

# 博士論文

建築物の構造性能のマルチプルな劣化リスクに対する  
群的アプローチと超長期的時間軸への展開

三好 徹志



## 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本研究の構成	4
参考文献	5
第2章 建築物群の更新過程の解析像の共有	7
2.1 小序	7
2.2 超長期のエージェント像	10
2.3 耐用年数の設定	10
2.4 初期集団の設定	11
2.5 修正下方 OFT の概要	12
2.6 基準建築物群の更新過程	14
2.7 評価対象の建築物群の更新過程	16
2.7.1 評価対象の建築物群	16
2.7.2 更新過程の定量と比較	17
2.8 小結	22
参考文献	23
第3章 コンクリートの経年劣化に対する材料学的アプローチ	25
3.1 小序	25
3.2 材料学的アプローチの基本方針	27
3.2.1 劣化現象のスクリーニング	27
(1)塩害	28
(2)凍害	28
(3)アルカリシリカ反応	28
(4)疲労	29
(5)その他	29
(6)対象とする劣化現象	29
3.2.2 定式化の方針	30
3.3 コンクリート中の物質移動特性	31
3.3.1 物質の移動経路	31
3.3.2 セメントペーストの毛細管空隙量のモデル	32
3.3.3 骨材の遷移体量のモデル	34
3.3.4 コンクリートの空隙量と物質の移動特性の関係	35
3.4 水の移動特性	36
3.4.1 水の移動の基本モデル	36

(1)コンクリート工学的手法	36
(2)熱水分連成解析	38
3.4.2 水の移動の簡易式	39
3.4.3 水の反応モデル	40
3.5 CO <sub>2</sub> の移動特性	41
3.6 Cl <sup>-</sup> の移動特性	43
3.7 材料学的劣化モデルの検証	44
3.7.1 トレース対象の実験概要	44
3.7.2 改正の手順	44
3.7.3 解析結果と評価	45
3.7.4 製造段階の変動を考慮した追加解析	45
3.8 小結	48
参考文献	49
第4章 供用環境の超長期モデルに対する自然科学的アプローチ	55
4.1 小序	55
4.2 自然科学的アプローチの基本方針	56
4.2.1 RCP シナリオに関するスクリーニング	56
4.2.2 各外的要因の評価	56
(1)気温・室温	56
(2)降雨・相対湿度	56
(3)日射	57
(4)風速とエアロゾル中の Cl <sup>-</sup>	57
(5)大気中の酸	57
(6)RCP シナリオに準じる外的要因	58
4.3 熱環境	58
4.3.1 外皮の熱環境	58
(1)外皮の熱環境の検討方針	58
(2)土地利用の影響	58
(3)マイクロ環境へのスケールダウン	59
(4)斜面日射量	61
(5)仕上材の設定	61
(6)外気温と風速	66
4.3.2 室内の熱環境	66
(1)室内の熱環境の検討方針	66
(2)非空調時の室内温度	67
(3)空調時の室内温度	68
(4)室内温度の定式化	69
4.4 水環境	70

4.4.1	降雨のモデル化	70
4.4.2	降雨情報の入力間隔	71
4.4.3	酸性成分の影響	74
4.5	大気環境	75
4.5.1	CO <sub>2</sub> 濃度	75
	(1)室外のCO <sub>2</sub> 濃度	75
	(2)室内のCO <sub>2</sub> 濃度	75
4.5.2	飛来塩分	77
	(1)飛来塩分の有意性の検討方針	77
	(2)飛来塩分の影響の試算	78
4.6	コンクリートの中性化の超長期動向	80
4.6.1	超長期環境モデルによる中性化の試算	80
4.6.2	中性化の超長期用簡易式	80
4.7	小結	82
	参考文献	84
第5章 RC造建築物群の経年劣化に対する建築学的アプローチ		87
5.1	小序	87
5.2	建築学的アプローチの基本方針	88
5.3	部材単位の劣化	89
5.3.1	修繕を伴う仕上材の劣化	89
	(1)仕上材の劣化モデルの検討方針	89
	(2)仕上材自体の劣化に関する体系	90
	(3)仕上材とCO <sub>2</sub> の反応に起因する体系	95
	(4)その他の体系	96
5.3.2	修繕を伴う躯体の劣化	96
	(1)躯体の劣化の検討方針	96
	(2)壁の乾燥収縮ひび割れ部分の劣化	96
	(3)床の曲げひび割れ部分の劣化	102
	(4)躯体の劣化の評価指標	103
5.4	RC造建築物の基本計画	103
5.4.1	空間構成の設定	103
5.4.2	躯体・仕上材・修繕の仕様の設定	105
	(1)仕様設定の検討方針	105
	(2)躯体の仕様	105
	(3)仕上材の仕様	107
	(4)修繕の仕様	109
	(5)その他の選択肢	109
5.5	建物所有者の意思決定	110

5.5.1	意思決定のモデルの位置づけ	110
5.5.2	志向する性能	111
5.5.3	志向のモデル化の方法論	112
	(1)Sugar scrape	112
	(2)QOL	113
	(3)BIM	113
	(4)Prospect 理論	114
5.5.4	意思決定のルール	115
5.6	鉄筋の加速期到達率の試算	116
5.6.1	建築物群のシナリオの概要	116
5.6.2	加速期到達率の群単位の集計	119
5.7	小結	121
	参考文献	123
第6章 経年劣化のリスク分析に対する総合科学的アプローチ		127
6.1	小序	127
6.2	耐震性による評価の課題と対策	128
6.3	耐震診断用モデル	129
6.3.1	耐震性関連の仕様	129
6.3.2	鉄筋の腐食による強度低下	130
6.3.3	地震時被害	131
	(1)構造耐震判定指標	131
	(2)人的被害	132
6.4	地震時被害の試算	133
6.4.1	健全な建築物群の地震時被害	133
6.4.2	経年劣化した建築物群の地震時被害	135
6.4.3	耐用年数の定義	140
6.5	超長期修繕プロセスの考察	140
6.5.1	超長期修繕プロセスの検討方針	140
6.5.2	中性化確率と構造耐震指標の対初期値比	140
6.5.3	加速期到達率と構造耐震指標の対初期値比	142
6.6	小結	145
	参考文献	147
第7章 結論		149
7.1	研究の結論	149
7.2	今後の課題と展望	155
	謝辞	158

# 第1章 序論

## Chapter1: Introduction

### 1.1 本研究の背景

建築物が、異なる尺度の重層の人間活動の中で、理論を特定することなく、時代毎に Emerson のいう一人の賢人<sup>1-1)</sup>を繰返し迎え、その認識を共有するかたちで、徐々に変容してきたことは事実である。必然的に、建築物の要求性能には無軌道なまでの多様性が認められるが、各性能の実現に対する技術論は、近年に至っては個々が真理である幻想を与える迄に成熟している。しかし、かつて Locke が知性論<sup>1-2)</sup>において、単純観念から、経験に基づく抽象作業を経て、一般化のための複雑観念が創出されると論じたが、現代の科学技術は、極限の探求と万物のシステム化を、並行して、社会の予想を超える速度で進めており、自身が以前に科学的に提示した単純観念に内在する抽象性を直接発見するジレンマさえ生じる段階に達している。

人間の可能性に照らすと、単純観念に普遍性を期待することは困難であり、今現在の認識を記述するための最低限の抽象が不可避となる。しかし、昨今では、The Club of Rome が提起した成長の限界<sup>1-3)</sup>と、これに続く持続可能社会への移行が、我が国の建築物に人類の経験しない 100 年を超える超長期までの延命を求めており、全ての技術的思想に内在する抽象の適性に関し、新たに同時間軸で議論する必要を生じると共に、建築物の超長期供用の可否というプリミティブな課題が派生している。

そこで、建築物の耐用年数に関する我が国の研究を回顧すると、先の大戦後の資材不足下の需要推計に端を発し、高度経済成長期に露見した品質問題、次世代への経済および環境的負荷へと動機を替え、国際的かつ分野横断的に継続されている。

超長期に亘る供用が広く期待できる構造は RC 造にほぼ限定され、同構造に特化する最も大きな動きを挙げれば、1980 年代の建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」により、建築物の高耐久仕様が提案され、予防保全の重要性、劣化現象の不確実性が明らかとなり<sup>1-4)</sup>、同プロジ

エクトで得られた耐用年数推定手法である Factor method が, ISO15686-1<sup>5)</sup>の骨子を形成する迄に至っている。同手法は, 標準的な使用条件下の耐用年数であるリファレンスサービスマイルに, 構成材の品質, 環境等の影響因子に関する係数を乗じて耐用年数を定めるもので, ISO の基盤になることを期して fib が刊行した, コンクリートに関する Dura Crete, DARTS project の成果を含む Model Code<sup>16)</sup>と比べてシンプルな構成である。但し, 同規格には実績, 経験, 実験等に基づく耐用年数の予測手法も併記されており, CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction) と RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) の共同研究報告は, 複数の劣化要因の干渉, 実現象の単純化, データ不足及び供用環境, 気候, 施工品質, 使用状態等のデータとの直接的な関係の欠如を, Factor method の課題として明記している<sup>17)</sup>。また, NIST (National Institute of Standards and Technology) は, ACI (American Concrete Institute), ASTM International と共催したコンクリートの耐用年数評価に関する研究集会において, RILEM, CEN (European Committee for Standardization) と共同で, 試験法, 仕様, ガイドライン, 規格の構築に対処する必要性を指摘し<sup>18)</sup>, モデル構築にあたる ACI は具体的な物理化学モデルを提示したが<sup>19)</sup>, Factor method に依らない複数の手法を併記しており, 技術者の判断が介在する余地を残している。これらの事実は, 数多の研究機関が, 耐用年数評価に関する単純観念の一般化を探究する過程で, 実構造物と関連付けるための抽象化を科学者として敬遠した結果, 全分野に亘る共通則の確立に至っていない現実を示している。

膨大な研究成果は, 論文に限定せず, 学協会の指針やインターネット等の多様な媒体を通じて公開され, 建築主, 建物所有者, 技術者等のエンドユーザーに委ねられているが, 少なくとも材料学, 自然科学, 建築学の三分野に亘る当該領域の研究には個々を連成するプラットフォームがないため, 法規や関連指針で標準化されていない最新の手法については, 重大な意思決定を委ねられたユーザーが, 同法で得られた結果と異なる現象が具体化した際の責任論のリスク・ヘッジを優先し, トランスディシプリナリー<sup>110)</sup>に至らないことは自明である。

一方で, 建築物の耐用年数評価に対する市場の喫緊のニーズは, 前述した持続可能社会への移行に限定されず, 放射性廃棄物貯蔵庫, 超長期住宅, 次世代リニューアブル, 人工地盤, 千年ダム等の建築物単体に関するものから, 不動産証券化, 金融機関及び企業の資産評価, 超長期に亘る人口減少を俯瞰した社会インフラのスマートシュリンクの効率化や, 高経年時の景観財としての価値創造に伴う群単位の延命等の建築物群に関するものまで, 社会情勢の変化に則して, 日々, 派生し続けている。

周知であるが, これまで建築物の耐用年数に関する基礎研究と実社会の関連付けを阻害してきた最大の抽象的要因は, 施設運営における, 建物所有者による修繕や改修等の意思決定である。建築物を特定し, 世代を超える人間の志向に決定論的に言及するのは困難であるが, 同時に更新において支配的で, その他の物理化学的な手段の有意性を損なうため, 高次の課題として看過する状態が続いている。

但し, 現在の重厚な社会システムでは, 建物所有者の選択肢が, 国・自治体の法規や学協会の関連指針の管理下にあるため, 建築物群単位で更新過程を俯瞰すれば, 個々の建物所有者の主観を確率的に設定でき, 有識者達が標準と考える各供用環境のための耐用年数を, 一般論として具体化することは可能である。また, 近年の計算機の能力向上によって, 建築物群単位の膨大な部材・材料の性能の推移を解析することも, 部分的な抽象を前提とすれば, 技術的には不可能ではない。建築物の耐用年数に関する研究は, 市場と方法論が群単位に及ぶに至り, 新しい局面を迎えている。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、建築物群の超長期に亘る更新過程の解析的考察から、群単位の解析のイメージを共有した上で、同解析で重要な社会的影響を示す RC 造建築物を対象とし、コンクリートの劣化モデルへの材料学的アプローチ、気候変動を伴う環境モデルへの自然科学的アプローチ、材料の劣化モデルを部材単位、建築物単位、建築物群単位に拡張する建築学的アプローチ、劣化現象を社会的影響と関連付ける総合科学的アプローチによって、経年劣化に関わる研究のオントロジーを構築し、各階層で具体化するマルチプルなリスクの考察を通じて、超長期的時間軸における耐用年数の概念を可視化することを目的とする。

この際、計算機の能力による制約を回避するため、解析システムではなく、オントロジーを本研究の成果物とした点を改めて注記する。

本研究の解析の全体像を、Fig.1-1 に示す。

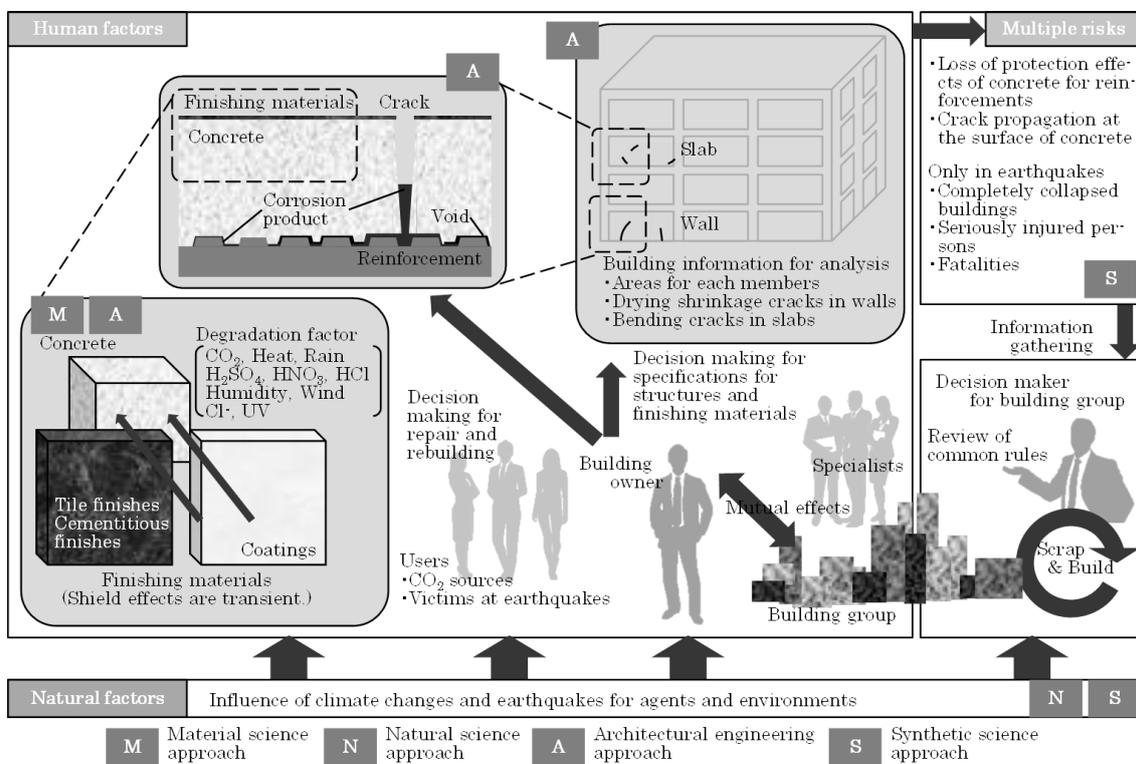


Fig.1-1 Whole image of this work

同図で示した本研究の特徴を従来の研究と対比して概説すると、第一に、従来の当該分野の研究は、物理化学的劣化モデルの精緻化に傾倒した結果、過大・過小評価の両極に類する多様な式が派生し、算定式の選定時の合意形成自体が一つの課題となっていたが、本研究は関係する全ての式を連成するため、こうした愚がなく、トランスディシプリナリーが促進される。

第二に、従来は数十年単位の調査や実験に基づいて、一建築物の安全な仕様を追求してきたため、実績の無い超長期の挙動について言及できなかったが、本研究は解析により数百年の劣化過程を定量するため、同時間軸の議論が可能となり、都市計画や環境問題等のマクロな課題まで言及できる。

第三に、従来は、建築物単位で、一部材の下限評価に依って耐用年数を定義したため、居住空間にお

ける適用範囲が限られるコンクリート打放し仕上げ部分で当該年数が確定し、建築物の性能、例えば耐震性の劣化過程に言及しても実態との乖離があった。一方、本研究は、解析対象を群単位に拡張することで、建物所有者の志向を統計的にモデル化し、これと関連付けられる多様な仕上材や修繕計画を適用した実態に近い建築物に関し、耐震性の劣化過程まで言及できる。

第四に、従来は、中性化確率、鉄筋の腐食、耐震性を解析しても、社会的な評価指標である経済性(LCC)や環境性(LCA)を信頼できる条件、特に期間に制約があったが、本研究は、地震時の人的被害まで予測するため、仕上材や設備の仕様が劇的に変わらなければ、解に普遍性が期待できる。耐用年数に関する普遍的な評価指標を得ることで、超長期的時間軸における経年劣化の社会的影響を検討できるようになる。

上述した本研究の利点は、自治体のまちづくり、複数の建物所有者の施設運営、保険会社の地震保険、専門業者の技術提案等において、合理化や高度化を促進し、これらに支えられた環境に居住する住民の生活の質の向上に貢献できるものとする。

### 1.3 本研究の構成

本研究では、前節で上述した通り、前例の少ない建築物群単位の解析の試算例を示し、イメージを共有した上で、準拠するアプローチ毎にモデルを概説する。本文中の各アプローチの定義は、それぞれ以下の通りである。

- ・ 総合科学的アプローチ…行政の調査等、非技術論文の知見も踏まえ、包括的にモデルを構築
- ・ 建築学的アプローチ…人間活動が介在する建築物内の現象に関する技術論文、又は建築物の設計指針に準拠してモデルを構築
- ・ 材料学的アプローチ…材料分野の技術論文に準拠してモデルを構築
- ・ 自然科学的アプローチ…環境分野の技術論文に準拠してモデルを構築

各章の概要を以下に列記するが、各アプローチの技術の現状については、論旨の明快のため、各章の小序で個別に説明する。

その上で、第1章は本章であり、研究の背景と目的、構成を示す。

第2章では、群単位の解析像を共有するため、経験的耐用年数、法的耐用年数、物理的耐用年数、社会的耐用年数を勘案する更新の意思決定に関してフロー志向をもつ建物所有者が大勢を占める建築物群において、行政の奨励でストック志向が普及する500年間の過程を、ストック志向の建物所有者の全体に対する割合、建築物群の経年数の平均及び標準偏差を評価指標として、集団の繰返し囚人のジレンマに学習機能を付与した間接的互惠関係に関するアルゴリズムである下方OFTを用いて試算し、RC造高耐久建築物の社会的影響を可視化する。

第3章では、一般建築物のコンクリートに作用する主要な外的要因を、一括して評価可能な解析モデルを得るため、コンクリート中の反応を含む物質移動特性を、酸性雨を想定した $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HCl}$ を含む水、大気中の $\text{CO}_2$ 、 $\text{Cl}^-$ 毎に材料学的アプローチによって整理し、反応型非定常拡散方程式として連成した上、屋外暴露した打放しコンクリートの中性化深さを再現し、モデルの妥当性を示す。

第4章では、第3章で確定した材料の劣化モデルの検証時に用いた環境モデルを、自然科学的アプローチによって超長期に展開するため、RCP (Representative Concentration Pathway) シナリオへの適性を検討して、熱、水及び大気環境に大別してモデル化し、打放しコンクリートの超長期経年劣化過程

の試算に供して、妥当性を確認した上で、群単位の解析に用いる簡易式を示す。

第5章では、第3, 4章で構築した材料及び環境のモデルを、部材、建築物、建築物群単位の拡張するため、修繕を伴う仕上材及び躯体の劣化モデル、建築物の基本計画、建物所有者のエージェントベースモデリングに建築学的にアプローチし、得られた解法で、重視する技術的志向の異なるシナリオを与えた建築物群の鉄筋の腐食の指標である加速期到達率を集計して、群単位の検討の有意性を示す。

第6章では、第5章で確定した建築物群の鉄筋の加速期到達率の統計と社会的影響を総合科学的アプローチによって関連付けるため、耐震診断用の仕様、鉄筋の腐食による耐力低下、構造耐震判定指標による統計的な地震動のモデル、地震時被害予測に関する行政のモデルを整理し、上記加速期到達率の算出過程で得られる鉄筋の腐食量に基づく重量減少率によって、力学特性を補正した鉄筋の諸元を日本建築防災協会の二次診断法に入力し、被災時の建築物群内の人的及び建物被害の経年劣化による推移を定量化して、建築物群の耐用年数に関する概念を示す。

第7章では、各章の結論を整理した上、今後の展望について言及する。

## 参考文献

- 1-1) 新渡戸稲造著, 須知徳平訳: 武士道対訳 BUSHIDO, 講談社インターナショナル株式会社, 1998
- 1-2) J., Locke 著, 大槻春彦: 人間知性論 1~4, 岩波書店, 1997
- 1-3) D.H., Meadows, D.L., Meadows, J., Randers, W.W., Behrens III : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind: The Limits to Growth, Universe Books, 1972
- 1-4) 建設大臣官房技術調査室監修/国土開発技術研究センター編: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986
- 1-5) ISO/TC59 SC14 : ISO15686-Part1, General Principals, International Organization for Standardization, 2000
- 1-6) fib Task Group 5,6 : fib bulletin 34—Model Code for Service Life Design, Fédération internationale du béton, 2006
- 1-7) CIB W080/RILEM 175-SLM : Performance Based Methods for Service Life Prediction State of the Art Reports, Conseil International du Bâtiment, 2004
- 1-8) G., Frohnsdorff : Modelling Service Life and Life-Cycle Cost of Steel-Reinforced Concrete Report from the NIST/ACI/ASTM Workshop Held in Gaithersburg, MD on November 9-10, National Institute of Standards and Technology, 1998
- 1-9) ACI Committee 365 : Service-Life Prediction, American Concrete Institute, 2000
- 1-10) 日本学術会議: 環境学の俯瞰, 2014



## 第2章 建築物群の更新過程の解析像の共有

### Chapter2: Sharing the Image of the Analysis for Rebuilding Process of Building Groups

#### 2.1 小序

建築物の耐用年数を群単位で解析する場合、汎用式を繰返すだけでは解析は完結しない。竣工年の異なる建築物で構成される群は、異なるグレードの仕様で構築されている上、建物所有者の志向や、意思決定を求められる時点の建築物の劣化状態が異なり、改修の要否の判断基準も近隣の影響を受ける。即ち、建築物群単位で劣化モデルを連成させる必要を生じるが、前章で述べた様に、計算機の能力との関係性に起因するモデルの制約により、検討対象の抽象化が必要となり、無数のアウトプットを生じうる。本章では、将来の計算機の能力の向上を俯瞰し、要素技術のモデルを簡略化した上で、解析の全体像に関する一つの解を示し、解析のイメージを共有することを目的とする。

建築物群単位の耐用年数評価に関する研究を、既往の研究体系に求めると、土地利用のモデル化に関する研究が最も近い。当該分野の研究には、Lowry のピッツバーグモデル<sup>21)</sup>や Anas の住宅市場のダイナミックモデル<sup>22)</sup>を研鑽した事例が多く、国内では、例えば、林らが、世帯のライフサイクルの変化に応じた住替需要と立地余剰及び住宅供給量をモデル化した上、意思決定の最小単位である個人・世帯主の行動をモンテカルロ法で与える Fig.2-1 の概念で示されるマイクロシミュレーションを行い、基準年から5年後の名古屋都市圏の住宅立地を試算し、解析の有意性を示している<sup>23)</sup>。

また、横井らは、産業生産額変化率と人口動態に基づき、Fig.2-2 に示す産業、医療、学校、住居の床面積を推計する将来床面積推計システムと、建築時期毎の建築物の耐用年数と用途地域、立地選択のルールに基づく新築床面積推計システムを構築した上、2050年までの省エネ技術効率・導入率の推移シナリオを仮定し、横浜市におけるCO<sub>2</sub>削減効果を試算している<sup>24)</sup>。

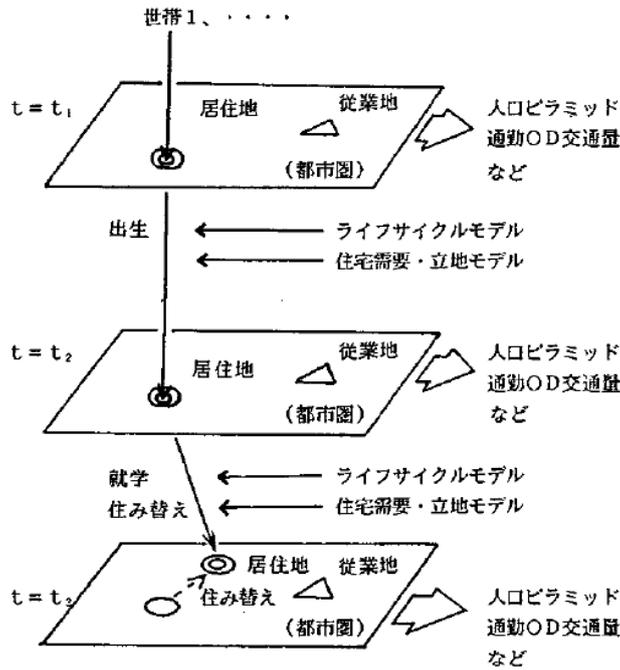


Fig.2-1 Conceptual scheme for micro simulations<sup>2-3)</sup>

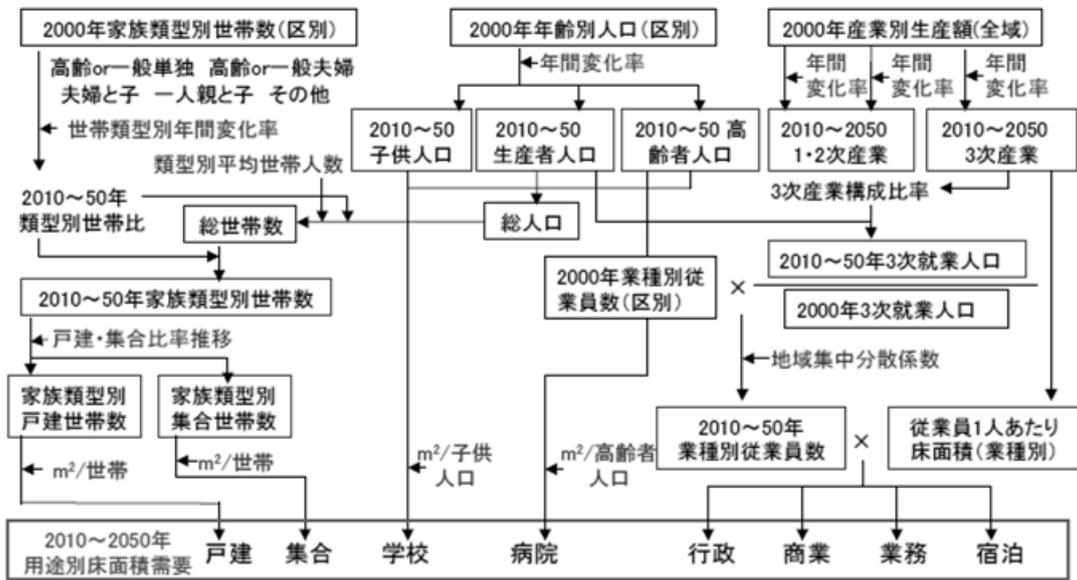


Fig.2-2 Estimation system for future floor area<sup>2-4)</sup>

但し、何れも人口動態を基準として、土地利用に関わる主要因を網羅し、評価の精度向上を図った結果、検討期間が短く、超長期の検討の参考にはならない。仮に、当該モデルを超長期に展開する場合、サブモデルの誤差の蓄積による解の発散を回避するため、仮想シナリオを策定して、制約を強化する必要を生じ、結果的に、モデルを多様化する意義が損なわれる。また、超長期に亘って供用可能な所謂高耐久建築物の計画は、建設予定地近隣における建築物群全体の耐用年数の長期化を期待しているが、直接的互恵関係のない将来世代のために、高耐久建築物が普及する過程を再現するサブモデルはない。

しかし、例えば、解析対象を人口動態が安定した建築物群に限定して、ダイナミックシステムの最大の課題を排除した上、不確実性の高い建物用途や立地条件等の詳細情報も排除し、土地利用モデルを建築物の耐用年数に特化した個別課題として合理化すれば、巨視的な解析は可能である。当然、解に決定的な影響をもつ人口動態の議論は必要であるが、解析行為を成立させた上でモデルを追加すればよい。

一方で、20世紀末に日本建築学会会長が地球環境会長声明<sup>25)</sup>を公表しているが、建築物の高経年化は、少子高齢化による人口構造的な動機だけではなく、建物所有者の環境意識の向上も作用し、今後、確実に進む。現行法規に基づく建築物の耐用年数が数十年であるのに対し、例えば、RC造建築物の物理的耐用年数は数百年に及ぶ場合があり、建築物の仕様選択の影響は、仕様を固定した場合の物理的予測の方法論の域を明らかに上回る。即ち、建築物群の更新過程を記述するための決定的要因は、更新に際する高耐久化の意思決定となり、人口動態がない理想条件では、問題はほぼ二者択一まで単純化される。

こうしたモデル化の手法は、個々の建築物に、物理的耐用年数等の意思決定のための情報を与え、建築物群としての相互作用を再現する点でエージェントベースモデリング<sup>26)</sup>に分類されるが、二者択一の対立構造は、当該研究分野の源流である Shelling のセグレーションモデル<sup>27)</sup>まで回帰される。

次に、間接的互惠関係を表現するアルゴリズムであるが、二者択一のジレンマ問題において、利他的行動が発生する過程をボトムアップ的に考察するために構築された下方 OFT (Out for Tit-For-Tat)<sup>28)</sup>がある。1:1の繰返し囚人のジレンマで最適な戦略である Tit-For-Tat 戦略<sup>29)</sup>は、自分の行為に対する次の報復を回避するため、相互協力が発生する過程を再現するのに対し、集団における繰返し囚人のジレンマにおいて、裏切りを受けると相手との関係を絶つ選択肢を追加したものが OFT 戦略である。更に、下方 OFT は、エージェント毎に無作為に定めた利他性の値に基づき、個々が常に利他的行動をとるが、報酬を与える相手が自分の満足水準以上、他者に報酬を与えていない場合、奉仕の対象を変える学習機能を具備している。また、全員が利他的な集団の全体の利益が、全員が利己的な集団の全体の利益を超過する様に、報酬を与える側より、受ける側の評価を高く設定しているため、利他性に関する情報を共有・学習しながら行動することで、サンクション効果によって、最終的には利他的集団が大勢を占める過程が説明できる<sup>28)</sup>。

建築物群の更新過程においても、利他的な志向の重要性が喚起される環境では、技術、制度、市況、行政の支援等の情報共有が適切に行われれば、必然的に、利己的集団に対するサンクションが強まることは自明である。実現性に関しては、例えば、不動産の購買活動において、購買者が、CGM (Consumer Generated Media) 等を通じ、自分と類似する他の購買者や購買情報に準拠することが知られており<sup>210)</sup>、この問題に対して、下方 OFT を用いることは妥当であると言える。

その上で、時間軸をもつエージェントの意思決定に同アルゴリズムを導入すると、高耐久化が普及する過程が説明可能になるが、普及速度に関する客観性はない。しかし、同課題も、アルゴリズムの定数を基準となる建築物群における任意のシナリオに適合する様に収斂して得た上、同定数を使用して、評価対象の建築物群の更新過程を解析し、相対比較によって考察すれば、同速度の客観性を確保することが出来る。

総じて、耐用年数評価に必要な情報に特化して解析範囲を限定した上、持続可能社会への移行を俯瞰したフロー志向とストック志向の建物所有者の二者択一の対立構造まで問題を単純化すれば、既往の間接的互惠関係に関するアルゴリズムに基づいて、建築物群の建物所有者の更新に関する意思決定をモデル化し、群の耐用年数の統計量の推移を定量することは可能であると言える。以下に詳細を述べる。

## 2.2 超長期のエージェント像

建築物群の更新の相互作用を解析する際、意思決定がモデル化の対象となるため、通常、意思決定者であるエージェントは建築主又は建物所有者になる。しかし、超長期を扱う場合、不動産の売買や世代交代が不可避であるため、エージェントは一個人ではなく動的に扱う必要がある。そこで、本解析では、エージェントを人間ではなく、一敷地上の建設行為に関する情報を擬人化した存在として扱う。また、エージェントの意思決定の動機である報酬は俯瞰的には行政が決定するため、本解析は、行政を含めて、ヒエラルキーが潜在する擬人的なマルチエージェントに関する解析になる。

その上で、敷地の在り方についてであるが、人口動態の安定と建物用途の非住宅系への限定を制約として付加する。全ての建築物を対象にする場合、住宅系と非住宅系の更新の動機の相違に起因し、昼間人口と夜間人口の比、更には他建築物群との交通をモデル化する必要があるが、本条件により、これらのモデル化が不要になる。社会インフラのモデルは、本研究のモデルよりも大きく、将来の連成を期する高次の課題である。この際、木造建築物の大勢は住宅系であるため、構造形式も、SRC 造を含む RC 造と S 造の二種類に大別され、解析モデルがより簡単になる。

## 2.3 耐用年数の設定

本解析では、建物所有者の意思決定の多様性を表現するため、建築物の経験的耐用年数、法的耐用年数、物理的耐用年数、社会的耐用年数の四種類の耐用年数を扱う。

第一に、経験的耐用年数は、更新時の経年数に関する統計量であり、2-1 式に示すワイブル分布が多用される。同年数には、法的耐用年数や物理的耐用年数の影響も含まれているが、ここでは、建築物群の初期状態の設定に限定して用い、他の耐用年数と区分する。

$$R(t) = \exp \left\{ - \left( \frac{t-\delta}{\eta} \right)^m \right\} \quad (2-1)$$

ここで、 $t$  : 材齢、 $R(t)$  : 残存率関数、 $m$  : 形状係数、 $\delta$  : 遅延係数、 $\eta$  : 特性寿命

具体的な定数は、那覇市を除く全国の都道府県庁所在地 46 市に川崎市と北九州市を加えた 48 市の固定資産台帳から、小松らが作成した耐用年数の分布のうち、事務所の値を引用する。構造形式毎のワイブル係数、尺度パラメーター、位置パラメーターは、S 造で順に、3.127, 40.444, -7.329, RC 造で順に、2.887, 40.591, 0.027 である<sup>2-11)</sup>。

第二に、法的耐用年数は、建築物の減価償却期間を想定した年数とする。法的には、減税、環境負荷低減の観点から、増減の何れの改正も想定されるため、シナリオの一環として、任意に定める。また、超長期に亘って、建築物群が存続することが前提であるため、群単位の撤退に係る法的措置も対象外とする。具体的な年数は、事務所の減価償却期間を引用し、S 造で 38 年、RC 造で 50 年とする。

第三に、物理的耐用年数であるが、S 造に関しては、構造の特性上、耐久性を期待する事例が希少であることと、保全によって主観的に耐用年数が定められることに配慮し、物理的耐用年数を定めず、経験的耐用年数で代替する。RC 造に関しては、竣工年を代表する設計基準強度からなる、室内の打放しコンクリートに対し、日本建築学会の中性化予測式<sup>2-12)</sup>により、任意のかぶり厚さの鉄筋が腐食する深さまで中性化する経年数の分布を求め、同分布を順守する様に、建築物毎に乱数で与える。室外は、鉄筋発錆後のかぶりコンクリートの剥落までの期間が短く、第三者障害に配慮して、仕上げの仕様や保全において予防措置を講じるため、仮に検討の対象外とする。その上で、RC 造建築物の物理的耐用年数の算定には、コンクリートの W/C、雰囲気温度湿度、CO<sub>2</sub>濃度、鉄筋のかぶり厚さ及び各統計量が必要になる。

まず、コンクリートの W/C は、東京都周辺のレディーミクストコンクリートの設計基準強度の推移<sup>2-13)</sup>を線形回帰し、日本建築学会の関連仕様書<sup>2-14)</sup>に記載された東京圏の呼び強度と W/C の関係を Abrams 式に近似した上、設計基準強度と呼び強度を同じと仮定して得る。また、雰囲気の情報、東京都の平年値に準じ、気温は 15.4℃、湿度は 65%、CO<sub>2</sub>濃度は中性化予測式の室内用に汎用されてきた 0.2%<sup>2-12)</sup>とする。鉄筋のかぶり厚さの代表値は仮に全数 40mm とし、中性化深さの変動係数を 0.1、かぶり厚さの標準偏差を 10mm とする。

第四に、社会的耐用年数は、任意のエージェントが、建築物群内の高耐久建築物の普及率に配慮して、耐用年数に関する全ての情報を俯瞰した上で、主体的に選択した年数とする。エージェントがもつ耐用年数に関する具体的な情報は上述してきた 3 種類であるが、個々の耐用年数に基づく意思決定の機会の都度、志向に応じて、更新を検討し、当該時点が社会的耐用年数に該当するか判断する。社会的耐用年数の支配的要因は群内の志向であり、内包される各耐用年数の度数分布とは、異なる分布を呈する。

なお、本試算で扱わない主要な耐用年数の定義に、機能的耐用年数がある。5.1 で後述するが、機能即ち要求性能の普遍的な評価は難しく、経済性によって間接的に評価する場合も、本解析の対象である非住宅系建築物の更新時の経済的リスクに照らすと、更新を検討する重要な要因となっても副次的であり<sup>2-15)</sup>、単独で更新の動機にならないことから、ここでは対象外とする。

## 2.4 初期集団の設定

エージェントの初期集団は、建築物に関する情報である竣工年、構造形式、最低供用年数と、上述した法的耐用年数、経験的耐用年数、物理的耐用年数、運用面に関する情報である大規模修繕周期、意思決定時の志向に関する情報によって構成する。

相対比較の基準となる建築物群（以下、基準建築物群）を例に解説すると、まず、竣工年については、国土交通省の建設投資の統計<sup>2-16)</sup> <sup>2-17)</sup>を参考に、日本全土の着工床面積の推移を定める。更に、経験的耐用年数に準じて更新される仮定のもと、各年の任意の経年数の面積比を求め、解析を開始時点、ここでは 2015 年時点のエージェント数の比として解析に供する。個々の構造形式は、同様に建設投資の統計から非住宅系の S 造、RC 造（SRC 造を含む）の比率を得て、同比率を順守する様に無作為に与える。

次に、最低供用年数は、各耐用年数を統計分布に基づきモンテカルロ法で与える際、実際にありえない短期で更新する可能性があるため、予防的に定める年数である。ここでは、S 造は瑕疵担保期限である 10 年、耐久性が期待される RC 造は、民法における求償の上限である 20 年を下限として設定する。

また、大規模修繕周期は躯体の修繕を想定し、12 年又は 15 年を無作為に与える。

更に、意思決定時の志向は、高耐久建築物の建設を志向するエージェントをストック志向、従来の経験的耐用年数や法的耐用年数での更新を志向するか、更新に拘りのないエージェントをフロー志向と定義し、エージェントを二分する。初期集団では、ストック志向のエージェントの比率が仮に 5%になる様に、無作為に与える。

最後にエージェントの数は、解析開始時点の建築物群の竣工年毎の件数の比率を再現した上、解の多様性を維持する観点から、1,000 件設定する。

上述した仮定に基づく初期集団に関し、各耐用年数から経年数を減じた年数のヒストグラムを、Fig.2-3 に示す。図中の社会的耐用年数は、解析開始時の値であるため、意思決定の影響が含まれていない。社会的耐用年数の残存年数の分布は、経験的耐用年数と類似するが、他の耐用年数の影響によって多峰性を呈する。俯瞰的には、更新までの年数が 30 年以内の建築物がほぼ均等に分布しており、人口動態とス

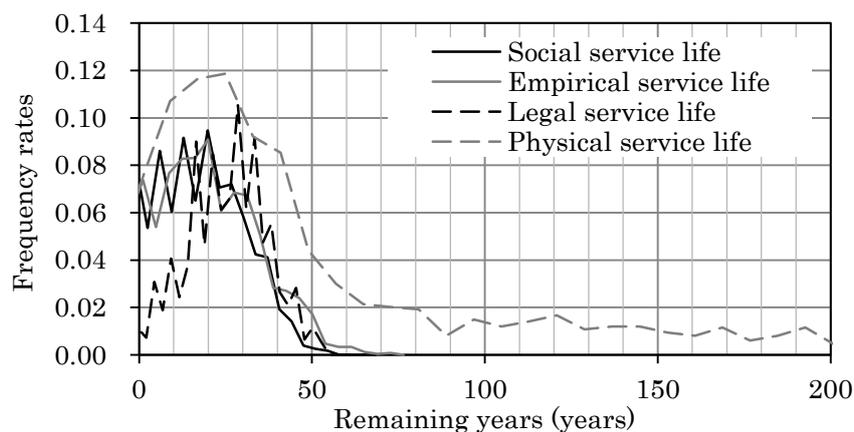


Fig.2-3 Frequency rates of remaining service lives

ストック・フローの志向に変状がない限り、当面は更新工事の量が安定することを示唆している。同年数に関し、図示しない負の領域に相当数の建築物が分布するのは、各耐用年数の設定において、耐用年数経過後も継続使用される少数の建築物の固有の事情を考慮せず、一義的に乱数によったためである。

## 2.5 修正下方 OFT の概要

下方 OFT を建築物群の更新過程に用いるには、解釈の追加やプロセスの見直しを要するため、修正下方 OFT として、Fig.2-4 に示す通り、アルゴリズムを修正する。

まず、各エージェントは、任意の経年数に達すると意思表示のテーブルに上がり、同エージェント間のみで有効なネットワーク数をべき乗則で与えられ、同数分のエージェントに無作為に報酬を配分する。ネットワーク数は、下方 OFT の利他性の値に該当し、本研究では、Dorogovtsev らに準じて<sup>2-18)</sup>、2-2 式で表現する。

$$d(k) = k^{-\gamma}$$

ここで、 $d(k)$  : 利他性の値の確率、 $\gamma$  : べき乗指数 (2-2)

なお、建築物群に与えるシナリオの特性を記述するためには、他にも、ネットワーク数の上下限、ネットワーク数の上限をもつエージェントの数、報酬の増加割合の調整を要する。この際、末広がり度数分布を呈する、べき乗指数が 2 を上回る範囲では、当年の評価対象のエージェント数で定まるネットワーク数が十分小さく、ネットワーク数の上下限と、上限をもつエージェント数の設定が形骸化することに配慮すると、問題はべき乗指数と報酬の割増になる。一般には二変数の近似によって解が得られるが、ここではトレンドが表現できればよいので、望まれる度数分布の下限近傍を実現し、既往の研究<sup>2-19)</sup>において中程度の値として用いられる 2.5 をべき乗指数とした上で、報酬の割増のみを調整し、シナリオを記述する。

修正下方 OFT のフローの説明に戻ると、概念的には、報酬の配分は常時行われているが、任意の経年数で更新に向けた情報交換を行う際に、報酬の授受の履歴が共有される状態を再現している。この際、報酬を与えた側は資本が減るので 1 点減点され、受けた側は 1 点加点されるが、ストック志向のエージェントに限り、行政の支援により、受けた報酬が一定割合増える。2 回目の配分では、各エージェントは前回と同じエージェントに報酬を配分しようとするが、自他が報酬を配分したエージェント数の比である満足水準が 1 を下回る、即ち、相手の配分数が自分より少ない場合、配分先を無作為に変更する。テ

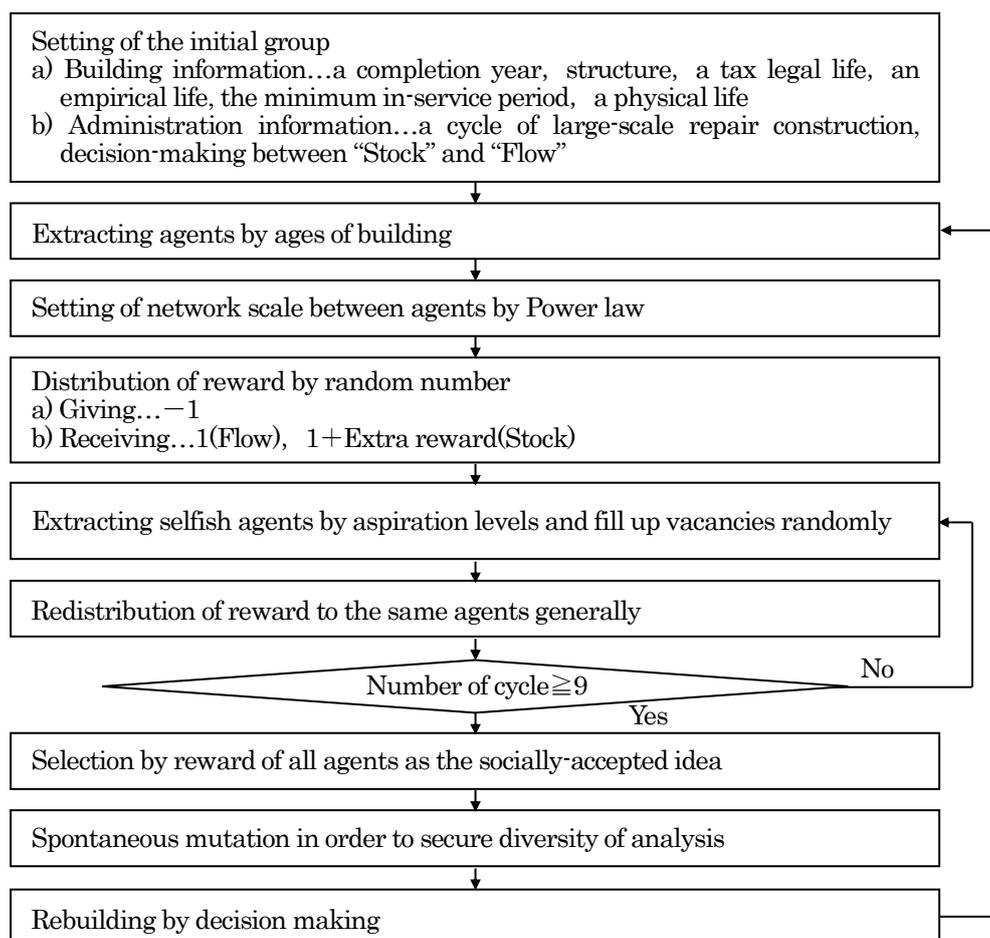


Fig.2-4 Flow of modified downward-OFT

テーブル上の全エージェントでこれを9回繰り返した後、同年の全10回の得点を決定し、テーブル外も含む全エージェントの得点の平均値と標準偏差に基づく閾値を下回るエージェントに対し、大規模修繕周期やストック・フローの志向等の運用面の情報を、得点が上位のエージェントの情報と書き換える淘汰を行う。また、解の多様性を保つため、突然変異として、意思表示するエージェントの一定割合に関し、運用面の情報を無作為に書き換える。

なお、フロー志向のエージェントは、意思表示の都度、同時点のフロー志向の比率に準じ、一般的な仕様で建替え、ストック志向のエージェントは、物理的耐用年数到達時に、長期供用に適した計画供用期間100年の物理的耐用年数をもつRC造建築物に建替える。S造建築物でも修繕によって100年間の供用は不可能ではないが、一般的な建築物を想定して、修繕頻度を抑制可能な仕様を優先した結果である。また、建替に際しては、ストック・フローの志向以外の全ての情報を更新する。この際、ストック志向の建築物の経験的耐用年数は物理的耐用年数と同じとする。

上記が1年間に相当するルーチンであり、任意の年数回繰り返すことで、ストック志向のエージェントが増加する、高耐久建築物が普及する人工社会の社会的耐用年数を可視化する。なお、意思表示のテーブルに上がる経年数は、志向毎に基準を定めて設定する。即ち、フロー志向は、法的耐用年数及び同年以降の大規模修繕周期の前後2年、ストック志向は、物理的耐用年数の前後2年とする。但し、毎年、

全エージェントの配点体系に基づき淘汰を行うため、全エージェントの志向は、社会通念として、常時反映される。

## 2.6 基準建築物群の更新過程

前述した日本建築学会会長の地球環境会長声明<sup>25)</sup>では、我が国の建築分野でのCO<sub>2</sub>排出量の削減について2つの見解を示しているが、その一つにおいて、「CO<sub>2</sub>排出量の削減のためには、我が国の建築物の耐用年数を3倍に延長することが必要不可欠であり、また可能であると考え」としている。地震力については免制震技術の採用、建築設備については配管腐食等のライフラインの信頼性向上対策が必要としているが、欧米では既に我が国が目標とする耐用年数以上供用している事実も併記している。前節の仮定に照らすと、免制震やライフラインの信頼性確保を実現する建築物が耐用年数100年の仕様であり、現在の性能のまま、欧米に準じて高経年化するのは、供用中にフロー志向からストック志向に転じ、物理的耐用年数まで継続利用する状態である。

その上で、地球環境会長声明に則することを意図して、群の平均経年数が3倍になる過程を軸にTable2-1の3シナリオを設定する。

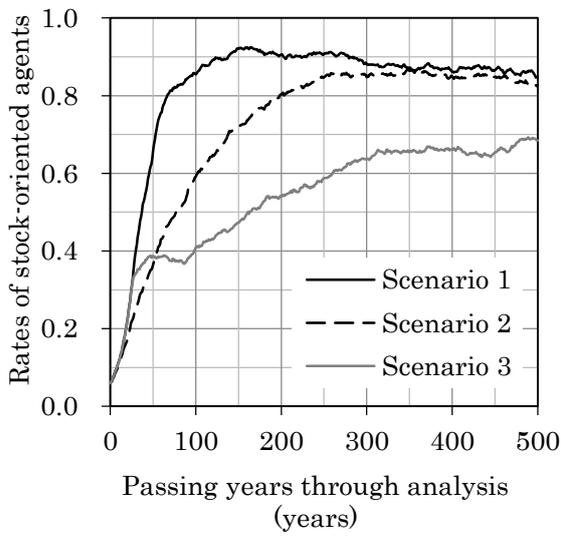
Table2-1 Scenarios for rebuilding processes in building groups

Scenario1	Average passing years of buildings in the group increase 3times in this century (2015-2100).
Scenario2	Average passing years of buildings in the group increase 2times in this century (2015-2100).
Scenario3	Until the rates of agents oriented for “Stock” are 30% for all agents, the increasing rates of average passing years are same as them in scenario1 and extra rewards are stopped subsequently.

