

塩害環境下における橋梁群の
実効的維持管理計画に関する研究

(Study on effective maintenance management strategy for bridges in salt damage environment)

2019年3月

中野 智章

Nakano Tomoaki

〈 目 次 〉

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景と目的	3
1.2	本論文の構成	5
第2章	インフラ構造物の維持管理の現状と課題	9
2.1	インフラ構造物の現状	11
2.2	維持管理における現状	14
2.2.1	点検の現状	15
2.2.2	診断	17
2.3	維持管理における課題	18
2.3.1	効率的な維持管理	18
2.3.2	劣化予測のあり方	19
2.4	劣化機構に基づく環境外力の抽出	21
2.4.1	飛来塩分の影響	21
2.4.2	水掛かりの影響	24
2.5	まとめ	28
第3章	飛来塩分評価手法の検討	31
3.1	実構造物における飛来塩分調査	33
3.1.1	はじめに	33
3.1.2	与論島における飛来塩分調査	33
3.1.3	結果および考察	44
3.1.4	まとめ	46
3.2	同一年代に架設された実橋梁群の劣化状況に関する基礎的研究	47
3.2.1	はじめに	47
3.2.2	調査対象と調査内容	47
3.2.3	調査結果および考察	48
3.2.4	まとめ	51
3.3	数値解析手法による飛来塩分評価	52
3.3.1	はじめに	52
3.3.2	測定および解析手法の概要	52
3.3.3	実橋梁におけるマイクロ環境	55
3.3.4	まとめ	58
3.4	数値解析手法による飛来塩分評価	59

3.4.1	数値解析によるマイクロ環境評価	59
3.4.2	ランダムウォーク法の検証	61
3.4.3	まとめ	61
第4章	水掛かりと水分移動の影響評価	63
4.1	はじめに	65
4.2	モルタル内部の水分移動特性に関する検討	65
4.3	試験	65
4.3.1	供試体配合	65
4.3.2	水の浸透試験	66
4.3.3	試験結果および考察	68
4.4	水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響	79
4.5	試験	79
4.5.1	供試体配合	79
4.5.2	屋外曝露試験	80
4.5.3	試験結果および考察	83
4.6	まとめ	86
4.6.1	モルタル内部の水分移動特性に関する検討	86
4.6.2	水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響	86
4.7	結論	87
第5章	マルコフ連鎖モデルを用いた将来予測手法の検討	89
5.1	マルコフ連鎖モデルとは	91
5.1.1	まえがき	92
5.2	データの抽出条件と環境区分	93
5.3	損傷種類別の劣化進行予測	95
5.3.1	環境における損傷の特徴	95
5.3.2	鹿児島県における劣化予測手法の現状	99
5.3.3	マルコフ連鎖による劣化進行予測	100
5.3.4	損傷別の遷移確率	101
5.3.5	損傷を組み合わせた場合の遷移確率	103
5.4	まとめ	106
第6章	実効的維持管理手法の提案	109
6.1	はじめに	111
6.2	点検のあり方	115
6.2.1	点検の目的	115
6.2.2	新工法の必要性	116
6.2.3	点検の流れ	117

6.2.4	点検手法の考え	118
6.2.5	新工法を用いた点検実施橋梁の選定の例	120
6.2.6	課題と解決策（案）	122
6.2.7	点検における課題と解決策（案）まとめ	129
6.3	飛来塩分評価の影響について	130
6.3.1	マクロ環境による飛来塩分の影響	130
6.3.2	メゾ環境における飛来塩分の影響	130
6.3.3	ミクロ環境における飛来塩分の影響	130
6.3.4	実橋による飛来塩分の影響	131
6.4	水掛かり部の対策	133
6.4.1	伸縮装置取替工	134
6.4.2	張出床版部および中間床版部の補修	136
6.4.3	水切設置工	138
6.5	劣化進行予測の提案	140
6.6	水掛かり部における維持管理	141
6.7	地理情報システムを用いた維持管理	142
第7章	結論	147
7.1	本研究の総括	149
	謝辞	151
	卷末【付録】	155
Extra-I	電気抵抗率の経時変化	156
Extra-II	相対湿度の経時変化	163

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的

現在、わが国で橋長 2m以上の橋梁は、70 万橋を超えている。¹⁾

戦後の 1954 年（昭和 29 年）にスタートした第一次道路整備五箇年計画等に基づく計画的な道路整備の進捗に合わせて拡充が進み、その多くの橋梁は高度経済成長期、1960 年代から 1980 年代にかけて多く建設されている。²⁾

一方、昭和初期や大正年間に架設され、現役で社会に貢献している文化的な遺産となるすばらしい橋梁も少なくない。これらの橋梁を含めてしだいに環境条件の変化や交通量増大に伴う劣化や損傷・高齢化が進んでいる。

また、これらの高度経済成長期につくられた多くの構造物が老朽化のため更新時期を迎えようとしている。まさに高齢化する膨大なインフラのマネジメントが不可欠な時代に入った。国内インフラのストックは 800 兆円の規模に達し、今後これらのインフラの維持管理・更新には膨大な予算が必要となる。^{3), 4), 5)}

例えば、高速道路におけるインフラ（資産額 45 兆円）に対する今後 15 年間の更新・修繕費は最近の調査から 3 兆円に達すると発表されている。そのため、鉄筋コンクリート構造物の耐久性の把握および向上は今後のインフラ整備、環境負荷低減の観点からも重要な課題となっている。

また、この建設資材となるコンクリートはセメント、細骨材、粗骨材と水等の材料から構成される極めて非均質な複合材料である。そのため、その劣化および破壊形態は構成材料の力学特性の違いなどに起因する局所的なひび割れに大きく影響される複雑な現象である。更なるその破壊特性は荷重条件や日射、温度、湿度等の環境条件の経時変化によっても大きく影響する。

コンクリート構造物は、遠望からみると健全でも橋梁定期点検において近接目視による点検を行うとひび割れや剥離、鉄筋露出等の部分劣化している構造物も多くある。

実構造物でコンクリート構造物の劣化現象を診ると特に張出し床版のひび割れ、うき、剥離・鉄筋露出や橋台の桁受け部などの水掛かり部では激しい劣化がおきている。また、コンクリート構造物の主な劣化としては、塩害・中性化・アルカリシリカ反応が挙げられ、これらの劣化現象や劣化機構には、劣化因子となる塩化物イオンを運ぶ雨水など水の影響も考えられる。⁶⁾

さらにこの水が移動することで劣化因子が蓄積し、劣化箇所を拡大させる影響もある。鉄筋コンクリート構造物における維持管理において、水分移動特性を把握することは、コンクリート構造物の経年劣化の進行予測を行う上で非常に重要であると考えている。近年、コンクリート内部の水分移動に関する研究は行われ始めているが、乾燥過程におけるものが多く浸透過程におけるものは少ない。

また、橋梁のように局所的に水分が供給されるような水掛かり部におけるコンクリート

内部の水分移動特性は不明瞭な点が多い。 7.) 8), 9), 10)

そのため、実構造物のマクロ環境・メゾ環境・マイクロ環境における環境評価手法、検討に加えコンクリートの水掛かり部を模擬した供試体を作製し、コンクリート内部の水分移動を把握するために実験的な検討を行った。 11)

そこで本研究では、塩害環境下の橋梁群を対象とし、現行の維持管理における点検、劣化機構の推定、劣化予測、性能評価、対策など維持管理における一連のプロセスの課題を抽出・整理したうえで、環境外力と劣化機構に関する実証試験の結果を踏まえた「効果的な点検」、劣化のプロセスを踏まえた情報分析と数値シミュレーションを活用した「精緻な診断」、確率論的手法を用いた「高精度な予測」を提案した。また、その結果を、ICTやGISを活用した「スパイラルアップ可能な記録」など、維持管理計画立案のための各段階での新たな手法を取り入れた実効的維持管理計画を提案した。

1.2 本論文の構成

第1章は、本研究の背景及び目的を明確にし、論文の構成を示した。(図 1.1)

第2章は、インフラ構造物の維持管理における現状を整理し、わが国におけるインフラ構造物である特に橋梁について維持管理における課題の抽出・整理を提示した。

第3章は、環沿岸環境下における、飛来塩分評価手法の提案のために奄美大島におけるメゾ環境の違いに起因する橋梁群の劣化状況調査結果を実施し、与論島における島内全域の飛来塩分量分布の調査を行った。さらに、数値解析手法を用いた橋梁部位別の付着塩分量予測とその検証結果を基に、実環境および実構造物における環境外力の評価手法について検討した。

第4章は、局所的な水掛かりがコンクリート内部の水分移動と鉄筋腐食挙動に与える影響を確認するための模擬実験の結果を基に、水掛かりとそれに伴う水分移動が構造物の劣化進行に及ぼす影響とその範囲について検討した。

第5章は、これまでの劣化予測式は、環境別の点検結果を基に、それぞれの損傷等級が発生する平均供用年数を算出し、これを近似する直線で示すような劣化進行予測法である。本検討では、効率的な維持管理を行うための手法として、マルコフ連鎖モデルを用いた統計的解析手法により損傷種類ごとの劣化の推移を時系列的に整理するとともに、一般環境や塩害環境において劣化進行過程に基づいた新たな劣化予測手法を提案した。

第6章は、前章までの第3章、第4章および第5章において検討を行った結果を維持管理計画に導入するための手法に加え、対策として環境外力評価を踏まえた工法選定を行う手法、さらに、ICTやGISなどの新技術を活用したスパイラルアップ可能な記録等を含む、維持管理の技術向上と効率化の具体的な方策を検討するとともに、実効的な維持管理手法の提案した。

第7章では、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

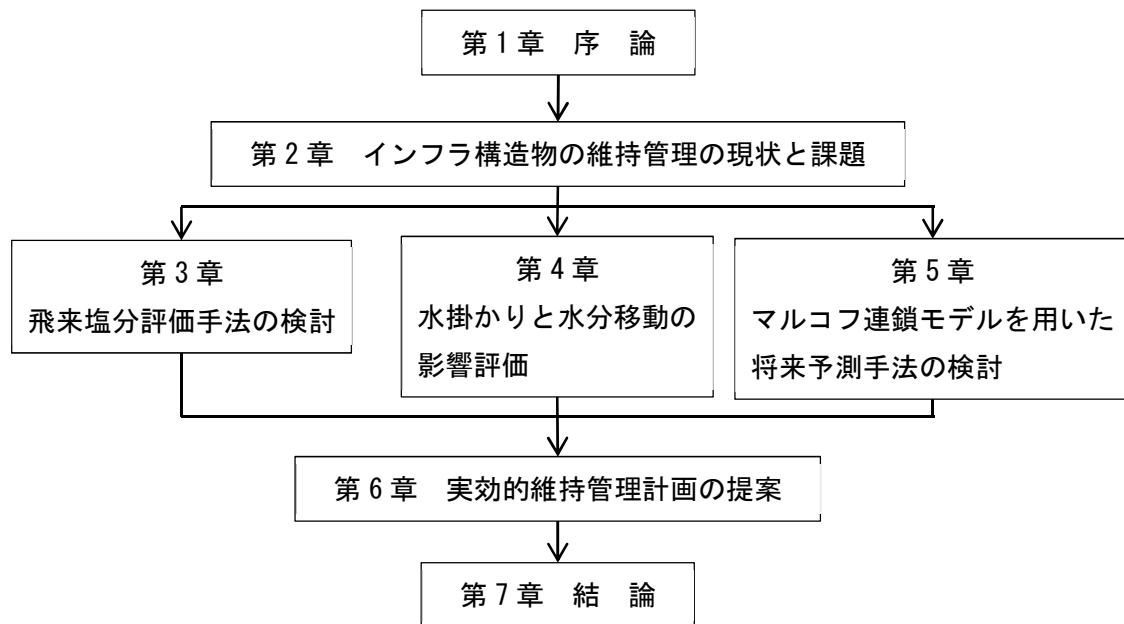


図 1.1 論文の構成

参考文献

- 1) メンテナンス年報 国土交通省 道路局 平成 30 年 8 月
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h29/30_03maint.pdf
- 2) 平成 27 年度 国土交通白書
- 3) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, 2018
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/7_infura.pdf
- 4) 国土交通省：老朽化の現状・老朽化対策の課題
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 5) 宮川豊章：我が国におけるコンクリート構造物の耐久性評価小史,
特集/コンクリート構造物の耐久性-新設構造物への取組み-/1. 総論
- 6) 上田隆雄, 宮川豊章：コンクリート構造物の劣化と問題点 材料と環境 59, 111-116, 2010
- 7) 武若耕司：コンクリート構造物の劣化とその対策 zairyuu-to-kankyou, 47, 696-705, 1998
- 8) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸, 好本健一：コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析, コンクリート工学会, Vol. 24, No1, 2002
- 9) 国土交通省：老朽化の現状・老朽化対策の課題
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 10) 武若耕司, 濱田秀則, 野口貴文, 下村匠, 山口明伸：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル研究委員会報告, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, 2004
- 11) 土木学会：2017 年度制定土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編], 2017

第2章

インフラ構造物の 維持管理の現状と課題

第2章 インフラ構造物の維持管理の現状と課題

2.1 インフラ構造物の現状

わが国の現状として、保有している道路延長は、約122万kmである。また、その中で橋梁は、図2.1に示すとおり、約73万橋あり、そのうち約48万橋が市町村管理の橋梁である。

市町村が管理している橋梁は、図2.2より66%と半数以上であり、また、これらを管理する数に対して予算や人材が伴わず、国土交通省の調べでは、維持管理・更新業務を担当する職員数は図2.3に示すように5人以下しかいないところがほとんどである。

日本では、全122万kmの道路のうち8割以上が市町村道

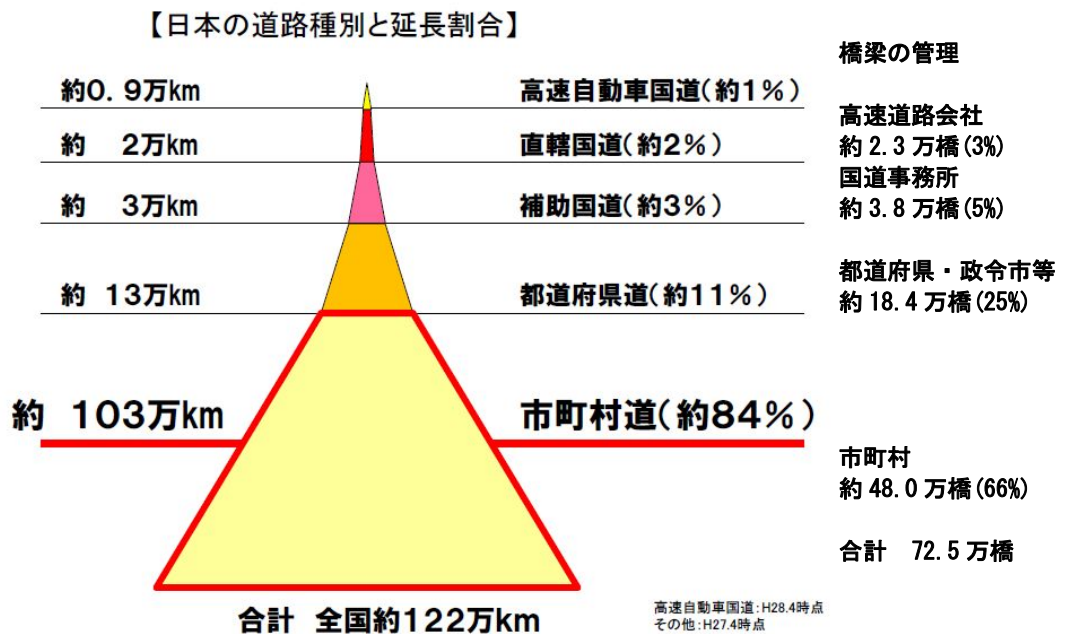


図 2.1 日本の道路種別と延長割合

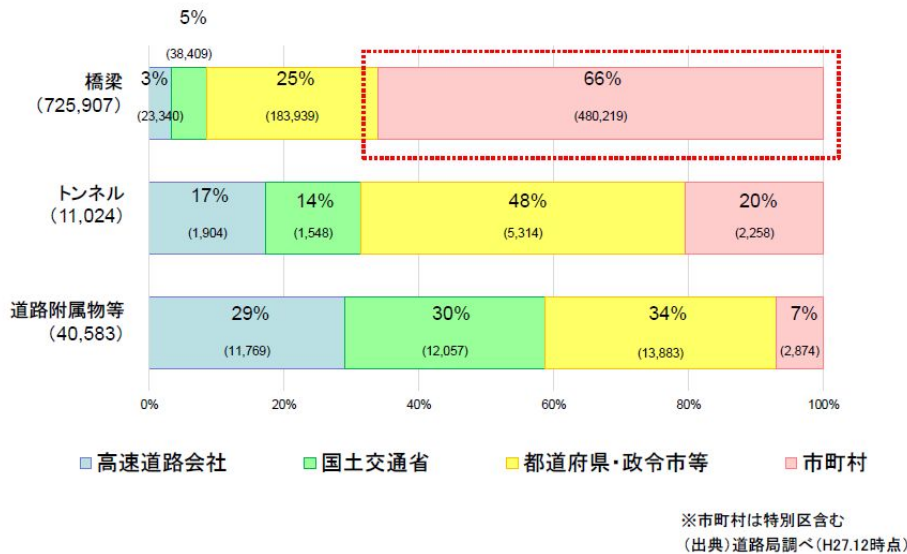


図 2.2 日本の管理者別管理施設

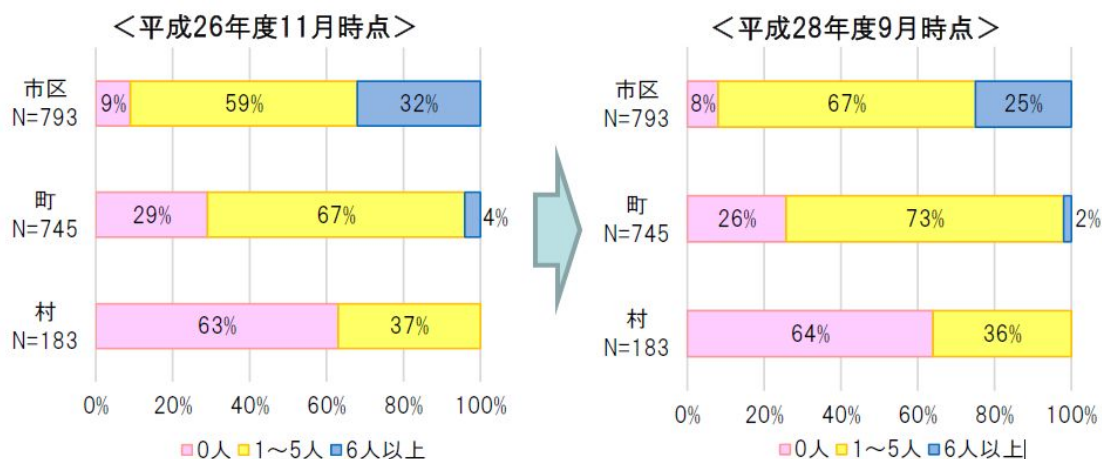


図 2.3 市町村における橋梁管理に携わる土木技術者の人数

また、その土木技術者が存在しない町の割合は、平成 26 年度と平成 28 年度を比較すると 29%から 26%へ減少していることより今後も土木技術者の減少は進むと予想される。

これらのことより、今後、大量のインフラ構造物を効率的に維持管理することが必要であることが分かる。

図 2.4 は、架設年度別の橋梁数を示すが、高度経済成長期をピークに架設されたことが分かる。建設後 50 年を経過した現在の橋梁の割合は図 2.5 に示す、2017 年時点で約 23% であるのに対し、10 年後の 2027 年には約 48%に急増する。そのうち、橋長 15m 未満の橋梁は、2017 年時点で 28%であるのに対し、10 年後の 2027 年には、約 54%が建設後 50 年を経過することとなる。このほかに建設年度が不明の道路橋が全国で約 23 万橋あり(図 2.6)、これらの大半が市町村管理の橋長 15m 未満の橋梁である。

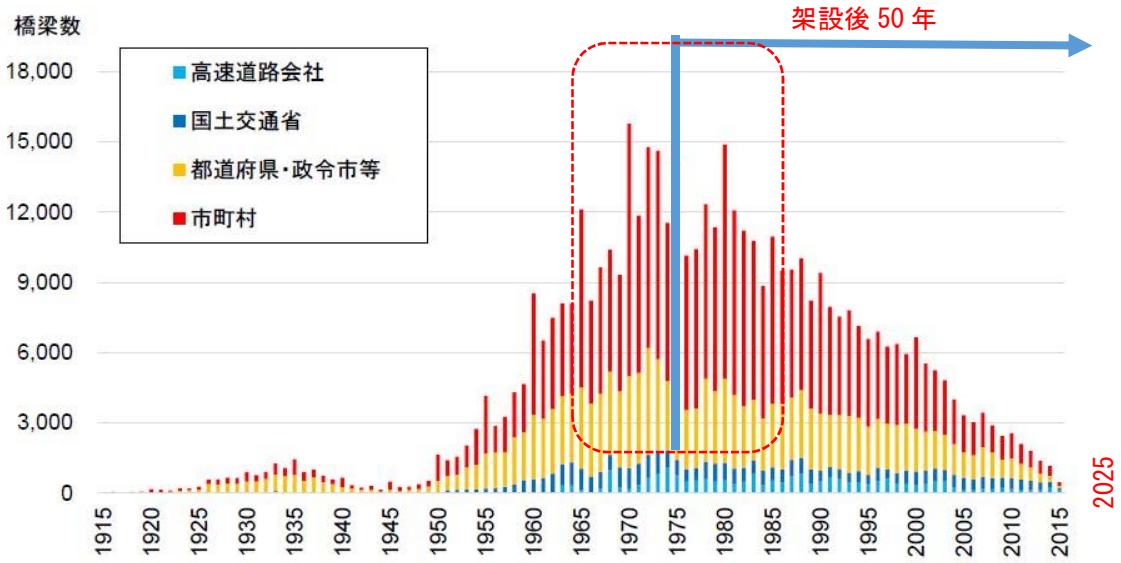


図 2.4 建設年度別の橋梁数

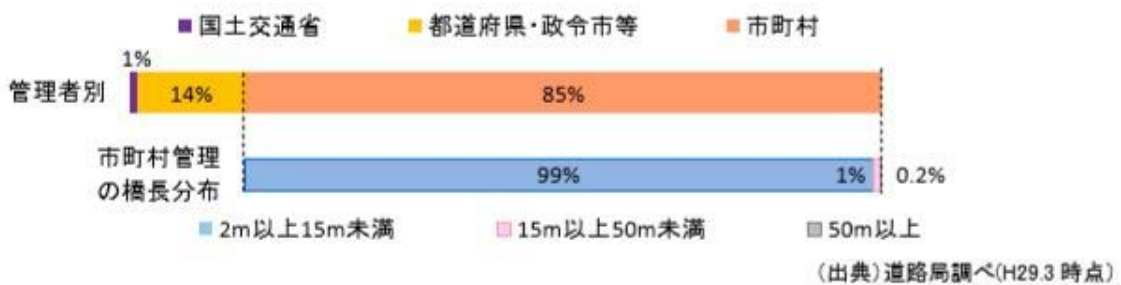
※この他に建設年度不明橋梁約23万橋
 ※市町村には特別区を含む
 (出典)道路局調べ(H27.12時点)

○建設後 50 年を経過した橋梁の割合



※この他に建設年度不明橋梁約 23 万橋
 (出典) 道路局調べ(H29.3 時点)

図 2.5 建設後 50 年を経過した橋梁年度不明橋梁別の橋梁数



(出典)道路局調べ(H29.3 時点)

図 2.6 建設年度不明橋梁(約 23 万橋)の内訳

2.2 維持管理における現状

維持管理は、橋梁に生じた変状を的確に点検等により把握して、その変状が初期欠陥、損傷、劣化の中のいずれによるもので、その主な原因が何であるかをできるだけ明確にし、適切な処置が講じられる必要がある。構造物の性能の経年劣化に影響を及ぼす劣化が顕在化している場合には、その劣化原因をできるだけ明確にし、劣化機構の推定・予測、性能の評価および対策の要否の判断を行い、対策を要する場合には適切に対策を実施する必要がある。また、一般的な維持管理は、個々の橋梁について検討することを基本としているが、インフラストックの構造物維持管理を行ううえではその個々の橋梁を含む複数の橋梁を全体として管理する必要がある。しかし、実際に橋梁の維持管理を行うためには、予算や人材、制度上の制約により計画通りに対応できていないのが現状である。

そのため、個々の橋梁に対してまず、点検したものを診断まで行う。その診断においては、同時期に架設された橋梁でもマクロ環境・メゾ環境により損傷および劣化の進行にはばらつきがある。

図 2.7 に示すとおり、点検、劣化機構の推定を行い、その結果を用いてその損傷について評価・判定し、対策の必要がある場合には補修・補強等を行う必要がある。

また、その性能評価した結果および対策を行った内容、工事は記録として管理することが維持管理を行ううえで大切となる。

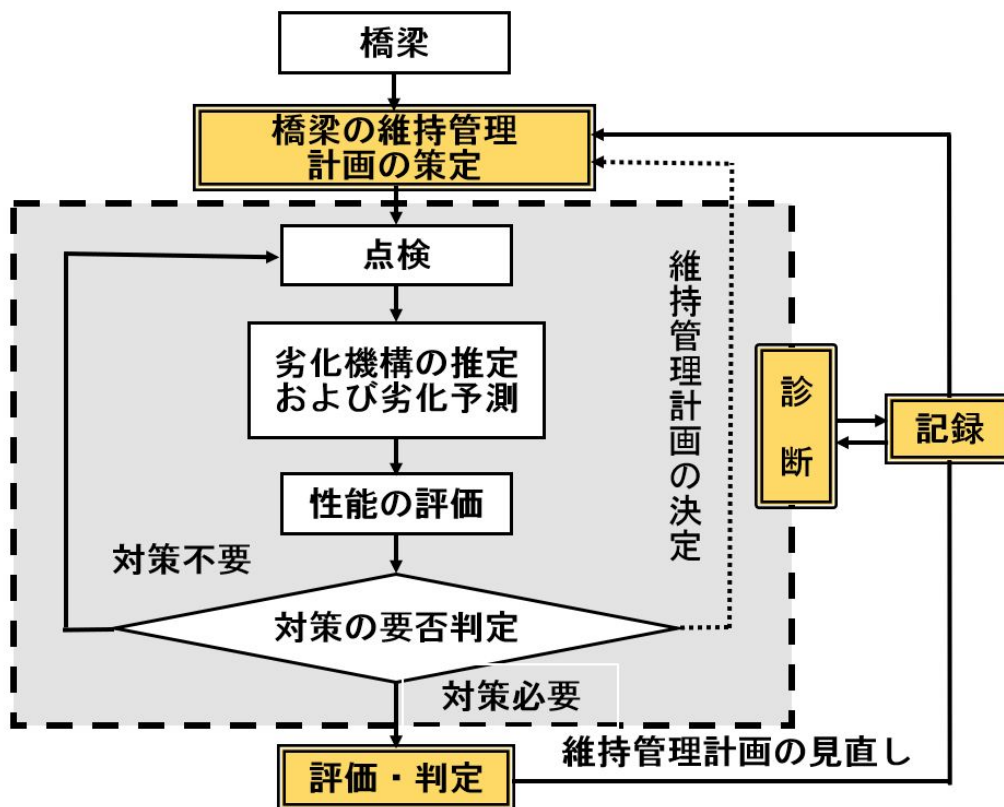


図 2.7 点検から評価判定までのフロー

2.2.1 点検の現状

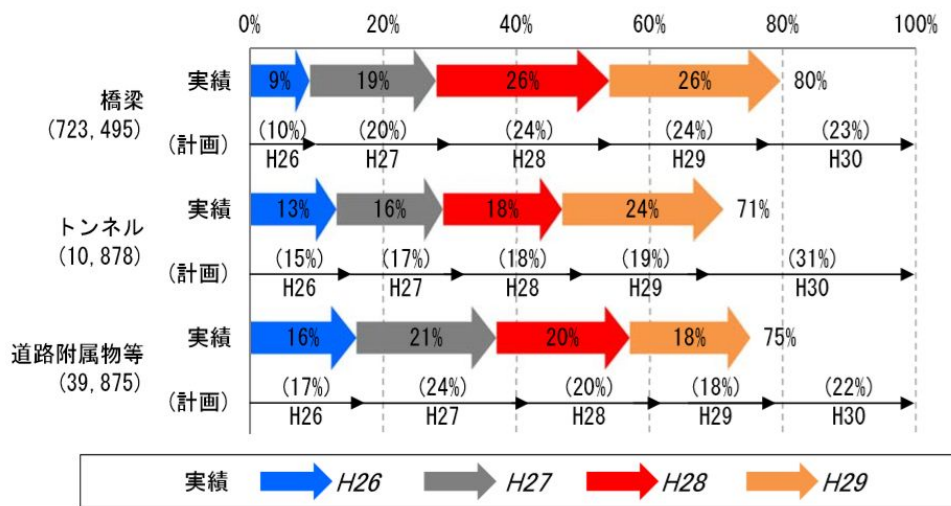
定期点検結果(平成26年より5年に一度の頻度で点検を実施中)を踏まえ、本格的な予防保全による道路の老朽化対策を推進し、戦略的・効率的な修繕等によるメンテナンスのセカンドステージを着実に実施しなければならない。

橋梁における点検の実施状況(図2.8)は、平成26から29年度の過去4年間で約80%の点検が実施されている。

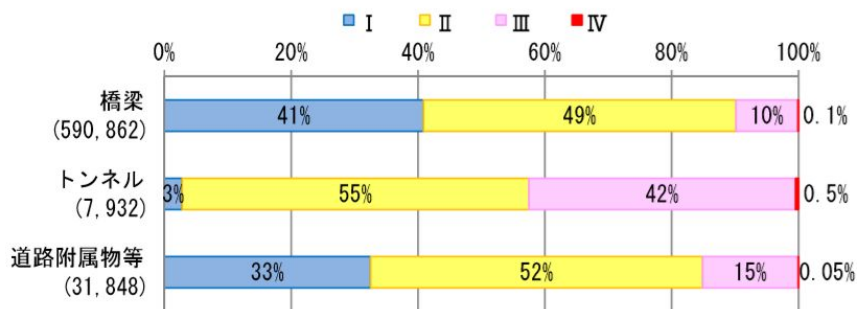
また、橋梁においては、点検実施の59万橋に対しての判定区分は、判定区分Ⅲ(早期措置段階)およびⅣ(緊急措置段階)を合わせると約10%となることが分かる。

健全性の診断は表2.1の4段階に区分される。

○ 5年間の点検計画と平成26～29年度の累積点検実施率(全道路管理者合計)



○ 橋梁・トンネル・道路附属物等の判定区分の割合(全道路管理者合計)



※四捨五入の関係で合計値が100%にならない場合がある(次頁以降も同様)。

道路メンテナンス年報より引用

図2.8 点検実施状況と点検結果(平成26年～平成29年度)

表 2.1 橋梁の診断区分

区 分		状 態
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態.
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが, 予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態.
III	早期予防保全段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり, 早期に措置を講ずべき状態.
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている, 又は生じる可能性が著しく高く, 緊急に措置を講ずべき状態.

次に平成 29 年度における全管理者の点検結果を図 2.9 に示すが, 全体の 72.5 万橋のうち 19.3 万橋の点検をしており, 点検の実施率は 27%である. その点検結果の内訳は, I (健全) 44%, II (予防保全段階)48%, III (早期予防保全段階) 8%, IV (緊急措置段階) 0.1%となった.

架設経過年数が長くなるほど損傷が出始めており, 補修対策が必要になることが分かる. そのため, II (予防保全段階)までの軽微なうちに予防保全的維持管理ができるようにすることが望ましい.

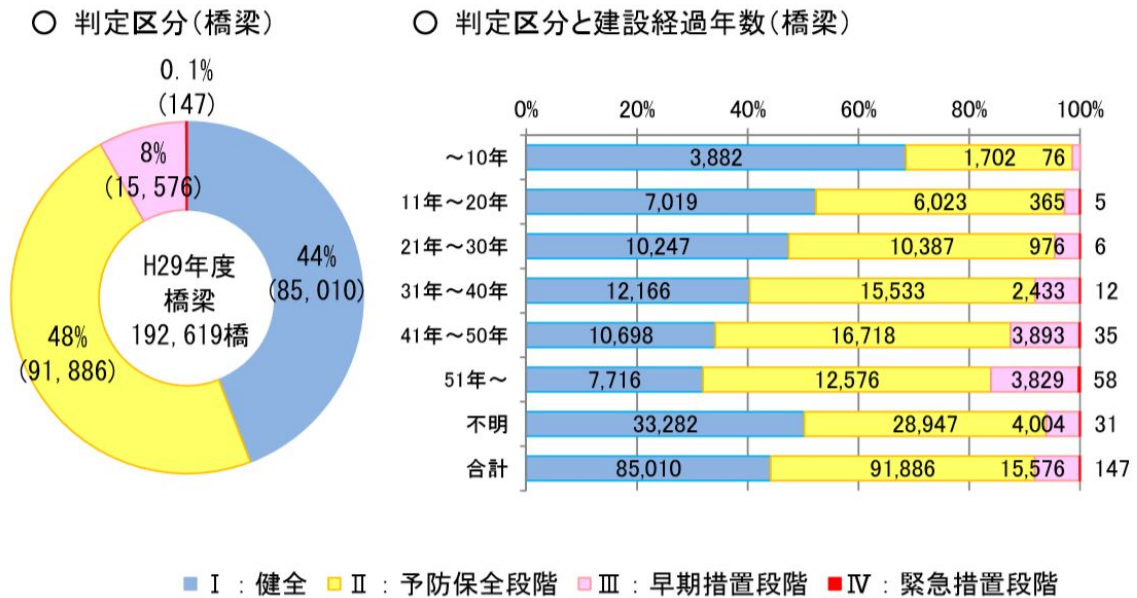


図 2.9 点検結果(平成 29 年度)

2.2.2 診断

定期点検では、橋単位で表 2.1 の判定区分による診断を行う。

道路橋毎の健全性の診断は、道路橋単位で総合的な評価を付ける。

そのため、構造特性や架設されている環境条件、道路橋の重要度等も踏まえ総合的に判断する必要がある。

この診断は、構造物の性能に影響を及ぼす主要な部材に着目して、最も厳しい評価で代表している。

2.3 維持管理における課題

2.3.1 効率的な維持管理

管理運用コストなどの「効率化」や社会資本が提供するサービスなどの「効果」の向上を図ることが必要である。効率化を図るためには、長期にわたる社会資本のライフサイクルを見通した体系的なマネジメントが必要となる。また、社会資本におけるサービスには、顧客である国民のニーズに的確に対応することが重要であり、利用者が安心して安全に利用できるインフラ施設、橋梁は特に重要であると考えられる。

実効的な維持管理手法の提案により効率化の向上を図ることのためには、確実な点検が必要であり、その点検結果について劣化機構の推定および劣化予測をする必要がある。

また、その劣化予測について橋梁の性能が低下するかしないかを評価・判断する必要がある。性能低下が判断できる場合には、対策の要否を判定し、対策工法を選定する必要がある。その結果は、確実に記録に残し今後の維持管理計画に必要な基礎資料となる。

市町村管理橋梁の診断区分Ⅳ（緊急に措置を講ずべき状態）の発生割合は、図 2.10 に示すとおり国の約 8 倍、都道府県・政令市の約 7 倍になっている。

このような状況を改善するためには、予算およびこれを管理する人材が必要であるが、市町村の地方自治体の管理橋梁の 66 万橋と多く、また、これらを管理する土木技術者も少ない。

この多くの橋を管理するためにも維持管理の重要性およびメリハリある維持管理が重要であることは判断できる。

**市町村管理橋梁の診断区分Ⅳ(緊急に措置を講ずべき状態)の発生割合は、
国の約8倍、都道府県・政令市の約7倍**

管理者	点検実施数 (橋)	診断区分Ⅲ		診断区分Ⅳ	
		(橋)	発生割合 (100橋あたり)	(橋)	発生割合 (10,000橋あたり)
高速道路会社	8,272	695	8	0	0
国土交通省	13,103	1,310	10	3	2.3
都道府県・政令市等	58,185	7,647	13	16	2.7
市町村	124,973	14,449	12	231	18
計	204,533	24,101	12	250	12

※H26～27年度点検結果
※市町村は特別区含む

(出典)道路局調べ(H28.3末時点)

道路メンテナンス年報の概要より引用

図 2.10 市町村管理橋梁の診断区分ⅢおよびⅣの評価

2.3.2 劣化予測のあり方

平成 26 年より 5 年に一度の橋梁点検が実施され、その点検結果を基に橋梁長寿命化修繕計画の見直しを行い、橋梁の健全度を向上または維持する必要がある。これまでの点検結果を用いた劣化曲線の設定における環境区分の設定については、県内自治体の多くは一般環境と塩害環境の 2 つに区分している。離島を多く保有しているわが県は、この塩害環境の設定手法が確立していないことが問題であると考えている。

現在の劣化の進行における予測は、点検結果に基づき各橋梁の部材毎の損傷を用いているが、この損傷には初期欠陥による損傷や補修が行われて再劣化した部材も含まれている。また、この各橋梁の損傷結果を用いて橋梁群として劣化曲線の設定をしている。

塩害環境下における環境区分を適切に区分し、維持管理することが必要であるとする。実効的な維持管理手法の提案により効率化の向上を図ることのためには、適切な時期に適切な判断と措置が行う必要がある。

(1) 損傷事例

以下に点検における損傷事例を示す。

写真 2.1 は、離島内陸部の損傷事例であるが、橋脚上伸縮継手からの漏水とかぶり不足等による剥離・鉄筋露出が診られる。写真 2.2 は、内陸部における山間部橋梁であるが地覆端部、水掛かり部の漏水により剥離が生じている。写真 2.3 は、離島における山間部の橋梁であるが、伸縮継手および地覆端部、水切り部の漏水により張り出し床板および桁下面に剥離・鉄筋露出の損傷が生じている。写真 2.4 は、内陸部の橋台であり伸縮継手部からの漏水により橋台前面に漏水跡が生じている。

このように損傷の多くは、桁端部や水掛かりがある部位にあるため、これらに着目し課題を整理する。水掛かり部の多くに損傷が多く発生しているため、その程度や頻度に着目した調査を点検の中で行うことが望ましい。水が掛かることで劣化することはないが、水や塩化物イオン等との浸入による塩害による鋼材腐食やアルカリ骨材反応、凍害等コンクリート劣化に大きく関与することが考えられる。



写真 2.1 離島 内陸部



写真 2.2 内陸部 山間部



写真 2.3 離島 山間部



写真 2.4 内陸部 橋台の水掛かり部

2.4 劣化機構に基づく環境外力の抽出

2.4.1 飛来塩分の影響

図 2.11 に塩害における劣化機構を示す。塩害とは、コンクリート中の塩分の存在により鉄筋周囲の不動態被膜が破壊されるとともに鉄筋が腐食を開始し、その部分への酸素、水分の供給に伴って腐食が促される現象である。その被害は鉄筋だけにとどまらず、かぶりコンクリートにひび割れを生じさせるまでに至ることも多い。塩害は、良質な川砂の枯渇等による海砂、混和材などの使用により最初からコンクリート内部に存在している塩分に原因がある場合と、海洋環境下における塩分の飛来や寒冷地等で道路表面の凍結防止のために使用される融氷剤等のように、外部から浸入してくる塩分に原因のある場合がある。

一般にコンクリートの空隙中の水分は、飽和水酸化カルシウム溶液と、これに若干の水酸化ナトリウムと水酸化カリウムを含む溶液として存在しており、その pH は約 12.5 程度と非常に強いアルカリ性を示している。このような強アルカリ性環境下では、鉄筋はその表面に不動態被膜と呼ばれる水和酸化物($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)からなる薄い酸化被膜を形成し、不動態化しているので、鉄は腐食作用から保護されている。したがって、適切な施工が行われたひび割れのない密実な鉄筋コンクリート構造物では、鋼材腐食はほとんど問題とならない。

しかし、アルカリ成分の溶出や炭酸化によってコンクリートのアルカリ度が低下した場合に、コンクリート中へ塩化物イオンなどの有害成分が混入すると、不動態被膜は破壊され、鉄筋は活性体となり腐食しやすくなる。活性体にある鉄筋は水と酸素の供給により腐食を引き起こす。最終的に、鉄筋表面に赤錆($\text{Fe}(\text{OH})_3$)や黒錆(Fe_3O_4)等の腐食生成物が形成される。これらの腐食生成物は鉄より大きな体積を占めるので、これによる膨張圧がかぶりコンクリートにひび割れを生じさせ、時にはその剥離を引き起こす。さらに、そこから腐食因子が容易に浸入し、腐食の進行を促進させる。

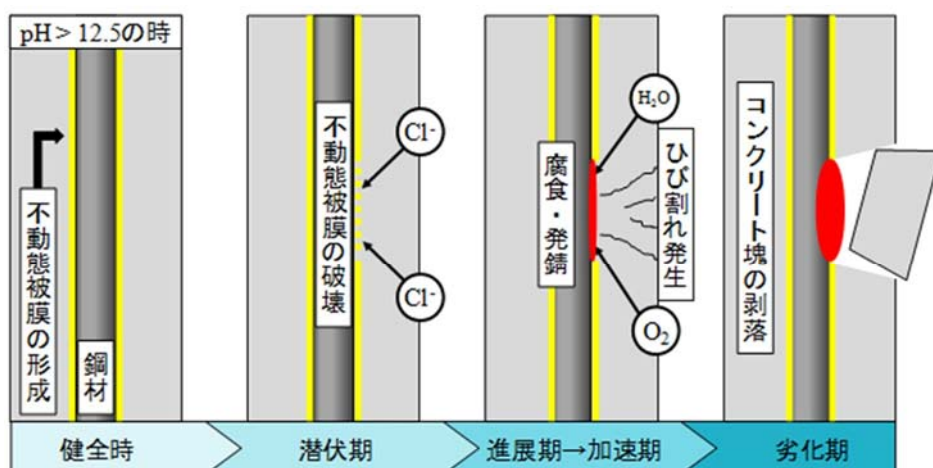


図 2.11 塩害によるコンクリートの劣化メカニズム

塩害の劣化に対する耐久性評価手法および問題点

現在、【2018年制定】コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では、コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測手法の一つとして拡散方程式を用いた方法を提示している¹⁾。

～示方書より一部抜粋～

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、塩化物イオンの濃度勾配に依存する拡散や水分移動に起因する移流のほか、セメント水和生成物やセメント成分への塩化物イオンの固定あるいは吸着などを伴う。塩化物イオンの拡散の予測は、(i) これら複雑な浸透現象を見かけの拡散現象ととらえて予測する方法と (ii) セメント水和生成物等に対する塩化物イオンの固定や吸着等の反応や乾湿繰返しにより毛管水とともに移動するメカニズムに基づいて予想する方法に大別される。一般には、前者による方法が用いられることが多いが、後者による理論的な計算方法についての研究も進められている。なお、後者の方法による場合には、塩化物イオン濃度をコンクリート単位体積中の量として計算するのではなく、液相中の塩化物イオン濃度を用いることが基本となる。

前者による方法の場合には、液相中の塩化物イオン濃度ではなく、コンクリート単位体積当たりの全塩化物イオン濃度が対象となり、次に示す4つの方法のいずれかにより見かけの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度等を設定して、式2.1により将来の塩化物イオンの拡散の予測を行う。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) + C_i \quad \text{式 2.1}$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x (mm)、供用期間 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/年)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m³)

erf : 誤差関数

γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数

このように、コンクリートの耐久性評価として、拡散方程式や塩化物イオンの見かけの拡散係数を用いることは大変一般的なものとなっている。しかし、実環境において塩化物イオンの移動の駆動力は濃度拡散だけではなく、乾湿繰り返しに伴う水分の移動の影響や塩化物イオンの吸着・固定化、さらには中性化に伴う塩化物イオンの濃縮など、様々である。そのため、例えば乾湿繰り返しの水分移動が激しい場所では塩化物イオンの移動形態が濃度拡散とは全く異なるため、全塩化物イオン濃度分布をFickの第2法則にフィッティングさせて評価しようとしても不合理が生じてしまう可能性がある。実際に丸屋らの研究報告では³⁾、⁴⁾、中東の高温乾燥環境下における塩化物イオンの浸透要因として、毛管水の移動を指摘しており、その重要性を述べている。また、見かけの拡散係数に関しても環境条件に応じて変化するという報告を受けており⁵⁾、環境の違いによる塩化物イオンの移動形態の影響が示唆されている。故に既往の研究報告からも明らかなように、塩化物イオンの移動を語る上では濃度拡散のみでは不十分であり、環境条件に応じた塩化物イオンの移動を与える要因を明確に把握した上で、浸透予測式に考慮しなければならない。

2.4.2 水掛かりの影響

コンクリートの劣化過程において水の存在がある。

中性化、アルカリシリカ反応による劣化については、水の影響があり、また、外力による影響として、床版の疲労があるがこれについても水が大きく関係している。

(1) 中性化の劣化機構

コンクリート構造物に生じる中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリートの空隙中の水分のpHを低下させる現象である。これにより、内部の鋼材表面の不動態皮膜が失われ、酸素と水分の供給により腐食が進行する。さらに鋼材の腐食により、ひび割れ発生、かぶりの剥落、耐力の低下などが起こる。また、炭酸化によってC-S-Hを含めた全ての水和物に変質することに加えて、セメント硬化体の空隙構造の変化が生じることにより、強度の変化や炭酸化収縮と呼ばれる収縮現象も併せて起きることが知られている。

現在、【2018年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編]では、中性化の進行予測手法の一つとして \sqrt{t} 則を用いた方法を提示している²⁾。

～示方書より一部抜粋～

中性化深さの測定値がある場合は中性化速度係数を測定結果から求め、その後の予測を行うとよい。中性化速度係数の算出は、原理的には一度の測定で可能である。ただし、信頼性の高い値を得るには、定期点検の中で数年から数十年の単位で数回測定を行い、最小二乗法等により算出するとよい。また、同一構造物でも測定部位によって中性化深さや中性化速度係数が大きく異なる場合は、部位ごとに中性化速度が異なるものとして扱う必要がある。

$$y = b\sqrt{t} \quad \text{式 2.2}$$

ここに、 y : 中性化深さ (mm)

t : 中性化期間 (年)

b : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

点検結果が無い場合は、コンクリートの材料、配合や構造物が供用されている環境条件を適切に考慮し、信頼性のある中性化速度式により予測を行う必要がある。中性化速度は多種多様な要因に影響を受けるが、多くの中性化速度式はコンクリートの特性を代表する指標として、水セメント比（水結合材比）や圧縮強度をパラメータとして用いる。予測には、対象となる構造物と同じ、あるいは類似した材料、配合、環境条件を対象としている式を用いることが望ましいが、そのような式が無い場合は次の式を用いてよい。

～示方書より一部抜粋～

$$y = \gamma_{cb} \cdot (-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t} \quad \text{式 2.3}$$

ここに、 W/B ：有効水結合材比 $=W/(C_p + k \cdot A_d)$

W ：単位体積あたりの水の質量

B ：単位体積あたりの有効結合材の質量

C_p ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

A_d ：単位体積あたりの混和材の質量

k ：混和材の種類によって定まる定数

フライアッシュの場合： $k=0$

高炉スラグ微粉末の場合： $k=0.7$

γ_{cb} ：予測の精度に関する安全係数

ただし、この式にはコンクリートの養生の影響や環境の影響が考慮されていないため、供用開始後に適宜、点検結果を用いて、劣化の進行予測を修正するのが好ましい。なお、式中の γ_{cb} は予測の精度全般にかかる安全係数で、一般的には 1.0 を用いてよい。

(2) アルカリシリカ反応の劣化機構

セメントに含有されるアルカリは、セメントの水和反応の過程でコンクリートの空隙内の水溶液に溶け出し、水酸化アルカリ (NaOH および KOH) を主成分とする強アルカリ性 (pH=13～13.5) の水溶液となる。ある種のシリカ鉱物もしくはガラス質鉱物質を含有する骨材は、コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させることがある。このような反応は、アルカリシリカ反応と総称されている。岩石中で水酸化アルカリを含む水溶液と反応するものには、オパール、クリストバライト、トリディマイト、隠微晶質もしくは微晶質な石英といったシリカ鉱物や火山ガラス等がある²⁾。

(3) 床版疲労について

昭和 39 年道路橋示方書で設計した RC 床版が建設後 4, 5 年で局所陥没事故を発生したことに端を発して、昭和 45 年頃から床版の疲労損傷の議論が始まった。

実橋での損傷は、自動車が走り抜けることに起因し、自動車の移動によって配力鉄筋断面に交番断面力が作用することによる。

自動車が走行する輪荷重による交番断面力が発生し、床版上面でも主鉄筋方向にひび割れ、下からの曲げひび割れとドッキングして貫通ひび割れとなるとともにひび割れ面の摩耗が早い速度で発生するためである。

