤勉: 鉄道 RC ラーメン高架橋の中酸化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.147-157, 2004.
- [88] 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- [89] 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
- [90] 下村泰造, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 空港舗装アセットマネジメントのためのハイブリッド型地盤沈下モデル, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.4, pp.463-482, 2008.
- [91] 中村剛: Cox 比例ハザードモデル, 医療統計学シリーズ, 朝倉書店, 2001.
- [92] Lee, E. T. and Wang, J. W.: *Statistical Methods for Survival Data Analysis*, John Wiley & Sons, 2003.
- [93] Cox, D.R. and Oakes, D.: *Analysis of Survival Data*, Chapman & Hall/CRC, 1998.
- [94] 安野貴人, 保田敬一: 土木構造物の維持管理と劣化進行のハザード形状, 応用力学論文集, Vol.10, pp.1019-1026, 2007.
- [95] 田中尚, 藤森裕二, 貝戸清之, 小林潔司, 安野貴人: 加速劣化ハザードモデル: コンクリート中性化予測への適用, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.3, pp.329-341, 2010.7 (登載決定)

-
- [96] 磯田和男, 大野豊: 数値計算ハンドブック, オーム社, 1990.
- [97] 森棟公夫: 計量経済学, 東洋経済新報社, 1999.
- [98] 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.18(1), pp.97-107, 2001.
- [99] 田村謙介・慈道充・小林潔司: 予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール, 土木計画学研究・論文集, Vol.19(1), pp.71-82, 2002.
- [100] 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 2005.
- [101] 堀倫裕, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 下水処理施設の最適点検・補修モデル, 土木計画学・研究論文集, Vol.25(1), pp.213-224, 2008.
- [102] 例えば, Heyman, D.P. and Sobel, M.J.(eds.): Stochastic Models, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.2, North-Holland, 1990.
- [103] 例えば, Eckles, J.E.: Optimal maintenance with incomplete information, *Operations Research*, Vol.16, pp.1058-1067, 1968.
- [104] Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- [105] Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- [106] 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.105-116, 2005.
- [107] The Ahammed, M. and Melchers, R.: Probabilistic analysis of pipelines subjected to pitting corrosion leaks.” *Journal of Engineering Structures*, Elsevier, 17(2), 74-80, 1995

- [108] Ahammed, M. and Melchers, R.: Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stresses and corrosion, *Journal of Engineering Structures*, Elsevier, 19(12), 988-994, 1997.
- [109] Takashi TANAKA, Le Thanh NAM, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI: Probabilistic Analysis of Underground Pipelines for Optimal Renewal Time, The 8th international symposium on water supply technology, session3, p505-524, June 10-12 2009
- [110] Takashi TANAKA, Le Thanh NAM, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI: Probabilistic Analysis of Underground Pipelines for Optimal Renewal Time, *IWA AQUA*, 59(6-7), 2010
- [111] 田中 尚, Le Thanh Nam, 貝戸清之, 小林潔司: 上水道管路の最適予防取替えモデル, 土木計画学・研究論文集, 土木学会, Vol.26, Vol.1, pp.123-132, 2009.9
- [112] 谷口靖博, 田中 博, 村上博哉, 松下智美: 配水管事故未然防止の観点から見た小口径経年管の改良優先度の決定に係る一手法, 第48回研究発表会発表概要集, pp5-8, 日本水道協会 関西地方支部, 2004.11
- [113] 松下智美, 村上博哉, 谷口靖博: 配水管事故未然防止の観点から見た小口径管の改良優先度の決定に関わる一手法, 第56回全国水道研究発表会講演集, pp.76-77, 2005.
- [114] 厚生労働省健康局水道課: 水道事業の費用対効果分析マニュアル(改訂版), 2007.7
- [115] Akaike, H.: "A new look at the statistical model identification." *Automatic Control*, IEEE, 19(6), 716-723, 1974.
- [116] 松崎裕司: アセットマネジメントの導入を目指す!!「その基本的考え方と動向」アセットマネジメントの幅広い活用を更新需要と財政収支を長期に捉えて必要な対応を, *水道公論*, 巻45号:2頁:24-33, 2009
- [117] 木下昌樹: アセットマネジメント・手引きの積極的活用を, *水道公論*, 巻45号, 9月号 p28-39, 2009
- [118] 総務省: 地方公営企業会計制度等研究会報告書, 2009