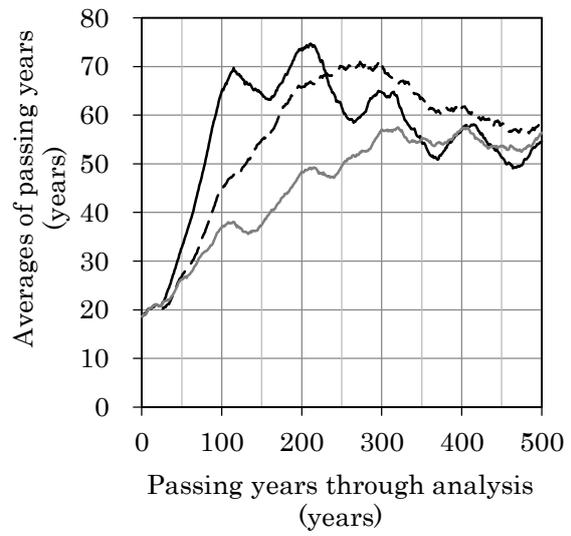
ストック志向の比率、経年数の平均及び標準偏差の推移を、Fig.2-5に示す。具体的な割増は、収斂の結果、シナリオ1、3で2倍、シナリオ2で1.5倍となる。

同図において、ストック志向の比率に関し、シナリオ1は、解析開始から40年で半数に達し、70年以降は0.8~0.9で推移している。シナリオ2は解析開始から50年は全シナリオの最小値をとるが、その後は他のシナリオの中間を推移し、解析終了時点でシナリオ1とほぼ同値に達する。シナリオ3は、割増を中断する同率0.3までシナリオ1と同じ履歴をとるが、同値到達後に一度停滞し、改めて増加して、解析終了時点で約0.7に達する。ストック志向の比率が0.3以上になるのは、初期に高得点を取得したストック志向のエージェントが人工社会の淘汰の閾値を上げ、フロー志向を淘汰するためである。この様に、利他的行動だけでなく、淘汰によってもストック志向が漸増するのは、下方OFT特有の現象である。また、シナリオ3に関し、解析開始から50年頃に小さいピークが見られるのは、ストック志向の普及が遅滞する中で、建築物群の竣工年の構成の影響が顕在化したものである。下方OFTを用いたことで、シナリオと建築物群の構成の影響が、解析結果に複合的に反映されていると言える。

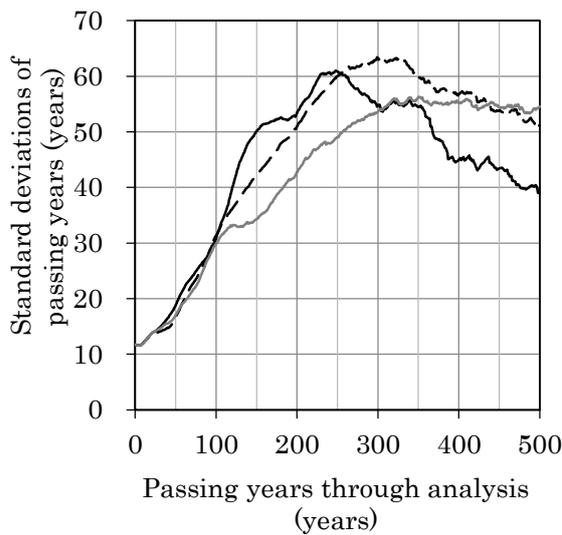
次に、平均経年数であるが、全てのシナリオが、解析開始から20年程、既存の建築物群の竣工年の構成に応じて、高経年化と更新による極めて小さなピークを示す。その後、シナリオ1は、ストック志向の急増に伴い、85年経過時には当初の3倍に達し、110年で二度目のピークに達する。また、同年以降



(a) Rates of stock-oriented agents



(b) Averages of passing years



(c) Standard deviations of passing years

Fig.2-5 Service life indices of the reference model

は、100年周期の10年前後の幅の増減を繰り返すフェーズに移行し、210年で全体のピークに達した後、徐々に減少する。平均経年数が漸減するのは、Fig.2-3で示した様に、解析開始時点で建設済みの建築物に、100年を上回る物理的耐用年数をもつRC造建築物が相当数含まれており、建設後にフロー志向からストック志向に転じて、超長期に亘り運用され、群の平均経年数を底上げしていたものが更新された結果である。シナリオ2は、30年頃からシナリオ1より平均経年数の増加速度が落ちるが、230年でシナリオ1を超え、300年で全体のピークに達し、減少に転じる。シナリオ1と比べて振幅が小さいのは、解析開始直後に、志向の不安定による、更新時の経年数の分散を生じたことによる。シナリオ3は最も増加速度が遅いが、解析終了時点で他と同等に達している。シナリオ2より増減が目立つのは、初期にストック志向の有意性が明瞭になったためである。

更に、経年数の標準偏差に関しては、最も平均経年数の増加速度が遅いシナリオ3は、320年頃まで漸増したあと安定するが、他はシナリオ1で250年、シナリオ2で300年にピークに達した後、減少に転じる。耐用年数100年のRC造建築物へと、建築物群の経年数の均質化が進むためである。なお、標準偏差は平均と同等に達しており、一体感のない建築物群において、現実の建築主がストック志向の傾向を認識できない懸念もあるが、通常、高価格になる高耐久仕様の建築物が建設された事実が共有されれば、群内の相互作用を認める解析の前提は達成される可能性が高いため、問題を認めない。

上述してきた各指標の推移は、全て解析の仮定とシナリオの設定によって説明可能であり、帰納的な本法の妥当性を示している。

最後に、解析開始時と全シナリオの500年時の経年数のヒストグラムをFig.2-6に示す。ビンの幅はFreedman-Diaconisの法則によったが、いずれも正規分布を呈しておらず、特に解析開始後500年時の分布は、経年数100年にクリフエッジがあり、その後、500年近くまで若干数の分布が続いている。ストック志向のエージェントは計画的に100年前後で更新するため、同年近傍に分布の特異点を形成することや、フロー志向からストック志向に転じたRC造建築物が、超長期に及ぶ物理的耐用年数まで供用されること等が、反映されている。

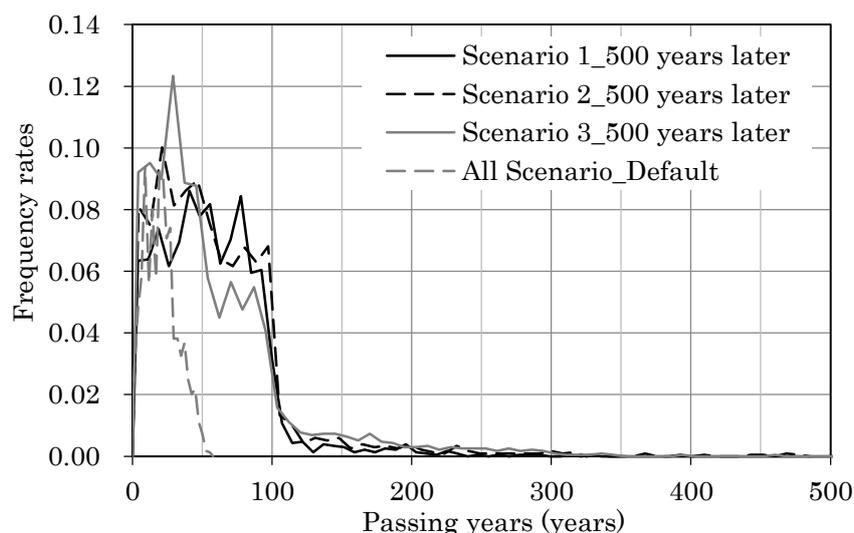


Fig.2-6 Frequency rates of passing years

## 2.7 評価対象の建築物群の更新過程

### 2.7.1 評価対象の建築物群

前節で比較用の基準建築物群の履歴を得たので、本解析の意図をより明確に伝える建築物群を評価対象として選択するに当たり、超長期に亘り、人口動態に起因して群が撤退する懸念がない建築物群であることを前提に、対象が超長期であることも勘案し、東京都内の市区郡島から、工事量の推移に関し、特徴的な建築物群を複数選択する。

具体的には、東京都統計年鑑<sup>2-20)</sup>に記載された1972~2014年の43年間の着工面積の推移を、構造形式別にScilab Enterprises社製オープンソース数値計算システム「Scilab5-5-2」を用いて離散フーリエ変換し、建設投資に少なからず周期性を期待できる低周波数の1~4次の波形を合成して模式化した建設

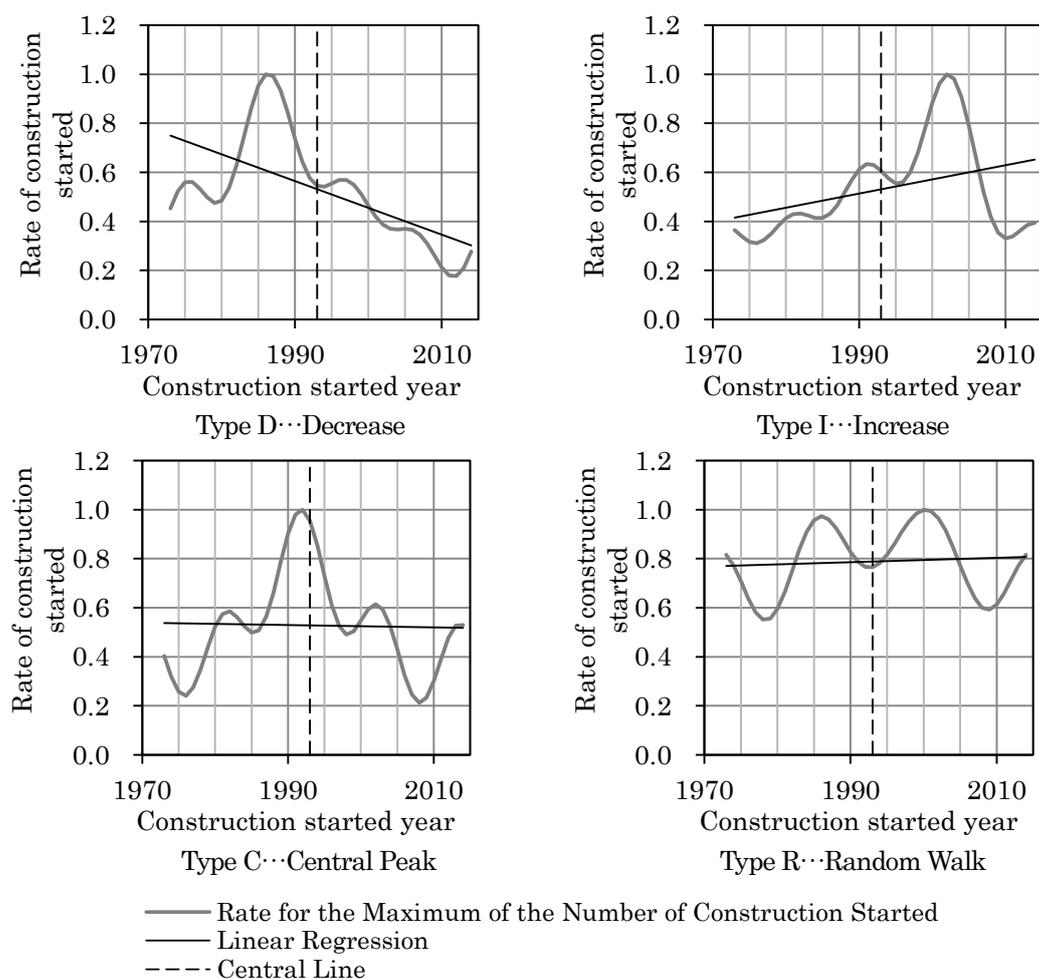


Fig.2-7 Pattern of construction started

投資モデルを，最大のピークが観察される時間と，線形回帰時の勾配により，Fig.2-7 に示す 4 種類とその他に分類する。

図中の Type D は，ピークが前半にあり，回帰係数が負，Type I はピークが後半で回帰係数が正，Type C はピークが中央にあり，回帰係数が 0 近傍，Type R は複数のピークがあり，回帰係数が 0 近傍であることを条件とする。この上で，構造形式間の工事量の相関も勘案して，各 Type の典型的な 8 建築物群を選択し，離散フーリエ変換前の波形を解析に供する。Table2-2 に，採用する建築物群の構造形式毎の波形の分類と，構造形式間の工事量の相関を示す。なお，離散フーリエ変換によって得られる波形は，同期間内の土地利用計画と技術的な関係はなく，あくまでも建築物群の構成を類型化する手法にすぎない。

## 2.7.2 更新過程の定量と比較

評価対象の 8 建築物群に関し，ストック志向の比率，経年数の平均及び標準偏差の推移を，シナリオ 1 と 3 に基づいて求めて，経年数毎の上下限を，基準となる建築物群の各指標と併せて，Fig.2-8，2-9 に示す。なお，経験的耐用年数，法的耐用年数，物理的耐用年数の計算根拠と下方 OFT の定数は，何れも基準となる建築物群に準じる。

Table2-2 Character of selected building groups

No.	Wave of RC	Wave of S	Predominance of Structure
1	Type D	The Others	Number of RC > Number of S
2	Type I	The Others	Number of RC > Number of S
3	Type C	The Others	Number of RC > Number of S
4	Type R	The Others	Number of RC > Number of S
5	Type R	Type D	Number of RC > Number of S
6	Type D	Type I	Number of RC > Number of S
7	Type D	Type D	Number of RC < Number of S
8	Type D	The Others	Number of RC < Number of S

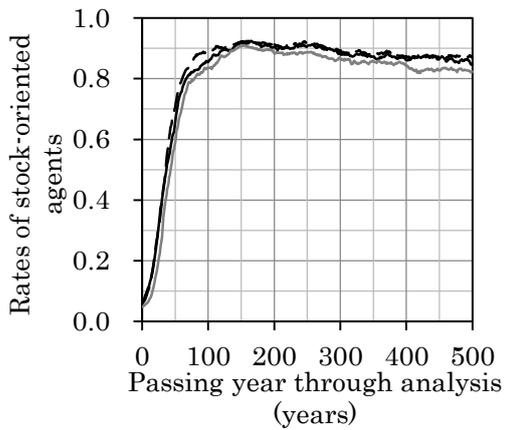
シナリオ1に関する Fig.2-8 について言及すると、ストック志向のエージェントの比率の建築物群間の差は、解析開始から40年頃に最大の0.14に達し、500年間の平均は0.04である。基準となる建築物群の履歴は、全建築物群の上下限にほぼ収まる。また、建築物群間の平均経年数の差は、160年頃に最大の15年に達して平均は6年、経年数の標準偏差の差は、420年頃に最大の14年に達し、平均7年である。平均、標準偏差ともに、基準となる建築物群が、全ての建築物群の最小値近傍を推移するのは、解析開始時のS造建築物の比率が多いためである。

次に、シナリオ3に関する Fig.2-9 では、ストック志向のエージェントの比率の建築物群間の差は、190年頃に最大0.12で平均0.09、建築物群間の平均経年数の差は、250年頃に最大11年で平均7年、同標準偏差は、155年頃に最大11年で平均7年に達する。全ての指標において、基準となる建築物群は最小値近傍を推移するが、初期集団はシナリオ間で差がないため、シナリオ1と同様の理由によるものと考えられる。

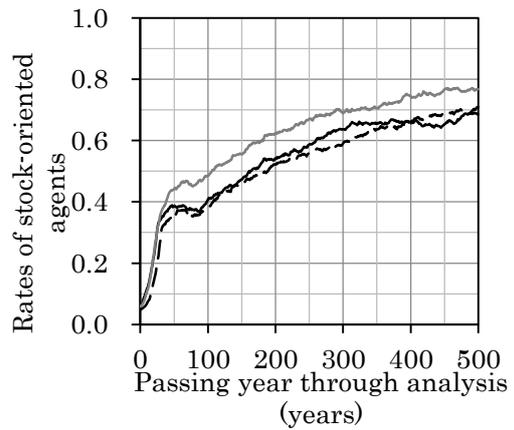
ここで、両シナリオの全ての指標に関し、建築物群の履歴の概形は、基準となる建築物群と相似している。また、ストック志向の比率については、シナリオ1の建築物群間の差が0.04であるのに対し、シナリオ3は0.09と2倍に達するが、他の指標はシナリオによる差が認められない。しかし、500年を俯瞰すると、長期に亘る変量が大きく、建築物群間の差が不明瞭になるものの、いずれの指標も、解析開始時の各指標の絶対量に近い差で推移している。そもそも、意思決定は維持保全計画に基づき、任意の周期に離散的に行われるため、群単位の意思決定の推移は、図示できても、現実の建築主には体感できない。建物所有者が建築物群に対して抱く心象をより適切に再現するため、事例毎に、評価時点の基準となる建築物群の指標に対する比に変換して、改めて Fig.2-10, 2-11 に示す。

シナリオ1に関する Fig.2-10 では、ストック志向の比率に関して、解析開始直後は、基準から4割低下する建築物群が認められるが、50年以降は基準に対して1割程度の増減に留まる。また、平均経年数は、基準となる建築物群より全般に大きいが、解析開始から100年内の最大値は3割増、200年内は2割増で、徐々に最大値が減少するものが大勢である。但し、No.7は、解析開始後5年から400年迄、基準値の5%内の増減に留まっており、基準となる建築物群とほぼ同じ履歴を呈している。経年数の標準偏差については、全般に2割内の増減で推移するが、No.4, 5の様に工事がランダムウォークを呈する構造を含む場合を除いて、400年経過後にピークに達し、最大3割、基準となる建築物群を上回る。

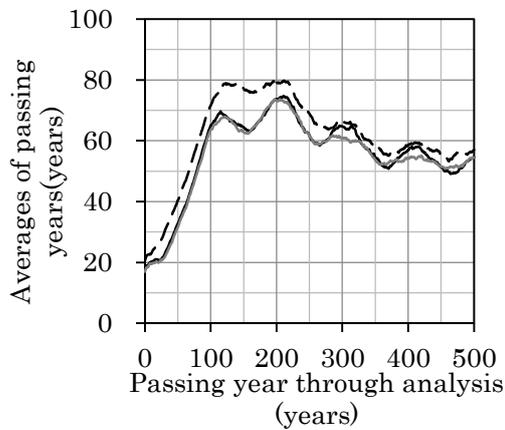
シナリオ3に関する Fig.2-11 では、ストック志向の比率に関して、解析開始直後は、基準から4割低



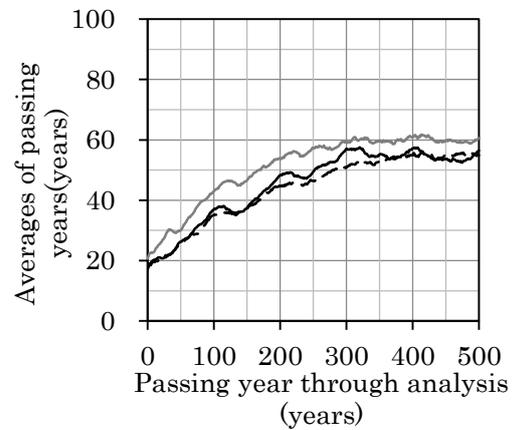
(a) Rates of stock-oriented agents



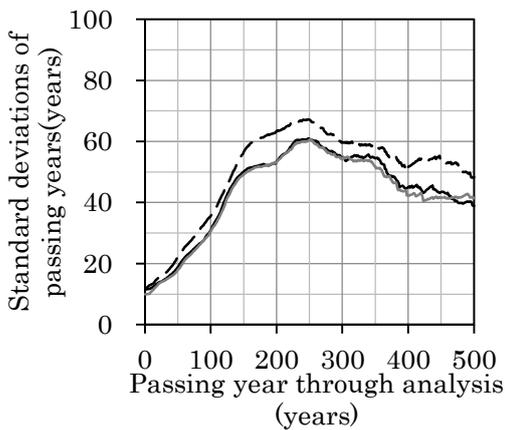
(a) Rates of stock-oriented agent



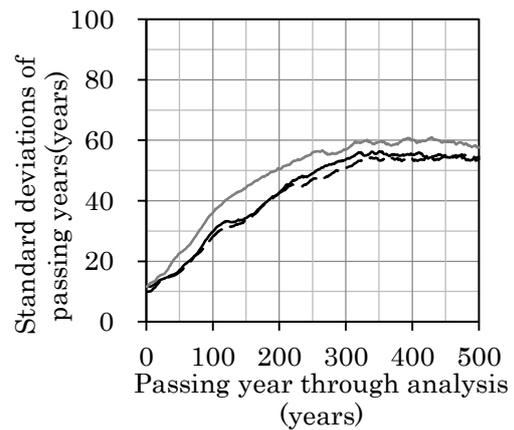
(b) Averages of passing years



(b) Averages of passing years



(c) Standard deviations of passing years



(c) Standard deviations of passing years

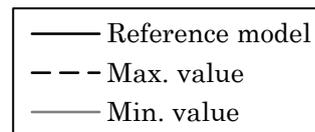
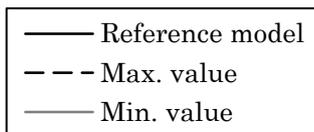


Fig.2-8 Bounds of service life indices (Scenario 1)

Fig.2-9 Bounds of service life indices (Scenario 3)

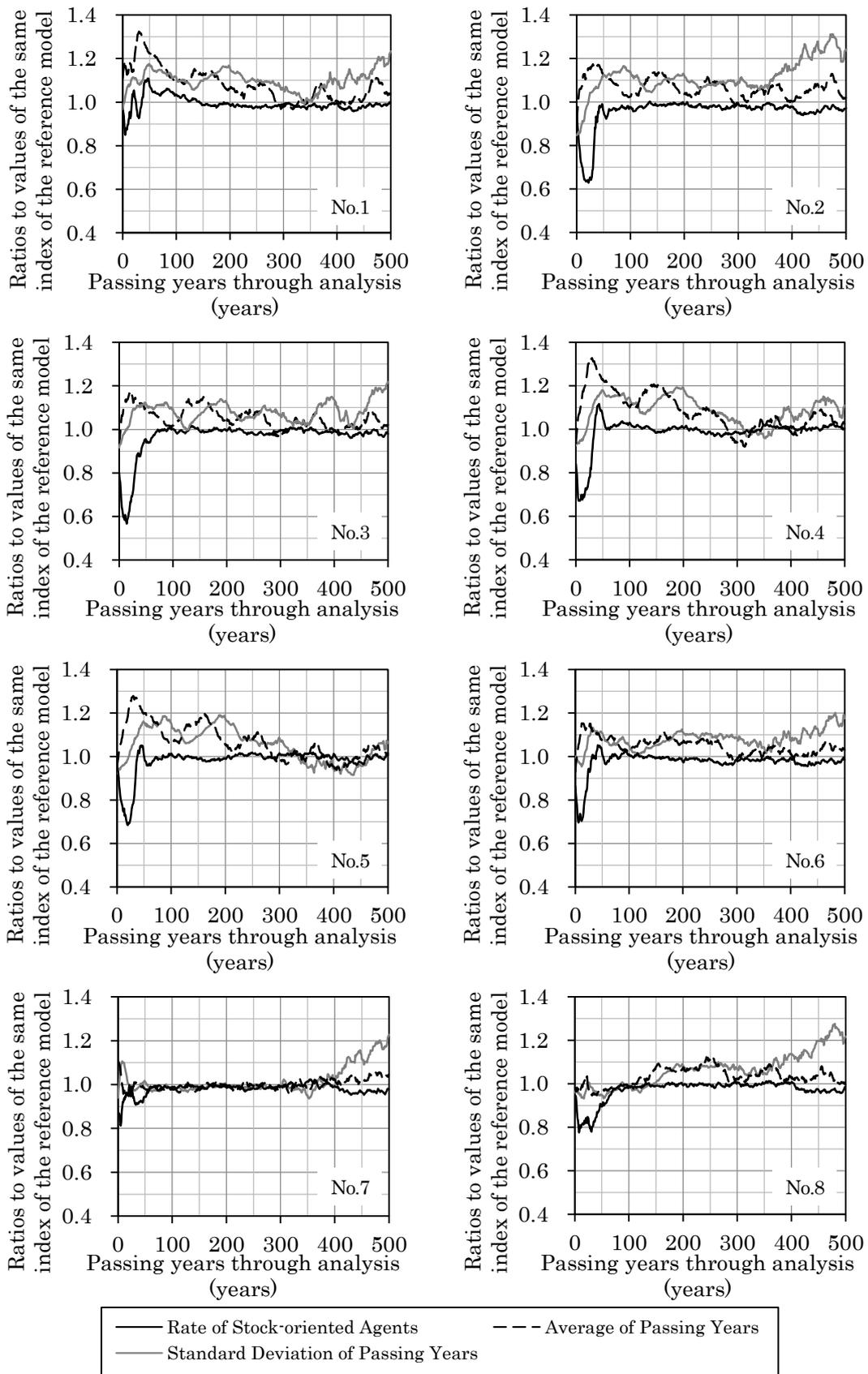


Fig.2-10 Ratio of service life index to reference model (Scenario 1)

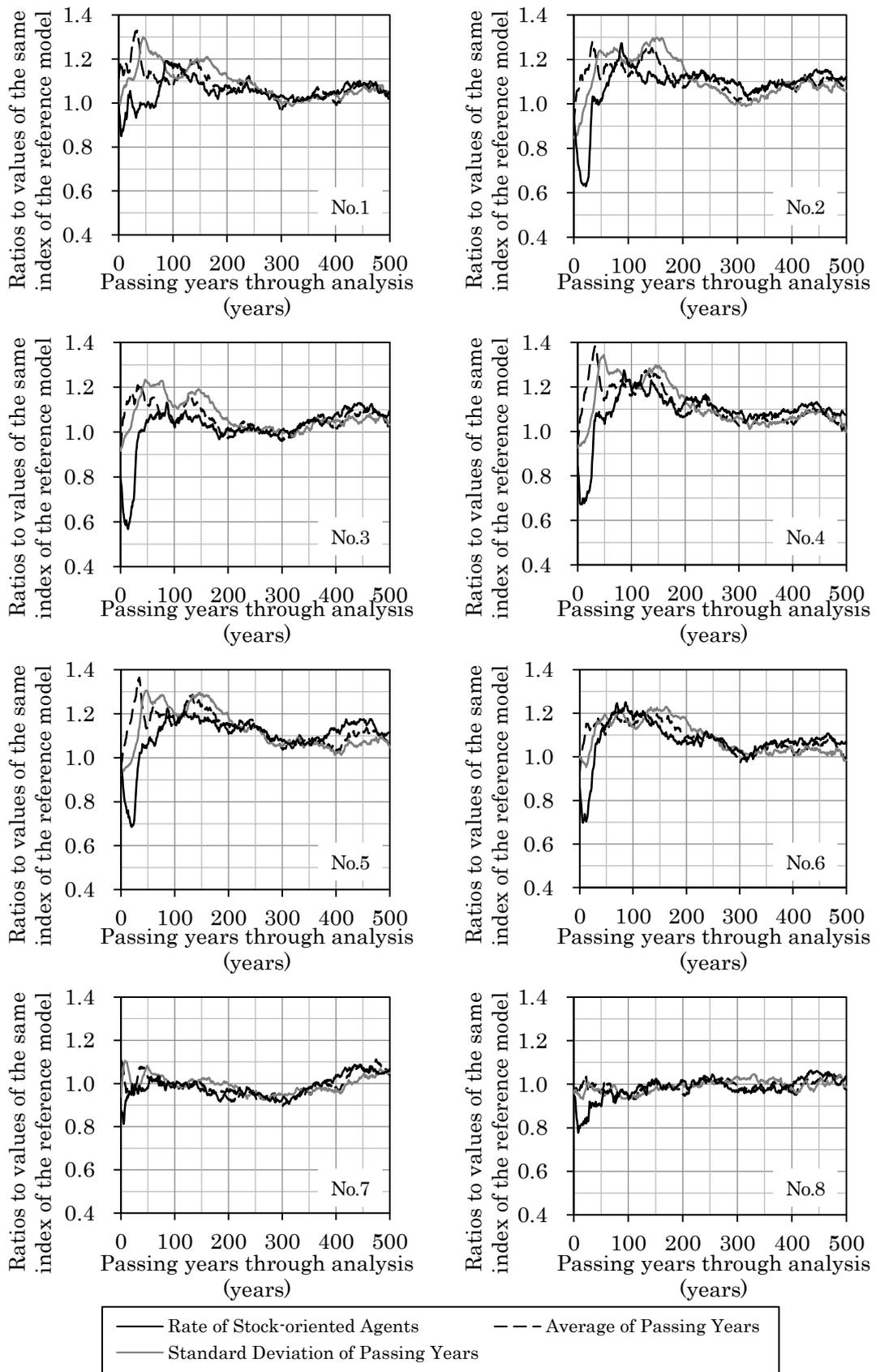


Fig.2-11 Ratio of service life index to reference model (Scenario 3)

下する建築物群があり、100年経過時も基準より2割大きい建築物群が認められる。その後は基本的に1割内で増減するが、No.5では一時的に二割近く迄増加している。平均経年数は、No.7, 8は基準となる建築物群に対して1割の増減で、ほぼ同じ履歴と言える。その他は全般に基準より大きい。解析開始から100年内の最大値は4割増、200年内は3割増で、それ以降は徐々に最大値が減少する。経年数の標準偏差については、No.7, 8は平均と同様で、その他は全般に基準より大きい値を示し、200年内でピークに達し、最大3割を超える。

両シナリオを比較すると、平均経年数におけるシナリオの影響は不明瞭であるが、他の二指標は履歴の概形も合致しない建築物群があり、建築物群によって、シナリオの影響は異なる。

総じて、行政の政策に相当するシナリオと建築物群の仕様に関する基本情報の相違により、基準となる建築物群との関係性が有意な水準で変わる上、定性的な考察に不合理が認められないため、本解析は意思決定の参考になりうると言える。

## 2.8 小結

本章では、超長期に亘る建築物群の耐用年数評価のモデルの在り方を例示した。解析条件は極めてプリミティブで、建物用途の拡大や交通・人口モデルの導入、行政による支援の建築物群毎の適性のモデル化等、解析対象を一般化するための検討要因は残っているが、建築物群の超長期に亘る更新過程を、任意のシナリオに基づいて定量出来ていると考えられる。

得られた結果を、あくまで可能性のレベルで社会影響と関連付けると、例えば、群によって、ストック志向の比率、経年数の平均及び標準偏差が、基準に対し3~4割乖離する点は重要である。Fig.2-12に示す様に、1995年時の国内のCO<sub>2</sub>排出量の内訳を大別すると、業務・家庭用の、所謂、施設運営上のエネルギーが24%、資材・輸送・施工による建設時のエネルギーが18%に達するが<sup>2-21)</sup>、本解析に依れば、個々の排出源が数割のオーダーで変動することになる。シナリオの主観性は否定できないが、エネルギー、製造、農業、林業、土地利用、廃棄物利用等の広域に亘るステークホルダーに環境対策を求める上で、何らかの配慮が必要であることは明らかである。

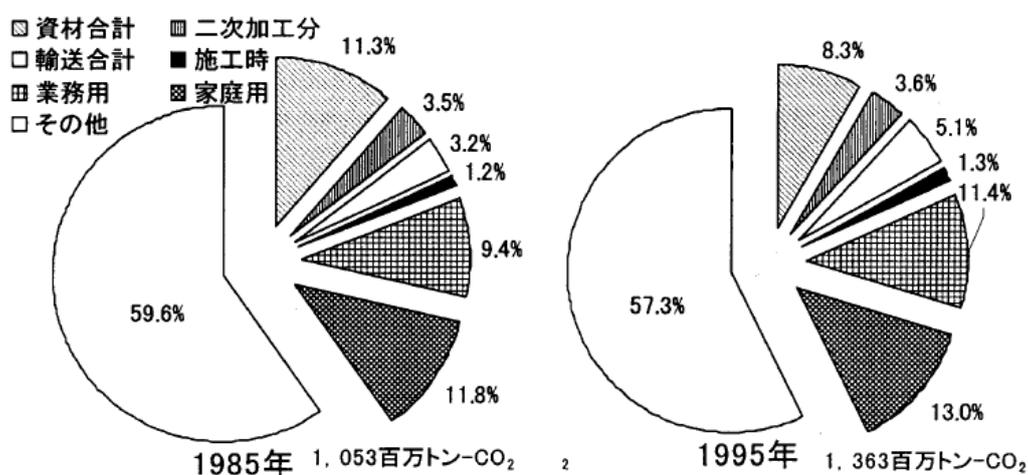


Fig.2-12 CO<sub>2</sub> emissions related to buildings<sup>2-21)</sup>

また、ストック志向を急速に普及させる場合、高度経済成長期からバブル崩壊に至る建設投資の履歴

やストック志向に早期に移行した建物所有者のほぼ 100 年周期の更新に起因する各指標の増減が、将来に亘って残る可能性が認められた点は、後者の極値近傍の数十年間が人間の生涯の労働時間と同等である点に照らして重要である。人口減少に応じた建設市場の縮小は既存建築物の耐用年数の延長により解決できても、増減は企業の数だけでなく、就労者の年齢構成を変え、その影響は組織論に基づく働き方にまで及ぶ。意思決定の多様化により、更新の時期を分散する必要があるが、持続可能社会への移行に配慮すると、選択肢は高経年化だけである。

他にも、供用年数が 100 年を超える建築物が一定割合に達すると、建築物群が文化財としての価値をもつので、同年数に至る履歴を予測し、操作すれば、今後の国内のスマートシュリンクにおける優位性を確保出来る点も重要である。この際、群内の経年数の標準偏差は、群の一体性を評価する指標となり、例えば、同値が大きい場合は、象徴的な建築物に合せた、外装の仕様の調整に要する負担が大きくなる可能性が派生する。

本章により、広域に亘る社会的影響を統計的に具体化し、超長期的時間軸特有のアウトプットをもつ建築物群の解析のイメージを共有できたと考えるが、本題に回帰すると、解析の基本となる建築物の耐用年数、特に、超長期まで供用される可能性の高い RC 造建築物の耐用年数が、こうした時間軸の検討を経ていないことは、解析結果の信頼性において決定的である。以下に、RC 造建築物の耐用年数を具体化するための影響因子を、分野横断的なアプローチによって論考する。

## 参考文献

- 2-1) I.S., Lowry : A Model of Metropolis, Rand Corporation, 1964
- 2-2) A., Anas : Dynamics of Urban Residential Growth, Journal of Urban Economics Vol.5, No.1, pp.66-87, 1978
- 2-3) 林良嗣, 富田安夫 : マイクロシミュレーションとランダム効用モデルを応用した世帯のライフサイクル—人口属性構成予測モデル—, 土木学会論文集IV, No.395, pp.85-94, 1988
- 2-4) 横井隆志, 山本祐吾, 東海明宏, 盛岡通 : 低炭素都市の形成に向けた街区更新およびエネルギー計画の統合を支援するシステム開発, 土木学会論文集 G, Vol.66, No.1, pp.17-34, 2010
- 2-5) 日本建築学会 : 気候温暖化への建築分野での対応 (会長声明全文), 参照 2018.10, <<https://www.ajj.or.jp/jpn/archives/971202.htm>>
- 2-6) J.M., Epstein, R., Axtell 著, 服部正太, 木村香代子訳 : 人工社会 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション, 共立出版株式会社, 1999
- 2-7) T.C., Scelling : Models of Segregation, American Economic Review, Papers and Proceedings Vol.59, No.2, pp.488-493, 1969
- 2-8) 高橋伸幸, 山岸俊男 : 利他的行動の社会関係的基盤, 実験社会心理学研究, Vol.36, No.1, pp.1-11, 1996
- 2-9) R., Axelrod : Effective Choice in the Prisoner's Dilemma, The Journal of Conflict Resolution, Vol.24, No.1, pp.3-25, 1980
- 2-10) リクルート住まい研究所 : CGM 時代のマンション購入行動に関する研究, 参照 2018.10, <[http://www.jresearch.net/house/jresearch/cgm/pdf/cgm07\\_all.pdf](http://www.jresearch.net/house/jresearch/cgm/pdf/cgm07_all.pdf)>
- 2-11) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也 : わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告, 日本建築学会計画系論文報告集, No.439, pp.101-110, 1992

- 2-12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，丸善，2016
- 2-13) 玉井孝幸，嵩英雄：レディーミクストコンクリートの圧縮強度の季節変動に関する調査・研究，日本建築学会技術報告集，Vol.9，No.18，pp.17-20，2003
- 2-14) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，丸善，1997
- 2-15) 飯田恭一，吉田倬郎：建物の取壊し理由とその存続期間等に関する研究，日本建築学会計画系論文集，Vol.75，No.652，pp.1573-1579，2010
- 2-16) 総務省統計局：第六十四回日本統計年鑑，参照 2018.10，<<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/back64/index.htm>>
- 2-17) 総務省統計局：日本の長期統計系列，参照 2018.10，<<https://www.stat.go.jp/data/chouki/index.html>>
- 2-18) S.N., Dorogovtsev, J.F.F., Mendes : Evolution of Networks from Biological Nets to the Internet and WWW. (1st ed.), Oxford University Press, 2003
- 2-19) 塚本鋭，白山晋：協調の進化における協力者の空間分布の変化，第 23 回人工知能学会論文集，pp.1-4，2009
- 2-20) 東京都総務局統計部：東京都統計年鑑，参照 2018.10，<<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/tn-index.htm>>
- 2-21) 漆崎昇，水野稔，下田吉之，酒井寛二：産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定，日本建築学会計画系論文集，Vol.66，No.549，pp.75-82，2018.6

# 第3章 コンクリートの経年劣化に対する

## 材料学的アプローチ

### Chapter3: The Approach to Aging Deterioration of Concrete

by Materials Science

#### 3.1 小序

本章は、鉄筋コンクリートの経年劣化を検討する際の基本である、コンクリートによる鉄筋の保護機能の喪失に対し、材料学的にアプローチすることを目的とする。

1章で前述した通り、複数の劣化現象に対し、それぞれ多くの評価手法が提案され続けているものの、日本建築学会の関連指針<sup>3-1)</sup>等によって、実用的な手法はある程度限定されている。例えば、一般環境で支配的となる中性化については、濱田、岸谷、白山、和泉らの研究で体系づけられる3-1式によって示す、所謂、放物線則が、現地での実測値との併用を念頭に、市場に普及している。因みに、同指針では、中性化の速度を示す中性化速度係数Aの算定式として、3-2式を紹介している。

$$C = A \cdot \sqrt{t} \quad (3-1)$$

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (3-2)$$

ここで、C：中性化深さ、t：経年数、A：中性化速度係数、 $\alpha_1$ ：コンクリートの種類による係数、 $\alpha_2$ ：セメントの種類による係数、 $\alpha_3$ ：調合（W/C）による係数、 $\beta_1$ ：気温による係数、 $\beta_2$ ：湿度およびコンクリートに作用する水分の影響による係数、 $\beta_3$ ：CO<sub>2</sub>濃度による係数

3-2式の変数のうち環境に関する $\beta_1 \sim \beta_3$ の係数は、超長期を俯瞰すると気候変動の影響下にあるが、同変動の予測はシナリオに大きく依存することや、現存する一般的な建築物は同変動が問題になる前に棄却することから、信頼できる資料または試験に基づいて求めることを前提に、非定常環境に適用できる様式にはしていない。

研究レベルでは、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第1次報告書<sup>3-2)</sup>が公表されるにあたり、国内では福島が、中性化に最も支配的なCO<sub>2</sub>濃度の漸増に関し、CO<sub>2</sub>とCa(OH)<sub>2</sub>の中性化を拡散と反応の二現象の結果と見なす微分基礎方程式で定式化した上、Laplace変換し、CO<sub>2</sub>濃度の

式とした 3-3~6 式に示す非定常速度論解析を提案し、1958~2020 年迄の約 60 年間の中性化の履歴を解析している。また、同研究では、Ca(OH)<sub>2</sub> と CSH の二系統の中性化や、仕上材の影響についても言及している<sup>3-3)</sup>。

$$C(x, t) = \int_0^t C_a(\lambda) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot F(x, t - \lambda) \cdot d\lambda \quad (3-3)$$

$$F(x, t) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \exp \left[ -x \cdot \sqrt{\frac{k}{D}} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{a2} \cdot t}} - \sqrt{k \cdot t} \right] + \exp \left[ x \cdot \sqrt{\frac{k}{D}} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{a2} \cdot t}} + \sqrt{k \cdot t} \right] \right\} \quad (3-4)$$

$$P(x, t) = k \cdot \int_0^t C(x, t) \cdot dt \quad (3-5)$$

$$C_a(t) = 14.4128 \cdot \exp(0.00357 \cdot t) + 1.9946 \cdot \sin(-1.9867 + 0.533598 \cdot t) + 300.7913 \quad (3-6)$$

ここで、C : コンクリート中の CO<sub>2</sub> 濃度、x : 深さ、t : 月、C<sub>a</sub> : CO<sub>2</sub> 濃度、k : CO<sub>2</sub> と Ca(OH)<sub>2</sub> の炭酸化反応の擬 1 次反応速度定数、D : CO<sub>2</sub> のコンクリート中における有効拡散係数、D<sub>a2</sub> : 固相の拡散係数、P : コンクリート中の CaCO<sub>3</sub> 濃度

福島の解析自体は、地球温暖化により中性化深さに有意な差が生じることを示す内容であったが、前述の通り、実際の維持保全上問題ないことを立証したに過ぎず、3-1、3-2 式に代わることはなかった。