これまでの陥没破壊した床版ではほとんどが遊離石灰の沈着を生じているため、雨水による損傷の加速が原因によるものである。

床版上に薄く水を張って輪荷重走行試験の結果、乾燥状態の 80 万回持ったものが僅か 2 万回程度で床版上面が砂利化して押し抜きせん断破壊することが確認された。

実験結果を平均すると実に 100 倍程度早く破壊する。つまり床版の損傷は大きな輪荷重になっている大型トラックが多数走り抜ける特有の疲労現象であり、それに雨水が舗装を通じて床版上面のひび割れに浸入し、押し抜きせん断破壊が加速されるためである。

この成果やその後の研究を経て、平成 14 年の道路橋示方書から床版全面に防水工が必要とされ、日本道路協会の道路橋床版防水便覧（平成 19 年）で具体化された。NEXCO の構造物施工管理要領におけるグレードⅡ（高性能床版防水、平成 24 年）である。

このように水の影響による床版劣化がクローズアップされた。



写真 2.5 水平ひびわれ（上面鉄筋位置に多い）

輪荷重による床版疲労も水の影響が大きく上面鉄筋位置に水平方向のひび割れが発生している。また、荷重作用によるねじりの影響でひび割れ幅は大きくなるが、その原因は明らかではない。そのため、対策としては床版への雨水の浸透を防ぐためのも防水層が有効であると考えられる。

水張り実験では2ケタ（100倍）の損傷進行の差

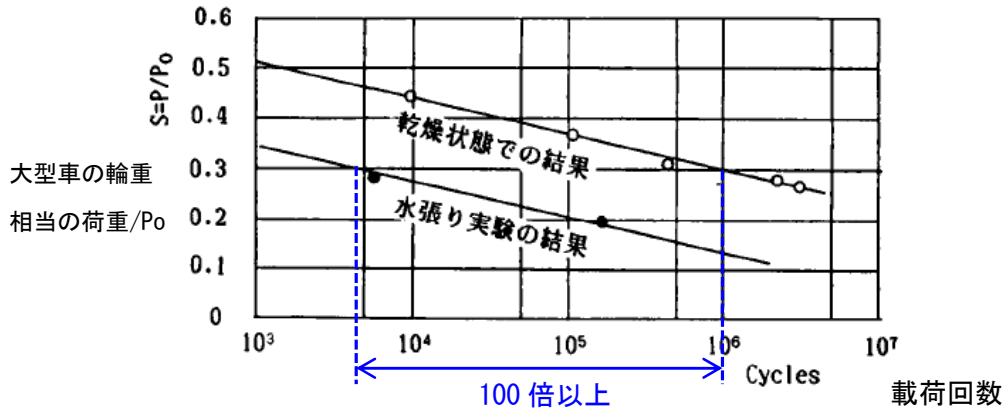


図 2.12 床版疲労 S-N 結果

2.5 まとめ

わが国の社会資本は高度経済成長期に建設されたものが多く、その余寿命を考慮すれば、近い将来大量の橋梁が一斉に更新時期を迎えることは確実である。

橋梁はこれまでに約 73 万橋つくられており、維持管理する担い手である人材不足や予算の確保が厳しいなか、効率的でかつ効果的な維持管理をすることが喫緊の課題である。維持管理は、橋梁に生じた変状を的確に点検等により把握して、その主な原因が何であるかをできるだけ明確にし、適切な処置が講じる必要がある。

塩害環境における飛来塩分の関係や水掛かり部の損傷のメカニズムについての報告は少ない。そこで本研究では、以上の点にも着目して検討を行った。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会ほか：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，社団法人土木学会，pp. 139-144，2018. 10
- 2) 土木学会コンクリート委員会ほか：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，社団法人土木学会，pp. 119-122，2018. 10
- 3) 丸屋剛，武田均：高温乾燥環境下における塩化物イオンの移動，土木学会第52回年次講演会，V-120，pp. 240-241，平成9年9月
- 4) 丸屋剛：毛管水の移動にともなう塩化物イオンの移動，土木学会第51回年次講演会，V-120，pp. 240-241，平成8年9月
- 5) 劉姁，武若耕司，山口明伸，石橋美希：塩害劣化の影響を受けるコンクリート構造物の塩分浸透性評価，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，V-219，pp. 437-438，2010. 9
- 6) 土木学会コンクリート委員会ほか：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理】社団法人土木学会，pp. 1-103，2018. 10
- 7) 道路メンテナンス年報

第 3 章

飛来塩分評価手法の検討

第3章 飛来塩分評価手法の検討

3.1 実構造物における飛来塩分調査

3.1.1 はじめに

環沿岸環境下における，飛来塩分の影響について実構造物での検証を 2 つの環境において検討を行った．1 つは，与論島において島全体の飛来塩分の影響についてマクロ環境での違いについて検証した．また，同年代に架設された実橋梁群においてメゾ環境違いについて検証した．

3.1.2 与論島における飛来塩分調査

(1) 背景(薄板モルタル供試体によるポータブル蛍光 X 線装置)

海岸付近に位置する構造物は，海からの飛来塩分によりコンクリート内部の鉄筋や鉄骨部分などの腐食が促進され，耐久性が著しく低下することが知られている．(写真 3.1)

そこで，構造物の耐久性低下の促進要因となる飛来塩分に関して，与論島で調査を実施した．



写真 3.1 与論庁舎(海岸から約 80m)の劣化状況

(2) 調査方法

標高や風などの環境条件が飛来塩分の分布に及ぼす影響を把握するために、与論島における飛来塩分の分布をモデル化した。今回、与論島を対象とした利点として、飛来塩分を単に海岸線からの距離だけでなく、標高や風向き遮蔽物の有無などを考慮しコンパクトに調査が可能であると判断したためである。

調査方法としては、薄板モルタル供試体を用いこの供試体を粉砕したのちポータブル蛍光X線装置にて塩分滴定にて塩化ナトリウム量を求めた。(写真3.2)

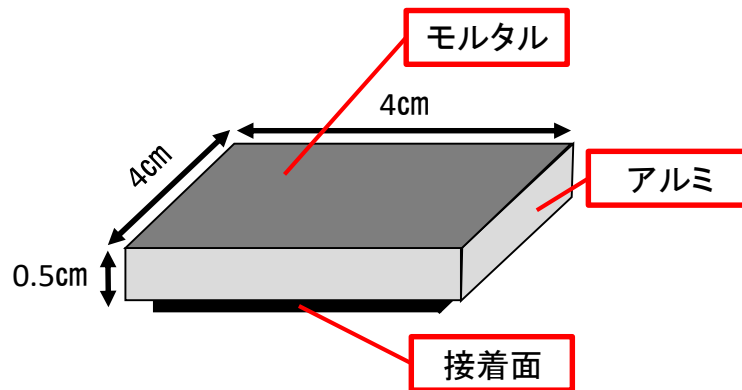


写真 3.2 薄板モルタル供試体および設置例

薄板モルタル供試体は、**図 3.1** に示すように電柱の下面から 3m の位置に設置し、その試料を用い携帯型蛍光 X 線 (**図 3.2**) により飛来塩分量を調査した。

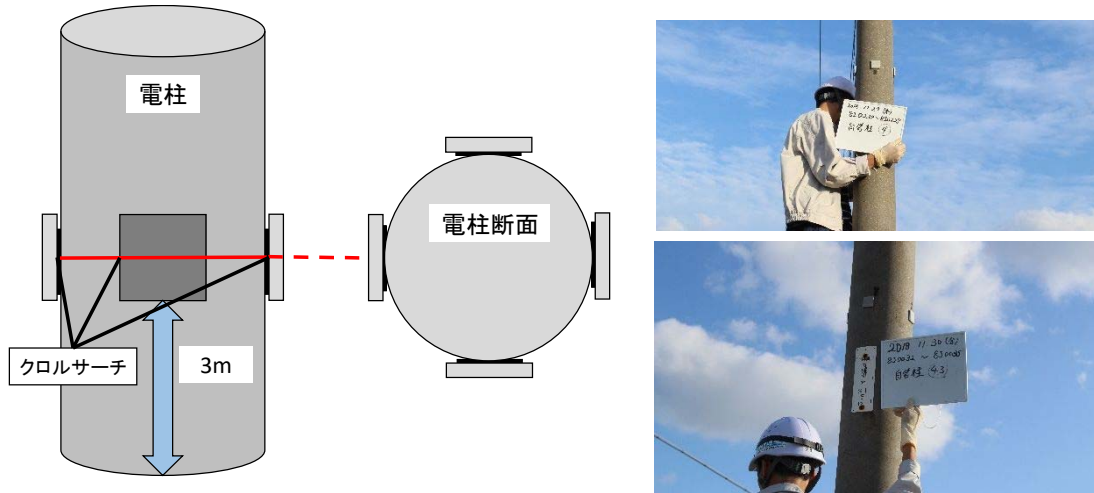


図 3.1 自営柱への薄板モルタル供試体設置例



図 3.2 ポータブル蛍光 X 線装置

本来は、薄板モルタル供試体を粉砕後、塩分滴定を行い塩化ナトリウム量を求める。

ここで、ポータブル蛍光 X 線とは、物質に X 線を照射すると元素に固有のエネルギーの蛍光 X 線が発生することを利用して、物質の中に含まれている元素の種類や量を調べることが可能である。そのため、容易に構造物に付着する塩分量が測定可能となる。

既往の研究では、薩摩川内市の塩分滴定結果より **図 3.3** の式-3.1 が得られている。一例として図中の近似式を使ってポータブル蛍光 X 線装置により C1 濃度 0.5% での JIS 法の C1 量を算出すると 4.77 kg/m³ を得ることができる。

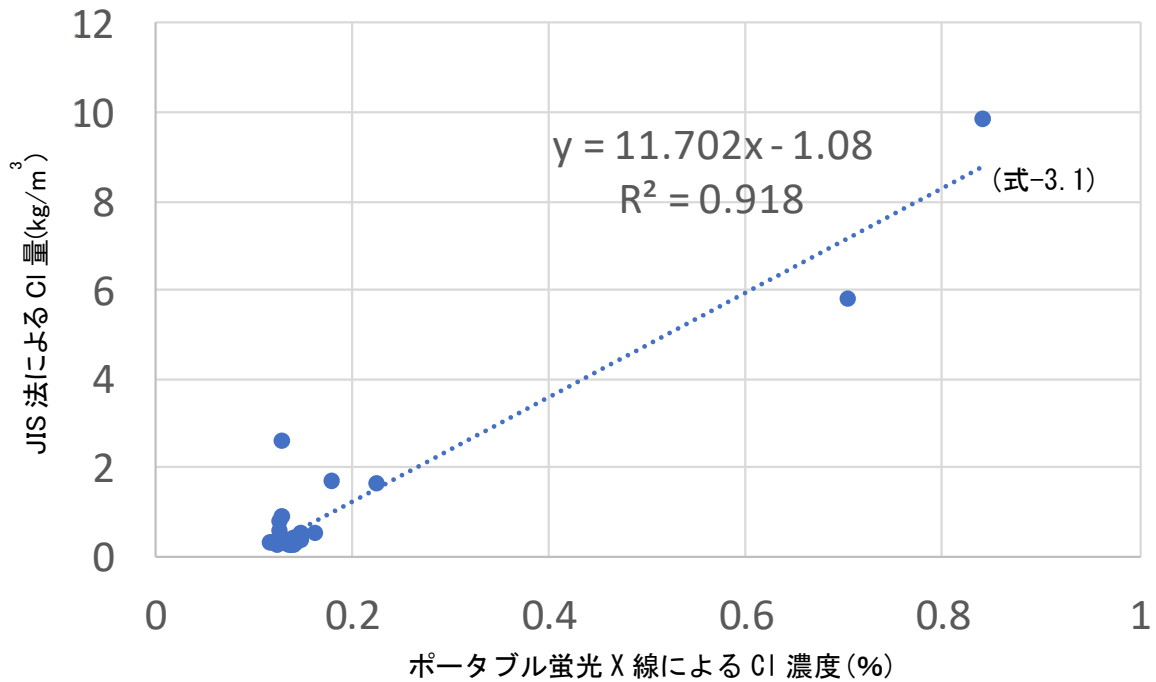


図 3.3 薩摩川内市の塩分滴定結果と薄板モルタル供試体の X 線結果との比較

この Y 式に与論で回収した薄板モルタル供試体供試体をポータブル蛍光 X 線で計測し代入すると推定 Cl 量(kg/m³)が求まる。

(補足) 飛来塩分量 (または付着塩分量) の単位について

既往の研究においては、飛来塩分量 (または付着塩分量) を表す単位として、主として以下に示すものが用いられている。

① 単位時間単位面積あたりの飛来塩分量

塩分捕集器などにより得られたデータは、通常は以下のような単位が用いられる。

- ・ mg/dm²/day (mdd と表記される場合が多い。1dm²=100cm²)
- ・ g/m²/hr など

なお、例えば日平均飛来塩分量は以下のように求められる。

$$\text{日平均飛来塩分量(mdd)} = \frac{\text{計量塩分濃度(mg/ml)} \times \text{回収水量(ml)}}{\text{収集期間(day)} \times \text{収集面積(dm}^2\text{)}} \quad \text{式-3.2}$$

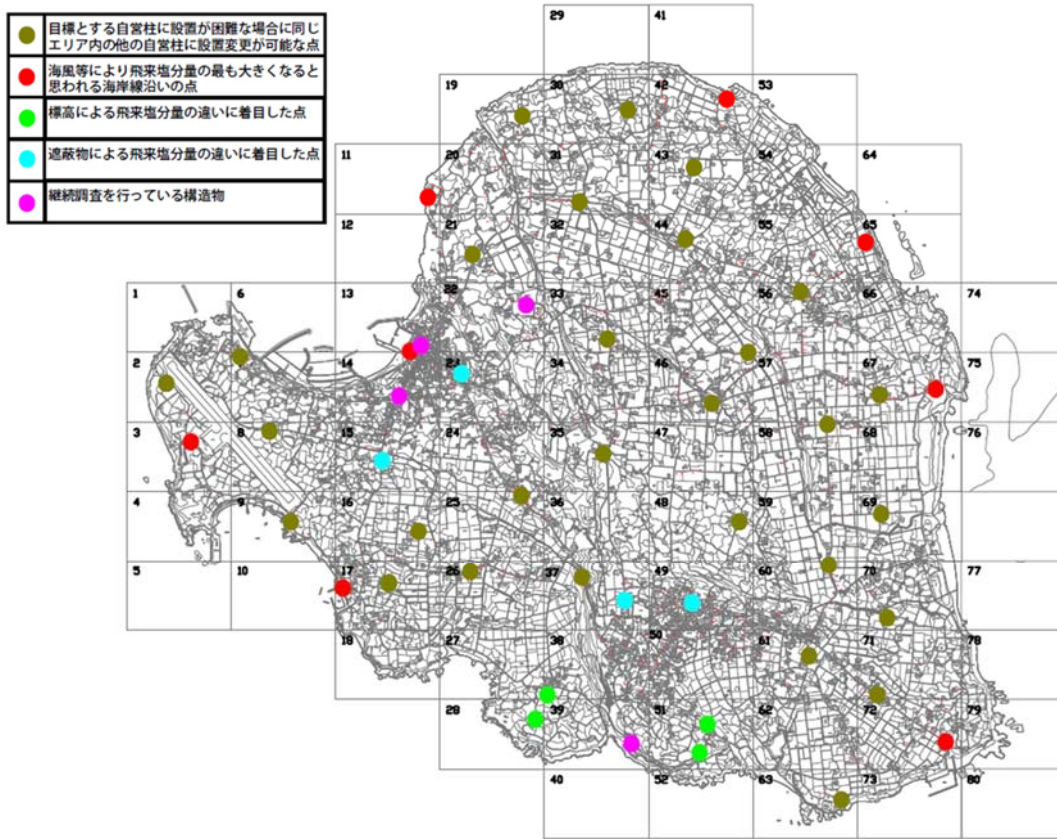
② 単位時間あたりのコンクリート表面に付着する塩分量

コンクリート中の塩分量分布から付着塩分量を推定した結果に対して用いられる¹⁾。

- ・ kg/m³/sec

(3) 薄板モルタル供試体設置

以下は薄板モルタル供試体設置点をプロット図にしたものである。(図 3.4)



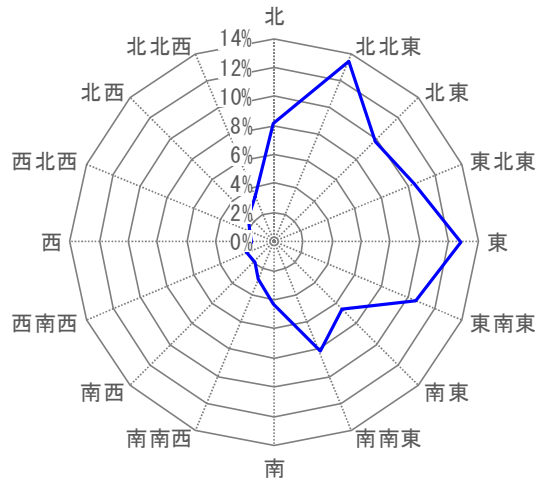
- 赤：飛来塩分量が大きいと考えられる海岸付近の点
- 黄緑：標高差が40m(東側が高い)の点
それぞれ海岸線からの距離が230m,380m
- 水色：遮蔽物の有無(西側 遮蔽物無 南側 遮蔽物有)を考慮する点
- ピンク：継続調査場所
- 金：島全体に均等に設置するための点

図 3.4 与論島におけるプロット図

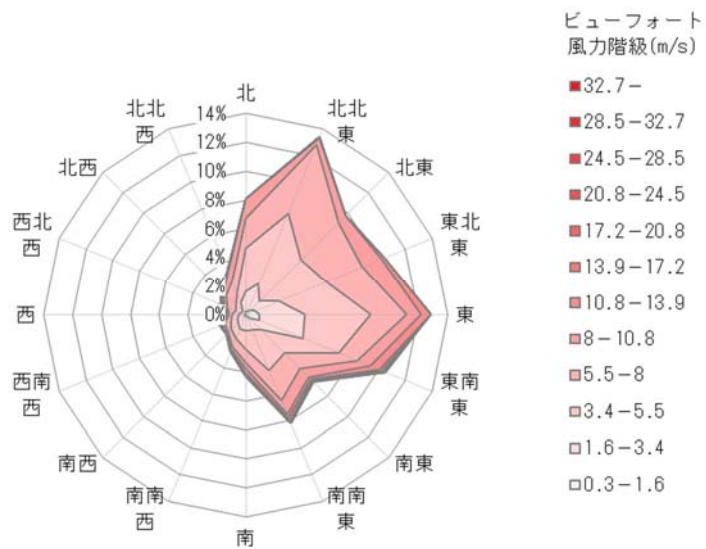
(4) 風の影響について

設置期間中の風の吹き方

与論島における風向頻度図と風配置を以下に示す。与論島の夏から秋にかけての風向きは、北北東から東よりの風が卓越していることが分かる。(図 3.5)



2018/7/7～2018/11/29
与論の風向頻度図



2018/7/7～2018/11/29
与論の風向配置図

図 3.5 風向き・配置図

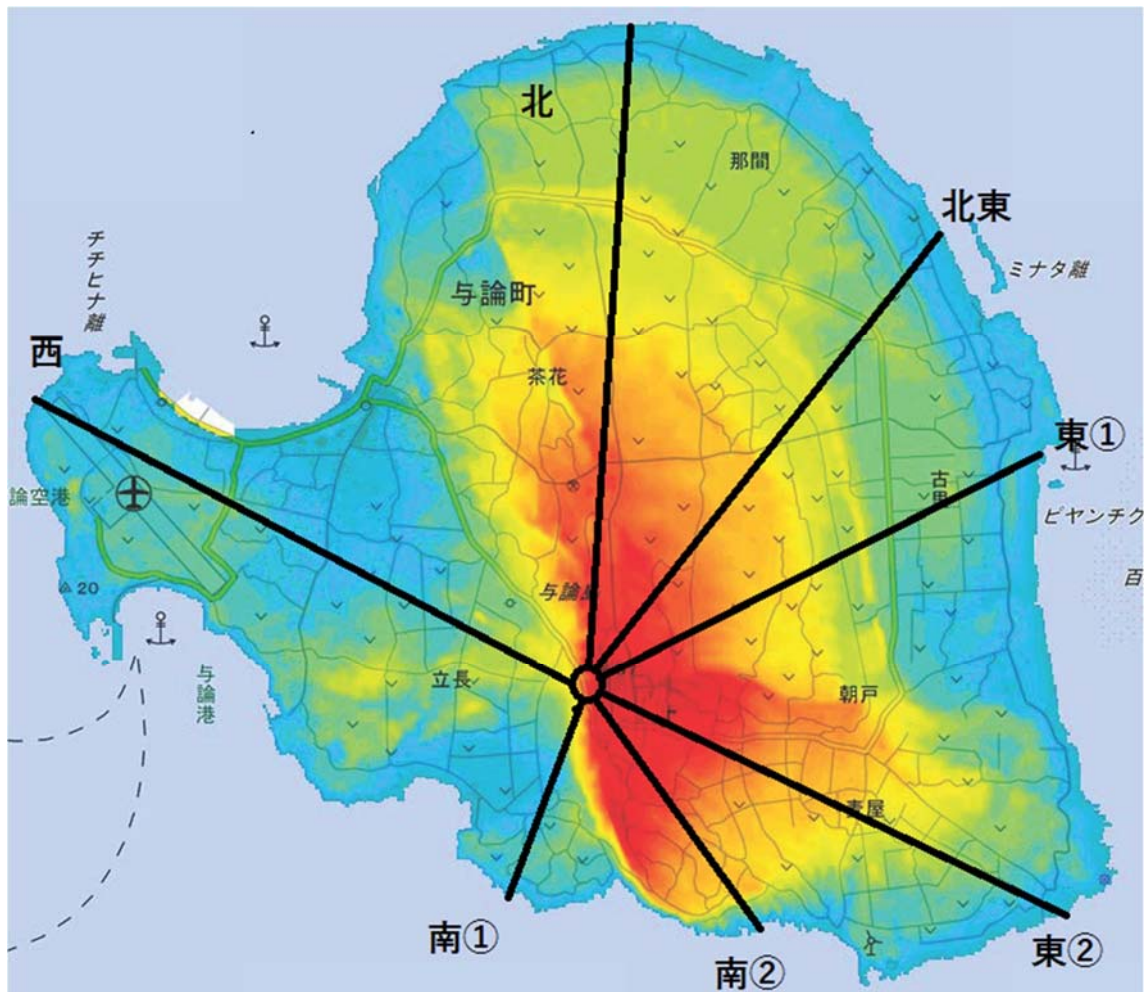


図 3.6 主な方位の別配置図

与論島の山頂を起点として尾根と谷を基本として図 3.6 に示す 7 方向に分けて日平均飛来塩分量を測定して、汀線からの距離と標高によりどのような傾向があるかを検討した。

また、期間については、2018/7/7～2018/11/29 における 10 分ごとの気象庁のデータから作成した。

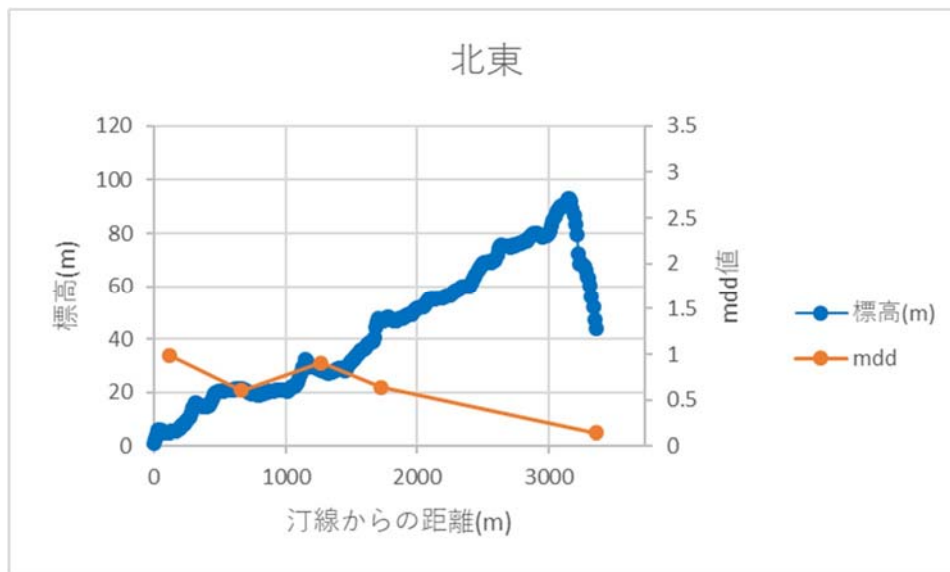


図 3.7 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量配置図 【北東】

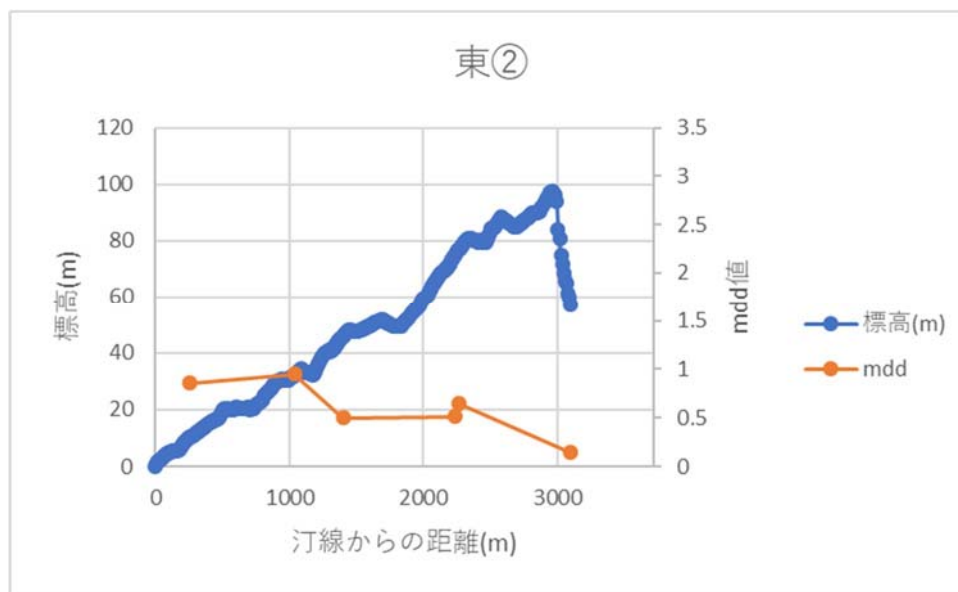


図 3.8 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量配置図 【東②】

与論島の夏から秋にかけての風向きは、北北東から東よりの風が卓越しているため、北東(図 3.7)および東②(図 3.8)において標高 100m 付近の約 3km 付近まで飛来塩分の影響があることが分かる。

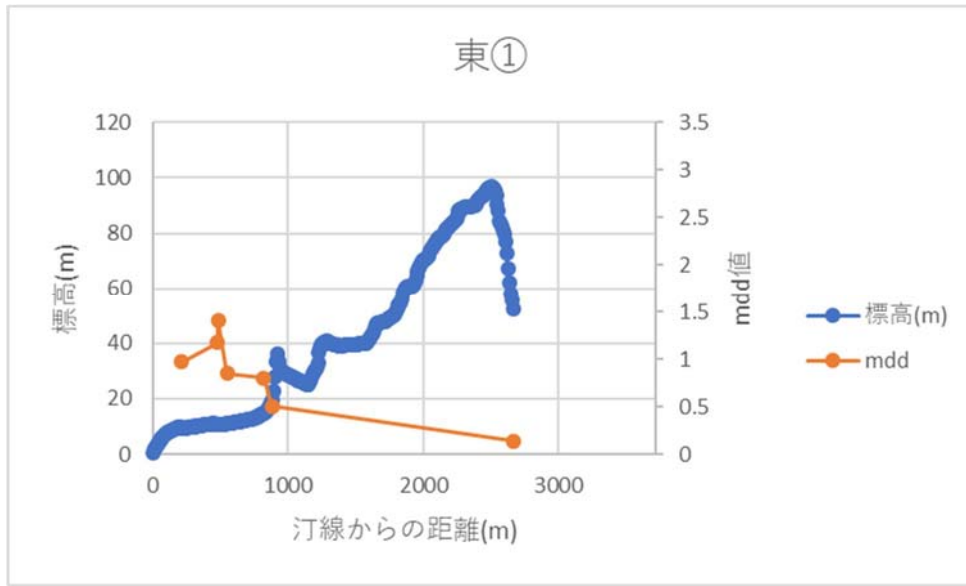


図 3.9 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量 【東①】

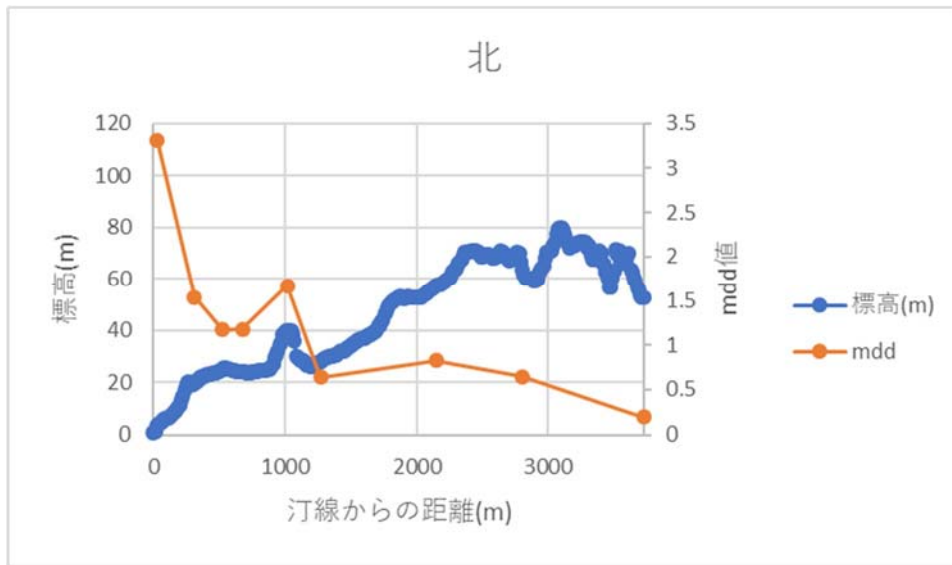


図 3.10 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量 【北】

北北東から東よりの風が卓越していることより、東①(図 3.9)も北東および東②(図 3.10)と同様の傾向が見える。また、北においては、汀線付近から 1km 程度までは、飛来塩分の影響が高いことが分かった。北側に関しては、他の方向に比べて汀線部分で 3 倍程度の影響があることも分かった。

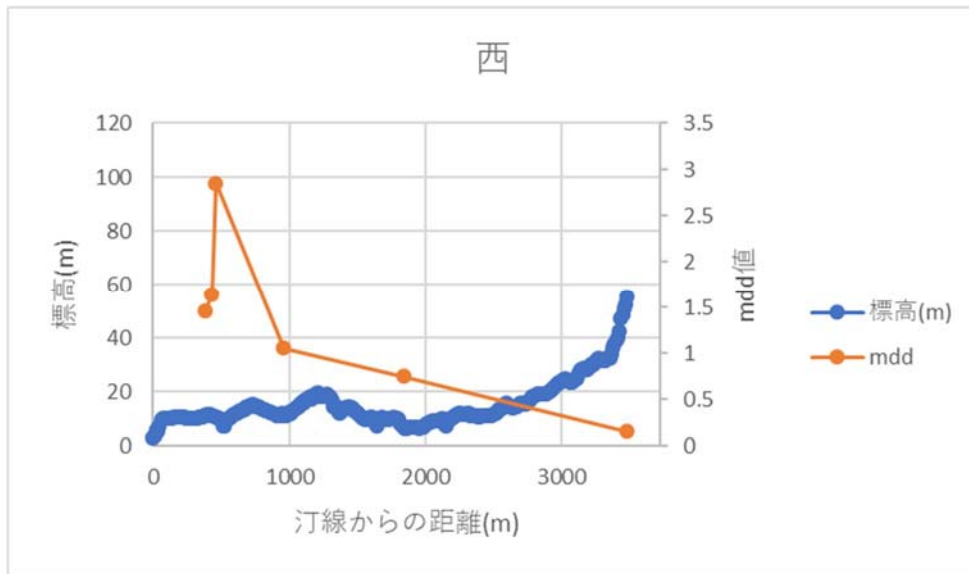


図 3.11 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量 【西】

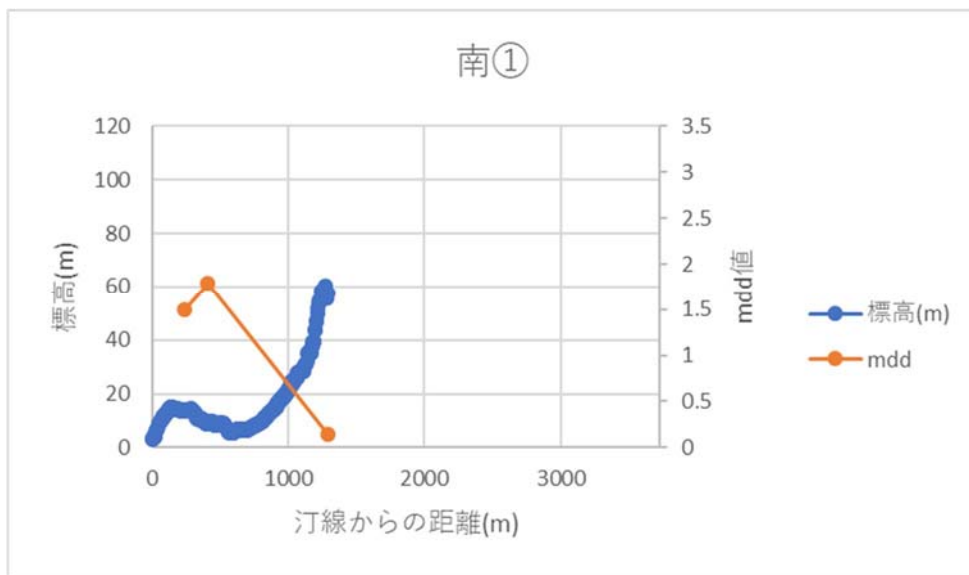


図 3.12 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量 【南①】

与論島の夏から秋にかけての風向きは、北北東から東よりの風が卓越しているがその対角となる西側(図 3.11)でも汀線付近では飛来塩分の影響が高いことが分かった。

南①(図 3.12)は汀線から 1 km 付近に山頂があるため、その付近までは飛来塩分が滞留していることが分かった。

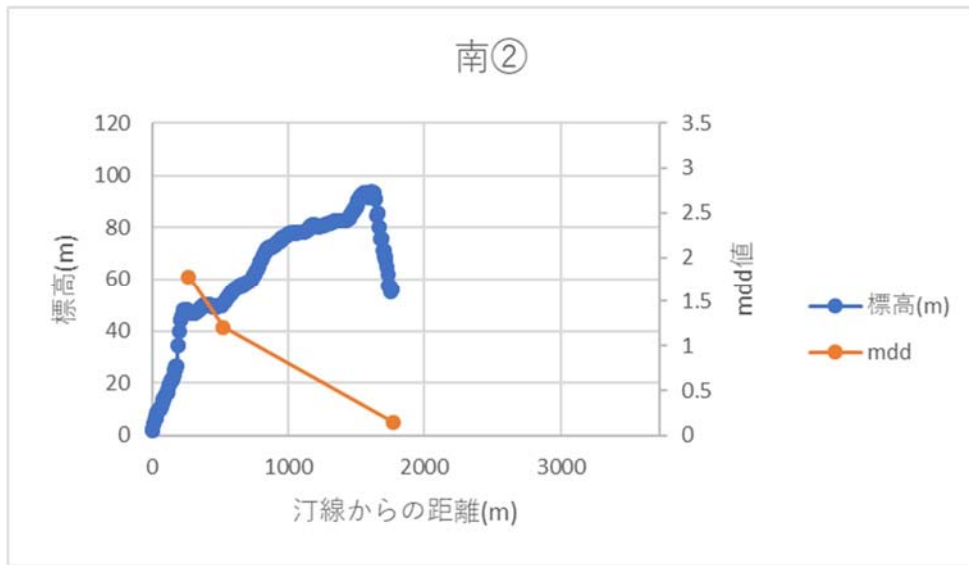


図 3.13 汀線からの距離と標高による日平均飛来塩分量 【南②】

南②(図 3.13)は汀線からすぐに山頂迫っているため、汀線付近の飛来塩分の影響は高いことが分かった。

3.1.3 結果および考察

図 3.14 に各自営柱の東西南北の飛来塩分量 mdd の値で等高線を描いた図と、色別標高図を重ねた図を示す。等高線 mdd0.25 間隔である。まず等高線より、4 面とも海岸付近の飛来塩分量が多く、海岸線からの距離が大きくなるにつれて飛来塩分量が少なくなる。このことより、海岸線からの距離が影響していることがわかる。また、等高線と標高を照査すると、全体的に標高が変化する境界に沿う様に等高線が描かれているとわかる。

次に、それぞれの面を考えると自営柱北面は、矢印で示した点で標高差が激しく、風が遮断され、飛来塩分がその場に留まったと推察される。

自営柱南面は、島南側に標高差が特に激しい点があるが、南風が非常に強いことにより風が卓越し、標高が高い点にも飛来塩分が輸送されたと推察される。

次に、自営柱東面は、風の割合が最も多いが、 $mdd \geq 1.0$ の範囲は最も狭い。要因は、島東部にある最長 1.5 km のサンゴ礁により、沖で砕波が生じ、飛来塩分到達までの距離が長くなることが挙げられる。

次に、自営柱西面は、 $mdd \geq 1.0$ の範囲が最も広く、また、西風が強く、島西部に低地が広がっており、飛来塩分が障害物に遮蔽されることなく島内部に広がったと推察される。

以上より、飛来塩分は海岸線からの距離、地形、標高、風など様々な要因が飛来塩分分布に影響すると考察された。しかし、風の影響は時期により風の吹き方も変化するため、次の調査で同じ点のデータと比較することで顕著に風の影響が表れると推察される。

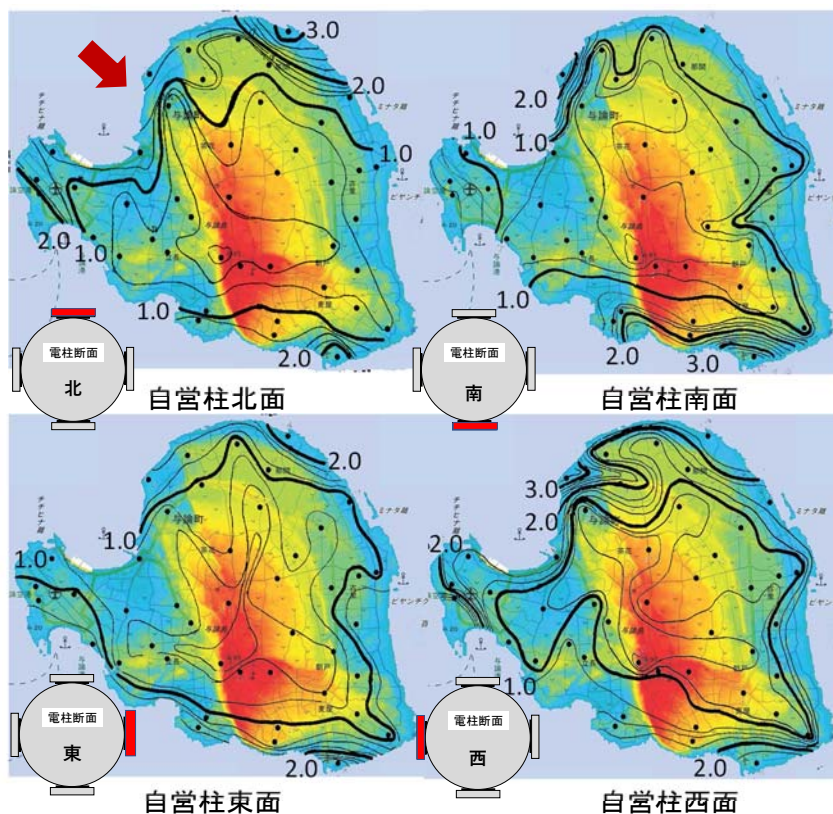


図 3.14 各方向 mdd 値と識別標高図

次に図 3.15 は、与論島の飛来塩分環境マップを示す。東西南北の飛来塩分等高線マップを重ね合わせ、安全側で作成したマップ図である。赤色が $mdd \geq 3.0$ 、ピンク色が $2.0 \leq mdd < 3.0$ 、橙色が $1.0 \leq mdd < 2.0$ 、黄色が $0.5 \leq mdd < 1.0$ 、緑が $mdd < 0.5$ である。海岸線から約 1.0km 圏内は大半が $mdd \geq 1.0$ であるといえる。

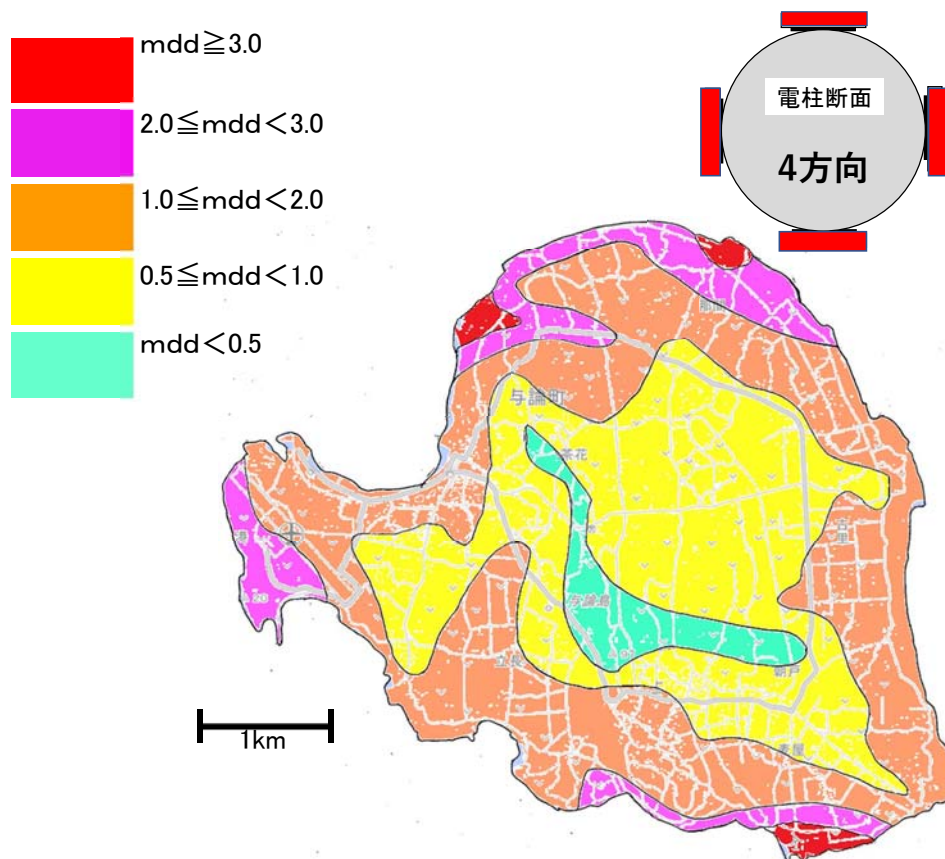


図 3.15 各方向 mdd 値と識別標高図

また、今回は夏季のみであるが、この風の吹き続けると仮定した時、mdd を一般的なコンクリート構造物の評価方法に準じたものを表 3.1.1 に示す。それぞれの mdd 値をコンクリート表面塩化物イオン濃度 C_0 に換算し、普通ポルトランドセメント、水セメント比 0.5、かぶり 3cm の構造物を想定し、鋼材腐食発生限界濃度に到達するまでの耐用年数 t を算出した結果を表 3.1 にて示す。mdd3.0 では耐用年数が 13 年、mdd2.0 では耐用年数 21 年でありこの条件下においては、一般的な建築物の設計耐用年数である 30 年に満たないと推察される。

表 3.1 飛来塩分環境マップ

mdd	0.5	1	2	3
$C_0(kg/m^3)$	2.196	2.684	3.636	4.556
t(year)	311	63	21	13

3.1.4 まとめ

1) 風の影響について

風速と塩分が飛来する距離，風向と塩分が飛来する方向は相関がみられ，飛来塩分量も大きく異なってくる．また，与論島の場合，島中央部の標高が高い点においても海岸付近と同等程度の塩分が飛来してくる．

・標高の影響について

海岸から 200m の点では，標高の影響よりも風の影響が大きくなっている．

海岸から 400m の点では，風の影響を受ける方向(風速が大きい)の点のみ，標高の違いによる差がみられた．

・全体として

島の中心部の標高が高く汀線部分においては風向きに関係なく飛来塩分量は高いことが分かった．また，西においては湾の影響により風下にはなるが汀線から近い位置には飛来塩分量が高く，滞留しているように見える．

風の影響のみでなく地形の影響も大きいため，飛来塩分量の影響は単純でないことも分かった．

単に海岸線からの距離だけでなく，風の吹き方や標高などの地形が飛来塩分の分布に大きく影響することが確認された．また，与論島は飛来塩分が構造物に及ぶ影響が甚大であると考察された．これらの結果は 2018/7/7～2018/11/29 の期間での結果であり，台風の影響も考えられる．したがって今後，時期により風の吹き方等も変化するため継続調査を行う必要がある．

与論島でも地形，標高，風向，風速により環境外力の相違は確認できた．そのため，今後はこれらのデータを蓄積し，構造物のおかれた環境による環境外力評価が必要であることがわかった．

3.2 同一年代に架設された実橋梁群の劣化状況に関する基礎的検討

3.2.1 はじめに

構造物の劣化進行を精度よく予測するためには、都道府県や市町村の位置に想定するマクロ環境だけでなく、数十～数百メートルの違いに相当するメゾ環境の影響を適切に評価する必要があるが、メゾ環境の影響については未だ十分な検討がなされていない。本研究では、メゾ環境の違いが構造物の劣化に及ぼす影響を把握することを目的に、塩害環境である同一地域内に同一年代に架設された実橋梁群の劣化状況調査を行い、メゾ環境の違いが構造物へ与える影響を検証した。

3.2.2 調査対象と調査内容

対象とした橋梁群は鹿児島県内離島の海岸付近で供用中の 8 橋の実橋梁である。調査対象橋梁の諸元を表 3.2 に、位置関係および損傷図を図 3.16 に示す。対象橋梁は A, B の 2 つの河川に 4 橋ずつ架かっており、河川記号と海岸からの距離を記号化し、それぞれ A-0～A-240, B-0～B-120 と称す。

調査項目は、近接目視および打音検査による外観観察、反発度試験、拭き取り法と蛍光エックス線による表面塩分量測定、自然電位分布測定、コア採取による中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布などである。

表 3.2 橋梁の諸元

橋梁	A-0	A-80	A-160	A-240	B-0	B-40	B-80	B-120
海岸線からの距離(m)	0	80	160	240	0	40	80	120
橋長(m)	7							
幅員(m)	9.5	6	12	6	9.5	4	6	6
架設年	S55							
供用年数	33年							
形式	現場打ボックスカルバート							

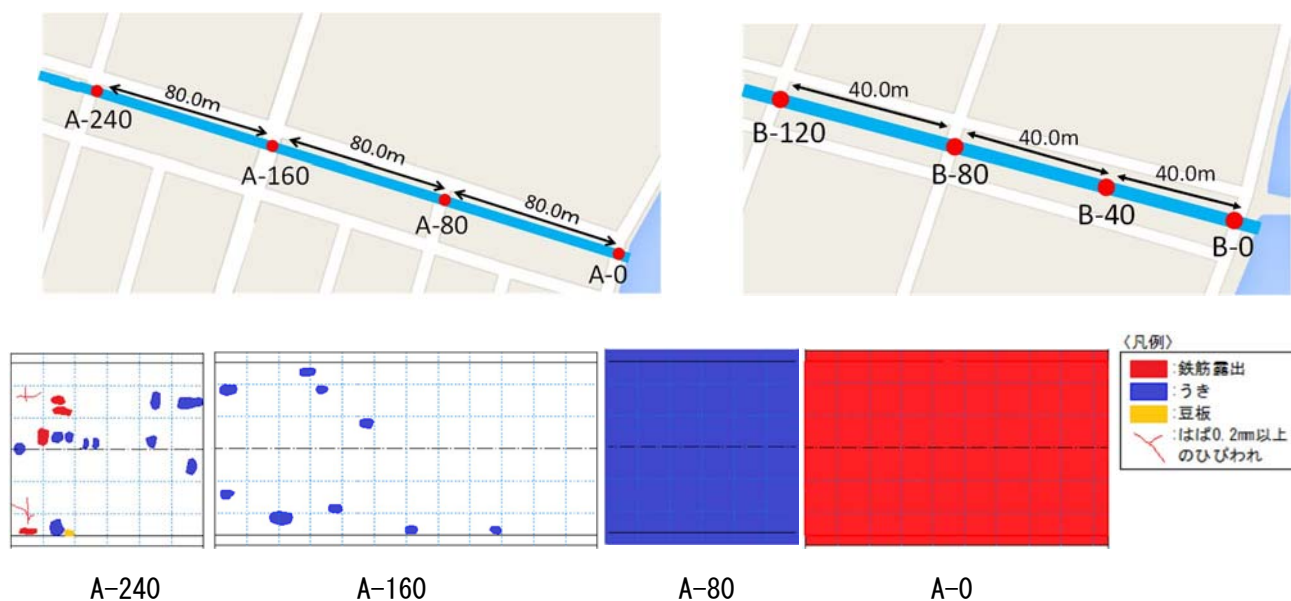


図 3.16 各橋梁の頂版の損傷図と凡例

3.2.3 調査結果および考察

(1) 損傷状況および損傷面積率の算出

打音検査を含む近接目視調査によって作成した各橋梁の頂版部裏面の損傷図の例を図 3.2.1 に示す。いずれの橋梁も塩害劣化が進行しており、海岸に近い A-0 や A-80 では全面に鉄筋露出あるいは鉄筋剥離が生じており、既に耐荷性が低下する「劣化期後半」に到達していることが分かる。