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々にご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心よりの感謝の意を表します。まず、京都大学 小林潔司教授には、本研究の内容および方針について、終始親切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。

2001年に筆者は、冒頭にも触れたように住友 恒京都大学名誉教授のご指導を受け、水道施設の将来の更新需要予測に取組み、時代の到来に警鐘を鳴らす研究に取り組みました。しかしながら、一方で、水道施設の適切な更新時期とはどのようにアプローチすべきなのか、あるいは、更新時代を迎えた水道事業経営はどのようにあるべきなのかといった課題を残すこととなりました。その後、ハザード関数を用いたアセットマネジメント分野の第一人者であり、経済学にも精通され、経営面へのアプローチにも長けておられる小林潔司教授の存在を知り、なんとかご指導を受け、以前からの忘れ物となっている課題に挑みたいと希望しておりました。縁あって、3年の長きにわたり、アセットマネジメントや管理会計などのマネジメント論の全般にわたり、筆者をご指導いただくことになりました。さらに、筆者が本研究をとりまとめるにあたり、学会発表等様々な機会を与えてくださったことは、筆者にとっての大きな財産となりました。京都大学 大津宏康教授には、建設マネジメント勉強会でお会いする度に筆者の研究状況について気をかけていただくとともに、研究成果をとりまとめるにあたり適切なご助言並びにご指導をいただき、非常に参考になりました。特に、建設マネジメント勉強会での情報は、筆者が研究成果をとりまとめるにあたり、非常に有益なものでした。また、京都大学 伊藤禎彦教授には、筆者の研究に対して、水道の専門家として、様々なご助言をいただきました。大阪大学 貝戸清之特任講師には、非常に御多忙な中で、劣化予測手法であるワイブルハザ - ドモデル等、劣化予測手法に関する最新の知見について様々なアドバイスをいただくとともに、アセットマネジメントの普及について様々な議論をさせていただきました。

筆者が小林潔司教授のご指導を賜ることができましたのは、私の学部、修士課程時代の恩師である 池淵周一 京都大学名誉教授に取り計らいいただいたことによるものであり、深く感謝いたします。

また、博士論文への取組みを薦めていただき、ご支援もいただいた河谷幸生 大阪市水道局工務部長に深く感謝いたします、さらには、本研究を進めるに当たって多大なご支援をいただいた大阪市水道局関係者一同に深く感謝いたします。本研究成果は、水道事業を進めて行く上で非常に有用ものであることから、日常の維持管理業務に反映させ、さらなる向上を図っていくのが今後の重要な課題であり、努力してまいりたい所存であります。

京都大学松島格也准教授、大西正光助教、吉田 護 GCOE 特定助教には、研究の進め方をはじめとして親切丁寧にご指導いただき筆者の研究生活の多くを支えていただきました。心より感謝いたします。京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻計画マネジメント論研究室の諸先輩・諸兄には、本研究を取りまとめる上で多大なる支援を頂きました。博士課程 Le Thanh NAM 氏には、管路の最適更新周期に関する研究において、研究室にて大いに議論させていただき共に過ごせたことは大きな喜びです。また、修士課程藤森祐二氏にはコンクリート構造物に関する中性化に関する研究において、実測データの分析、予測モデルの推計において多大なる貢献をいただきました。また、秘書の藤本彩氏には、学生生活を進める上で、履修等様々な面でご支援頂きました。心より感謝いたします。

最後に、陰ながら支えていただいた周囲の皆様に謝意を表するとともに、筆者を育て見守り続けてくれた両親、および、筆者の研究活動に対して多大なる協力をいただいた妻と3人の子供たちに心から感謝の意を表します。

2010年9月

田中 尚