但し、国外では、近年でも、例えば、Stewart らが IPCC の消費シナリオから局所的な温湿度の履歴を、オーストラリアの CSIRO-Mk3.6.0 と ACCESS model、フランスの IPSL CM5A-LR、日本の MICRO5、中国の bcc-csm1-1、EC の CNRM-CM5 によって算定し、気候変動の影響を検討している。具体的な劣化現象については、Dura-Crete と Yoon らの研究<sup>3-4)</sup>に準拠した中性化の予測に関する 3-7~3-9 式に基づいて、コンクリートの拡散係数と CO<sub>2</sub> 濃度の推移を考慮する放物線状の予測式を構築した上、オーストラリアや中国の主要な都市の現地の基準に基づく鉄筋コンクリートにひび割れが伝搬する過程を解析し、高耐久仕様を採用する寒冷地や沿岸の構造物では、100 年間供用した場合も中性化による被害がでる可能性は低いが、内陸部では損傷が具体化することを指摘している<sup>3-5) 3-6)</sup>。

$$x_c(t') = \sqrt{\frac{2 \cdot f_T(t') \cdot D_{CO_2}(t') \cdot (t' - 1999)}{a}} \cdot k_{urban} \cdot \int_{2000}^{t'} C_{CO_2}(t') \cdot dt' \cdot \left( \frac{1}{t' - 1999} \right)^{n_m} \quad (3-7)$$

$$D_{CO_2}(t) = D_1 \cdot t^{-n_d} \cdot a = 0.75 \cdot C_e \cdot C_{aO} \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (3-8)$$

$$f_T(t') \approx e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{av}(t')} \right)} \cdot T_{av}(t') = \frac{\sum_{t'_0=2000}^{t'} T(t')}{t' - 1999} \quad (3-9)$$

ここで、t : 経年数、t' : 2000 年以降の西暦の年数、x<sub>c</sub>(t) : 中性化深さ、C<sub>CO<sub>2</sub></sub>(t) : 大気中の CO<sub>2</sub> の時間依存性を持つ質量濃度、D<sub>CO<sub>2</sub></sub>(t) : コンクリート中の CO<sub>2</sub> の拡散係数、D<sub>1</sub> : 1 年後の CO<sub>2</sub> の拡散係数、n<sub>d</sub> : CO<sub>2</sub> の拡散係数の経年の係数、C<sub>e</sub> : 単位セメント量、C<sub>aO</sub> : セメント中の CaO 含有量の比、α<sub>H</sub> : 水和率、M<sub>CaO</sub> : CaO のモル質量、M<sub>CO<sub>2</sub></sub> : CO<sub>2</sub> のモル質量、n<sub>m</sub> : 乾湿周期の頻度と関連付けた微気候の状態の経年の係数、f<sub>T</sub>(t') : 20°C に対する温度補正の係数、E : 拡散過程の活性化エネルギー、R : 気体定数、k<sub>urban</sub> : 都市の係数、a : 完全な中性化に必要な CO<sub>2</sub> 濃度、T<sub>av</sub>(t) : 平均気温

更に、Talukdar らは、Ca(OH)<sub>2</sub> と CSH の中性化過程を 3-10 式に示す非定常反応型拡散方程式によって定式化し、カナダの大陸型気候と沿岸型気候の地域に対し、降雨の影響を除外した上で、①IPCC の消費シナリオに基づく大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の履歴、②地球平均で年平均気温が漸増する上、年内周期の変動を評価可能な気温モデル、③現在の相対湿度の年平均を与えて、中性化の履歴を計算し、100 年間で鉄筋位置に中性化が至らないが、加力によって、ひび割れを生じた場合等の検討が更に必要であることを指摘している<sup>3-7) 3-8)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial t} [CO_{2(aq)}] = D \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} [CO_{2(g)}] \cdot H \cdot R \cdot T - k \cdot [CO_{2(aq)}] \cdot [Ca(OH)_{2(aq)}] \quad (3-10)$$

ここで、 $t$  : 時間,  $CO_{2(aq)}$  : 液相中の  $CO_2$  濃度,  $D$  : 有効拡散係数,  $CO_{2(g)}$  : 気相中の  $CO_2$  濃度,  $H$  : Henry 定数,  $R$  : 気体定数,  $T$  : 温度,  $k$  : 反応定数,  $Ca(OH)_{2(aq)}$  : 液相中の  $Ca(OH)_2$  濃度

他にも、反応型拡散方程式に基づく福島, Talukdar らの研究や、放物線則に基づく Stewart らの研究を踏襲する研究が、米英や旧東欧圏諸国でも継続されており、実用式とは別の潮流がある。

何れも、一般建築物の直近数十年間の供用や、過酷環境仕様の社会インフラの 100 年間の供用においては、気候変動が影響しないとの結論であるため問題ないが、超長期まで視野に入れ、気候変動の影響が劣化速度や建築物群の更新過程に有意との解を導いた場合、解析の範囲は劇的に変わる。

建築物の更新の履歴を資源循環シミュレーション用の人工社会である ecoMA<sup>3,9)</sup>等に代入すれば、Fig.3-1 に例示する様に、コンクリート関連産業の  $CO_2$  排出量の推移が可視化され、周辺のマイクロ環境の気象が信頼性を喪失する。従って、物理化学的な精度を確保するためには、 $CO_2$  を含む温暖化ガスの濃度に応じて、気温や降雨、大気や降雨中の劣化成分を再設定し、中性化の過程を再計算し、解を収斂させる必要を生じるのである。そして、この構図は、地球上のあらゆる地上環境で進行する中性化で確認される以上、その他の劣化現象に対しても、熱、水、大気環境を介して影響を及ぼす。

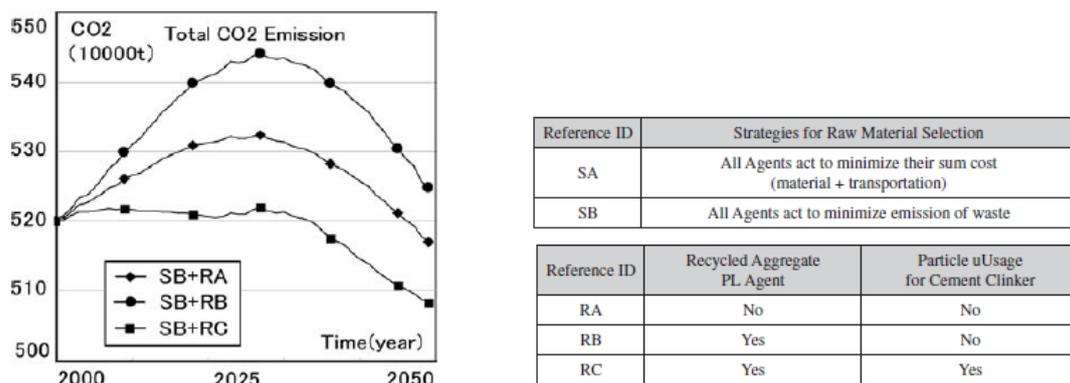


Fig.3-1 Total  $CO_2$  emission with different strategies for recycling<sup>3,9)</sup>

建築物群の全材料・部材の劣化過程を研究レベルの精度で解析した上、資源循環シミュレーション用人工社会や地球シミュレータと連成させ、収斂させることは、現代の科学技術に照らすと非現実的であるが、計算機の能力的な面は、将来の技術の進歩により解決できる可能性が高い。真の問題は、3-1~3-10 式で示した何れの手法も気温の日内変動や降雨の酸性成分の影響等を  $CO_2$  と同次元で検討していないため、収斂計算に供する理論さえ存在しないということである。

本章では、収斂計算は高次の課題として将来世代に託し、一般建築物のコンクリートに作用する主要な外的要因を整理した上、超長期の環境変動の影響を反映できる式として、全て連成してモデル化することを試みる。

## 3.2 材料学的アプローチの基本方針

### 3.2.1 劣化現象のスクリーニング

解析する劣化現象を改めて選定する上で、業界標準と言える日本建築学会の関連指針<sup>3,1)</sup>を参考にする

と、大気中の CO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, 土壌中の CO<sub>2</sub>, 水中の H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>による中性化, 塩害, 凍害, アルカリシリカ反応, 大気, 土, 水中の酸, 無機塩類, 侵食性ガスによる化学的侵食が挙げられ, その他の外力として, 疲労, 摩耗, 溶脱が例示されている。検討の要否は, 想定条件下での具体性によって判断する必要があるため, 以下に, 国内の研究に基づいて, 順に確認する。

### (1)塩害

塩害については, 島国の日本では対象が多く思われるが, 影響範囲の全国土に対する面積比は小さい上, 該当する地域では, 劣化速度の速さ<sup>3-10</sup>に起因し, 直接作用する外皮全面に遮蔽効果のある仕上材を採用するため, 鉄筋の発錆による表層コンクリートの剥離・剥落は, 仕上材の劣化部や, 納まり上, 浸水を許す部位等の局所的な被害に留まり, 建築物の耐用年数には直接関わらない。温暖化による海面上昇については, 東日本では兆候が認められるが<sup>3-11</sup>, 建築物群への影響に配慮すると, 浸水確率が閾値に達した時点で, 津波対策の海岸堤防の延長線上の技術思想で解決され, 問題になる可能性は低い。一方, 津波については, 一時的な冠水やその後の海水を含む泥土との長期に亘る接触が影響する事態が想定される。復旧活動の中での洗浄やひび割れへの海水の浸透により, 劣化機構の特定は困難であるが<sup>3-12</sup>, 海水との接触時間が支配的であること, 残置される海水を含む泥土の厚さが数 cm であることを勘案すると, 戸建て住宅の基礎の様に, 浸水を防げない上, 洗浄の漏れを生じやすい部位を除くと, 影響は限定される。また, 海水の遡上により, 地下水の塩分濃度が上がる可能性もあるが<sup>3-13</sup>, 予めの鉄筋のかぶり厚さの割増しに照らせば, 問題が発生する建築物は限定される。即ち, 所謂, 沿岸の塩害は, 一建築物の仕様や保全計画を策定する上で重要な検討要因であるが, 建築物群としては, 検討の優先順位は低いと言える。影響範囲に照らすと, 濃度は低い, 仕上材の仕様が一般的な建築物が大勢を占める内陸まで飛散するエアロゾル中の Cl<sup>-</sup>の方が検討の余地があるため, 本章では同条件の影響を確認する。

### (2)凍害

凍害に関しては, 地球温暖化説の対論として, 太陽活動度の周期性と地球磁場強度の減少傾向を根拠とする今世紀内の寒冷化を指摘する研究<sup>3-14</sup>や, 地球温暖化が社会問題化する前の, 直近1万年内の2,600年周期の寒冷化等を指摘する研究<sup>3-15</sup>があり, 気候変動予測の不確実性に照らすと, 重要な劣化現象と考えられる。他の物理化学的劣化外力との複合的な作用を検討すると, 材料学的にも関心がつきないが, 塩害同様に, 基本的に影響は外皮に留まる上, 水が滞留する部位に被害が限定され, 対策が提示されていることから, 建築物群を対象とする本章では対象外とする。

### (3)アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応に関する昨今の研究は, 一部で劣化機構や膨張挙動の定量と予測に関する研究が進められているが, その他大勢は, 既存の建築物の補修方法に関するものである。劣化現象に対する新規の知見としては, 放射線によって, 国内の多くの骨材に含まれる長石の反応性が活性化することが報告されており<sup>3-16</sup>, 東日本大震災後の放射性物質の拡散と相乗すると不安材料に思われるが, 実験時の線量が全く違うため, 実環境での対応の緊急性は認められない。アルカリシリカ反応対策はほぼ普及したと言ってよく, 本章では, 同反応が生じる建築物は特例と位置付け, 検討の対象外とする。

#### (4)疲労

疲労は、複数回の地震による損傷や、工場の繰返し荷重による損傷を念頭に置いた、鉄筋の耐力低下に関する研究が散見される。コンクリートの影響を指摘する研究もあり<sup>3-17</sup>、超長期を対象とする場合は、鉄筋の滑りや凍害に起因するひび割れ幅の拡大、補修材の剥離等の材料学的要因も課題として具体化する。しかし、RC造が誕生してから200年に達していない上、誕生後の技術水準の推移も著しく、現在の一般的な仕様で施工した建築物の疲労に対する十分な統計はない。複数回の地震動による損傷を扱う場合、リスク論が必要になるが、不確実性が大きい地震の発生確率の影響が支配的になり、その他の現象が具体化しないため、本研究の目的では共存しえない。また、繰返し荷重を受ける工場は、建築物群単位の検討では、全体に埋没する可能性が高い。総じて、地震のリスク解析との差別化を図り、疲労は実験的な研究が必要な高次の課題と見做し、本研究では扱わないものとする。

#### (5)その他

その他、化学的侵食は、発生源がごく一部の居室に限られる上、ライニングやかぶり厚さの確保によって予防策がとられるため、本章では対象外とする。また、摩耗は、レベル調整のない完全なコンクリート打放しの床面が少なく、群単位で影響が具体化しないこと、土壌又は水中の中性化や溶脱は、一部の地域を除いて、数百年単位の検討では、鉄筋の腐食に関わる程度の劣化に至らないことから対象外とする。

#### (6)対象とする劣化現象

残る大気中の $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$ による中性化は、大気と接する全ての建築物に共通する現象であり、劣化速度は塩害や化学的侵食と比べて遅いが<sup>3-10</sup>、超長期を対象とする上で、最も影響範囲が広い。そこで、本研究では、 $\text{CO}_2$ とエアロゾル中の $\text{Cl}^-$ を基本として、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$ 及びエアロゾル中の $\text{Cl}^-$ と大気中の $\text{HNO}_3$ が反応して生成する $\text{HCl}$ <sup>3-18</sup>を酸性雨起源として加えた、Fig.3-2に示す外的要因の複合的な作用に対する劣化過程を検討する。

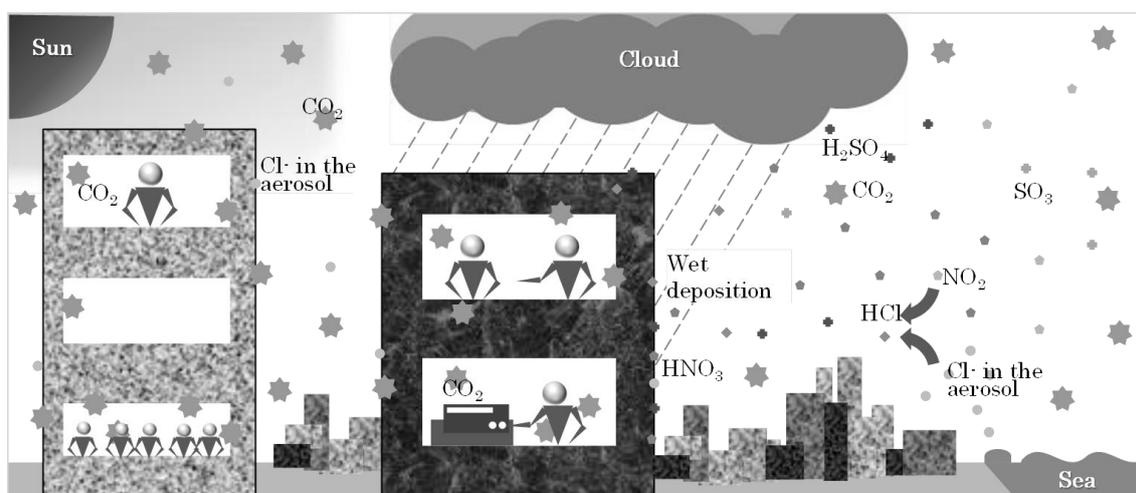


Fig.3-2 Deterioration factors for buildings in this study

### 3.2.2 定式化の方針

次に、劣化過程の表現方法であるが、一般環境でコアとなる中性化については、放物線則が広く普及しているものの、土木系では、気候変動とは別に、前川、石田らが、材料解析と構造解析を並行する連成解析システムの開発において、Fig.3-3 に示す CI及び水分の移流拡散を評価する物質、エネルギー、運動量の保存法則、移動則、生成及び逸散則に基づく熱水分連成方程式を提案し<sup>3-19)</sup>、物理化学的な実験に基づいて、劣化機構のモデルの広域化と精緻化を継続している。

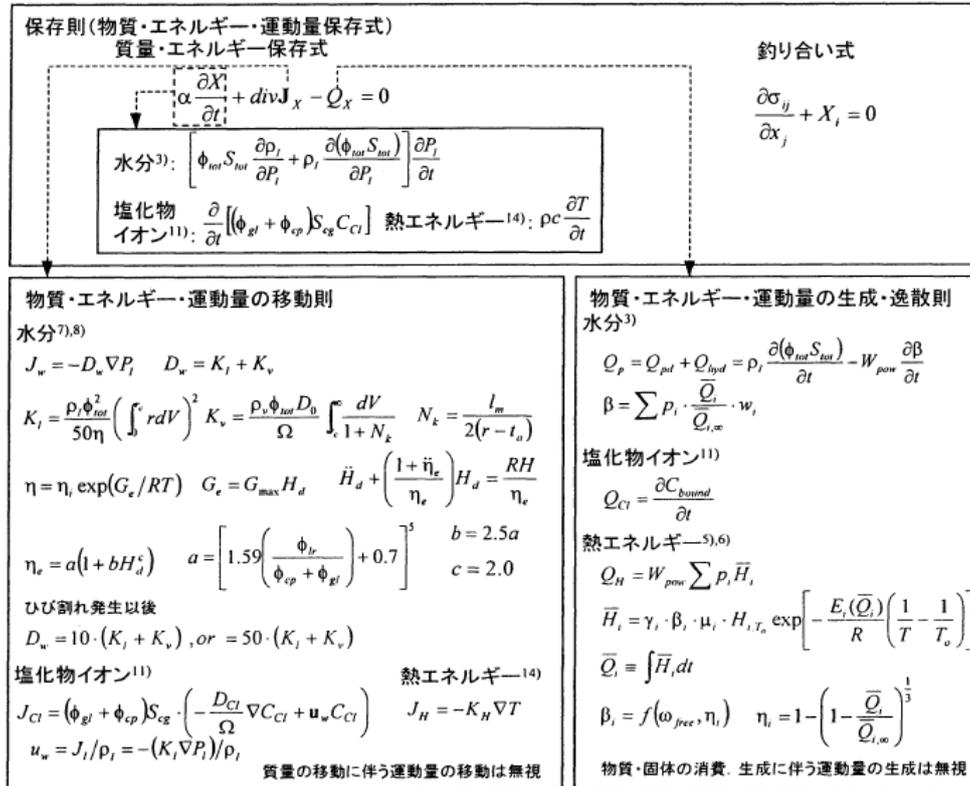


Fig.3-3 Constitutive law about heat and moisture transport model<sup>3-19)</sup>

また、建築系でも、高分子系仕上材が劣化するコンクリート中の CO<sub>2</sub>の移動を評価するため、柘田、兼松らが、福島の実験型非定常拡散方程式を踏襲している<sup>3-20) 3-21) 3-22)</sup>。

土木構造物では、コンクリートの物性の不確かさと、他方での構成材料と供用環境の単純や社会インフラ単位的意思決定の緊急性に照らして、精緻化の継続は必然であるが、建築物では、解析上、多様な供用環境に関する緩衝項を設定する必要を生じ、かつ、同項の影響がコンクリート単体の解析上の残差と同等以上になるため、過剰な精緻化は避け、安全側の解が得られることを前提に、各構成要素を評価する際の技術的階層を揃えることが優先される。

本章では、建築系の昨今の代表的な研究である柘田、兼松らの反応型非定常拡散方程式を基本とした上で、前川、石田らの CIの拡散に関するモデル<sup>3-19)</sup>や福島が解析した CSH の中性化<sup>3-3)</sup>、鉄筋の腐食過程に支配的な降雨の影響を酸の挙動と併せてモデル化して、コンクリートの超長期経年劣化を広域に亘り検討可能な解析モデルを構築する。なお、本研究は解析的研究であり、材料定数を何れかの実験結果に準じる必要があるが、使用材料の構成に近いことを優先し、基本的に国内の研究に準じるものとする。

### 3.3 コンクリート中の物質移動特性

#### 3.3.1 物質の移動経路

梶田、兼松らの反応型非定常拡散方程式において、拡散係数はコンクリート中の連続空隙内の気液相の移動を表現する指標と言える。同係数を特定する方法として、例えば、梶田は促進中性化試験結果に基づいて拡散係数と反応速度定数の二変数の収斂計算を行い、W/C 毎の推奨値を Table3-1 の通り示しており<sup>3-21)</sup>、兼松も体裁は梶田に準じている<sup>3-22)</sup>。

Table3-1 Diffusion coefficients and reaction rates for each W/C<sup>3-21)</sup>

W/C	D (cm <sup>2</sup> /day)	K (1/day)
0.50	0.015	250,000
0.60	0.050	500,000
0.70	0.070	1,000,000

同体裁は、コンクリートの中性化に関する建築分野の実用式として扱いやすいが、セメントマトリックスの単位量等、調合条件を伴わないため、フレキシビリティに欠ける。そこで、本研究では、単位水量と水和反応率からコンクリート中の水和生成物の単位量を特定した上で、コンクリートの調合と拡散係数を関連付けるプロセスを追加する。

CO<sub>2</sub> の拡散係数については、例えば、石田らが、内部に水分のない空隙内を分子同士が衝突しながら運動量を輸送する分子拡散と、気体分子と固体壁面とが衝突を繰返し、壁に運動量を輸送しつつ進む Knudsen 拡散からなる気相の拡散移動と、空隙中の液状水を介する溶存拡散移動を定式化している<sup>3-23)</sup>。

$$D_{gCO_2} = \frac{\phi \cdot D_0^g}{\Omega} \cdot \frac{(1-S)^n}{1+l_m/2 \cdot (r_m-t_m)} \quad (3-11)$$

$$D_{dCO_2} = \frac{\phi \cdot S^n}{\Omega} \cdot D_0^d \quad (3-12)$$

ここで、 $D_{gCO_2}$  : 空隙を通過する気体 CO<sub>2</sub> 拡散係数、 $\phi$  : CO<sub>2</sub> の移動経路・保持空間となる細孔の空隙率、 $D_0^g$  : 気体 CO<sub>2</sub> 拡散係数の基準値、 $\Omega$  : 空隙の屈曲度を表現するパラメータ、 $S$  : 空隙の飽和度、 $n$  : 空隙相互の連結度を示すパラメータ、 $l_m$  : 気体分子の平均自由行程、 $r_m$  : 不飽和空隙の平均半径、 $t_m$  : 半径  $r_m$  の空隙内の吸着水層厚、 $D_{dCO_2}$  : 溶存 CO<sub>2</sub> 拡散係数、 $D_0^d$  : 溶存 CO<sub>2</sub> 拡散係数の基準値

但し、前述した様に、建築学的な要因に配慮すると、同階層までの細分化は関連技術のモデル化を難解にする。そこで、よりプリミティブなモデルに回帰するため、土木系の研究の源流を遡上すると、例えば、下村は、コンクリート中の空隙を、10  $\mu$  m を境にエントラップ乃至はエントレインドエアに類する大径の空隙とその他に二分し、前者の経時による変動はなく、後者に該当するセメントペーストの細孔容積分布密度関数は次式で表すことが出来るとしている<sup>3-24)</sup>。

$$\frac{dV(r)}{dr} = V_0 \cdot B \cdot C \cdot r^{C-1} \cdot \exp(-B \cdot r^C) \quad (3-13)$$

ここで、 $V(r)$  : 細孔容積分布関数、 $V_0$  : 単位体積中における総細孔容積、 $r$  : 細孔半径、 $B$ 、 $C$  : 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ

更に下村は、W/C:0.40 と 0.60 の実験結果から、W/C が大きくなると、細孔径分布は全般に大径にシ

フトして総細孔量も増加し、また、径によって水の移動速度も異なることを指摘している<sup>3-25)</sup>。同氏の研究は洗練されているが、細孔径分布までのモデル化は、石田らの研究同様に建築系では適用し難い。

そこで、更に小林らの研究<sup>3-26)</sup>、<sup>3-27)</sup>まで遡上すると、モルタル被覆による耐久性向上効果を報告する論文中で、コンクリート中の気体の拡散に分子拡散と Knudsen 拡散が混在し、 $\mu\text{m}$  オーダーを上回る粗大な開放孔隙量が拡散性状に支配的になることを、 $\text{O}_2$  の実験を通じて指摘し、同じ材料を使う場合、Fig.3-4 に示す様に、拡散係数を開放孔隙量の関数としてよいと結論している。下村の研究と異なり、W/C の影響を示していないのは、水和度とゲル空隙の相関が外乱として有意な水準で作用する等したため、結果的に、建築物の一般的な構成技術と同じ巨視的な構図までに言及を留めたものと考えられる。本研究では、同研究に準じ、関連するモデルの統合を進める。

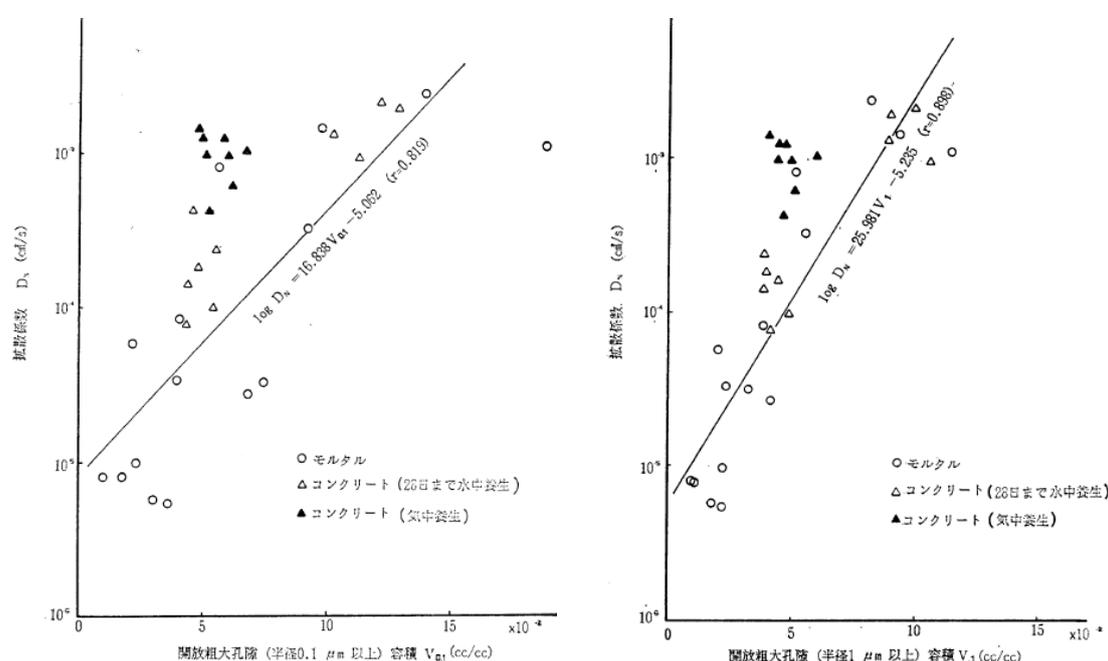


Fig.3-4 Relation between diffusion coefficients and pore volume for each diameter<sup>3-27)</sup>

なお、乾燥に配慮するとゲル空隙も関係するが、拡散係数との相関は低い<sup>3-26)</sup>ため、本研究では比較的粗大な空隙として、毛細管空隙以上の連続空隙を解析の対象として設定する。従って、外的要因が移動する連続空隙は、毛細管空隙と骨材の遷移帯になる。

### 3.3.2 セメントペーストの毛細管空隙量のモデル

そこで、毛細管空隙量のモデルに関する研究を回顧すると、Powers の毛細管空隙率のモデル<sup>3-28)</sup>を元にしたペースト中の空隙率に関するモデルとして、横関らによる 3-14 式がある<sup>3-29)</sup>。

$$\theta = \frac{W/C - 0.36 \cdot F_{avg}}{W/C + 0.32} \quad (3-14)$$

ここで、 $\theta$  : ペースト中の空隙率、 $W/C$  : 水セメント比、 $F_{avg}$  : 平均水和度

同式で用いる平均水和度については、丸山らが  $W/C:0.35, 0.50$  の普通ポルトランドセメントのペーストを  $10\sim 40^\circ\text{C}$  で養生して水和を進行させた上でリートベルト解析に供し、 $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{A}$ 、 $\text{C}_4\text{AF}$  毎に

Parrot の反応速度式に準じて定式化した 3-15~31 式から推測できる<sup>3-30), 3-31)</sup>。因みに、各鉱物の水和反応が析出領域や水和に利用可能な水分量の低減に関わる実験定数は、 $\text{CaCO}_3$  が共存しない場合の式を示したものである。

$$\frac{\partial \alpha_{C_3S}(t)}{\partial t} = k_{C_3S} \cdot \left(1 - \alpha_{C_3S}(t)\right)^{r_{C_3S}(w) \cdot n_{C_3S}} \quad (3-15)$$

$$k_{C_3S} = r_{srf} \cdot k_{C_3S,20} \cdot \exp\left(-\frac{E_{C_3S}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right) \quad (3-16)$$

$$r_{C_3S}(w) = 1 + 2 \cdot \exp(-10 \cdot w) \quad (3-17)$$

$$\frac{\partial \alpha_{C_2S}(t)}{\partial t} = r(\alpha_{C_3S}) \cdot k_{C_2S} \cdot \left(1 - \alpha_{C_2S}(t)\right)^{r_{C_2S}(w) \cdot n_{C_2S}} \quad (3-18)$$

$$k_{C_2S} = r_{srf} \cdot k_{C_2S,20} \cdot \exp\left(-\frac{E_{C_2S}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right) \quad (3-19)$$

$$r_{C_2S}(w) = 1 + 4 \cdot \exp(-10 \cdot w) \quad (3-20)$$

$$r_{C_2S}(\alpha_{C_3S}) = \begin{cases} \alpha_{C_3S} > 0.9 & 1.0 \\ \alpha_{C_3S} \leq 0.9 & 0.3 \end{cases} \quad (3-21)$$

$$r_{srf} = S/S_0 \quad (3-22)$$

$$\frac{\partial \alpha_{C_3A}(t)}{\partial t} = k_{C_3A} \cdot \left(1 - \alpha_{C_3A}(t)\right)^{r_{C_3A}(w) \cdot n_{C_3A}} \quad (3-23)$$

$$k_{C_3A} = r_{srf} \cdot k_{C_3A,20} \cdot \exp\left(-\frac{E_{C_3A}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right) \quad (3-24)$$

$$r_{C_3A}(w) = 1 + 8 \cdot \exp\left(-10 \cdot (w - w_{0,C_3A})\right) \quad (3-25)$$

$$w_{0,C_3A} = \max(-0.197 + 0.227 \cdot W/C + 7.65 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273), 0) \quad (3-26)$$

$C_3A < 1\%$ の時

$$w_{0,C_3A} = 0 \quad (3-27)$$

$$\frac{\partial \alpha_{C_4AF}(t)}{\partial t} = k_{C_4AF} \cdot \left(1 - \alpha_{C_4AF}(t)\right)^{r_{C_4AF}(w) \cdot n_{C_2S}} \quad (3-28)$$

$$k_{C_4AF} = r_{srf} \cdot k_{C_4AF,20} \cdot \exp\left(-\frac{E_{C_4AF}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)\right) \quad (3-29)$$

$$r_{C_4AF}(w) = 1 + 10 \cdot \exp\left(-10 \cdot (w - w_{0,C_4AF}(T))\right) \quad (3-30)$$

$$w_{0,C_4AF}(T) = \max(-0.135 + 0.488 \cdot W/C + 4.32 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273), 0) \quad (3-31)$$

ここで、 $t$ : 時間、 $\alpha_{C_3S}$ :  $C_3S$ の水和反応率、 $\alpha_{C_2S}$ :  $C_2S$ の水和反応率、 $\alpha_{C_3A}$ :  $C_3A$ の水和反応率、 $\alpha_{C_4AF}$ :  $C_4AF$ の水和反応率、 $k_{C_3S,20}$ 、 $k_{C_2S,20}$ 、 $k_{C_3A,20}$ 、 $k_{C_4AF,20}$ 、 $n_{C_3S}$ 、 $n_{C_2S}$ 、 $n_{C_3A}$ 、 $n_{C_4AF}$ : 各鉱物の水和反応速度に関する係数、 $k_{C_3S}$ 、 $k_{C_2S}$ 、 $k_{C_3A}$ 、 $k_{C_4AF}$ : 任意の温度条件における各鉱物の水和反応に関する係数であり、基準温度を  $20^\circ\text{C}$  とした場合の係数を  $k_{C_3S,20}$ 、 $k_{C_2S,20}$ 、 $k_{C_3A,20}$ 、 $k_{C_4AF,20}$  としてその反応係数を表し、温度の影響に関して見かけの活性化エネルギーに  $E_{C_3S}$ 、 $E_{C_2S}$ 、 $E_{C_3A}$ 、 $E_{C_4AF}$  を用い、アレニウス式に従うと仮定して評価される係数、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 温度、 $r_{C_3S}(w)$ 、 $r_{C_2S}(w)$ 、 $r_{C_3A}(w)$ 、 $r_{C_4AF}(w)$ : 体積含水率  $w$  の関数として表現した析出可能領域の低減による水和反応速度に関する係数、 $r_{C_2S}(\alpha_{C_3S})$ :  $C_2S$  の  $C_3S$  の反応依存性を表す係数、 $r_{srf}$ : 比表面積の影響を表す係数でセメントの比表面積  $S$  と基準とする比表面積  $S_0$  との比、 $w_{0,C_3A}$ 、 $w_{0,C_4AF}$ : 各鉱物の水和反応が析出領域や水和に利用可能な水分量の低減に関わる実験定数

### 3.3.3 骨材の遷移体量のモデル

一方、骨材の遷移帯については、加藤らが、篩分けした骨材を用いた  $W/C : 0.40 \sim 0.60$  のコンクリートに関し、Wall effect とブリーディング水量から簡易に算定する 3-32～37 式を示しており<sup>3-32)</sup>、本研究でもこれに準じる。

因みに、Wall effect は、Fig.3-5 に示す通り、高濃度の均質なセメントペーストに異物を挿入した際に、異物周囲のセメントが干渉を避け移動するため、見かけの濃度が低下する現象であり、骨材とセメントの距離を計算することで得られる。また、ブリーディング水量は、遠心脱水試験で得られる脱水量をペースト部分の単位体積当たりの自由水量と仮定し、Wall effect 部分の水量を除いて骨材割合を乗じた Fig.3-6 に示す水量である。

$$\begin{bmatrix} TS_{ITZ-B} \\ TG_{ITZ-B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.058 & -0.046 \\ 1.194 & -0.944 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_w \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.024 \cdot \ln(w/c) - 0.0287 \cdot w/c + 0.0418 & 0.0013 \cdot \ln(w/c) + 0.000004 \\ 0.492 \cdot \ln(w/c) - 0.589 \cdot w/c + 0.858 & 0.0272 \cdot \ln(w/c) + 0.000086 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_g \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

$$P_{ITZ/con} = 4.64 \cdot V_s \cdot (TS_{ITZ-W} + TS_{ITZ-B}) + 0.46 \cdot V_g \cdot (TG_{ITZ-W} + TG_{ITZ-B}) \quad (3-33)$$

$$TS_{ITZ-W} = 0.024 \cdot \ln(W/C) + 0.042 \quad (3-34)$$

$$TG_{ITZ-W} = 0.37 \cdot \alpha + \beta \quad (3-35)$$

$$\alpha = 0.008 \cdot W/C - 0.0003 \quad (3-36)$$

$$\beta = 0.053 \cdot W/C + 0.0004 \quad (3-37)$$

ここで、 $P_{ITZ/con}$  : コンクリート単位体積当たりの遷移帯空隙量、 $V_s$  : 細骨材体積割合、 $V_g$  : 粗骨材体積割合、 $TS_{ITZ-W}$  : wall effect による細骨材周囲の平均遷移帯厚さ、 $TG_{ITZ-W}$  : wall effect による粗骨材周囲の平均遷移帯厚さ、 $TS_{ITZ-B}$  : ブリーディングにより形成される細骨材の平均遷移帯厚さ、 $TG_{ITZ-B}$  : ブリーディングにより形成される粗骨材の平均遷移帯厚さ、 $W/C$  : 水セメント比

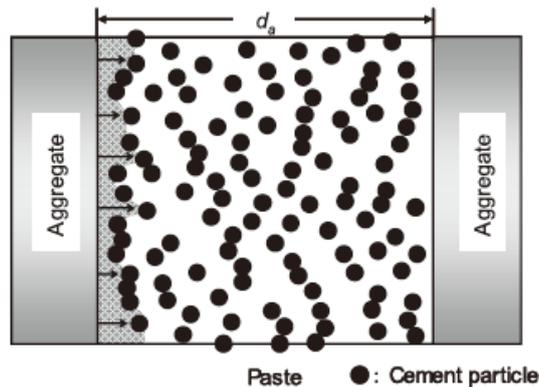


Fig.3-5 Concept of wall effect<sup>3-32)</sup>

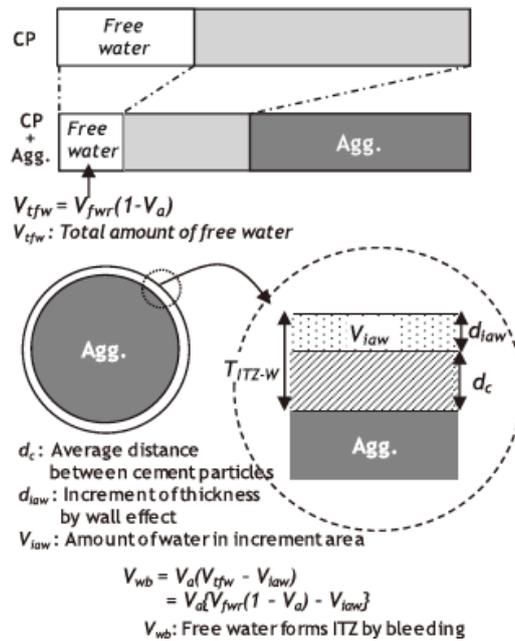


Fig.3-6 Concept of bleeding water around aggregates<sup>3-32)</sup>

### 3.3.4 コンクリートの空隙量と物質の移動特性の関係

上述したペースト中の空隙率と骨材の遷移帯量の式を統合すると、コンクリートの構成材料の単位量、養生条件及び材齢によって、粗大な空隙量を算出でき、更に既往の研究の拡散係数の実験結果と関係づけければ、コンクリートの調合の影響を具体化できる。

参考に、小林らが  $O_2$  の拡散係数を測定した実験<sup>3-27)</sup>に関し、上述した手法で空隙量を求め、両値の相関を Fig.3-7(a)に示す。この際、前項で拡散係数との相関を認めなかったゲル空隙の影響を確認するため、取違らが 3-38 式で定式化したゲル空隙量<sup>3-33)</sup>を加算した場合も併記している。

$$\theta_{gel} = \frac{0.19 \cdot F_{avg}}{W/C + 0.32} \quad (3-38)$$

ここで、 $\theta_{gel}$ : ペースト中のゲル空隙率、 $W/C$ : 水セメント比、 $F_{avg}$ : 平均水湿度

また、小林らの実験では、試験体を水中に 48 時間浸漬して吸水させた状態を含水率 100%、105°C 強制乾燥で一定重量となった状態を含水率 0%としているが、本試算では、乾燥に影響するゲル空隙以上の空隙が飽水した状態を含水率 100%、左記の空隙が絶乾した状態を含水率 0%とし、開放空隙率は 0 以上とした。また、セメントペースト中の自由水量は、丸山らの実験結果<sup>3-30) 3-31)</sup>から近似式を作成し、解析に供した。

得られた Fig.3-7(a)において、小林らの結果と異なり、ゲル空隙率を考慮した方が、拡散係数との寄与率が高い。但し、小林らの実験は、スランブ 10cm と 18cm を想定しているので、後者に限定して改めて寄与率を求めると、Fig.3-7(b)に示す通り、ゲル空隙率を考慮しない方が、寄与率が高くなる。骨材の遷移帯量を定式化した加藤らが、別の論文<sup>3-34)</sup>において同じ目的で試算した想定コンクリートは、 $W/C:0.50$  に対して、軟練の単位水量  $185\text{kg/m}^3$  を設定していることから、小林らが実験した 30 年以上前の土木系の固練りコンクリートに、本法で統合した手法が適さなかった可能性が高い。また、逆説的に、建築で一般に用いるスランブ 18cm のコンクリートに関し、小林らの見解をほぼ再現することが確認できたとと言える。

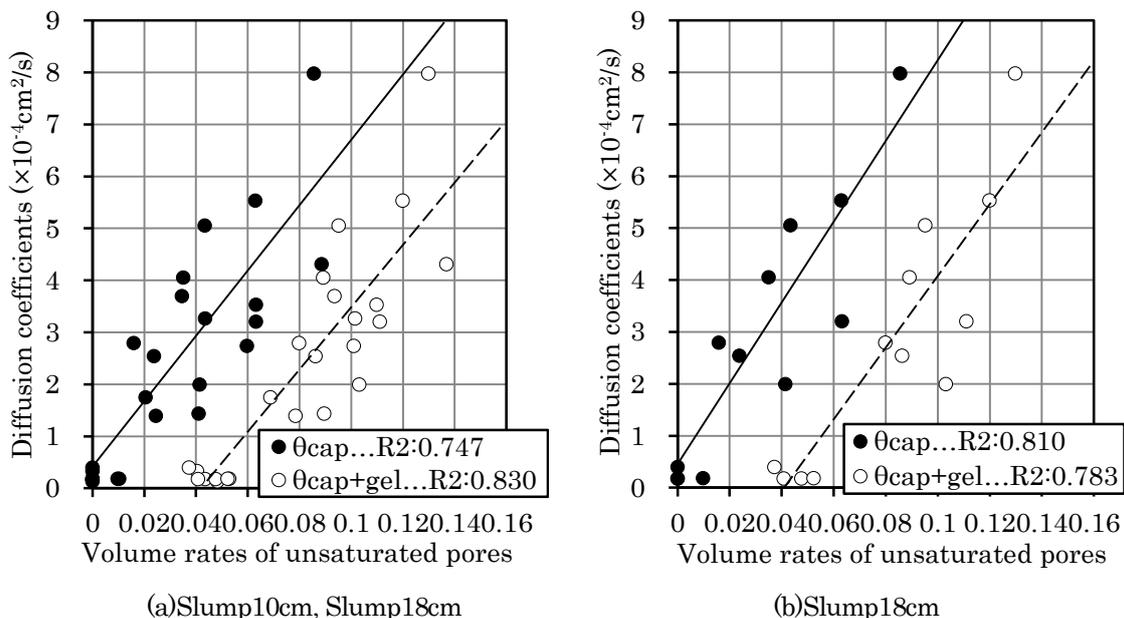


Fig.3-7 Contributing rates of the linear regression between diffusion coefficients and volume rates of unsaturated pores

総じて、丸山らの平均水湿度を用いた横関らの毛細管空隙率と、加藤らの遷移帯量を加算した上で含水率を減じたコンクリート中の粗大な開放空隙量によって、気相の拡散係数の線形の関係を、より高い寄与率で得られると考えられる。なお、解析時点の材齢は簡単のため91日に特定し、コンクリートと外的要因の反応については物資毎に後述する。

### 3.4 水の移動特性

#### 3.4.1 水の移動の基本モデル

##### (1) コンクリート工学的手法

前節で述べた様に、コンクリート中の物質の移動特性は水の影響を受け、また、建築物の仕上材には透湿性があるため<sup>3-35)</sup>、原則として、全てのコンクリートが吸放湿を繰り返している。柳らは、水セメント比とひび割れの有無を因子とする打放しコンクリートの供試体に対して降雨を模した散水実験を行い、本研究の趣旨に関連する主要な知見として、ひび割れのないW/C:0.60の供試体で、Fig.3-8に示す様に、深さ3cmまでが降雨の影響範囲にあり、特に深度1cmで相対含水率が急激に増す傾向があることを確認し、表層では表面張力によって水が膜を形成するため、水の供給速度が吸水速度を上回り、かつ、メニスカスまでの距離と毛細管壁の摩擦抵抗合力の正の相関に起因し、経時に伴い水分伝導率が低下するため、降雨量よりも降雨期間の方がコンクリート中の水分状態に重要であること等を述べている<sup>3-36)</sup>。

同知見から、コンクリートのかぶり部分の含水率の傾斜性のモデル化が不可避であること、吸水・放湿過程毎に、異なる拡散係数を設定する必要があること、コンクリートの拡散係数だけではなく、降雨の履歴を勘案して、含水率の分布を予測する必要があること等が分かる。

コンクリート中の深さ方向の含水率の分布を特定する研究としては、コンクリートの乾燥収縮機構を把握するための研究が多く、源流には、水和に伴う自己乾燥を含む乾燥過程に関する非線形拡散方程式をクランクニコルソン法で解いたBažantらによる解法<sup>3-37)</sup>、乾燥過程の拡散係数をボルツマン変換で得

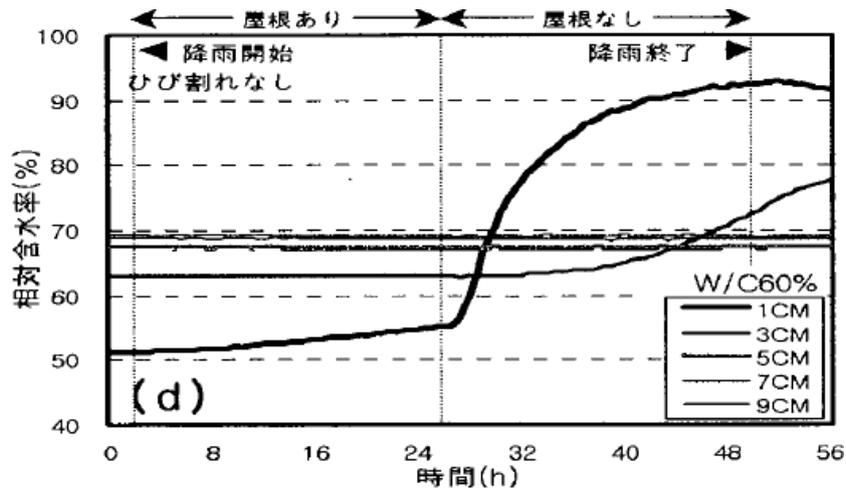


Fig.3-8 Transition of relative moisture content in concrete with/without rainfall<sup>3-36)</sup>

た非線形拡散方程式を、ガラーキン法による重み付き残差法と四角形アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法で解いた阪田らによる解法<sup>3-38)</sup>、一次元非線形方程式に供するための、ボルツマン変換による乾燥・吸湿・吸水過程の水分伝導率の秋田らによる解法<sup>3-39)</sup>、打設直後からの乾燥の初期材齢モデルをBažantらの手法に導入した橋田らによる解法<sup>3-40)</sup>等があるが、任意の条件の実験結果に対し、トップダウン的に原理を提示するもので、調査情報等処理するインターフェースがないため、汎用性がない。