また、A-160, A-240 は、局所的な劣化が認められ、「加速期」にあるものと考えられる。これら「加速期」にある橋梁の内部鉄筋腐食の状況をより詳細に確認するために、自然電位分布を計測した結果を損傷図と併せて図 3.17, 図 3.18 に示す。この結果から、鉄筋露出部やうき部分の位置に相当する部位だけでなく、その周辺の自然電位も卑変しており、目視による損傷以外の部分でも既に腐食が進行していると判断される。これは、近接目視のみから劣化度を判断することは危険側の判定となる可能性があり、近接目視による損傷面積は潜在する周辺の損傷を考慮して評価する必要があることを示唆するものである。

そこで、近接目視による損傷周辺に潜在的な劣化進行を考慮するために、対象領域を 1m×1m の格子状に分割した上で、近接目視による損傷が有る格子を全て損傷面積として再評価した。その結果を図 3.19 に示す。近接目視による損傷を直接評価した場合、実際の損傷よりも危険側の判定となりやすいが、格子状に分割し潜在的な損傷を加味することで自然電位分布等の詳細点検結果や海岸線からの距離で表される環境外力負荷に応じた評価に修正可能であることが分かる。

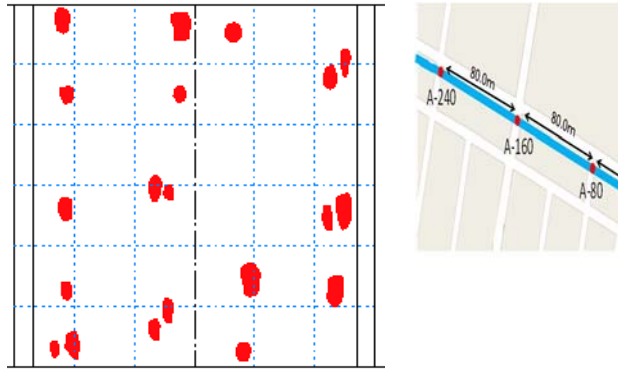


図 3.17 B-80 の頂版部裏面損傷図と凡例

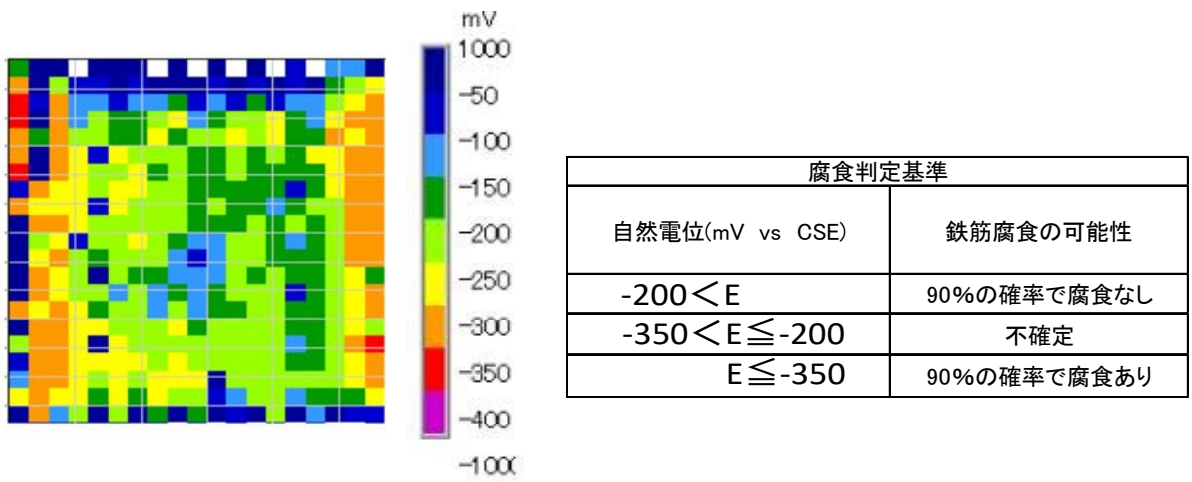


図 3.18 B-80 の自然電位分布

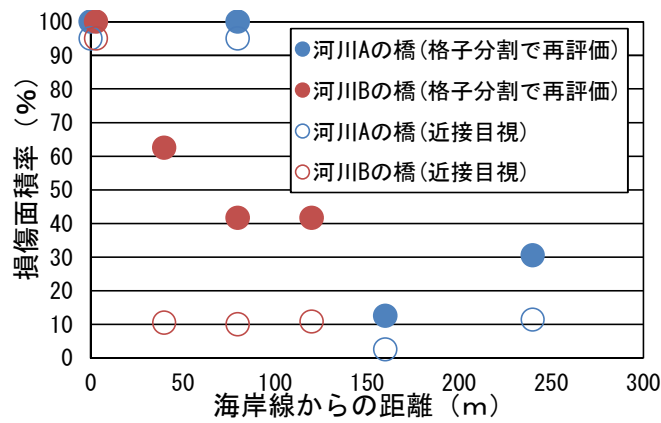


図 3.19 損傷面積率

(2) 塩分浸透特性

各橋梁側面からコアを採取し、コア中の全塩化物イオン量分布を測定した。海岸線からの距離に応じた全塩化物イオン量を図 3.20 に示す。なお、各橋梁で見掛けの拡散係数はほぼ同レベルであり、A-80 については、10cm 以上深部においても 3kg/m³ 以上の塩化物イオンがほぼ均一に存在していること、見掛けの拡散係数が他の橋梁とほぼ同程度であることから、建設時における内在塩分の混入と判断し、深部の塩分濃度との差分を浸透塩分量として取り扱った。

図 3.20 のように、海岸線から近い程、全塩化物浸透イオン量が多い傾向を示しているが、河川 A と河川 B では、塩化物イオン量の絶対値やその傾向に相違もあり、メゾ環境の評価に際しては、周辺環境や橋梁の配置間隔などの影響も考慮すべきであることが示唆された。一方、図 3.21 には、Fick の拡散方程式の解を用いて最小二乗近似によって求めた表面塩化物イオン量とガーゼ拭き取り法による付着塩分量を比較した結果を示す。付着塩分量は雨掛かり等の影響を受けることが想像されるが、今回の測定結果では、表面塩化物イオン量とガーゼ拭き取り法との良好な相関関係が得られ、ガーゼ拭き取り法によって表面塩分濃度を相対的に評価できる可能性が示唆された。

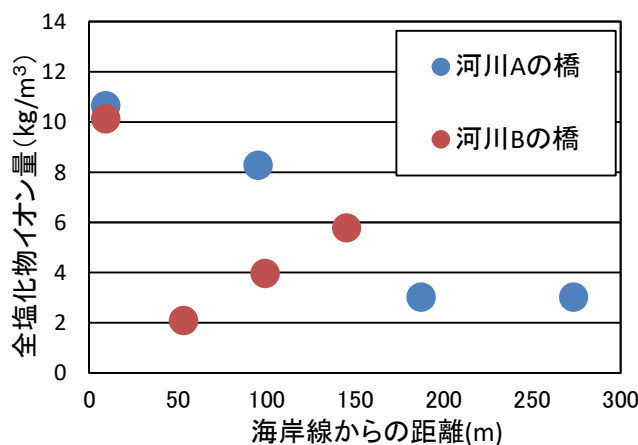


図 3.20 全前塩化物イオン量

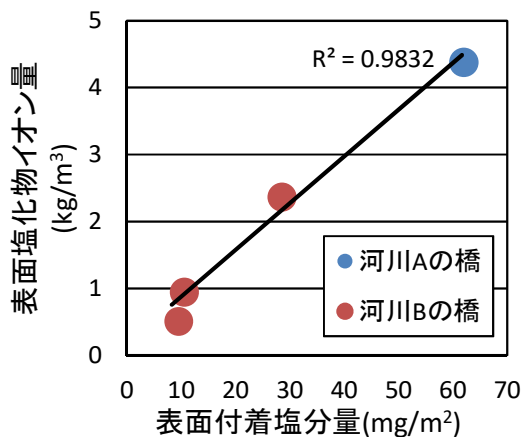


図 3.21 表面における塩化物イオン量と付着塩分量の関係(側面・海側)

3.2.4 まとめ

同一年代に架設された橋梁群の塩害劣化状況を調査した結果、劣化速度は海岸からの距離を始めとするメゾ環境に応じて、環境外力に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 同一年代に架設された橋梁群の塩害劣化状況を調査した結果、劣化速度は海岸からの距離を始めとするメゾ環境に応じて異なることが分かった。
- 2) 近接目視と非破壊検査機器による点検・調査の結果、メッシュに分け損傷面積率を算出することで、内部鉄筋の腐食状況を考慮した損傷の評価が行えることが示唆された。
- 3) 構造物の劣化予測を精度よく予測するためには、地域(都道府県や市町村)の位置に想定するマクロ環境だけでなく、数十m～数百mの違いに相当するメゾ環境の環境の影響を適切に評価することが重要であり、この調査でメゾ環境による環境区分の細分化の評価を行うことも必要であることを再認識できた。

3.3 数値解析手法による飛来塩分評価

3.3.1 はじめに

コンクリート構造物の塩害劣化の進行は、飛来塩分を始めとする環境外力によって大きく異なる。現在の劣化予測における環境外力は、対象構造物の地域と海岸からの距離、標高などの条件によって設定されるのが一般的である。しかし、実際には、周辺の環境条件や構造物の形状などの影響で、同一構造物であっても部位部材によって環境外力は異なる可能性がある。これからのコンクリート構造物の維持管理をより効率的かつ効果的に行うためには、部位部材別の環境外力の違いを踏まえた劣化予測を行い、それに応じた点検箇所や補修範囲を決定できることが望ましい。

そこで本研究では、このようなマイクロ環境における環境外力の違いを検討するために、実際の橋梁の部位別の表面塩分量をガーゼ法と携帯型蛍光 X 線分析によって調査した。また、併せて、対象橋梁を想定したランダムウォーク法による数値解析を行い、実際の橋梁におけるマイクロ環境の予測精度の検証を行った。

3.3.2 測定および解析手法の概要

(1) 対象橋梁およびその周辺環境

対象橋梁は平成 23 年 3 月に供用開始された 3 径間ポストテンション PC 橋であり、沖縄本島北部東シナ海側に位置する。図 3.22 に位置図を示す。また、図 3.23 に対象橋梁側面図及び断面図を示す。調査は、図 3.23 の N (北側端部)、M (中央部)、S (南側端部) の位置の 5 主桁で行った。



(Google Map より引用)

図 3.22 対象橋梁位置図影響

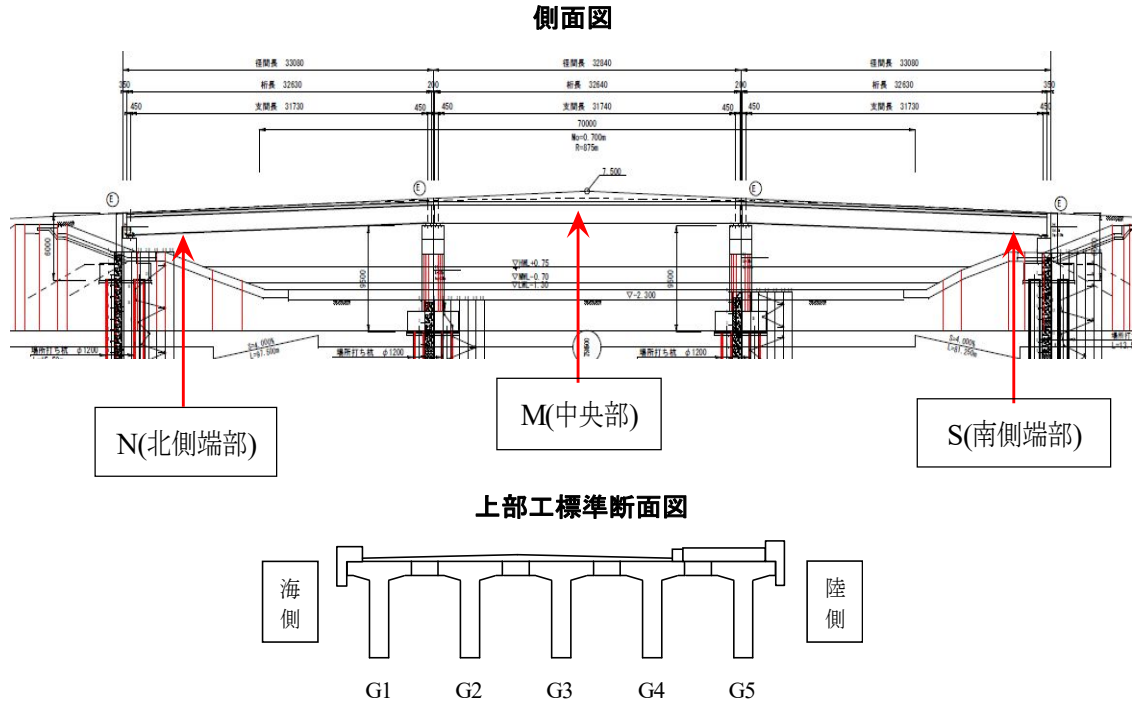


図 3.23 対象橋梁側面図及び断面図

(2) ガーゼ拭き取り法

図 3.24 に示すように 20cm×20cm の範囲内のコンクリート表面をガーゼで図中の手順で拭き取り、拭き取ったガーゼを規定量の脱イオン水に浸けて塩素イオン検知管を用いて塩素イオンを検出した。

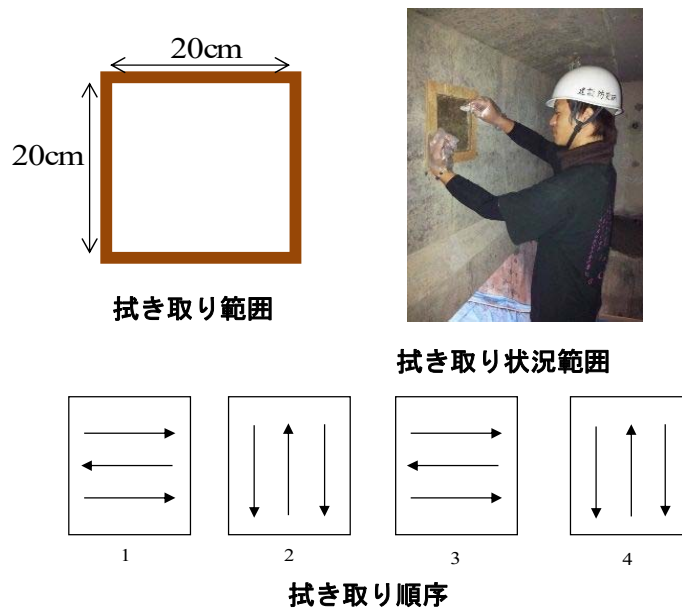


図 3.24 拭き取りの作業状況

(3) 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線分析とは、分析対象試料に X 線を照射した際に発生する二次 X 線（蛍光 X 線）を測定して、元素の定性あるいは定量分析を行うものである。従来は、据え置き型が一般的であったが、2000 年頃から片手で持って現場で測定可能な携帯型が、特に、土壌や玩具の品質検査などで使われ始めた。簡便かつ迅速に結果が得られることから、主に精密分析の前段階となるスクリーニング位置付けで使われることが多い。対象や条件によって異なるが、一般的に、検出下限が数～数 10ppm 程度、誤差は 10%程度とされている²⁾。携帯型の場合の計測結果は、機器を密着させた部位の平均濃度と考えてよいが、その深度は、材料に応じて数 μm （金属の場合）から数 mm（有機物の場合）まで変化する。

図 3.25 は、海洋環境下に一定期間曝露したコンクリート試験体の全塩化物イオン濃度を携帯蛍光 X 分析法で測定した結果と、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」による結果と比較したものである。

なお、携帯型蛍光 X 線装置による測定は、コンクリート試験体をスライスした薄片状態での測定と、粉砕処理後の粉末状態での測定の二つの方法で実施している。図のように、粉末状態の試料に対する両者の結果は非常によく一致するが、コンクリート表面での測定では、表層付近の骨材の影響等で大きなばらつきが生じていることが分かる。これは、測定結果が誤差を含むことに加えて、実際の塩分濃度も骨材等の配置によって局所的な差異を生じていることを示唆するものでもある。したがって、実構造物への適用に際しては、同一部位の測定でも数 mm レベルで位置を変えた複数回の測定を平均化するなどの工夫が必要と考えられる。

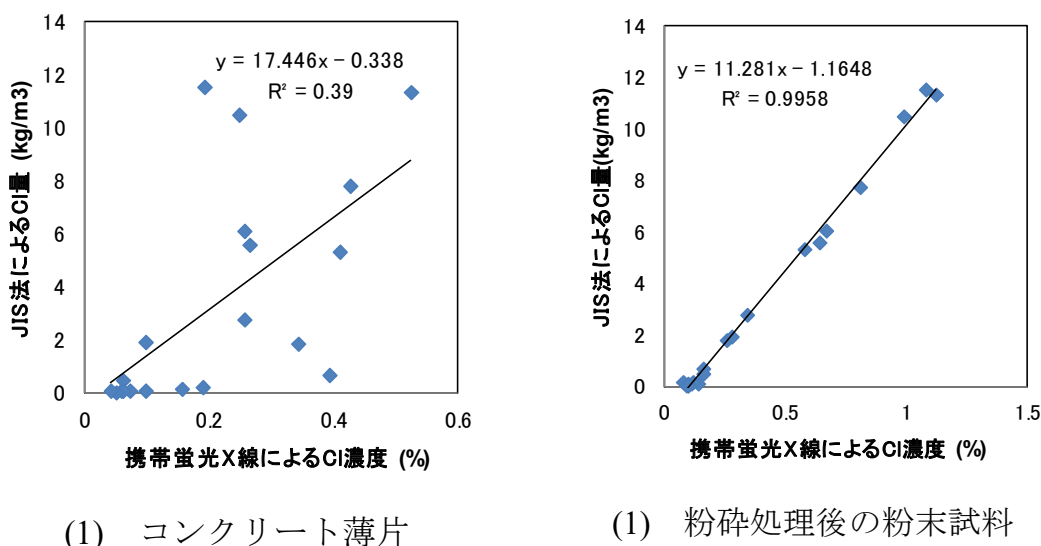


図 3.25 携帯蛍光 X 分析法と JIS 法による実験値の比較

(4) ランダムウォーク法

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である 3 次元ランダムウォーク法を用いた。このモデルは、発生源から追跡粒子を放出し、個々の粒子が平均流と乱流によって運ばれるとして、その後の粒子の分布を、3 次元空間で計算するものである。

なお、今回の検討では、構造物に衝突した飛来塩分の粒子はすべてコンクリート表面に付着すると仮定した完全付着モデルを採用している。

3.3.3 実橋梁におけるマイクロ環境

(1) ガーゼ拭き取り法による測定結果

図 3.26 および図 3.27 にガーゼ拭き取り法による付着塩分量の測定箇所とその測定結果を示す²⁾。同一構造物においても付着塩分量は位置に全く異なり、最大で 10 倍程度の違いが生じていることが分かる。分布的な特徴としては、2 回の測定のいずれにおいても、主桁下面に多く付着する傾向を示しており、最も海側の桁よりも海側から 2 番目および 3 番目の主桁下面への付着量が著しく多いことが分かる。

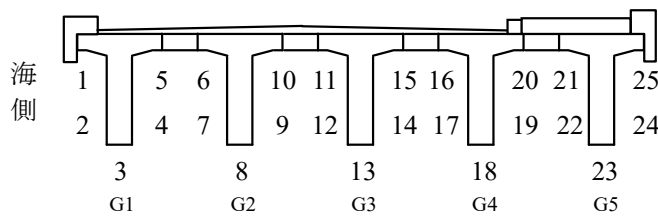


図 3.26 ガーゼ拭き取り法の測定箇所と位置

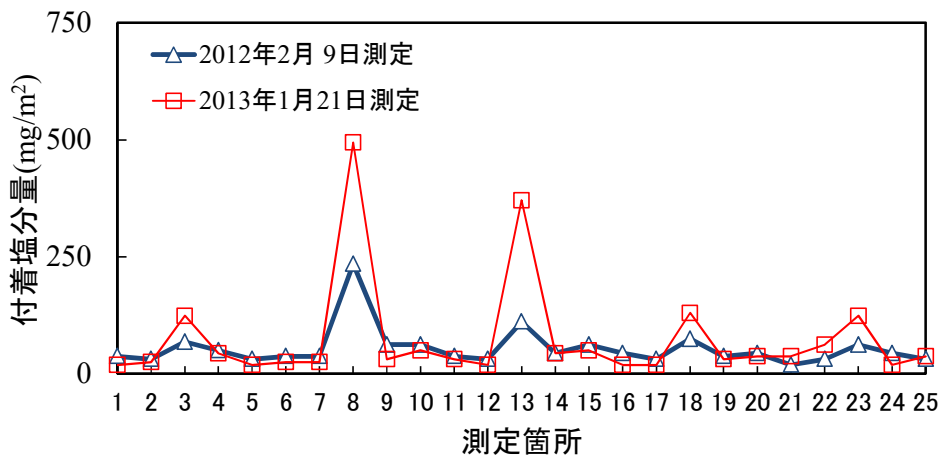


図 3.27 ガーゼ拭き取り法による付着塩分量

(2) 携帯型蛍光 X 線分析による測定結果

図 3.29 から図 3.31 に蛍光 X 線分析による塩分量の測定箇所およびその測定結果を示す。測定箇所は図 3.28 に示すように各桁 5 箇所とした。

図 3.29 から図 3.31 より、季節によって大きく表面塩分量が異なり、夏場よりも冬場の塩分量が大幅に上昇する傾向が認められた。また、部位ごとの塩分量を比較すると、南北の位置はもちろん、桁の位置によっても大きく異なっており、最も海側である G1 よりも、むしろやや陸側の G2 や G3 の方で表面塩分量が大きくなる傾向が示された。これらの結果は、同一時期に測定したガーゼ拭き取り法による結果や数値解析等の既往の知見とも傾向的に一致している^{3), 4)}。

また、図 3.29 に示す南端部の塩分量の値が他の位置と比較して大きくなっていることが分かる。これは、橋梁位置での風向きと橋梁周辺の護岸の影響で、南端部が直接波しぶきを受けやすい位置となっているためと考えられる。

一方、ここで測定された塩分量は、表層に付着した塩分量も含んでいるが、降雨等によって流される塩分や表面に固着した塩分など、実際にはコンクリート中への浸透しない塩分量も含まれると考えられる。そこで、その影響程度を調べるために、サンドペーパーを用いて測定位置表面の付着物を軽い研磨によって除去し、再度蛍光 X 線分析による測定を実施した。その結果を図 3.32 に示す。

図のように、研磨後の表面塩分量は一様に減少し、最大で 1/3 程度となった。研磨後の結果が表層付近に浸透した塩分量とすれば、両者の差が測定時点における付着塩分量と考えることができる。このような観点から考察すれば、G1～G3 は桁下面に測定時点での付着塩分量が多く、G4, G5 の塩分量は、付着塩分量よりも内部に浸透した塩分量の割合が大きいことが推察される。実際のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布との関連については確認する必要があるが、このような付着塩分量の情報から、地域や季節さらに部位別の環境外力を評価できる可能性もある。

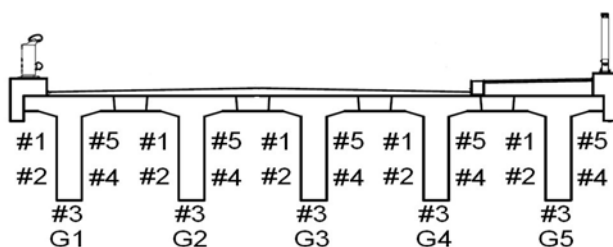


図 3.28 蛍光 X 線分析の測定箇所と位置記号

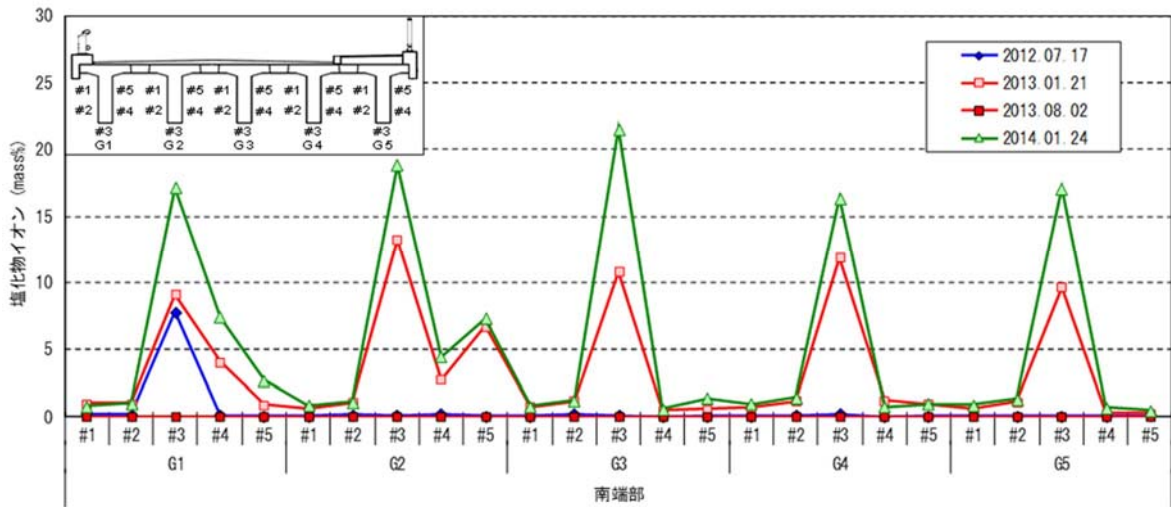


図 3.29 蛍光 X 線による塩分量(南端部)

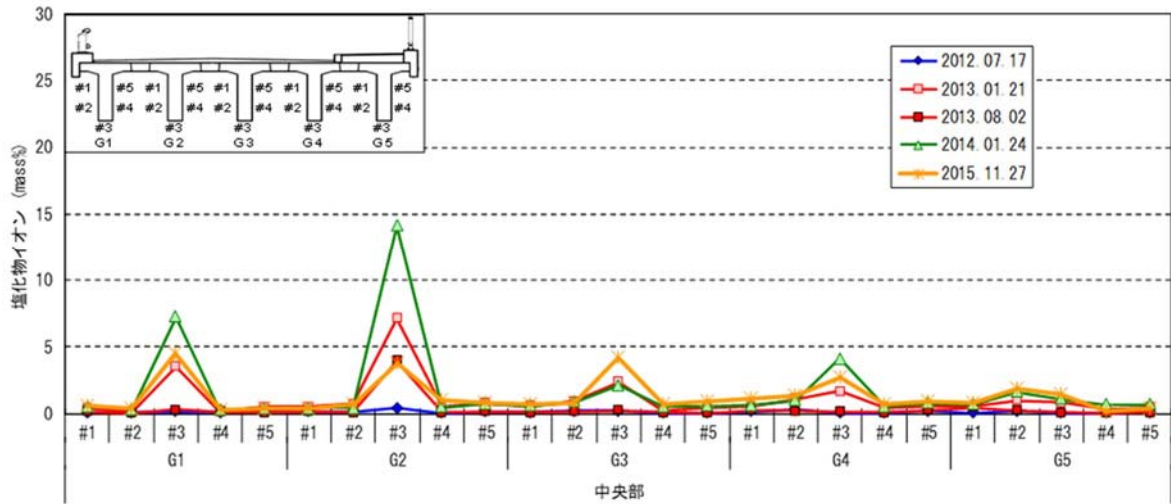


図 3.30 蛍光 X 線による塩分量(中央部)

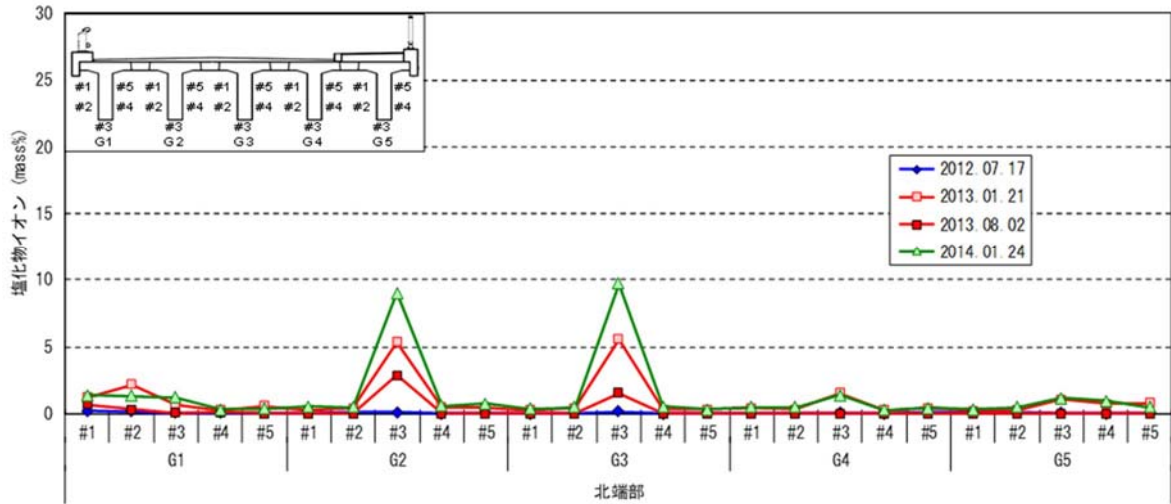


図 3.31 蛍光 X 線による塩分量(北端部)

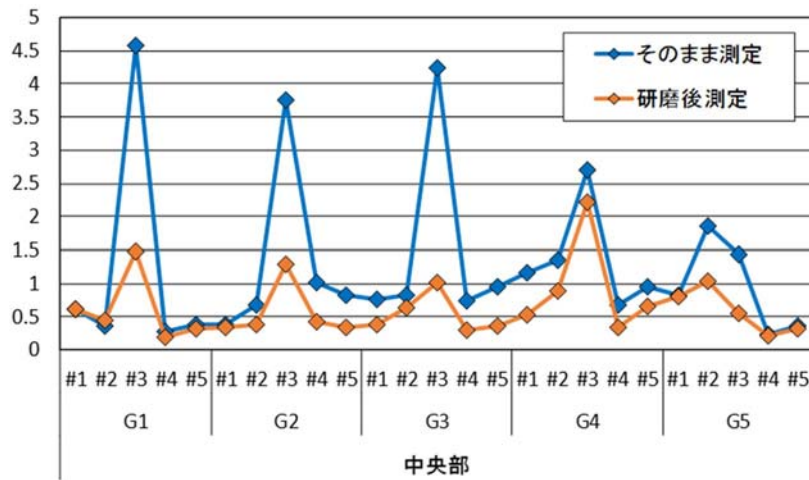


図 3.32 蛍光 X 線による塩分量(研磨後)

3.3.4 まとめ

塩害環境下の PCT 桁橋上部工を対象としたマイクロ環境の違いが、環境外力に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 同一構造物であっても、マイクロ環境の違いによって付着塩分量は大きく異なる。
- 2) 各種測定および評価手法の特性を十分に把握した上で、複合的に整理・分析することで、コンクリート構造物の劣化予測に用いる付着塩分量を適切に設定できる可能性がある。
- 3) コンクリート構造物の維持管理計画策定の際には、マクロ環境、メゾ環境およびマイクロ環境のそれぞれの影響を考慮することで、より効果的かつ効率的な維持管理が可能となると考えられる。

3.4 数値解析手法による飛来塩分評価

3.4.1 数値解析によるマイクロ環境評価

(1) ランダムウォーク法による解析結果

本項では、ランダムウォーク法^{4), 5)}に用いた風速場とその結果を用いたランダムウォーク法の計算条件と計算結果について説明する。併せて、前述の測定結果との比較も行う。計算における風速は、伊是名気象台を使用し、2008年1月～2012年12月の期間における累積風向割合より算出した。年間を通して北寄りの風向頻度が高い風況であり、その風速は、年間平均風速を算出した結果4.6m/sであった。そのため、平均風速風上側（海側）の風速5m/sを一様流として仮定した。計算結果は、時間が進行するに従い、橋梁断面の風下側（陸側）にカルマン渦が発達することを確認した。それに伴い、桁間に卓越して生じた大きな渦から、小さな渦に変化していく乱流場の流れに移行することが分かった。しかし、実際に風況として、一様な風速場が続くことはあり得ないと考えられることから、計算初期の状態、つまり、大きな渦が桁間に生じては消える周期的な流れ場となることが予想される。このためランダムウォーク法に用いる風速場として、桁間に最も大きな渦が生じた0.5秒後の風速場を用いることとした。

図3.33の風速場（0.5秒後）を用いて、ランダムウォーク法による飛来塩分粒子の移流・拡散・構造物への付着解析を実施した。飛来塩分シミュレーションの一例（2.0秒後）を図3.34に示す。飛来塩分粒子が発生位置から風速場に応じて移流および拡散し、構造物へ付着している現象が再現できていることが確認できる。また、図3.35に付着粒子を構造物面ごとに評価した結果を示す。ここでは単位面積当たりの付着粒子数として整理している。その結果、シミュレーション結果は、図3.27に示したガーゼ拭き取り法の結果と同様な傾向を示していることが分かる。ただし、ランダムウォーク法の結果は、構造物表面に到達したすべての塩分量を表しているのに対し、ガーゼ拭き取りの結果は到達した塩分の反射、降雨による洗い流しおよび浸透などの減少効果を含んでいる。そのため現時点での定量的な比較評価は困難であるが、付着量の相対比較からの定性的な評価は十分可能であると考えられる。

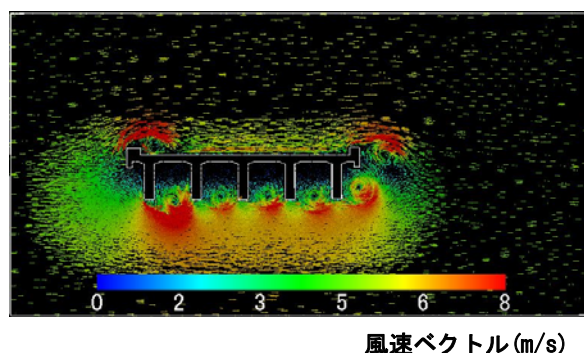


図 3.33 解析に用いた風速場（0.5 秒後）

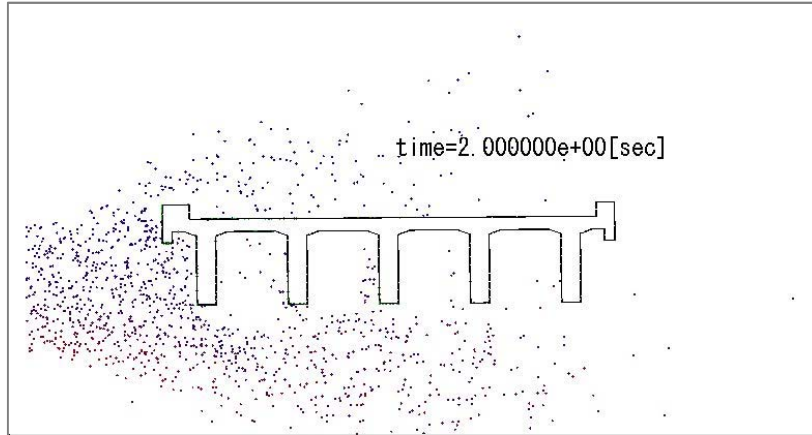


図 3.34 飛来塩分シミュレーション(2.0)

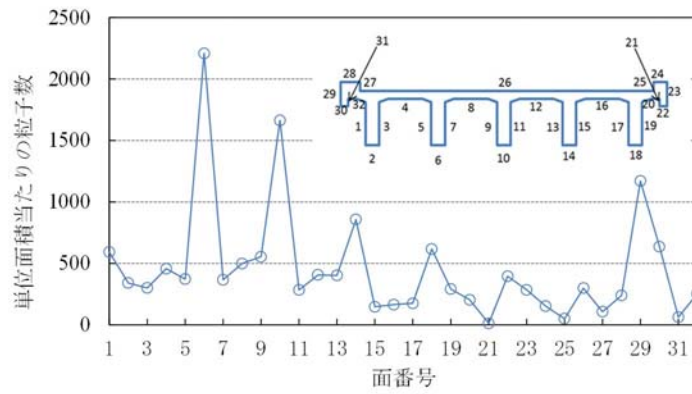


図 3.35 単位面積当たりの付着粒子数

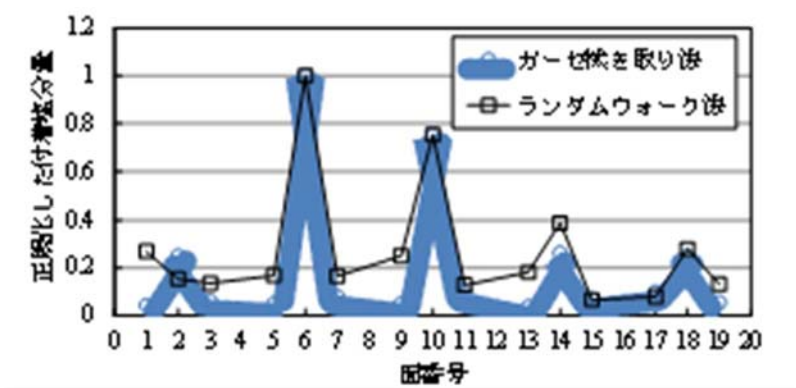


図 3.36 ランダムウォーク法とガーゼ拭き取り法の比較

3.4.2 ランダムウォーク法の検証

ランダムウォーク法とガーゼ拭き取りの両者の相関を確認するため、付着量が最も多い、海側から2番目のG2主桁下面の結果を用いて正規化した。また、ガーゼ拭き取り法は、桁側面の測定を上下2箇所で行っているため、側面の値として2測定結果の平均値を採用した。また、ガーゼ拭き取り法で測定していない床版下面は比較対象外とした。

図3.36にランダムウォーク法とガーゼ拭き取り法の正規化した付着塩分量の比較を示す。なお、面番号は、図3.35に示した面番号に対応する。図のように、ランダムウォーク法の結果は、全体的にガーゼ拭き取り法による測定結果と同様の傾向を示しており、特に主桁下面では良く再現されていることが分かる。

ガーゼ拭き取り法の海側桁側面の面番号1の値はランダムウォーク法に比較して小さい値となっており、これは降雨による洗い流し効果によるものと考えられる。一方、主桁下面を比較するとランダムウォーク法の海側の主桁側面の面番号2の付着量は、ガーゼ拭き取り法よりも小さな値となっている。これは、その位置で風速による圧力が負圧となっていることから、風況上飛来塩分が付着し難い可能性も考えられ、必ずしも降雨による洗い流し効果だけではないことも示唆される。

3.4.3 まとめ

本研究では、塩害環境下にあるPCT桁橋の上部工を対象として、マイクロ環境の違いが環境外力に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 同一構造物であっても、マイクロ環境の違いによって部位部材ごとの付着塩分量は大きく異なる。効果的かつ効率的な維持管理のためには、部位ごとの違いを踏まえた、劣化予測、点検、補修等を行うことが重要である。
- 2) 今回実施した3つの測定および評価手法の特性を十分に把握した上で、それぞれの結果を複合的に整理・分析することで、コンクリート構造物の劣化予測に用いる付着塩分量を適切に設定できる可能性がある。
- 3) 携帯型蛍光X線分析は、含有塩化物イオン濃度の精緻な分析を目的とするよりは、むしろその簡便さを活かして、立地条件の違いや部位ごとの違い、経時的な変化など、環境外力評価や健全度把握を目的とした一次評価のためのツールとしての活用が期待される。
- 4) 風力場の影響を加味したランダムウォーク法によるシミュレーションは、ガーゼ拭き取り法との相関性も高いことから、実構造物におけるマイクロ環境評価のための有力な手法の一つであることが確認できた。
- 5) コンクリート構造物の設計あるいは維持管理計画策定の際にマイクロ環境の影響を考慮することで、効果的かつ効率的な維持管理が可能となる。

参考文献

- 1) コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム 委員会報告 JCI-C64, 2004年10月8日 P54
- 2) 河合潤：ハンディ型蛍光 X 線元素センサー, 材料と環境, Vol. 60, pp. 512-517, 2011
- 3) 松浦葵, ほか 4 名：ガーゼ拭き取り法におけるコンクリート橋梁の付着塩分量に関する調査研究, 土木学会第 68 回学術講演会, V-495, pp. 989-990, 2013.
- 4) 富山潤：コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 874-879, 2014
- 5) LECCA2 理論解説書, コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会 日本コンクリート工学会, 2016.9

第4章

水掛かりと水分移動の影響評価

第4章 水掛かりと水分移動の影響評価

4.1 はじめに

水掛かりと水分移動の影響評価についてモルタル内部の水分移動特性に関する検討と水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響について検討する¹⁾。

まず、水掛り部を模擬した供試体を作製し、コンクリート内部の水分移動を把握することを目的に浸透試験および乾湿繰り返し試験を行った。

4.2 モルタル内部の水分移動特性に関する検討

コンクリート中の水分移動に関する研究は数多く行われているが、乾燥過程におけるものが多く浸透過程におけるものは少ない。また、局所的に水が供給されるような水掛かり部における水分移動特性は、未だに不明瞭な点が多い。コンクリート構造物の経年劣化の進予測を行う上で、コンクリート中の水分移動を把握することは非常に重要であり、水分移動を把握する必要性が求められている。

そこで本研究では、水掛かり部を模擬した供試体を作製し、コンクリート内部の水分移動を把握することを目的に浸透試験および乾湿繰り返し試験を行った。また、別途キャリブレーション試験によって得られたモルタル内部の相対湿度と電気抵抗率の関係式を用いて、モルタル内部の相対湿度を推定することとした。

4.3 試験

4.3.1 供試体配合

検討には、表 4.1 に示す配合で作製した 10×10×40cm のモルタル供試体を用いた。また、目標フロー値が 160±10mm となるようにペースト容積比を調節した。

表 4.1 水の浸透試験に用いた供試体の配合

	W/C	ペースト 容積比	単位水量(kg/m ³)		
			W	C	S
OPC	0.5	0.459	275	550	1400

ここで、W：水（密度：1.0 g/cm³）、C：普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）、S：富士川産川砂（密度：2.64 g/cm³）である。

4.3.2 水の浸透試験

本章では、浸透過程におけるモルタル中の水分移動特性を把握することを目的ため水の浸透試験を実施した。以下に、試験の概要を示す。

(1) 供試体作製手順

供試体作製手順を以下に示す。

- ① 通電部の長さが1cmとなるようにチタン線にゴムチューブを巻いた。
- ② チタン線を埋設した10×10×40cmの型枠(写真4.1)を用いてモルタルを打設する。
- ③ 2日間温潤養生を行った後に26日間気中にて養生した。
- ④ 養生終了後、脱型を行い、供試体上面と下面以外からの水分の出入りを防ぐために、エポキシ樹脂による表面塗装を合計3回行った。
- ⑤ 供試体上面に幅2cmのアクリルケースを設置することで水掛り部を模擬した供試体を作製した。

(2) 検討項目および試験方法

水の浸透試験の際には、供試体を室温約20℃、湿度約50%の部屋に静置し、電気抵抗率が定常になった後に試験を開始した。試験期間はシリーズ1として浸透3日、乾燥4日の乾湿繰り返し試験を、シリーズ2として浸透のみの試験をそれぞれシリーズにおいて49日間測定を行った。浸透時には供試体上面に設置したアクリルケースから水を浸透させ、乾燥時にはアクリルケースを取り除いた。

試験開始後は、定期的にチタン線間の電気抵抗を測定した。また、電気抵抗の測定には、交流10kHz、5Vに設定したLCRメーターを用いた。



写真 4.1 水の浸透試験用供試体の型枠

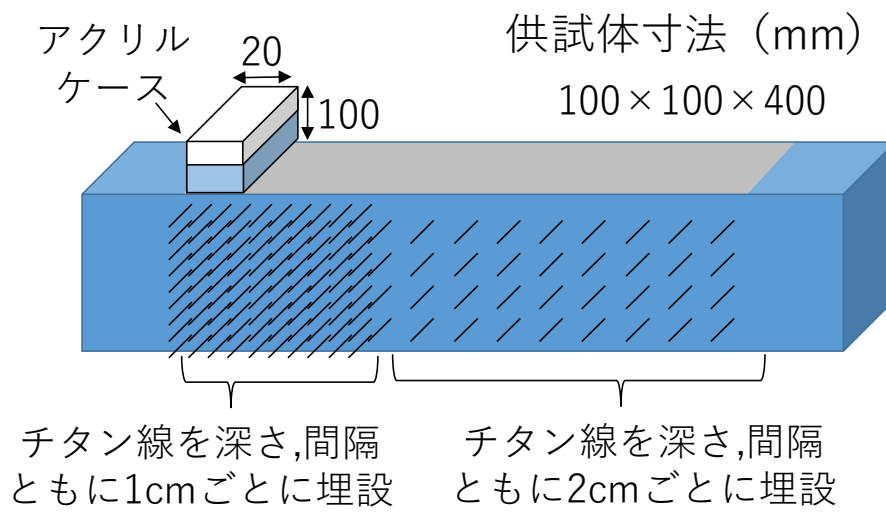


図 4.1 水の浸透試験に用いた供試体の概要図

4.3.3 試験結果および考察

まず、LCR メーターを用いて測定した電気抵抗から式 4.1 を用いて電気抵抗率を算出した。

$$R = \{\log(d/a) (\pi/l)\} \times \rho = sf \times \rho \quad \text{式 4.1}$$

ここで、R：電気抵抗(kΩ)、a：電極棒の半径(cm)、d：電極間隔(cm)、l：通電部の長さ(cm)、ρ：電気抵抗率(kΩ・cm)、sf：電極固有の形状係数(本研究では、0.358079 と算出された。)

(1) シリーズ1 (浸透3日, 乾燥4日)

今回は図 4.2 の赤枠に示すようにチタン線を密に配置した部分に着目した。図 4.3 にモルタル内部の相対湿度分布を、図 4.4 には初期からの増減値を示す(図については、P63～P68 を時系列として作図)。乾湿繰り返しの影響を受けるシリーズ1では、供試体全体的に初期相対湿度が90%以上となっており、高湿度状態からの試験開始となる。3日後(浸透後)の分布をみても、浸透面からの深さ0～4cm、水平方向の間隔1～6cmの範囲で相対湿度の上昇が確認された。時間の経過に伴って供試体全体的に乾燥傾向にあることがわかる。49日後(乾燥後)の分布をみても供試体表面付近と底面付近で相対湿度が80%程度となっており乾燥の影響が顕著であった。水槽直下では湿潤状態を保っているのに対してそのすぐ横では乾燥した状態となっている。このような湿度差は劣化に影響を与える可能性があると考えられる。またこの湿度差は乾燥状態から水を浸透させた場合に顕著になる。

(2) シリーズ2 (浸透のみ)

今回は図 4.2 の赤枠の部分に着目した。図 4.5 にモルタル内部の相対湿度分布を、図 4.6 に初期からの増減値を示す(図については、P69～P72 を時系列として作図)。浸透のみのシリーズ2では、モルタル内部の相対湿度が70～80となっており比較的乾燥した状態からの試験開始となる。時間の経過に伴って水槽直下で相対湿度の上昇が確認できた。49日後の分布をみても、浸透面からの深さ0～5cm、水平方向の間隔1～5cmの範囲で相対湿度が上昇していることがわかった。供試体上面と底面付近で底面付近の方が乾燥の影響が顕著であった。これは供試体上面で浸透した水の散逸の影響によって乾燥が抑制されたためだと考えられる。また水槽直下は相対湿度が90%以上という非常に高い値を示しているのに対して、水槽のすぐ横では相対湿度が60%程度と非常に乾燥した状態となっていることがわかる。このように局所的な場所に湿度差が30%程度ある場合環境差によってマクロセル腐食を引き起こす可能性が高いと考えられる。

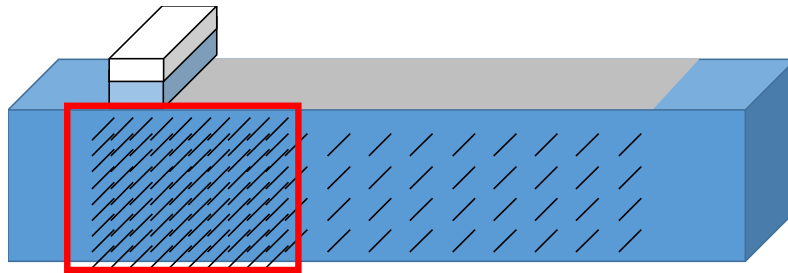


図 4.2 水の浸透試験用供試体

〔シリーズ1〕

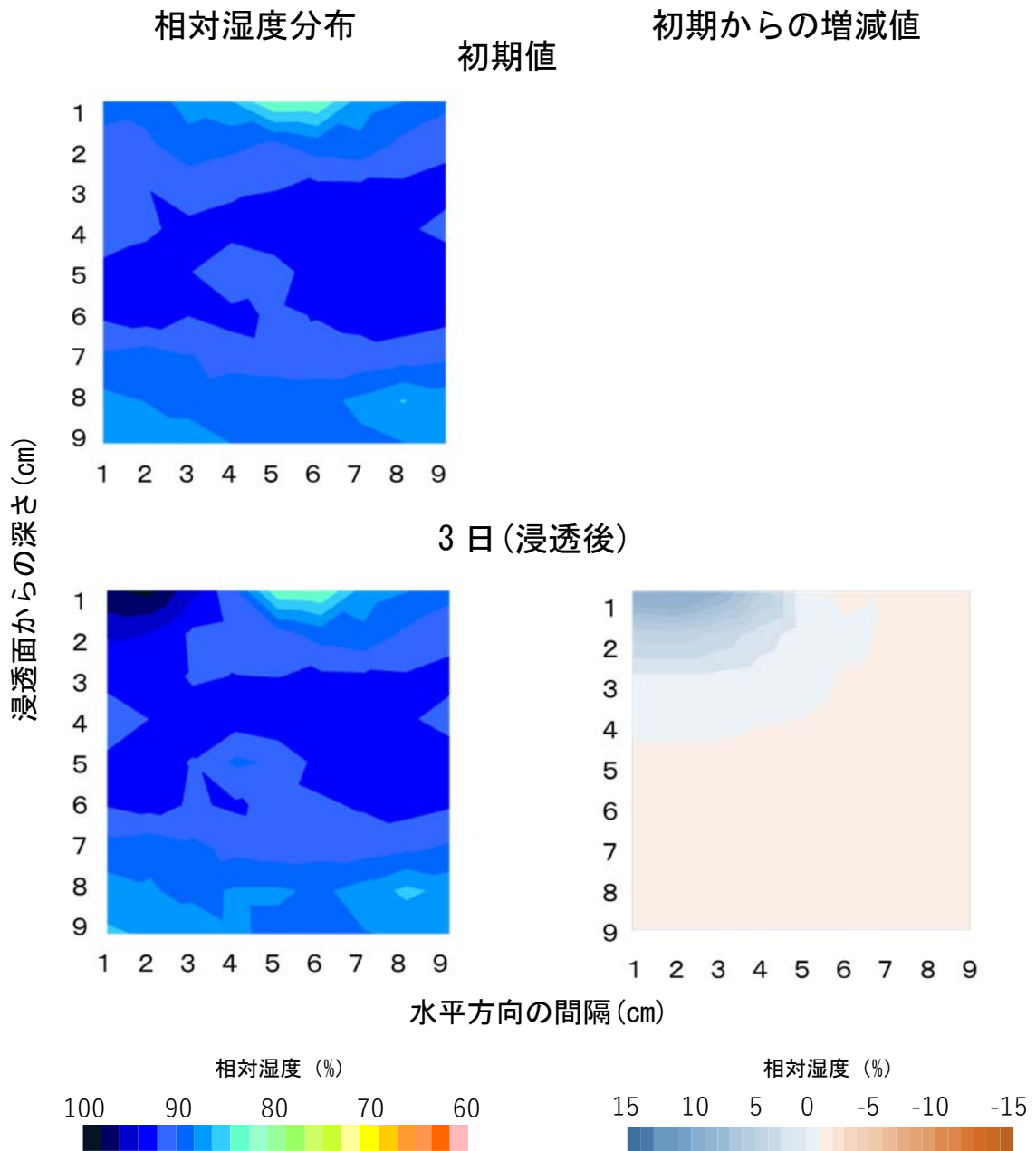


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ1〕

図 4.4 初期からの増減値
〔シリーズ1〕

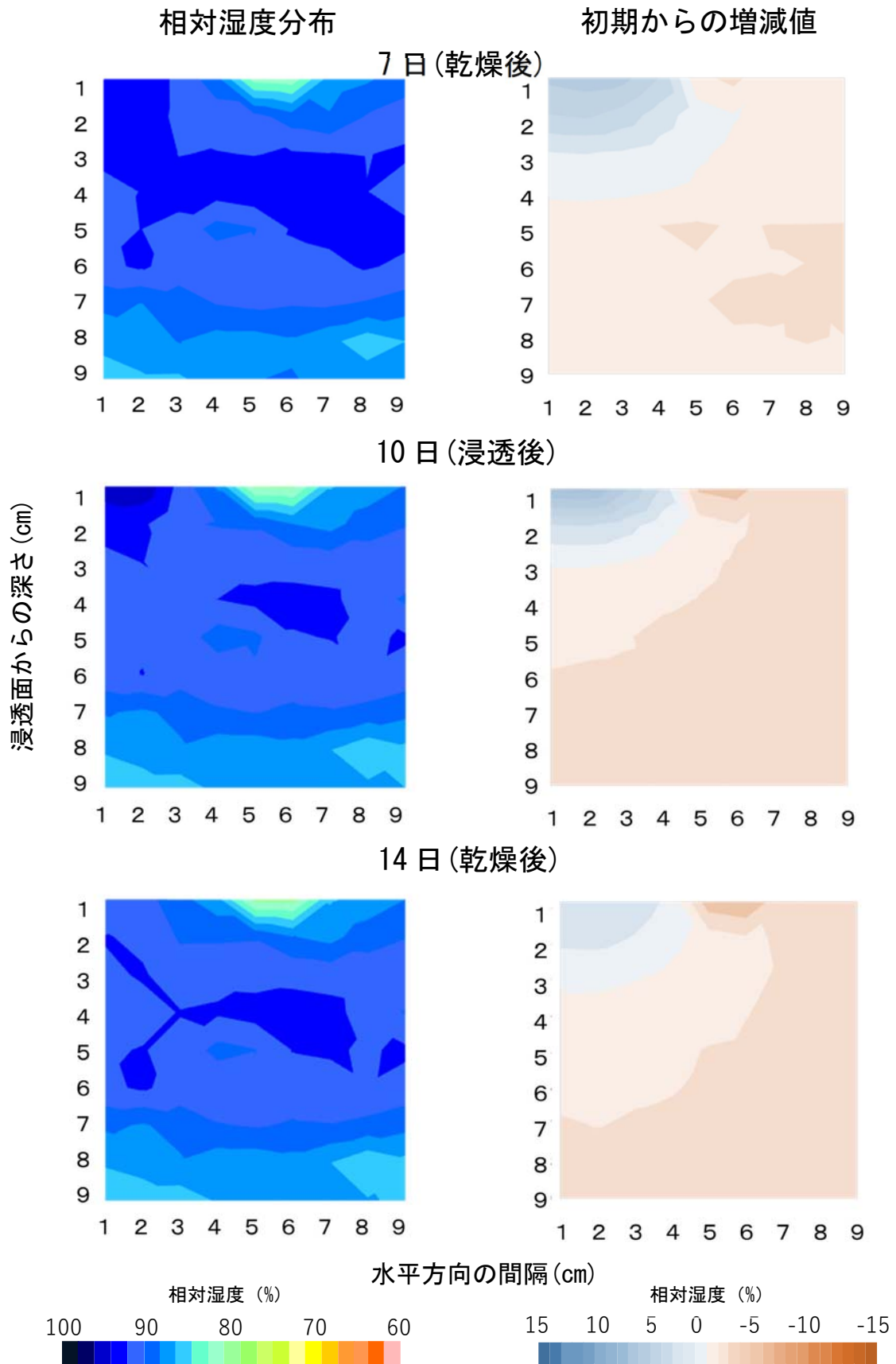


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ1〕

図 4.4 初期からの増減値
〔シリーズ1〕

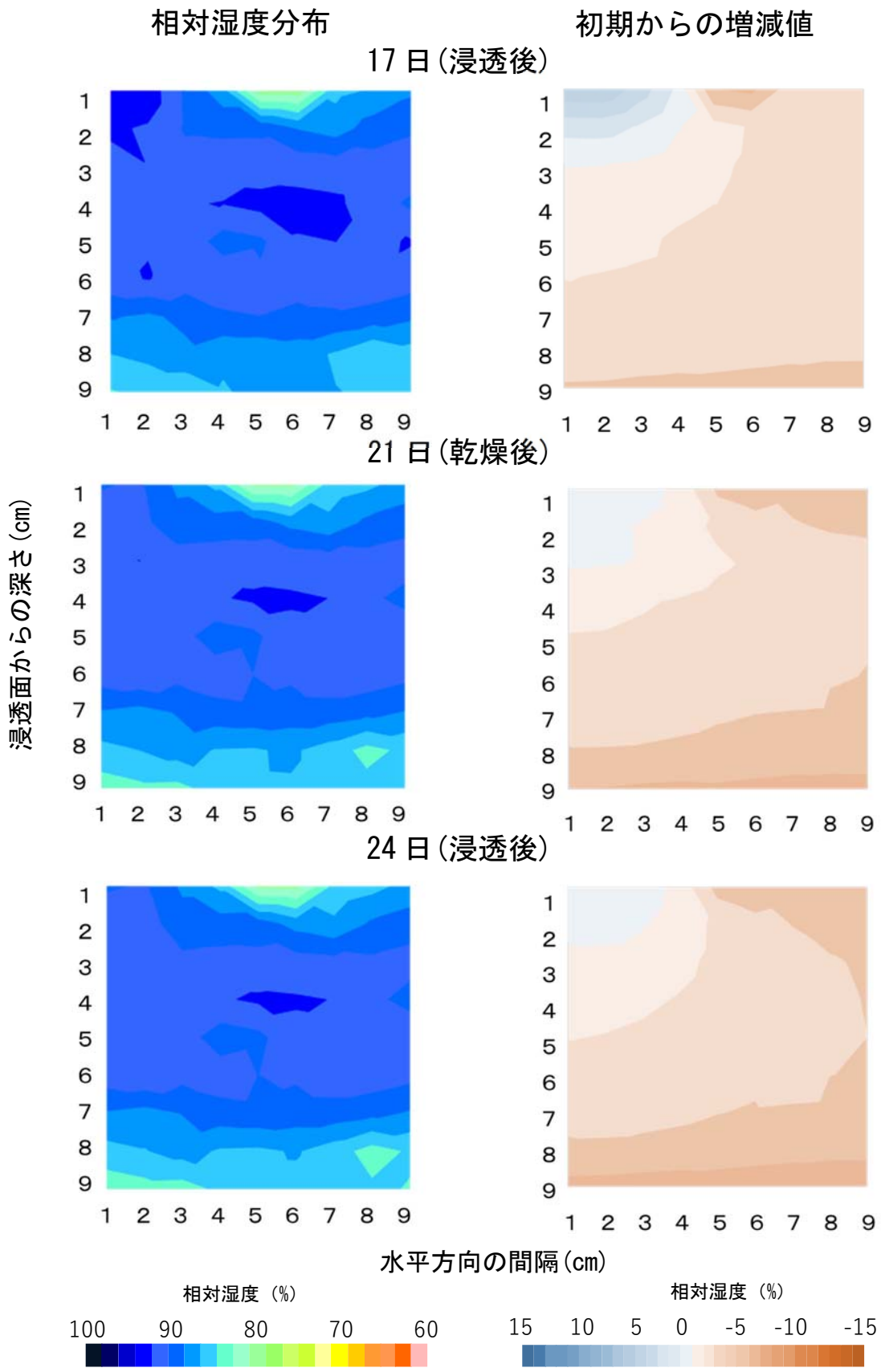


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
[シリーズ1]

図 4.4 初期からの増減値
[シリーズ1]

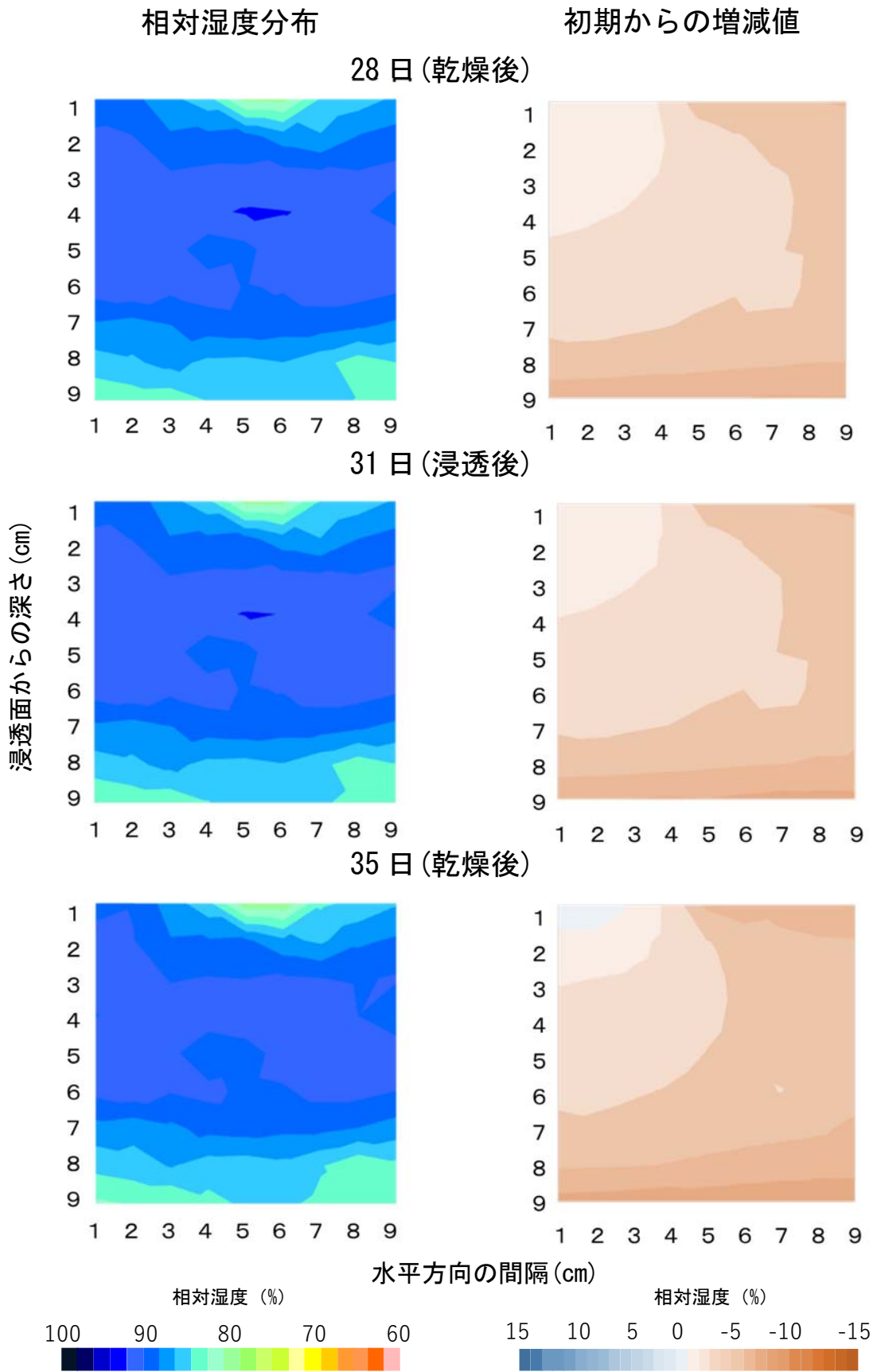


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ1〕

図 4.4 初期からの増減値
〔シリーズ1〕

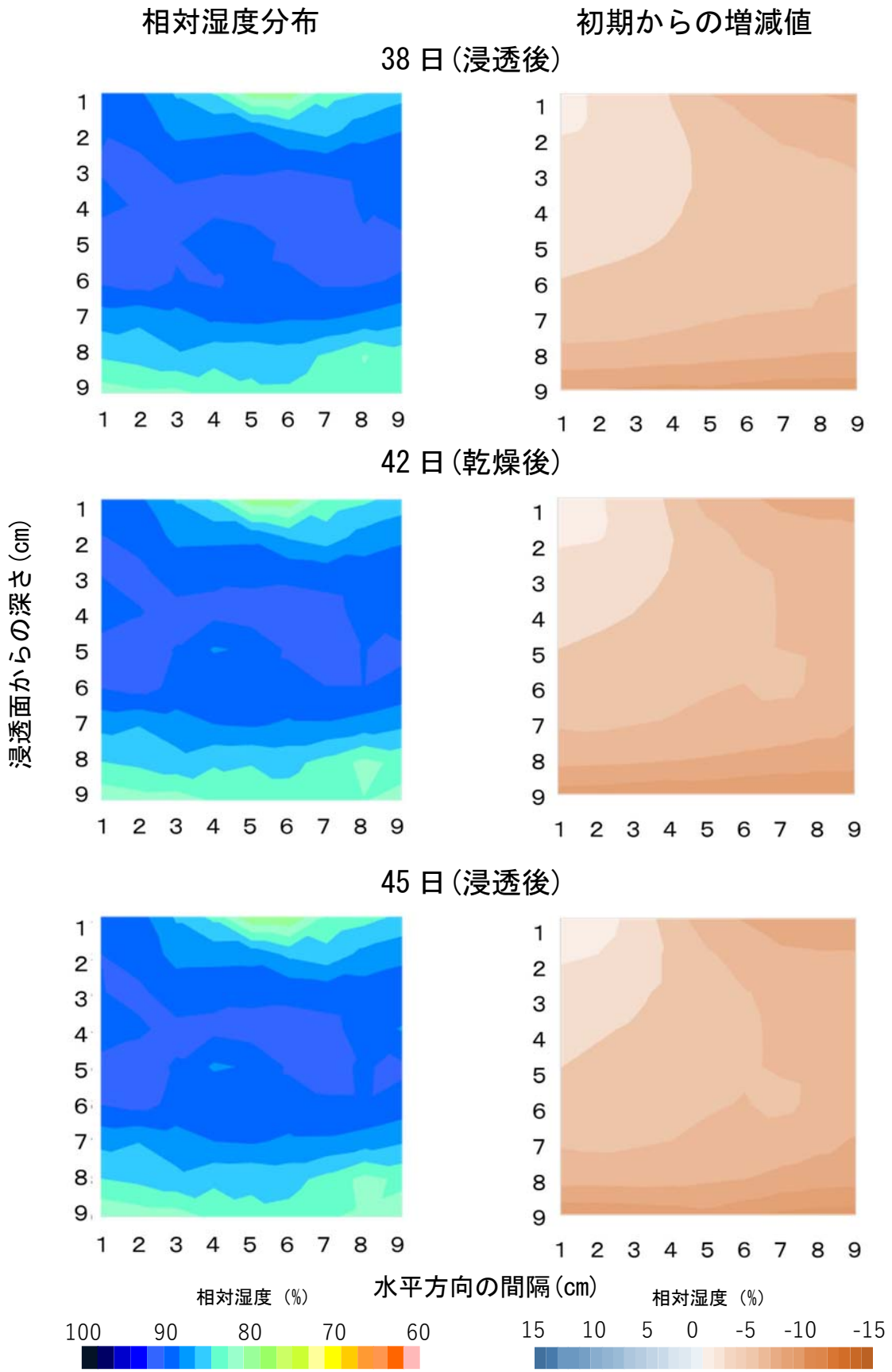


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
[シリーズ1]

図 4.4 初期からの増減値
[シリーズ1]

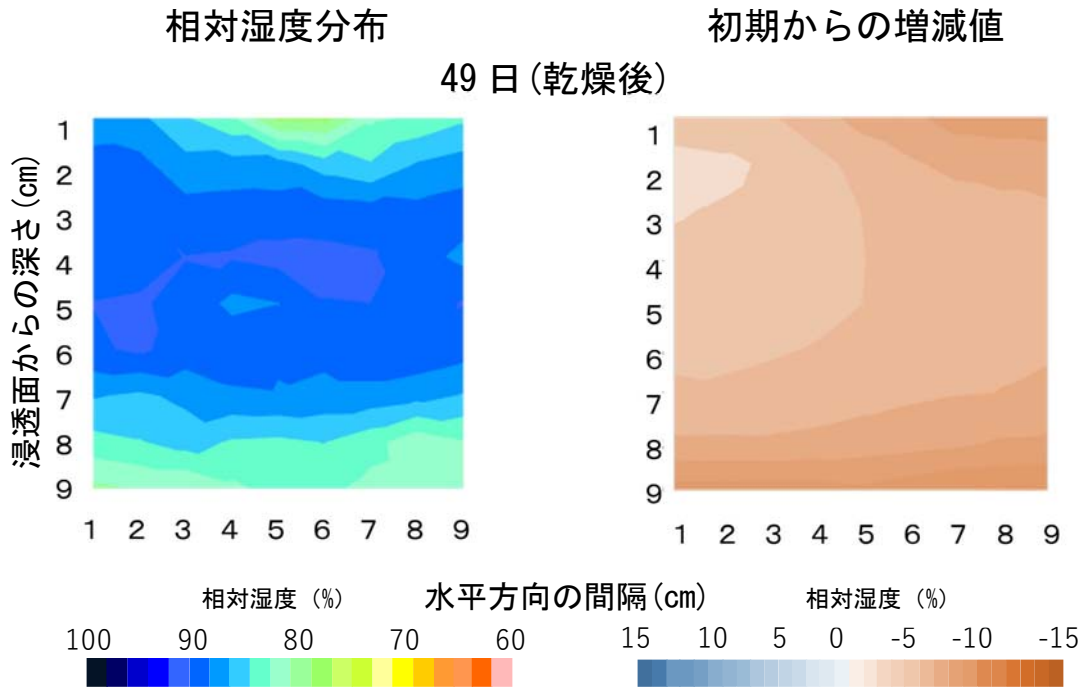


図 4.3 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ 1〕

図 4.4 初期からの増減値
〔シリーズ 1〕

〔シリーズ2〕

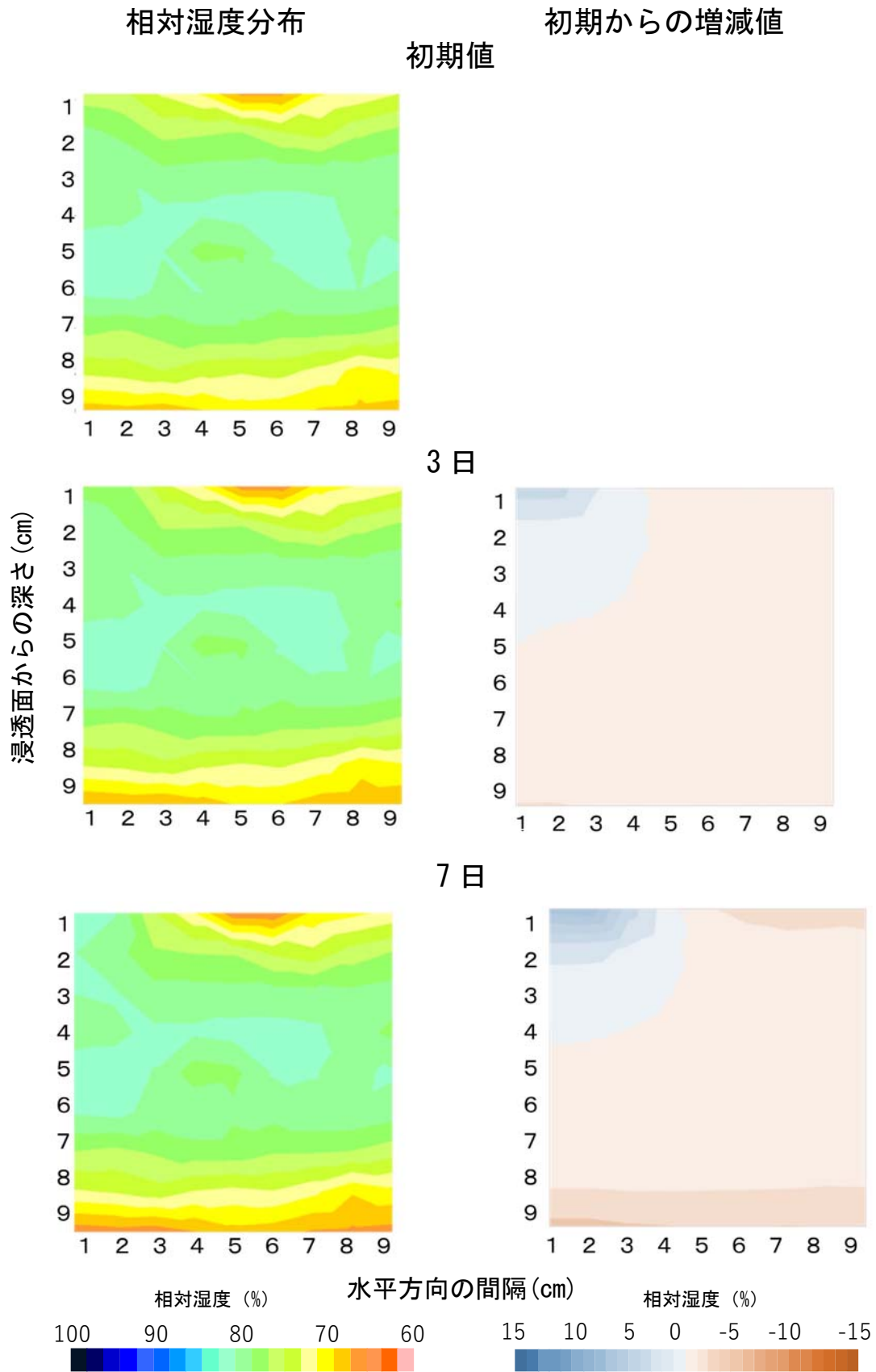


図 4.5 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ2〕

図 4.6 初期からの増減値
〔シリーズ2〕

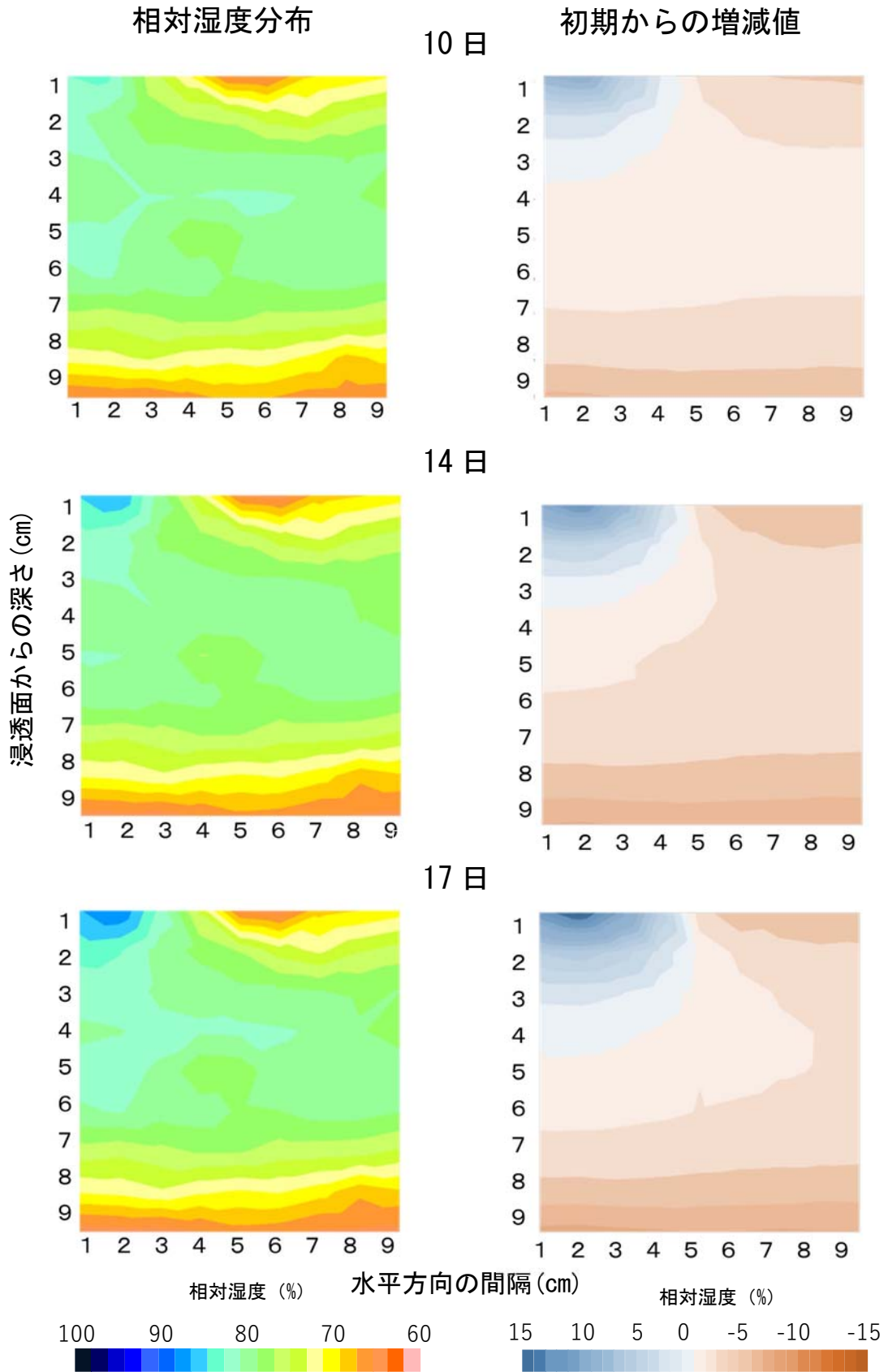


図 4.5 モルタル内部の相対湿度分布
[シリーズ2]

図 4.6 初期からの増減値
[シリーズ2]

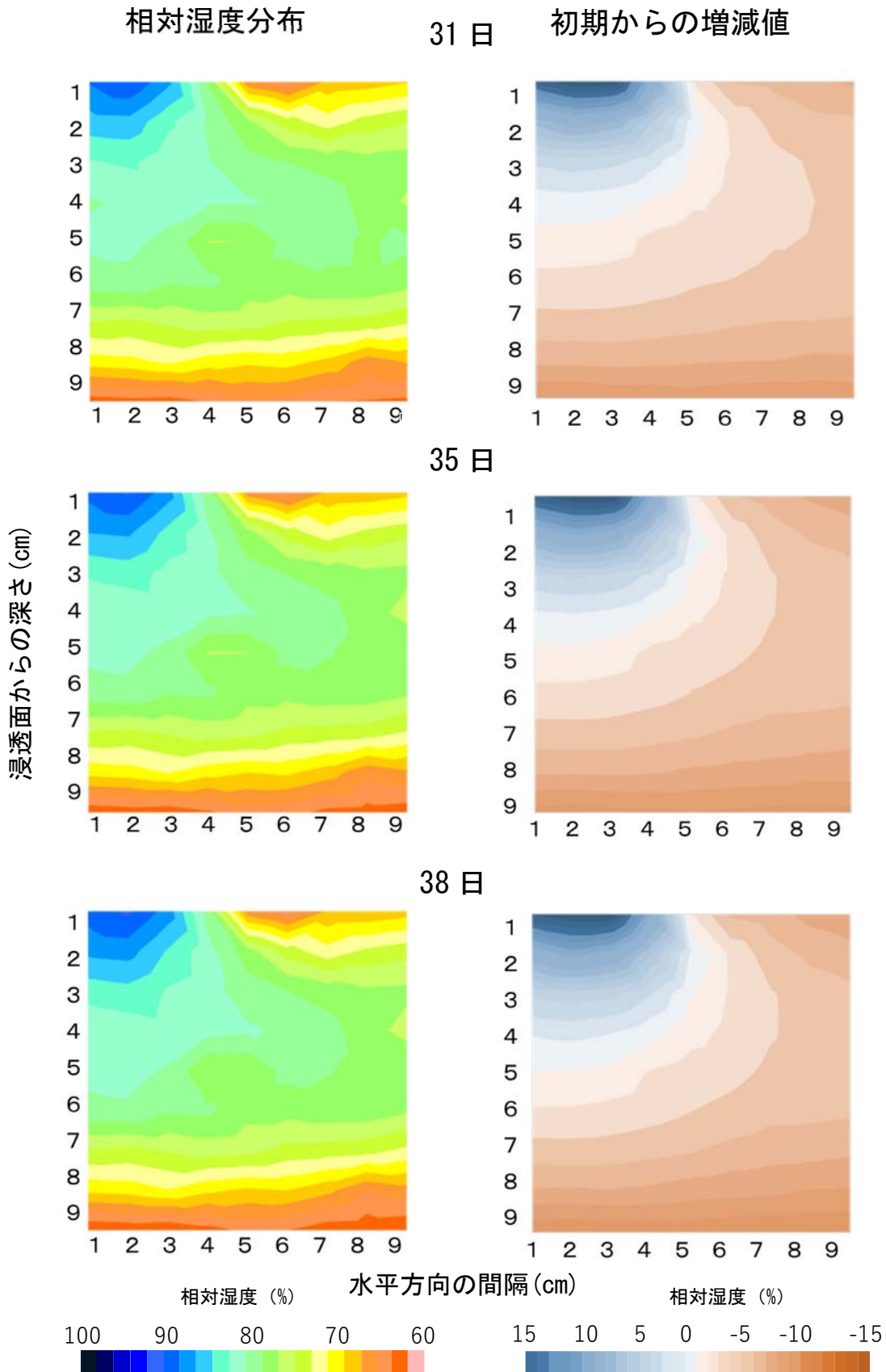


図 4.5 モルタル内部の相対湿度分布
〔シリーズ2〕

図 4.6 初期からの増減値
〔シリーズ2〕

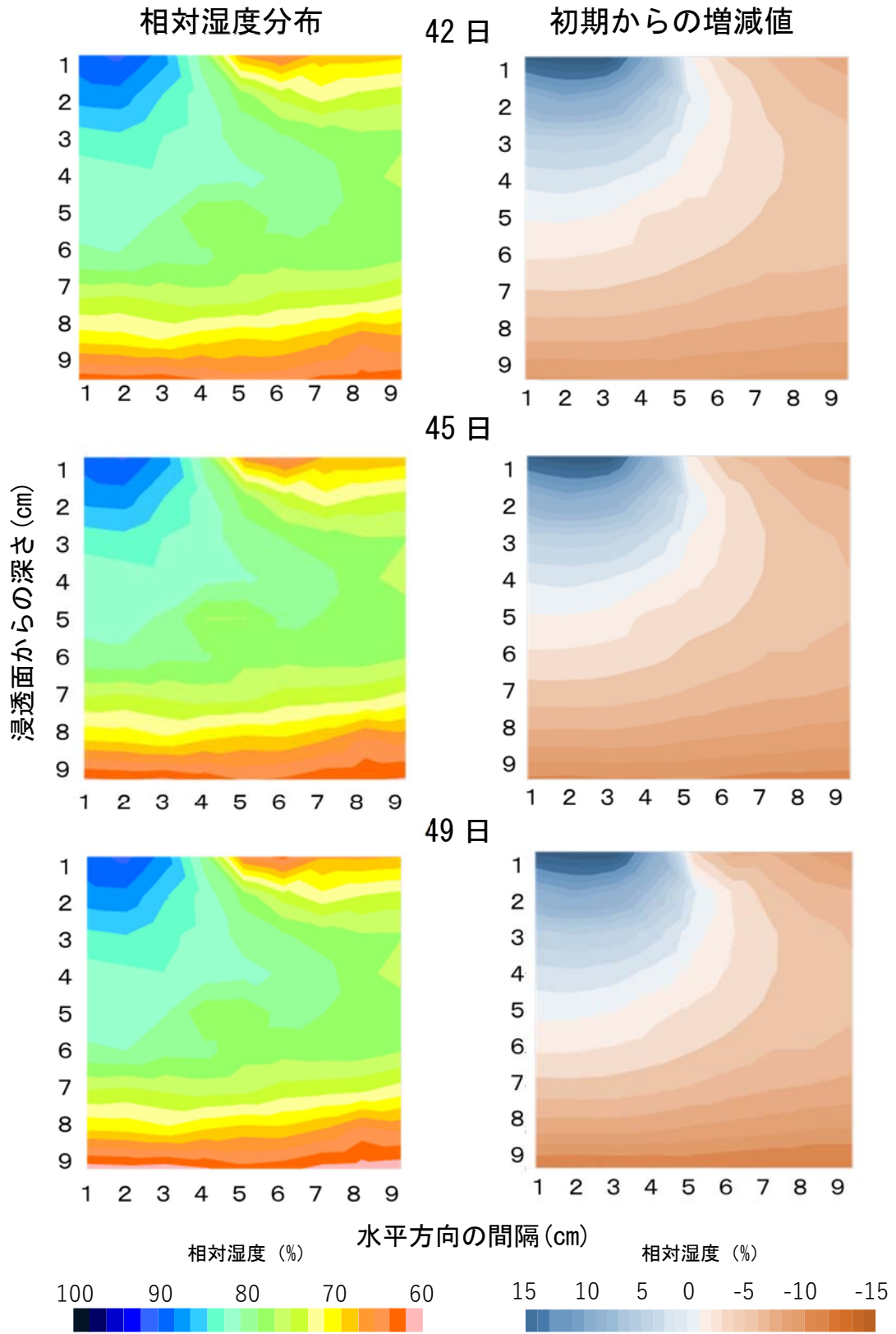


図 4.5 モルタル内部の相対湿度分布
[シリーズ2]

図 4.6 初期からの増減値
[シリーズ2]

4.4 水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響

第4.2章の浸透試験の結果より、水掛かり部で局所的に水分が供給されるような場合、水分の供給場所とその他の場所で局所的な場所で湿度差が生じており、そのような場所ではマクロセル腐食を引き起こす可能性が高いと考えられる。

そこで本章では、水掛かりを受けるような屋外環境を模擬し、水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響について把握することを目的に屋外曝露試験を行った。

4.5 試験

4.5.1 供試体配合

検討には、表4.2に示す配合で作製した150×150×1200cmの角柱供試体を用いた。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。また、劣化を促進させるため、予め初期塩化物イオン量が5kg/m³となるよう練り混ぜ時にNaClを外割で添加した。

表 4.2 屋外曝露試験に用いた供試体の配合

W/C	s/a	単位水量(kg/m ³)					混和剤 (cc/m ³)		
		W	C	S	G	初期Cl ⁻ 量	AE減水剤	AE剤	
0.5	44	175	350	774	991	5	700	1050	

ここで、W：水（密度：1.0 g/cm³）、C：普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）、S：富士川産川砂（密度：2.64 g/cm³）、G：川砂利である。

4.5.2 屋外曝露試験

本章では、水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響を把握することを目的とし、屋外曝露試験を行った。以下に、試験の概要を示す。

(1) 供試体作製手順

供試体作製手順を以下に示す。

- ① かぶりを確保するため、供試体と同様の配合でスペーサーを作製した。
- ② 150×150×1200mm の型枠を用いてコンクリートを打設する。また、主筋として $\phi 13$ みがき丸鋼をかぶり 3cm で、スターラップ筋として $\phi 5$ みがき丸鋼を 25cm 間隔で埋設した。また自然電位を測定するため主筋には導線を接続した。(図 4.7)
- ③ コンクリート打設後、1日間温潤養生を行ったのちに脱型し、27日間温潤養生を行った。
- ④ 厚さ 5mm の塩化ビニル板を所定の大きさにカットした後、接着、溶接を行い、カバーを作製した。

(2) 検討項目および試験方法

屋外曝露試験の際には、屋内曝露、カバー無、端部露出、中央露出の計 4 ケースで試験を行った。端部露出、中央露出の 2 ケースについては塩化ビニル製のカバーを設置した(図 4.8, 4.9)。また端部露出供試体については両端部を 12.5cm 露出させ、中央露出供試体についてははり上面中央部に直径 5cm の穴を設置した。屋内曝露以外の供試体は稲盛会館の屋上に曝露した。なお、供試体は端部が南北方向に設置した。写真 4.2 に実際に稲盛会館の屋上に曝露している様子の写真を示す。

曝露開始後は、目視で確認できる水の浸透域およびひび割れの記録、自然電位の測定を定期的に行った。供試体の鉄筋は鉄筋の状態を非破壊的に調査することができる自然電位測定を用いた。自然電位測定はマルチメータに海水塩化銀照合電極を取り付けて行った。

供試体寸法 (mm)

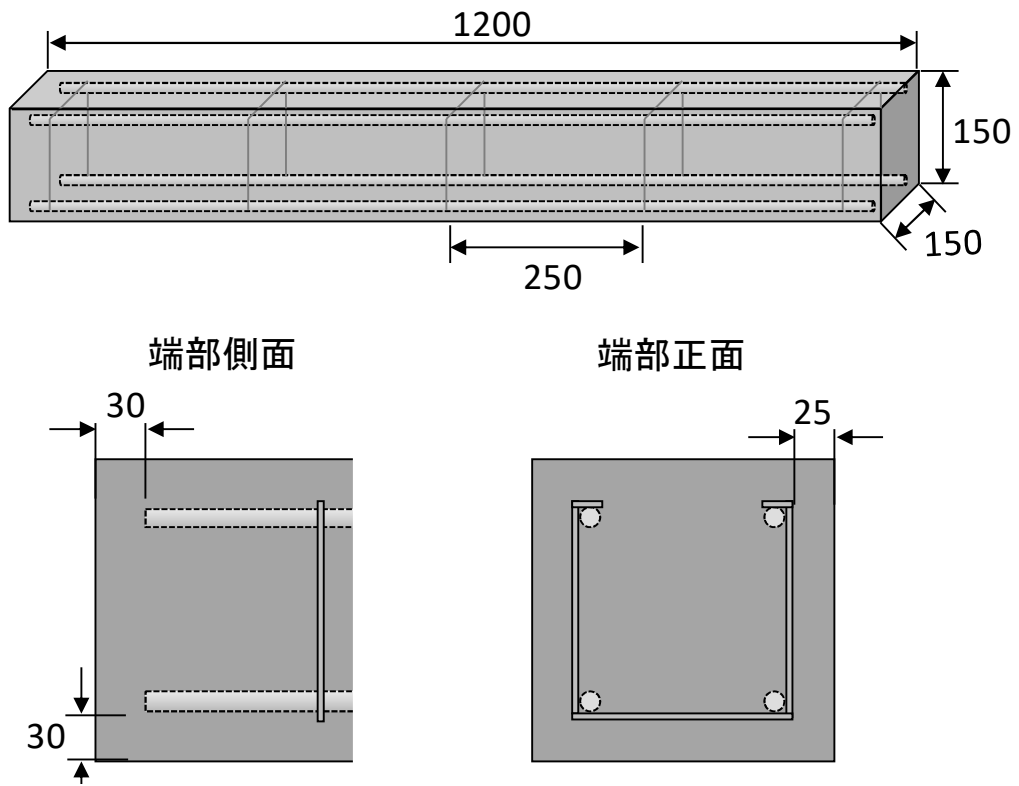


図 4.7 供試体概要図

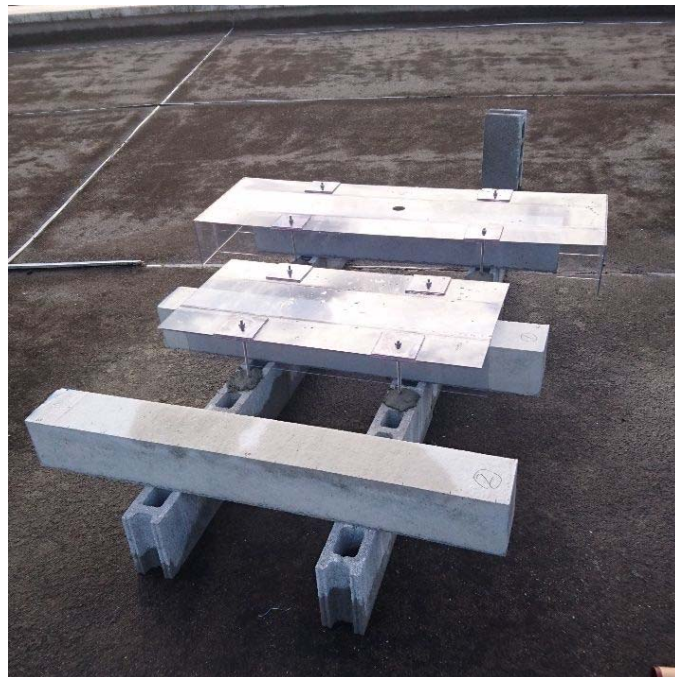


写真 4.2 曝露の様子

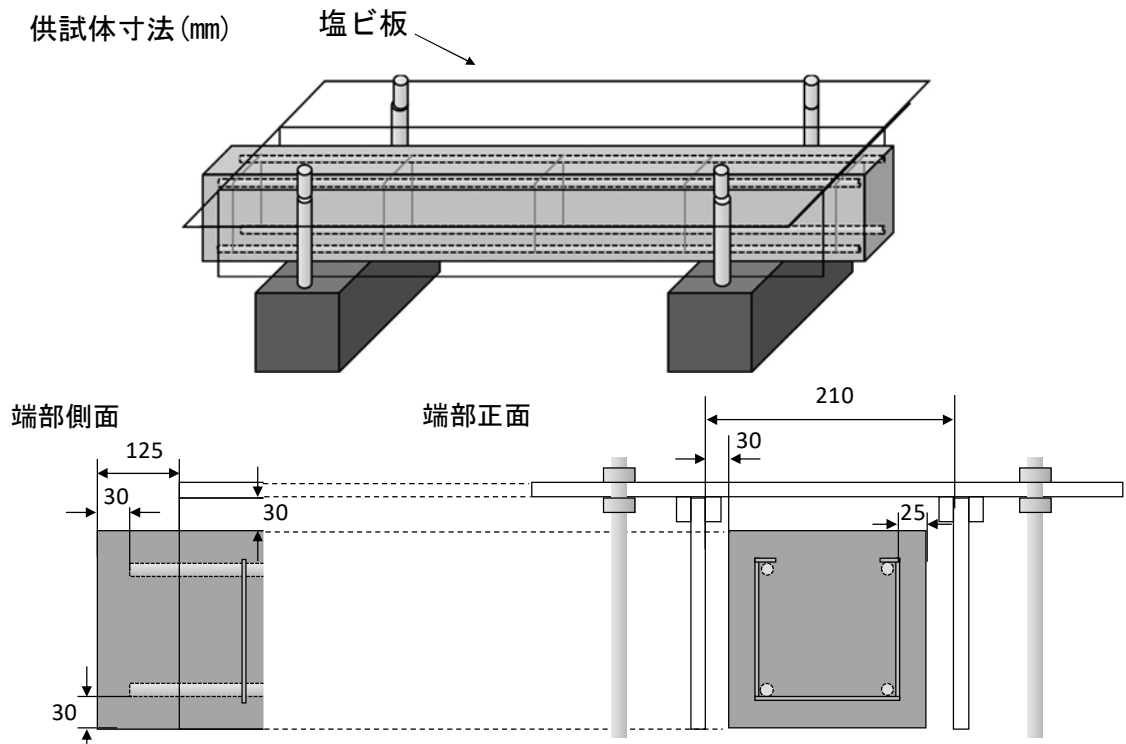


図 4.8 端部露出供試体概要図

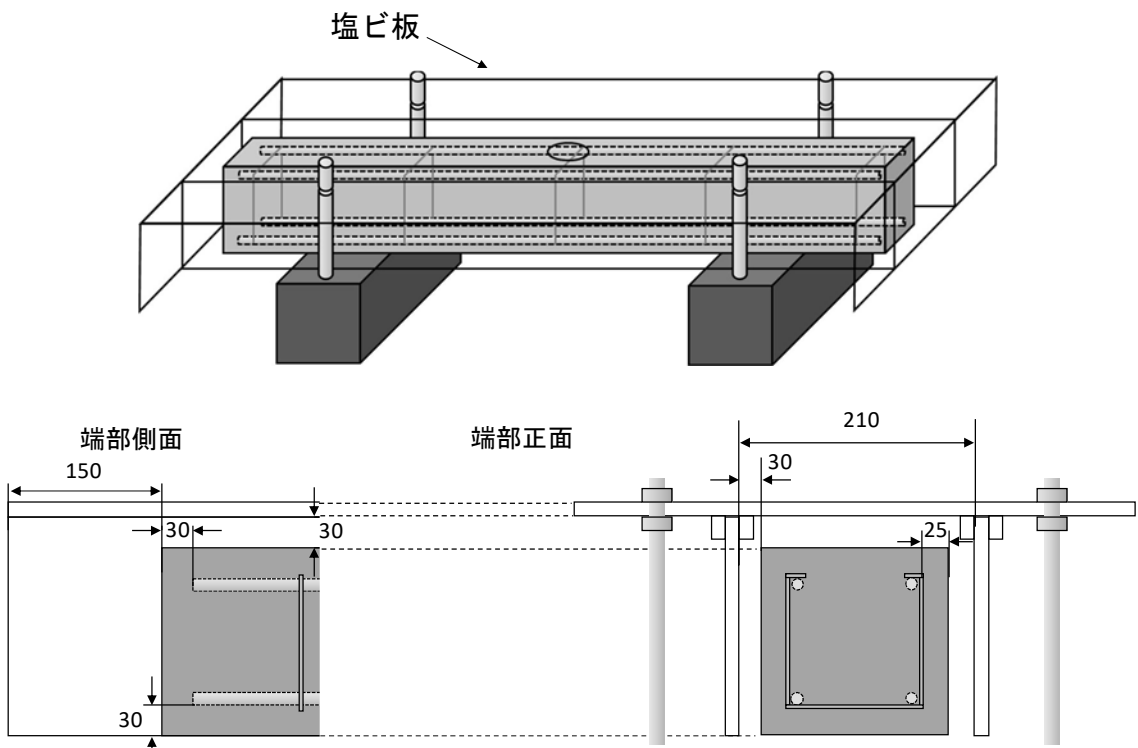


図 4.9 中央露出供試体概要図

4.5.3 試験結果および考察

自然電位の経時変化の一例として、**図 4.10** に上部鉄筋の自然電位の経時変化を、**図 4.11** に下部鉄筋の自然電位の経時変化を示す。屋内曝露供試体については上部鉄筋、下部鉄筋ともに時間経過に伴う自然電位の変化は見られなかった。一方でカバー無、端部露出供試体については上部鉄筋、下部鉄筋ともにおいて時間の経過に伴って水掛り部の自然電位が卑化した。またその自然電位は腐食判定値（**表 4.3**）である -350mV vs CSE より卑な値を示した。中央露出供試体については上部鉄筋のみ水掛り部の自然電位の低下がみられた。第4章の浸透試験の結果より乾湿繰り返しの影響を受ける水掛り部では浸透面からの深さ 5cm 付近まで高湿度状態になっていることが想定され、屋外曝露試験用の供試体でも水掛りの影響によって自然電位が卑化したためだと推察される。水掛り部と健全部では大きな電位差が生じており、水掛り部をアノード、健全部をカソードとするマクロセル腐食を形成する可能性が高く、水掛り部では極めて激しい腐食環境であると考えられる。短時間で明確に水分の影響があることがわかった。**写真 4.3~4.5** に H30.1.22 の降雨直後の供試体の写真を示す。中央露出供試体では、直径 15cm 程度、端部露出供試体では、端部から 20cm の範囲で水掛りの影響があることが確認された。