細孔径分布までモデル化した精緻な研究としては、下村らが、前節で紹介した研究において、①細孔容積分布密度関数による細孔径のモデルに関する 3-13 式、②細孔組織中に水蒸気と乾燥空気からなる理想混合気体と粘性と表面張力をもつ非圧縮性流体である液状水が存在する仮定のもと、質量保存則に基づいて水及び水蒸気の移動を定式化した上で、水蒸気量は微小のため、相変化を無視できるものとして、再構成した 3-39～41 式、③気液相界面の応力差で得られる毛細管張力による組織の変形の線形モデルに関する 3-42 式、④大気との境界条件の水分流速モデルに関する 3-43, 44 式を統合し、乾燥過程の材料のモデルとする方法を示しており、ほぼ完成されている<sup>3-24)</sup>。但し、前節で粗大空隙量によってコンクリートの物性を巨視的に特定した経緯に照らすと、技術階層的に精緻な本解析モデルが引用できないことは自明である。

$$\frac{\partial w_V}{\partial t} = -\text{div}(J_V + J_L) \quad (3-39)$$

$$J_V = -D_{V(w_L)} \cdot \text{grad} w_L \quad (3-40)$$

$$J_L = -D_{L(w_L)} \cdot \text{grad} w_L \quad (3-41)$$

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\sigma_S}{E_S} = A_S \cdot \frac{2\gamma}{r_S} \cdot \frac{1}{E_S} \quad (3-42)$$

$$J_B = \alpha_B \cdot (w_{LS} - w_{LB}) \quad (3-43)$$

$$\alpha_B = \frac{D_{V(w_L)} + D_{L(w_L)}}{h} \quad (3-44)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $w_V$  : 単位体積中の水蒸気の質量、 $J_V$  : 水蒸気の質量流束、 $D_{V(w_L)}$  : 水蒸気拡散係数、 $w_L$  : 単位体積中の液状水の質量、 $D_{L(w_L)}$  : 液状水拡散係数、 $J_L$  : 液状水の質量流束、 $\varepsilon_{sh}$  : 乾燥収縮歪み、 $r_S$  : 毛管の半径、 $\sigma_S$  : 毛管力に起因する応力、 $E_S$  : 毛管力に対する弾性係数、 $A_S$  : 毛管力の作用

面積の影響を表す係数,  $\gamma$ : 液状水の表面張力,  $J_B$ : 境界での水分流束,  $\alpha_B$ : 水分伝達係数,  $w_{LS}$ : コンクリート表面での液状水量,  $w_{LB}$ : 雰囲気の相対湿度に平衡する液状水量,  $h$ : 境界近傍の雰囲気湿度分布の状態を表現する長さの次元をもつ量

## (2)熱水分連成解析

そこで, より俯瞰的に, 多孔体中の水の移動に関する研究を対象を転じると, 地盤分野の研究に端を発した計画・環境分野の熱水分連成解析が, 松本らによって確立され, コンクリートに適用される迄に至っている<sup>34)</sup>。この際に用いた式は, 3-45~51式である。

$$\rho_w \cdot \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_\mu \cdot \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda'_T \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3-45)$$

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( r \cdot \lambda'_{\mu g} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda + r \cdot \lambda'_{Tg}) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3-46)$$

$$\lambda'_{Tg} = \lambda' \cdot e^{\frac{\mu}{R_v T}} \cdot \left( \frac{\partial P_{vS}}{\partial T} - P_{vS} \cdot \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (3-47)$$

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} \cdot \left( 1 / \left( \frac{R_v T \cdot \frac{\partial P_{vS}}{\partial T}}{P_{vS}} \right) - \frac{\mu}{T} \right) \quad (3-48)$$

$$\lambda'_\mu = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l} \quad (3-49)$$

$$\lambda'_{\mu l} = \frac{K \cdot \rho_w}{g} \quad (3-50)$$

$$\lambda'_T = \lambda'_{Tg} \quad (3-51)$$

ここで,  $\rho_w$ : 水の比重量,  $\psi$ : 体積含水率,  $\mu$ : 水分化学ポテンシャル,  $t$ : 時刻,  $x$ : 位置,  $\lambda'_\mu$ :  $\mu$  勾配に関する水分伝導率,  $\lambda'_T$ : 温度勾配に関する水分伝導率,  $T$ : 温度,  $c$ : 比熱,  $\rho$ : 比重量,  $r$ : 蒸発潜熱,  $\lambda'_{\mu g}$ :  $\mu$  勾配に関する気相水分伝導率,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\lambda'_{Tg}$ : 温度勾配に関する気相水分伝導率,  $\lambda'$ : 湿気伝導率,  $R_v$ : 水蒸気の気体定数,  $P_{vS}$ : 飽和水蒸気圧,  $\lambda'_{\mu l}$ :  $\mu$  勾配に関する液相水分伝導率,  $K$ : 透水係数

但し, 尾崎によると, 松本らの手法は温度勾配と水分化学ポテンシャル勾配に対する水分伝導率及び水分伝達率の算定に, 湿気伝導率と湿気伝達率を用いるため, 湿流の駆動力を水蒸気圧としたのと同様であり, 連成解析として問題がある<sup>342)</sup>。尾崎は, 駆動力としての水分ポテンシャルを改めて定義した上で, 気液相水分流に関する水分収支式, 伝導及び水分流による熱流に関する熱収支式によって, 熱水分連成の解析モデルを構築している<sup>343)</sup>。

$$\rho_{lw} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \cdot \nabla \mu_w + \nabla \lambda'_l \cdot \nabla \mu \quad (3-52)$$

$$\frac{\partial c \cdot \rho \cdot T}{\partial t} + (c_{lw} \cdot j_{lw}) \cdot \nabla T = \nabla \lambda \cdot \nabla T + r_v \cdot \nabla \lambda'_g \cdot \nabla \mu_w \quad (3-53)$$

$$-\lambda'_g \cdot \frac{\partial \mu_w}{\partial n_v} = \alpha' \cdot (\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) \quad (3-54)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_v} - r_v \cdot \lambda'_g \cdot \frac{\partial \mu_w}{\partial n_v} = \alpha_c \cdot (T_a - T_s) + r_v \cdot \alpha' \cdot (\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) + q_s \quad (3-55)$$

ここで,  $\rho_{lw}$ : 液相水分の比重,  $\partial \phi / \partial \mu$ : 水分容量,  $\mu$ : 不飽和水分ポテンシャル,  $t$ : 時間,  $\lambda'_g$ : 気相水分伝導率,  $\mu_w$ : 水分ポテンシャル,  $\lambda'_l$ : 液相水分伝導率,  $C$ : 材料の比熱,  $\rho$ : 壁体の比重,  $T$ : 絶対温度,  $c_{lw}$ : 液相水分の比熱,  $j_{lw}$ : 液相水分流,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $r_v$ : 相変化熱,  $n_v$ : 境界面の内向き法

線ベクトル,  $\alpha'$  : 水分ポテンシャル差に対する水分伝達率,  $\mu_{w,a}$  : 周囲空気の水分ポテンシャル,  $\mu_{w,s}$  : 境界面の水分ポテンシャル,  $\alpha_c$  : 対流熱伝達率,  $T_a$  : 周囲空気の温度,  $T_s$  : 境界面の温度,  $q_s$  : 放射受熱量

同式は、多孔質材中の熱水分の移動を扱う際に、多孔質の細孔径分布を扱わず、固相として巨視的に扱う点で好適であるが、本研究で基本とする拡散方程式とは技術思想が根本的に異なるため、一考を要する。本研究では、①熱と水の解析に必要となる気温、日射、降雨等の環境モデルの不確実性が大きいこと、②コンクリートの空隙量と水の拡散性状の相関曲線を得る際に最小二乗法を用いるため、緩衝項が発生すること、③コンクリート中の水の移動による温度変化が、材料の表面温度を示す相当外気温<sup>34)</sup>や空調による室内の壁面温度の日内の温度変化を卓越する可能性が無いことを勘案し、尾崎らの手法に基づいて、恒温環境下のコンクリート内の水の挙動に関するデータベースを構築した上、同データベースから、拡散方程式の定数を得る関係式を定めるものとする。同行為は、熱水分連成解析の設計思想に照らすと不遜な感があるが、実験結果の欠如という建築系の解析モデルの根本的な課題と、建築系の他の要素に関する解析との技術水準の乖離という土木系の解析の課題を同時に解決できる。

### 3.4.2 水の移動の簡易式

実際の解析であるが、まず、コンクリート内の水の挙動に関するデータベースを構築するため、熱水分連成解析に関し、吸水過程は Table3-2、放湿過程は Table3-3 の因子・水準を設定する。解析は陽解差分法によるものとし、履歴が安定することを目標に、試行錯誤の上、吸水時のメッシュを 2.5mm、モデル化の範囲を 100mm、時間間隔を 10 秒、全解析期間を 100,000 秒、放湿時を順に 10mm, 400mm, 100 秒, 3,000,000 秒とする。

Table3-2 Parameters of analysis for water absorption process

Porosity	0.120, 0.14, 0.157, 0.17, 0.180
Relative water content (%)	25, 40, 55.6, 70, 85
Heat transfer coefficient (W/(m <sup>2</sup> · K))	16.0, 19.1, 22.0
Temperature(K)	273, 283, 293, 303, 313

Table3-3 Parameters of analysis for moisture desorption process

Porosity	0.120, 0.14, 0.157, 0.17, 0.180
Relative humidity (%)	10, 45, 75, 90
Heat transfer coefficient (W/(m <sup>2</sup> · K))	16.0, 19.1, 22.0
Temperature (K)	273, 283, 293, 303, 313

表中の空隙率 0.157、相対含水率 55.6%は、柳らの論文<sup>33)</sup>から、北海道大学大学院理学研究院附属原子核反応データ研究開発センターのグラフ数値読取システム「GSYS2.2」を用いて読み取った値で、熱伝達係数 19.1 W/(m<sup>2</sup> · K)は、コンクリートに限定せず、一般的な外壁の熱伝達率を想定した値である。因みに、柳らの実験自体は打放しコンクリートを対象とするため、5 W/(m<sup>2</sup> · K)が適当である。その他の値は、同じく柳らの実験結果を基準として、実用される普通強度のコンクリート中の水の挙動を再現す

ることを目標に、任意に定めた値である。

次に、得られたデータベースをもとに、3-56式の関係性が得られる定常環境下の拡散係数 $D_{w,T_B}(t)$ を収斂して得た上、各温度の拡散係数間に3-57式のアレニウス則を当てはめ、定数を得る。

$$\frac{\partial[w(t)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{w,T}(t) \cdot \frac{\partial[w(t)]}{\partial x} \right) \quad (3-56)$$

$$D_{w,T}(t) = D_{w,T_B}(t) \cdot \exp \left( -\frac{E_w}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_B} \right) \right) \quad (3-57)$$

ここで、 $t$ ：時間、 $w(t)$ ：時間 $t$ における含水率、 $T$ ：コンクリートの絶対温度、 $D_{w,T}(t)$ ：任意の含水率と絶対温度における水の拡散係数、 $x$ ：深さ、 $D_{w,T_B}(t)$ ：任意の含水率と基準温度における水の拡散係数、 $E_w$ ：水の拡散に関する見かけの活性化エネルギー、 $R$ ：気体定数、 $T_B$ ：基準温度

本研究では、更に、基準となる拡散係数を空隙率と含水率の関数として近似した。この際、式の体裁に数学的根拠はないため記載を避け、指数則とべき乗則の組合せによって近似したことを付記する。

その上で、得られた近似式と熱水分連成解析による解析範囲の平均含水率の相関を、吸水、放湿過程毎にFig.3-9に示す。放湿時の挙動は本法によって、よく再現できている。吸水時は、高含水状態で吸水させる場合、本解析の感度が鈍くなる傾向があるが、俯瞰的には、ほぼ1：1の対応線近傍に位置している。

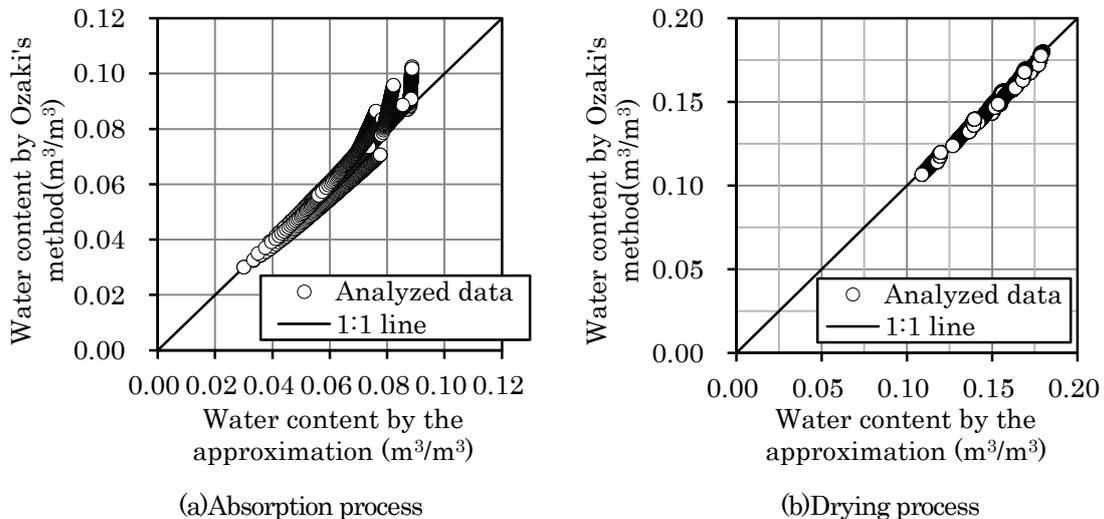
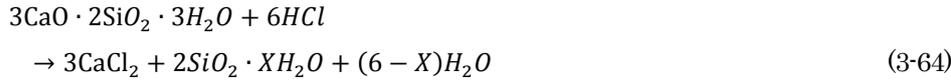
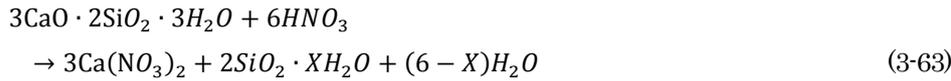
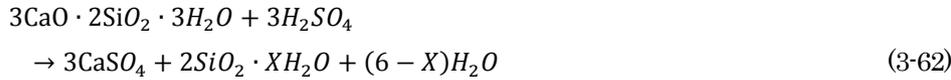


Fig.3-9 Relation between water content by Ozaki's method and water content by this approximation method

### 3.4.3 水の反応モデル

本研究で外部から侵入する水は、原則として降雨に起因するもので、 $H_2SO_4$ 、 $HNO_3$ 、 $HCl$ の混合酸を含んでいる。降雨に際しては、酸性成分が建築外皮に湿性沈着した上、内部に移流拡散し、内部から生成物が溶出して、外皮上を流下する現象が発生する。化学反応としては、3-58式に示す $Ca(OH)_2$ と $H_2SO_4$ の反応による $CaSO_4$ の生成、 $Ca(OH)_2$ 全量消費後の3-59～61式に示す $CaCO_3$ の分解、 $CaCO_3$ 全量消費後の3-62～64式に示すCSHからの $SiO_2 \cdot XH_2O$ の生成と<sup>3-45)</sup>、3-65及び3-66式に示す $HNO_3$ 、 $HCl$ の $Ca(OH)_2$ との反応生成物と $H_2SO_4$ の二次反応を生じている。



従来は、 $H_2SO_4$ のモル分率が、 $HNO_3$ または $HCl$ との二成分混合酸で約0.4以上、 $HNO_3$ 、 $HCl$ との三成分混合酸で約0.3以上の場合、 $CaSO_4$ の被膜生成が、 $HNO_3$ 、 $HCl$ と $Ca(OH)_2$ の生成物の溶脱に卓越するため、劣化の進行が緩慢になるとの研究がある上<sup>3-46)</sup>、雨水中の $H_2SO_4$ 濃度が同値を超過すると報告が大勢を占めたため<sup>3-46), 3-47)</sup>、実害はCSHの分解時の非分解部との境界の鉄の濃縮による黄変と、 $CaSO_4$ の流下の痕跡程度と考えられ、酸性雨の影響は検討されてこなかった。

しかし、近年の調査では、閾値となるモル分率を下回る地域も多く確認されている上<sup>3-48)</sup>、上述した黄変は、ラボではpH3を下回る強酸で初めて再現される現象<sup>3-49)</sup>であることから、降雨と乾燥の繰返しにより、濃縮が生じている可能性も否定されない。超長期を俯瞰すると、酸性雨による劣化のリスクを、降雨の成分分析だけで判断するのは困難であると言える。

ここでは、降雨中の酸の濃度を定めた上、降雨に伴うコンクリートの含水率の変量に基づいて、深度方向の酸の濃度を定め、3-58～66式の反応による空隙率の変化を算定する。即ち、黄変や流下の痕跡、体積変化に伴う亀甲ひび割れは、検討の対象外とし、コンクリート中の水和生成物の中性化と外的要因の移動速度の変化だけを定量することを試みる。なお、 $Ca(OH)_2$ は、梶田、兼松らの仮定<sup>3-21), 3-22)</sup>に準じ、原則として移流を生じず、暴露開始時の位置で各酸と反応するものとし、空隙率の変化は、体積変化が顕著な $CaSO_4$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $SiO_2 \cdot XH_2O$ 、CSHに限定して、計算する。また、毛細管空隙中の3-58～66式の全ての反応速度を、既往の研究で説明するのは困難であるため、ここでは、①一回の降雨でコンクリートと反応する酸は微量であること、②降雨のモデルは不確実性が大きいこと、③三成分混合酸の反応は同時に生じること<sup>3-45)</sup>から、仮に、解析上の1ステップ内で全ての反応が完結するものとして解析に供する。なお、前節で記述した様に、コンクリートの材齢は91日で固定するので、未反応のセメントは外部から侵入した水と反応しないものとする。

### 3.5 CO<sub>2</sub>の移動特性

CO<sub>2</sub>の移動特性を反応型拡散方程式で表現する上で、生じている化学反応を特定する必要がある。小林らによれば、同移動過程において、 $Ca(OH)_2$ とCSHの反応が順次発生するとされており<sup>3-50)</sup>、石田らの研究においても同様である<sup>3-51)</sup>。石田らは、 $SiO_2 \cdot XH_2O$ 中の水の当量の予測の困難と、CSHのC/S比、周囲の温湿度、CO<sub>2</sub>濃度による反応過程の不確実性に配慮しつつ、AFtとAFmをCSHとして平均して扱い、反応速度を3-67式で表現している<sup>3-51)</sup>。そこで、本研究では、これを梶田らの式<sup>3-21)</sup>に統合し

た 3-68 式によって、CO<sub>2</sub>の移動過程を表現する。

$$R(t) = \kappa_s \cdot \exp(20.7 \cdot \Lambda(t)) \cdot [CO_2(t)] \cdot [CSH(t)] \quad (3-67)$$

$$\frac{\partial[CO_2(t)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{CO_2,T}(t) \cdot \frac{\partial[CO_2(t)]}{\partial x} \right) - \kappa_{c,T} \cdot [CO_2(t)] \cdot [Ca(OH)_2(t)] - R(t) \quad (3-68)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $R(t)$  : CSHの時間 $t$ における反応速度、 $\kappa_s$  : SiO<sub>2</sub>・XH<sub>2</sub>Oの反応速度、 $\Lambda(t)$  : 時間 $t$ におけるCSHの炭酸化率、 $[CSH(t)]$  : 時間 $t$ におけるCSH濃度、 $T$  : コンクリートの絶対温度、 $x$  : 深さ、 $[CO_2(t)]$  : 時間 $t$ におけるCO<sub>2</sub>濃度、 $D_{CO_2,T}(t)$  : 時間 $t$ , 絶対温度 $T$ におけるCO<sub>2</sub>の拡散係数、 $\kappa_{c,T}$  : 絶対温度 $T$ におけるCaCO<sub>3</sub>の反応速度、 $[Ca(OH)_2(t)]$  : 時間 $t$ におけるCa(OH)<sub>2</sub>濃度

その上で拡散係数であるが、CO<sub>2</sub>がもたらすコンクリートの中性化速度に関する実験的研究は膨大で、それぞれ多様なアプローチがとられている。必要とされるのは、含水率を考慮した空隙率とCO<sub>2</sub>の拡散係数の関係であるが、例えば、最も有名なPapadakisらの式は、相対湿度に応じたKelvin半径以下の細孔は水が充満し、その他は同様に相対湿度に応じた厚さの水膜で覆われる仮定のもとで、細孔量と相対湿度の関数として、次式で拡散係数を定式化している<sup>3-52)</sup>。

$$D_{CO_2} \approx 1.64 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_p^{1.8} \cdot (1 - RH/100)^{2.2} \quad (3-69)$$

ここで、 $D_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub>の有効拡散係数、 $\varepsilon_p$  : 硬化したセメントペーストの空隙量、 $RH$  : 相対湿度

しかし、同式は明らかに降雨時の吸水の評価には適しておらず、骨材の影響を考慮しないことと併せて実用性にかける。その他、前掲したYoon<sup>3-4)</sup>、梶田<sup>3-21)</sup>、兼松<sup>3-22)</sup>らの研究でもW/Cとの関係性等には言及しているが、コンクリートの含水率及び空隙率と拡散係数を関連付ける迄に至っていない。

この点で、佐伯らは、小林らのO<sub>2</sub>の拡散係数を1.3倍した上で、飽水時の拡散係数を0にすることを意図して切片を補正すべき乗則を定式化しており、好適である<sup>3-53)</sup>。

$$D_{CO_2} = 0.33 \cdot (3.62 \cdot 10^{12})^V - 0.33 \quad (3-70)$$

ここで、 $V$  : 含水率を考慮した細孔量

本研究でもこれに準じるが、小林らの実験は原理の確認実験であって、一般化するには標本数が少ない上、飽水に至らない場合も、見かけの拡散が具体化しない可能性もあるため、補正値の是非については各論がある。そこで、絶対量の補正は全体で行うものとし、他の因子の近似においても共通の手法をとることを念頭に、佐伯らの式を次式に近似して、解析に供するものとした。

$$D_{CO_2,T_B}(t) = a \cdot \exp(b \cdot (\theta(t) - w(t))) \quad (3-71)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $T_B$  : 基準温度、 $D_{CO_2,T_B}(t)$  : 時間 $t$ , 絶対温度 $T_B$ におけるCO<sub>2</sub>の拡散係数、 $\theta(t)$  : 時間 $t$ の空隙率、 $w(t)$  : 時間 $t$ の含水率、 $a$  : 近似式の定数、 $b$  : 近似式の定数

因みに温度の影響は、佐伯らの式から得たデータから、水の拡散係数の場合と同様に、アレニウス則のエネルギー定数を得て、解析に供する。

次に、CaCO<sub>3</sub>の反応速度 $\kappa_{c,T}$ については、差分法で拡散方程式を解く場合、メッシュと時間間隔によって、都度設定する必要がある。万能定数になる懸念もあるが、本研究では、その他の材料定数を全て設定した上で、基準温度下で、最小二乗法により $\kappa_{c,T_B}$ を決定するものとする。なお、同定数の温度依存性については、Papadakisらの次式<sup>3-54)</sup>を、拡散係数同様にアレニウス則に近似して再現する。

$$r_{CH} = H \cdot R \cdot T \cdot k_2 \cdot [OH^-]_{eq} \cdot [CO_2] \quad (3-72)$$

ここで、 $r_{CH}$  : 溶解したCa(OH)<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の反応速度、 $H$  : Henry定数、 $R$  : 気体定数、 $T$  : 温度、 $k_2$  : CO<sub>2</sub>とOH<sup>-</sup>の反応速度、 $[OH^-]_{eq}$  : 液相のOH<sup>-</sup>濃度、CO<sub>2</sub> : 気相のCO<sub>2</sub>濃度

また、CSHの炭酸化については、現時点で十分なデータがないため、Ca(OH)<sub>2</sub>が全て中性化した範囲で、石田らの3-67式<sup>3-50</sup>)に準じて進行するものとし、その影響を考慮する。

### 3.6 Cl<sup>-</sup>の移動特性

Cl<sup>-</sup>は、海洋環境の飛沫や水中浸漬ではなく、一般環境のエアロゾルを想定し、外皮に面する空隙に滞留する水分に飛着したイオンの自己拡散を扱う。海洋環境における研究に準じると、Cl<sup>-</sup>とコンクリートの反応に、CO<sub>2</sub>が作用することが知られており、例えば、小林は、フリーデル氏塩の生成に伴う固相のCa(OH)<sub>2</sub>の溶出による炭酸化の加速、炭酸化に伴うフリーデル氏塩からのCl<sup>-</sup>の解離、その後の濃縮と拡散の繰返しを指摘している<sup>3-50</sup>)。本研究では、Cl<sup>-</sup>のAFm以外の水和物への吸着や物理的吸着、二水石膏やpH等の三次的要因は、簡単のため、モデル化の対象外とした上、小林らの示した劣化機構をCO<sub>2</sub>同様に反応型拡散方程式に近似し、同過程を評価する。

$$\frac{\partial[Cl^{-}(t)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{Cl^{-},T}(t) \cdot \frac{\partial[Cl^{-}(t)]}{\partial x} \right) - \kappa_{FR} \cdot [AFm(t)] \cdot [Cl^{-}(t)] + \kappa_{Cl^{-}} \cdot [FR(t)] \cdot [CO_2(t)] \quad (3-73)$$

ここで、 $t$  : 時間,  $[Cl^{-}(t)]$  : 時間 $t$ のCl<sup>-</sup>濃度,  $x$  : 深さ,  $T$  : コンクリートの絶対温度,  $D_{Cl^{-},T}(t)$  : 時間 $t$ , 絶対温度 $T$ におけるCl<sup>-</sup>の拡散係数,  $\kappa_{FR}$  : フリーデル氏塩の生成に関する反応速度,  $[AFm(t)]$  : 時間 $t$ のAFm濃度,  $\kappa_{Cl^{-}}$  : フリーデル氏塩の炭酸化によるCl<sup>-</sup>の解放に関する反応速度,  $[FR(t)]$  : 時間 $t$ のフリーデル氏塩の濃度,  $[CO_2(t)]$  : 時間 $t$ のCO<sub>2</sub>濃度

なお、暴露開始時のAFm濃度は、二水石膏含有量と同石膏を全量消費した後のC<sub>3</sub>Aの残量から算出し、AFmのモル濃度とCl<sup>-</sup>のモル濃度の2分の1のうち最小値相当、フリーデル氏塩が生成される仮定を与え、解析に供する。反応速度については、化学的平衡を基本とした研究は多いが、速度を定量した研究は限られるため、作用するCl<sup>-</sup>が微量であることを勘案し、本研究の範囲では、Cl<sup>-</sup>が到達した時点で反応が完了するものと仮定する。一方、フリーデル氏塩の炭酸化については、基本的にCa(OH)<sub>2</sub>やCSHの炭酸化に類似した反応過程を経て、Cl<sup>-</sup>を放出するものとする。なお、Cl<sup>-</sup>の自己拡散係数に関しては、石田らがEinsteinの理論式をDebye-Hückel理論で補正するのが一般としつつも、NaCl濃度に照らすと無視できるため、前者だけで同係数を得たことに準じ、次式で表現する<sup>3-55</sup>)。

$$D_0 = R \cdot T_B \cdot \frac{\lambda_{Cl^{-},T_B}}{z_{ion}^2 \cdot F^2} \quad (3-74)$$

ここで、 $D_0$  : Cl<sup>-</sup>の自己拡散係数,  $R$  : 気体定数,  $T_B$  : 基準温度,  $\lambda_{Cl^{-},T_B}$  : 基準温度 $T_B$ におけるCl<sup>-</sup>のモル伝導率,  $z_{ion}$  : イオンの価数,  $F$  : ファラデー定数

その上で、自己拡散する液相の影響を補正するため、佐伯らの含水率に関する3-75式<sup>3-56</sup>)を、他同様に指数関数に近似して、3-74式に乗じた3-76式を得て、見かけの拡散係数の評価式として用いる。なお、温度の影響は、CO<sub>2</sub>の拡散係数同様に、アレニウス則に近似して解析に供する。

$$D/D_0 = 0.0032 \cdot 10^{0.025 \cdot w} \quad (3-75)$$

ここで、 $D$  : 含水率の影響を補正したCl<sup>-</sup>の自己拡散係数,  $w$  : 含水率

$$D_{Cl^{-},T_B}(t) = \mu \cdot \theta(t)^{\nu} \cdot \exp\left(\omega \cdot \frac{w(t)}{\theta(t)}\right) \cdot R \cdot T_B \cdot \frac{\lambda_{Cl^{-},T_B}}{z_{ion}^2 \cdot F^2} \quad (3-76)$$

ここで、 $t$  : 時間,  $D_{Cl^{-},T_B}(t)$  : 時間 $t$ , 基準温度 $T_B$ におけるCl<sup>-</sup>の拡散係数,  $\mu$  : 近似式の定数,  $\theta(t)$  : 時間 $t$ の空隙率,  $\nu$  : 近似式の定数,  $\omega$  : 近似式の定数,  $w(t)$  : 時間 $t$ の含水率

### 3.7 材料学的劣化モデルの検証

#### 3.7.1 トレース対象の実験概要

モデルの検証のため、日本建築学会の仕様書<sup>3-57)</sup>において、中性化速度係数の根拠として引用されている既往の実験的研究から、解析に必要な情報が類推可能な木許ら<sup>3-58)</sup>、笹川ら<sup>3-59)</sup>、笹谷ら<sup>3-60)</sup>の屋外の打放しコンクリートの測定結果を再現する。塩害の影響については、環境条件の影響も大きいため、4章で後述するものとし、本検証では対象としない。

再現する各測定結果の諸元は、Table3-4の通りである。

Table3-4 Specifications of measurement conditions

	Kimoto <sup>3-58)</sup>	Sasagawa <sup>3-59)</sup>	Sasatani <sup>3-60)</sup>
Area	Tsukuba	Niigata	Kanazawa
Direction	South, North	Upper	Upper
Member type	Wall	Roof	Prism
Passing years	8, 15	8, 22, 35	5
W/C	0.55, 0.60, 0.65	0.57	0.65
Specific gravity(g/cm <sup>3</sup> )	3.15 <sup>3-61)</sup>	3.15 <sup>3-62)</sup>	3.13
Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	3,260 <sup>3-61)</sup>	2,980 <sup>3-62)</sup>	3,230

表中のセメントの比重と比表面積は、木許らと笹川らの論文には記載されていない。前者は関連する情報がないため、セメント協会のHP<sup>3-61)</sup>を参考に任意に定め、後者は同じメーカーのセメントに、本論文同様にCSA系膨張材を混和したコンクリートを用いた論文<sup>3-62)</sup>から引用した。また、主要化学成分は、普通ポルトランドセメントを想定して、C<sub>3</sub>Sを51%、C<sub>2</sub>Sを25%、C<sub>3</sub>AとC<sub>4</sub>AFを9%で共通とした<sup>3-63)</sup>。

#### 3.7.2 解析の手順

具体的な解析方法に関し、本拡散方程式は関係因子が多いため、解析上の仮定が増えることを避け、陽解差分法によって解く。繰返し数を抑えるため、時間は $2 \times 10^3$ 日、要素は表層を2.5mm、内部を5mmで分割する。同設定の影響下にある反応定数は、陽解法特有の誤差の累積も含めて、AIJ式の超長期の履歴と照合し、促進試験結果に近似した石田の値<sup>3-51)</sup>の50分の1を与える。また、中性化は、当該深さのCa(OH)<sub>2</sub>の濃度が、0.1mol/m<sup>3</sup>未満に達した時点とする。

環境設定に関し、ここまでに一切言及していないが、実用式で汎用する代表的な環境条件である気温、降雨のない日の相対湿度は、最寄りの気象庁観測所の暴露期間の1時間単位の観測値、CO<sub>2</sub>濃度は前項で示した実験期間の記録のある気象庁綾里観測所の値を用いる。

また、降雨のモデルについては4章で詳述するが、入手可能な暴露期間の1時間単位の降雨の有無の情報を、年単位で乱数によって与える。降雨の成分については、環境省が降雨中の非海塩起源のH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>とHNO<sub>3</sub>の濃度の測定結果と平成10~24年の地域毎の最小値、中央値、最大値、10、25、75、90%値を公表しているので<sup>3-64)</sup>、ここでは、つくば市を含む太平洋側の結果を用いてモデル化する。

但し、各濃度の変動を大気中の成分のダイナミックな解析によることは避け、中央値と25乃至75%値との差分に標準正規分布を仮定して標準偏差を得て、3-77式によって表現する。なお、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>とHNO<sub>3</sub>の濃度の変動は一致しないが、山口らの横須賀市における10年間の測定によると、降雨頻度や発生源の

活動状況等に起因する巨視的な傾向はあるため<sup>365)</sup>、定性的な関係性を 3-78 式で外挿する。HCl については同報告に記載されていないが、山口は H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度より 1 オーダー大きい実測値を報告しており、他方で河野が電力中央研究所の研究をもとに採用したモデルにおける H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度に対する HCl 濃度の当量比は 0.6 と小さく<sup>366)</sup>、ともに標準偏差が得られる情報もない。ここでは簡単のため、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度と同一のモル濃度を与える。

$$[H_2SO_4(t)] = [H_2SO_{4Ave.}] + SD_{H_2SO_4} \cdot N(0,1) \quad (3-77)$$

$$[HNO_3(t)] = [HNO_{3Ave.}] / [H_2SO_{4Ave.}] \cdot [H_2SO_4(t)] + SD'_{HNO_3} \cdot N(0,1) \quad (3-78)$$

ここで、 $t$  : 時間,  $[H_2SO_4(t)]$  : 時間  $t$  における, 降雨中の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度,  $[H_2SO_{4Ave.}]$  : 降雨中の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度の年平均値,  $SD_{H_2SO_4}$  : 降雨中の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度の標準偏差,  $N(0,1)$  : 正規乱数,  $[HNO_3(t)]$  : 時間  $t$  における, 降雨中の HNO<sub>3</sub> 濃度,  $[HNO_{3Ave.}]$  : 降雨中の HNO<sub>3</sub> 濃度の年平均値,  $SD'_{HNO_3}$  : 降雨中の H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 濃度に基づき, HNO<sub>3</sub> 濃度を求める際に, HNO<sub>3</sub> 濃度の標準偏差を得るための定数

なお、既にモデル化の方法を示した気温は、既往の実用式においては劣化現象との相関を確認した上で採用されているが、検証を経ていない超長期では評価対象の温度と直接合致しないため、不十分である。降雨モデル同様に 4 章で詳述するが、外皮の温度は、外気温と斜面日射量、相対湿度、風速と Goff 式から得られる絶対湿度からなる、渡部らの 3-79~83 式の相当外気温<sup>344)</sup>によって得る。

$$T_{sat} = T_a + (a \cdot I - J) / \alpha \quad (3-79)$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (3-80)$$

$$\alpha_c = 5.6 + 3.9 \cdot v \quad \text{for } v \leq 4.9 \text{ m/s} \quad (3-81)$$

$$\alpha_c = 7.2 \cdot v^{0.78} \quad \text{for } v > 4.9 \text{ m/s} \quad (3-82)$$

$$J = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (0.474 - 0.076 \cdot f^{0.5}) \cdot T_a^4 \quad (3-83)$$

ここで、 $T_{sat}$  : 相当外気温,  $T_a$  : 外気温,  $a$  : 仕上材表面の日射吸収率,  $I$  : 水平面日射量,  $J$  : 夜間放射量,  $\alpha$  : 総合熱伝達率,  $\alpha_r$  : 放射熱伝達率,  $\alpha_c$  : 対流熱伝達率,  $v$  : 風速,  $\varepsilon_s$  : 仕上材表面の長波長熱放射率,  $\sigma$  : Stefan-Boltzmann の定数,  $f$  : 絶対湿度

解析のフローを、Fig.3-10 に示す。

### 3.7.3 解析結果と評価

解析結果を、Fig.3-11 に示す。なお、材料・調合及び外的条件の影響を比較するため、日本建築学会の中性化速度係数を用いた放物線則（以下、AIJ 式）<sup>31)</sup>の結果も併記する。

同図において、本法の結果の回帰係数は AIJ 式より 1 に近く、残差平方和は AIJ 式の 7 割で、個別に確認すると全体の 7 割のデータで AIJ 式より測定値に近い。両手法で得られる値の差は僅かであるが、AIJ 式が超長期で検討を要する非定常環境に適用しない点に照らすと、本法が優位であると考え。但し、本法は、南北の測定値を含む木許らの 15 年時の結果と比較的よく整合するが、測定の都度のばらつきが大きい笹川らの結果との整合性は低い。

笹川らは、実構造物の屋根の天端に位置する打設面の中性化深さを測定しているため、基本的に中性化の進行は早くなる筈であるが、図中、解析値より顕著に遅い値があるため、特殊な要因が介在した可能性がある。

### 3.7.4 製造段階の変動を考慮した追加解析

そこで、最低限、均しの精度に起因する水溜りについては、測定部位から除外しているものと考え、

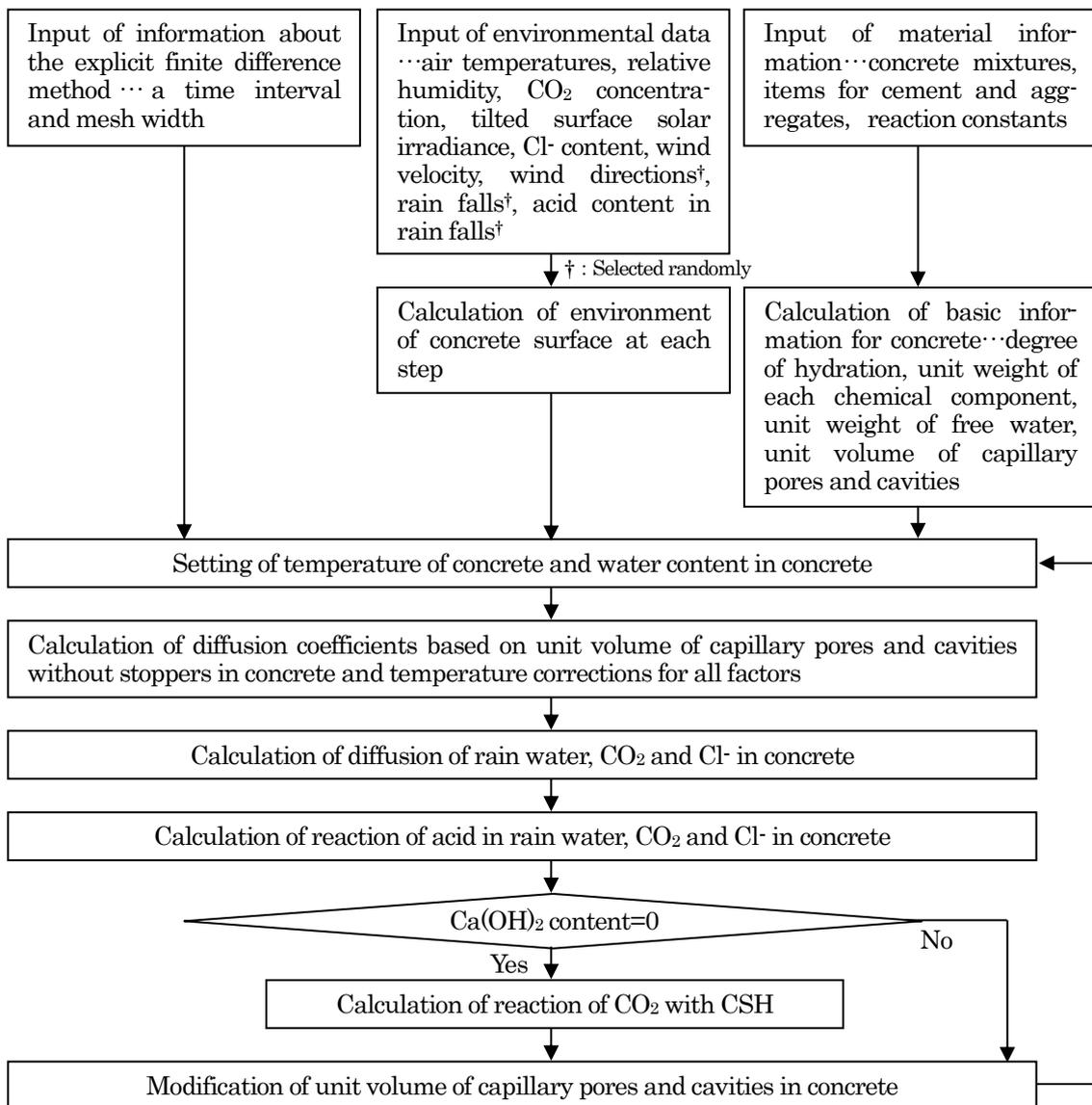


Fig.3-10 Flow of deterioration analysis for concrete

製造段階の変動要因として、JIS A 5308 に定めるセメント、骨材、水の計量誤差、練混ぜ時のばらつきのうち、単位粗骨材量と空気量、既往の研究に基づく、普通ポルトランドセメントの比表面積の標準偏差  $20\text{cm}^2/\text{g}$ <sup>3-67)</sup>、細骨材の表面水率の最大日変動幅  $2.6\%$ <sup>3-68)</sup> を与えて、調合のモンテカルロシミュレーションを行う。この際、現場施工時の変動要因は、天端の中性化を促進する側に作用するため、検討の対象外とする。また、パスは1万本とし、比表面積以外の変動は、分布幅の2分の1を標準偏差とする正規乱数で与え、セメントの比表面積が  $2,500\text{cm}^2/\text{g}$  を下回る場合と、単位水量の計画調合との差が  $20\text{kg}/\text{m}^3$  を超える場合、廃棄されるものとする。

得られた中性化開始時の空隙率、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度の度数分布を、Freedman-Diaconis法によるビンの幅で図示すると、Fig.3-12の通りとなる。調合の分布幅はW/Cで0.48~0.67、単位セメント量で  $300\sim 351\text{kg}/\text{m}^3$  となり、分布幅を両指標の平均値に対する割合に換算すると、空隙率で45%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度で15%に達する。同結果を、日本建築学会の仕様書<sup>3-69)</sup>に記載された東京圏の生コンクリートの呼び強

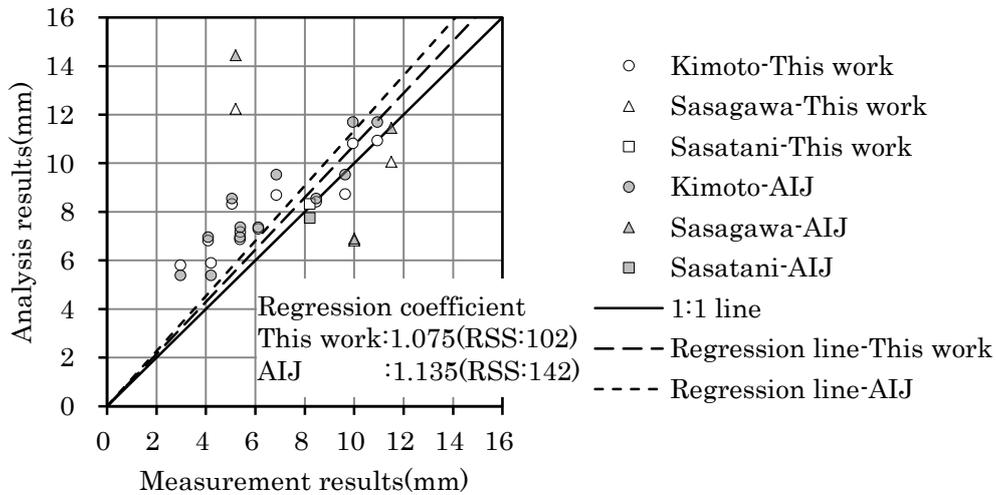


Fig.3-11 Comparison between analysis results and measurement results

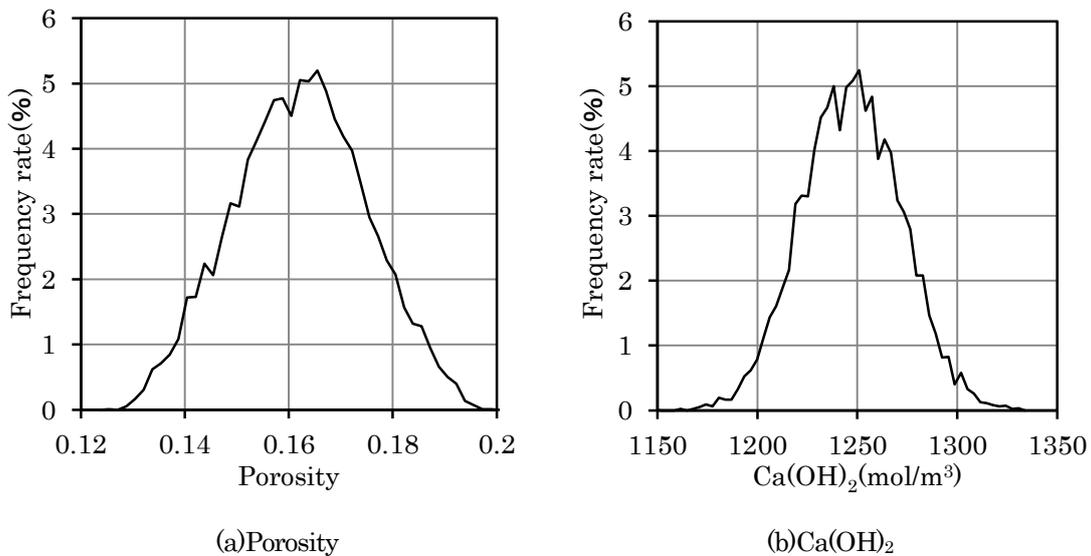


Fig.3-12 Frequency rates of porosity and Ca(OH)<sub>2</sub>

度と W/C の関係に当てはめ、コンクリートの圧縮強度を推定すると、変動係数 9% に該当する分布である。

次に、計画調査と空隙率が極値をとる調査に関し、本法と AIJ 式によって、中性化深さの履歴を求め、測定値と併せて、Fig.3-13 に示す。中性化の進行が過大な 8 年時、過小な 35 年時の結果に関し、本法、AIJ 式によって、共にほぼ再現できていることが分かる。

入力値に関する統計的な情報設定が不可欠であると考えられることから、精緻化を基本とする決定論的な検討の限界と、多様な入力値に対応する総体的な本法の合理性が、同時に確認できたと言える。

因みに、本法の上限の履歴が、中性化深さが 15mm に達した時点で終了するのは、乾燥により見かけの空隙率、延いては、拡散係数が増加したため、解が発散したものである。全ての領域を同じ時間間隔、メッシュ、反応定数で解析できる保証はないので、一般に使用しない W/C であること、少なくとも測定

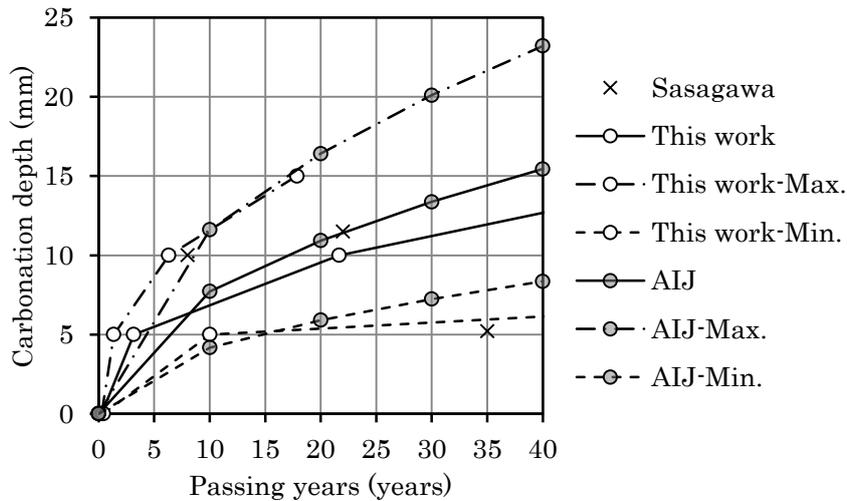


Fig.3-13 Carbonation depth of assumed mixtures

値を包含する事実を確認したことから、本事例に対し、敢えて、解析条件を修正しなかった。

### 3.8 小結

本章では、鉄筋コンクリートの経年劣化の基本である、コンクリートによる鉄筋の防食機能の喪失に材料学的にアプローチすることを意図して、一般建築物のコンクリートに作用する外的要因として、大気中の  $\text{CO}_2$ 、酸性雨中の  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、エアロゾル中の  $\text{Cl}^-$  を抽出し、全てを反応型非常拡散方程式において連成させた。データマイニングに依存しているが、技術的思想を統一したため、本来、複合的に作用する外的要因を同一の枠組みで扱うことが可能となった。

同時に、外部条件の入力間隔のフレキシビリティ、コンクリートの材料・調査情報に関するインターフェースを確保したことで、降雨や日射等、日内変動の大きい外的要因への追従性、コンクリート製造上の品質変動の影響の再現性が飛躍的に向上した。

本法の精度については、屋外暴露時のコンクリートの中性化深さの実験結果を再現して、AIJ 式と同等以上の精度が得られることを決定論的に確認した上、入力値の変動要因を考慮すれば特異値も再現することを確認できている。超長期への適性については、放射性廃棄物関連の研究において、実験的に確認した範囲の劣化モデルに基づいて、セメント水和物の 6 万年の挙動を解析した事例<sup>370</sup>もあり、コンクリートの数十年間の物理化学的特性に関する知見に基づいて、数百年単位の超長期的時間軸の検討を行っても問題ないものと判断する。

しかし、既往のコンクリート工学分野の環境モデルは、内外装や調度品、設備の配置、人間活動の複雑や不確実性と実験主義への偏重により、年平均等の巨視的な指標で環境条件をモデル化する傾向にあり、本法の優位性を具体化できるモデルは確立されていない。

本章の試算では、実験結果の再現のため、一部の環境モデルに自然科学的アプローチをとることを余儀なくされたが、次章では、超長期挙動に対する見解と併せて、同アプローチについて論じる。

※解析上採用した先行研究の式

- ・横関ら (Powers) の毛細管空隙量の算定式
- ・丸山, 野口ら (Parrot) の化学成分毎の平均水程度の算定式
- ・加藤らの Wall effect, ブリーディング水を考慮した遷移帯量の算定式
- ・尾崎の吸放湿過程の熱水分連成解析
- ・梶田・兼松らの  $\text{CO}_2$  と  $\text{Ca(OH)}_2$  の反応型非定常拡散方程式
- ・石田らの  $\text{CO}_2$  と CSH の反応の算定式
- ・Einstein の Cl- の自己拡散係数の算定式
- ・佐伯らの含水率による Cl- の自己拡散係数の補正項の算定式

※解析上の仮定

- ・対象…大気中の  $\text{CO}_2$  と  $\text{Ca(OH)}_2$ , CSH, フリーデル氏塩の反応, エアロゾル中の Cl- と AFm の反応によるフリーデル氏塩の生成, 酸性雨中の  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$  の  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{SiO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ , CSH との反応
- ・式の形式…反応型非定常拡散方程式
- ・解法…陽解差分法 (時間:  $2 \times 10^3$  日, 要素: 表層 2.5mm, 内部 5mm)
- ・中性化時点…当該深さの  $\text{Ca(OH)}_2$  の濃度が  $0.1\text{mol/m}^3$  未満に達した時点
- ・水の拡散係数…尾崎らの熱水分連成解析の結果から吸水, 放湿過程毎に近似
- ・ $\text{CO}_2$  の拡散係数…小林らの実験結果に基づく佐伯らの式から近似
- ・Cl- の拡散係数…自己拡散係数を含水率によって補正
- ・各拡散係数の式の形式…開放粗大空隙量の関数
- ・開放粗大空隙量…粗大空隙量から含水量を減じた値
- ・開放粗大空隙量の時間依存性…水和の影響は除外して, 材齢 91 日の水和度による値を基準とし, その他の反応のみ反映
- ・降雨中の酸性成分の反応定数…降雨中断時の位置で全量即時に反応
- ・ $\text{CO}_2$  と  $\text{Ca(OH)}_2$  の反応定数…基準となる中性化の履歴と合致する様に収斂 (メッシュと時間間隔に依存する定数)
- ・Cl- と AFm の反応定数…Cl- 到達時の位置で全量即時に反応
- ・フリーデル氏塩と  $\text{CO}_2$  の反応定数…  $\text{Ca(OH)}_2$  と同じと仮定
- ・温度の影響…アレニウス則
- ・ $\text{Ca(OH)}_2$  の移流…対象外
- ・CSH の炭酸化… $\text{Ca(OH)}_2$  の中性化の完了後に開始
- ・AFm…二水石膏含有量と同石膏を全量消費した後の  $\text{C}_3\text{A}$  の残量から算出
- ・フリーデル氏塩…AFm のモル濃度と Cl- のモル濃度の 1/2 のうち最小値と仮定
- ・酸性雨がコンクリート表層を流下する際の反応…対象外
- ・Cl- の AFm 以外の水和物への吸着や物理的吸着, 二水石膏や pH 等の二次的要因…対象外
- ・気温, 降雨のない日の相対湿度…最寄りの気象庁観測所の暴露期間の 1 時間単位の観測値
- ・コンクリートの温度…相当外気温
- ・ $\text{CO}_2$  濃度…実験期間の記録のある気象庁綾里観測所の値
- ・降雨…暴露期間の 1 時間単位の降雨の有無の情報を, 年単位で乱数によって付与 (降雨時は吸水, その他は放湿)
- ・降雨の成分…環境省報告書中の太平洋側の降雨中の非海塩起源の  $\text{H}_2\text{SO}_4$  と  $\text{HNO}_3$  の濃度,  $\text{HCl}$  の濃度は仮に  $\text{H}_2\text{SO}_4$  と同じ

参考文献

- 3-1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説, 2016
- 3-2) Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change The IPCC Scientific Assessment, 1990
- 3-3) 福島敏夫: コンクリートの中性化進行の理論的予測法と数値解析 鉄筋コンクリート造建築物外壁の耐久性予測法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 428 号, pp.1-15, 1991.10

- 3-4) I, Yoon, O., Çopuroğlu, K., Park : Effect of Global Climatic Change on Carbonation Progress of Concrete, Atmospheric Environment, Vol.41, No.34, pp.7274-7285, 2007.11
- 3-5) X., Wang, M.G., Stewart, M., Nguyen : Impact of Climate Change on Corrosion and Damage to Concrete Infrastructure in Australia, Climatic Change, Volume 110, Issue 3-4, pp.941-957, 2012.2
- 3-6) L., Peng, M.G., Stewart : Climate Change and Corrosion Damage Risks for Reinforced Concrete Infrastructure in China, Structure and Infrastructure Engineering -Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, Vol.12, No.4, pp.499-516, 2016.4
- 3-7) S., Talukdar, N., Banthia, J.R., Grace : Carbonation in Concrete Infrastructure in the Context of Global Climate Change -Part 1: Experimental Results and Model Development, Cement & Concrete Composites, Vol.34, No.8, pp.924-930, 2012.9
- 3-8) S., Talukdar, N., Banthia, J.R., Grace, S., Cohen : Carbonation in Concrete Infrastructure in the Context of Global Climate Change -Part 2: Canadian Urban Simulations, Cement & Concrete Composites, Vol.34, No.8, pp.931-935, 2012.9
- 3-9) 藤本郷史, 北垣亮馬, 兼松学, 野口貴文, 間宮尚, 鈴木宏一 : マルチエージェントシステムを応用した資源循環シミュレーション手法によるコンクリート関連廃棄物の動向予測, 日本LCA学会誌, Vol.2, No.3, pp.222-228, 2006.7
- 3-10) 伊代田岳史, 魚本健人 : コンクリート構造物の劣化原因別劣化進行予測システムの構築, 生産研究, Vol.55, No.11, pp.777-780, 1999.11
- 3-11) 村上和男, 山田邦明 : 我国沿岸の潮位と平均海面の変動の解析, 港湾技術研究所報告, Vol.31, No.3, pp.37-70, 1992.9
- 3-12) 石山智, 権代由範, 西脇智哉, 長谷川兼一 : 東北地方太平洋沖地震による津波被害を受けたコンクリート材料の塩分浸透状況に関する調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.50, pp.377-380, 2016.2
- 3-13) 谷口真人 : 気候変動と地下水, 地下水学会誌, Vol.47, No.1, pp.5~17, 2005.2
- 3-14) 丸山茂徳 : 地球温暖化問題と 21 世紀の気候変動予測, 日本放射線安全管理学会誌, Vol.8, No.2, pp.113-114, 2009
- 3-15) 根本順吉 : 気候変動の諸問題, 第四紀研究, Vol.11, No.3, pp.101-111, 1972.10
- 3-16) T., Ichikawa, T., Kimura : Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.44, No.10, pp.1281-1284, 2007.10
- 3-17) 山中憲行, 林貞夫 : コンクリート中の圧接鉄筋の疲労寿命特性, 日本建築学会構造系論文集, No.593, pp.103-110, 2005.7
- 3-18) 小林禧樹, 池沢正, 渡辺弘 : 環境大気中における海塩粒子の動態について—海塩粒子と二酸化窒素の相互作用—, 大気汚染学会誌, Vol.14, No.10, pp.401-407, 1979
- 3-19) 前川宏一, 石田哲也, : 物質・エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム, 土木学会論文集, Vol.44, No.627, pp.13-25, 1999.8
- 3-20) 李榮蘭, 梶田佳寛, 河野政典, 唐沢智之 : 仕上塗材の劣化がコンクリートの中性化進行に及ぼす影響に関する解析的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.443-449, 2009

- 3-21) 梶田佳寛, 棚野博之: コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.1, pp.125-134, 1991.1
- 3-22) 兼松学, 松下哲郎, 朴同天, 野口貴文: 建築用仕上材料によるコンクリートの中性化抑制モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.637-642, 2005.6
- 3-23) 石田哲也, 前川宏一: 物質移動則と化学平衡論に基づく空隙水の pH 評価モデル, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.203-215, 2000.5
- 3-24) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.8
- 3-25) 下村匠, 陳丙学, 小沢一雅: コンクリートの細孔構造と収縮特性, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.478-479, 1991.9
- 3-26) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究 (IV) —水セメント比およびスランプの異なるコンクリートの拡散性状—, 生産研究, Vol.38, No.6, pp.269-272, 1986.6
- 3-27) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol.24, No.12, pp.91-106, 1986.12
- 3-28) T.C., Powers: Physical Properties of Cement Paste, Chemistry of Cement, Proceedings of the Fourth International Symposium Washington 1960, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Monograph 43, Vol.2, pp.577-613, 1962.9
- 3-29) 横関康祐, 渡邊賢三, 林大介, 坂田昇, 大即信明: 水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.131-142, 2003.2
- 3-30) 丸山一平, 松下哲郎, 野口貴文, 細川佳史, 山田一夫: エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究—ポルトランドセメントの水和機構に関する研究 その 1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.681-688, 2010.4
- 3-31) 丸山一平, 松下哲郎, 五十嵐豪, 野口貴文, 細川佳史, 山田一夫: アルミネート相およびフェライト相の水和反応に関する研究—ポルトランドセメントの水和機構に関する研究 その 2—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.659, pp.1-8, 2011.1
- 3-32) 加藤佳孝, 西村次男, 魚本健人: 骨材周囲の遷移帯厚さおよび空隙率の簡易算定手法の提案, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.308-315, 2010.2
- 3-33) 取違剛, 武地真一, 横関康祐, 大即信明: セメント系材料からの成分溶脱解析における水和物の沈殿と境界条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.835-840, 2009.7
- 3-34) 加藤佳孝, 魚本健人: 構成材料の空間的特性を考慮したコンクリートの有効拡散係数の予測モデル, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.11-21, 2005.1
- 3-35) 朴宰弘, 長谷川拓哉, 千歩修: 文献調査に基づく各種仕上塗材および塗料の中性化抵抗および塩化物イオンの拡散係数, 日本建築学会技術報告集, Vol.18, No.40, pp.847-851, 2012.10
- 3-36) 柳東佑, 高正遠, 兼松学, 野口貴文: 打放しコンクリート中の水分分布に及ぼす降雨の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.21-26, 2007.9
- 3-37) Z.P., Bazant, L.J., Najjar: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.1, pp.3-20, 1972.1
- 3-38) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会

- 論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.12
- 3-39) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.61-69, 1990.8
- 3-40) 橋田浩, 田中享二, 小池迪夫: 打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討 その 1, 日本建築学会構造系論文報告集, No.412, pp.1-8, 1990.6
- 3-41) 恩村定幸, 小南和也, 松本衛, 銚井修一, 松下敬幸, 小椋大輔, 安井義貴: 強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性, GBRC, Vol.30, No.1, pp.24-32, 2005.1
- 3-42) 尾崎明仁, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 山崎繁, 湯浅孝, 佐藤章造: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力—, 日本建築学会計画系論文集, No.488, pp.17-24, 1996.10
- 3-43) 尾崎明仁, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 蔵重裕行, 宮副泰彰: 応力と気相・液相水流を考慮した熱・水分複合移動解析モデルの提案, 日本建築学会九州支部研究報告, No.36, pp.157-160, 1997.3
- 3-44) 渡部嗣道, 井川憲男: タイル直張り外断熱工法における仕上げ温度推定法に関する基礎的研究, 日本建築技術報告集, Vol.15, No.30, pp.389-392, 2009.6
- 3-45) 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真: 混合酸の作用によるセメント硬化体の劣化挙動の整理と劣化現象のモデル化に関する検討, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.133-145, 2012.7
- 3-46) 小林一輔, 宇野祐一: 酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.615-620, 1991.6
- 3-47) 上田洋, 牛島栄, 出頭圭三: 酸性水の作用を受けたコンクリートの特性および劣化予測, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.27-41, 2007.1
- 3-48) 環境省: 越境大気汚染・酸性雨 長期モニタリング報告書 (平成 20~24 年度), 2014.3
- 3-49) 里隆幸, 武若耕司, 鎌田薩男, 桑原幹雄: 酸性雨によるコンクリート構造物の劣化とその抑制に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.11-25, 1999.11
- 3-50) 小林一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.8
- 3-51) 石田哲也, 李春鶴: 微細空隙構造と物質平衡・移動の熱力学強連成に立脚したコンクリートの炭酸化反応モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp.274-286, 2007.5
- 3-52) V.G., Papadakis, C.G., Vayenas, M.N., Fardis: Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.88, No.2, pp.186-196, 1991.3
- 3-53) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, 第 414 号, pp.99-108, 1990.2
- 3-54) V.G., Papadakis, C.G., Vayenas, M.N., Fardis: Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, ACI Materials Journal, Vol.88, No.4, pp.363-373, 1991.7
- 3-55) 石田哲也, Ho Thi Lan Anh: 非線形固定化モデルと濃度依存型拡散則の連成による塩分浸透解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.875-880, 2006.7
- 3-56) 佐伯竜彦, 二木央: 不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, コンクリート工学年次論文報告集,

Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996.6

- 3-57) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015, 丸善出版, 2015
- 3-58) 木許真悟, 吉崎芳郎, 長谷川拓哉, 福島敏夫：15 年間屋外暴露されていた打放し鉄筋コンクリート外壁モデル化試験体の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, PP.755～760, 2003.7
- 3-59) 笹川幸男, 大塚哲雄, 白井健太郎, 坂井悦郎：35 年間暴露した膨張コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1287～1292, 2002.6
- 3-60) 笹谷輝彦, 鳥居和之, 川村満紀：自然環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.787～792, 1994.6
- 3-61) セメント協会：セメント協会 Top Page, 参照 2018.10, <<http://www.jcassoc.or.jp/>>
- 3-62) 保利彰宏, 玉木俊之, 荻原宏俊：一軸引張応力下における膨張コンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.511-516, 2000
- 3-63) 野口貴文, 今本啓一, 兼松学, 小山明男, 田村雅紀, 馬場英実：ベーシック建築材料, 彰国社, 2010
- 3-64) 環境省：越境大気汚染・酸性雨 長期モニタリング報告書 (平成 20～24 年度), 2014.3
- 3-65) 山口晴幸, Jirawattanaphan,W., 斎藤和伸, 黒島一郎：横須賀市での酸性雨の長期モニタリング, 地球環境シンポジウム講演論文集, Vol.11, pp.123-132, 2003
- 3-66) Y., Kohno, T., Kobayashi: Effect of Simulated Acid Rain on the Growth of Soybean, Water, Air, and Soil Pollution, Vol.43, Issue.1-2, pp.11-19, 1989.1
- 3-67) 西本好克, 谷口秀明：2003 年 JIS 改正後のセメントの品質変動に関する調査結果, コンクリート工学, Vol.46, No.11, pp.9～17, 2008.11
- 3-68) 小原直, 平武, 早坂幸治：細骨材の表面水安定化貯蔵槽の開発, コンクリート工学, Vol.27, No.10, pp.24～33, 1989.10
- 3-69) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 1997, 丸善出版, 1997
- 3-70) 大和田仁, 中西博, 朝野英一, 小川秀夫, 森大介, 平岩知仁, 渋谷和俊：TRU 廃棄物地層処分における C-14 の長期閉じ込め型パッケージの開発 その 1 高強度高緻密コンクリート製パッケージの化学的耐久性に関する研究, 原子力バックエンド研究, Vol.15, No.1, pp.3-11, 2008.9



# 第4章 供用環境の超長期モデルに対する

## 自然科学的アプローチ

### Chapter4: The Approach to Super Long-term Models for In-service Environment by Natural Science

#### 4.1 小序

本章では、前章で提示したコンクリートによる鉄筋の保護機能の環境に起因する外的要因のモデルを、自然科学的アプローチに基づく超長期挙動に対する見解と併せて、詳述することを目的とする。

鉄筋コンクリートに関する先行研究では、前章で紹介した CO<sub>2</sub>濃度が増加する気候変動モデルを除くと三橋らの研究<sup>4)1)</sup>等に限定され、超長期の非定常環境に言及したものはない。参考に、三橋らは、中性化速度を算定するための環境条件を、屋外暴露した 100×100×400mm のコンクリート供試体の、表面から 10mm の位置の温度を定量する富板の 4-1 及び 4-2 式と、降雨、積雪による中性化に有効な期間を補正する 4-3 式によって、説明を試みている。因みに、CO<sub>2</sub>濃度は、屋外の一般的な大気中濃度を 300～350ppm とした上、試算では上限を用いている。

$$T_{cd} = 0.982 \cdot T_d - 0.528 \cdot W_d + 0.320 \cdot S_d - 0.212 \quad (4-1)$$

$$T_{cn} = 1.004 \cdot T_n + 0.145 \cdot W_n - 1.302 \cdot C_i - 1.293 \quad (4-2)$$

$$t_{eff,n} = t_{d1} + t_{d2} - (X_1/B)^2 + \dots + t_{dn} - (X_{n-1}/B)^2 \quad (4-3)$$

ここで、 $T_{cd}$  : コンクリートの昼間平均温度、 $T_d$  : 昼間平均気温、 $W_d$  : 昼間平均風速、 $S_d$  : 日積算日射量、 $T_{cn}$  : コンクリートの夜間平均温度、 $T_n$  : 夜間平均気温、 $W_n$  : 夜間平均風速、 $C_i$  : 晴天指数、 $t_{eff,n}$  : 降雨・積雪の影響を考慮した場合の中性化有効期間、 $t_{dn}$  : 降雨または積雪の間隔の期間、 $(X_{n-1}/B)^2$  : 降雨後におこる乾燥期間、 $X_{n-1}$  : n 回目の降雨・積雪がある直前の中性化深さ、 $B$  : 拡散係数

本法は降雨の影響を時間単位で反映すること、超長期の検討に供することを勘案すると、日内及び長期変動に言及する必要があるが、上記の環境設定に関わる因子である気温、風速、日射、降雨、積雪、CO<sub>2</sub>濃度は、全てが両変動を表現しておらず、一部の因子では年内変動も表現していない。また、コンクリート温度は深さ 10mm の情報であるため、内部の状態の傾斜性を前提とする本解析では、得られる

解の位置づけが曖昧であり、前章の試算でも引用出来なかった。

前章でも概説したが、コンクリート工学的なモデルは、根拠とする劣化状態の評価を数年に一度の局所破壊調査に依存するため、実験の希少性に照らして、環境評価を数年の巨視的な時間軸でトップダウン的に行う傾向がある。そこで、本章ではコンクリート工学的な研究を離れ、自然科学領域の先行研究に解を求める。気候変動のモデル化の妥当性を評価した上、必要に応じ、前章で構築した材料学的な劣化モデルにより、マイクロ環境のモデルの有意性を解析的に確認し、より合理的な環境モデルの構築を試みる。

## 4.2 自然科学的アプローチの基本方針

### 4.2.1 RCP シナリオの適用に関するスクリーニング

前章でモデル化した劣化機構の外的要因は、気温、室温、日射、相対湿度、風速、酸性雨、大気中のCO<sub>2</sub>、エアロゾル中のClと多岐に亘る上、3章で前述した様に、物理化学的な信頼性の確保には資源循環シミュレーション用人工社会や地球シミュレータとの連成を要するため、現存する計算機の能力では精緻なモデルを構築することは不可能である。

ここでは、環境モデルを帰納的なシナリオの一部と位置付け、気候変動に関し、現在、国内で最も普及している自然科学の粹としてのIPCCのRCPシナリオ<sup>42)</sup>に対し、本解析への適性に特化して見解を整理することを軸とし、個々の外的要因のモデル化の基本方針を示す。なお、CO<sub>2</sub>濃度については、RCPシナリオに着目する大前提であるため採用の上、妥当性についても敢えて言及しない。

因みに、仕上材までモデル化する場合、紫外線量の影響のモデル化を要するが、紫外線照射とその他の劣化促進環境を複合した室内試験を基準として、劣化機構が異なる実環境に展開する巨視的な補正を要するため、自然科学的アプローチにおいては、検討の対象外とする。

### 4.2.2 各外的要因の評価

#### (1) 気温・室温

気温については、環境省がRCPシナリオに基づいて日本の気候を予測した報告<sup>43)</sup>に、解析結果が明記されている。何れのシナリオによる結果も温暖化する傾向を示しているが、他方で、前章で触れた寒冷化論者<sup>44) 45)</sup>、CO<sub>2</sub>の温暖化効果の有効範囲、エアロゾルの影響等の機構に関する異説論者<sup>46)</sup>、同一の論文を再解析した結果に基づいて、地球温暖化を否定する懐疑論者<sup>47)</sup>が存在する上、国際的なコンセンサスが得られれば、適切な高度での継続的な石灰岩粉末の散布により、廉価に温暖化が解決されるとの説もあり<sup>48)</sup>、現状維持のためのアニミズム的な政策が継続される可能性は高いが、超長期的には不確実性が極めて高い。

本文では、第一に、劣化は不可逆性の物理化学的反応であること、第二に、凍害を検討対象外としていること、第三に、不確定要因への対策として、下限評価は建築設計における一つの選択肢であることを勘案し、気温に関し、地球温暖化を前提とするRCPシナリオを引用するものとする。一方、室温は空調の支配下にあるものの、非空調時は気温の影響を受けることは明らかである。従って、RCPシナリオの扱いも気温に準じる。

#### (2) 降雨・相対湿度

降雨についても気温同様に環境省の報告に解析結果が示されているが<sup>43)</sup>、RCPのシナリオによって、

長期的動向が異なる上、コンクリートの含水率の解析に求められる時間単位の値を、超長期に亘って予測することは不可能であり、場合によっては、危険側に評価する可能性を生じる。従って、降雨との関係性が高い相対湿度と併せて、同シナリオを引用しない。

### (3)日射

日射については、前章では、渡部らが提案した、厚さ 12mm のタイルの表裏面温度の平均である相当外気温に関する 4-4~4-8 式において、その影響を考慮した<sup>4-9)</sup>。

$$T_{sat} = T_a + (a \cdot I - J) / \alpha \quad (4-4)$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (4-5)$$

$$\alpha_c = 5.6 + 3.9 \cdot v \quad \text{for } v \leq 4.9 \text{ m/s} \quad (4-6)$$

$$\alpha_c = 7.2 \cdot v^{0.78} \quad \text{for } v > 4.9 \text{ m/s} \quad (4-7)$$

$$J = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (0.474 - 0.076 \cdot f^{0.5}) \cdot T_a^4 \quad (4-8)$$

ここで、 $T_{sat}$  : 相当外気温、 $T_a$  : 外気温、 $a$  : 仕上材表面の日射吸収率、 $I$  : 水平面日射量、 $J$  : 夜間放射量、 $\alpha$  : 総合熱伝達率、 $\alpha_r$  : 放射熱伝達率、 $\alpha_c$  : 対流熱伝達率、 $v$  : 風速、 $\varepsilon_s$  : 仕上材表面の長波長熱放射率、 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann の定数、 $f$  : 絶対湿度

同式は、基本的に 4-1、4-2 式と技術思想は同じであるが、タイルの表裏面の温度はほぼ等しく、最も高温になる表面の挙動を算出したのと同様である。従って、部材内の傾斜性を扱う解析でも、安全率を最大にとった評価として扱いやすく、加えて、熱の授受に関する物理的指標の関数であるため、タイルと異なる材料に対しても適用できる利点がある。

同式を基本に考えると、日射量には建築物の向き、日影等の情報が含まれ、超長期では更新や近隣の建築・外構計画の影響も加わるため、使用にあたって膨大な情報に関する見解の整理が必要になる。更に、個々の要因に関し、RCP シナリオをタイル一枚の微視的気候までダウンスケーリングする必要があるが、降雨量、相対湿度をモデル化しない前提では、曇天の影響も含めて、得られる履歴の妥当性を立証することは不可能である。従って、本章では、日射量についても RCP シナリオの引用を避けるものとする。

### (4)風速とエアロゾル中の Cl-

風速、エアロゾル中の Cl-については、エアロゾルの主な動力源が風であるため併せて見解を示す。沿岸の RC 造建築物に付着する飛来塩分の解析的研究は、設計用大規模計算システム Adventure を用いて、群単位の解析が見られる程、深化しているが<sup>4-10)</sup>、沿岸から数 km 離れた立地のエアロゾルに関しては、S 造構造物の研究にはほぼ限定される。Adventure を用いることで、RCP シナリオに基づく同イオンの発生源と発生量、建築物の形状、風向と風速の影響を精密に解析できるが、Cl-の影響を定量するには、気象予測と建築物周囲の乱流、表面の付着、降雨による洗浄効果に加え、水分の蒸発によるイオンの濃縮、建築物の構成材料の物理化学反応、更には近隣の開発による外部環境、更新による外皮の状態の経時変化を検討する必要がある。従来、一般環境のエアロゾルによる塩害を指摘した研究はないことも勘案し、RCP シナリオの引用は避け、パラメトリックスタディによって、影響の有無から検証する。

### (5)大気中の酸

次に、大気中の酸についてであるが、地球温暖化との関係性に関する研究は、エアロゾルの状態に対

するものが多く、降雨中の、所謂酸性雨に対するものは少ない。但し、例えば、大石らは  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$  ガスによる酸性雨の生成プロセスを、以下の式で表現している<sup>411)</sup>。

$$PC = 10^3 \cdot C_{1i} \cdot Q_{SO_2} \cdot q_{cnd,i} \quad (4-9)$$

$$C_{1i} = 1.75 \cdot 10^{-14} / [H_i] \cdot \exp(5.19 \cdot 10^3 / T) \quad (4-10)$$

$$PG = Q_{HNO_3} \cdot \sum_{D_j} 2\pi \cdot 0.75 \cdot K_D \cdot D_j \cdot (0.65 + 0.44 \cdot S_c^{1/3} \cdot R_e^{1/2}) \cdot N(j) \quad (4-11)$$

$$S_c^{1/3} \cdot R_e^{1/2} = (\nu / D_j)^{1/3} \cdot (V_j(r_j) \cdot 2 \cdot D_j / \nu)^{1/2} \quad (4-12)$$

ここで、PC :  $\text{SO}_2$  の降雨粒子への溶解量、 $Q_{SO_2}$  :  $\text{SO}_2$  の混合比、 $q_{cnd,i}$  : 降雨粒子の凝結成長量、 $i$  : 降雨粒子の種類 (雲粒, 雨粒),  $[H_i]$  : 降雨粒子 $i$ の  $\text{H}^+$ 濃度、 $T$  : 気温、PG :  $\text{HNO}_3$  ガスの氷晶、霰、雹への取り込み量、 $Q_{HNO_3}$  :  $\text{HNO}_3$  の混合比、 $D_j$  : 降雨粒子の粒径、 $j$  : 降雨粒子の種類 (雪、霰、雹) と大きさによるクラス、 $K_D$  :  $\text{HNO}_3$  ガスの拡散係数、 $N(j)$  : クラス $j$ の降雨粒子の数密度、 $\nu$  : 大気の動粘性係数、 $V_j$  : 降雨粒子 $r_j$ の落下速度

同式は、雲の形成プロセスと空気質によって、酸性雨の成分を追跡できることを示しているが、同時に、酸性雨の成分が降雨モデルの支配下にあることも示差している。本章では、降雨モデルにおいて、RCP シナリオの採用を見送っていることから、酸性雨に関しても、同シナリオを用いないものとする。

## (6)RCP シナリオに準じる外的要因

従って、RCP シナリオに準じるのは、気温、室温、 $\text{CO}_2$  の三要因で、準じる必要性を検討するのは風速、エアロゾル中の Cl-の二要因である。本章では、まず、外的要因が単独ではなく、複合的に作用する点に配慮し、各要因をコンクリートが置かれる熱環境、水環境、大気環境として体系化し、年内乃至は日内変動を表現可能な環境モデルを構築する。その上で、RCP シナリオに準じる要因に限定して、年平均の増分を加算し、超長期モデルに拡張する。

### 4.3 熱環境

#### 4.3.1 外皮の熱環境

##### (1)外皮の熱環境の検討方針

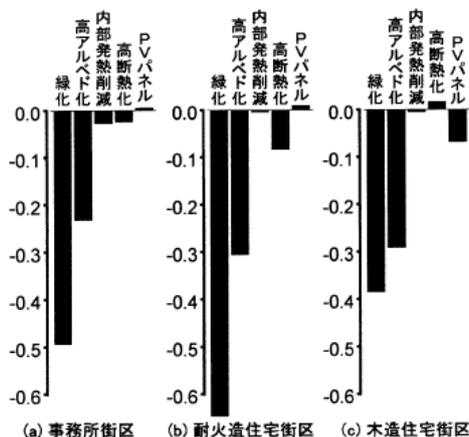
まず、外皮の熱環境は、気温、日射、風、材料の含水率による影響が大きい上、検討期間が超長期に及ぶと、仕上げの改修の影響も加わるため、正確なモデル化は困難を極める。また、本研究の様に、建築物群を対象にすると、主観や立地に起因する不確実性を確率論で処理できる利点があるが、同時にヒートアイランド現象に見られる土地利用の影響を検討する必要を生じる。以下に、土地利用からマイクロ環境までスケールダウンしながら熱環境のモデル化について論じ、前章の試算において、渡部らの相当外気温<sup>49)</sup>を用いた根拠について説明を補足し、具体的な計算方法を解説する。

##### (2)土地利用の影響

三上によると、ヒートアイランド現象の原因は、都市域の人工排熱と都市構造の変化で、具体的には、前者は工場、事業所、住宅、自動車等から排出される熱量、後者は地表面被覆の人工化、中高層建築物の密集化、緑地・水面の減少を指している<sup>412)</sup>。

しかし、例えば、平野らは、人工熱源に属する空調に関し、冷房設定温湿度、窓面の日射総合透過率、外気導入量、換気口の位置、占有床面積、空調面積割合、人体発熱量、建築物の階高、外壁の熱貫流率、熱容量、熱源方式・熱源機器構成比、表面被覆及びアルベドによって、都市キャノピーをモデル化し、

東京都内の平均的な事務所街区，耐火造住宅街区，木造住宅街区におけるヒートアイランド対策及び省エネ対策の気温低下効果等を試算して，その効果が Fig.4-1 に示す通り，緑化で 0.4~0.6°C，高アルベド化で 0.3°C に達するとしている<sup>4-13)</sup>。



緑化	屋上：屋上面の60%を緑化 壁面：壁面（窓を除く）のうち60%を緑化 地面：地面の緑被率を20%増大
高アルベド化	屋上：屋上面の60%のアルベドを0.83とする 壁面：壁面（窓を除く）の60%のアルベドを0.64とする 地面：地面の60%（非緑被部分）のアルベドを0.64とする (3(2)での検討の結果に基づき，最終的な評価では地面には適用していない。)
内部発熱削減	室内の内部発熱（空調を除く機器・照明発熱）を20%削減
高断熱化	文献 <sup>9)</sup> の想定に従い，熱貫流率 (W/m <sup>2</sup> /K)，単位断面積あたり熱容量 (J/m <sup>2</sup> /K) をそれぞれ次の通りに設定（基本的には次世代省エネルギー基準相当）。 事務所街区・屋根および側壁：0.38(W/m <sup>2</sup> /K)，2.12×10 <sup>8</sup> (J/m <sup>2</sup> /K) 耐火造住宅街区・屋根：0.39(W/m <sup>2</sup> /K)，3.81×10 <sup>8</sup> (J/m <sup>2</sup> /K) 耐火造住宅街区・側壁：0.72(W/m <sup>2</sup> /K)，3.98×10 <sup>8</sup> (J/m <sup>2</sup> /K) 木造住宅街区・屋根：0.23(W/m <sup>2</sup> /K)，2.95×10 <sup>8</sup> (J/m <sup>2</sup> /K) 木造住宅街区・側壁：0.56(W/m <sup>2</sup> /K)，2.97×10 <sup>8</sup> (J/m <sup>2</sup> /K)
PV パネル	屋上面の60%に発電効率10%のPVパネルを導入 <sup>10)</sup> （ただし，パネル自体の空調負荷への効果のみを対象とし，発電分は含まない。)

Fig.4-1 Difference between daily air temperatures of the standard plan and daily air temperatures of improved plans<sup>4-13)</sup>

また，羽島らは，都市化が影響する対象は，日射の影響に埋没しない最低気温に限定され，関東圏で試算する限り，Fig.4-2 に示す通り，半径 20km 内の土地利用を反映するとしている<sup>4-14)</sup>。従来のコンクリートの耐久性における温度の評価は外気温に基づいているが，これを渡部らの手法<sup>49)</sup>に準じて相当外気温にした場合，10°C以上の差異を生じる時間帯があること，気象庁観測所の観測値によって，半径 20km 内の広域の気候を代表出来ることを勘案すると，土地利用のモデル化は，本研究に対しては，現時点での優先順位が低いと考えられる。

### (3) ミクロ環境へのスケールダウン

そこで，土地利用より微視的な領域にスケールダウンすると，久保田らが街区形態の微気候に及ぼす影響を研究しており，高層低密，低層高密，囲み型，都心高密型の街区に対し，夏季と冬季に SET\* と受熱放射量を測定して，建築物の密度，街路方向，囲み型の配置，立地の影響を考察し，天空率とその他変数と SET\* の関係に関するモデルと，天空率に代え南北天空率を変数とするモデルの重回帰分析により，天空の開放度の影響と同影響の南北による性質の違いが有意であることを，Table 4-1 の通り示している

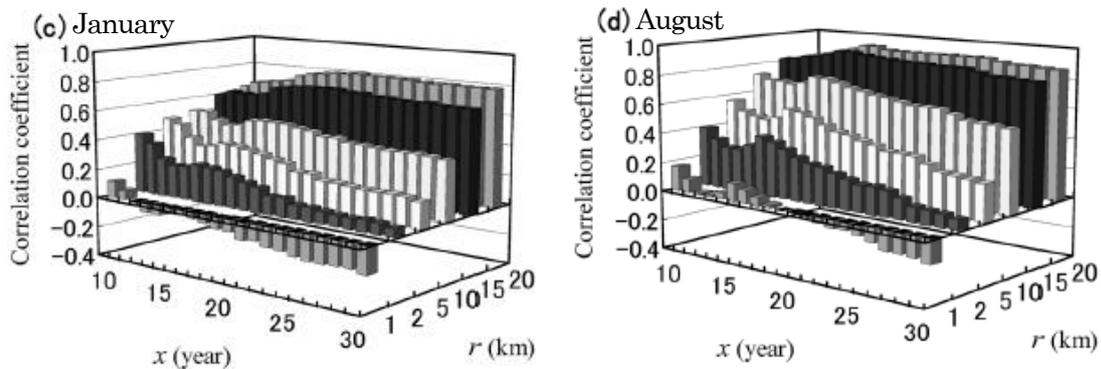


Fig.4-2 Correlation coefficient between land use changing rates and minimum temperatures according to the various combinations of the radius<sup>4-14)</sup>

Table4-1 Correlation between city block indices and SET<sup>\*4-15)</sup>

<Summer>		目的変数	SET* N=116	モデル 1			モデル 2		
				回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	0.018	0.142	3.354	0.018	0.141	3.480		
	u(roof)	-0.463	-0.086	-2.718	-0.462	-0.086	-2.844		
	ta(roof)	0.852	0.811	20.230	0.856	0.814	21.267		
	建蔽率	-0.060	-0.185	-1.225	-0.057	-0.175	-1.215		
	容積率	0.014	0.137	3.017	0.014	0.139	3.212		
	高さ	-0.064	-0.291	-2.865	-0.068	-0.309	-3.180		
	自然被覆率	0.186	0.132	1.442	0.173	0.123	1.404		
	天空率	-0.088	-0.213	-4.174					
	南天空率				-0.056	-0.169	-2.516		
	北天空率				-0.090	-0.295	-4.449		
切片							1.879		
重相関係数R				5.696	0.952	1.933	5.292	0.957	1.879

<Winter>		目的変数	SET* N=119	モデル 1			モデル 2		
				回帰係数	標準化係数	t値	回帰係数	標準化係数	t値
説明変数	I(roof)	0.008	0.022	0.294	0.006	0.017	0.362		
	u(roof)	-0.394	-0.147	-2.022	-0.391	-0.146	-3.190		
	ta(roof)	0.915	0.551	7.746	0.916	0.551	12.332		
	建蔽率	0.027	0.099	0.099	-0.086	-0.318	-0.502		
	容積率	-0.028	-0.276	-0.934	-0.012	-0.123	-0.661		
	高さ	0.067	0.339	0.560	-0.009	-0.047	-0.124		
	自然被覆率	-0.442	-0.351	-0.611	-0.866	-0.687	-1.897		
	天空率	0.088	0.239	1.962					
	南天空率				0.260	0.883	8.403		
	北天空率				0.090	0.330	3.202		
切片							1.458		
重相関係数R				7.555	0.724	0.560	12.386	0.902	1.458

<sup>4-15)</sup>。なお、同表中、前者がモデル 1、後者がモデル 2 に該当する。これらは、人工排熱の問題が軽微な前提であれば、問題が相当外気温の変数でもある風速と日射に限定されることを示唆している。

更にスケールダウンして、外皮の熱環境に関する論文を俯瞰すると、萩島らが外皮の対流熱伝達率に関する既往の研究を整理する上で<sup>4-16)</sup>、実大建築物の表面の熱伝達率と高さの関係の共通則は、建築物の形状、風速定義高さ、表面温度と気温の温度差に関する定量的な検討の不足により確立されておらず、縮小模型実験も立方体や二次元リブの規則的配列の粗度群に対する報告は散見されるが、実大スケールへの適応性については検証されていない状態であり、結果的に、ASHRAE が推奨する Jürges の 4-6 及び 4-7 式が、慣習的に利用されていると述べている。

本研究は、コモンセンスの統合を意図するもので、個別の技術的課題を解決するものではないため、

上述した知見を勘案して、風速の関数である Jürges 式を含む上、日射を変数とする、4-4~4-8 式で得られる渡部らの相当外気温<sup>49)</sup>によって、外皮の温度をモデル化するものとする。なお、同法のコンクリート工学的手法に対する優位性は、4.2.2 で前述した通りである。

#### (4) 斜面日射量

そこで、相当外気温の変数の扱いに言及すると、まず、気温及び風速は、気象庁観測所の測定点の高さを補正した値になり、比較的容易に入力値が得られる。但し、日射量については、4-4 式は水平面のため、気象庁の測定値を直接入力しているが、壁面では斜面日射量を入力する必要があり、解析を要する。

本研究では、曾我らが、天空の放射輝度分布を一樣とする Isotropic モデル、天空の日射量を分布が一樣な天空日射量と太陽光球周辺の高輝度天空からの志向性のある日射成分に分ける Hay モデル、Hay モデルに加え、天頂からの天空日射量と地平線付近の障害物により遮蔽される天空日射量を考慮する Skartveit モデル、天空日射量を分布が一樣な天空日射量、地平線付近からの天空日射量、準直達日射量に分ける Reindl モデル、Reindl モデルに加えて、8 種類の天空状態別に天空日射量に占める各成分比率を決定する Perez の Anisotropic モデル、天空日射量を分布が一樣な天空日射量と、太陽中心からの各距離の関数で表す準直達日射量に分ける Akasaka モデルによって、日本国内の 4 方位鉛直面日射量を計算し、Table4-2 に示す様に組合せ毎のランキングを行い、Anisotropic モデルが最も優れると結論したことに準じ<sup>417)</sup>、同モデルによって、斜面日射量を算定する。

Table4-2 Ranking of RMSE by several estimation methods for tilted surface irradiance<sup>417)</sup>

分離モデル	合成モデル					
	A'	H'	I'	P'	R'	S'
C	9	23	46	2	24	27
E	11	34	47	3	33	35
M	15	30	45	6	40	31
P	7	19	44	1	29	21
R	10	17	43	4	18	16
S	14	36	48	5	41	37
U	26	12	42	8	20	13
W	39	22	38	32	28	25

記号	開発者	記号	開発者
C	Chandrasekaran	A'	Akasaka
E	Erbs	H'	Hay
M	Maxwell	I'	Isotropic
P	Perez	P'	Perez
R	Reindl	R'	Reindl
S	Skartveit	S'	Skartveit
U	Udagawa		
W	Watanabe		

なお、斜面日射量の算定に用いる日射量は、対象とする年度の測定値がある場合は同値によればよいが、将来に亘る観測値の予想にあたっては、太陽の軌道の長期動向までは具体化しないものの、11 年周期の黒点の影響、火山噴火等による大気混濁係数の増減の影響が確実に介在するため、一考を要する。本研究では、Pinatubo 火山の噴火以降の直近の 11 年以上の日射量の観測値の平均によって、日射量をモデル化するものと仮定した。

#### (5) 仕上材の設定

次に、仕上材表面の日射吸収率であるが、例えば、梅干野らの調査の範囲でも 20~80% と差が大きく<sup>418)</sup>、張らの表面処理の異なるアルミニウム板の短波長域の日射吸収率の測定では、アルミニウム板素地の 39.8% に対し、表面研磨で 47.57%、一般塗料の塗布で 57.57% まで上がり、複層の反射性塗料の塗布で最小の 7.91% を呈することから<sup>419)</sup>、測定方法に各論あるが、製品毎に異なる物性を示すことは確かと言ってよい。一方、張らは、夜間放射量の変数である長波長放射率も測定しており、アルミニウム板の

92.58%に対し、研磨時に 65.9%、一般塗料及び反射性塗料は 1.85~6.6%に分布することを確認している。ここで、日射吸収率、長波長放射率の製品間の定性的な相関が異なる点は、留意を要する。

そこで、上記の物性を与えた場合の相当外気温を求めた上、同気温を 3 章でモデル化した吸水過程の水の拡散係数、放湿過程の水の拡散係数、CO<sub>2</sub>の拡散係数、CaCO<sub>3</sub>の反応速度、Cl<sup>-</sup>の拡散係数のアレニウス則に基づく補正項を入力し、同項の比較によって、凡その影響度を把握する。相当外気温の試算の因子・水準は、Table4-3 の通りである。

Table4-3 Parameters of analysis for SAT

Direction	South, North
Radiative heat transfer coefficient $\alpha_r$	6, 3
Solar radiation absorptivity	0.5757 for general paints 0.0791 for reflective paints 0.3980 for aluminum plates
Emissivity	0.0588 for general paints 0.0600 for reflective paints 0.9258 for aluminum plates
Observed year	1991, 1992, 1993, 1994, 1995 1996, 1997, 1998, 1999, 2000