表 4.3 腐食判定基準

自然電位E (mV vs CSE)	腐食確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

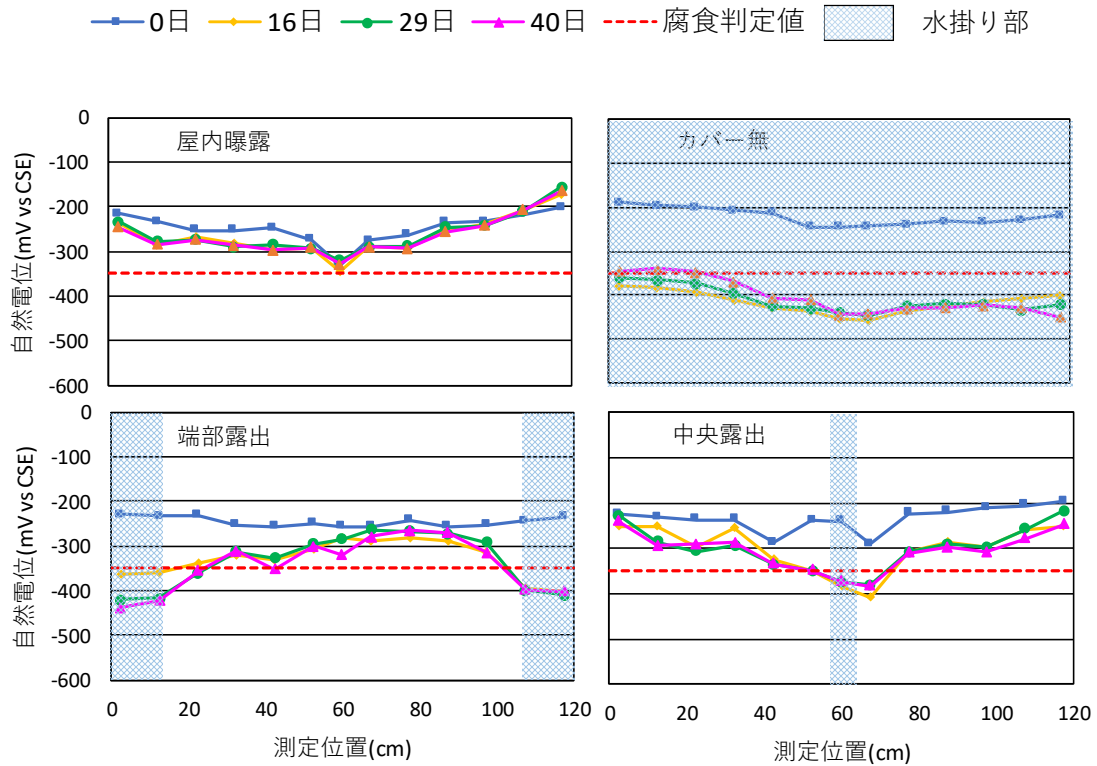


図 4.10 上部鉄筋における自然電位の経時変化

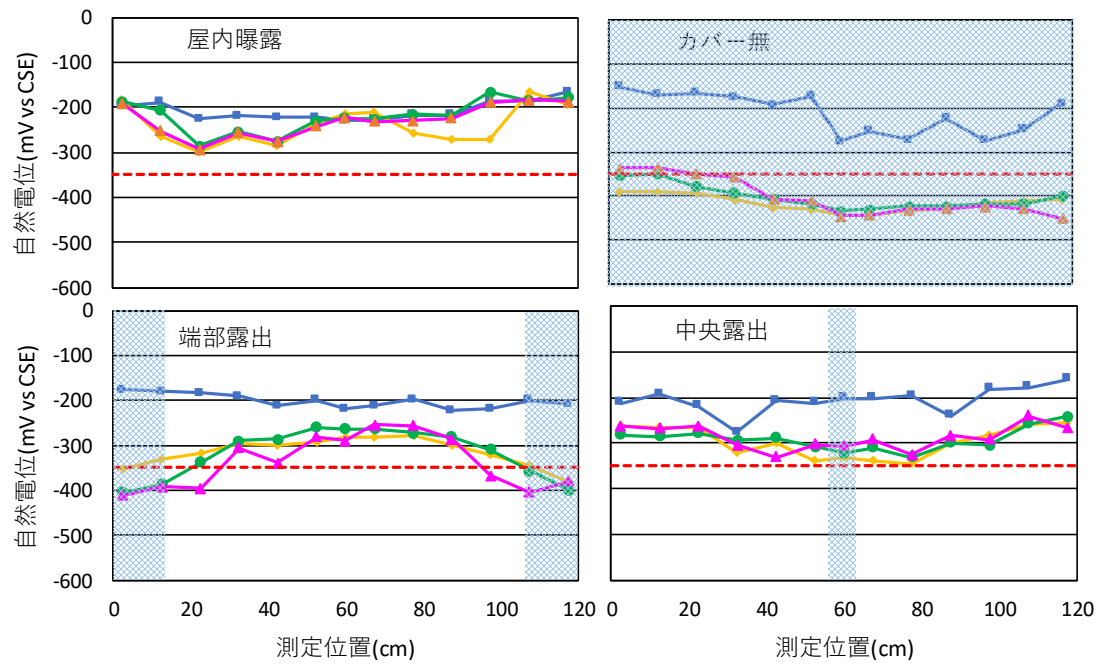


図 4.11 下部鉄筋における自然電位の経時変化



写真 4.3 降雨直後のカバー無供試体の様子

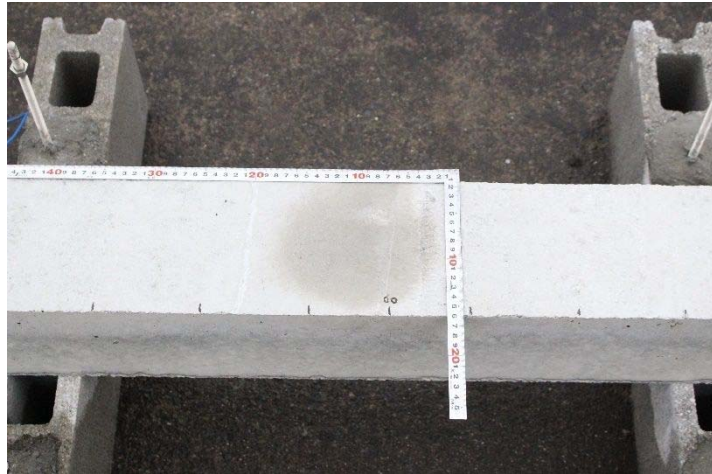


写真 4.4 降雨直後の中央露出供試体の様子



写真 4.5 降雨直後の端部露出供試体の様子

4.6 まとめ

コンクリート中の水分移動は、コンクリートの塩害、中性化、アルカリシリカ反応などコンクリート構造物の劣化の発生や進行に大きな影響を与える。実構造物をみても床版のひび割れ部や橋台の桁受け部などの水掛かり部では激しい劣化が報告されている。塩化物イオンの存在やアルカリシリカ反応のような劣化につながる要因を内在しているコンクリートに水が掛かる場合に劣化が進行しやすい。また塩害環境の構造物のように劣化につながる要因が外部から供給される場合も同様である。逆に水がなければ、劣化の進行が極めて遅くなることが多い。水が存在するだけでも劣化を進行させるが、さらに移動が伴うことで劣化因子を蓄積させたり変状箇所を広げたりする影響をもたらす。鉄筋コンクリート構造物における性能照査型の維持管理体系において、水分移動特性を把握することは、コンクリート構造物の経年劣化の進行予測を行う上で非常に重要である。近年、コンクリート内部の水分移動に関する研究は行われ始めているが、乾燥過程におけるものが多く浸透過程におけるものは少ない。また、局所的に水分が供給されるような水掛かり部におけるコンクリート内部の水分移動特性は不明瞭な点が多い。

そこで本研究では、水掛かり部を模擬した供試体を作製し、コンクリート内部の水分移動特性を把握するとともに、その水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響について実験的な検討を行った。

4.6.1 モルタル内部の水分移動特性に関する検討

モルタル内部の水分移動特性を浸透試験および乾湿繰り返し試験によって検討した。モルタル内部の相対湿度と電気抵抗率の関係式を用いることで、モルタル中の水分移動を三次元で把握することができ、その結果水掛かり部におけるモルタル中の水分分布を評価できることがわかった。また水掛かり部では局所的な場所に30%程度の湿度差が生じていることがわかった。この環境差によってマクロセル腐食を引き起こす可能性があると考えられる。

4.6.2 水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響

水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響を、屋外曝露試験により検討した。その結果、水掛かり部において鉄筋の自然電位が腐食判定値である -350mV vs CSE より卑な値を示した。このことから水掛かり部では短時間で明確に水分の影響があることがわかった。また水掛かり部と健全部で大きな電位差が生じており、水掛かり部をアノード、健全部をカソードとしてマクロセル腐食を引き起こす可能性が高く、水掛かり部は極めて激しい腐食環境であると考えられる。

4.7 結論

結論として本研究で得られた成果を取り纏めるとともに、今後の課題を提示することで本研究の結びとした。

最後に、本研究で残された課題について述べていく。

本研究においてモルタル内部の相対湿度と電気抵抗率の関係を明確にすることで、モルタル中の水分移動を三次元で捉えることができ、モルタル中の水分状態を評価することができた。本研究ではシリーズ1の乾湿繰り返し試験とシリーズ2の浸透試験で同一の供試体を用いて試験を行ったため、材齢の異なる供試体を同一の関係式によって評価した。しかし既往の研究より水和反応による組織の緻密化によって同程度の相対湿度でも材齢が長い供試体は材齢の若い供試体に比べて電気抵抗率が大きくなく傾向にあることがわかっている。そのため、ある特定の材齢時に作成したモルタル内部の相対湿度と電気抵抗率の関係式を一律に用いて評価するのは問題があるといえる。今後供試体内部の相対湿度を詳細に把握するためには、材齢による電気抵抗率への影響を明確化することが必要である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会ほか：2013年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，社団法人土木学会，pp. 114-118, 2013. 10

第5章

マルコフ連鎖モデルを用いた 将来予測手法の検討

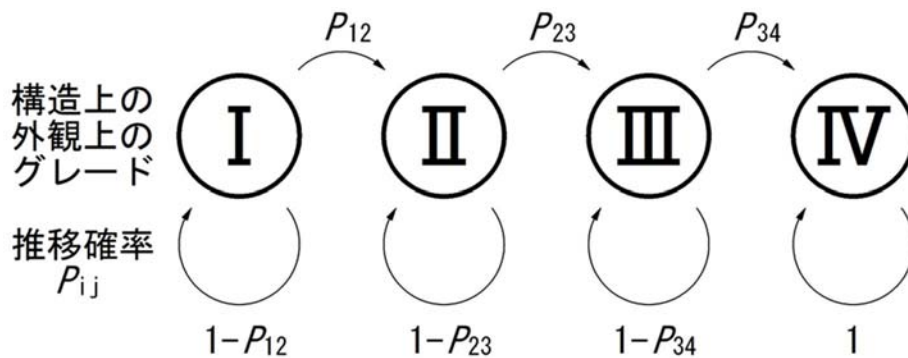
第5章 マルコフ連鎖モデルを用いた将来予測手法の検討

5.1 マルコフ連鎖モデルとは

マルコフ連鎖とは、確率過程の一種であるマルコフ過程のうち、未来の状態（の確率）が過去の状態によらず現在の状態のみで決まるような確率過程のことをマルコフ過程という。マルコフ連鎖モデルは、「状態」と「推移」という2つの概念を用い、物事がある状態から、ある「移行確率」で次の「状態」へと移行する様子を確率論的に捉える統計的手法である。

橋梁の点検時の外観上のグレードを現状の「状態」として、外観上のグレードが次の段階に進行する現象を「推移」とすると、この劣化進行の確率（推移確率）が求めれば、劣化の進行予測が可能になる。

この模式図を図5.1に示す。



（構造物の外観上のグレードを I, II, III, IV の 4 段階とした場合）

図 5.1 マルコフ連鎖モデルによる予測の概念

遷移確率は、ほぼ同じ条件下にある多数の構造物や部材の外観上のグレードのデータから逆算して平均的な値を求めることができる。

5.1.1 まえがき

わが国の社会資本は高度経済成長期に建設されたものが多く、その余寿命を考慮すれば、近い将来大量の構造物が一斉に更新時期を迎えることが予測される。また、国土交通省の総合政策として平成 25 年 11 月に「インフラ長寿命化基本計画」が策定されインフラの安全性・信頼性や業務の効率性の向上等が図られることが期待される^{2), 3)}。

したがって、今後は限られた予算内でこれらの構造物を効率的に維持管理し、長寿命化させる方策が必要不可欠となる。このような状況に対し、橋梁の劣化進行を予測し、補修が必要となる時期とその経費を予め算定する橋梁長寿命化修繕計画が各自治体で策定されつつある。

その前提となる劣化予測手法は、管理橋梁群を設置環境に応じて区分し、各環境区分に属する橋梁点検データを橋種あるいは部材ごとに整理することで行われているが、非常にばらつきが大きく、また、損傷の種類や各劣化進行過程での劣化の程度を考慮していないため、改善の余地がある。本研究では、従来の劣化予測手法ではなく、マルコフ連鎖モデルを用いた統計的解析手法により損傷種類ごとの劣化の推移を時系列的に整理するとともに、一般環境や塩害環境において劣化進行過程に基づいた新たな劣化予測手法を検討し、より効率的な維持管理を行うための方法を提案することを目的としている。

5.2 データの抽出条件と環境区分

本論文では、鹿児島県橋梁長寿命化修繕計画データベースより、鹿児島県管理橋梁(2399橋)および市町村管理橋梁(2505橋)の計4904橋を対象として検討を行った。検討には、データベース内の橋梁基本データと点検データを用いている。橋梁基本データには表5.1に示すような、橋梁名や架設年度、橋種、架設位置などの橋梁個別のデータが入力されており、点検データには点検日や部材、損傷種類、損傷評価などのデータが入力されている。検討を行うにあたり、橋梁基本データにおいては次のような条件の下で抽出データの絞り込みを行った。

- 1) 架設年月日のデータが無い、もしくは点検時の入力ミス等が考えられる橋梁を除外する。
- 2) 架設位置に関するデータの無い橋梁を除外する。
- 3) 補修・補強を行った履歴のある橋梁を除外する。
- 4) 橋種について、コンクリート橋のみを対象とした。

以上の条件での絞り込みにより、1454橋の橋梁についてのデータを得た。また架設位置に関して、鹿児島県は離島も含めて海岸線に沿って多くの橋梁が建設されていることから、塩害環境と一般環境の2環境に分けて検討を行っている。鹿児島県橋梁長寿命化修繕計画(H26年4月)では、塩害影響地域を本土の海岸線から200m以内および離島・奄美地域としている。本検討でも、この条件に準じ、上記の条件に当てはまる環境を塩害環境(250橋)とし、それ以外を一般環境(1204橋)とした⁴⁾。ただし、塩害環境にもその環境外力の程度は大きく異なることが予想されることから本検討では塩害環境をさらに2つに区分した。すなわち、海岸線から100mまでの最も塩害の影響が大きいと考えられる環境(157橋)と、100mを超えて200mまでの環境(93橋)とする2つの区分である。以上のように、これらの計3つの環境区分における橋梁群に対して検討を行った。

表 5.1 橋梁群の点検データを引用した自治体および橋梁の基礎データ

自治体名	いちき串木野市 さつま町 阿久根町 始良町 伊佐市 伊仙町 宇検村 奄美市 屋久町 加治木町 浦生町 肝付町 喜界町 錦江町 薩摩川内市 志布志市 指宿市 鹿屋市 鹿児島市 出水市 垂水市 瀬戸内町 西之表市 曾於市 大崎町 大和村 知名町 知覧町 中種子町 長島町 天城町 東郷町 東串良町 徳之島町 南さつま市 南種子町 南大隅町 日置市 枕崎市 霧島市 湧水町 和泊町			
橋梁の基礎データ概要	橋梁管理コード 橋梁名 点検年月日 完成年月日 供用年数 損傷種類 部材 材料 径間番号 緯度 経度 市町村 塩害対策区分 代表損傷等級			
損傷種類別の標本数	損傷種類	ひびわれ	うき	剥離・鉄筋露出
	橋梁数	1359橋	430橋	1362橋

点検データは、対象期間が平成19年から平成26年までに行われた点検を対象としており、点検データは、各径間毎にそれぞれの部材に損傷状態を記録している。なお、記録されている損傷の評価には損傷等級が用いられている。

図5.2に鹿児島県における橋梁の損傷状態に関する考え方を示す。図の損傷区分は、損傷

毎の程度や広がりの評価であり、鹿児島県の橋梁定期点検マニュアル⁵⁾に基づいて評価がなされている。診断については、損傷区分や橋梁の状態から専門の知識を持った技術者が総合的な検討を行って、損傷種類ごとに定量的な評価値(部材診断区分:5段階評価)を判定し、部材の中で最悪の部材診断区分を部材の損傷等級として、決定している。さらに、対象とする橋梁で最も損傷程度の悪い部材の損傷等級を損傷度として決定することで、橋梁の損傷状態を評価している。表 5.2 には国土交通省令で示された判定区分⁶⁾と損傷度の関係を示す。

既往の研究⁷⁾に示されているように、部材ごとに劣化の発生時期や進行速度には当然ながら違いがある。そのため本検討では、橋梁全体を評価する「損傷度」ではなく、部材の状態を評価する「損傷等級」に着目し、一例として部材を主構に限定した劣化進行予測について示している。また、今回対象とした平成 19 年から平成 26 年の 7 年間に於いて複数回の点検データを有している橋梁の場合、各点検結果を比較して、補修が実施されていないにも関わらず損傷状態が前回に比べて回復している場合新しいデータは採用しないこととした。

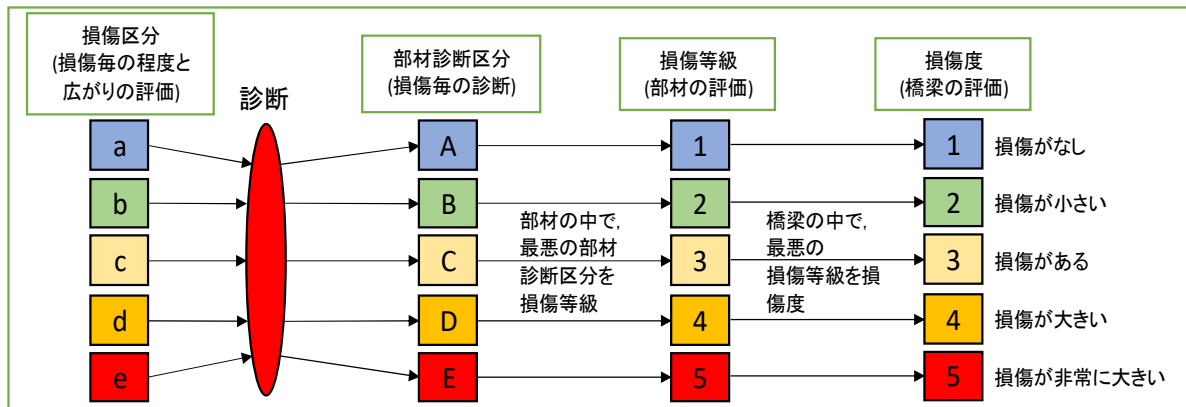


図 5.2 鹿児島県における損傷度評価の考え方

表 5.2 損傷度と国土交通省令で示された健全度との関係

損傷度 (県)	判定区分(国)		状態
1 2	I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
3 4	II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、 予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
5	III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、 早期に措置を講ずべき状態
	IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が 著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

5.3 損傷種類別の劣化進行予測

5.3.1 環境における損傷の特徴

海岸線から 200m を超える地域を一般環境(橋梁数 1204 橋), 海岸線から 100m を超えて 200m までの環境(橋梁数 93 橋), 海岸線から 100m までの最も塩害の影響が大きい環境(橋梁数 157 橋)とした。それぞれの環境における橋梁群の損傷割合を損傷種類ごとに図 5.3 に示す。

一般環境における損傷等級 5 については, うきによる損傷割合が約 35%を占め, つづいて剥離・鉄筋露出, ひび割れ, 漏水・遊離石灰の順となっている。一方, 海岸線から 100m を超えて 200m までの環境においては, 剥離・鉄筋露出が約 42%を占め, つづいてひび割れ, うきの順となっている。さらに, 最も海岸線に近い 100m までは, うきが 75%と 3つの環境の中で最も割合が高い結果となる。つづいて, 剥離・鉄筋露出, コンクリート補強材の損傷, ひび割れの結果になっている。環境に応じて損傷種類別の割合が異なり, 特に, 塩害環境である 2つの区分ではうきや剥離・鉄筋露出が進行していることから, 早期の補修が必要な橋梁が多いことが推察される。

なお, 点検結果からは橋梁の異常なたわみは見られておらず, 橋梁の主構には致命的な影響は出ていないと推察されるが, 剥離・鉄筋露出の損傷割合が大きい場合には緊急処置が必要となる場合もあるため, 損傷の程度に応じて適宜追加調査を行うなど, 適切な維持管理を行うことが重要である。

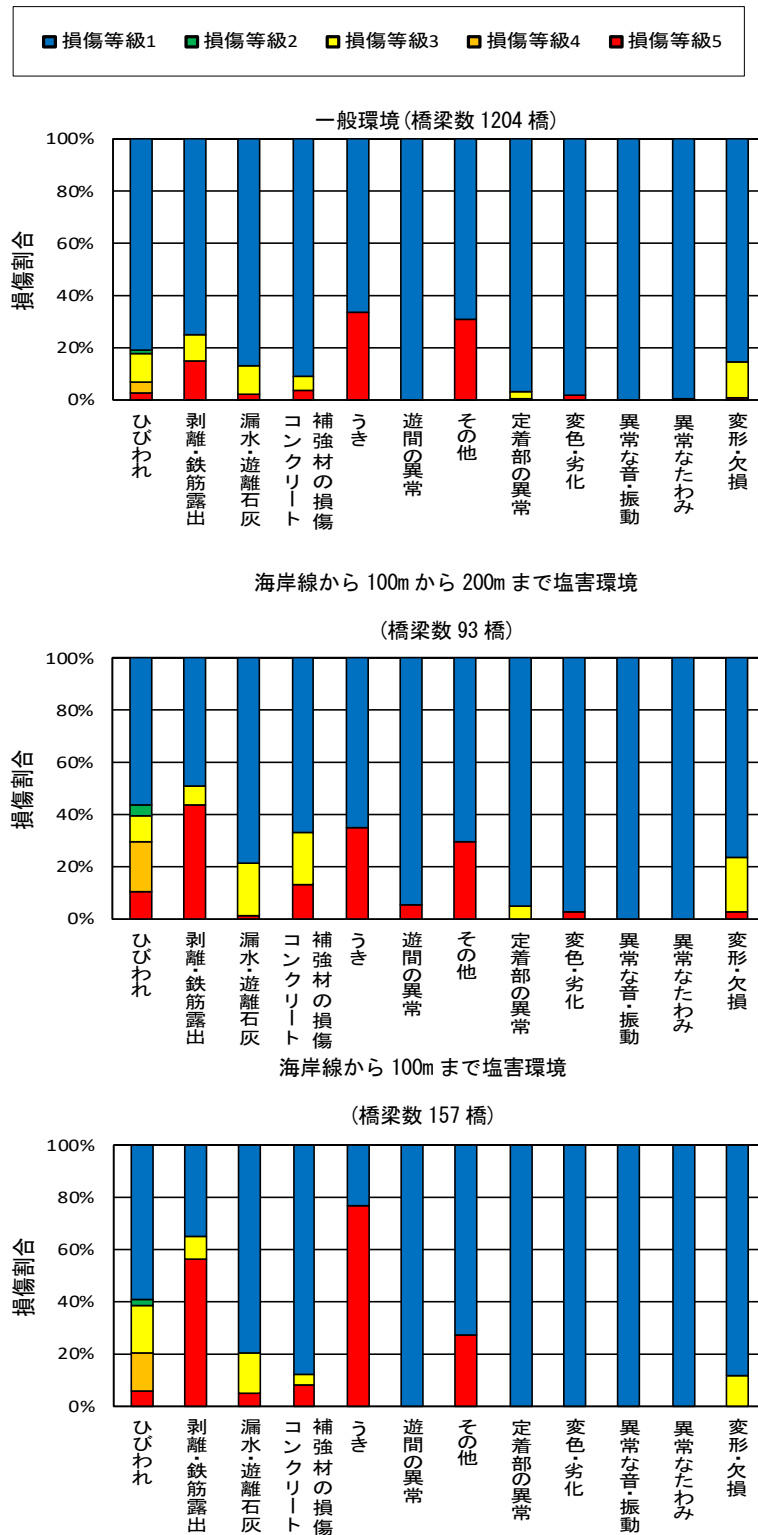


図 5.3 主構における各損傷種類の損傷等級の割合

コンクリート橋の主構に着目した図 5.4 は、径間ごとに最も損傷等級の大きい点検データを抽出し、3つの環境条件で損傷等級の割合を示したものである。一般環境では、損傷等級 1 の割合が 83.3%と高く、比較的健全な主構を持つ橋梁が多い。一方、海岸線から 100m までの最も海岸線に近い環境では、損傷等級 5 が 62.5%を占めており、剥離鉄筋露出等により劣化期にあたる鋼材腐食による断面減少に至り、早急に補修が必要な橋梁も多い。

両環境の劣化進行の違いは明白であるが、環境別の損傷等級の違いは、現状では、環境の違いを踏まえた構造物の維持管理がなされていないことを示している。また、従来同じ塩害環境に区分される環境であっても、海岸から 100m を境に区分するだけで、その損傷等級割合が大きくことなることから、必要に応じて環境区分をさらに細分化することも効率的な維持管理の上で重要なポイントとなる。

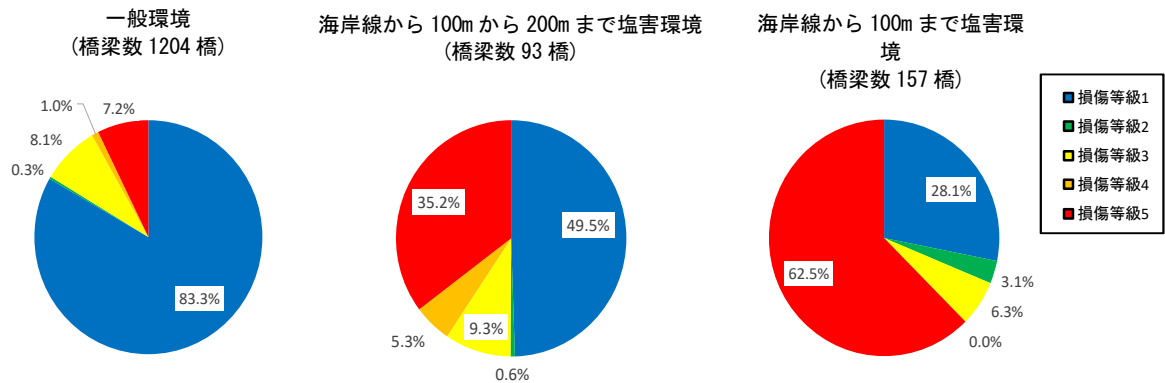


図 5.4 主構における各損傷等級の割合

このような環境区分の分類方法の一例として、鹿児島県の橋梁群における主構部材の損傷種類別の損傷状況を GIS⁸⁾ で整理した結果を図 5.5 に示す。図中の損傷状況から橋梁群の損傷状況の可視化ができ、それぞれの主構の点検結果による局所的なデータだけでなく、橋梁群としての劣化状況の可視化につながる。

また、損傷種類に着目すると「ひび割れ」が発生している主構は、「剥離・鉄筋露出」が生じている主構も多く相関があるように推察できる。また、劣化機構にひび割れによる劣化因子の侵入から「剥離・鉄筋露出」へ損傷を助長していることも考えられる。このようにそれぞれの損傷が単独ではなく、複雑に関係していることも可視化できる。今後は、地理的な位置情報に、各損傷種類の損傷等級や 5 年毎に行われる点検データによる損傷等級をプロットすることで環境条件等に注目した合理的な劣化進行予測にも寄与できると考えている。

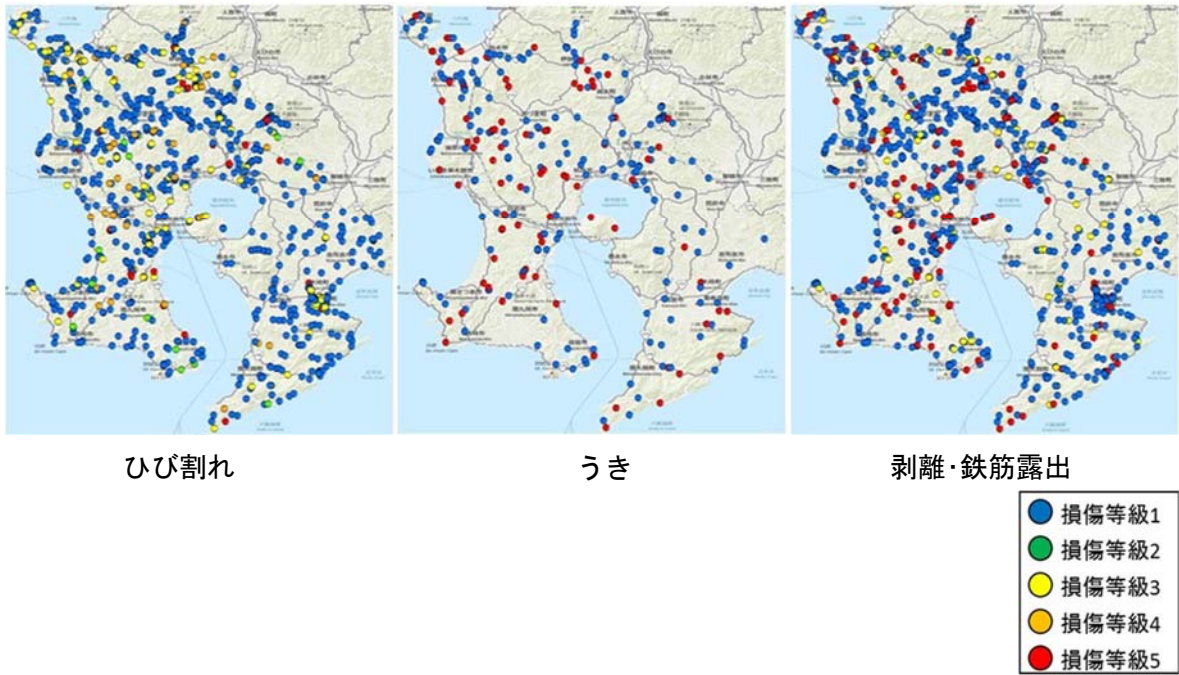


図 5.5 鹿児島県本土での主構における各損傷種類の損傷状況

5.3.2 鹿児島県における劣化予測手法の現状

現在の鹿児島県における橋梁長寿命化修繕計画では、管理橋梁点検結果を一般環境、塩害環境の2環境に区分し、部材ごとの劣化進行予測を行っている。図5.6には、一般環境における主構の点検結果より得られた、損傷等級と供用年数の関係の一例を示す。具体的には、得られた点検結果を基に、それぞれの損傷等級が発生する平均供用年数を算出し、これを近似することで、直線で示すような環境別の劣化進行予測式を設定している。しかしながら、図5.7に示すように実際の橋梁群における損傷発生時期は数十年のスパンで分布するのが普通であり、上記の手法のように損傷等級の推移を供用年数の平均値で処理する現行の劣化予測手法では、十分な精度の予測は困難である。より効率的な維持管理を計画的に行うためには、これまでの点検結果を統計的に整理・分析することで、劣化進行の状態変化を確率過程で示すことが望ましいと考えられる。

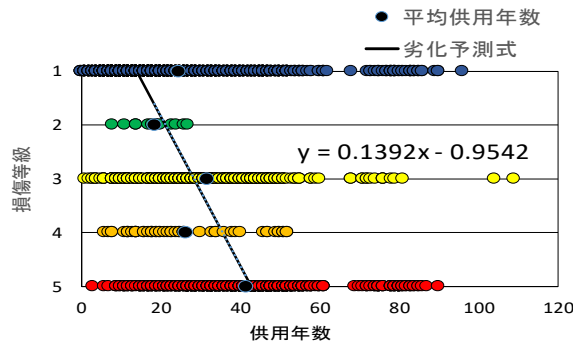


図 5.6 現行の手法での予測結果(一般環境)

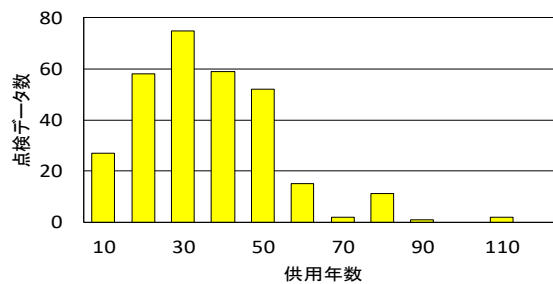


図 5.7 損傷等級3の分布と供用年数との関係

5.3.3 マルコフ連鎖による劣化進行予測

事象の出現確率とその時点以前に出現した事象の系列に依存するものをマルコフ過程といい、離散的な時間と離散的な標本空間で定義されるマルコフ過程をマルコフ連鎖という。マルコフ連鎖は、「状態」と「遷移」という概念を用い、物事がある状態からある遷移確率で、次の状態へと移行する様子を確率論的に捉える統計手法である。このマルコフ連鎖による統計手法を用い橋梁の劣化進行を評価することを試みた。図 5.8 に、一例として塩害を例とした劣化進行過程の概念図を示す⁹⁾。ここで、マルコフ連鎖は、時間的に一様であるとされていることより、劣化の進行速度において同義となる「遷移確率」は一定としている。しかしながら、損傷種類によって区分される損傷等級が劣化進行過程のどの期（時期）に属するものであるか、また、それぞれの損傷種類の劣化進行速度は異なると考えられるため、図 5.9 に示すように、遷移する。

$$P = \begin{pmatrix} 1-P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & 1-P_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_3 & 1-P_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_4 & 1-P_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_5 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{式 5.1}$$

確率一定ではなく各劣化状態（損傷等級）から推移する際の遷移確率を式 5.1 のような行列式を考え、それぞれ P2, P3, P4, P5 と変化させて統計的整理を行った。

遷移確率は、点検結果データベースから、各損傷等級別に供用年数を 10 年ごとに区切りそれぞれの橋梁数に離散化し、最小二乗近似による回帰分析を行うことにより算出した。したがって、今回求めた遷移確率は 10 年確率である。なお、本検討では、維持管理計画を策定する際に設定される要求性能を満足するために各損傷を対象として対策する場合があるため、まずは損傷種類別の遷移確率を算出した。次に、橋梁の供用期間内の劣化進行に及ぼす環境外力を評価するため、環境区分を細分化し、さらに各損傷種類を一つの劣化進行過程に対応させた状態で遷移確率を算出した。

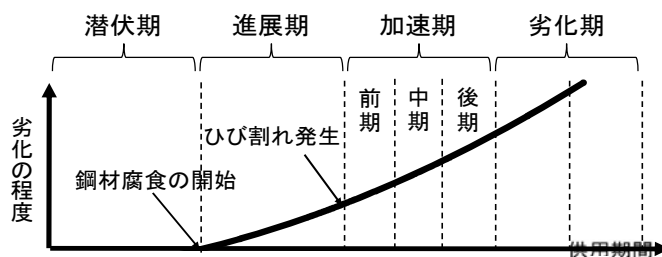


図 5.8 塩害を例とした劣化機構による劣化進行過程の概念図

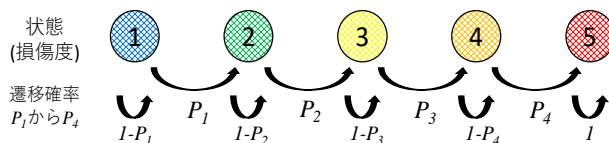


図 5.9 マルコフ連鎖モデルによる劣化予測

5.3.4 損傷別の遷移確率

損傷種類ごとに算出した遷移確率の傾向を分析するため、損傷種類を、ひび割れ、うき、剥離・鉄筋露出の3種類、環境区分を、一般環境と2種類の塩害環境（海岸線から100mまでと、海岸線から100mを超えて200mまで）の3つに細分化して検討した。なお、本論文では、部材区分が主構のコンクリート構造物の場合について示す。また、表5.3に各損傷種類の損傷区分を示す。ひび割れに関してはひび割れ幅とひび割れ間隔、うきに関してはうきの有無、剥離・鉄筋露出に関しては剥離、鉄筋露出の有無を基準として区分している。図5.10に主構のひび割れに関する遷移確率を環境区分別に示す。環境区分別で、損傷がない状態である損傷等級1からひび割れが顕在化し始める損傷等級2に推移する時の遷移確率 P_2 に差がみられなかった。ひび割れは、鉄筋腐食やアルカリシリカ反応のように損傷の広がりが進展してゆくものと、初期欠陥のようにそれ単体では進展のみられないものがある。それらを細かく区分せず、一括りでひび割れとして点検しているためこのような結果になったと考えられる。

また、より高精度な劣化進行予測を行うために、全ての橋梁においてコンクリート品質試験等ができれば、劣化の原因特定ができる。しかし、点検に加え試験コストが増加するため現実的ではない。そこで、環境条件により塩害、中性化、凍害などはその劣化原因については、おおよそ推定できるため、これらを記録することが望ましい。

図5.11には主構における環境区分別のうきの遷移確率を示す。損傷がない状態である損傷等級1からうきが生じ始める損傷等級5に推移する時の遷移確率 P_5 は、一般環境から過酷な塩害環境になるにつれて、大きくなることが確認された。図5.12に主構における環境区分別剥離・鉄筋露出の遷移確率を示す。損傷がない状態である損傷等級1から剥離が生じ始める損傷等級3に推移する時の遷移確率 P_3 は、うきと同様に一般環境から過酷な塩害環境になるにつれて、大きくなることが確認された。また、いずれの環境下においても遷移確率 P_5 が大きな値を示したことより、剥離から鉄筋露出への移行は非常に早いことが確認された。以上の結果より、損傷種類がうきと剥離・鉄筋露出の場合に環境区分別に明確な傾向が認められた。うきや鉄筋露出は、中性化や塩害等による鉄筋腐食に起因する劣化現象であり、今回の環境区分の整理では、鉄筋腐食に対する環境外力の影響度をある程度評価できた。

うきや鉄筋露出は、中性化や塩害等による鉄筋腐食に起因する劣化現象であり、今回の環境区分の整理では、鉄筋腐食に対する環境外力の影響度をある程度評価できた。また、各損傷種類の劣化進行速度の精度を向上させるためには、塩害環境をより細かく区分する必要があることが示唆された。

表 5.3 各損傷種類の損傷区分

損傷種類		損傷等級	1	2	3	4	5		
ひびわれ	ひびわれ幅	ひびわれなし		0.2mm未満	0.2mm未満	0.2mm以上	0.2~0.3mm	0.3mm以上	0.3mm以上
	ひびわれ間隔			0.5m以上	0.5m未満	0.5m以上	0.5m未満	0.5m以上	0.5m未満
剥離・鉄筋露出		ひびわれなし	ひびわれなし	—	剥離のみが生じている		—	鉄筋が露出しており、鉄筋が腐食している	
うき		ひびわれなし	ひびわれなし	—	—	—	—	うきがある	

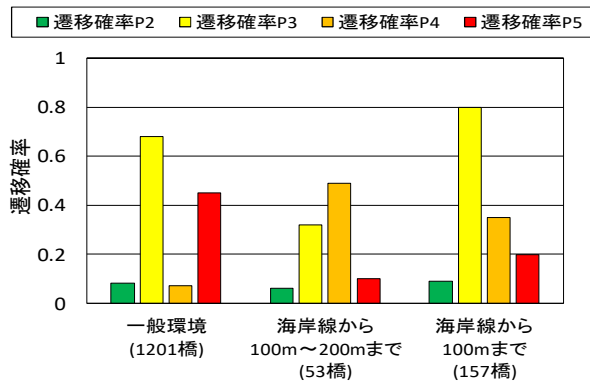


図 5.10 ひび割れの遷移確率 (主構)

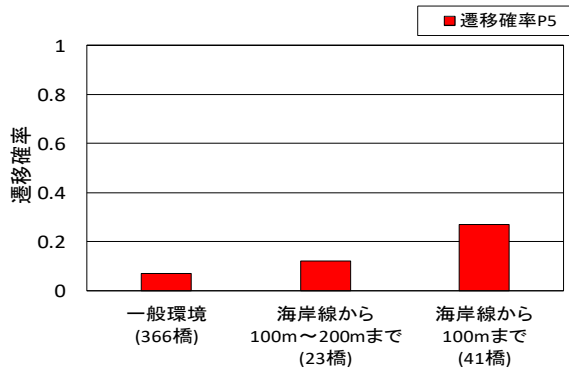


図 5.11 うきの遷移確率 (主構)

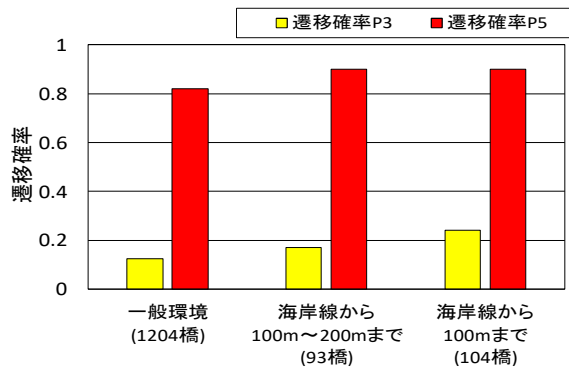









図 5.12 剥離・鉄筋露出の遷移確率 (主構)

5.3.5 損傷を組み合わせた場合の遷移確率

前項における劣化進行過程の評価は、あくまでも各損傷別の損傷等級の変化に対するものであり、これらは必ずしも構造物の劣化進行過程と関連付けられているものではない。さらに、図 5.8 に示すような各劣化進行過程の期間の長さは、環境や使用状況に応じて変化し得ることから、損傷別の評価を基に、その部材が劣化進行過程のどの段階あるか、あるいは今後どのような確率で劣化過程が進行するかを示すことは難しい。そこで、各損傷の発生時期を、劣化進行過程を踏まえて時系列的に整理することで、部材の劣化過程として評価することを試みた。例えば、塩害、中性化の劣化過程においては、通常、鋼材の腐食が開始し、その腐食量が限界に達するとひび割れが発生し、さらに加速的に腐食が進行することであり、剥離、鉄筋露出と経時的に推移していく。これを踏まえて各損傷の発生時期を時系列的に組み合わせることで、各損傷の情報を総合的に評価した劣化進行過程に対する遷移確率を算出することができる。

表 5.4 に劣化過程を踏まえた各損傷とその程度の組み合わせを示す。また、図 5.13 に主構における環境区分別の各劣化進行過程に対する遷移確率を示す。

表 5.4 損傷の組み合わせ

劣化進行過程 損傷種類	劣化進行過程		加速前期	加速中期	加速後期		劣化期
	潜伏期	進展期			損傷等級4	損傷等級5	
ひび割れ	損傷等級1	損傷等級2		損傷等級3	損傷等級4	損傷等級5	
	損傷なし						
うき	損傷等級1			損傷等級5			
	損傷なし						
剥離 鉄筋露出	損傷等級1				損傷等級3		損傷等級5
	損傷なし						

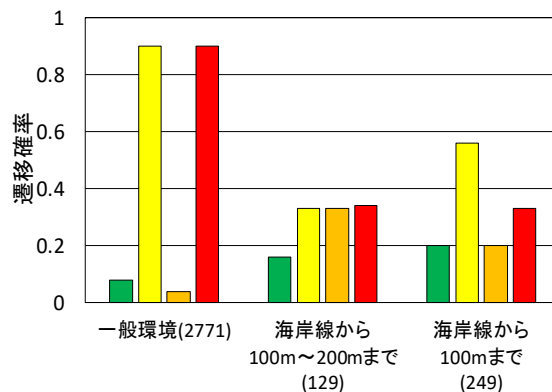








図 5.13 各劣化進行過程での遷移確率 (主構)

潜伏期～進展期の状態から損傷が顕在化し始める加速前期に着目すると、一般環境から過酷な塩害環境になるにつれて遷移確率は大きくなる傾向が確認された。また、からに、この遷移確率を用いて各環境における橋梁群の劣化進行予測結果を示す。一般環境では、塩害に比べて潜伏期が長いことはもちろんだが、腐食によるひび割れやうきが発生した状態から、次の剥離・鉄筋露出に至る期間が長いことが分かる。また、同じ塩害環境であっても、海岸線に近いより厳しい環境では特に潜伏期や進展期などの劣化初期の進行が早くなる反面、加速期中期以降においては塩害環境内での進行の差異は小さくなる傾向が認められる。

また、橋梁の寿命に関して「減価償却資産の耐用年数等に関する財務省令」等を引用して一般に50年程度といわれていることや、またはに示されるように供用100年以上が経過した橋梁が存在することなどから、この予測結果を基に、供用45年経過時、また95年経過時に着目して各環境での主構の劣化状況を示したものが, である。供用年数45年時においては、健全な橋梁は、一般環境で約70%、海岸線から100m～200mまでの環境で約50%、海岸線から100mまでの環境で約40%であることが確認され、供用年数95年時においては、健全な橋梁は、一般環境で約50%、海岸線から100m～200mまでの環境で約20%、海岸線から100mまでの環境で約10%となり、環境に応じて劣化過程の進行を評価できることが確認された。

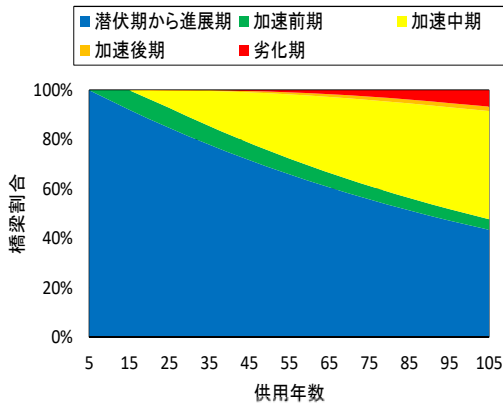


図 5.14 主構における劣化進行の予測結果 (一般環境)

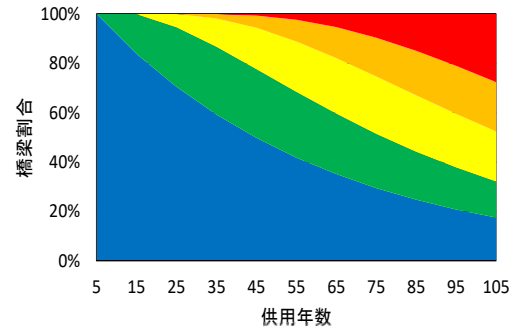


図 5.15 主構における劣化進行の予測結果 (海岸線から 100m~200m)

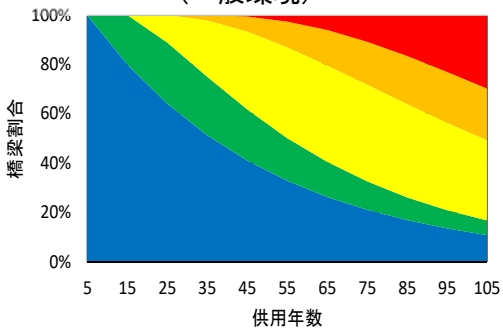


図 5.16 主構における劣化進行の予測結果 (海岸線から 100m まで)