相当外気温の算定に必要なその他の仮定については、絶対湿度は気象庁観測所の相対湿度から Goff 式で算定し、放射熱伝達率は、測定条件によって広域に推移するため、渡部らが一般的な値として用いた  $6\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^{+9}$  と半分の  $3\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$  を参考値として用い、本ケーススタディによって、併せて留意事項を確認する。立地は、仮につくば市とし、気象庁の観測値は 1991 年からの 10 年間の値を、観測年毎に計算に供する。

1 時間毎に算出した相当外気温と外気温の年平均の差を Fig.4-3、相当外気温の年平均値に基づく吸水過程の水の拡散係数、放湿過程の水の拡散係数、CO<sub>2</sub>の拡散係数、CaCO<sub>3</sub>の反応速度、Cl<sup>-</sup>の拡散係数のアレニウス則による温度補正項を Fig.4-4~8 に示す。

Fig.4-3 から、本試算の範囲では、南面で相当外気温と外気温の年平均の差が最大 8.1°C、北面で 4.8°C に達し、方角の影響は最大 3.3°C であること、放射熱伝達率の影響は最大 1.2°C であること、材料毎の日射吸収率と長波長放射率の設定の影響は最大 7.1°C であること、観測年の影響は最大 2.2°C であることが分かる。個々の因子の影響は、材料定数の設定、方角、観測年、放射熱伝達率の順に大きい。

また、Fig.4-4~8 より、吸水過程の水の拡散係数の分布幅は 0.96~1.02、放湿過程の水の拡散係数では 0.69~1.15、CO<sub>2</sub>の拡散係数では 0.95~1.02、CaCO<sub>3</sub>の反応速度では 0.98~1.01、Cl<sup>-</sup>の拡散係数では 0.72~1.13 になることが分かる。

例えば、一般環境の主要な劣化現象である中性化に関する既往の劣化促進試験では、基本的に降雨や Cl<sup>-</sup>の影響をモデル化していないので、上記の温度補正は、気相を介する因子、即ち、CO<sub>2</sub>の拡散係数と CaCO<sub>3</sub>の反応生成速度だけで具体化する。同因子に関する温度補正の変動幅は、順に 0.07、0.03 とコンクリート工学的に小さいことから、既往の提案式に外気温が用いられてきた実態と合致する結果と考えられる。

一方、放湿過程の水の拡散係数では差が 0.46 と温度依存性が高く、特に雨曝しになる外皮で影響が具

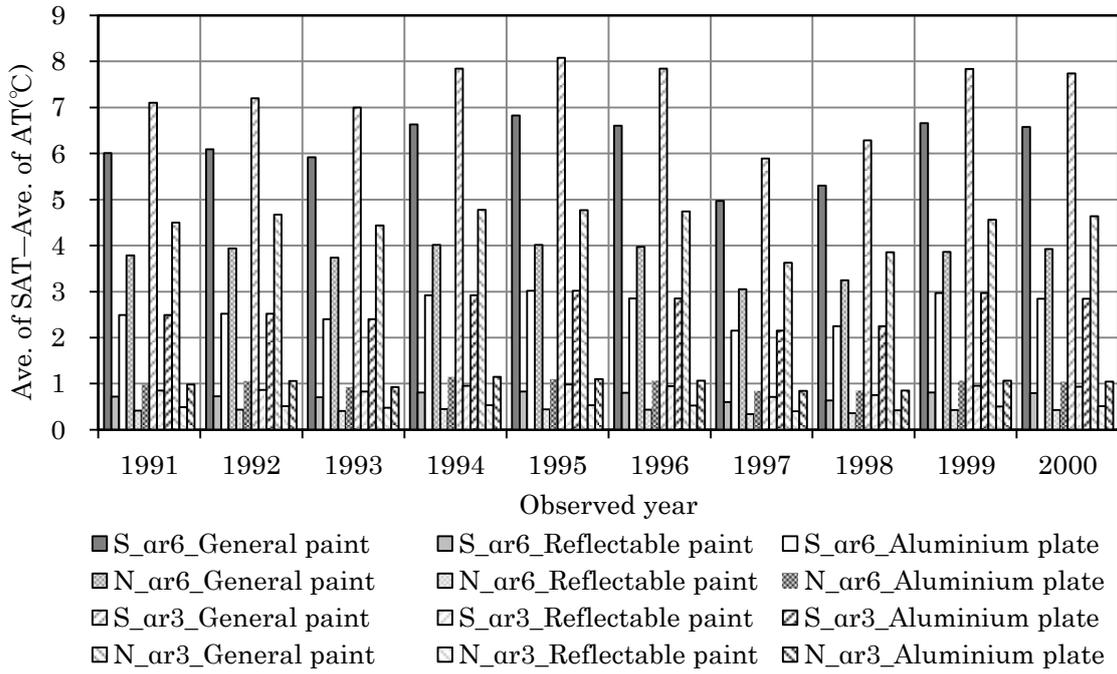


Fig.4-3 Difference between average of SAT and average of AT

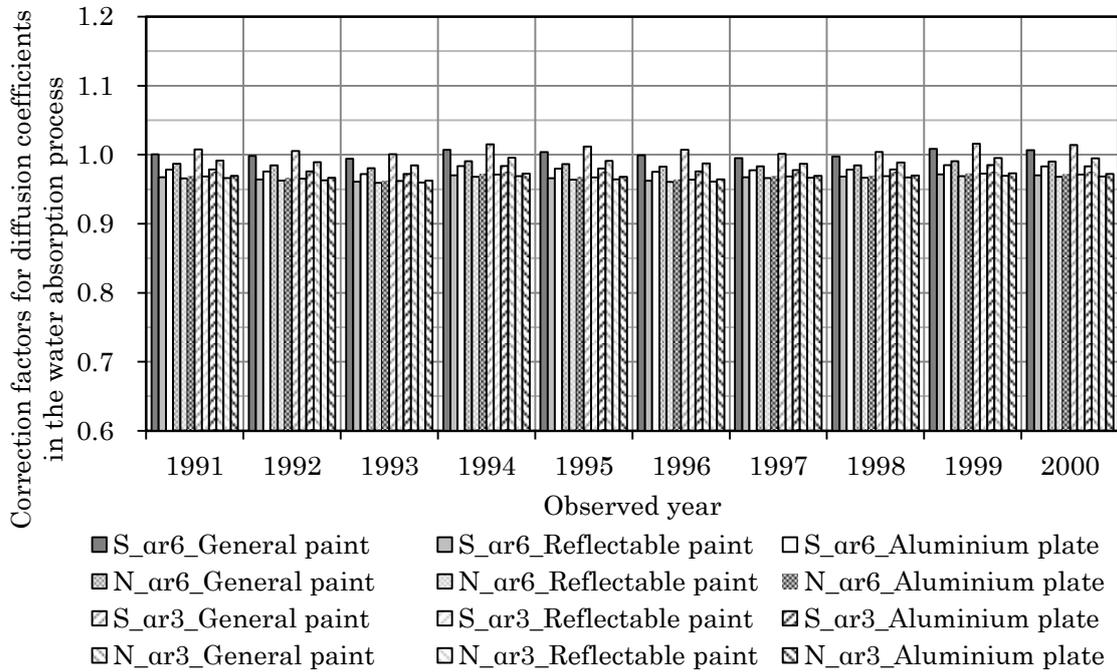


Fig.4-4 Correction factors for diffusion coefficients in the water absorption process

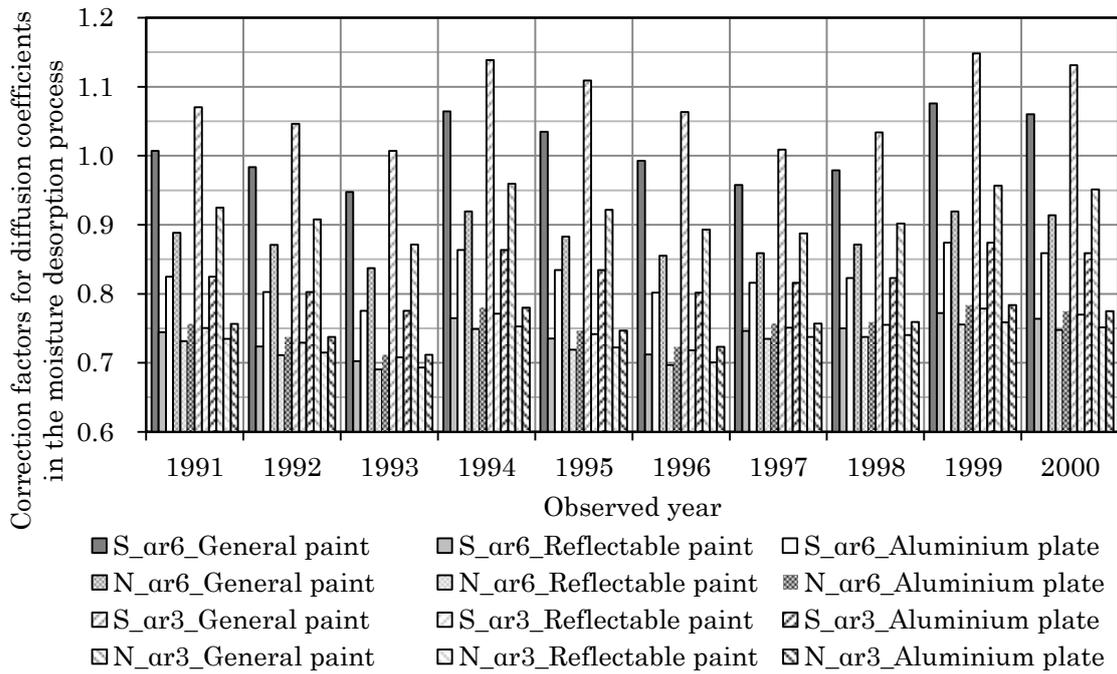


Fig.4-5 Correction factors for diffusion coefficients in the moisture desorption process

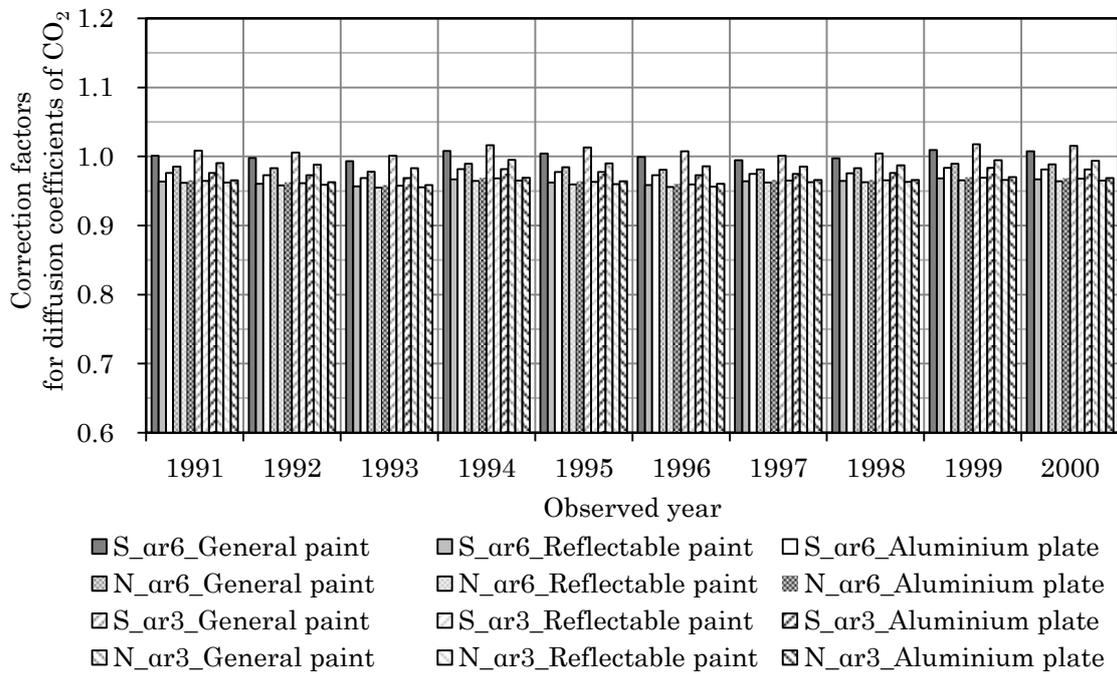


Fig.4-6 Correction factors for diffusion coefficients of CO<sub>2</sub>

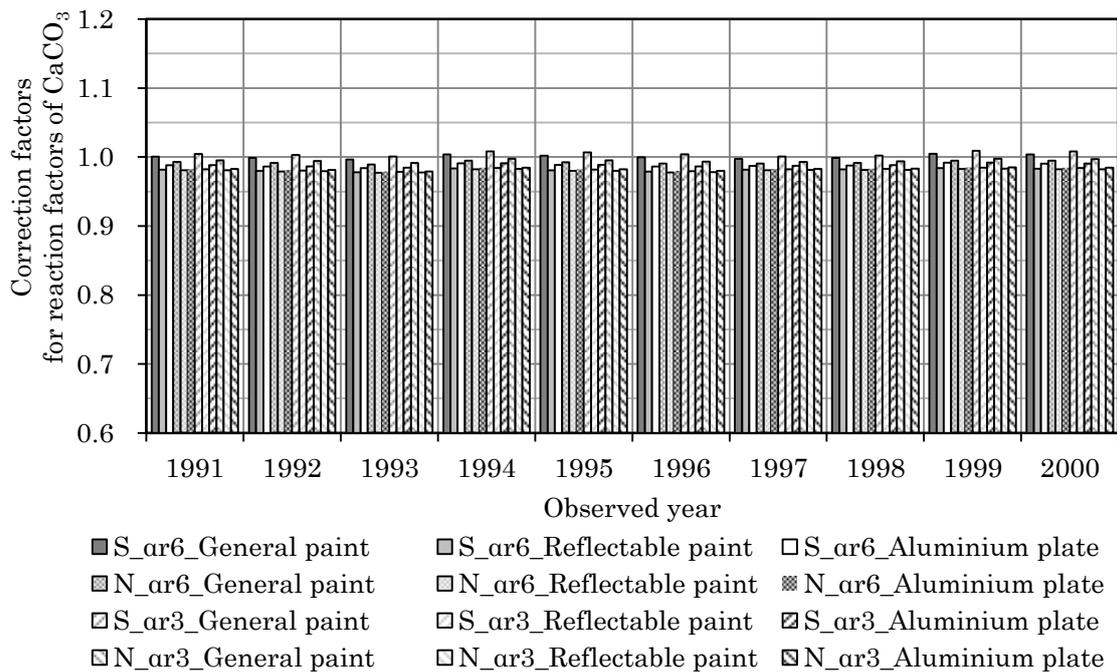


Fig.4-7 Correction factors for reaction factors of  $\text{CaCO}_3$

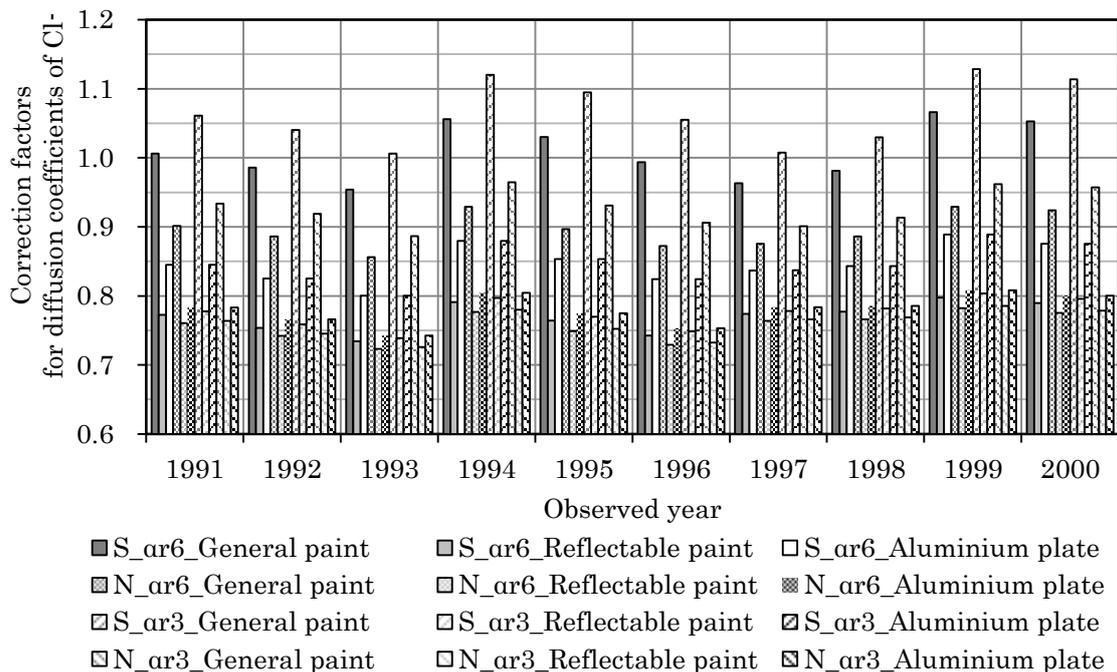
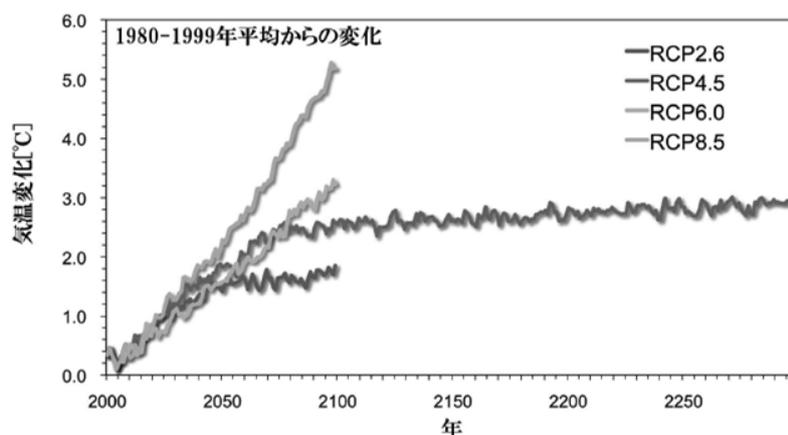


Fig.4-8 Correction factors for diffusion coefficients of  $\text{Cl}^-$

体化する可能性が高い。しかし、週間天気予報の日単位の降雨の有無の的中率が 50~85%程度であることを勘案すると<sup>4-20)</sup>、これを根拠に材料モデルの精緻化を図っても、降雨の入力値と材料定数において、二重に不確定要素を内包するだけである。従って、本研究では、不用意な計算資源の浪費を避け、塗装を施したコンクリートを想定して、日射吸収率を 0.6、長波長放射率は 0.9 一定とし、影響の小さい放射熱伝達率も、渡部の値に準じる<sup>4-9)</sup>。

Table4-4 Changes of annual average temperatures in A.C.2100<sup>4,3)</sup>

	全国	北日本 日本海側	北日本 太平洋側	東日本 日本海側	東日本 太平洋側	西日本 日本海側	西日本 太平洋側	沖縄・奄美
RCP2.6	1.1 (0.9~1.2)	1.2 (0.9~1.3)	1.2 (1.0~1.3)	1.1 (1.0~1.2)	1.0 (0.9~1.1)	1.1 (0.9~1.2)	1.0 (0.9~1.1)	0.9 (0.7~1.0)
RCP4.5	1.8	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	1.6	1.4
RCP6.0	2.5 (1.9~2.9)	2.7 (1.9~3.2)	2.7 (2.0~3.3)	2.5 (1.9~2.9)	2.4 (1.9~2.8)	2.4 (1.8~2.7)	2.3 (1.8~2.6)	2.0 (1.6~2.3)
RCP8.5	4.4 (3.9~4.7)	4.8 (4.3~5.3)	4.8 (4.3~5.3)	4.3 (3.8~4.7)	4.2 (3.7~4.5)	4.0 (3.6~4.4)	3.9 (3.5~4.2)	3.2 (2.8~3.6)
(参考都市例)	-	札幌	釧路	新潟	東京	福岡	大阪	那覇
上記都市の 平年値	-	8.9	6.2	13.9	16.3	17.0	16.9	23.1

Fig.4-9 Changes of annual average temperatures from A.C.2000 to A.C.2300<sup>4,21)</sup>

## (6)外気温と風速

その上で、外皮の温度の超長期挙動を4-4~4-8式で表現するため、外気温と風速の超長期用モデルを確認する。まず、外気温については、現時点の履歴は気象庁のデータから時間平均の平年値として得ることが出来、2100年までのRCPシナリオ毎の予想も、Table4-4に示す通り、環境省によって地域毎に算出されているため<sup>4,3)</sup>、これに準じることが出来るが、同年以降の算例は現時点で少ない。本研究では、Fig.4-9に示す海洋研究開発機構の地球システム統合モデル(MIROC-ESM)によるRCP4.5の2300年までの解析結果<sup>4,21)</sup>に準拠し、 $0.2 \times 10^{-2} \text{K/年}$ で年平均気温が増加するものとする。

また、風速については、飛来塩分で併せて考慮するものとしているが、単独で考える場合、近隣の空間構成の影響を多分に受けることから、超長期に亘るモデル化は都市計画とほぼ同意である。そこで、風速は分野横断的な高次の課題と見なして、外皮の熱環境の範囲では長期変動を設定せず、気象庁のデータに基づき日平均の平年値で与え、飛来塩分の計算用の風向は、平年値が得られない都合により、日平均を乱数で与える。

### 4.3.2 室内の熱環境

#### (1)室内の熱環境の検討方針

室内の熱環境は、内装の下地となるコンクリートの表面温度を定量するために必要な情報である。例えば、松本らは、前章で引用した熱水分連成解析を、防露設計や室温設計に供しており<sup>4,22)</sup>、Fraunhofer-Institut für Bauphysikは同用途の解析に適したWUFIを市販している。また、省エネ法対応の冷暖房負荷の算定に供する、外皮の熱特性に関する解析ソフトとして、建築環境・省エネルギー機構のSMASHや建築環境ソリューションズのAE-Sim/Heat等も流通しており、ツールは豊富である。

但し、本研究で用いる他の解析技術と統合するにあたり、熱水分連成解析や汎用の解析ソフトは、モデルの再構成に多大な労力を要するのに対し、室温は人間活動への依存度が高く、いずれかの技術的階層で統計に依存するバッファを設ける必要があり、一考を要する。

本研究では、前項で最大となった 8.1°C の温度差でさえ、水の挙動以外に与える影響がコンクリート工学的に軽微と結論した点を重視し、室内のコンクリート表面温度が指示値に至る原理まで扱うことは避け、前項でモデル化した室外の気温を基準に、室内外の温度差を加算して、室内の気温を仮に求めた上、RC 造建築物の特性を端的にとらえた実験的研究の知見に基づいて、コンクリート表面温度に換算することを試みる。

## (2)非空調時の室内温度

RC 造建築物の表面温度の実験的研究としては、大空間と同施設内の一般居室の大気環境、躯体の表面及び内部温度、更にはコンクリートの含水率や中性化等を測定した白石の研究<sup>423)</sup>がある。同研究には、空調を使用しない環境では、雰囲気温度、即ち、室温とコンクリート表面温度がほぼ同じであることや、事務室内の温度が全般に気象庁観測値より高く、夏季の冷房期間以外は日平均より高い域で推移すること等が記載されている。

また、室内外の温度差に言及した研究を俯瞰すると、開口率、仕上材や構造を問わないが、住宅の空調設定の閾値として、非冷暖房時の室内外の温度差を求めた羽原らの研究がある<sup>424)</sup>。同研究では、暖房シーズンと冷房シーズンに分けて、日射や機器の発熱の影響のない床上 1.5m での測定値を平均しており、本研究で改めて模式化すると、Fig.4-10 に示す様に、概ね昼間で 1°C、夜間で 4°C の温度差がある。夜間に温度差が開くことから同差の主な原因は日射で、午前中の温度差の減少は日出、午後の同差の増加は日入の数時間前に始まっている。

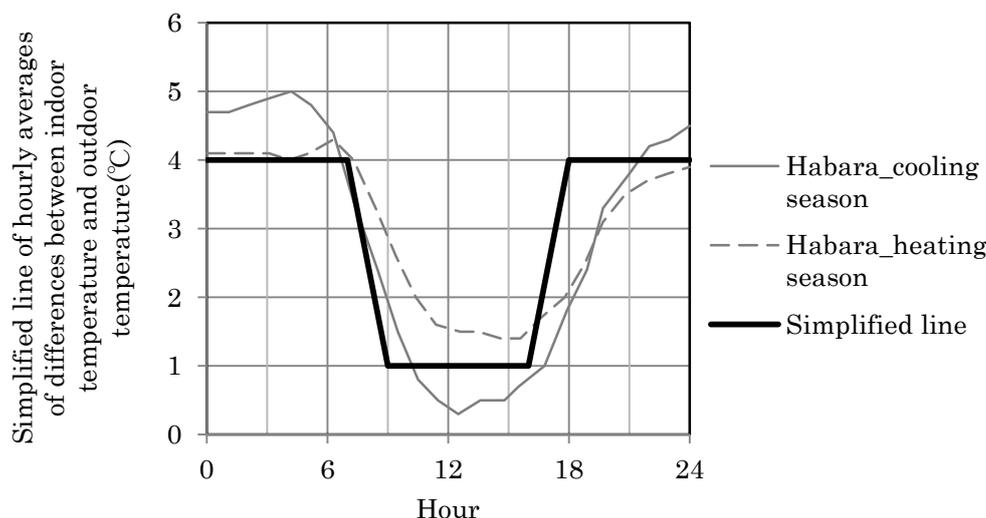


Fig.4-10 Simplified line of hourly averages of differences between indoor temperature and outdoor temperature during the days without air conditioner

両研究を参考に、空調しない室内の RC 造部材の表面温度のモデル化を検討するにあたって、白石の研究に基づいて、表面温度は室温と同じと見なし、以後、同温度のモデルについて言及する。

その上で、まず、簡単のため、日中の室温は外気温+1℃、夜間は外気温+4℃で推移するものとした上、温度変化の原因が日射であること、気象庁の観測値に準じると、基本的に1時間単位の入力になることを勘案して、日入時刻の2時間前と日出時刻から室内外の温度差が変動するものとし、温度差1~4℃間の推移を線形で外挿する。なお、温度差が変動する際の、温度差を加算する対象は各時点の外気温ではなく、温度差が変動し始める時点の外気温として、勾配を補正する。これは、アウトプットである室温に着目する際に、外気温の変動に応じて、日射の影響が変わる不合理を回避することを意図した仮定である。また、同履歴は構造を限定しないものなので、RC造特有の高断熱性を反映する必要がある。ここでは、日平均気温以上の室温、日入近傍までの昇温の継続も条件として付加する。因みに、日出、日入の時刻は、海上保安庁の日月出没計算サービス<sup>425)</sup>から得られる。以上の設定において、曇天、降雨の影響は考慮していないが、雲の配置を1時間単位で予測することは困難である上、基本とする羽原の履歴も平均値であることから、モデル化の高次の課題とし、本研究では対象としない。

### (3)空調時の室内温度

次に、空調時の室温であるが、基本的に関連法規に委ねるものとし、夏季として7~9月の施設利用時間を想定した8~18時は、建築物環境衛生管理基準に基づいて28℃以下、冬季として12~2月の同時間帯は、小林が冬季の温熱的中性、快適度の閾値として紹介した<sup>426)</sup>17~21℃のうち、化学反応を促進する側の28℃及び21℃とする。また、その他の期間の施設利用時間の室温は、換気により外気と同じになるものと仮定する。この際、冬季の暖房中断直後の外気温との温度差が大きく、外気温+4℃や日平均気温に降温するまでの落差が非現実的になるため、冬季に限り、空調停止時点の室内外の温度差を維持して、外気温に応じて降温する履歴を更に外挿する。当然、空調の設定は任意であり、耐用年数の評価対象である建築物の明確なモデルがある場合は、上記に準じる必要はない。

この上で、羽原らの測定は、日射や機器の発熱の影響を受けない床面から1.5mの部位に対するもので、当該分野の永年の課題である、室内の上下方向の温度分布や、空調の影響は含んでいない。そこで、同課題の黎明期の研究を回顧すると、伊藤らが上部吹き出し、下部吸い込み方式の定風量、定温度吹出で、吹出口種類と吹出風量を因子とする実大実験により、室内の温度分布を測定している。測定例のうち温度差が最大のものは、Fig.4-11に示す様に18.6~24.2℃で分布する<sup>427)</sup>。

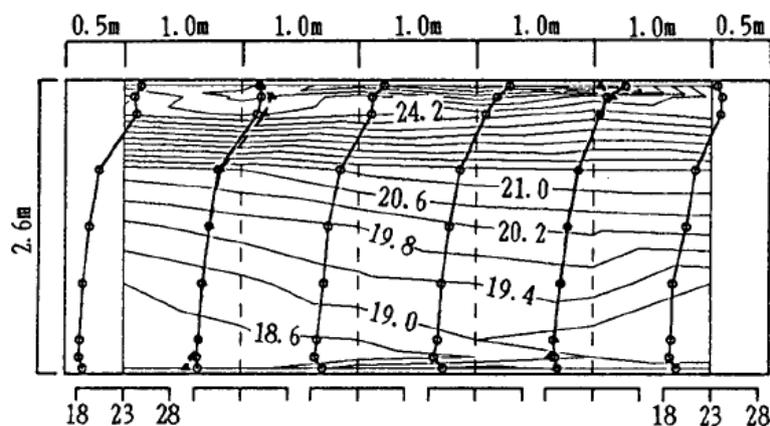


Fig.4-11 Distribution of vertical air temperature with air heating<sup>427)</sup>

同研究には空調方法の異なる六例の温度分布が掲載されているので、相当外気温の検討に準じ、本解析に用いる定数に対する温度補正項に換算すると、吸水過程の水の拡散係数の分布幅は 0.98~1.05、放湿過程の水の拡散係数では 0.86~1.53、CO<sub>2</sub>の拡散係数では 0.98~1.05、CaCO<sub>3</sub>の反応速度では 0.99~1.03 になる。相当外気温同様に、環境モデル自体が確立されていない水環境に与える影響以外はコンクリート工学的に無視できる範囲である。従って、高さ方向他局所的な変動まで言及せず、室温の代表値だけを設定するものとする。

#### (4)室内温度の定式化

以上の条件を定式化すると、非空調時の室内の雰囲気温度は 4-13~15 式、施設利用時間内の空調下の温度は 4-16 式、冬季の施設利用終了後の温度は 4-17 式で表現できる。なお、4-14 式と 4-15 式を切替える時刻を日入 2 時間前とすると、日中の最高気温を含む前者と後者の不連続が目立ち、また、日没時点とすると日没前の温度差の増加過程が表現できないため、形式的に両履歴の切換え時点を日入の 1 時間前とする。

$$T'_{o,t_h} = \max(T_{o,t_h} + 1, T'_{o,t_h-\Delta}) \quad (4-13)$$

$$T_{i,t_{dh}} = \max\{T_{o,Ave.}, \min\{T'_{o,t_h}, T_{o,t_{h,r}} + 2 \cdot H(t_{h,r}) \cdot (t_h - t_{h,r})\}\} \quad (4-14)$$

$$T_{i,t_{nh}} = \max\{T_{o,Ave.}, \min\{T_{o,t_h} + 4, T_{o,t_{h,d}-2} + 2 \cdot H(t_{h,d} - 2) \cdot (t_h - t_{h,d} + 2)\}\} \quad (4-15)$$

施設利用時間の空調時

$$T_{i,t_{bh}} = \begin{cases} Jun \sim Sep \ 8:00 \sim 18:00 & \min\{301, T_{o,t_h}\} \\ Dec \sim Feb \ 8:00 \sim 18:00 & \max\{294, T_{o,t_h}\} \\ etc. \ 8:00 \sim 18:00 & T_{o,t_h} \end{cases} \quad (4-16)$$

冬季の空調停止以降

$$T_{i,t_{bh}} = \max\{T_{i,t_{nh}}, T_{o,t_h} + \{\max\{294, T_{o,18:00}\} - T_{o,18:00}\}\} \quad (4-17)$$

ここで、 $T'_{o,t_h}$  : 室温の計算に用いる定数、 $T_{o,Ave.}$  : 日平均気温、 $T_{o,t_h}, T_{o,t_{h,r}}, T_{o,t_{h,d}-2}, T_{o,18:00} : t_h, t_{h,r}, t_{h,d}-2, 18$ 時における外気温、 $T'_{o,t_h-\Delta}$  : 前ステップにおける $T'_{o,t_h}, T_{i,t_{dh}}, T_{i,t_{nh}}, T_{i,t_{bh}} : t_{h,r} \sim t_{h,d}-2, t_{h,d}-2 \sim t_{h,r}$ , 業務時間内、冬季の空調停止以降の時刻 $t_h$ における室温、 $H$  : Heaviside 関数、 $t_{h,r}$  : 日出時刻、 $t_h$  : 時刻、 $t_{h,d}$  : 日入時刻

参考に、長期の温度上昇の影響を除外した上、つくば市の南面の 2000 年の情報に基づいて、夏季の例として 8/1、冬季の例として 2/1 の日内の室外の雰囲気温度、相当外気温 (外皮の温度)、室内の雰囲気温度 (内壁の温度) を求め、Fig.4-12 に示す。

同図において、日射量の影響が時間毎に直接反映されるため、外皮の温度である相当外気温がやや不安定になるが、複数の条件を重ねた内壁の温度は比較的安定しており、日照時間の差異等も含めて、いずれも季節感のある履歴となっている。但し、同履歴は一例であって、別の季節、地域、条件の場合に、一時的に特異な履歴を呈する可能性もある。その場合、同特異値が外的要因に与える影響がコンクリート工学的に有意であるか検証し、必要に応じて、制御するアルゴリズムを付加する必要があるが、式の構成上、前項で対象外とした持続的な外皮の温度差の影響を超越する可能性は低く、上記の式で実用上問題ないものと判断する。

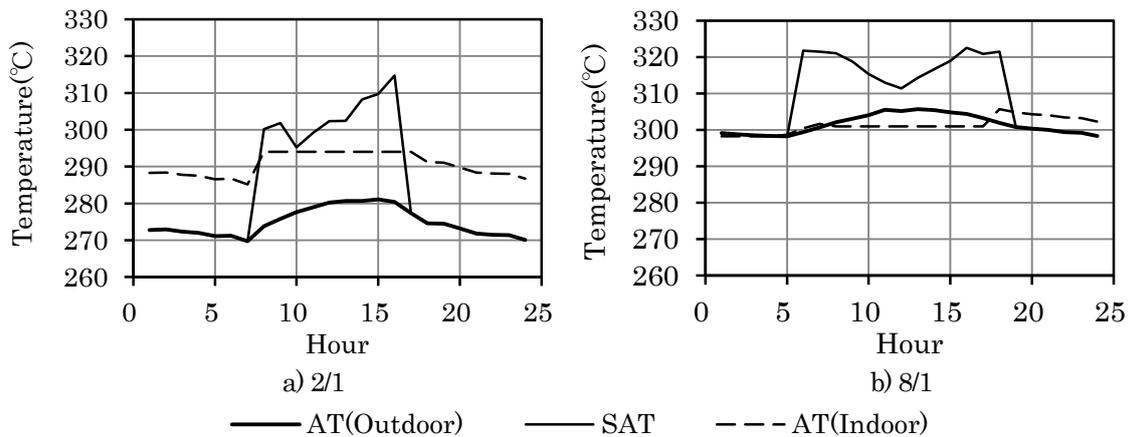


Fig.4-12 Samples of temperature histories during one day

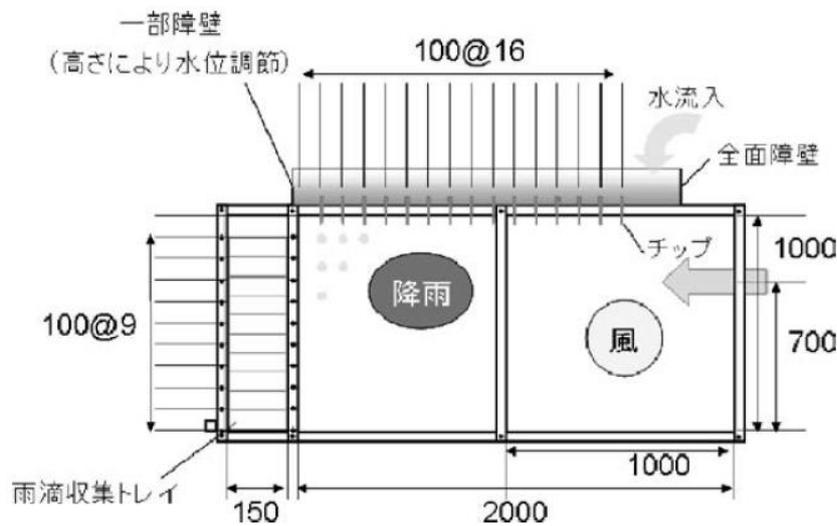


Fig.4-13 Simulated rain adhesion experiment<sup>4-28)</sup>

#### 4.4 水環境

##### 4.4.1 降雨のモデル化

4.2節で述べた様に、降雨の長期動向はRCPシナリオ毎に異なる上、週間天気予報の日単位の降雨の有無の的中率が50～85%程度であることを勘案すると、100年後の年間の時間単位の降雨の履歴を決定論的に予測した場合に的中する可能性は皆無である。

降雨のモデル化の方法として、例えば、竹下らは、雨滴の径の分布を4-18式で定義した上、0.02mm以上の雨滴のみが落下する仮定のもとで総雨滴量を三分して、各範囲の径を特定し、各粒子の終端速度を4-19式で仮定して流体解析を行い、Fig.4-13に示す実験と併せてコンクリートへの雨滴の付着量及び付着時間を検討している<sup>4-28)</sup>。

$$N_D = 8000 \cdot \exp(-4.1 \cdot D \cdot R^{-0.21}) \quad (4-18)$$

$$v = 9.4 - 9.4 \cdot \exp(-1.57 \cdot 10^3 \cdot D^{1.15}) \quad (4-19)$$

ここで、 $N_D$ ：確率密度関数、 $D$ ：粒径、 $R$ ：単位時間降雨量、 $v$ ：粒子の終端速度

しかし、コンクリート表面の細孔に大気中の雨滴が直接付着するのはコンクリート打放し仕上げだけ

であること、吸水量が一定になる給水量は0.6mm/hrであるが、気象庁の転倒ます型雨量計の最小測定値が10分毎の0.5mm単位で、同観測値に依る時点で付着時間が検討できないことを勘案すると、現時点では実用段階にない。一方、3.4.1で前述した柳らの研究<sup>429)</sup>は、余程の少量でなければ、降雨による水の供給速度が吸水速度を上回り、水膜が形成されることを報告している。

そこで、本研究では、気象庁観測値で降雨量が確認される時点で、外皮を流下する水によって水膜が形成され、任意の拡散係数で水が吸水され、断面内の含水量に傾斜性が形成されるものとする。

#### 4.4.2 降雨情報の入力間隔

因みに、気象庁観測値としては、10分、1時間及び1日単位の降雨の測定値が公開されている。降雨の持続時間の影響が高いことを重視すると、10分単位の測定を採用するべきであるが、同間隔で測定している観測所は限定される上、モデル化のための作業が手間である。そこで、前節で試算したつくば市南面の打放しコンクリートを想定して、降雨の測定間隔毎の含水率の分布を比較し、コンクリートの物性に生じる影響を確認し、モデルの作成方針を検討する。

なお、降雨中の酸性成分の濃度は、太平洋側を想定した3.7.2の試算に準じ、その他の気象条件、即ち、外気温、相対湿度、風速、日射量は、原則として、気象庁つくば観測所の2000年以降15年間の測定値の平均値とする。平均できない風向と降雨量の記録は、ここでは考察の簡単のため、最終年である2014年の記録を用いる。コンクリートは、W/C: 0.65と0.50のTable4-5に示す調合とし、解析期間は50年間とする。

Table4-5 Concrete mixture

W/C	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Air (%)	Ave. of diameter of fine aggregate (mm)
	W	C	S	G		
0.50	175	350	793	964	4.5	1.30
0.65	175	269	861	964	4.5	1.30

C <sub>3</sub> S (%)	C <sub>2</sub> S (%)	C <sub>3</sub> A (%)	C <sub>4</sub> AF (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> (%)	Density of cement (g/cm <sup>3</sup> )	Specific surface area of cement (cm <sup>2</sup> /g)
51	25	9	9	0.98	2.05	0.02	0.22	3.15	3,260

得られた水の拡散係数、CO<sub>2</sub>の拡散係数、コンクリート内の含水量の各平均の推移をFig.4-14~16、経年劣化の指標としての中性化深さの推移をFig.4-17に示す。

W/C毎に10分単位の解に対する比に換算して比較すると、W/C:0.65に関しては、水、CO<sub>2</sub>の拡散係数は1時間、1日単位共に基本的に1以下の状態で推移し、CO<sub>2</sub>の拡散係数の減量は1時間単位で最大1割、1日単位で2割程度、含水率の増量は1時間単位で3%内、1日単位は7%内で推移し、中性化深さでは1時間単位で2~8%、1日単位で13~22%小さい値になり、かつ、経年により差は小さくなる。また、W/C:0.50に関しては、拡散係数の動向はW/C:0.65とほぼ同じで、含水率は1時間、1日単位ともに2%内の増減に留まり、10分単位の解より多い期間は解析開始から数年に留まるが、中性化深さでは1時間単位で1割、1日単位で2割小さくなる。

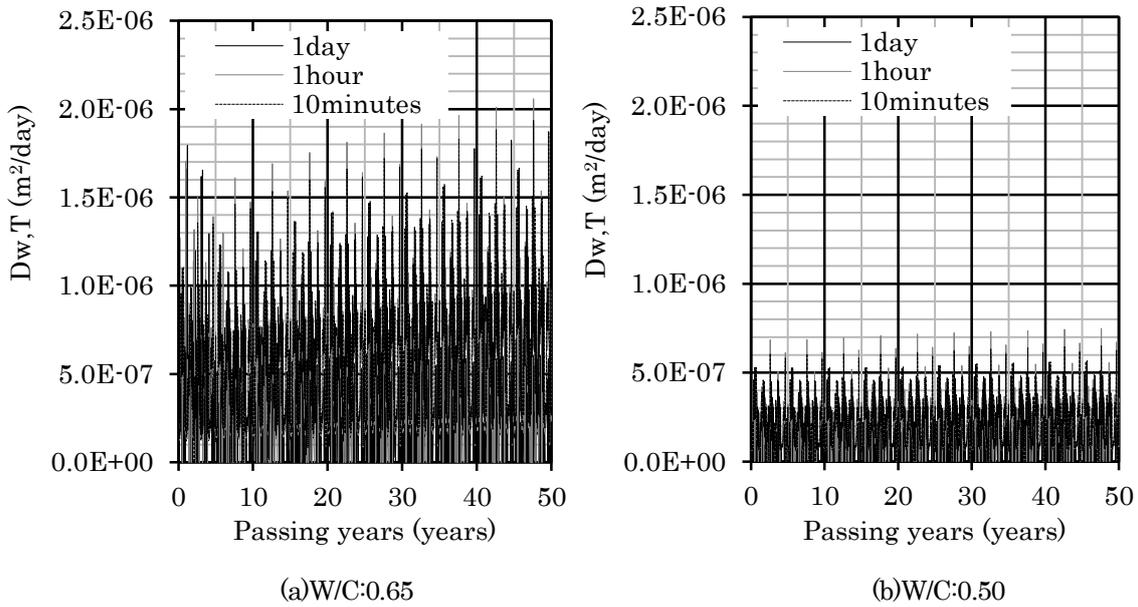


Fig.4-14 Diffusion coefficients of concrete for water with several terms of water saturation

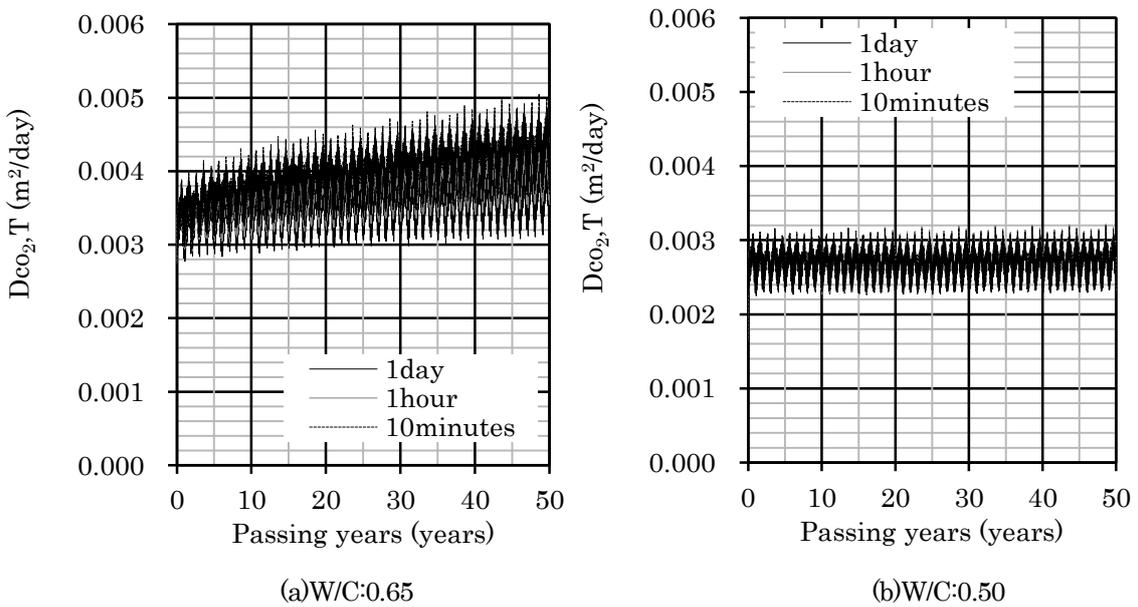


Fig.4-15 Diffusion coefficients of concrete for CO<sub>2</sub> with several terms of water saturation

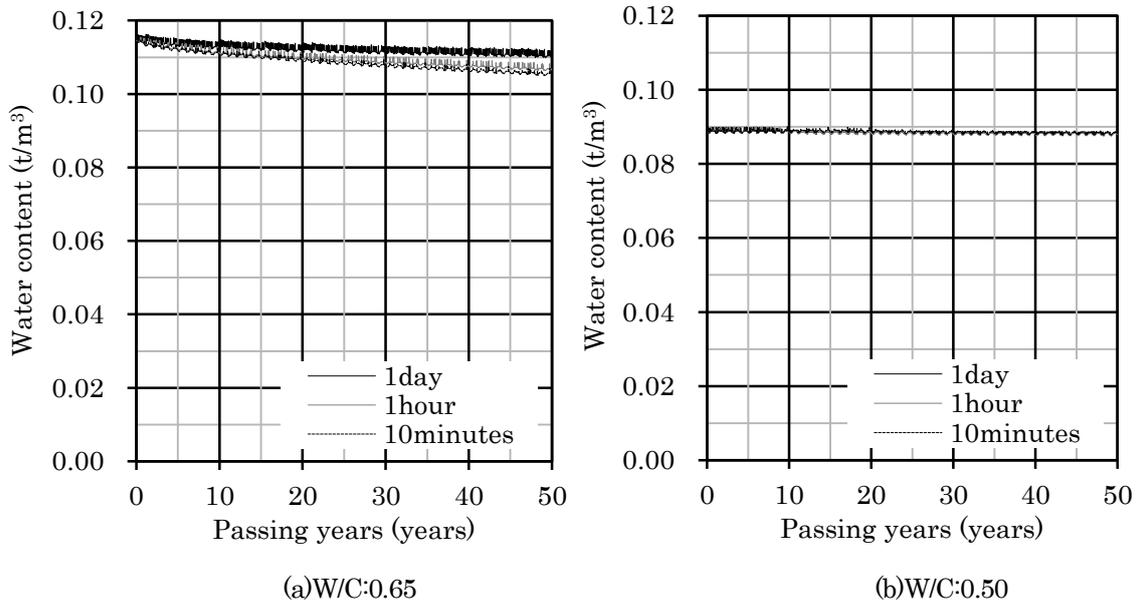


Fig.4-16 Water content of concrete with several terms of water saturation

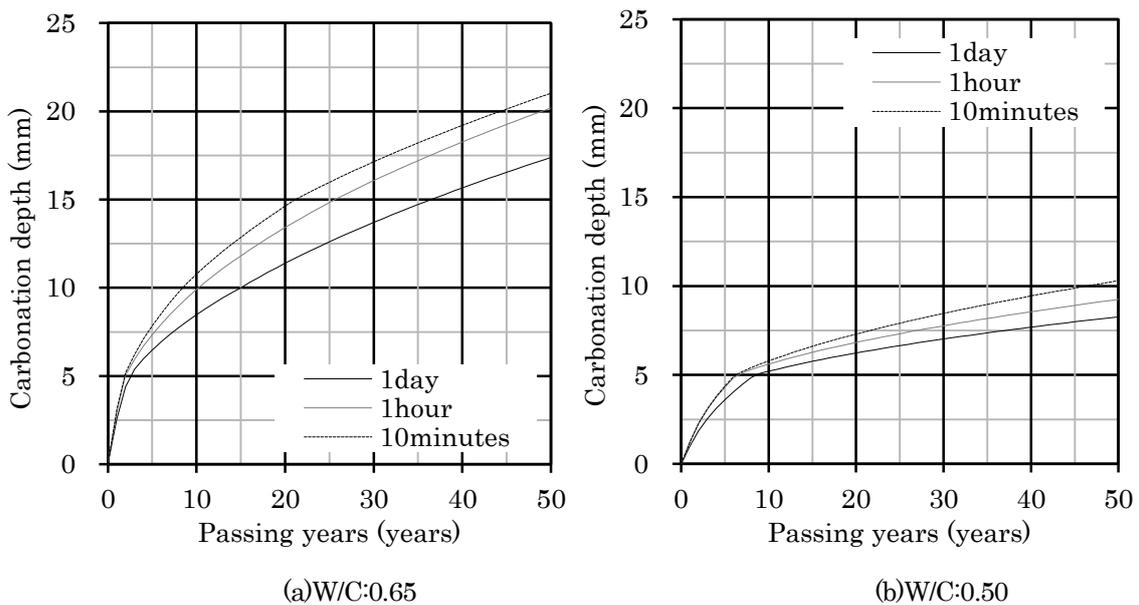


Fig.4-17 Carbonation depth with several terms of water saturation

降雨時間の影響には深度方向の傾斜性があるため、平均による比較は各条件に対する感度を鈍化しているが、飽水状態に近い条件での水の動きの緩慢や、中性化が先行する表層の CSH の分解による空隙量の低下に伴う給水量の低下により、少なくとも、降雨時間が短いほど中性化が進行することは事実である。但し、中性化深さの絶対量で比較すると、1時間単位の測定値に依れば、両調合で 1mm 前後の差に留まることから、コンクリート工学的にはほぼ同等と考えられる。従って、目的に応じて、10分単位、1時間単位の記録を使い分ければよく、以下の解析では1時間単位の入力値によって解析を進める。

#### 4.4.3 酸性成分の影響

次に、酸性成分の影響を確認するため、酸が一切ない場合と、冬季の越境汚染の影響が大きい山陰の  $\text{H}_2\text{SO}_4$  濃度、 $\text{HNO}_3$  濃度、標準偏差<sup>430</sup>を設定した場合の水、 $\text{CO}_2$  の拡散係数、含水率、中性化深さの推移を、前述の太平洋側の酸性成分に基づく1時間単位の解析と比較し、Fig.4-18~21に示す。解析上、降雨間隔は全て同じとし、降雨中の  $\text{HCl}$  濃度は前章同様に  $\text{H}_2\text{SO}_4$  濃度と等しいものとする。

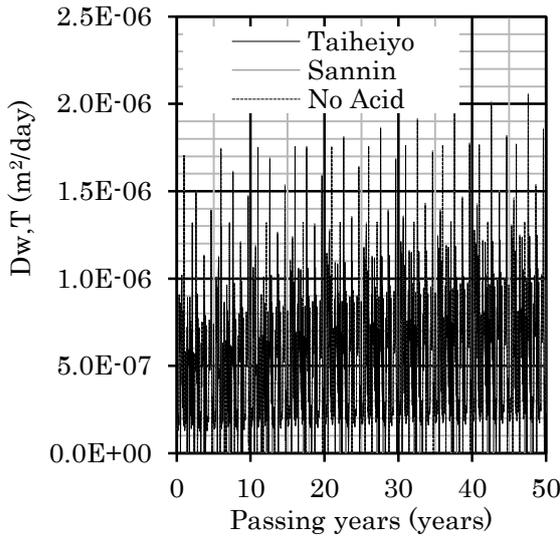


Fig.4-18 Diffusion coefficients of concrete for water with several acid quantities

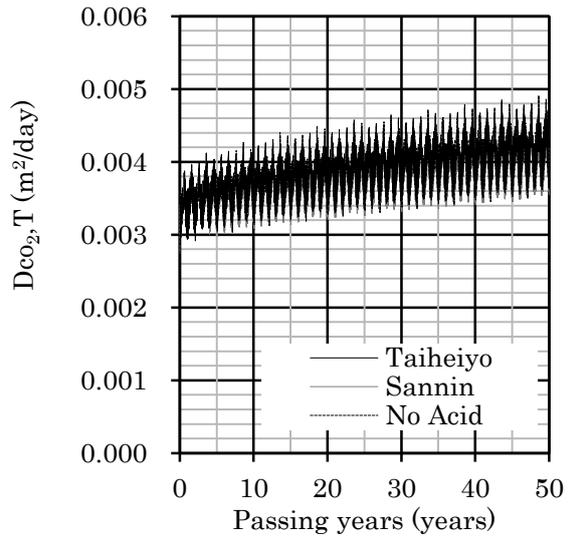


Fig.4-19 Diffusion coefficients of concrete for  $\text{CO}_2$  with several acid quantities

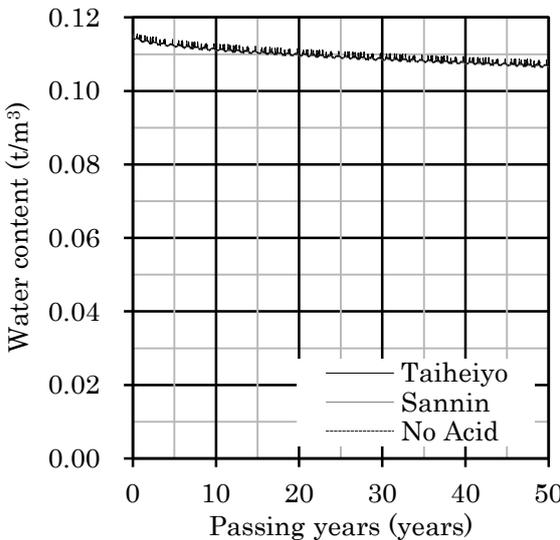


Fig.4-20 Water contents of concrete with several acid quantities

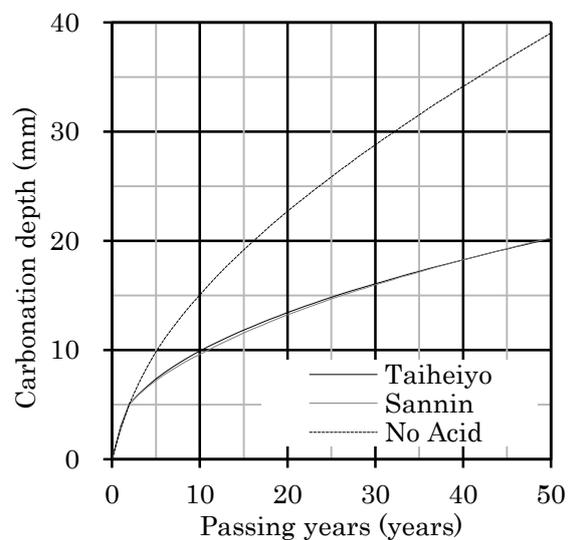


Fig.4-21 Carbonation depth with several acid quantities

結果的に、Fig.4-21 に示す中性化深さに関し、酸性成分を考慮しない場合の履歴が他の 2 倍近い以外は、ほぼ同等である。データベース上の表層のメッシュの空隙率は、酸性雨を考慮する場合に 12.5%減少したが、履歴に照らすと、Ca(OH)<sub>2</sub> の中性化後に開始する CSH の炭酸化が主要因であると考えられる。また、今回の検討では、酸性成分に関し、山陰と太平洋の濃度を用いた解析結果に有意な差はなく、酸がない場合は全く違う履歴を呈している。酸と即時に反応する仮定の影響が大きかった可能性は否定できず、今後の課題である。

ちなみに、同現象は、大気が清浄になると、建築物の劣化が進行し、汚染物質が増えるジレンマの存在を示唆している。同ジレンマは、土木構造物の様な打放し構造物における、凍結融解との複合作用による表層の剥落を伴う酸性雨劣化とは逆方向に作用する建築物特有の問題であり、留意を要する。

## 4.5 大気環境

### 4.5.1 CO<sub>2</sub>濃度

#### (1) 室外の CO<sub>2</sub>濃度

ここでは、CO<sub>2</sub>濃度と風の影響を含む飛来塩分のモデルを扱うが、まず、CO<sub>2</sub>濃度については、一般環境にある RC 造建築物の耐久性の主題である中性化現象の主要な外的要因であり、考え方はほぼ確立されている。日本建築学会の関連指針<sup>4-31)</sup>によると、人間活動の影響と長期的な漸増傾向を認めた上で、個々の建築物又は適用部位・部材での連続測定に依って、同濃度を定めることを原則としている。同方針は合理的であるが、人間活動を完全に把握することは不可能であり、モデルの普遍性の確保は困難を極める。

そこで、室外の濃度に関して、ここで新たにモデルを設定することを避け、温室効果ガス資料センターが公開する測定結果<sup>4-32)</sup>に基づいて、年内周期に配慮して、現状の外気の濃度を設定した上で、RCP シナリオによる 2300 年までの予測<sup>4-33)</sup>に準じ、年平均の漸増をモデル化する。

#### (2) 室内の CO<sub>2</sub>濃度

室内の濃度に関しては、建築物環境衛生管理基準において、換気を目安となる濃度の上限として 1,000 ppm が定められているが、同濃度は、19 世紀末に Pettenkofer が示した、通常の室内で健康影響が出ない状態の例である<sup>4-34)</sup>。CO<sub>2</sub>自体は 6 時間の暴露では 5,500 ppm でも人体に症状がないため、事務所衛生基準規則で 5,000ppm まで許容される中、国内でも臭気と関連付けて、多くの研究が続けられてきた結果、2013 年の ASHRAE 換気規格<sup>4-35)</sup>において、換気量を外気濃度+700ppm とする基準に対し、「信頼できる確実な空気質指標ではない」と付記するに至っている。

例えば、東日本大震災後、節電の要望から十分な換気を行えず、同基準が順守できなかったことは周知であるが、他方で、白石の競技施設における測定<sup>4-23)</sup>に依れば、外気の 421.1ppm に対し、平均して事務室で 17.1%増 (493.1ppm)、更衣室で 13.0%増 (475.8ppm) に留まり、建築物環境衛生管理基準の上限である 1,000ppm の半分に満たない。

室内は、外気より管理下にある心象を受けるが、人間活動の影響が非常に強いため、気流による濃度分布も併せて、決定論的考察には限界がある。国内の管理基準は、今後、2013 年の ASHRAE の換気規格に準じる可能性が高いが、同値はあくまで上限の目安であって、実際の濃度との関係性に基づくものではない。そこで、本研究では、現在の外気の CO<sub>2</sub>濃度が約 400ppm、室内の濃度の管理基準が 1,000ppm である点を重視し、外気の濃度を下限、同濃度に現在の差分の 600ppm を加算した値を上限として、居

室毎の濃度をその間で乱数によって求めるものとする。本設定は不確かと評される室内濃度を現実的な範囲で仮定し、解析自体が成立しない状態を打開したもので、乱数の根拠となる統計量をシナリオとして与えれば、実環境の再現性を向上することが出来る。

なお、室内のCO<sub>2</sub>濃度は、基本的に換気、気流と人間活動に依存するため、位置による差がある。短期の測定例は幾つかあるが、例えば、金らは、平均的な体型の若者を読書程度の活動状態で Fig.4-22 の空間に居住させ、換気方向、風量を因子として、室内の高さ方向のCO<sub>2</sub>濃度の分布の推移を測定している<sup>4-36)</sup>。

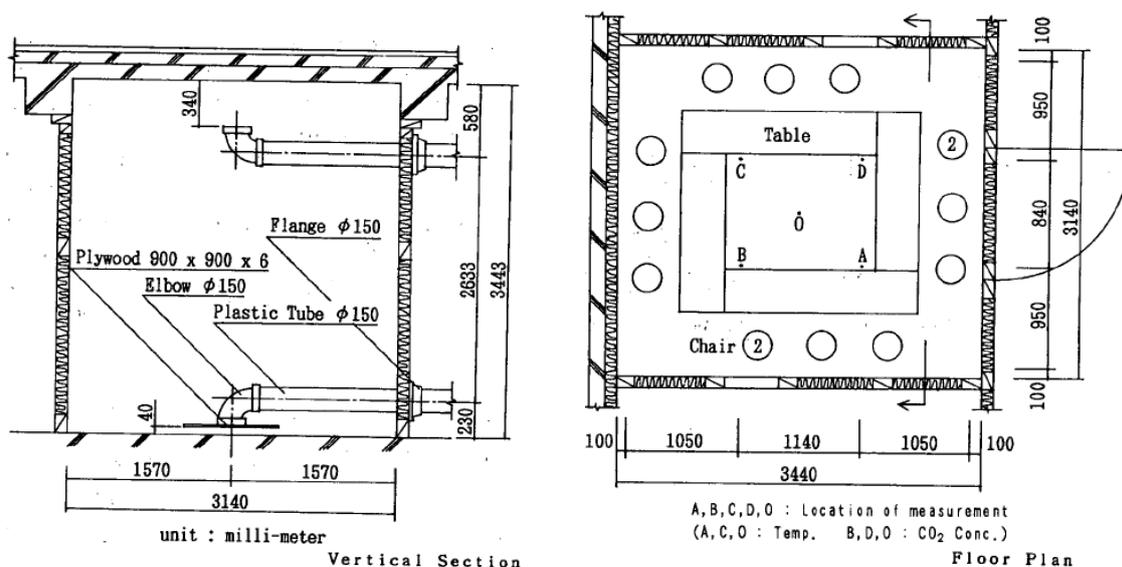


Fig.4-22 Floor plan and vertical section of the experimental space and the location of measuring points<sup>4-36)</sup>

金の分析対象は本研究とは別であるが、呼吸域のCO<sub>2</sub>濃度の推移を比較した図によると、上方換気・下方換気の別を問わず、入室から1時間程度で放物線状の履歴でCO<sub>2</sub>濃度のピークに達し、被験者の退室後変曲して、ほぼ線形に濃度が低下することが示されている。また、下方換気時の高さ方向の濃度は、経過時間にもよるが、ほぼ同じである。

そこで、上方換気時に限定して、CO<sub>2</sub>濃度の分布の影響を確認するため、高さ方向のCO<sub>2</sub>濃度の履歴を仮定し、上下限の濃度の中性化深さの履歴を解析する。具体的には、金が測定した30m<sup>3</sup>/hの上方換気時のCO<sub>2</sub>濃度の履歴を定式化した上、全ての高さの濃度が同履歴に比例して増減するものと仮定し、3時間入室後、1時間退室し、再度、4時間入室後、16時間退室する1日を想定した小サイクルを5回繰り返して、48時間退室する1週を想定した大サイクルのCO<sub>2</sub>濃度の推移を設定する。ピークが最大になるレベルと最小になるレベルの履歴を、Fig.4-23に示す。

前節で解析したW/C:0.65のコンクリートを、同環境に50年相当暴露した際の中性化深さの履歴を求める。なお、人間が熱源として作用するため、室温にも勾配を生じるが、金の実測値によると、供気の温度292~298.3Kに対し、室温との差は最大4℃に留まり、4.3で影響を認めなかった範囲になる。ここでは、CO<sub>2</sub>濃度の差の影響だけを確認するため、温度の影響は除外する。また、紫外線や相対湿度、降雨、風の影響も除外するため、温度と相対湿度は気象庁つくば観測所の平年値とし、仕上材、降雨、

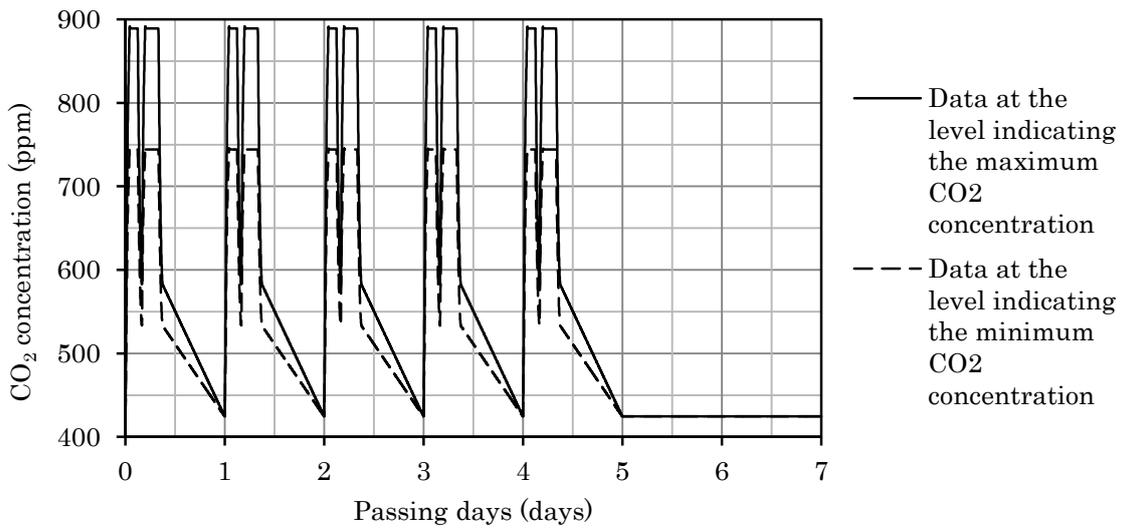


Fig.4-23 Hysteresis of CO<sub>2</sub> concentration in a week

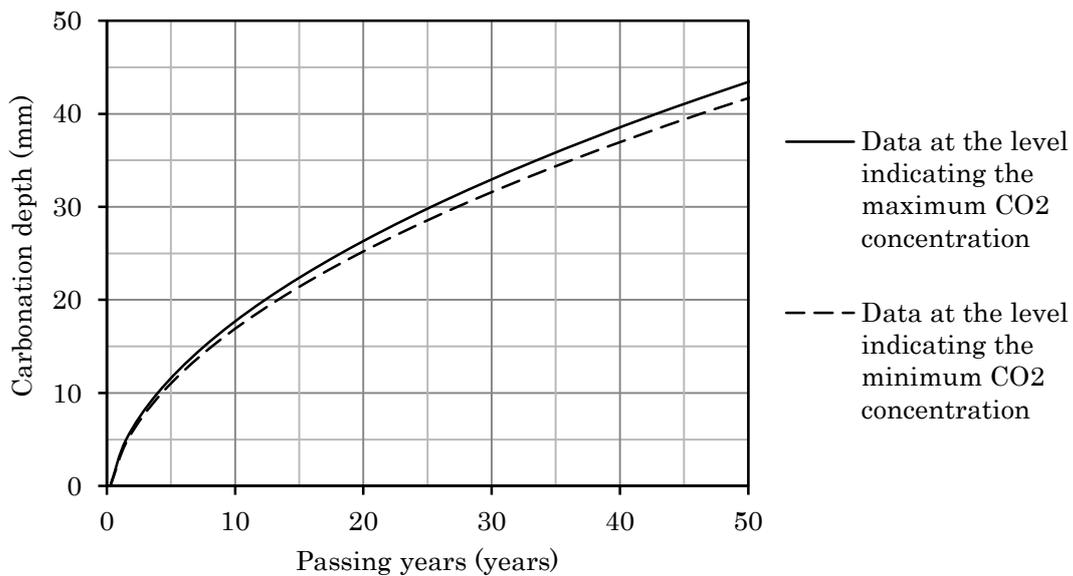


Fig.4-24 Carbonation depth of concrete in several CO<sub>2</sub> concentrations in the same room

風はないものとする。なお、二次元反応型拡散方程式に供すれば、CO<sub>2</sub>濃度は更に平滑化される可能性があるが、計算資源に配慮し、Fig.4-23の履歴をそのまま用いて、一次元で解析を行う。

得られた結果を、Fig.4-24に示す。同図より、50年経過時の中性化深さは、ピークが最大になるレベルで43.5mm、最小では41.7mmとなり、その差は2mm未満かつ絶対量の約4%で、居室内のCO<sub>2</sub>濃度の代表値の不確実性に照らすと、ほぼ差はない。従って、室内のCO<sub>2</sub>濃度の履歴や高さ方向のばらつきは、解析上考慮しないものとする。

#### 4.5.2 飛来塩分

##### (1)飛来塩分の有意性の検討方針

次に、風の影響を含む飛来塩分のモデルを検討する。離岸距離が10kmを超過する内陸部の飛来塩分

に対する国内の解析的研究は、S造橋梁の維持保全や無塗装耐候性鋼材の適用の合理化を意図した2000年以降のものが大勢である。

例えば、加藤らは橋桁の部位毎の付着塩分量を流体解析によって予測した上、耐候性鋼材の形状の最適化や環境評価の迅速化を図り<sup>437)</sup>、中村らは、構造物周囲の気流が付着塩分量に与える影響をセルラーオートメタで表現し<sup>438)</sup>、小畑らは、飛来塩分の鋼材表面での付着と反発を衝突速度で表した上、粒子の流入速度を正弦則で変動させると付着量が増すことを確認し<sup>439)</sup>、別の研究では三段階のネスティングも行っている<sup>440)</sup>。また、姜らは解析の定性的評価への適性と定量的評価への限界を認め、定量に必須の実測方法を新規に提案した上、付着塩分の雨水による洗い流し効果をモデル化して流体解析に導入し<sup>441)</sup>、同解析を踏襲した野口らは、付着を表面近傍濃度フラックスと粒子追跡の二種類の計算手法で求めて考察を行い、領域内塩分濃度と大気の流れ方向を因子とするケーススタディにより、単位風速・単位濃度当たりの付着量の分布を求め、観測で得られた塩分濃度と風速から、付着塩分量を求める方法を提案する等している<sup>442)</sup>。

解析方法の詳細に言及すると更に細分されるが、端的には、広域の気象、橋桁周辺の乱流と付着、雨水による洗いの何れかのプロセスの定性評価と定量手法に関する解析である。但し、加藤らによると、橋梁の跳ね出しの先端の形状だけでも付着量は変わるので<sup>437)</sup>、建築外皮のテクスチャまで考慮すると、付着とその後の洗いの定量はほぼ不可能である。

そこで、本項では、非降雨日に化粧打放しコンクリート表層の空隙部分に飛来した塩化物が、鉄骨表面と異なり、捕集率に依らずに全量付着するものとし、水の移流の影響を受けない状態で自己拡散して、AFmと反応してフリーデル氏塩となり、改めて炭酸化する際にCO<sub>2</sub>を消費するプロセスが、超長期でコンクリートの中性化にどの程度の影響を及ぼすか確認し、検討の要否を具体化することを試みる。

飛来塩分の先行研究の流体解析は何れも複雑であるが、得られる解が定性評価の域を出ないため、形状を問わない本検討では簡略化することが出来る。そこで、飛来塩分の研究の中で、プリミティブな位置づけである風力発電に関する大屋らの研究<sup>443)</sup>に準じると、飛来塩分量と風速及び風向の関係は次式で表される。

$$[NaCl] = a \cdot \sum_D \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \cos \theta)^3 \cdot A \cdot T \quad (4-20)$$

ここで、 $[NaCl]$ ：飛来塩分濃度、 $a$ ：飛来塩分濃度と風力エネルギー係数の回帰係数、 $\rho$ ：空気密度、 $V$ ：時間平均風速、 $\cos \theta$ ：ガーゼ捕集面にあたる風速の方向成分、 $A$ ：単位面積、 $T$ ：観測時間、 $D$ ：1日

本項は飛来塩分の検討の要否を確認するものであるため、基本となる飛来塩分量を、一般環境を想定して、耐候性鋼材の使用限界である0.05mddと仮に定め、風速と風向については、4.3.1で前述した風の設定に準じ、つくば市の気象庁観測所の最大風速とその風向の15年間のデータベースを構築し、乱数で与え、その他の熱、降雨及びCO<sub>2</sub>濃度のモデルは、本章の各節に準じる。

コンクリートは、前節の試算で用いたW/C:0.65の調合とする。フリーデル氏塩と同塩の炭酸化の反応定数は感度解析に依るのがよいが、十分な先行研究がないため、仮にCa(OH)<sub>2</sub>の炭酸化と同じ値とする。解析期間は、2000年から50年間とする。

## (2)飛来塩分の影響の試算

飛来塩分濃度を0とした場合と中性化深さの履歴を比較した結果をFig.4-25に、飛来塩分を入力した際の表層から0~2.5mmと同2.5~7.5mmのメッシュ内のCl<sup>-</sup>のモル濃度の推移をFig.4-26に示す。

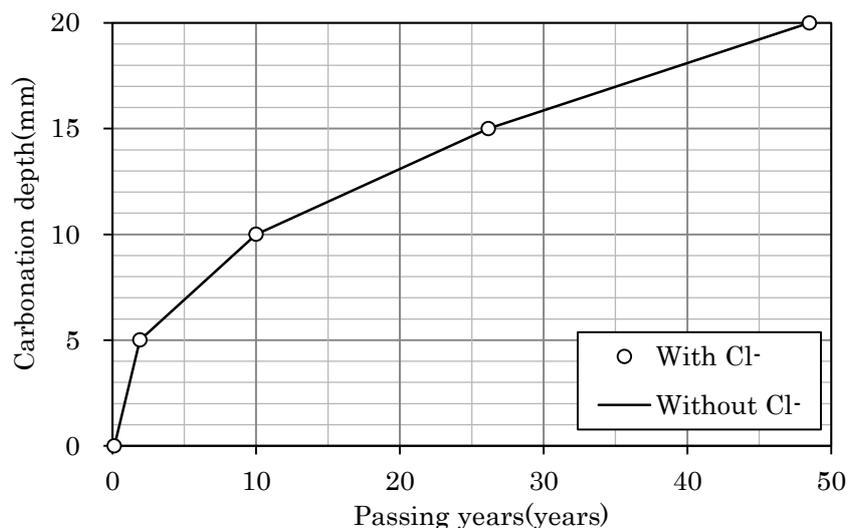


Fig.4-25 Carbonation depth of concrete with/without Cl-

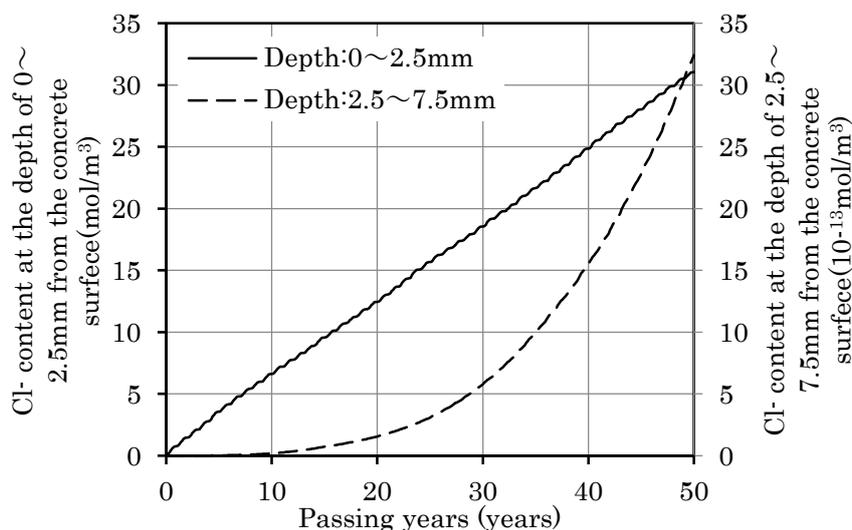


Fig.4-26 Cl- content at the several depths of concrete

Fig.4-25 において、飛来塩分の有無を因子とする両履歴が完全に合致している。そこで、Fig.4-26 を見ると、0~2.5mm と 2.5~7.5mm の Cl 濃度は、単位が  $10^{13}$  異なり、Cl が内部に全く拡散していないことが分かる。これは、コンクリート工学的に扱う飛来塩分は飛沫等の水の移流拡散が介在する現象を扱うのに対し、本解析はイオンの自己拡散という現象に特化して解析した結果、Cl が表層に留まる上、フリーデル氏塩の炭酸化の影響も具体化しなかったもので、自己拡散現象と他の劣化現象のスケールの相違に起因する。

従って、エアロゾルに起因する Cl は、コンクリートの空隙内の水の移流の影響を考慮する必要があると考えられるが、Cl が内部に移動する吸水現象は、飛来塩分が  $\text{HNO}_3$  と反応した  $\text{HCl}^{4+40}$  を含む降雨時に発生するので、環境を適切に表現するためには、建築物~海岸間の十 km 以上の空間、更には雲の形成を含む気象のモデル化を要する。また、自己拡散自体を適切に表現するためには、コンクリートの解析上のメッシュをより細分し、表層のメッシュの空隙に継続して  $\text{CO}_2$  を供給する本解析の設定の影響を

極小化する必要がある。

広域の解析対象を処理するにはネスティングを要するが、精度云々ではなく、本試算で全く影響がないことと、過去に実害に関する報告がないことを勘案すると、一般環境ではエアロゾルに起因する飛来塩分の検討は、計算資源の浪費であり、不要であると判断する。但し、任意の工場の近傍等、エアロゾル起因の  $\text{Cl}^-$  濃度が顕著に高い特殊環境ではこの限りではなく、上述した手法でも効果が認められる可能性がある点は留意を要する。

## 4.6 コンクリートの中性化の超長期動向

### 4.6.1 超長期環境モデルによる中性化の試算

本節では、前節迄に構築してきた超長期用の環境モデルを用いて、RCP シナリオ 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 に対応するつくば市の南面の雨曝しの外皮の環境を設定し、打放しコンクリートの状態を超長期に相当する 200 年間に渡って解析し、AIJ 式との比較を行う。

解析には、陽解差分法を用い、時間は  $2 \times 10^3$  日、要素は表層を 2.5mm、内部を 5mm に分割する。反応定数は、分割数に依存するため、AIJ 式の超長期の履歴と照合し、石田の値<sup>44)</sup>の 50 分の 1 を与え、当該深さの  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  濃度が  $0.1 \text{ mol/m}^3$  未満に達した時点で中性化したものと判断する。コンクリートは、4.4 の試算で用いた W/C:0.65 のコンクリートとする。環境モデルの算定フローを、Fig.4-27 に示す。

解析期間の温度、 $\text{CO}_2$  濃度の平均値と相対湿度の気象庁の平年値を AIJ 式に入力して得た参考値と併せて、本環境モデルを与えたコンクリートの中性化深さの履歴を Fig.4-28 に示す。

図中、本法による RCP2.6, 4.5, 6.0 の解析結果は放物線則に近い挙動を呈しているが、RCP8.5 は大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の履歴に即して、3 次曲線状の履歴を呈する。AIJ 式との比較では、RCP8.5 以外のシナリオでの差は 3~6mm 内で 200 年の予測としては僅かな差であるが、RCP8.5 では最大 17mm の差に達している。本法によるシナリオ間の差は 50 年までなく、100 年以降に拡大していることから、気候変動の影響は超長期特有の課題であると共に、鉄筋の防食機能に限定するものの、リスクの定量に有意な差を生じる場合があると言える。

### 4.6.2 中性化の超長期用簡易式

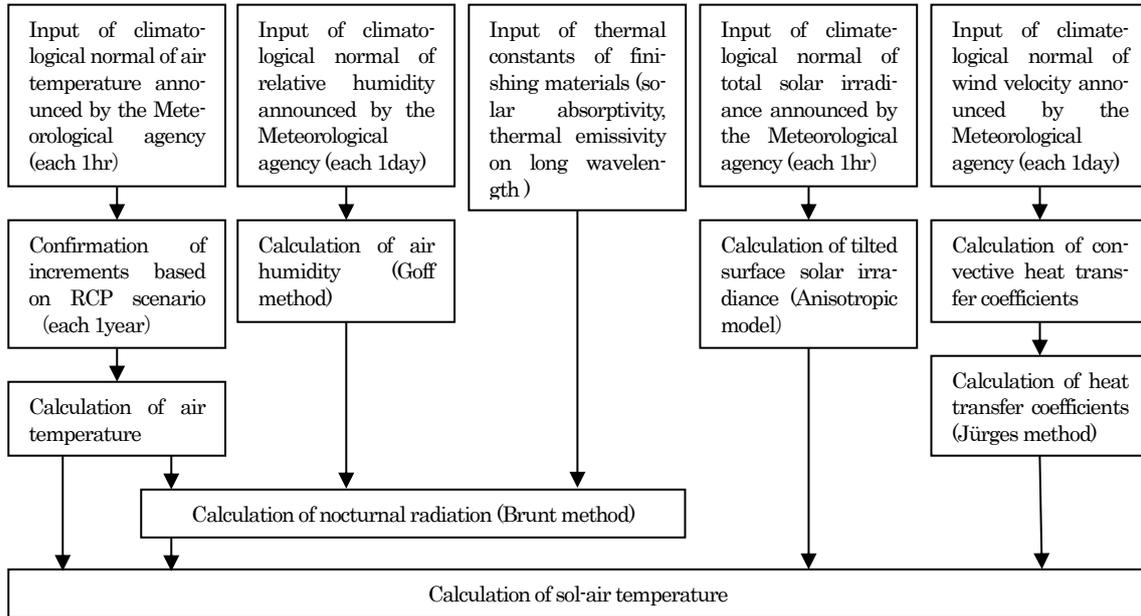
前章でも述べた様に、気候変動が更新過程に影響する場合、資源循環シミュレーション用人工社会や地球シミュレータとの連成を要するため、本解析結果を更新過程まで関連付ける必要がある。上述してきた解析は、建築物群単位の解析に供するには計算資源の浪費が大きく、簡易式に変換することが望ましいが、RCP8.5 の中性化深さの履歴は図示した通り、3 次曲線状を呈しており、汎用されてきた放物線則による定式化は不可能である。ここでは、前節で記した様に、AIJ 式が  $\text{CO}_2$  濃度の累積値の平方根の関数に変形できる点に着目し、RCP シナリオに則した  $\text{CO}_2$  濃度の推移を前提に 4-21 式の様に変形する。

0 内は、中性化の履歴の概形を定めるもので、第 1 項が中性化開始時の大気中の  $\text{CO}_2$  濃度による履歴、第 2 項が大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の増分の累積が中性化の履歴に与える影響を、各時点の増分と W/C 毎の定数で補正した補正項である。また、 $C_{100}/A$  は、100 年時の中性化深さを水セメント比毎の定数で除した絶対量を補正する係数である。

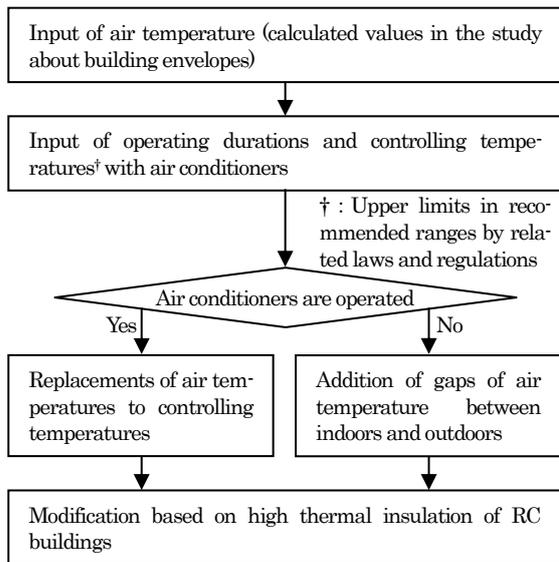
$$C(t) = C_{100}/A \cdot \left( \sqrt{[\text{CO}_{2,s}] \cdot t + B \cdot \left( \int_0^t \Delta \text{CO}_2(t) dt \right)^{\Delta \text{CO}_2(t)/G}} \right) \quad (4-21)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $C(t)$  : 時間  $t$  における中性化深さ、 $C_{100}$  : 100 年時の中性化深さ、 $A$ 、 $B$ 、 $G$  : 補正

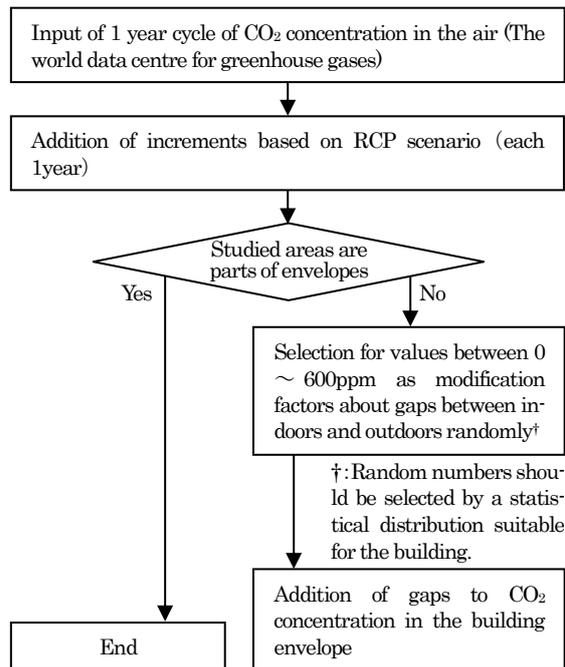
### Thermal environment (building envelopes)



### Thermal environment (surfaces in indoors)



### Air environment



### Water environment

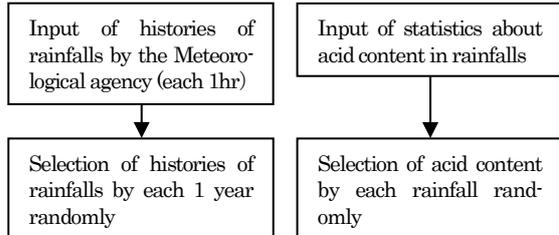


Fig.4-27 Flow of calculation about environmental factors

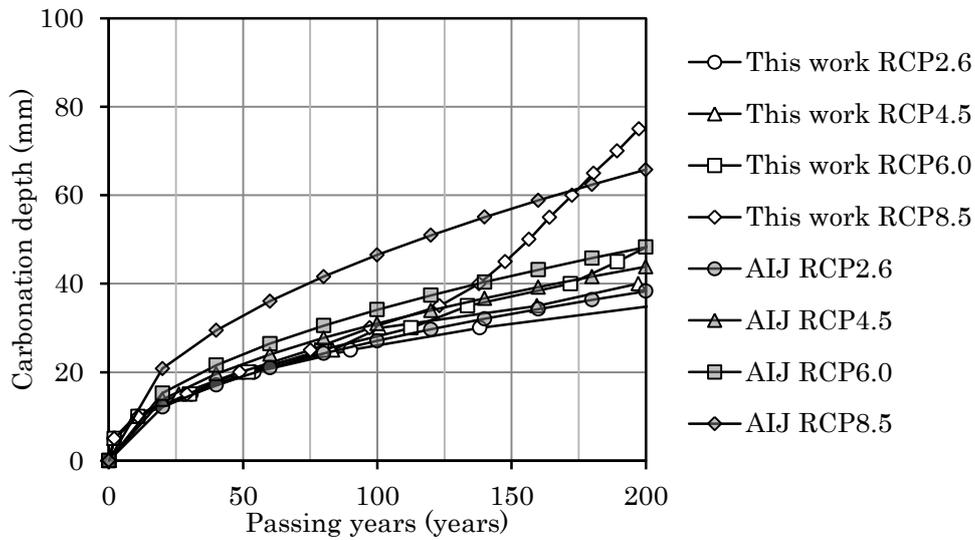


Fig.4-28 Carbonation depth in several RCP scenarios

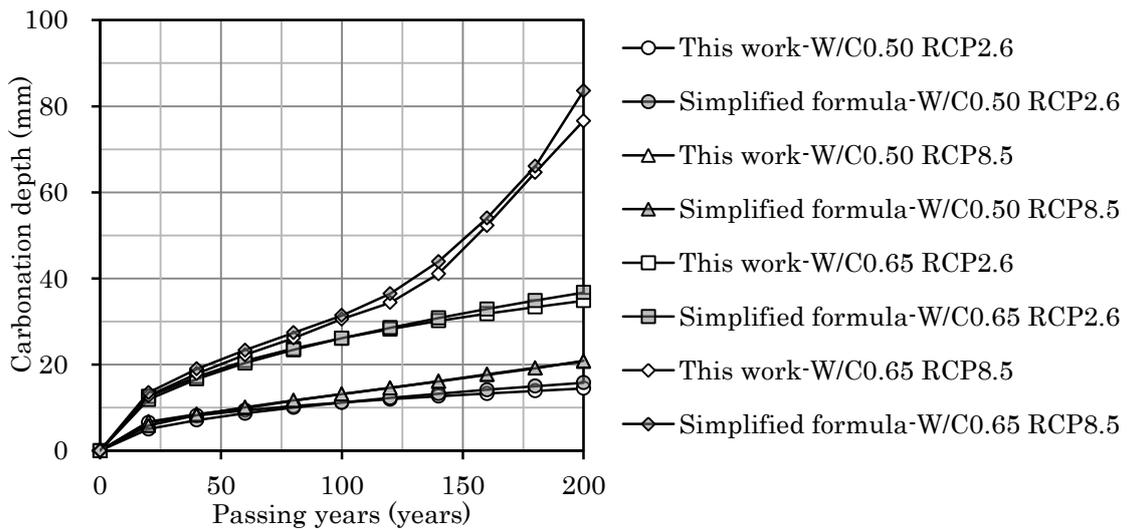


Fig.4-29 Approximation to the simplified formula

係数,  $CO_{2,s}$  : 中性化開始時の  $CO_2$  濃度,  $\Delta CO_2$  : 中性化開始後の  $CO_2$  濃度の増分

4.4 の試算で用いた W/C : 0.50 の調査と併せて, RCP2.6 と 8.5 の履歴を前項に準じて求めた上, 4-21 式に近似した結果を, Fig.4-29 に示す。簡易式は, 本法の履歴を再現している。

#### 4.7 小結

本章では, コンクリートによる鉄筋の保護機能の劣化過程に関する環境モデルを, 超長期を俯瞰した自然科学領域の先行研究に基づいてモデル化するため, RCP シナリオが適用可能な外的要因を気温, 室温, 日射, 相対湿度, 風速, 酸性雨, 大気中の  $CO_2$ , エアロゾル中の Cl からスクリーニングした上, 各要因が複合的に作用する状態を想定し, 熱環境, 水環境, 大気環境毎に体系化した環境モデルを, 室内外毎に提示した。

前章の材料学的モデルを用いた検証により、一般環境の劣化機構が CO<sub>2</sub> と降雨中の酸性成分による中性化に限定できることを確認した上、超長期に亘るコンクリートの中性化挙動を解析し、経年数 100 年以降に RCP シナリオによる差が生じ、RCP8.5 では 200 年以内に影響が有意になることを示した。また、同解析結果を更新過程まで関連付けるため、群単位の解析に適用可能な 3 次曲線状の簡易式を構築した。

因みに、RCP シナリオは、地表の放射強制力から地球温暖化ガスを逆算し、これを実現する社会現象を記述したシナリオであるため、これを用いて新たな環境モデルを作成する時点でシナリオ本来の理論が破たんしており、本モデルの妥当性に関する議論に至らないとの見方がある。しかし、上述した様に、従来の知見に反し、超長期において、気候変動は躯体の劣化に影響するため、建築物群の更新周期の変化、延いてはマイクロ環境の CO<sub>2</sub> 濃度の RCP シナリオからの乖離を生じる。シナリオを補正するプロセスが不可欠である点で、本環境モデルは RCP シナリオと同種であって、発生確率を定義しないシナリオプランニングの成果と理解すればよい。

なお、本解析を実環境に適用する段階では、シナリオを用いた以上、IPCC が各 RCP シナリオを元に定期的に現況を評価し、環境政策の軌道修正を求めている様に、データ収集の継続と環境モデル他の定期的な補正によって、解析を実態に漸近させる必要がある。但し、萌芽的研究段階にある現状では、定性的な見解が統一されている要因や前章で構築した劣化モデルによる検証を経た要因に基づいて構築した本環境モデルは、帰納的なシナリオとしては妥当と考えられる。