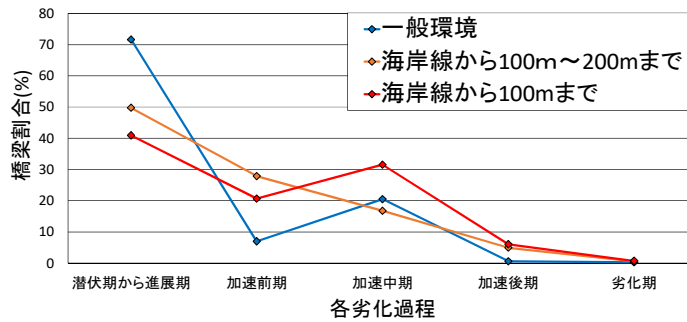


図 5.17 各環境下における供用年数 45 年時の主構での劣化進行予測

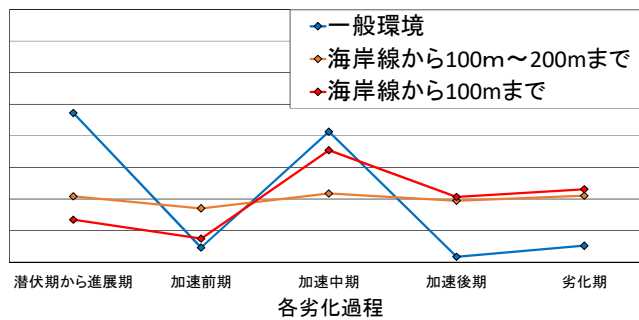


図 5.18 各環境下における供用年数 95 年時の主構での劣化進行予測

5.4 まとめ

本研究では鹿児島県内において管理されている橋梁群の維持管理データを用い、環境別および損傷別の部材の劣化進行をマルコフ連鎖モデルによって評価することを試みた。その結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 現状では2区分とされている環境区分に対し、塩害環境をさらに2分割した3区分に細分化することで、より劣化進行予測を高精度化できる可能性がある。また、このような現状に即した環境区分の設定に対しては、GISなどの新しい技術の活用が期待される。
例えば、GISを用いることで橋梁群における各橋梁の位置情報と点検時の損傷状況の可視化ができ、また、年度毎の点検の結果をレイヤに分けて記録することで進行状況を把握できる。さらに、マルコフ連鎖モデルの劣化進行予測の結果を進行状況と比較することで予測の高精度化にもつながると考える。
- (2) 各損傷の損傷等級の評価は、部材や構造物の劣化進行と必ずしも直結しないが、各損傷の損傷等級の移行時期を時系列的に組み合わせることで、各損傷の情報を総合的に評価した劣化過程の進行予測が可能となる。
- (3) 入力項目を適切に設定したマルコフ連鎖モデルを活用することで、環境別の劣化進行過程の違いを把握し、点検や補修の時期の設定など、効率的な維持管理に資する情報を得ることができる。

また、今回の検討により、橋梁点検データに関する以下の課題も改めて認識された。

- (1) 損傷種類による分類の際に、その原因が明示されていないため、進行性の有無に対する区別がなされていない。特に初期欠陥あるいは補修された欠陥に対する取り扱いではこの点に注意する必要がある。
したがって、点検の際には、損傷の有無と程度を確認すると同時に、前回との比較によって進行性の有無を評価することが重要である。
- (2) うきや剥離・鉄筋露出は、一般環境、塩害環境のいずれにおいても鉄筋の腐食に起因する場合が多く、飛来塩分などの情報に加えて、水掛かりなど水分の影響についても評価項目に入れることも有効である。

参考文献

- 1) 池守昌幸:土木計画のための確率・統計序説, 森北出版株式会社, 1985. 5
- 2) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議:インフラ長寿命化基本計画
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/
- 3) 国土交通省:道路局集計 道路構造物の現状, 2014. 4
- 4) 鹿児島県土木部:鹿児島県橋梁長寿命化修繕計画, 2014. 4
- 5) 鹿児島県土木部:橋梁定期点検マニュアル(案), 2015. 7
- 6) 国土交通省道路局:橋梁定期点検要領(案), 2014. 6
- 7) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理:全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, pp. 167-180, 2014
- 8) 国土交通省国土地理院 HP:
<http://www.gsi.go.jp/index.html>
- 9) 土木学会:2013 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2013. 10

第 6 章

実効的維持管理計画の提案

第6章 実効的維持管理計画の提案

6.1 はじめに

橋梁は、安全性や使用性などの要求性能に対して良好な状態を維持しつつ供用する必要がある。そのためには、点検、劣化機構の推定および劣化予測、性能評価、対策の要否判定を行い補修・補強を含めた適切な維持管理が必要であることは第1章、第2章で述べた通りである。

本章では、第3章、第4章および第5章において検討を行った実橋梁の飛来塩分評価手法、水掛かりと水分移動の影響評価、マルコフ連鎖モデルを用いた将来予測手法の検討における位置づけを明確にするとともに、これらを体系化することによって今後の維持管理を合理的で適切な計画ができるように提案する。

橋梁は、河川や海岸線などの野外環境下で供用される構造物であり、コンクリート構造物を長期に維持管理するためには、この野外環境から与えられる環境外力を適切に評価することが重要である。

図6.1に示す橋梁の維持管理を効率的に効果的に精度よくデミングサイクルを行うためにこれまで検証した結果を用い提案する。

点検については、効率的に精度よく損傷を把握する必要がある。精度よく損傷を把握するためにもどの部位に損傷が発生しやすいかランダムウォークによる解析結果より飛来塩分量の付着量が多い海側から2番目のG2桁に着目するなどの配慮が必要である。また、これまでの損傷より水掛り部は特に重点に点検をすることが必要である。さらに応力による損傷、ひび割れが発生する箇所は入念に点検し点検結果を記録し、下流の劣化機構の推定へつなげる必要がある。

定期点検においては5年に一度の点検を実施する必要があるが、わが国に架橋されている72.5万橋のうち約92%を占める地方自治体ではこれまでの近接目視点検ではコスト面、管理する人材面、労力や時間が不足することが考えられる。そこで、効率的な点検のあり方について提案する。

劣化機構の推定については、環境外力評価を与論島で行ったが、標高や風などの環境条件の違いにより定量的な評価ができないことが分かった。また、薄板モルタル供試体を用いこの供試体を粉碎したのちポータブル蛍光X線装置による塩分滴定にて塩化ナトリウム量を求めた。また、塩害環境下において劣化速度は海岸からの距離を始めとするメゾ環境に応じて異なることも推定する上で重要である。

さらに水分移動による透水試験の結果より、水掛かり部で局所的に水分が供給されるような場所となる桁端部や張出床版部や伸縮継手部では、水分の供給場所とその他の場所で局所的に湿度差が生じ酸素の濃淡による電位差を起電力として腐食電池が形成されマクロセル腐食を引き起こす可能性が高い、

予測および性能評価においてコンクリートの劣化は損傷種類および損傷等級により評価し、ひび割れに関してはうき幅とひび割れ間隔，うきに関しては有無，剥離・鉄筋露出に関しては剥離・鉄筋露出の有無を基準としている。

ひび割れについては，鉄筋腐食やアルカリシリカ反応のようにひび割れが時間とともに進行するものと初期欠陥のようにそれ単体では進展は見られないものもある。環境条件の違いにより塩害，中性化，凍害などを点検時におおよその環境条件より判断し推定できる原因を記録することが望ましい。

また，今回のマルコフ連鎖モデルを用いた将来予測をした結果より各損傷の損傷等級における移行時期を時系列に組合した各損傷の情報を総合的に評価した劣化進行予測が可能となる。

これらを踏まえ，実効的維持管理計画の課題を整理し提案を行う。（表 6.1）

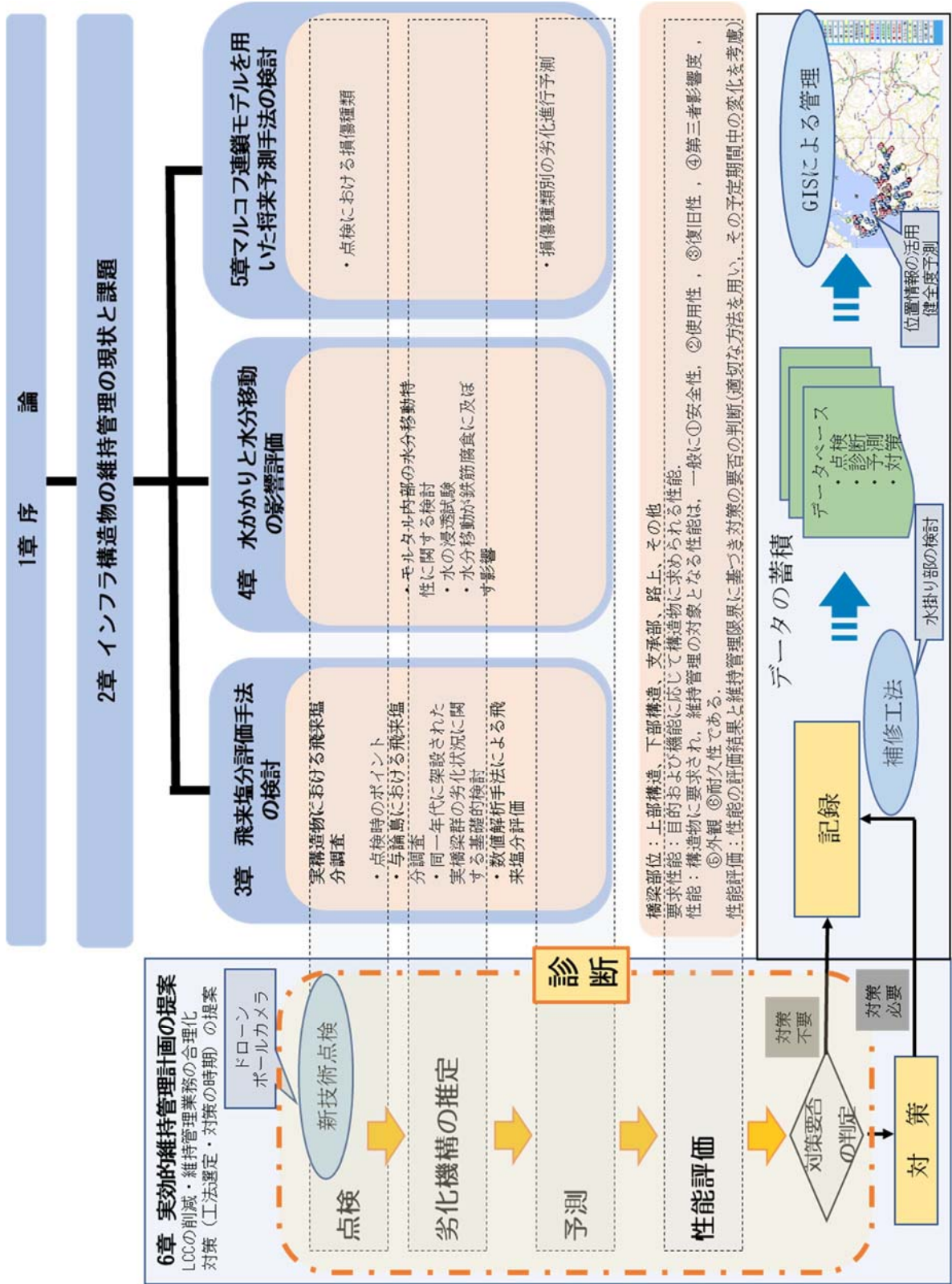


図 6.1 橋梁の維持管理計画の提案

表 6.1 橋梁の維持管理の手順および課題と解決策

既往の研究	点 検	劣化機構の推定	予 測	性能評価	対策の要否判定
	点検時の情報 竣工図書不足 点検のばらつき 人材不足 目視点検不可能箇所 点検と性能の関係	緩やかな損傷 急速な劣化	環境条件の把握 外観による劣化 要因の特定 複合劣化の予測 性能予測	劣化現象に着目し 性能評価していない 点検が主体となり 補修補強への性能 評価が曖昧	外観だけの劣化要 因特定困難 現有性能と今後の性 能予測不明 何が直ったか いつまで効果がある か 利用者の理解度
	新設の図書保存 モニタリング技術 ・ 定量評価 ・ 損傷種類による原因 調査方法の明確化 飛来塩分の推定エリ アマップ ランダムウォーク法 (第3章)	環境外力評価 (第3 章) 部位毎の環境外力評価 周辺環境評価 気象条件 水分移動特性 (第4 章) 水分移動による鉄筋 腐食 (第4章)	性能予測 マルコフ連鎖モ デルの活用 (第5 章) 予測方法や劣化 した構造物の性 能評価方法 コンクリートの 材料劣化モデル の構築 調査 飛来塩分 ガーゼ 法, コンクリー ト片による飛来 塩分量調査	健全度評価の例 ① 耐荷性: 走行荷 重(重量車両)に対 する安全性 ② 災害抵抗性: 地 震時や洪水時の荷 重に対する安全性 ③ 走行安全性: 通 常の車両の走行に 対する安全性	コンクリートの品質 試験 劣化に対する評価の 明確化 対策の要否の検証 ・ 判断基準となる維 持管理限界, 記録方 法などを具体的に設 定 対策の妥当確認 維持管理をどのよう に実施していくかと いう維持管理の基本 方針である維持管理 区分を設定する。

6.2 点検のあり方

橋梁定期点検要領(H26.3 国土交通省)により、橋梁点検を5年に1度の頻度で実施することが定められた。また、橋梁長寿命化修繕計画の中で点検時期を設定している。

しかし、現状としてこれまで事後保全による修繕を実施してきたため、各年度修繕を実施しなければならない橋梁が多くあり、また、詳細点検を実施する度に「早期措置段階」と判定される橋梁が確認されている。

これら橋梁は、主な損傷はないが橋梁点検者等が必要な場合も多く、コストおよび道路規制等を伴う。そこで、橋梁点検に係るコストの縮減、橋梁点検に係る工期の短縮、道路の利用者等の利便性を目的として、ICT (Information and Communication Technology) 技術を用いた効率的な点検による橋梁点検が必要と考えられる。

6.2.1 点検の目的

橋梁点検の目的は、図 6.3 に示す2つの目的がある。一つ目の目的は、管理する橋梁の現状を把握し、橋梁の安全性や使用性に悪影響を及ぼしている損傷を点検により早期に発見する。その結果により性能を評価し適切な措置をとる事によって、安全かつ円滑な交通を確保することにある。また、二つ目の目的は、効率的な維持管理を実施するための基礎情報を蓄積し、継続的かつ効果的な点検や計画的な補修・補強を行うことにある。

また、蓄積された点検結果を分析することにより、維持管理面からみた構造上の問題点や改善点が明らかとなることで、より耐久性の高い橋梁の施工につながる事が期待される。そのため、橋梁点検を継続的に行うことは維持管理を行う上で重要である。

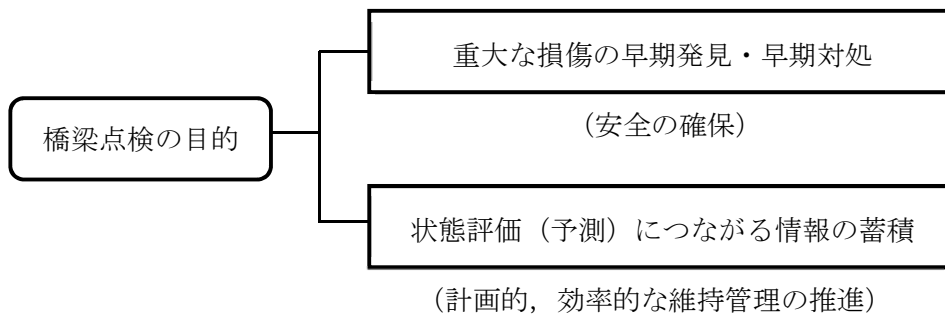


図 6.3 橋梁点検の目的

6.2.2 新工法の必要性

各定期点検で使用する主な機材は下写真のとおりである。これまでの橋梁点検では桁下高さが 5.0m 以上の場合で桁下が河川等の桁下に点検車両が入れない場合に写真 6.1 の橋梁点検車を使用する。また、写真 6.2 は桁下高さが 5.0m 以上の場合で桁下が道路や公園、駐車場等の点検車両が入れる場合に使用している。また、写真 6.3、写真 6.4 および写真 6.5 は今回提案する点検に有効な ICT 技術などを反映した機器である。ICT 技術は日々、急速な発展・進化を遂げており、常に最新の技術に注視し積極的に点検業務に取り入れていくことも有効であると考えている。



写真 6.1 橋梁点検車



写真 6.2 高所作業車



写真 6.3 無人航空機



写真 6.4 無人航空機



写真 6.5 ポール点検用カメラ

6.2.3 点検の流れ

橋梁の点検は、以下の図 6.4 に示す通り日常点検、定期点検、異常時点検に分類できるが、具体的には図 6.4 および表 6.2 に示す定期点検について説明する。

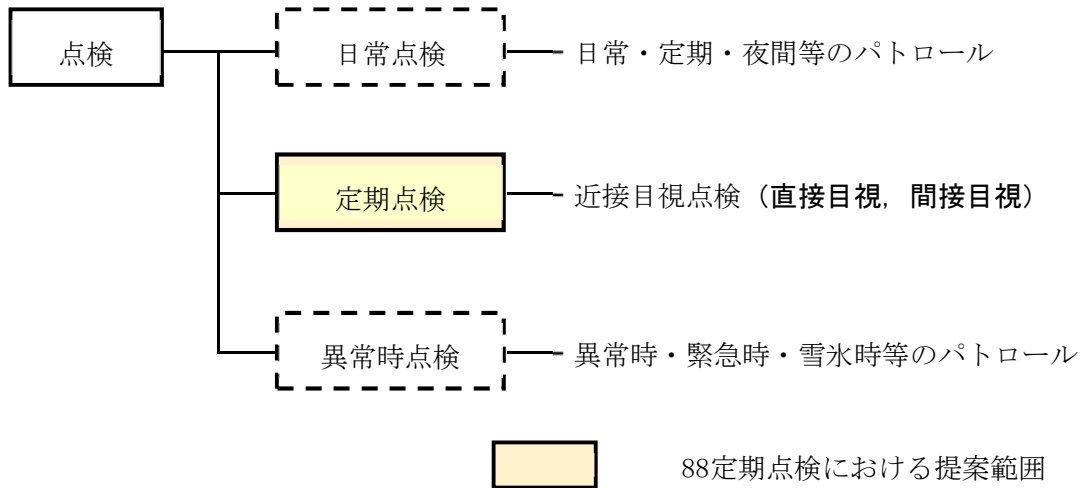


図 6.4 維持管理における点検の体系

表 6.2 点検の内容

項目	目的	頻度および時期	調査法	対象部材	
橋梁点検	日常点検	損傷の早期発見	日常的なパトロールを実施	車内より目視（もしくは徒歩）	車中から確認できる路上部材
	定期点検	橋梁全体の健全性の確認	5年に1回	近接目視（もしくは間接目視）	全径間の全材
	異常時点検	地震等発生時に橋梁の安全性を確認する	必要に応じて実施	近接目視（もしくは徒歩）	異常が確認できる部材

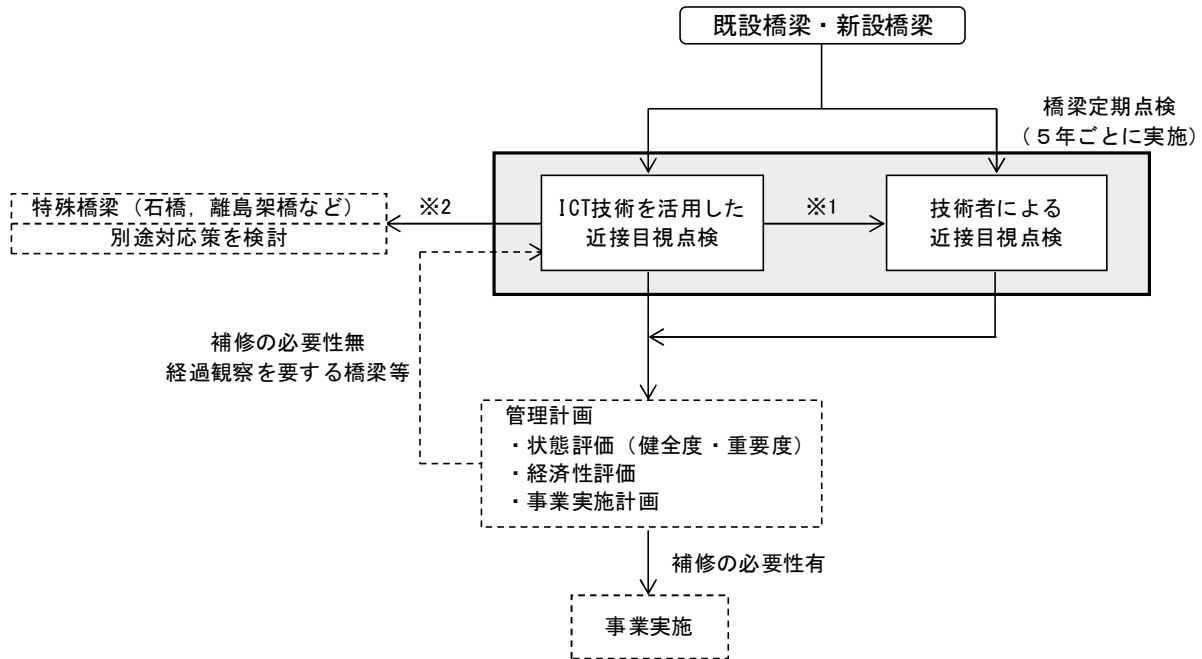
(1) 定期点検の種類

定期点検は、下記に定義する「直接目視による近接目視点検」もしくは「間接目視による近接目視点検」により提案する。

- ・直接目視による近接目視点検…対象部材に技術者が近づき、直接目視により実施する点検。
- ・間接目視による近接目視点検…ICT技術を活用し、機械や器具が対象部材に近づき、モニター等を通して、技術者が間接目視により実施する点検。

6.2.4 点検手法の考え

ICT 技術を利用し効率的な点検を実施するための定期点検を実施するための定期点検の頻度と水準を以下の点検フローに示す。(図 6.5)



- ※1. 下記に示す橋梁は、技術者による近接目視点検を検討する。
 ①長寿命化修繕計画で要対策となった橋梁
 ②過去の近接目視点検で健全度が低いもの
 ③ICT技術を活用した近接目視の結果、健全性の診断結果が「Ⅲ：早期措置段階」
 「Ⅳ：緊急措置段階」になる可能性がある橋梁
- ※2. 石橋、離島架橋、跨線橋、跨道橋などの特殊橋梁

図 6.5 定期点検の頻度と水準

定期点検を行う上で下記の条件，情報を確認し点検することが望ましい。

- (1) 定期点検は，上記のフローによることを基本とするが，損傷の発生状況や管理水準に応じて，その頻度や体系の見直しを行うことが重要である。
- (2) 健全性は，間接目視による点検ではコンクリート表面の状態を直接的に判断できないため，直近による直接目視による点検結果より判断する。
- (3) 定期点検実施の優先順位や頻度の計画にあたっては，橋梁規模，架設後の経過年数，現在の損傷の度合い，橋梁の重要度等を総合的に判断して決定する必要がある。

橋台、路上、路面など、技術者が容易に接近できる箇所については、「直接目視による近接目視点検」を実施する。また、参考として下記に示す橋梁については、劣化の進行が「進展期」～「加速期」に進行していることが推察できるため、コンクリート表面の損傷を確実に判断するために「直接目視による近接目視点検」で実施する必要がある。

以下に直接目視点検による近接目視点検のイメージ図(図 6.6)と間接目視点検による近接目視点検のイメージ図(図 6.7)を示す。

これまでの点検の基本となる直接目視点検による近接目視点検が必要となる基本的な橋梁として以下の橋梁が挙げられる。

- ・長寿命化修繕計画で要対策となった橋梁
- ・過去の近接目視点検の健全度が低いもの
- ・間接目視による近接目視点検の結果、健全性の診断結果が「Ⅲ：早期措置段階」「Ⅳ：緊急措置段階」になる可能性がある橋梁

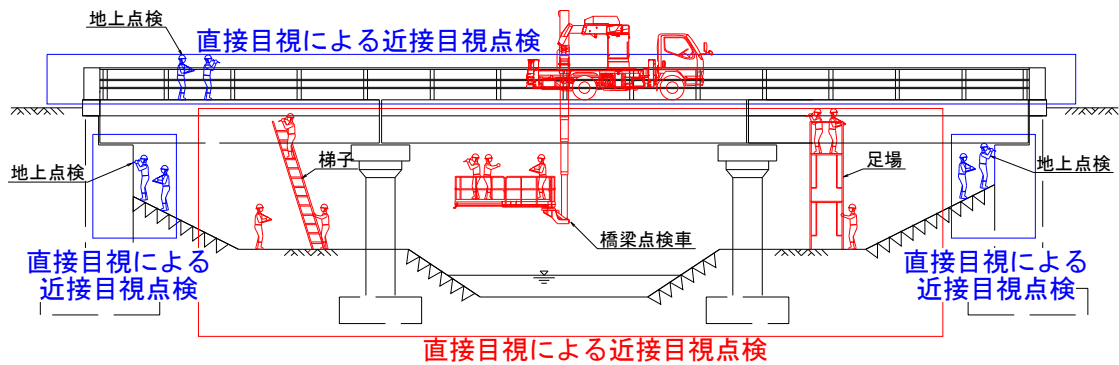


図 6.6 直接目視による近接目視点検のイメージ

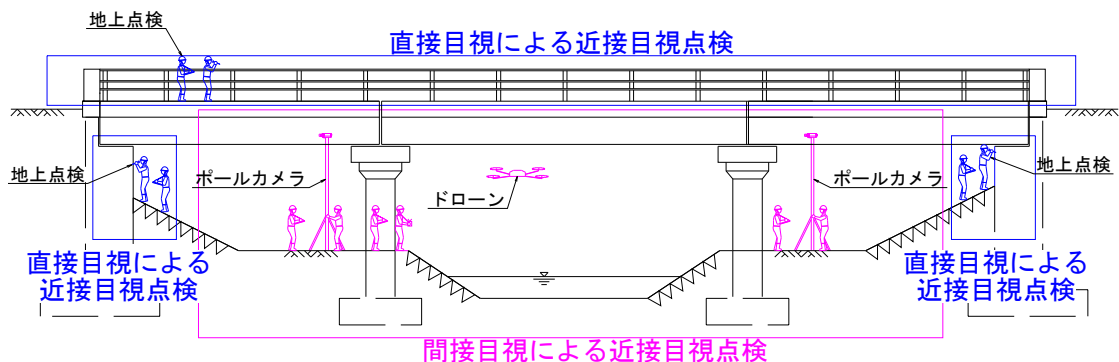


図 6.7 間接目視による近接目視点検のイメージ図

6.2.5 新工法を用いた点検実施橋梁の選定の例

ICT 技術を活用した新技術で点検を実施する橋梁を、以下の条件において選定する。

- (1) 橋梁長寿命化修繕計画【①長寿命化修繕計画】
橋梁長寿命化修繕計画における対策不要の橋梁
- (2) 点検調書作成状況【④点検調書】
【①長寿命化修繕計画】で対策不要とされる橋梁で、「道路橋定期点検要領」に基づく点検調書を未作成の橋梁
- (3) 過去の詳細点検の実施状況【⑤過去の詳細点検】
【④点検調書】で未作成とされる橋梁で、過去の詳細点検の実施していない橋梁
- (4) 特殊橋梁
特殊橋梁（石橋，跨線橋，跨道橋）以外の橋梁
- (5) 橋梁条件
「一般環境地域」かつ「PC 橋」かつ「架設年が比較的新しい」橋梁
 - ・一般環境地域…塩害環境地域の橋梁は除外
 - ・PC 橋…RC 橋，鋼橋は除外
 - ・架設年が比較的新しい…1997 年以降（架設後 20 年以内）

これらの条件を整理し点検手法の選定においては、**図 6.8** に示すとおり長寿命化修繕計画で計画された個々の橋梁の損傷程度やこれまでの点検履歴から判断する必要がある。また、基本的な点検は直接目視による近接目視が基本であることより各々の橋梁を補修対策の要否により判断し最適な点検手法を選定する必要がある。

点検対象橋梁は、効率的かつ効果的な点検を行うことが目的であるためこれまでの点検記録や対策工法の有無等が特に直接目視点検による近接目視点検と間接目視による近接目視点検の選定において重要となる。

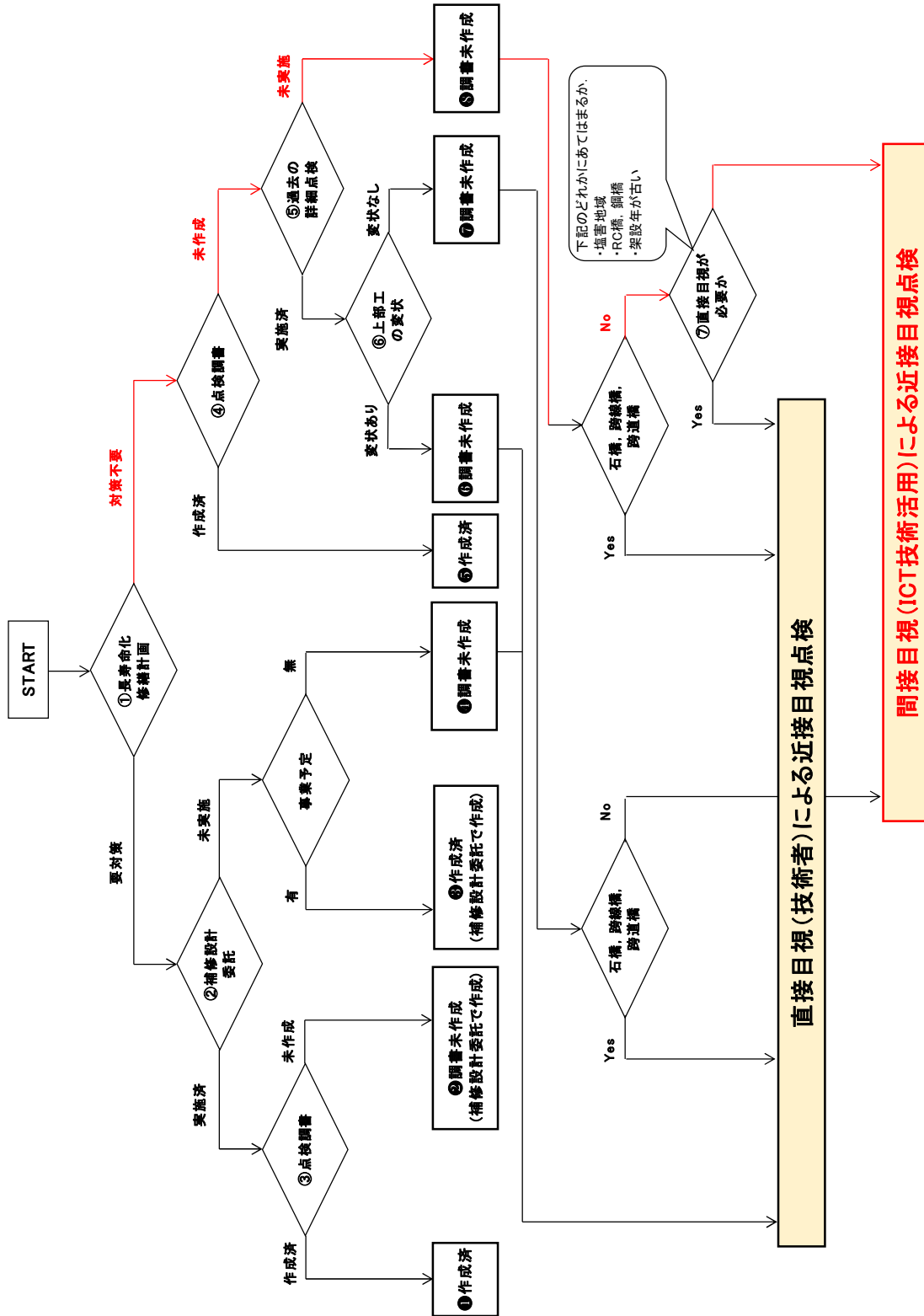


図 6.8 点検対象橋梁の選定フロー一例

6.2.6 課題と解決策（案）

本検討では、道路法施行規則に基づく定期点検をより効率的かつ効果的に実施するために、鹿児島県が管理する橋梁のうち、50 橋に対して新たな点検手法を導入し、健全性の診断について検証した。

対象橋梁の中で、桁下高が高い箇所や水深が深い箇所など、点検者が対象部材に容易に近づけない箇所については、カメラを搭載したドローンやポールにカメラを設置したポールカメラなどの新たな ICT 技術を活用し、モニターを通して、点検者が間接的に近接目視する点検を実施した。このような箇所については、点検者は対象部材に近づいておらず、間接的に近接目視を実施した。

以下に、本業務を実施した上での問題点と解決策（案）を述べる。

課題 ①：クラックスケールを使用できないため、ひびわれ幅の計測が困難である。

解決策(案)：撮影時のカメラとひびわれ箇所との距離を測定し、同じ距離でクラックスケールも撮影し、写真上でひびわれ幅を推定する。本業務では、A4 版のクラックスケールを作成し、実際に比較した。（図 6.9）

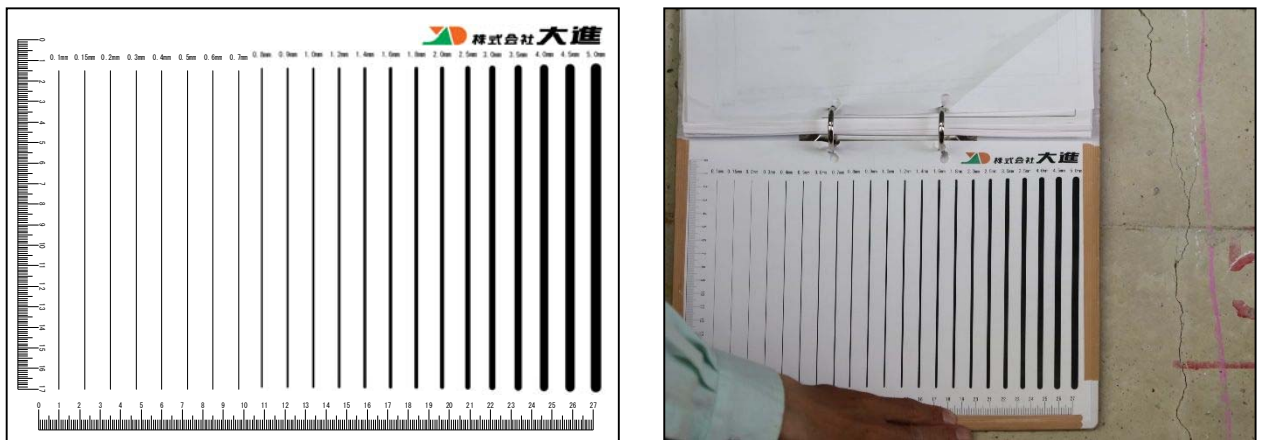


図 6.9 クラックスケール（A4 版）

課題 ②：ドローンやポールカメラが近接できない箇所については、カメラの精度によっては損傷が分かりにくい場合がある。また、チョーキングを実施していないため、写真で損傷位置が分かりにくい。

解決策(案)：近づける可能な距離に応じて、写真の解像度を上げて撮影する。チョーキングの代わりに PC 上でひびわれなどの損傷位置を図化する。以下に、カメラの精度と対象物の距離について、本業務での経験値を表記する。ただし、撮影条件や手振れの有無などによっては、一概に判断できないため、注意する必要がある。

- 300 万画素 (1920×1440) 焦点距離 25mm…対象物との距離が 1m程度であれば, PC 上でひびわれの有無が確認できる.
- 300 万画素 (1920×1440) 焦点距離 100mm…対象物との距離 3m程度であれば, PC 上でひびわれの有無が確認できる.
- 900 万画素 (4000×2250) 焦点距離 22mm…対象物との距離が 2m程度であれば, PC 上でひびわれの有無が確認できる.
- 900 万画素 (4000×2250) 焦点距離 70mm…対象物との距離 3m程度であれば, PC 上でひびわれの有無が確認できる.

解決策(案)

また, 点検の効率化として, コンクリートのひび割れを画像解析として検出する技術も開発されており, その事例を以下に示す.

近年, デジタルカメラなどのデジタル機器の開発・普及により高解像度のデジタル画像を取得でき, コンクリート表面情報をデジタル画像として撮影することでひび割れを検出・評価する技術が開発されている.

橋梁下部工のひび割れ調査への適用

(1) 調査概要

本手法をひび割れの発生している橋台の調査に適用した. **写真 6.6** に調査対象の橋梁と**図 6.10**にその調査損傷図を示す. 対象とした橋梁は, 2005年に架橋された単純PCスラブ桁橋であり, 橋長は13.0m, 幅員は13.5mである. 今回の調査対象は, A1橋台の豎壁部である.



写真 6.6 対象橋梁の外観

本調査における写真撮影については、今後の点検の効率化を考慮して、撮影対象の橋台に対してドローンおよび三脚に固定した一眼レフカメラによりそれぞれ撮影した。

ドローン撮影による方向は、点検による足場等が不要となり道路利用者である車両の通行止めや規制等が必要とならないため、今後の点検においては特に優位になると判断し、かつ、ドローンの機体はジンバルにて水平に保ち撮影できる利点も併せ持つため採用した。

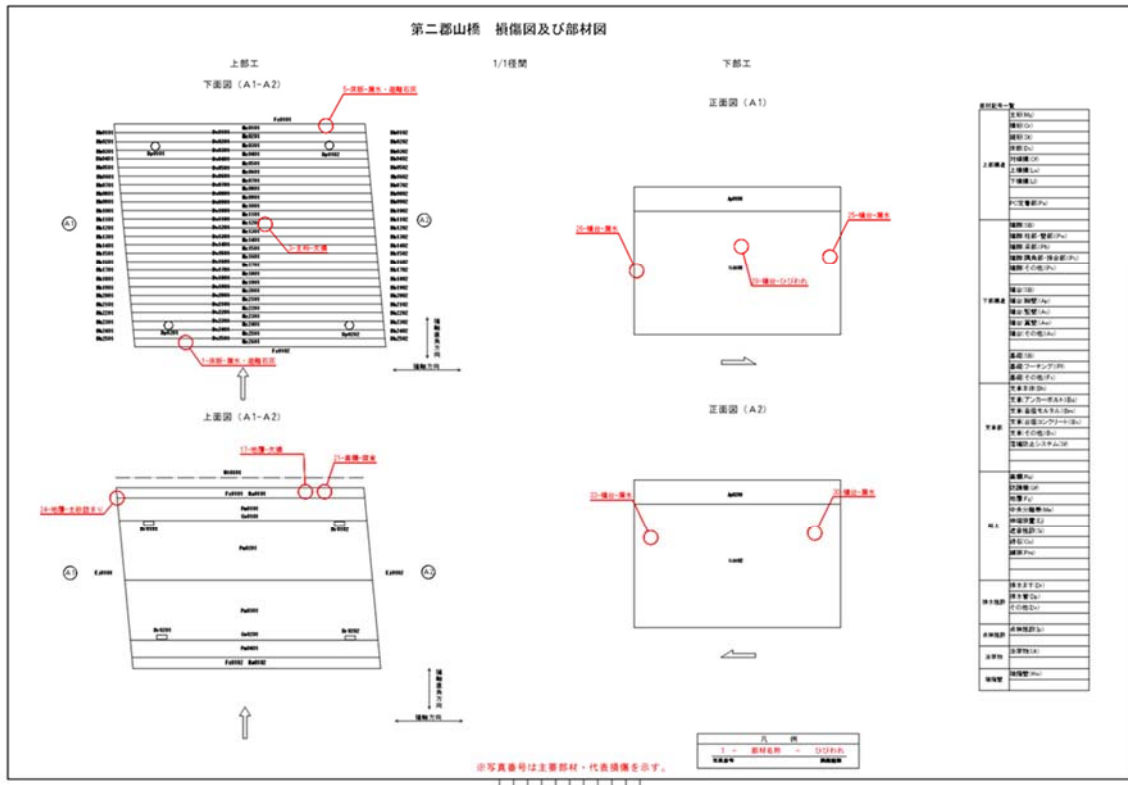


図 6.10 対象橋梁の損傷図

撮影方法については、被写体とカメラの焦点距離(写真1枚あたりの撮影の平面的な範囲)をパラメータとして撮影の分解能を設定し、被写体までの撮影距離を空間分解能 0.8mm/Pixel によりドローンは 2.6m で撮影した。また、一眼レフによる撮影も同様に空間分解能 0.8mm/Pixel とし被写体までの撮影距離を 19m に設定した。

画像解析

今回の画像解析は、ウェーブレット変換を用いた解析でひび割れ解析を行っている¹⁾。現地においてカメラで撮影した撮影画像に幾何学的な補正処理を行い、画像解析をするための入力画像を作成しこの入力画像からひび割れ検出解析やひび割れ定量解析を行い、ひび割れを定量的に評価している。

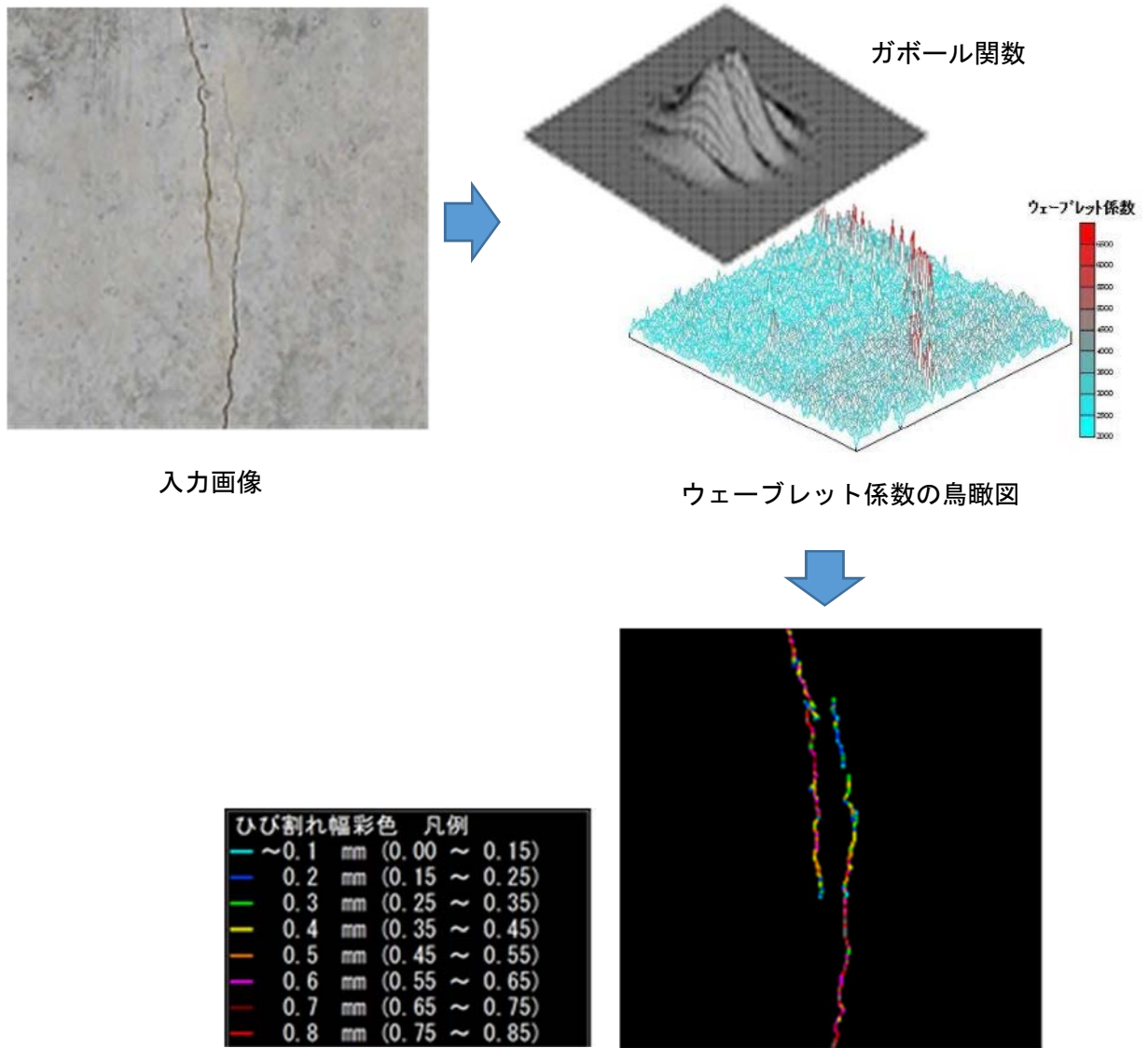


図 6.11 ひび割れ画像解析の参考図

図 6.11 は、コンクリート表面に発生しているひび割れの検出を行うために、ガボール関数を用いたウェーブレット変換を適用して得られたウェーブレット係数からひび割れ判定を行い、ひび割れの検出およびひび割れ幅を推定している鳥瞰図である。

このウェーブレット変換によりひび割れ画像およびひび割れ幅毎のひび割れ分布図を出力する。

今回対象の A1 橋台部の損傷写真を示す(写真 6.8)。橋台には、点検時のひび割れの損傷を示すが、最大ひび割れ幅で 1.2 mm を計測している。今回のひび割れ画像解析は、赤のハッチ部であり、点検時 0.3 mm および 0.4 mm を計測したひび割れになる。



写真 6.8 対象橋梁橋台の損傷写真

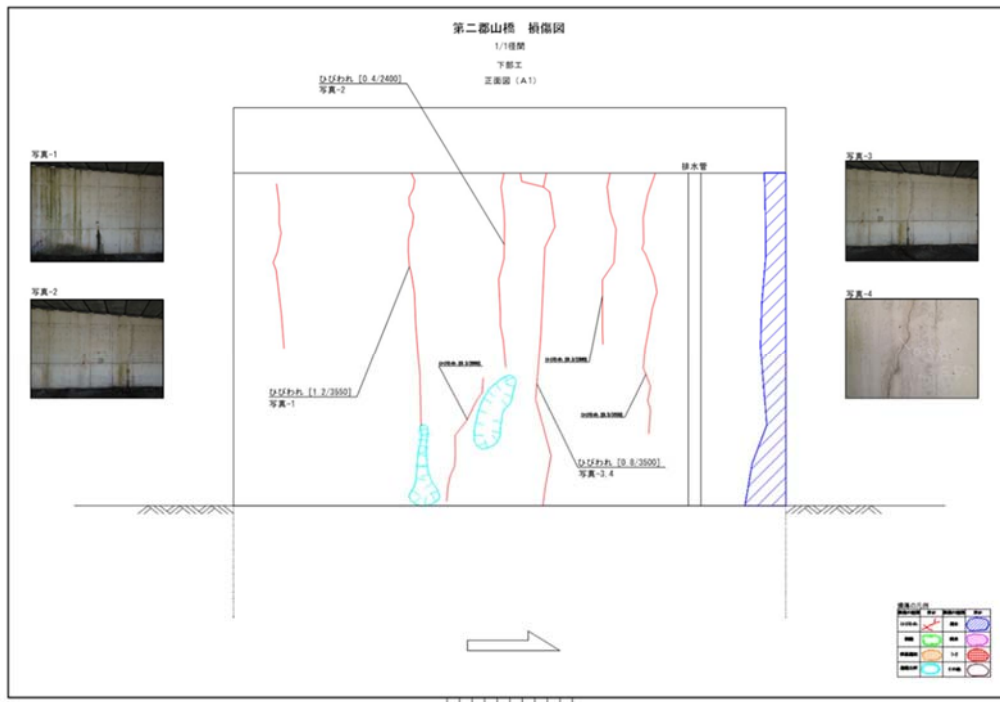


図 6.12 対象橋梁橋台のひび割れ損傷図

今後効率的な点検を行うために必要不可欠となる市販されているドローンでひび割れ解析ができるか検討した。ひび割れ判定処理するためには特に撮影画像の精度が求められるため、ドローン撮影の精度が一番の課題であった。写真 6.9 の一眼レフによる三脚撮影と写真 6.10 ドローン撮影において大きな相違はなかった。



写真 6.9 画像解析結果（一眼レフによる三脚撮影）



写真 6.10 画像解析結果（ドローン撮影）

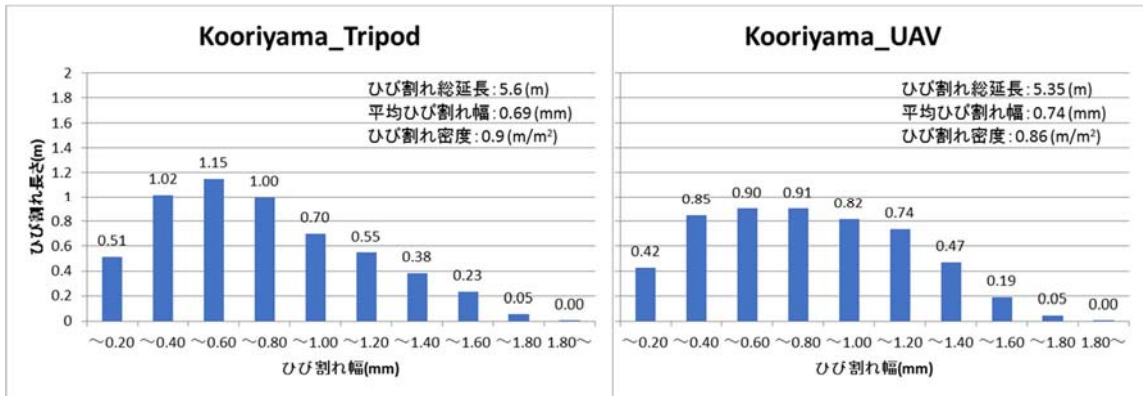


図 6.13 画像解析結果の比較（三脚およびドローン撮影）

ひび割れの解析結果(図 6.13)より三脚による平均ひび割れ幅は、0.69mm、ドローンによる平均ひび割れ幅は、0.74mm となった。三脚撮影解析では、手振れや画像の精度より 0.6 mm 程度が卓越しているが、ドローン撮影では 0.4 mm から 1.0 mm 程度とやや幅が広いことが分かる。そのため幅のばらつきがでていることよりひび割れ幅においてばらつきがでていることが分かる。そのため、そのばらつきがあることまた、その精度において誤差があることを理解したうえで利用することを考慮するとドローン撮影は複数枚の撮影による平均値の使用やクラックスケール等とのキャリブレーションを行うことで精度は高まると考えられる。

6.2.7 点検における課題と解決策（案）まとめ

- ・従来の橋梁点検員による近接目視点検では、人的力量の差によるひび割れ計測のばらつきや誤差が多く、定量的な評価が困難である。また、足場や橋梁点検車を利用した点検では、交通規制による道路利用者への不便さ、点検準備に多大な労力と費用を要しており、また、高所作業での点検になるため墜落や転倒といった危険を伴う作業となっている。
- ・ひび割れの幅や長さを客観的かつ画像解析にて高精度に把握できる利点を備えている。デジタル画像によるひび割れ解析のため橋梁点検員による人的誤差を排除し、点検の安全性も飛躍的に向上することが分かった。
- ・従来の点検による橋梁点検車や高所作業車にて近づけない場所、近接目視点検では測定できない部材にもドローンやポールカメラを使用することで近接し撮影することが可能となる。
- ・従来の点検では、ひび割れ幅を人の判断でするため取り残しや計測ミスなどの記載ミスがないことより点検ミスが少なく、より高精度で均一なひび割れの作図も可能となる。また、分析プロセスに点検技術者の判断が入ることでさらに信頼性が確保できる。
- ・今回気温が低い冬での点検であり、前回点検された時よりひび割れ幅が0.1mm～0.2mm程度広く観測できたことから経時的な変化を確認することもできることが分かった。そのため、定点観測をすることでひび割れの変化も確認できると判断できる。
- ・分析精度は解像度に影響するため事前にデジタルカメラや機器の確認が重要であり、デジタルカメラの特性を把握する必要もある。
- ・これらの技術を点検業務に活用することで、コスト縮減や工期短縮、安全確保ができ、点検や維持管理の優先度を定める指標となる情報を収集し記録することが実現可能となる。
- ・今後、これらの技術を使いこなしブラッシュアップしていくことで定量的な点検から維持管理をすることで実効的維持管理を行うことができる。

6.3 飛来塩分評価の影響について

6.3.1 マクロ環境による飛来塩分の影響

塩害環境におけるマクロ環境での評価として与論島における飛来塩分量の結果より汀線付近は、飛来塩分量は高いことが分かったが、地形の影響により飛来塩分量は単純ではないことも分かった。そのため、各橋梁の架橋位置の汀線からの距離や標高、風向きを考慮した塩害対策の設計、維持管理が必要である。

6.3.2 メゾ環境による飛来塩分の影響

塩害環境下における同一年代に架設された橋梁群の塩害劣化状況を調査した結果、劣化速度は海岸からの距離を始めとするメゾ環境に応じて異なることが分かった。

近接目視と非破壊検査機器による点検・調査の結果、メッシュに分け損傷面積率を算出することで、内部鉄筋の腐食状況を考慮した損傷の評価が行えることが示唆された。

6.3.3 ミクロ環境による飛来塩分の影響

同一構造物であっても、ミクロ環境の違いによって部位部材ごとの付着塩分量(図 6.3.1)は大きく異なる。効果的かつ効率的な維持管理のためには、部位ごとの違いを踏まえた、劣化予測、点検、補修等を行うことが重要である。

また、コンクリート構造物の設計あるいは維持管理計画策定の際にミクロ環境の影響を考慮することで、効果的かつ効率的な維持管理が可能となる。

塩害環境下における橋梁群における環境評価および点検、調査手法から飛来塩分の評価を行い塩化物イオンは海水や凍結防止剤のように外部から供給される場合、水の関与が大きいと考えられる。そこで水の関与する劣化部で多い張出床版部を模擬した供試体を作製し屋外暴露試験の結果を基に床版張出部の劣化機構について解明した。その結果より水切り部の補修について提案する。

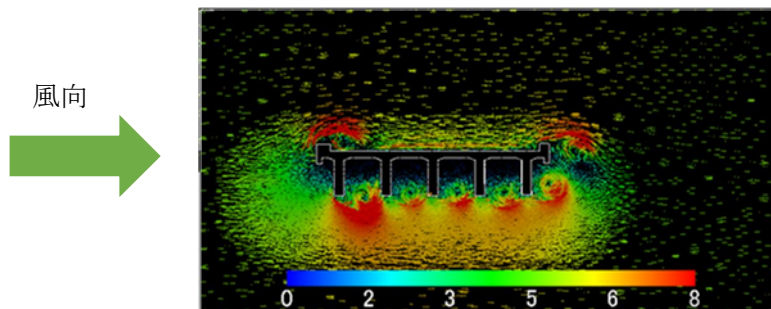


図 6.14 ランダムウォーク法によるシミュレーション

6.3.4 実橋による飛来塩分の影響

実橋における損傷を確認すると、湾から200m程度内陸部であるが常に潮風による飛来塩分の影響を受けている環境にある離島の橋梁である。橋長は22.0mのRCT桁橋である。架設年度は1980年である。(写真6.11, 写真6.12)



写真 6.11 上空からの写真 (google map より)



写真 6.12 現況写真



写真 6.13 現況写真



写真 6.14 現況写真

写真 6.11 および写真 6.12 より汀線から 200m程度に位置する橋梁であるが風が当たる桁下が塩害により損傷した事例である。十分な塩害対策を行うことが必要である。その対策として例えば、十分なかぶりをとる、エポキシ樹脂鉄筋等の使用も考えられる。

6.4 水掛かり部の対策

4章にて水掛かりと水分移動の影響評価についてモルタル内部の水分移動特性に関する検討と水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響について検討した。

この結果より橋台の橋座部の土砂や繁茂している部分は湿潤状態を保っており、そのすぐ横では乾燥した状態となっている。そのため、実験結果より湿度差よりマクロセル腐食を引き起こしやすい環境となっている。

そのため、水掛かり部では、以下のことに留意し設計から維持管理を考慮した計画が必要である。

水掛かり部の損傷に目を向けた場合に損傷としては、桁端部、橋台部の漏水および伸縮継手部から漏水により桁端部に損傷が発生している。

また、地覆下面の張り出し床版部の損傷が多くみられた。



写真 6.15 桁端部の損傷

橋台の受台(写真 6.15)においては、雨水が滞水し、また伸縮継手部からの土砂も溜まり保水効果も伴い損傷している部分も多く見受けられた。

雨水の浸入



図 6.15 桁端部の雨水の侵入

6.4.1 伸縮装置取替工

A1 橋台側と A2 橋台側の桁端遊間部と 1 期施工と 2 期施工の継目部に鋼製の伸縮装置が設置されている(写真 6.16, 写真 6.17).

現況調査より, 橋座及び 1 期施工と 2 期施工の橋軸方向継目部の張出床版付近に漏水跡が見られ, 伸縮装置及び地覆目地材の経年劣化により止水機能が低下しているため, 伸縮装置の取換えと目地材の補修を計画する。(写真 6.18~6.21)

表 6.4.1 伸縮装置の補修

対象箇所		損傷	工法	使用材料
伸縮装置	桁端部遊間 (A1 橋台・A2 橋台)	止水機能の低下 (橋座に漏水あり)	伸縮装置取換え	鋼製(既設と同等品)
	1 期施工と 2 期 施工の継目部	伸縮装置のゴム部分の劣化 止水機能の低下(床版に漏水あり)		
地覆	桁端部遊間 (A1 橋台・A2 橋台)	目地材の劣化に伴う止水機能 の低下	止水工	シール材



写真 6.16 橋軸直角方向伸縮装置(終点側)



写真 6.17 橋軸方向伸縮装置(1期施工と2期施工の継目部)



写真 6.18 漏水跡(端部横桁)



写真 6.19 伸縮装置劣化状況(1期施工と2期施工の継目部)



写真 6.20 地覆目地材(1期施工)



写真 6.21 地覆目地材(2期施工)

6.4.2 張出床版部および中間床版部の補修

・水切り部が無い橋梁に関しては、雨水が張出床版、中間床版および主桁まで到達、張出床版部及び主桁の損傷発生に影響する。(図 6.16)

・写真 6.22 に示すとおり雨水が達している箇所には損傷が多く発生している事が分かる。よって、雨水が路面を浸透し損傷が発生するよりも地覆部から雨水がまわり込み損傷を発生させることが分かる。

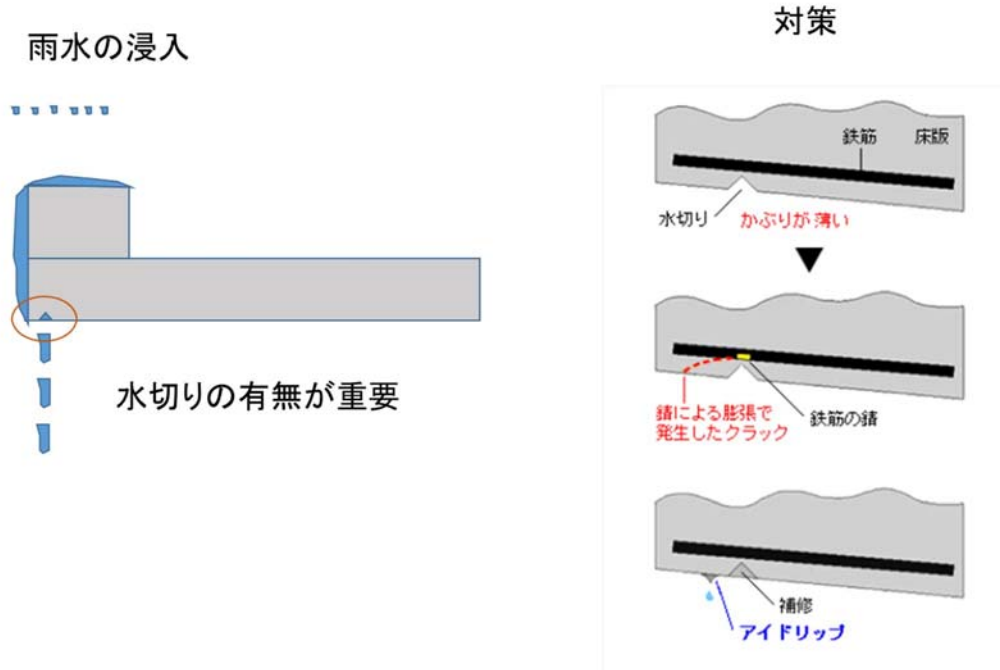


図 6.16 水切り部の構造

点検においては、水掛かり部を確認して効率的な点検をすることが望ましいと考える。

RCT桁橋



RCT桁橋



昭和60年3月架設



写真 6.22 雨水の侵入による損傷

6.4.3 水切設置工

橋梁においては、張出床版には水切り溝が確認できる場合でも、水切りのVカットが小さいため機能していない箇所もあり部分的に床版側へ水がまわり込んでいる場合もある。さらに、水がまわりこみ剥離・鉄筋露出やうきに進展している箇所も現場で確認できる(写真6.23)。

劣化因子の一つである水分の遮断は、構造物を健全に維持するための重要な対策であるため、張出床版下面には水を切る確実な構造となる水切り材を設置する必要がある。

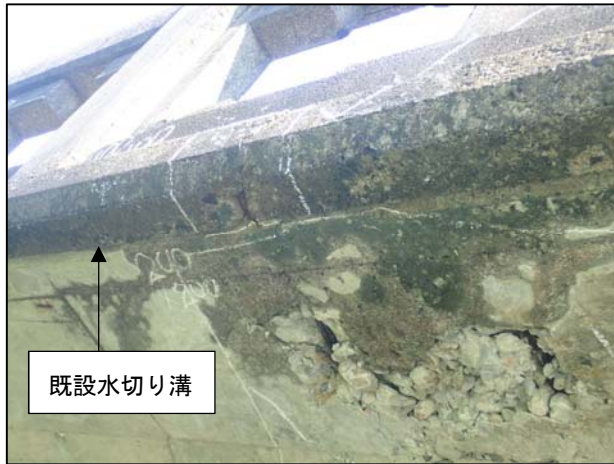


写真 6.23 張出床版の漏水

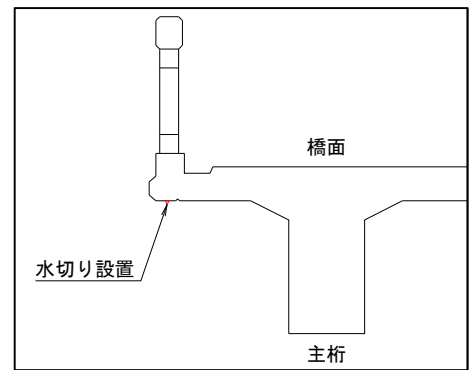



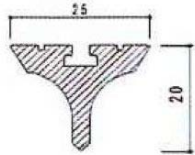

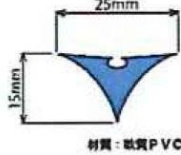
図 6.24 水切設置工

水切り材としては面木も考えられるが、提案する設計では施工性に優位となる次の 2 つの材料を選定し、提案する。

- ・第 1 案：EPDM スポンジ
- ・第 2 案：軟質 PVC

水切り材の参考を表 6.3 に示す。

表 6.3 水切り材の参考

	1) EPDM スポンジタイプ	2) 軟質 PVC タイプ
外 観 構 造	<p>【外観】</p>  <p>【断面形状】</p> 	<p>【外観】</p>  <p>【断面形状】</p>  <p>材質：軟質PVC</p>
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ・後付けなので、鉄筋のかぶりが確保される。 ・素材の柔軟性により、表面の凹凸に対応。 ・低温時でも硬くならない材質を採用。 ・材質が軽量で柔らかく、万が一落下した場合でも第三者被害が少ない。 ・独自の形状により水切り効果が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・後付けなので、鉄筋のかぶりが確保される。 ・素材の柔軟性により、表面の凹凸に対応。 ・耐候性のある材質を採用。 ・素材の柔軟性により、万が一落下した場合でも第三者被害が少ない。 ・側面のカーブにより水切り効果が大きい。

水掛かり部は、ドライなコンクリートと比べコンクリート内部の水分移動によって、塩害、中性化、アルカリシリカ反応などコンクリート構造物の劣化の発生に大きな影響を与えることが実験的検証で分かった。また、実橋においてもどのように水掛かり部の損傷は確認できている。

そこで、点検時には特に水掛かり部を着目した点検を行い、補修設計を行う場合にも同様に留意する必要がある。

また、今回の実験により表面から 5cm 深さ程度の水分移動は確認できているため、新設時から十分なかぶり確保と水を切る構造にすることで維持管理の容易な橋梁ができると考えている。

今後は、水掛かり部の対策を取り入れた実験も必要であり、表面含浸材や水切りを考慮した提案も必要と考えている。

6.5 劣化進行予測の提案

本研究では鹿児島県内において管理されている橋梁群の維持管理データを用い、環境別および損傷別の部材の劣化進行をマルコフ連鎖モデルによって評価することを試みた。その結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 現状では2区分とされている環境区分に対し、塩害環境をさらに2分割した3区分に細分化することで、より劣化進行予測を高精度化できる可能性がある。また、このような現状に即した環境区分の設定に対しては、GISなどの新しい技術の活用が期待される。例えば、GISを用いることで橋梁群における各橋梁の位置情報と点検時の損傷状況の可視化ができ、また、年度毎の点検の結果をレイヤに分けて記録することで進行状況を把握できる。さらに、マルコフ連鎖モデルの劣化進行予測の結果を進行状況と比較することで予測の高精度化にもつながると考える。
- (2) 各損傷の損傷等級の評価は、部材や構造物の劣化進行と必ずしも直結しないが、各損傷の損傷等級の移行時期を時系列的に組み合わせることで、各損傷の情報を総合的に評価した劣化過程の進行予測が可能となる。
- (3) 入力項目を適切に設定したマルコフ連鎖モデルを活用することで、環境別の劣化進行過程の違いを把握し、点検や補修の時期の設定など、効率的な維持管理に資する情報を得ることができる。

また、今回の検討により、橋梁点検データに関する以下の課題も改めて認識された。

- (1) 損傷種類による分類の際に、その原因が明示されていないため、進行性の有無に対する区別がなされていない。特に初期欠陥あるいは補修された欠陥に対する取り扱いではこの点に注意する必要がある。
したがって、点検の際には、損傷の有無と程度を確認すると同時に、前回との比較によって進行性の有無を評価することが重要である。
- (2) うきや剥離・鉄筋露出は、一般環境、塩害環境のいずれにおいても鉄筋の腐食に起因する場合が多く、飛来塩分などの情報に加えて、水掛かりなど水分の影響についても評価項目に入れることも有効である。

6.6 水掛かり部における維持管理

水掛かり部は、ドライなコンクリートと比べコンクリート内部の水分移動によって、塩害、中性化、アルカリシリカ反応などコンクリート構造物の劣化の発生に大きな影響を与えることが実験的検証で分かった。また、実橋においてもどのように水掛かり部の損傷は確認できている。

そこで、点検時には特に水掛かり部を着目した点検を行い、補修設計を行う場合にも同様に留意する必要がある。

また、今回の実験により表面から5cm深さ程度の水分移動は確認できているため、新設時から十分なかぶり確保と水を切る構造にすることで維持管理の容易な橋梁ができると考えている。

今後は、水掛かり部の対策を取り入れた実験も必要であり、表面含浸材や水切りを考慮した提案も必要と考えている。

6.7 地理情報システムを用いた維持管理

地理情報システム(GIS:Geographic Information System)は、位置や空間等に関する様々な情報をコンピュータにより総合的に管理し、必要な情報を視覚的に表示でき、位置情報と維持管理データを統合し、高度な分析や迅速な判断を可能にするシステムである。^{2) 3)}

図 6.25 は、災害対策における GIS を利用した例である。レイヤ化された 1 枚 1 枚が特定のデータを持ち、防災施設の分布や、被災して自動車通行不能箇所等の複数のレイヤにより階層化して、位置情報をキーとして重ね合わせていくことで、それぞれの情報の関連性が可視化できます。この結果から、総合的な災害対策を講じることが可能となる事が分かる。

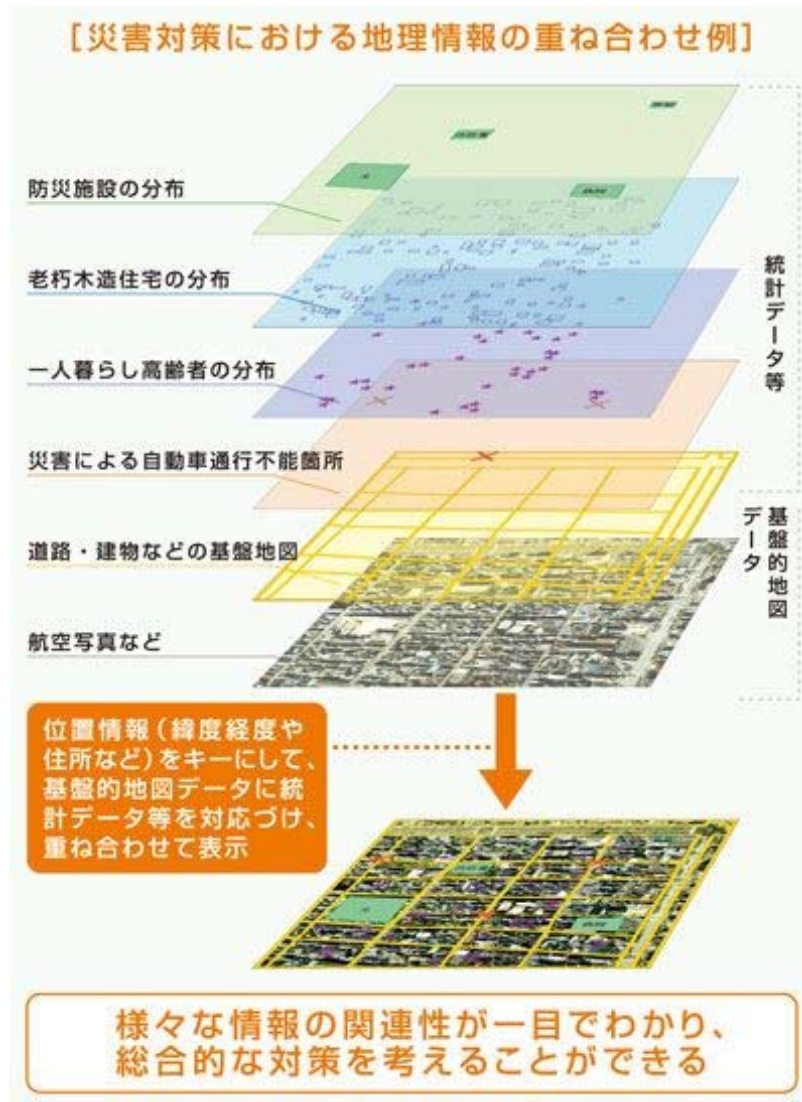


図 6.25 国土交通省政策局作成
「GIS 地図情報システム」パンフレットより⁴⁾

http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000041.html

地理情報システム(GIS:Geographic Information System)は、位置や空間等に関する様々な情報をコンピュータにより総合的に管理し、必要な情報を視覚的に表示でき、位置情報と維持管理データを統合し、高度な分析や迅速な判断を可能にするシステムである。

図 6. 25 は、災害対策における GIS を利用した例である。レイヤ化された 1 枚 1 枚が特定のデータを持ち、防災施設の分布や、被災して自動車通行不能箇所等の複数のレイヤにより階層化して、位置情報をキーとして重ね合わせていくことで、それぞれの情報の関連性が可視化できる。この結果から、総合的な災害対策を講じることが可能となることが分かる。

このシステムでは、災害対策の一例であるが、このシステムを利用し、地形図や管理地図などの基盤となる地図データや測量した地形データ、空撮による地形地図等を基盤地図として、その空間にある社会インフラ（路線図、構造物、橋梁、上下水道、電気、ガス）を図化することで維持管理技術の運用に効果があることも注目されている。

今回、このような GIS の現状を把握し、維持管理の在り方について検討計画するものである。

これまでの多くの社会インフラは、その構造物単体の情報（図面、写真、管理台帳）でのみ管理され、どこにその構造物があるかは、地図によりまた現地での確認となっていた。しかし、このシステムを利用し必要な情報を重ねることでこれまで以上に管理が容易になることが分かる。

図 6. 25 で分かるように GIS は、空間情報を地図によって表現するため、位置と情報を可視化することが可能である。特に各構造物を各レイヤ単位で管理し、必要な複数のデータをレイヤ単位で重ね合わすことで管理者、利用者の用途に応じた情報の可視化地図として表現、表示することが可能である。

維持管理において GIS を用いた維持管理基盤データの構築により情報の見える化と位置情報の見える化よりこれまで気づけなかったことも見えると考えている。例えば、近隣の構造物の損傷状況を確認できることで対策が判断できることもある。

GIS を用いた維持管理基盤データシステムについては、これまで定期点検で作成したデータと位置情報をリンクしたシステムを構築する。

維持管理における GIS のイメージ図(図 6.26)のとおり、位置情報と維持管理データを共有することでそれぞれのデータがイメージしやすくなりまた位置情報と点検結果や損傷状態を見える化できることで実効的維持管理が可能になると考える。

点検データの記録



GIS を利用した記録システム

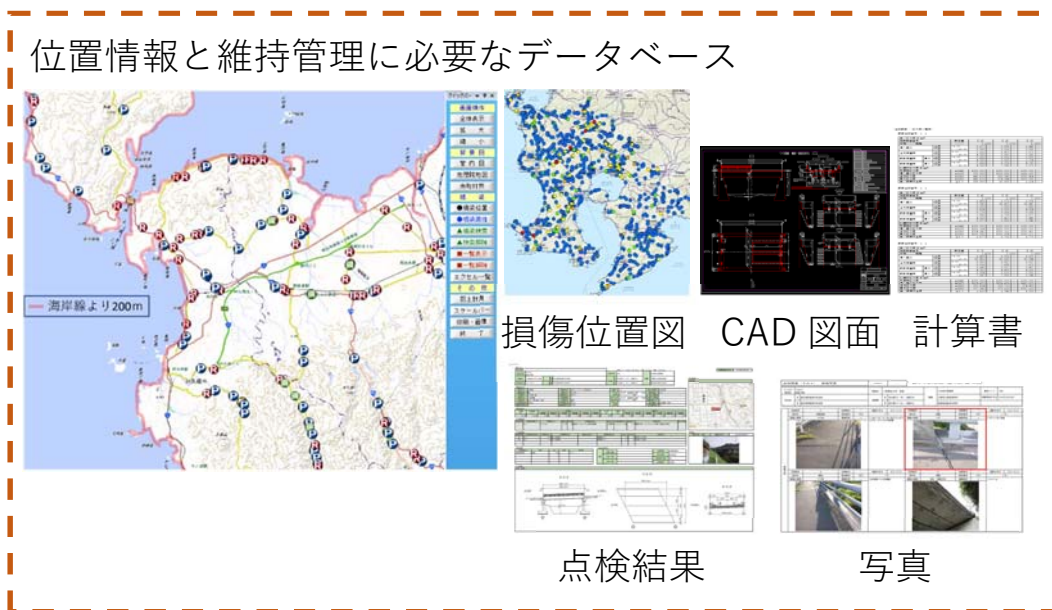


図 6.26 GIS を用いた橋梁の位置および維持管理データの共有イメージ

維持管理を行ううえで重要な管理および記録のシステムのイメージ図を図 6.27 に示す。維持管理においては、個々の橋梁に必要な諸元を記録し、橋梁点検結果を記録する必要がある。点検した結果による損傷を診断し劣化機構の推定を行い、最適な補修を行うが、その劣化機構を推定するためには、当初の設計図書や施工記録等の報告書の有無が重要となる。損傷を推定するためにはこの報告書等が重要であり、かつ、その橋梁の架設されている環境条件や利用条件等から推定する必要があるためこの2つの位置情報と橋梁の諸元や点検記録、補修履歴等の情報は特に重要となる。

また、ガーゼ法や薄型モルタル供試体を用い環境条件をマッピングすることで架設された実橋梁における環境条件を把握、評価することができるため維持管理を行ううえで重要な情報となる。

GIS を用いて架橋位置または、現地でのガーゼ法や薄型モルタル供試体による計測結果や気象観測をデータベース化し、塩害環境における腐食環境評価のマップも併用する。それにより、実構造物である橋梁の損傷と実際の飛来塩分量を対比することで橋梁の延命化を行うことができる。

作成した腐食環境評価のマップと維持管理工事の完了図書を GIS のデータベースに入れることで管理がしやすくまた、管理する場合のデータの引継ぎもしやすくなるためこれまでより効率的な維持管理が行えると考えている。



図 6.27 管理・記録のイメージ

参考文献

- 1) 小山 哲・丸屋 剛・堀口 賢一・澤 健男:ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)Vol. 68, No3, 178-194, 2012.
- 2) 福島 芳和: 地図情報と GIS
情報地質 第 8 巻 第 2 号 93-98 頁, 1997 年 Geoinformatics, vol. 8, No. 2, pp. 93-98, 1997
- 3) 西宮 宜昭・讃井 一将・溝田 祐造: 道路・橋梁維持管理技術協力の現状と課題, 土木学会論文集 F5(土木技術者実践)Vo67. No1, 78-90, 2011.
- 4) 「GIS 地図情報システム」パンフレットより
http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000041.html

第 7 章

結 論

第7章 結論

7.1 本研究の総括

本研究では、塩害環境下における橋梁群の実効的維持管理計画に関する研究として、飛来塩分と水掛り部に着目して実験的な検討を行うとともに、環沿岸環境下における、飛来塩分評価手法の提案のために奄美大島におけるメゾ環境の違いに起因する橋梁群の劣化状況調査結果を実施し、与論島における島内全域の飛来塩分量分布の調査を行い環境の違いによる各構造物を検証した。また、塩化物イオンについて数値解析と実構造物との相関があることも確認した。

これらを踏まえ塩害環境下における橋梁群の実効的維持管理計画についての検討し、今後架け替え時期を迎える橋梁群の延命化できるように維持管理計画を提案することを目的とした。

本章では、各章での検討内容と得られた成果、課題を総括し、本論文の結論結論とする。

「**第1章 序論**」では、わが国の橋梁の現状、維持管理について示した。そして、本論文の背景および目的を明確にし、論文の構成を示した。

「**第2章 インフラ構造物の維持管理の現状と課題**」では、現在わが国で管理されている橋梁は70万橋をこえると膨大なストックがありそのうちの大半を管理する地方公共団体は、66万橋の90%以上を維持管理していく必要がある。また、その中でも建設後50年を経過した橋梁の割合は、現在は約25%であるのに対して高度経済成長期に大量の橋梁を架設しているため、今後10年後には50%に急増する。これらを踏まえ課題点などを抽出した。

「**第3章 飛来塩分評価手法の検討**」では、飛来塩分は風向と塩分が飛来する方向は相関がみられ、飛来塩分量も大きくなる。また、同一年代に架設された橋梁群の塩害劣化状況を調査した結果、劣化速度は海岸からの距離を始めとするメゾ環境に応じて異なることが分かった。ガーゼ拭き取り法や蛍光X線装置で粉末状態の試料にして飛来塩分を測定した結果、両者の結果は非常によく一致するが、表面付近ではばらつきが生じた。これは表面付近の骨材の影響等で大きなばらつきが生じていることが分かった。

また、数値解析手法を用いた橋梁部位別の付着塩分量予測とその検証結果を基に、実環境および実構造物における環境外力の評価手法について検討し、今後の提案に繋げた。

「**第4章 水掛かりと水分移動の影響評価**」では、モルタル内部の相対湿度と電気抵抗率の関係式を用いることで、モルタル中の水分移動を三次元で把握することができた。

その結果水掛かり部におけるモルタル中の水分分布を評価できることがわかった。また水掛かり部では局所的な場所に30%程度の湿度差が生じていることがわかった。

この環境差によってマクロセル腐食を引き起こす可能性があると考えられる。

水分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響を、屋外曝露試験により検討した。その結果、水掛かり部において鉄筋の自然電位が腐食判定値である -350mV vs CSE より卑な値を示した。このことから水掛かり部では短時間で明確に水分の影響があることがわかった。また水掛かり部と健全部で大きな電位差が生じており、水掛かり部をアノード、健全部をカソードとしてマクロセル腐食を引き起こす可能性が高く、水掛かり部は極めて激しい腐食環境である。

「第5章 マルコフ連鎖モデルを用いた将来予測手法の検討」では、現状では2区分とされている環境区分に対し、塩害環境をさらに2分割した3区分に細分化することで、より劣化進行予測を高精度化できる可能性がある。また、このような現状に即した環境区分の設定に対しては、GISなどの新しい技術の活用が期待される。

各損傷の損傷等級の移行時期を時系列的に組み合わせることで、各損傷の情報を総合的に評価した劣化過程の進行予測が可能となる。また、橋梁群の効率的な維持管理を行うための手法としてマルコフ連鎖モデルに着目し、点検によって得られた損傷の分類方法、劣化プロセスを踏まえた劣化ステージの設定方法、各ステージ間の遷移確率の算出方法、さらに橋梁群の健全度に対する長期予測手法等について検討し、今後の維持管理への提案に繋げた。

「第6章 実効的な維持管理手法の提案」では、実効的な維持管理を行うためには、これまでの点検、劣化機構の推定、予測、性能評価を確実にを行い、その性能評価に対して対策の可否を判断し対策を確実に行う必要がある。点検の着目点は外力による損傷も確実にみる必要があるが、水掛かり部も入念に点検する必要がある。点検の効率化を今後図り、効率的で効果的な維持管理手法を提案する必要がある。

また、前章までの検討結果を維持管理計画に導入するため方法に加え、環境外力評価を踏まえて工法選定を行う「対策」、CITやGISなどの新技術を活用したスパイラルアップ可能な「記録」等を含む、維持管理の技術向上と効率化の具体的な方策を検討するとともに、実効的な維持管理計画の立案手法の提案を行った。

「第7章 結論」は、本章であり、各章で得られた内容を取りまとめるとともに、実効的維持管理を今後進めるうえでの提案を行い、結論とした。

謝 辞

本論文は、(主査) 山口明伸教授、(副査) 武若耕司教授、(副査) 審良善和准教授、(副査) 木村至伸准教授のご指導のもと鹿児島大学大学院理工学研究科物質生産科学専攻建設システム工学講座コンクリート研究室および株式会社大進橋梁構造部在籍時に実施した研究成果を取りまとめたものであります。本論文の作成など本研究の遂行に際しまして、ここに深く感謝致します。

本論文の主旨導教員として、終始暖かいご指導とご鞭撻を賜りました鹿児島大学大学院 教授山口明伸先生には深甚なる感謝の意を表します。

先生とは、2002年の「コンクリート構造物の劣化診断技術の開発と応用に関する研究会(診断技術研究会)」以来、意見交換させて頂き熱心にご指導いただきました。また、2013年の診断技術研究会の懇親会にて今後の土木技術者のあり方についてお話させていただいた時、博士課程への入学を最初に進めていただき、こうして社会人ドクターへチャレンジすることができたのも山口先生のお陰です。また、日常の業務では疎遠でありましたミーティングやゼミ、学会発表などへの参加などのさまざまな学びの機会を与えていただき誠にありがとうございました。研究においても私の力量不足から大変なご負担をかけてしまいましたが、ようやく博士後期課程の学位論文の執筆に至ることができたのは山口先生からの暖かいお言葉や励ましがあったからです。また、私が研究に関して質問、構成を相談した際も細部まで説明していただいたご指導の賜物です。先生からいただきましたお言葉をこころに留めて今後の業務に精進していきたいと思えます。

改めましてこころより御礼を申し上げますと共に、今後も土木のあり方、コンクリート構造物の維持管理等幅広くご相談させていただくことも多いと思えますが、ご指導とご鞭撻を何卒宜しくお願い致します。

鹿児島大学大学院 教授 武若耕司先生には、本論文の副査として、学位論文としての終着点や本研究の維持管理のあり方、今後の展望など本当に多くのアドバイスを頂きました。研究者としての現場における視点や必要な心構え、姿勢など多くの提言をいただきました。今後は設計の段階からコンクリートの長寿命化や維持管理を意識した配慮ある設計をするようにしていきたいです。また、武若先生の研究に対しての情熱、モチベーションの高さを日々肌もって感じることもできたのも私の財産になりました。今後ともコンクリートの維持管理についてご相談させて頂くことも多いと思えますが、ご指導とご鞭撻を何卒宜しくお願い致します。

鹿児島大学大学院 准教授 審良善和先生には、本論文の副査として、本研究の方向性等親身にご相談にのっていただき、行き詰ったときの解決の糸口をいただきました。また、本当にご多忙な折に

も関わらず夜遅くまで親身にご指導していただきました。審良先生のこの的確なアドバイス、ご助言がなければ本論文は完成しなかったと言っても過言ではありません。本当にありがとうございました。今後とも補修・補強や維持管理分野において幅広くご相談させていただくと思いますが、その際もどうぞよろしくお願い致します。

鹿児島大学大学院 准教授 木村至伸先生には、本論文の副査として、主に幅広い視点でのご助言、博士論文のあり方、研究の進め方に関してご助言いただきました。特に専攻ゼミでは、的確かつ重要な指摘を受け、研究の進め方や論文の作成に大変勉強になりました。本当にありがとうございました。今後は、設計における耐震設計等でのご相談等させていただくことも多いと思いますが、指導とご鞭撻を何卒宜しくお願い致します。

鹿児島大学大学院 助教 小池賢太郎先生には、博士課程入学した際博士後期課程2年生でした。入学後は、大学の先輩として大学の進め方や実験装置の使い方等教えていただきました。また、水掛かりに関しての実験や論文等について幅広く教えていただき、その後、助教になられてからは、研究に関するご助言も多くいただきました。本当にありがとうございました。今後ともコンクリートの材料や維持管理についてご相談させて頂くことも多いと思いますが、ご指導とご鞭撻を何卒宜しくお願い致します。

鹿児島大学工学部 前村政博技術専門職員には、実験器具の発注や検品から学生へご説明等大変にお世話になりました。器具の使用方法や時には一緒に作業をしてもらい、非常に心強かったです。退職されましたが、今後もお元気で過ごしてください。ここに感謝の意を表します。

住友大阪セメント株式会社 山本誠氏には、博士課程入学した際博士後期課程3年生であり、またJCI九州支部 研究専門委員会の「乾式吹付け工法における施工性と品質の評価手法検討委員会」でも乾式吹付け工法における委員会ではコンクリート吹付の実験や議論をさせていただき、食事でも何度も行く機会があり社会人ドクターの先輩として沢山のご助言も頂きました。

本当にありがとうございました。ここに感謝の意を表します。

琉球大学 准教授 富山潤 先生には、飛来塩分における考えや貴重なご意見などいただき、また、シミュレーション等についても快くご説明いただきました。今後の構造物の維持管理における劣化予測を行ううえで大変重要となると感じております。今後ともよろしくお願い致します。

また、ここに感謝の意を表します。

五洋建設株式会社 佐藤健志氏は、博士課程入学した際博士前期課程1年生だった佐藤氏は、私と一緒に橋梁の長寿命化について協議し、各橋梁の損傷について勉強してくれました。橋梁点検の結果からデータベースをつくりそのデータの損傷および評価のしかたを議論したことが今でも忘れません。

また、水掛かり部を模擬した供試体を悪戦苦闘しながらつくり、データを取ってくれました。コンクリートの水掛かり部の損傷が多いことを説明しながら、この損傷を実験で検証するためにモルタル供試体における水分移動を直接評価することを考え、相対湿度と電気抵抗率の関係について実験しました。

博士前期課程での2年間本当にありがとうございました。また、現在社会人として頑張っているすがたをみてたいへんうれしいです。今後も宜しくお願い致します。

宮崎河川国道事務所 前田圭氏は、博士前期課程の2年間維持管理について勉強しました。

橋梁の点検のやり方や記録についてもいっしょに現場で行い、実験もいっしょに夜遅くまで頑張ってくれました。頼もしい後輩でした。また、研究についても文句ひとつなく進めてくれて、メモをとりながら作業を進めてくれました。前田氏がいなかったらこの研究もまとまらなかったのではないかと思います。本当に2年間ありがとうございました。

また、現在弊社の業務とも発注者という立場で関わっていることも大変嬉しいです。

今後も発注者として、また維持管理の一人者として頑張してほしいです。

本当にありがとうございました。今後も宜しくお願い致します。

博士前期課程前期、学部4年生の皆様へ

年齢が離れており、なかなか気軽には話せないところがあったかと思いますが、こちらからの情報収集やコピー等お願いしたときにも快く接してくれて大変ありがたかったです。

野中達貴氏をはじめとする学生には、データ計測、取りまとめ等をして頂き、本当にありがとうございました。

また、飲み会の席でも気軽に話してくれてうれしかったです。

学生のみなさんは、卒業後、社会人としてまた、大学院へ進み勉学に励むかたもいると思います。コンクリ研で学んだことに自信も持ち立派な社会人となり、今後の社会に貢献して頂きたいと思います。また、研究室や現場で見かけたときには気軽に声をかけて下さい。

それぞれが目標を持ち頑張って下さい。本当にありがとうございました。

本論文は、私が勤務する株式会社大進のご理解があればこそ、まとめる上げることができました。

株式会社大進 山内康功社長には社会人ドクターとして業務の傍ら大学に行かせて頂き、誠に感謝しております。地方のコンサルで人員不足のなかで時間を頂き誠にありがとうございました。

株式会社大進 岩屋勝司氏には本当にいろいろなことを教えて頂きました。いつも高い視点で土木に向きありこれまで経験されたことを私に教えてくれました。社会人ドクターに進むと言ったときに頑張りなさい。と快く送り出して頂きました。いつも励ましのお言葉、後押しがあつて進むことがで

きた道でもあります。本当に感謝しております。

また、橋梁構造部の皆様には業務が忙しいなかでも時間を割かせて頂き感謝します。

浜田貴光次長，原田浩幸課長には業務を切り盛りして頂き感謝しております。また，部下の方々にも5年間と長い時間ではありますが，心配をお掛けしました。

本当にありがとうございました。本当に感謝しております。

今後も、これまで支えていただいた社員の方々の期待に沿えるよう、努力し頑張りたいと思います。

まだまだ、ご指導いただいた方、支えて頂いた方々は多く、本来ならば全員のお名前を挙げたいところですが、限られた範囲内ですので、このような形で失礼致します。

本当に皆様に感謝です。ありがとうございます。

最後に、いつも夜遅くまで、また、休日も犠牲にしても愚痴をこぼさず研究や業務に専念させてくれた家族は私の宝物です。私がここまで専念できたのも家族の支えがあったからこそです。

これからもおそらく似たような生活になると思いますが、これまでできなかった家族サービスを少しでもできるようにします。

金銭面や貴重な時間を頂き、支えてくれた大切な家族に感謝の意を表します。

本当にありがとうございました。

本論文は、ここに書き尽くせないほどの皆様のご支援とご協力があったからこそ作成することができました。皆様との議論の中で得た視点や情報、この研究成果だけではなく今後の社会インフラ整備に役立てたいと考えております。コンクリートのプロフェッショナルの方々との人脈の構築と勉強の場を広げられたことは私のこれからの財産であります。今回の論文作成には、これらの経験が多なる参考になりました。

本当に多くの人に支えられ、協力があったからこそ念願の武若・山口研究室でドクター論文を作成することができました。これまでつながって頂いた皆様に感謝し、御礼を申し上げます。

鹿児島大学で学んだことは私の誇りであり、コンサルタントとして大きく成長できたと自負しております。今後は社会に貢献していきます。

本当に技術者としてはまだまだ至らない私ではございますが、ここに深く感謝を申し上げ、本論文の謝辞と致します。

平成31年3月 中野 智章

卷 末

【 付 録 】

本項では，本論にて収録できなかった，データについて記載する。

【記載内容】

Extra-I 電気抵抗率の経時変化

Extra-II 相愛湿度の経時変化

Extra-I 電気抵抗率の経時変化

(1) シリーズ1 (浸透3日, 乾燥4日)

縦軸に浸透面からの深さ, 横軸に水平方向の間隔を示している.

初期	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	15.24522	14.71419	17.53418	19.09701	26.0867	25.69801	17.56143	16.36089	14.57459
	2	13.15063	13.65268	15.32786	14.57459	13.70953	15.18937	15.8031	13.48568	12.73182
	3	12.56474	12.08965	12.98311	12.5093	12.23007	11.67162	11.69954	11.75501	11.25242
	4	12.78718	12.28509	11.64292	11.30815	10.63815	10.55438	10.55472	11.61577	12.78852
	5	11.69954	11.47649	11.92327	13.81902	13.03734	11.03108	10.77775	11.08525	10.55502
	6	11.69954	11.05658	12.00589	11.47579	12.36885	11.95046	11.50408	11.00074	11.47539
	7	14.62987	15.35637	14.24004	13.01149	12.5643	12.84302	12.70342	13.20647	13.67931
	8	16.94898	16.22247	15.07716	16.22191	16.22129	15.46746	16.92052	19.1815	17.64586
	9	19.01464	18.14965	18.14965	16.27832	15.24522	15.07769	15.77518	16.27775	16.86467
3日 (浸透後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	7.789248	7.314635	9.939756	13.96082	25.26127	26.04284	17.5912	16.44637	14.63183
	2	10.1352	10.35775	12.42422	12.98398	13.18016	15.05068	15.86	13.59827	12.87266
	3	11.75539	11.30827	12.23007	12.00735	12.09112	11.69988	11.78423	11.89565	11.3648
	4	12.53682	12.03423	11.44857	11.19726	10.63849	10.63879	10.66672	11.7278	12.92851
	5	11.86742	11.64403	12.11904	14.43384	13.67879	11.33688	11.11349	11.42065	10.86246
	6	11.92358	11.33717	12.28659	11.75603	12.73268	12.28627	11.84007	11.33688	11.83916
	7	15.02276	15.63748	14.60462	13.34801	12.92813	13.23528	13.06812	13.5711	14.3238
	8	17.36951	16.6152	15.44201	16.64274	16.64274	15.88879	17.36917	19.71484	18.12313
	9	19.4639	18.5703	18.62578	16.69897	15.66576	15.47029	16.19633	16.69897	17.34124
7日 (乾燥後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	12.17295	11.61408	13.6532	15.83041	29.29741	29.85545	17.25497	16.22247	14.4918
	2	11.05616	11.36281	13.09429	13.15109	13.06812	14.88271	15.74781	13.62576	12.95606
	3	11.67084	11.19619	12.09007	11.895	11.97877	11.67162	11.81188	11.97911	11.53201
	4	12.4247	11.89462	11.33655	11.11317	10.5823	10.66641	10.7781	11.895	13.15151
	5	11.33658	11.14135	11.61627	13.87505	13.23227	11.00186	10.86187	11.19704	10.66714
	6	11.50482	10.89013	11.86767	11.39302	12.36997	12.0072	11.5886	11.11346	11.61577
	7	14.91145	15.52614	14.49321	13.29242	12.92851	13.26359	13.15189	13.65487	14.43637
	8	16.75503	15.55428	14.9673	16.11194	16.1683	15.44201	16.89445	19.18339	17.64852
	9	18.57055	17.70471	17.76033	15.91694	14.99569	14.82792	15.49797	16.00053	16.58677
10日 (浸透後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	9.632262	9.185171	12.75974	16.61338	30.72262	31.00379	19.15425	18.01004	16.11177
	2	11.41955	11.75367	13.79228	14.12835	14.24091	16.27931	17.2835	14.91063	14.15714
	3	12.48097	12.00631	13.01149	12.87266	13.01228	12.6772	12.84507	13.0402	12.5655
	4	13.34608	12.81603	12.23007	12.03461	11.50408	11.55993	11.69988	12.92851	14.3526
	5	12.45381	12.23042	12.78889	15.18697	14.48835	12.17458	11.97877	12.39796	11.81188
	6	12.6496	12.00704	13.06812	12.53791	13.6262	13.23566	12.81715	12.28627	12.87229
	7	16.08385	16.72652	15.63748	14.32505	13.96127	14.3238	14.18465	14.77145	15.6082
	8	18.68163	17.89933	16.69816	18.01102	18.03848	17.25663	18.90459	21.50153	19.76973
	9	21.19485	20.21749	20.30126	18.23442	17.11745	16.94991	17.73178	18.34653	18.9888

1 4 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	13.70905	13.15013	15.55235	18.06588	31.81516	32.09424	19.29447	18.1781	16.30765
	2	11.95004	12.36787	14.29484	14.29588	14.18506	16.16762	17.19973	14.85479	14.12921
	3	12.34137	11.8942	12.90021	12.70545	12.81715	12.48173	12.67782	12.92884	12.45413
	4	13.03895	12.53682	11.97911	11.78365	11.2807	11.3648	11.53201	12.78889	14.18506
	5	12.2025	11.97911	12.50998	14.76886	14.0982	11.97942	11.8395	12.25867	11.70045
	6	12.42649	11.78396	12.84507	12.34244	13.43113	13.09605	12.67782	12.17458	12.78889
	7	15.86087	16.53143	15.44267	14.15783	13.82206	14.21257	14.10129	14.68839	15.52538
	8	18.62615	17.84424	16.61482	17.95559	18.03936	17.28539	18.93332	21.58622	19.88239
	9	21.58659	20.63677	20.74881	18.65407	17.45329	17.34124	18.20727	18.76577	19.40805
1 7 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	11.41912	10.97195	14.43549	17.89835	32.65026	32.92932	19.76916	18.65225	16.72608
	2	11.81044	12.22879	14.29538	14.46429	14.40882	16.4752	17.53479	15.16194	14.40845
	3	12.5093	12.06254	13.09567	12.90092	13.04054	12.70545	12.92884	13.15224	12.6772
	4	13.26232	12.73268	12.14665	11.97911	11.44857	11.56026	11.7278	13.01228	14.43637
	5	12.37004	12.14665	12.70545	15.02013	14.37737	12.17489	12.03496	12.45413	11.89592
	6	12.59404	11.9515	13.04054	12.53791	13.65452	13.29186	12.87329	12.37004	12.98435
	7	16.11219	16.75515	15.66607	14.38151	14.04544	14.46429	14.3526	14.96764	15.83254
	8	18.98918	18.17934	16.9503	18.34689	18.43067	17.64841	19.38013	22.08925	20.32959
	9	22.28503	21.30762	21.44696	19.29668	18.04002	17.92832	18.87779	19.43657	20.13472
2 1 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	14.21534	13.72385	16.79794	19.66056	30.8603	31.18378	20.85082	19.69282	17.73121
	2	12.86582	13.37242	15.45975	15.2996	14.99355	17.13107	18.28205	15.79537	14.99722
	3	12.46372	12.02605	13.06135	12.87918	13.04234	12.74762	12.97677	13.21828	12.75787
	4	13.59164	13.08749	12.48736	12.27074	11.74405	11.85865	12.05006	13.39431	14.86329
	5	12.65246	12.42767	13.00571	15.25891	14.58756	12.47393	12.3554	12.83051	12.24314
	6	12.88704	12.22079	13.34542	12.84469	14.00262	13.66382	12.74477	12.74427	13.37307
	7	16.57966	17.24802	16.14105	14.8347	14.50597	14.94316	14.85853	15.51316	16.43124
	8	19.80583	18.97057	17.66995	19.14154	19.28311	18.49473	20.31673	23.21395	21.37805
	9	23.91456	22.86817	23.06621	20.76634	19.36073	19.29604	20.34659	20.95457	21.67146
2 4 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	14.30232	13.77991	16.77197	19.64562	31.16783	31.62807	21.12432	19.93317	17.99865
	2	12.64055	13.13872	15.24408	15.18292	15.00177	17.22636	18.4072	15.90358	15.08806
	3	12.90379	12.46615	13.52579	13.27746	13.40751	13.11414	13.36214	13.62702	13.15845
	4	13.52336	13.01271	12.42983	12.24603	11.75352	11.87845	12.0803	13.42925	14.90105
	5	12.58515	12.40306	12.98021	15.24905	14.59289	12.49063	12.38524	12.8409	12.28009
	6	12.88212	12.23135	13.36057	12.87478	14.04076	13.70457	12.78939	12.78889	13.41835
	7	16.62222	17.30608	16.20964	14.91141	14.58242	15.03397	14.96393	15.62311	16.56781
	8	19.96178	19.145	17.83642	19.34114	19.50766	18.71727	20.58954	23.55022	21.67512
	9	24.45556	23.41407	23.62715	21.30121	19.84379	19.8001	20.91986	21.52144	22.25681

28日(乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	16.08621	15.59446	18.2531	20.6707	31.39578	31.70331	21.61635	20.38664	18.42126
	2	13.40098	13.94994	15.9705	15.65023	15.29825	17.51583	18.71421	16.15782	15.32231
	3	13.21783	12.78737	13.82143	13.51479	13.58774	13.27296	13.52062	13.79074	13.32547
	4	13.68116	13.1743	12.57567	12.37889	11.87181	11.99596	12.20666	13.58022	15.07027
	5	12.67727	12.49396	13.09158	15.3091	14.65297	12.60328	12.50124	12.9753	12.41001
	6	12.96681	12.31543	13.45949	12.9794	14.16211	13.82519	12.93041	12.92993	13.56847
	7	16.76622	17.45467	16.35044	15.06041	14.7344	15.2005	15.14404	15.82208	16.78354
	8	20.22625	19.41837	18.08756	19.63187	19.8179	19.02936	20.93573	24.01065	22.11023
	9	25.08867	24.042	24.2823	21.91666	20.38782	20.3663	21.53718	22.17002	22.92846
31日(浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	15.33094	14.88914	18.06984	20.89475	31.57727	31.828	21.8785	20.63023	18.64327
	2	13.47555	14.04776	16.1517	15.85879	15.48194	17.71624	18.91165	16.31046	15.45271
	3	13.33641	12.90633	13.96252	13.64829	13.70483	13.37136	13.61194	13.88608	13.41306
	4	13.77884	13.28635	12.67729	12.47161	11.94662	12.06507	12.27348	13.65632	15.15666
	5	12.73578	12.57309	13.15934	15.42834	14.76316	12.66293	12.56445	13.03715	12.47903
	6	13.01945	12.3686	13.52651	13.0426	14.23325	13.89421	12.99479	12.99434	13.64546
	7	16.84074	17.54361	16.43508	15.14384	14.82185	15.30256	15.24566	15.93403	16.91736
	8	20.37039	19.56961	18.23372	19.80931	20.00591	19.22368	21.14393	24.26873	22.34918
	9	25.43393	24.36861	24.62723	22.2428	20.69318	20.68122	21.87907	22.52588	23.29623
35日(乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	14.62445	14.14278	17.68005	20.98664	33.21833	33.72618	22.64363	21.35512	19.3075
	2	13.37413	13.93495	16.15706	16.05957	15.87301	18.25176	19.50865	16.81506	15.91426
	3	13.49022	13.05602	14.17202	13.92301	14.05622	13.74148	13.99307	14.27068	13.79259
	4	14.06599	13.55819	12.96048	12.77837	12.26802	12.39982	12.61588	14.02588	15.56725
	5	13.05291	12.88445	13.49685	15.84948	15.18639	13.00455	12.90086	13.3899	12.8061
	6	13.35606	12.70618	13.88504	13.39494	14.60637	14.2678	13.34776	13.34727	14.01306
	7	17.31088	18.02517	16.88437	15.56133	15.23438	15.73606	15.68459	16.38776	17.40299
	8	21.01703	20.18161	18.80292	20.4299	20.64616	19.8267	21.82594	25.0739	23.09683
	9	26.4311	25.34756	25.61187	23.13518	21.50125	21.50854	22.75918	23.42097	24.21954
38日(浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	16.30182	15.93465	19.34499	22.36362	32.73207	33.05405	23.53698	22.1858	20.08153
	2	14.13469	14.77947	17.01865	16.74001	16.39733	18.82434	20.11742	17.31896	16.37082
	3	13.91061	13.4837	14.62965	14.3321	14.41909	14.08306	14.33617	14.62678	14.13718
	4	14.37767	13.88113	13.26039	13.07243	12.54488	12.67594	12.90746	14.3572	15.93722
	5	13.29752	13.1425	13.77117	16.14997	15.46792	13.28429	13.18981	13.69119	13.10129
	6	13.61719	12.96247	14.17719	13.67274	14.92854	14.58388	13.65419	13.65375	14.34212
	7	17.69968	18.43643	17.26805	15.94289	15.61355	16.14197	16.10798	16.83794	17.88753
	8	21.60953	20.75706	19.34524	21.05675	21.32347	20.4906	22.57588	25.97873	23.92901
	9	27.64814	26.49614	26.83794	24.316	22.586	22.61537	23.99223	24.67594	25.50629

4 2 日 (乾燥後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	16.19097	15.77207	19.24776	22.4829	33.72869	34.26947	24.26133	22.87209	20.71107
	2	13.94861	14.59395	16.93304	16.86573	16.75313	19.32497	20.6978	17.81994	16.83774
	3	13.98001	13.57149	14.78288	14.57684	14.76641	14.4596	14.7362	15.0383	14.53412
	4	14.61135	14.11391	13.51475	13.37488	12.87685	13.02791	13.27348	14.75706	16.37403
	5	13.58794	13.44327	14.09192	16.57958	15.90047	13.64865	13.56293	14.0726	13.46321
	6	13.94722	13.28271	14.53866	14.03591	15.35438	14.99965	14.03795	14.0375	14.74798
	7	18.14478	18.90534	17.72415	16.37245	16.05841	16.62377	16.58902	17.33816	18.43068
	8	22.19603	21.33526	19.90277	21.66938	21.97275	21.12857	23.29199	26.81998	24.69578
	9	28.57617	27.43216	27.80179	25.17494	23.35767	23.44177	24.88696	25.58662	26.43975
4 5 日 (浸透後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	17.88195	17.47736	20.63254	23.5304	34.21552	34.57467	24.76283	23.34165	21.13533
	2	14.65358	15.34115	17.63284	17.34689	17.04993	19.6119	20.99123	18.05749	17.05234
	3	14.30965	13.89499	15.1031	14.82843	14.96032	14.63109	14.89514	15.20017	14.69329
	4	14.81008	14.31065	13.6899	13.53349	13.01324	13.16003	13.40993	14.91518	16.55123
	5	13.71703	13.57382	14.23354	16.69247	16.00077	13.77593	13.69358	14.21001	13.59614
	6	14.059	13.35777	14.62625	14.12196	15.4528	15.09874	14.13359	14.13313	14.85556
	7	18.27092	19.03032	17.84783	16.48516	16.17756	16.75606	16.73328	17.48072	18.58117
	8	22.41519	21.56069	20.09643	21.89709	22.20966	21.36051	23.54079	27.14139	24.99873
	9	29.13331	27.9587	28.36454	25.68077	23.81178	23.89056	25.38324	26.09101	26.95687
49日 (乾燥後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	15.54935	15.30967	19.3644	23.06771	34.5407	35.02221	24.89674	23.50557	21.29851
	2	14.01353	14.74363	17.20659	17.17702	17.03688	19.64416	21.05312	18.10239	17.08635
	3	14.06177	13.69822	14.95096	14.74527	14.923	14.61161	14.87567	15.18736	14.68204
	4	14.68147	14.2183	13.61941	13.48118	12.97748	13.13085	13.38461	14.89801	16.53404
	5	13.60426	13.48913	14.15508	16.70151	16.02758	13.72747	13.66063	14.18539	13.57722
	6	13.95178	13.30957	14.56689	14.06281	15.39817	15.06035	14.13602	14.13557	14.8798
	7	18.18953	18.92001	17.70685	16.33431	16.04545	16.67591	16.71178	17.50419	18.65897
	8	22.16767	21.23824	19.67004	21.31714	21.61308	20.89148	23.21285	26.95951	24.90617
	9	29.36316	27.98933	27.82251	24.68129	22.73629	23.21881	25.34261	26.39879	27.47275

(2) シリーズ2 (浸透のみ)

縦軸に浸透面からの深さ、横軸に水平方向の間隔を示している。

初期値	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	44.18865	45.68012	56.26044	65.01954	89.9391	89.72942	64.71363	60.27603	54.77838
	2	33.0551	36.13415	42.2365	41.21538	39.9565	46.46023	49.80382	41.69467	38.3214
	3	30.81618	30.36125	33.49511	32.71282	32.64892	31.87303	32.01524	32.73954	31.55314
	4	31.41905	30.8679	29.03473	28.95806	27.81857	27.77908	28.36812	31.70057	35.22081
	5	28.05266	28.1775	29.71349	36.96811	35.67812	28.95722	29.15899	30.26113	28.6007
	6	28.87181	27.98282	30.75028	29.69559	32.9587	32.15383	29.93204	29.93171	31.67203
	7	39.3388	40.94849	38.34326	35.73323	35.68234	38.43963	38.50109	39.30806	42.37795
	8	52.02769	50.39965	47.02617	51.88295	53.77466	51.86491	57.25551	67.78191	62.34675
	9	80.15622	77.86669	81.11439	74.6786	67.97665	69.47623	75.36398	76.77323	78.97968
3日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	36.6099	37.83023	51.84459	64.40557	93.25817	93.73865	67.65363	63.01851	57.48331
	2	31.5173	34.54674	41.18009	41.05149	40.4898	47.43157	50.95387	42.63387	39.10201
	3	30.42815	30.03482	33.2841	32.70974	32.84409	32.16172	32.34431	33.09566	31.92101
	4	31.34647	30.82987	29.01705	29.01937	27.94629	27.94574	28.56856	31.93955	35.48656
	5	28.05933	28.22584	29.7951	37.16321	35.90746	29.10975	29.33757	30.45125	28.77988
	6	29.00541	28.13542	30.93525	29.89368	33.20293	32.40492	30.18532	30.18488	31.94799
	7	39.84223	41.465	38.81351	36.2029	36.16311	39.00462	39.10436	39.9285	43.06995
	8	53.57892	51.91638	48.3126	53.30361	55.3243	53.38139	58.99449	70.05099	64.39243
	9	86.77192	84.32512	87.06336	80.00916	72.40603	74.22599	80.81853	82.19373	84.42776
7日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	29.23732	29.52055	46.57332	63.0685	96.54012	98.40566	71.66348	66.50141	60.91064
	2	29.7352	32.53847	39.6233	40.71852	41.08577	48.71823	52.54435	43.92442	40.16873
	3	29.85226	29.49115	32.89015	32.62995	33.16394	32.65495	32.90218	33.69163	32.4956
	4	31.25918	30.74797	29.02241	29.1811	28.24522	28.31731	28.97337	32.40152	36.00195
	5	28.23063	28.40904	30.03902	37.59112	36.38628	29.5038	29.74396	30.87448	29.16823
	6	29.38769	28.51339	31.37438	30.33105	33.71849	32.92016	30.65675	30.6562	32.44133
	7	40.77161	42.39193	39.73467	37.01319	36.96378	39.90433	40.0372	40.86599	44.07695
	8	55.9017	54.14851	50.23479	55.45145	57.61704	55.5873	61.48446	73.16706	67.19319
	9	95.08004	92.37774	95.03848	87.11123	78.37444	80.54069	87.91348	89.23832	91.47092
10日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	25.73565	24.7825	41.90518	61.36657	100.3281	103.9854	75.57642	70.62111	64.74531
	2	28.81295	31.3481	38.85336	40.75489	42.30953	50.85968	55.24169	46.21096	42.16577
	3	30.03472	29.66523	33.22617	33.2201	34.16079	33.85674	34.21282	35.09495	33.85907
	4	31.86282	31.33406	29.64858	29.96601	29.16291	29.32988	30.0714	33.67175	37.43536
	5	29.01764	29.21232	30.94296	39.14471	37.97678	30.61487	30.91892	32.11095	30.32161
	6	30.44346	29.55222	32.55114	31.49838	35.08879	34.28143	31.9362	31.93583	33.78889
	7	42.72204	44.3603	41.48106	38.72494	38.70493	41.8847	42.04427	42.88952	46.30136
	8	59.40528	57.4504	53.14337	58.6543	61.07224	58.9087	65.07319	77.61459	71.18093
	9	102.3776	99.00422	101.3725	92.56499	83.13828	85.30622	93.03724	94.37108	96.78106

14日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	21.73505	19.04638	32.71914	55.16579	103.1724	109.7954	79.85558	75.06729	69.02247
	2	26.87374	28.56866	35.99827	39.48304	42.84382	52.57993	57.90086	48.67864	44.4278
	3	29.78558	29.33858	32.95487	33.30014	34.91939	35.02393	35.63329	36.70202	35.45391
	4	32.21818	31.63574	30.00851	30.54685	30.00714	30.38951	31.28739	35.12008	39.10215
	5	29.65758	29.86318	31.71695	40.76153	39.70222	31.79375	32.23528	33.52311	31.63984
	6	31.41645	30.51839	33.6724	32.66323	36.5407	35.76563	33.36627	33.36603	35.33767
	7	44.55195	46.27636	43.29965	40.50892	40.60195	44.11722	44.33306	45.18465	48.85087
	8	62.51176	60.68091	56.19894	62.11057	64.85592	62.6802	69.2202	82.87737	75.99934
	9	108.924	106.3988	109.6167	100.3154	89.97972	92.57205	101.2596	102.7758	105.428
17日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	19.1378	16.37714	26.77442	48.42015	101.7203	110.0788	78.456	74.22944	68.46216
	2	24.34455	25.44756	32.16187	36.35421	40.81855	50.87184	56.59393	47.80908	43.64024
	3	28.002	27.4854	30.90859	31.49547	33.47976	33.86222	34.64692	35.80909	34.64536
	4	30.70167	30.09852	28.59648	29.24705	28.91316	29.43746	30.42836	34.2266	38.12901
	5	28.49029	28.67746	30.50142	39.35421	38.4411	30.87846	31.38534	32.68257	30.85707
	6	30.41184	29.56088	32.66518	31.75592	35.6159	34.90722	32.62837	32.6281	34.57054
	7	43.63724	45.33583	42.44658	39.79327	39.92814	43.46994	43.75384	44.60406	48.2583
	8	62.29421	60.49951	56.03678	62.02225	64.89486	62.72126	69.28841	83.05331	76.18538
	9	111.0423	108.3536	111.5303	102.1194	91.58049	94.27829	103.1399	104.544	107.2411
31日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	16.05438	14.09727	18.41214	35.41876	98.13046	113.3913	82.83205	80.38486	75.35178
	2	20.22075	19.96597	24.998	30.77571	39.02796	51.34942	59.48077	51.37934	47.56896
	3	25.98086	25.05427	28.17597	29.70626	33.36523	34.89071	36.5205	38.45358	37.57144
	4	30.27828	29.43064	28.11059	29.21853	29.54126	30.71185	32.31407	36.87763	41.46907
	5	28.98035	29.06297	31.05535	40.82861	40.34141	32.6926	33.71108	35.35936	33.54042
	6	31.69501	30.79814	34.12147	33.47555	37.91704	37.47943	35.51561	35.51502	37.75978
	7	46.79564	48.51442	45.49811	42.83443	43.28035	47.50811	48.12789	49.20833	53.4045
	8	68.4256	66.36801	61.53839	68.38039	71.73522	69.69071	77.15362	92.96487	85.11721
	9	126.0207	122.9028	125.5148	115.3788	103.2267	106.7147	116.7277	118.1926	120.7763
35日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電気抵抗率 (kΩ・cm)	1	15.55124	13.83061	17.69791	33.12923	94.57411	111.9677	84.08291	82.80085	78.29358
	2	18.89435	18.4751	23.19838	29.14272	38.08167	51.2906	60.37157	52.85686	49.29127
	3	24.91878	23.92833	26.94169	28.79621	33.11751	35.02669	37.11943	39.45298	38.87531
	4	29.64768	28.74235	27.56797	28.88703	29.54768	31.02557	32.93277	37.84275	42.81094
	5	28.8037	28.89779	30.93451	40.91934	40.62092	33.20568	34.48625	36.4362	34.66307
	6	31.79498	30.87578	34.2972	33.71385	38.46621	38.26805	36.61103	36.61032	39.08158
	7	47.37987	49.09123	46.06046	43.62369	44.25453	48.91192	49.69203	50.89463	55.59255
	8	69.97269	67.94778	63.06147	70.0872	74.01797	71.95865	79.90157	96.51556	88.85389
	9	130.3865	127.3693	130.9192	119.7496	107.3434	111.0762	122.019	123.9046	126.706

3 8 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電氣抵抗率 (kΩ·cm)	1	15.1819	13.58355	17.38989	32.38932	96.51621	114.3009	84.72106	84.01435	79.99628
	2	18.18233	17.78796	22.39649	28.33001	37.5088	50.91449	60.4804	53.21878	49.79807
	3	24.11918	23.15369	26.08284	28.07833	32.59534	34.71691	37.01604	39.51513	39.03363
	4	28.92916	28.01883	26.93628	28.35722	29.15782	30.74595	32.81135	37.9055	42.88864
	5	28.331	28.39921	30.46	40.29106	40.12922	33.01249	34.46467	36.48319	34.77898
	6	31.52831	30.61814	34.07292	33.59095	38.40519	38.30706	36.84321	36.84277	39.40942
	7	47.60308	49.34345	46.39236	44.01197	44.75161	49.60098	50.58305	52.01599	56.84846
	8	71.49668	69.51778	64.45084	71.89573	76.25242	74.23735	82.6371	100.0725	92.12901
	9	134.9602	131.8011	135.8387	124.8538	112.459	116.5022	128.1743	130.1273	133.6783
4 2 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電氣抵抗率 (kΩ·cm)	1	14.95105	13.4293	17.10698	31.12495	88.21948	105.3766	81.45597	81.13747	77.42072
	2	17.73253	17.34362	21.84236	27.61423	36.45934	49.6894	59.23045	52.52246	49.45614
	3	23.58539	22.65051	25.52066	27.47756	32.03628	34.22444	36.6375	39.29784	38.93877
	4	28.37232	27.4748	26.45095	27.8951	28.78733	30.46924	32.58611	37.74214	42.92551
	5	27.88611	27.96409	30.05532	40.19916	40.07894	32.75741	34.32009	36.46428	34.79725
	6	31.0918	30.21367	33.64269	33.20706	38.10638	38.08652	36.77384	36.77336	39.45164
	7	46.8909	48.62238	45.71561	43.4507	44.35565	49.34159	50.35753	51.67136	56.71663
	8	69.75429	67.84636	63.05513	70.28841	74.6868	72.88771	81.01782	98.10779	90.42022
	9	127.9062	124.6391	128.3943	118.2064	106.5956	110.4463	121.4822	123.6662	127.2098
4 5 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電氣抵抗率 (kΩ·cm)	1	15.18099	13.74671	17.62293	32.112	93.95732	112.376	85.52417	85.50027	82.05668
	2	17.87265	17.52553	22.13207	27.99848	37.18448	50.96998	61.03633	54.20918	51.067
	3	23.90672	23.04156	25.79774	27.89486	32.56311	34.91516	37.50599	40.34277	40.0696
	4	28.78285	27.81613	26.80186	28.32832	29.3059	31.06511	33.3864	38.74344	44.13356
	5	28.35445	28.42909	30.53793	40.67148	40.6155	33.53533	35.19467	37.467	35.838
	6	31.69525	30.7991	34.32007	33.93818	39.00083	39.06693	37.85717	37.85678	40.66232
	7	48.1285	49.91429	46.91272	44.63169	45.64235	50.83251	51.98296	53.48977	58.88152
	8	72.71075	70.71202	65.61969	73.33209	78.05283	76.26609	84.98486	103.2985	95.27203
	9	138.3561	134.9217	138.9565	128.1085	115.2141	119.6801	131.9564	134.1249	138.2114
4 9 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
電氣抵抗率 (kΩ·cm)	1	14.87965	13.42324	17.52293	32.30486	103.9185	124.0369	88.28408	89.11172	86.47003
	2	17.29888	17.05759	21.71694	27.37982	36.64741	50.74165	61.29661	54.7185	51.66875
	3	22.90278	22.0278	24.88579	26.98695	31.78514	34.29106	37.06387	40.06246	39.98816
	4	27.64034	26.74623	25.84605	27.41238	28.5324	30.41948	32.87486	38.32265	43.80796
	5	27.39899	27.48716	29.6065	38.93329	39.02318	32.85641	34.6436	37.02694	35.53285
	6	30.85962	29.98499	33.47159	33.16479	38.25341	38.47994	37.58876	37.58852	40.52015
	7	47.50426	49.21816	46.35344	44.23575	45.30049	50.64728	52.03328	53.81687	59.42701
	8	73.65176	71.67081	66.47164	74.56183	79.61629	78.00596	87.34791	106.9368	98.62891
	9	148.4101	145.1522	150.0462	138.5864	123.9389	129.5053	143.8851	146.33	150.4546

Extra-II 相対湿度の経時変化

(1) シリーズ1 (浸透3日, 乾燥4日)

縦軸に浸透面からの深さ, 横軸に水平方向の間隔を示す.

初期	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	88.88969	89.35768	87.04319	85.91618	81.79918	81.99734	87.02269	87.95741	89.48351
	2	90.8406	90.34604	88.81833	89.48351	90.2912	88.93813	88.41528	90.5085	91.26782
	3	91.44219	91.95099	91.00983	91.50057	91.79855	92.41548	92.38394	92.32151	92.8983
	4	91.21055	91.7393	92.44799	92.83309	93.63931	93.74366	93.74324	92.47879	91.20917
	5	92.38394	92.63803	92.13391	90.18619	90.95481	93.16054	93.46721	93.09588	93.74285
	6	92.38394	93.13006	92.04276	92.63883	91.6496	92.10384	92.60633	93.19689	92.63929
	7	89.43354	88.7938	89.79004	90.98101	91.44266	91.15304	91.2973	90.78467	90.32032
	8	87.49126	88.06955	89.03601	88.07001	88.07052	88.69865	87.51345	85.85791	86.95938
	9	85.97324	86.5878	86.5878	88.02419	88.88969	89.03555	88.43862	88.02465	87.55708

3日 (浸透後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	97.75377	98.58362	94.53564	90.05144	82.2236	81.8214	87.00034	87.88861	89.43177
	2	94.27861	93.9919	91.59065	91.00895	90.81099	89.05921	88.36784	90.39875	91.1226
	3	92.32109	92.83295	91.79855	92.04115	91.94938	92.38356	92.28874	92.16452	92.76712
	4	91.47156	92.01164	92.67018	92.96317	93.63889	93.63851	93.60391	92.3521	91.06546
	5	92.19588	92.44672	91.91893	89.6116	90.32083	92.7996	93.06229	92.70242	93.36387
	6	92.13357	92.79925	91.73769	92.32036	91.26693	91.73803	92.22633	92.7996	92.22736
	7	89.08372	88.55435	89.45634	90.64395	91.06584	90.7559	90.92368	90.42516	89.71262
	8	87.16774	87.7538	88.72039	87.73194	87.73194	88.34389	87.16801	85.49589	86.6071
	9	85.66499	86.28536	86.24599	87.68742	88.5305	88.69624	88.09084	87.68742	87.18924

7日 (乾燥後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	91.86035	92.48072	90.34554	88.39248	80.26701	80.01795	87.25508	88.06955	89.55871
	2	93.13056	92.76944	90.89727	90.84014	90.92368	89.20736	88.46155	90.3721	91.03736
	3	92.41637	92.96443	91.95052	92.16524	92.07261	92.41548	92.2578	92.07223	92.57433
	4	91.59014	92.16566	92.79998	93.06267	93.70878	93.60429	93.46679	92.16524	90.83971
	5	92.79994	93.02924	92.47824	90.13279	90.75891	93.19555	93.36459	92.96343	93.60338
	6	92.60548	93.33028	92.1956	92.73439	91.64841	92.04132	92.50971	93.06233	92.47879
	7	89.18189	88.64867	89.55742	90.69904	91.06546	90.7277	90.83933	90.34393	89.60929
	8	87.64318	88.62477	89.13255	88.1598	88.11371	88.72039	87.5338	85.85661	86.95739
	9	86.28518	86.91544	86.87403	88.32053	89.10753	89.25604	88.67264	88.25139	87.77641

10日 (浸透後)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	94.95044	95.57781	91.2389	87.75525	79.64001	79.51975	85.87668	86.68974	88.15994
	2	92.70368	92.32302	90.21176	89.89398	89.78924	88.02339	87.23327	89.18261	89.86711
	3	91.53049	92.0423	90.98101	91.1226	90.98021	91.32457	91.15093	90.95191	91.44139
	4	90.64586	91.1808	91.79855	92.01121	92.60633	92.54241	92.38356	91.06546	89.68611
	5	91.55925	91.79817	91.20878	88.94022	89.56185	91.85858	92.07261	91.61857	92.2578
	6	91.35334	92.04149	90.92368	91.47041	90.37168	90.75552	91.17965	91.73803	91.12299
	7	88.18284	87.66566	88.55435	89.71147	90.05101	89.71262	89.84148	89.30641	88.57909
	8	86.20646	86.77113	87.68806	86.68901	86.6689	87.25381	86.04986	84.35076	85.4592
	9	84.54039	85.16357	85.10898	86.5263	87.3607	87.49054	86.89527	86.44539	85.99119

1 4 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	90.29166	90.8411	88.6264	86.64887	79.17875	79.06347	85.78039	86.56713	88.00042
	2	92.1043	91.65065	89.73934	89.73838	89.8411	88.11427	87.2974	89.23215	89.89317
	3	91.67897	92.16613	91.09438	91.29519	91.17965	91.52968	91.32393	91.06512	91.55891
	4	90.95318	91.47156	92.07223	92.28939	92.86516	92.76712	92.57433	91.20878	89.8411
	5	91.82834	92.07223	91.49985	89.30872	89.92218	92.07188	92.22698	91.76772	92.38292
	6	91.58823	92.28905	91.15093	91.67783	90.56201	90.8955	91.32393	91.85858	91.20878
	7	88.36711	87.82053	88.71983	89.86647	90.1833	89.81553	89.91929	89.38084	88.64932
	8	86.24572	86.81181	87.75411	86.7297	86.66826	87.23182	86.02981	84.29887	85.38419
	9	84.29865	84.89262	84.82114	86.22595	87.10423	87.18924	86.54596	86.14714	85.70292

1 7 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	92.70419	93.23148	89.6101	86.77185	78.83674	78.7244	85.45958	86.22724	87.666
	2	92.25941	91.79994	89.73884	89.58378	89.63451	87.8655	87.04273	88.962	89.63485
	3	91.50057	91.98062	90.89588	91.09366	90.95157	91.29519	91.06512	90.83899	91.32457
	4	90.72897	91.26693	91.88889	92.07223	92.67018	92.54203	92.3521	90.98021	89.60929
	5	91.64834	91.88889	91.29519	89.08604	89.66335	91.85824	92.01083	91.55891	92.16421
	6	91.41145	92.10269	90.95157	91.47041	90.34427	90.6996	91.12196	91.64834	91.00856
	7	88.1596	87.64308	88.53024	89.65955	89.97167	89.58378	89.68611	89.13224	88.39071
	8	85.99093	86.56623	87.49023	86.44512	86.38499	86.95747	85.72192	83.9948	85.09058
	9	83.87832	84.47034	84.38431	85.77889	86.66778	86.74977	86.06858	85.68354	85.21771

2 1 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	89.81295	90.27741	87.60942	85.53228	79.58099	79.44334	84.75641	85.51065	86.89569
	2	91.12962	90.61984	88.70524	88.84269	89.10941	87.3502	86.49186	88.42174	89.10618
	3	91.54875	92.0206	90.93052	91.11592	90.94975	91.25145	91.01628	90.77287	91.24084
	4	90.4052	90.90413	91.52374	91.75472	92.33382	92.20564	91.99428	90.59824	89.22459
	5	91.35035	91.58698	90.98688	88.87784	89.47176	91.53794	91.66397	91.1659	91.78445
	6	91.10787	91.80857	90.64652	91.15132	90.01197	90.33528	91.2544	91.25492	90.61919
	7	87.78207	87.2604	88.13597	89.25001	89.54581	89.15386	89.22882	88.65971	87.90077
	8	85.43511	86.00387	86.94138	85.88544	85.78817	86.33919	85.09893	83.33925	84.42679
	9	82.94677	83.53735	83.42353	84.81	85.73514	85.77932	85.07955	84.69089	84.24685

2 4 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	89.73243	90.2236	87.62984	85.54232	79.4501	79.25661	84.58439	85.35052	86.69808
	2	91.36279	90.85256	88.89067	88.94374	89.10218	87.27698	86.40181	88.33162	89.02647
	3	91.09073	91.54618	90.46931	90.71391	90.58524	90.87728	90.62998	90.37088	90.83275
	4	90.47167	90.97977	91.58469	91.78133	92.32318	92.18361	91.9612	90.56386	89.19111
	5	91.42076	91.61315	91.01278	88.88637	89.46694	91.52028	91.63213	91.15522	91.74467
	6	91.11291	91.79717	90.63154	91.12043	89.97607	90.29598	91.20826	91.20878	90.57457
	7	87.74823	87.21604	88.08	89.18193	89.47642	89.07388	89.13551	88.56649	87.7915
	8	85.33158	85.88305	86.8176	85.7485	85.63534	86.18131	84.92286	83.14942	84.24462
	9	82.65148	83.22595	83.10636	84.47432	85.40984	85.43893	84.71278	84.33854	83.89504

2 8 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.18089	88.59072	86.51278	84.87093	79.35391	79.22524	84.28046	85.05359	86.39173
	2	90.59167	90.06173	88.27619	88.54359	88.84385	87.05701	86.18346	88.12226	88.82311
	3	90.77332	91.21035	90.1839	90.48004	90.40898	90.71838	90.47435	90.21323	90.66626
	4	90.31854	90.81686	91.43072	91.6389	92.19099	92.05368	91.82384	90.4163	89.04205
	5	91.3245	91.51676	90.90001	88.83449	89.41271	91.40176	91.50907	91.01777	91.60576
	6	91.02641	91.70674	90.53417	91.0136	89.86247	90.18031	91.06352	91.06401	90.42772
	7	87.63437	87.10319	87.96584	89.05068	89.33956	88.92847	88.97759	88.39943	87.62074
	8	85.15784	85.69591	86.63304	85.55156	85.42707	85.96302	84.70276	82.89383	83.98227
	9	82.31411	82.87661	82.74533	84.09834	85.05282	85.06677	84.32889	83.94662	83.5026

3 1 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.81568	89.20166	86.64597	84.72863	79.27782	79.17343	84.12134	84.8968	86.2336
	2	90.51843	89.96949	88.12727	88.36885	88.6863	86.90684	86.04493	87.99815	88.71125
	3	90.65543	91.08813	90.04982	90.35029	90.29573	90.62088	90.3855	90.12229	90.57978
	4	90.22463	90.70507	91.32447	91.5404	92.10809	91.97785	91.75178	90.34253	88.96659
	5	91.26372	91.43343	90.83186	88.73208	89.31382	91.33944	91.4425	90.955	91.53255
	6	90.97294	91.64987	90.46861	90.94948	89.79633	90.11457	90.99796	90.99841	90.35303
	7	87.57583	87.0361	87.89768	88.97776	89.26144	88.84014	88.88931	88.30636	87.5159
	8	85.06412	85.59349	86.5268	85.43279	85.30243	85.82892	84.57215	82.75271	83.84038
	9	82.13369	82.6985	82.55914	83.90336	84.85659	84.86421	84.121	83.73643	83.29255

3 5 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	89.43843	89.8805	86.93383	84.67071	78.60906	78.40878	83.6676	84.44095	85.77148
	2	90.61815	90.07592	88.12289	88.20278	88.35702	86.51374	85.63467	87.59597	88.32275
	3	90.50406	90.93591	89.85324	90.08724	89.96154	90.26047	90.02097	89.76167	90.21146
	4	89.95237	90.43772	91.03286	91.21965	91.75765	91.6166	91.38857	89.99007	88.61376
	5	90.93905	91.11052	90.49758	88.3766	88.94073	90.98805	91.09372	90.60259	91.19103
	6	90.636	91.29443	90.12328	90.59763	89.45476	89.76433	90.64419	90.64468	90.00214
	7	87.21237	86.67864	87.54168	88.61879	88.89908	88.4714	88.51464	87.93574	87.14233
	8	84.6516	85.18701	86.12104	85.02561	84.88661	85.42121	84.15309	82.32188	83.40602
	9	81.62606	82.17859	82.04166	83.38412	84.35093	84.34646	83.60041	83.22206	82.77949

3 8 日 (浸透後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.00515	88.30586	85.74588	83.83185	78.80371	78.6745	83.15684	83.93723	85.25263
	2	89.88806	89.29924	87.43711	87.65502	87.92804	86.10601	85.22906	87.20622	87.94939
	3	90.09899	90.51045	89.43374	89.70497	89.6251	89.93636	89.70123	89.43632	89.88573
	4	89.66307	90.127	90.73089	90.91933	91.46307	91.32588	91.08696	89.68188	88.30373
	5	90.69398	90.84876	90.23198	88.12868	88.69826	90.70711	90.80133	90.30886	90.89022
	6	90.3804	91.03083	89.84842	90.32667	89.16677	89.4751	90.34458	90.34501	89.69575
	7	86.91919	86.38086	87.24508	88.29903	88.57456	88.13522	88.16304	87.57802	86.77983
	8	84.28462	84.8159	85.74571	84.62668	84.46053	84.98645	83.70716	81.85393	82.93879
	9	81.03183	81.59361	81.42442	82.72702	83.70124	83.68409	82.90397	82.53306	82.09619

4 2 日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.09521	88.44122	85.81239	83.76164	78.40779	78.19783	82.75674	83.53509	84.84518
	2	90.06299	89.46599	87.50368	87.55625	87.64467	85.75954	84.85364	86.8298	87.57818
	3	90.03331	90.42478	89.2962	89.48148	89.31091	89.58807	89.33794	89.07008	89.52022
	4	89.45026	89.90748	90.48008	90.61741	91.11831	90.96436	90.71786	89.31928	87.9468
	5	90.40879	90.55008	89.92806	87.78213	88.3342	90.34995	90.43311	89.94617	90.53051
	6	90.0643	90.70868	89.51609	89.98063	88.79551	89.10404	89.97871	89.97913	89.3274
	7	86.59135	86.04934	86.90095	87.94808	88.20373	87.74699	87.77462	87.19159	86.38498
	8	83.93114	84.45323	85.37066	84.24812	84.0646	84.58173	83.29495	81.43326	82.52245
	9	80.59604	81.13535	80.95868	82.26879	83.25778	83.21034	82.42066	82.05468	81.62174

49日 (乾燥後)		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.62895	88.834	85.73264	83.42267	78.09377	77.91103	82.41547	83.17447	84.47599
	2	90.00169	89.33129	87.29214	87.31484	87.42298	85.5433	84.62896	86.62222	87.38471
	3	89.95633	90.30209	89.14696	89.32983	89.17167	89.45003	89.2136	88.93988	89.38655
	4	89.38706	89.81021	90.37826	90.51291	91.01555	90.86047	90.60781	89.19379	87.81844
	5	90.39294	90.50513	89.86903	87.68541	88.22909	90.27394	90.33836	89.8408	90.41921
	6	90.05999	90.68202	89.49048	89.95535	88.75791	89.05074	89.88682	89.88723	89.20994
	7	86.55883	86.0391	86.91384	87.97886	88.21439	87.70566	87.67729	87.06579	86.22248
	8	83.94802	84.5134	85.52592	84.46445	84.28246	84.73069	83.33988	81.36476	82.41047
	9	80.23742	80.86993	80.94884	82.5302	83.6137	83.33649	82.18117	81.6422	81.11583

(2) シリーズ2 (浸透のみ)

縦軸に浸透面からの深さ，横軸に水平方向の間隔を示す。

初期値	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	74.84222	74.40405	71.65411	69.74412	65.46145	65.49226	69.80637	70.74406	72.0065
	2	78.67408	77.49845	75.43864	75.76169	76.17115	74.18052	73.26319	75.60907	76.72269
	3	79.59987	79.7962	78.49953	78.81148	78.83728	79.15477	79.096	78.8007	79.28791
	4	79.34413	79.57774	80.3859	80.4208	80.95071	80.96946	80.69249	79.22638	77.83639
	5	80.8401	80.78149	80.08086	77.19727	77.6661	80.42118	80.32952	79.83979	80.58471
	6	80.46017	80.873	79.62813	80.08882	78.71263	79.03898	79.98413	79.98428	79.23827
	7	76.37681	75.84744	76.71516	77.64573	77.66454	76.68203	76.66094	76.38713	75.39451
	8	72.68656	73.10621	74.0207	72.72333	72.25061	72.72792	71.42269	69.1949	70.29821
	9	66.9815	67.36402	66.82464	67.91584	69.15703	68.869	67.79525	67.5507	67.17668

3日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	77.32579	76.89297	72.73309	69.86936	64.98309	64.91526	69.21991	70.15674	71.37027
	2	79.30292	78.09146	75.773	75.81428	75.99614	73.9074	72.96185	75.31503	76.4565
	3	79.76714	79.93888	78.58295	78.81272	78.75861	79.03575	78.96102	78.65789	79.13491
	4	79.37466	79.59401	80.39393	80.39288	80.89024	80.8905	80.59955	79.12725	77.73717
	5	80.83696	80.75886	80.04466	77.12779	77.58152	80.35183	80.24893	79.75712	80.50227
	6	80.39923	80.80121	79.54897	80.00106	78.61518	78.93631	79.8729	79.8731	79.12376
	7	76.20896	75.68198	76.55426	77.47336	77.48788	76.48942	76.45571	76.18041	75.1807
	8	72.29874	72.71483	73.66446	72.36675	71.8756	72.3475	71.02774	68.76025	69.87205
	9	65.93466	66.31223	65.8904	67.00574	68.32378	67.99609	66.87288	66.65016	66.29617

7日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	80.29411	80.16686	74.14843	70.14628	64.52655	64.2739	68.45985	69.44665	70.60582
	2	80.07122	78.88202	76.28169	75.92178	75.80326	73.5541	72.55612	74.92139	76.10123
	3	80.01936	80.18001	78.74011	78.84496	78.63069	78.83485	78.73529	78.42231	78.89942
	4	79.41147	79.62912	80.3915	80.31952	80.7498	80.71615	80.41382	78.93769	77.54684
	5	80.75662	80.67346	79.93703	76.97666	77.40667	80.17435	80.06734	79.57493	80.32534
	6	80.2264	80.62507	79.36291	79.80933	78.41179	78.72807	79.66834	79.66858	78.92148
	7	75.90458	75.39015	76.24464	77.18118	77.19881	76.1884	76.14452	75.87406	74.87563
	8	71.73855	72.15916	73.14946	71.8453	71.3396	71.813	70.48204	68.18576	69.31005
	9	64.72771	65.1083	64.73348	65.88315	67.27823	66.91833	65.76214	65.5647	65.23852

10日	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
相対湿度 (%)	1	81.97802	82.47618	75.5426	70.50738	64.01852	63.54589	67.75809	68.65326	69.79991
	2	80.48711	79.37397	76.54071	75.91	75.41584	72.98627	71.89532	74.25154	75.46077
	3	79.93893	80.10232	78.60594	78.60835	78.23976	78.35778	78.21967	77.88365	78.35687
	4	79.15899	79.37989	80.10973	79.96916	80.32775	80.25239	79.92282	78.4301	77.03147
	5	80.39367	80.3054	79.54568	76.4421	76.84193	79.68639	79.55594	79.0566	79.81344
	6	79.7605	80.1527	78.87688	79.31084	77.88596	78.19323	79.12863	79.12878	78.38426
	7	75.28776	74.79105	75.67687	76.58441	76.59124	75.54905	75.49886	75.23612	74.22574
	8	70.93614	71.37783	72.40649	71.10408	70.57084	71.04695	69.73323	67.40683	68.54903
	9	63.75158	64.19385	63.88182	65.08157	66.49933	66.15953	65.0144	64.8265	64.49364

1 4 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	84.20817	85.95123	78.80893	71.91347	63.6495	62.82824	67.0311	67.84732	68.9555
	2	81.40682	80.5995	77.54819	76.3285	75.25019	72.54719	71.27473	73.56483	74.77098
	3	80.04888	80.24848	78.71417	78.57659	77.94984	77.91038	77.6827	77.29262	77.74932
	4	79.01259	79.25341	79.95045	79.71575	79.95106	79.78391	79.39956	77.87419	76.45646
	5	80.10572	80.01453	79.21956	75.90785	76.25542	79.18764	79.00559	78.4885	79.25169
	6	79.34522	79.72805	78.42984	78.8315	77.35077	77.63377	78.5504	78.55049	77.79267
	7	74.73414	74.23287	75.11049	75.98991	75.95963	74.86358	74.79915	74.548	73.51821
	8	70.26332	70.65569	71.66855	70.34831	69.77738	70.2278	68.91774	66.54082	67.68443
	9	62.93341	63.24304	62.84974	64.02018	65.45549	65.08057	63.89653	63.70034	63.36402

1 7 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	85.88801	87.9443	81.4557	73.63511	63.83661	62.7942	67.2645	67.99548	69.06309
	2	82.71153	82.12662	79.03568	77.41831	75.8894	72.98311	71.5761	73.80276	75.00707
	3	80.86396	81.10976	79.56035	79.31206	78.50558	78.35564	78.05324	77.61774	78.05384
	4	79.64902	79.91092	80.58666	80.28972	80.44128	80.20406	79.76705	78.21436	76.78912
	5	80.63577	80.54933	79.73539	76.37164	76.68152	79.57322	79.3583	78.82369	79.58237
	6	79.77422	80.14884	78.83071	79.20336	77.68915	77.95444	78.84559	78.84571	78.08237
	7	75.00798	74.50391	75.37315	76.22519	76.18053	75.05868	74.97275	74.71871	73.6793
	8	70.30934	70.69521	71.70669	70.36709	69.76946	70.21915	68.90474	66.51283	67.65216
	9	62.67917	63.00272	62.62129	63.78492	65.22272	64.83949	63.65366	63.47518	63.13895

31日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.20704	89.92305	86.39826	77.76241	64.31087	62.40285	66.54804	66.9439	67.79739
	2	85.16144	85.32881	82.3619	79.61722	76.48153	72.85977	70.91938	72.85208	73.86922
	3	81.85285	82.33222	80.7822	80.08408	78.55081	77.96069	77.35807	76.67724	76.98358
	4	79.83232	80.20712	80.81287	80.3026	80.1576	79.64464	78.97337	77.22961	75.68069
	5	80.41064	80.37306	79.49782	75.88614	76.04461	78.81964	78.41469	77.78457	78.48168
	6	79.2287	79.6076	78.25497	78.50724	76.86271	77.01594	77.72637	77.72658	76.91757
	7	74.08557	73.60943	74.45675	75.25308	75.11638	73.88611	73.71502	73.42197	72.34179
	8	69.07014	69.47316	70.47047	69.07886	68.44664	68.82832	67.48546	65.02467	66.18881
	9	61.00891	61.33961	61.06201	62.17349	63.64256	63.2039	62.02006	61.85543	61.57

3 5 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.62735	90.17513	86.92051	78.64451	64.79814	62.56962	66.3502	66.55301	67.29185
	2	86.05701	86.3532	83.34811	80.33689	76.80552	72.8749	70.72316	72.47785	73.39974
	3	82.40379	82.93917	81.37349	80.49478	78.64918	77.90934	77.14334	76.33855	76.53326
	4	80.11013	80.51949	81.07016	80.45322	80.15473	79.51049	78.72302	76.8886	75.26032
	5	80.49135	80.4483	79.54928	75.85684	75.95346	78.61408	78.1146	77.38857	78.04709
	6	79.18713	79.57437	78.18716	78.41361	76.6729	76.74108	77.32539	77.32564	76.4634
	7	73.92179	73.45342	74.2946	75.01207	74.82256	73.50172	73.29285	72.9772	71.81175
	8	68.77501	69.16264	70.14775	68.75343	68.03314	68.40559	67.0235	64.5299	65.62169
	9	60.55936	60.8684	60.50553	61.68268	63.12636	62.67514	61.43486	61.23244	60.93733

3 8 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.94463	90.41305	87.15226	78.94266	64.52982	62.29738	66.25039	66.36096	67.00786
	2	86.56406	86.85351	83.81246	80.71024	77.0056	72.97205	70.69939	72.38777	73.26471
	3	82.8343	83.37357	81.80113	80.82802	78.85896	78.0266	77.18016	76.31778	76.47961
	4	80.43398	80.85602	81.37614	80.69756	80.33005	79.62999	78.77178	76.86673	75.23639
	5	80.70977	80.67803	79.75333	76.06109	76.11422	78.69111	78.12286	77.37156	78.00303
	6	79.29831	79.68497	78.27376	78.46181	76.69386	76.72763	77.24194	77.24209	76.35314
	7	73.85975	73.38577	74.19982	74.89511	74.67512	73.31706	73.05826	72.68952	71.51686
	8	68.49061	68.86111	69.86008	68.41714	67.64055	67.99407	66.57914	64.05219	65.14389
	9	60.10426	60.41692	60.01862	61.1317	62.51183	62.04558	60.78524	60.58562	60.23024

4 2 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	89.14688	90.56381	87.36878	79.46827	65.71627	63.37047	66.76917	66.82089	67.43984
	2	86.89471	87.18743	84.14317	81.04803	77.38019	73.29355	70.97505	72.56162	73.35566
	3	83.12972	83.66359	82.08875	81.11352	79.08733	78.21519	77.31585	76.39056	76.51173
	4	80.69054	81.11485	81.61614	80.91445	80.49886	79.74933	78.8627	76.92374	75.22505
	5	80.9187	80.88184	79.92988	76.09123	76.13077	78.79349	78.17835	77.3784	77.99609
	6	79.48234	79.86051	78.44149	78.61353	76.79696	76.80384	77.26681	77.26699	76.339
	7	74.05873	73.58009	74.39379	75.06452	74.79243	73.38627	73.11725	72.77727	71.54751
	8	68.81628	69.18236	70.14908	68.71559	67.9144	68.23626	66.84037	64.31392	65.39102
	9	60.81288	61.15442	60.7626	61.85389	63.21865	62.75022	61.49307	61.25787	60.88495

4 5 日		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
相对湿度 (%)	1	88.94542	90.25545	86.97655	79.05617	64.8845	62.52158	66.12585	66.12954	66.67219
	2	86.79081	87.04971	83.96923	80.86562	77.12023	72.95767	70.57861	72.14438	72.93257
	3	82.95109	83.43765	81.94621	80.91456	78.87202	77.95144	77.00659	76.04416	76.13384
	4	80.50091	80.95187	81.44218	80.71102	80.26319	79.49367	78.54244	76.57811	74.85869
	5	80.69885	80.66415	79.7196	75.93704	75.95522	78.48369	77.84619	77.02032	77.60709
	6	79.2286	79.60719	78.17836	78.32606	76.49071	76.46835	76.88357	76.88371	75.94002
	7	73.71486	73.23394	74.05259	74.71054	74.41496	72.99332	72.69791	72.32073	71.05304
	8	68.26834	68.63627	69.62284	68.15602	67.33251	67.63819	66.20935	63.63338	64.70108
	9	59.77624	60.10804	59.71908	60.79202	62.19234	61.69035	60.40137	60.18621	59.79005