また、超長期用簡易式は、CO<sub>2</sub> 濃度の RCP シナリオに近い履歴に対応する式を近似によって得たものであり、その信頼性は環境モデルに依存する。

超長期的時間軸で建築物の経年劣化を扱う上で、シナリオにはあらゆる影響因子を反映する必要があるが、材料学及び自然科学的アプローチを用いた本章では、人間の意思決定の影響が支配的になる、修繕が必須となる仕上材を扱うことを敢えて避けた。次章では、修繕を伴う仕上材のある RC 造建築物単位まで本モデルを拡張するため、人間活動に着目する建築学的アプローチを試みる。

※解析上採用した先行研究の式

- ・渡部らの相当外気温
- ・絶対湿度の Goff 式
- ・Perez の Anisotropic モデル
- ・大屋らの飛来塩分量と風速及び風向の関係式

※解析上の仮定

- ・熱環境（外皮）…相当外気温でモデル化
- ・斜面日射量（相当外気温の変数）…Pinatubo 火山の噴火と太陽の黒点の周期に配慮し、同火山噴火後の 11 年以上の日射量の平均値を Anisotropic モデルに入力して算定
- ・仕上材の日射吸収率、長波長放射率（相当外気温の変数）…水の挙動に関する定数に与える影響のみ大きい、降雨の不確実性の二重構造の内包を避けるため、定数として設定
- ・放射熱伝達率（相当外気温の変数）…渡部らの仮定に準じて  $6\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- ・外気温（相当外気温の変数）…現状を気象庁の平年値に準拠して 1 時間単位で定め、2100 年まで RCP シナリオに準じ、その後 2300 年まで  $0.2 \times 10^{-2}\text{K/年}$  で漸増するものと仮定
- ・風速（相当外気温の変数）…気象庁観測値から風速の平年値に風向を乱数で与えて設定
- ・熱環境（室内、非空調時）…RCP シナリオに基づく外気温に、羽原らが実測した室内外の温度差を模式化して加算した上、RC 造の高断熱性に関する制約を付加して表現
- ・日出・日入時刻（室内外の温度差の起点）…海上保安庁日没計算サービスに準拠
- ・室内の躯体表面温度…白石の測定に準拠し、室温と同じ
- ・熱環境（室内、空調時）…関連法規の範囲で化学反応を促進する高温側の温度でモデル化

- ・空調による室内の温度分布…検討対象外（相当外気温に関する仕上材の定数を誘導した経緯と同じ根拠）
- ・水環境（降雨・降雨のない日の相対湿度）…気象庁観測値に準拠して，1時間単位の値を1年毎に乱数で付与（影響因子の検討時は参照年を固定）
- ・大気環境（CO<sub>2</sub>濃度，室外）…温室効果ガス資料センターが公開する測定結果に基づく年内モデルが，RCPシナリオに基づいて，年単位で漸増するものと仮定
- ・大気環境（CO<sub>2</sub>濃度，室内）…室外の濃度に0～600ppm間の値を乱数で加算
- ・大気環境（CO<sub>2</sub>濃度の空調時の室内分布）…下方換気時は兆候がなく，上方換気時も中性化深さ換算時の影響は軽微なため，対象外
- ・大気環境（エアロゾル中のCl<sup>-</sup>）…一般環境では検討不要
- ・中性化深さの超長期用簡易式（屋外）…定常環境下の放物線則に，CO<sub>2</sub>濃度の増分の補正項を追加して構築

## 参考文献

- 4-1) 三橋博三，岩上真也，金子佳生：コンクリートの中性化進行速度に及ぼす気象環境条件の影響に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.10，No.10，pp.143-149，1999.1
- 4-2) Intergovernmental Panel on Climate change：Climate Change 2014 Synthesis Report，2014
- 4-3) 環境省：日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）別添資料，参照 2018.10，<<http://www.env.go.jp/press/files/jp/24661.pdf>>
- 4-4) 丸山茂徳：地球温暖化問題と21世紀の気候変動予測，日本放射線安全管理学会誌，Vol.8，No.2，pp.113-114，2009
- 4-5) 根本順吉：気候変動の諸問題，第四紀研究，Vol.11，No.3，pp.101-111，1972.10
- 4-6) 秋山雅彦：地球史からみた地球温暖化問題，地球化学，Vol.58，No.3，pp.139-147，2004
- 4-7) C., Idso, S.F., Singer：Climate Change Reconsidered，2009
- 4-8) Y., Fujii：The Role of Atmospheric Nuclear Explosions on the Stagnation of Global Warming in the Mid 20th Century，Journal of Atmospheric and solar-Terrestrial Physics，Vol.73，No.5-6，pp.643-652，2011.4
- 4-9) 渡部嗣道，井川憲男：タイル直張り外断熱工法における仕上げ温度推定法に関する基礎的研究，日本建築技術報告集，Vol.15，No.30，pp.389-392，2009.6
- 4-10) 田中孝和，富山潤，伊良波繁雄，吉村忍：ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.789-794，2004
- 4-11) 大石哲，松井光弘，池淵周一：詳細な雲物理過程を含む酸性雨・酸性雪予測モデルの開発，水工学論文集，Vol.46，pp.1-6，2002.2
- 4-12) 三上岳彦：都市のヒートアイランド現象とその形成要因—東京首都圏の事例研究—，地学雑誌，Vol.114，No.3，pp.496-506，2005
- 4-13) 平野勇二郎，大橋唯太，亀掛川幸浩，近藤裕昭：玄地裕：都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルを用いた東京都心部のヒートアイランド対策と冷房負荷削減策の評価，環境システム研究論文集，Vol.33，pp.179-188，2005.10
- 4-14) 羽島知洋，清水庸，大政謙次：都市域の気温変化と土地利用変化の関連性の分析，農業気象，Vol.60，No.4，pp.291-297，2004.
- 4-15) 久保田孝幸，花木啓祐，浦野明，粉川大樹，小宮英孝：微気候からみた街区形態の評価に関する研究，環境システム研究，Vol.25，pp.191-199，1997.10

- 4-16) 萩島理, 谷本潤, 成田健一: 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー, 水分・水資源学会誌, Vol.17, No.5, pp.536-554, 2004.11
- 4-17) 曾我和弘, 赤坂裕, 二宮秀興: 全天日射量から斜面日射量を推定する各種モデルの比較, 日本建築学会計画系論文集, 第 519 号, pp.31-38, 1999.5
- 4-18) 梅干野晁, 飯野秋成, 小野幹治, 谷口新: 集合住宅地における街区の空間形態および構成材料と全表面からの顕熱流量との関係の考察, 日本建築学会計画系論文集, 第 502 号, pp.57-64, 1997.12
- 4-19) 張牛牛, 成瀬哲生, 西岡利晃, 梶井宏修, 二階堂稔: 表面の異なる建築材料の分光反射特性と表面温度及び放射量に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.82, pp.9-18, 2001.7
- 4-20) 気象庁, 週間天気予報検証結果, 参照 2018.10, <[http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/kensho/score\\_s.html](http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/kensho/score_s.html)>
- 4-21) 海洋研究開発機構: 21 世紀気候変動予測革新プログラム 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験 平成 23 年度研究成果報告書, 2012.3
- 4-22) 松本衛, 銚井修一, 三浦健治, 塚本彰, 佐藤安弘: セメント系多孔質建築材料の結露, 乾燥過程の実験とその解析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.353, pp.11-20, 1985.7
- 4-23) 白石聖: 実構造物調査に基づくコンクリートの中性化に及ぼす環境条件の影響に関する研究, 東京理科大学修士論文, 2015.3
- 4-24) 羽原宏美, 鳴海大典, 下田吉之, 水野稔: 居住者の室内温熱環境調節行為のモデル化による住宅の空調エネルギー消費の予測, 人間と生活環境, Vol.11, No.2, pp.83-88, 2004.11
- 4-25) 海上保安庁海洋情報部: 日日出没計算サービス, 参照 2018.10, <[http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/automail/sun\\_form3.html](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/automail/sun_form3.html)>
- 4-26) 小林陽太郎: ビルディングの環境衛生基準に関する研究, 昭和 40 年度厚生科学研究報告書, 1966
- 4-27) 伊藤尚寛, 横井睦己, 中原信生: 温風暖房空間の上下温度分布の簡易計算モデル—空調空間の熱的特性に関する研究 第 2 報一, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 398 号, pp.59-67, 1989.4
- 4-28) 竹下直樹, 加藤佳孝: 気象条件を考慮した流体解析に基づくコンクリート構造物への水分付着に関する研究, 生産研究, Vol.58, No.3, pp.269-272, 2006.5
- 4-29) 柳東佑, 高正遠, 兼松学, 野口貴文: 打放しコンクリート中の水分分布に及ぼす降雨の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.21-26, 2007.9
- 4-30) 環境省: 越境大気汚染・酸性雨 長期モニタリング報告書 (平成 20~24 年度), 2014.3
- 4-31) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説, 2016
- 4-32) 温室効果ガス世界資料センター, 参照 2018.10, <[http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/jp/wdcgg\\_j.html](http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/jp/wdcgg_j.html)>
- 4-33) M., Meinshausen, S.J., Smith, K., Calvin, J.S., Daniel, M., Kainuma, J.F., Lamarque, K., Matsumoto, S.A., Montzka, D.C.B., Raper, K., Riahi, A., Thomson, G.J.M., Velders, D.P.V., Vuuren : The RCP Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions from 1765 to 2300, Climatic Change, Vol.109, pp.213-241, 2011.11
- 4-34) New York State : Ventilation: Report of the New York State Commission on Ventilation, 1923
- 4-35) ASHRAE: ANSI/ASHRAE Standard 62.-2013 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2013

- 4-36) 金仁具, 本間宏: 上向きおよび下向き換気時における人体発生 CO<sub>2</sub> の分布および排除効率に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.442, pp.17-26, 1992.12
- 4-37) 加藤真志, 武田勝昭: 飛来塩分の数値解析的評価技術の橋梁への適用～耐候性鋼材適用地域拡大への試み～, 鋼構造論文集, Vol.7, No.28, pp.45-54, 2000.12
- 4-38) 中村秀治, 藤井堅, 緒方琴未, 田口義隆: 地形影響を考慮した飛来塩分量の推定と構造物への塩分付着に関する検討, 鋼構造論文集, Vol.14, No.54, pp.43-54, 2007.6
- 4-39) 小畑誠, 長谷川高士, 永田和寿, 後藤芳顕: 固気 2 相流解析による飛来塩分の付着シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.590-598, 2008.3
- 4-40) 小畑誠, 李国泰, 渡辺泰成, 後藤芳顕: 局所および広域解析を組み合わせた付着塩分量推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.668-678, 2012.3
- 4-41) 姜詠, 野口恭平, 奥田慧, 倉田直弥, 白土博通, 八木知己, 森下尊久, 田中雄三: 構造物表面に付着する飛来塩分量の推定, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.347-352, 2012
- 4-42) 野口恭平, 金城佑紀, 姜詠, 白土博通, 八木知己, 服部洋, 田中雄三: 海塩粒子の物理挙動と風況に基づく付着塩分量の評価, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.613-621, 2014.3
- 4-43) 大屋誠, 武邊勝道, 広瀬望, 松浦葉月, 今井篤実: 風向風速データを用いた飛来塩分予測, 材料と環境, Vol.62, No.11, pp.430-433, 2013.11
- 4-44) 小林禧樹, 池沢正, 渡辺弘: 環境大気中における海塩粒子の動態について—海塩粒子と二酸化窒素の相互作用—, 大気汚染学会誌, Vol.14, No.10, pp.401-407, 1979
- 4-45) 石田哲也, 李春鶴: 微細空隙構造と物質平衡・移動の熱力学強連成に立脚したコンクリートの炭酸化反応モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp.274-286, 2007.5

# 第5章 RC造建築物群の経年劣化に対する

## 建築学的アプローチ

### Chapter5: The Approach to Aging Deterioration of the RC Building Group by Architectural Engineering

#### 5.1 小序

前章までに、仕上材の無い鉄筋コンクリートの超長期の経年劣化過程の解析手法と簡易式を構築し、併せて、一般環境下の RC 造建築物の劣化機構が外的要因の複合作用による中性化であることを示したので、本章では、解析の対象を、仕上材を施した一般の RC 造建築物まで拡張することを目的とする。この際、第 1 章で前述した様に、超長期に亘る数世代の建物所有者の修繕の時期や仕様に関する意思決定を全て特定するのは実質不可能であるため、解析対象を更に建築物群まで拡張し、個々の建築物における全ての意思決定を確率論として扱う必要を生じる。結果的に、鉄筋コンクリートの経年劣化過程は、材料及び自然科学的問題から、人間活動に基づく問題に変質するため、建築学的なアプローチをとることとする。

人間の建築に関わる意思決定を扱う上でのインターフェースとなる建築物の要求性能に着目すると、例えば、野口らが、今世紀初頭に性能規定化の国際動向を鑑み、設計段階における建築材料・部材を選定するためのシステム構築を試みているが、この研究の中で、性能論の歴史的動向について論じており、西山による住宅の質と性能の関係の研究、田村による Building Elements の概念の導入、池辺の人間にとって必要な空間を確認する研究、内田の Building Elements に基づく建築設計のシステム化、建築研究所の材料設計に関する研究を、代表的な研究として挙げている<sup>5-1)</sup>。

西山の研究の主体は住宅であるが、建築経済に関する論文において、造形・機能・経済に言及し、一定機能の経済性追求の過程で、建築創造論理から造形・質が問われるとしている<sup>5-2)</sup>。西山の論調は、建築経済と建築創造の対立構造における建築家の姿勢を問うものであるが、田村は、専門研究の深化に偏重する時流に対し、設計基準に寄与する諸学科の総合化の必要性を説き、英国建築学会の Building Elements に基づいて、建築単位の要求性能を列挙し、基準設計の方法論を展開している<sup>5-3)</sup>。同時期に、

内田らは、構造力学、計画原論、材料学等の基礎知識を基本とした上で、適用部位毎の構法を最適化するために、同じく **Building Elements** に着目して、要求性能、構法と評価方法を整理し、バランスのとれた体系の構築を試みている<sup>54)</sup>。また、池辺は、建築物を構成する大量の構成材料の基本体系の確立にモジュールからアプローチし、性能と関連付けたコーディネーションを行った作品群を発表している<sup>55)</sup>。最後に建築研究所の研究は、全体系の分類に **Building Elements** を組込んだ上、材料設計の要求性能を定量的にグレーディングしている<sup>56)</sup>。一連の研究から、建築学的な視点で専門研究を再構成することで具体化した要求性能を、生産段階を俯瞰して、材料試験までブレイクダウンしたプロセスが理解される。しかし、人間の可能性に照らすと、建築に関わる製品の高機能化、高付加価値化は当面は継続するため、一連のプロセスの繰返しを要し、超長期では定量的な分類さえ困難である。

そこで、超長期の技術動向を高次の課題として、現在の技術に特化し、3、4章で示した鉄筋コンクリートの劣化モデルを建築物単位まで拡張する場合も、仕上材が劣化速度の異なる材料の複合体であること、修繕に建物所有者の主観が介在し、仕上材の仕様を根本的に変える可能性があることを勘案すれば、同材の物性に時間依存性を付与するのは必然に思われるが、例えば、仕上材によるコンクリートの中酸化抑制効果を表す中性化率は定数<sup>57)</sup>である。また、複層の仕上材の製品、施工上の変動や、供用環境の不確実性、出荷工場毎のコンクリートの品質の変動に照らすと、得られる解の信頼性には限界があり、十分な標本数に基づく確率論的考察に依存する必要があるが、部位、部材、建築物、建築物群の各階層における統計量に関する理論研究は少ない。

また、材料と構造の劣化モデルに、異なる耐久設計思想が混在することは周知であるが、例えば、前者のモデルでは、コンクリートの中酸化による維持保全限界を、何れかの鉄筋位置の腐食と位置づけて、最外側鉄筋の閾値を設定するのが一般であり<sup>58)</sup>、基本的に、耐力の一切の低下を認めていない。しかし、小林らの研究によれば、ひび割れの入った床板の引張領域の鉄筋は、広域が腐食しており<sup>59)</sup>、腐食を判断基準とする前者の場合、竣工直後に維持保全限界に達するので、意思決定自体は経済モデルに解を委ねる必要を生じ、実際の更新時の経年数との相関は低い。また、後者の劣化モデルは、経験工学に依存する設計体系の影響までモデルに含むため、性能の冗長性が前提としてあり、要求性能を満たす限り、ひび割れ等による力学的性能の漸減は問題にならない。従って、何れの耐久設計思想も、建築物としての耐用年数を直接変えるものにはなりえない。

総じて、超長期を対象として、建築物群の耐用年数に対峙する際、方法論を根本から見直す必要がある上、アウトプットについても、慎重に対応する必要があると言える。

## 5.2 建築学的アプローチの基本方針

そこで、本章では、第一に、劣化速度に時間依存性のある仕上材の修繕を伴う経年劣化モデルを、3章で構築したコンクリートの反応型非定常拡散方程式の境界条件に組み込み、同仕上材の超長期修繕プロセスの解析上の留意事項を確認した上、汎用する仕上材の物質透過特性の推移を、新製品・技術の開発も俯瞰し、製品毎ではなく劣化機構毎に体系化して、モデル化する。

第二に、部材の特性である壁床の先行ひび割れをモデル化した上、ひび割れ発生部とその他一般部の鉄筋の腐食過程の算定方法を定め、材料乃至構造的判断基準に依らず、鉄筋の腐食という現象に基づいて、躯体の劣化モデルを構築する。

第三に、材料、部材のモデルを、建築物として統合するため、躯体の空間構成を統計的に求める手法と、構成要素である躯体、仕上材及び個々の修繕仕様をモデル化し、第四に、世代を超える建物所有者

の志向を一般論として扱う方法として、エージェントベースでモデリングを行う。また、得られたモデルに基づいて、建物所有者の志向に関する複数のシナリオのもと、鉄筋の腐食量を群単位で定量する試算を行う。

上述した四段階の各検討項目の構図を整理すると、Fig.5-1 に示す階層構造が具体化する。なお、図中の最上位の概念である建物所有者の志向は、Fig.1-1 に示した様に、実際は近隣建築物群の修繕等の影響を受けるため、同図で示した構図で得られる劣化過程の影響下にある。この点で、同図の関係性は二重構造を呈するため、群単位で連成した上での相互影響の評価が不可欠である。以下に各論を解説するが、2章で示した試算において設定した竣工年や建物所有者間の相互影響は、劣化モデルの特性を複雑化して考察を困難にするため、本章では解析の対象外とする。

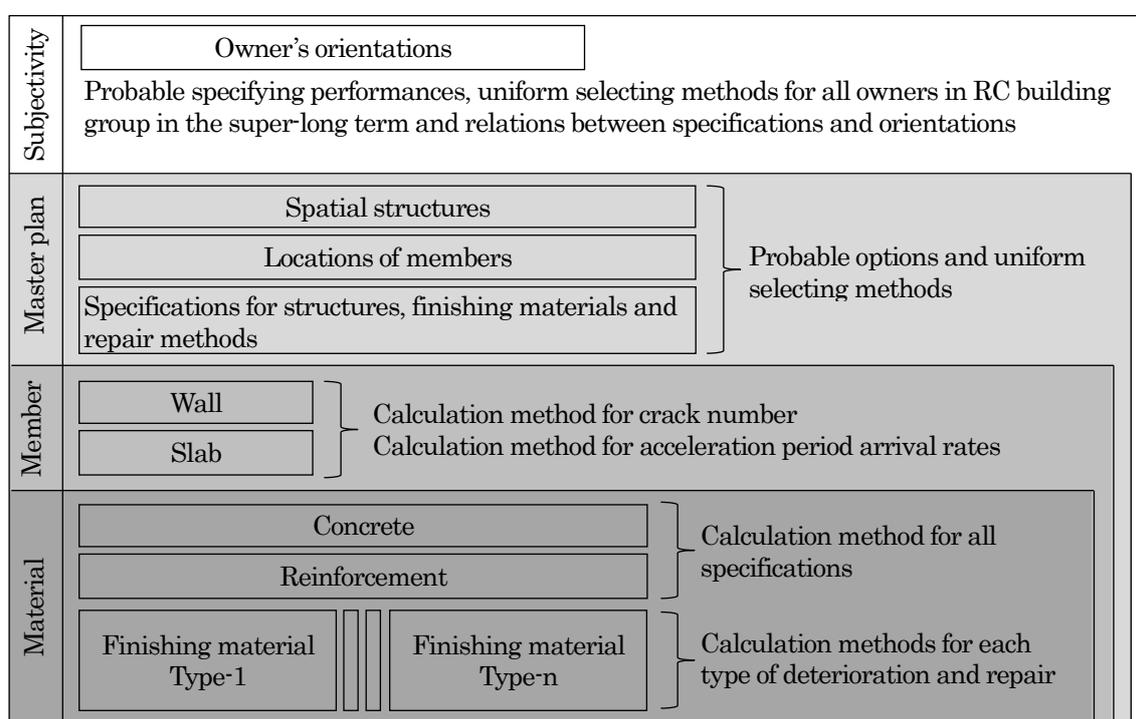


Fig.5-1 Hierarchy of awaiting solutions in this study

### 5.3 部材単位の劣化

#### 5.3.1 修繕を伴う仕上材の劣化

##### (1) 仕上材の劣化モデルの検討方針

前節で述べた様に、仕上材は劣化速度の異なる材料の複合体であり、例えば、仕上材のあるコンクリートの打放しコンクリートに対する中性化深さの比に、時間依存性があることは明らかである。しかし、耐久性に関する議論が起こった高度経済成長期の建築物こそ、コンクリート自体の品質の劣悪なものがあり、仕上材による中性化の遅延効果が減価償却期間内で認識できたため、仕上材毎の中性化率が経験的かつ実験的に標準化されたが、昨今の耐久設計基準強度やW/Cの上限を設ける建築物では、減価償却期間内で仕上材に依存する必要がなく、超長期を俯瞰すると、評価例の欠如、または更新時の意思決定の抽象に起因し、仕上材に関する議論すら成立する環境にない。

このうち、高分子系仕上塗材の劣化プロセスについては、4章でも前述した様に、促進試験と暴露試

験の劣化機構の乖離が周知である。例えば、矢部らは、屋外暴露試験の塗膜の劣化は光酸化反応を主体とし、顔料を含む塗膜は顔料周辺から樹脂が分解し、顔料を含まない塗膜は塗膜表面に巣穴状の欠陥が生じるのに対し、促進試験では条件に応じ、加水分解反応やラジカル分解反応等、特定の劣化反応が促進され、塗膜表面全体が劣化・分解すること等を確認している。同氏による屋外試験並びに各種劣化促進試験の劣化機構は、Table5-1の通りである<sup>5-10</sup>。

Table5-1 Degradation types of organic coatings in various weathering tests<sup>5-10</sup>

	屋外バクロ	SWOM	XWOM	QUV	S-UV
加水分解 (エステル・ウレタン等の減少)	○	○	○	○	○
酸化分解 (過酸化エステルの生成)	○	○	○	○	○
酸化分解 (二重結合の生成)	×	×	○	×	○
ラジカル切断 (アルキルの減少)	×	×	○	○	○

	バクロ地	試験期間
屋外バクロ	沖永良部島	24ヵ月、48ヵ月、72ヵ月

試験	試験条件					試験期間 (時間)
	カット波長	照射時間	温度	水負荷	紫外線 照度*	
SWOM	255nm	連続	63℃	散水	65	2000
XWOM	295nm	連続	63℃	散水	180	1500
Q U V	—	8時間	70℃	結露	13	2000
S - U V	295nm	4時間	63℃	結露	900	1200

SWOM : サンシャインカーボンアーク灯耐性試験  
XWOM : キセノンアーク灯耐性試験  
QUV : 紫外線蛍光灯耐性試験  
S-UV : メタルハライドランプ耐性試験

\*紫外線照度は波長300nm～400nmでの照度[W/m<sup>2</sup>]

劣化機構により踏込んだ研究としては、松本らが多成分系の塗料の赤外分光法による各要求性能とのPLS回帰分析を試みているが<sup>5-11</sup>、全ての環境に適応できる迄には多大な時間を要する萌芽期にある。結果的に、現時点では、日本ウエザリングテストセンター等が開示する促進試験と屋外暴露試験の変状の関係性<sup>5-12</sup>から補正係数を得る他ないため、高分子系仕上塗材の考察は、性能本位の巨視的な考察に限定される。

しかし、それ以前の問題として、超長期の検討をする上で、製品を特定した議論は、100年前の大正時代、200年前の江戸時代の仕様と比較する迄もなく、平成以降の仕様の推移を回顧しただけでも現実的ではない。

そこで、本研究では、製品を特定した議論を離れ、仕上材の劣化機構を体系化して扱う。具体的には、劣化曲線の概形に着目し、①仕上材自体の劣化に起因する体系、②仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因する体系、③仕上材の剥離・剥落に起因する体系、④検討不要の全四体系に分類してモデル化する。なお、躯体の修繕は、新耐震以前に建設された建築物が存在する昨今では、耐震補強に合せて行う例が多かったが、解決の迫った課題であるため、超長期を俯瞰する本研究では耐震補強を対象外とする。

## (2)仕上材自体の劣化に関する体系

順に整理するが、第一に、仕上材自体の劣化に関する体系は、上述した高分子系仕上塗材の劣化が該当する。この観点の論文は散見されるが、代表的な小池らの化学反応速度論的手法は、要求性能を特定せず、熱と紫外線による性能の劣化を表現するもので<sup>5-13</sup>、富板が20℃から30℃にかけ、反応速度が倍になる仮定のもと、熱影響をアレニウス則に修正した次式を提案している<sup>5-14</sup>。

$$\ln \frac{P_0}{P(t)} = Q \cdot \left( \int_0^t k_1 \cdot I(t) \cdot \exp \left( -\frac{E_{Lh}}{R} \cdot \left( \frac{1}{T(t)} - \frac{1}{293} \right) \right) dt \right)^a \quad (5-1)$$

ここで、 $t$  : 材齢、 $P(t)$  : 時間 $t$ における仕上材の外的要因の透過率、 $P_0$  : 暴露開始時の仕上材の外的要因の透過率、 $Q, a$  : 塗料の劣化の材料定数、 $E_{Lh}$  : 塗料の劣化に関する見かけの活性化エネルギー、 $I(t)$  : 材齢 $t$ における単位時間当たりの紫外線の強さ、 $T(t)$  : 材齢 $t$ における絶対温度、 $k_1$  : 屋外暴露時の劣化度と適合させる紫外線量の補正係数、 $R$  : 気体定数

同式は劣化機構を特定せず、適用のフレキシビリティに優れる上、コンクリートとのスケールの差に起因して、拡散方程式上、メッシュとしてモデル化出来ない本研究の塗膜の条件に適している。そこで、同式の採用を前提に、屋外での酸性雨の影響を表現するため、紫外線量の補正係数を追加した次式によって、高分子系仕上塗材の物性の変化を評価する。

$$\ln \frac{P_0}{P(t)} = Q \cdot \left( \int_0^t k_1 \cdot k_2 \cdot I(t) \cdot \exp \left( -\frac{E_{Lh}}{R} \cdot \left( \frac{1}{T(t)} - \frac{1}{293} \right) \right) dt \right)^a \quad (5-2)$$

ここで、 $k_2$  : 過酷環境（酸性雨）の影響を減じる補正係数（雨がかり以外は 1/1.1）

#### a) 複層構造の扱い

建築物の外装等で多用される複層仕上塗材は、トップコート、主材及び下地調整材の三層で被覆する部位と、トップコートと下地調整材の二層で被覆する部位で構成されるため、前章迄で扱った深さ方向のみの拡散方程式として扱う際の留意事項の確認を要する。そこで、仕上塗材の $\text{CO}_2$ の透過特性を仮定し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の中性化のみを扱うプリミティブな二次元拡散方程式に供し、計算資源の節約のため、JIS A 1153 に準じた促進中性化試験時のコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度の推移を確認する。コンクリートは 4.4 で試算に用いた W/C:0.65 の調合とし、仕上塗材の三層、二層部分の幅は共に 5mm とする。差分法のメッシュは 1mm 間隔、時間は  $5 \times 10^5$  日間隔とし、反応速度定数は打放しコンクリートの予めの試算で一致したことを根拠に、石田らが促進中性化試験の再現に用いた  $4.17 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{sec}^{5-15}$  を用いる。

同式に必要な仕上塗材の定数であるが、例えば、JIS A 0030 の気密性、防湿性に照らすと、仕上材によって、数千〜一万倍の差がある。また、中性化率に関する建築業協会のレポートでは、最大値を採用する前提で、経年数、修繕の扱いを問わずに集計したデータから、代表値として時間依存性のない定数を得ており<sup>57)</sup>、実質、同会の定めた値以下であれば、評価対象の一樣態を表現する上での問題はない。ここでは、経年劣化の影響を除外し、透過率を 0.3、0.5 一定として、解析に供する。促進開始 1 日の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度を Fig.5-2、表層から 5mm の位置の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度が全て  $0 \text{mol}/\text{m}^3$  になる促進 10 日の同濃度を Fig.5-3 に示す。

同図より、1 日では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度が 1mm まで  $0.2 \text{mol}/\text{m}^3$  未満になり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度の低下を示す範囲は表層の透過率の影響を受けて波状を呈しているが、10 日では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度が  $0.2 \text{mol}/\text{m}^3$  未満の境界が 5mm まで進み、直線状になる。二次元反応型拡散方程式では、仕上塗材の層数の切り替え間隔以深に達すると、仕上塗材の層数の影響がほぼなくなる可能性が高い。表面積の増加や塗り重ね時の施工欠陥による $\text{CO}_2$ の溶解量の増加も想定されるが、経年劣化のモデル化に関し、製品を問わない巨視的な本解析では、層数は副次的である。考察の簡単のため、以降は、三層部分の劣化プロセスを対象に検討を進める。

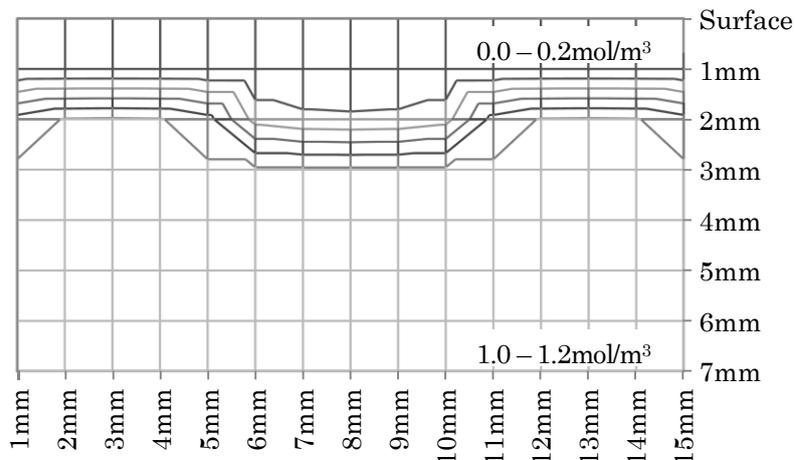


Fig.5-2 Ca(OH)<sub>2</sub> content in concrete (1day accelerated)

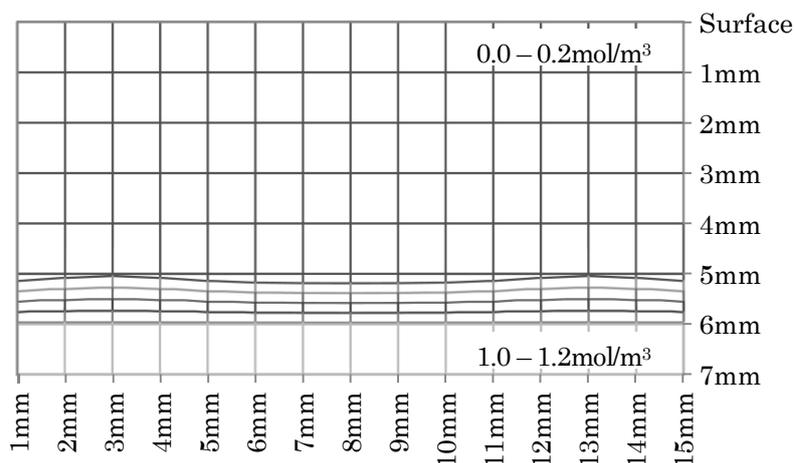


Fig.5-3 Ca (OH)<sub>2</sub> content in concrete (10days accelerated)

b)修繕の影響

次に、上述した W/C:0.65 のコンクリートに仕上塗材を施した上、屋外環境に暴露し、①修繕しない場合、②暴露開始後 50 年でトップコートを塗替える場合、③同 50, 65 年で塗替える場合、④同 50, 55, 60, 65 年で塗替える場合、⑤同 50 年以降 200 年迄 15 年間隔で塗替える場合の中性化深さの履歴を、反応型非定常拡散方程式で求め、高分子系仕上塗材の劣化と修繕プロセスの特性を、解析的に考察する。

仕上材の劣化過程については、塗料、建築用仕上塗材を塗布したコンクリート供試体を、紫外線照射後、促進中性化し、光沢保持率と色差、中性化率を測定した兼松らの実験の結果を参考に定める<sup>5-16)</sup>。同実験では、光沢保持率に関し、劣化促進時間と屋外暴露時間の相関を認めているが、CO<sub>2</sub>の透過率との相関には言及していない。但し、日本建築学会の関連指針に、10 年相当の暴露で中性化速度が開放しコンクリートに収束する事例が紹介されており<sup>5-8)</sup>、光沢保持率と同じ速度を仮定すると、ほぼ同次元の結果が得られることから、同相関に準じて、兼松らの中性化率を 5-2 式に近似し、屋外の各定数の参考値を得る。なお、同値は塗料間の相性を再現しないため、あくまで履歴の概形に関する Q, a の参考であり、

初期値  $P_0$  は建築業協会の絶対量<sup>57)</sup>を参考にする。仮定した定数を、Table5-2 に示す。

Table5-2 Specifications of CO<sub>2</sub> permeability of multi-layer coatings

	Numeric constant
Top coating	$P_0 : 0.02, Q : -0.004098, a : 0.3789$
Main coating	$P_0 : 0.15, Q : -0.006010, a : 0.3049$
Under coating	$P_0 : 0.60, Q : 0, a : 0$

因みに、同値は防水形複層塗材 E を想定し、フッ素系塗料のトップコートと、アクリルシリコン系塗料の主材の履歴を近似した上、15 年経過時点の中性化深さが打放しコンクリートに対して 4 割近辺になる様に、初期値を補正したものである。また、下地調整材はセメント系の値とし、劣化しないものとした。この際、塗料の劣化の履歴は中性化速度係数に関するもので、透気乃至透湿性の履歴とは明らかに異なるが、製品を特定しない解析の設定上、有意性は低いいため、仕上塗料の一例との位置付けでそのまま引用する。

その上でのコンクリートに作用する降雨の影響のモデル化にあたり、破壊モードは重要である。ここでは、トップコートに紫外線吸収能があり、屋外暴露時は、一般部の膜厚は変わらず、顔料や塵埃を起点としてピンホールが広がる破壊モードを想定し<sup>5-10)</sup>、CO<sub>2</sub>の透過率の増分を空隙の増分と見做し、相応する紫外線量を下層の主材に与える。降雨は同ピンホールを介して、コンクリートに作用するため、打放しコンクリートの吸水時の拡散係数を用いても問題がないものとする。

暴露環境については、関東の塩害のない地域を想定して、つくば市の南面の 90° の外壁に作用する年間紫外線量を、富板に倣って日射量から求め<sup>5-17)</sup>、温度補正のうえ累計した値で、兼松らの促進劣化試験の単年相当の紫外線量に関する同様の値を除いて、 $k_1$  を 22.56 とし、本事例用の 5-2 式を完成する。また、降雨の頻度と風向きは 2000 年の気象庁観測値、降雨中の酸性成分の設定用の正規乱数は 0、CO<sub>2</sub> 濃度の推移は RCP8.5 とする。

得られた結果を、Fig.5-4 に示す。50 年の塗替え時に中性化がほぼ停止し、再開後 50 年程度で 10mm 中性化が進行する過程で、非修繕時の履歴に近接し、その後は同履歴に沿い、コンクリート工学的に同程度の速さで中性化することが分かる。RCP8.5 は CO<sub>2</sub> 濃度が 100 年以降急増することも影響しているが、基本的に反応項の濃度依存性によるものである。

次に、同じ条件で、暴露開始後 15, 50, 150 年以降 15 年間隔でトップコートを塗替えた際と同深さを、中性化率を想定して、非修繕時の深さで除した値の履歴を Fig.5-5 に示す。

同図より、修繕の起点によって、中性化深さの比、更には同比の推移の概形が異なることが分かる。比較対象が RCP8.5 に準じた履歴であることも一因にあるが、非定常環境で、従来の中性化率の技術的思想が機能しないことは明らかである。

#### c) 修繕後の履歴の簡易モデル

複層仕上塗材として確からしい物性を仮定して解析する限り、少なくとも大規模修繕周期毎に仕上材の影響を見直す必要があるが、前章のコンクリート打放し仕上げ用の簡易式は、修繕に伴い CO<sub>2</sub> 濃度の供給量が激減する様な、RCP シナリオを逸脱する CO<sub>2</sub> 濃度の履歴に適用できない。そこで、形式論的

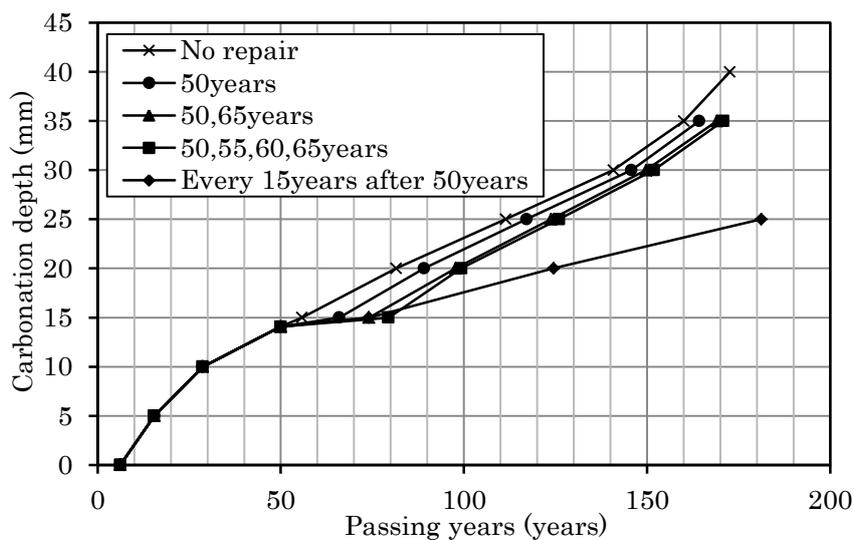


Fig.5-4 Carbonation depth of concrete repaired in several years

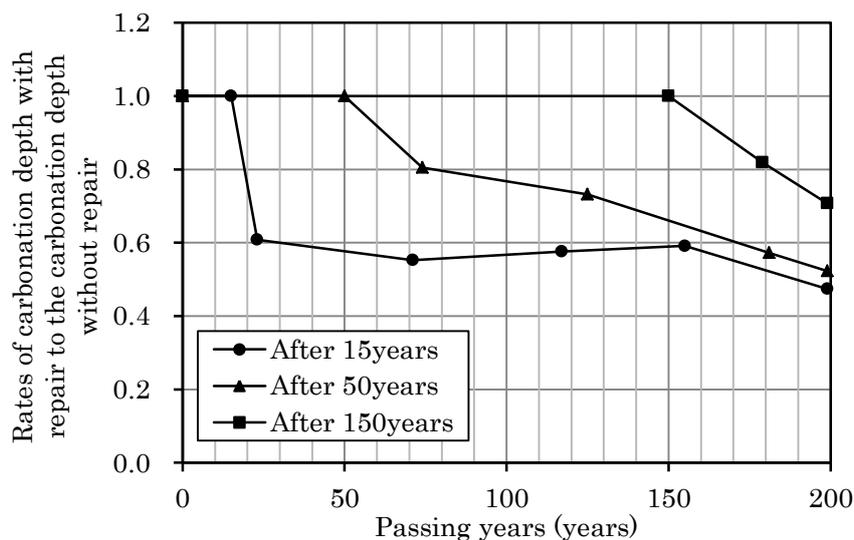


Fig.5-5 Rates of carbonation depth with repair to the carbonation depth without repair

な解析では、履歴の概形のみが問われることと、図示した超長期材齢では、例えば、50年時の塗替えから大規模修繕周期程度の間の中性化の進行が1mm程度と小さいことを重視し、塗替え時は5～15年間中性化が進行せず、同年数経過後、中性化が再開し、非修繕時との差が50年間で解消される様に差分を漸減するルールを与え、修繕時期毎に異なる劣化過程を再現する。なお、トップコートの塗替えを継続的に行う場合、本仮定を適用できないが、実際は高分子系仕上塗材の主材部も劣化して更新に至るため、群単位での影響は軽微と判断し、本法では扱わない。

基準となる修繕しない場合の中性化の履歴は、所定の中性化率が得られる様に、CO<sub>2</sub>の透過率算定用の定数を仮定した上、大気中のCO<sub>2</sub>濃度に同定数で得られる透過率を乗じて、コンクリート表面のCO<sub>2</sub>濃度とし、コンクリート用の簡易式に導入して得る。

### (3)仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因する体系

次に、劣化機構に関する第二の体系として挙げた、仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因する体系について言及するが、同体系は、具体的には、仕上材自体の中性化によりコンクリート表層に到達するCO<sub>2</sub>濃度が変わる、セメント系仕上材とタイル接着用モルタル（以下、仕上げモルタル）を指す。

劣化過程の理解のため、参考に、厚さ10mm、W/C:0.50、砂セメント質量比3、空気量8%のモルタルを4.4の試算で用いたW/C:0.65のコンクリート表層に塗布し、劣化速度の緩慢に配慮して、JISA 1153の促進中性化試験に供した際の、下地のコンクリートの中性化深さの推移を解析する。モルタルの物性は、コンクリートから粗骨材を抜いただけで、外的要因の透過性については、コンクリートと同じ設定が使用できるものと仮定する。なお、修繕の影響を確認するため、促進中性化開始時点のコンクリートの前中性化10mmの有無も、因子として考慮する。得られた結果を、参考のコンクリート単体の結果と併せて、Fig.5-6に示す。

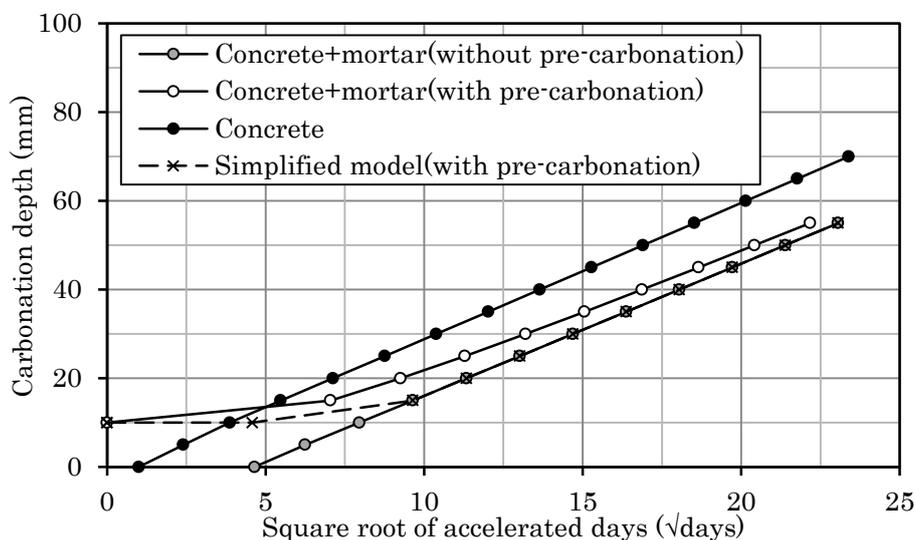


Fig.5-6 Carbonation depth of concrete with/without pre-carbonation

同図において、前中性化をしない事例は、既往の知見に即し、促進期間の平方根と中性化深さに線形の相関がある。これは、仕上げモルタルが中性化した後、躯体コンクリートの中性化速度で同コンクリートが中性化する馬場式<sup>5-10</sup>と同じである。一方、前中性化を施した事例は、放物線状の相関を呈する。

各履歴に関し、前者で中性化速度係数を求めると、打放し仕上げとほぼ同じであるため、反応定数が支配的であった可能性が高い。後者については、前中性化すると、仕上げモルタルで被覆した時点で、コンクリート内のCO<sub>2</sub>濃度が高いことに加え、その後作用するCO<sub>2</sub>もモルタルと反応して、全てがコンクリートに到達しないため、特異な履歴を呈した可能性がある。因みに、屋外暴露換算で19年に相当する中性化深さ15mmを境界として、前後の履歴から中性化速度係数を求めると、15mm以降、係数は3.8倍に増えるが、全劣化促進期間を俯瞰すると、前中性化がない事例に漸近したに過ぎない。従って、本研究では、前中性化の有無に依らず、仕上材が中性化した後、下地の躯体コンクリートが打放しコンクリートと同じ速度で中性化するルールを本体系に与えるものとする。図中に併記した前中性化時の簡易モデルによる履歴に関して言及すれば、製品を限定せず、最大値も任意に定める本解析方針に照らすと、問題は履歴の概形であるが、本法は前中性化時の履歴を概ね再現している。

本試算は、コンクリートから粗骨材を抜いたモルタルに関するものであって、市販の仕上げモルタルには、CO<sub>2</sub>や水分の透過率に影響する混和材、嵩増し材、ポリマーが種々の単位量で含まれるため<sup>5-19)</sup>、各材の混和効果を個別に議論するのは困難である。しかし、基本的に、混和材、嵩増し材は中性化深さの絶対値に作用するが、履歴はプレーンに相似するため、形式論的な本解析では差異が顕在化しない。また、アルカリによる経年劣化が想定されるポリマーについても、安らによれば影響はない<sup>5-20)</sup>。総じて、仕上げモルタルの中性化速度を形式論的に定めることで、履歴を設定できるものとする。

#### (4)その他の体系

次に、劣化機構に関する第三の体系として挙げた仕上材の剥離・剥落に起因する体系に言及するが、同体系には全ての仕上材が含まれる。この際、高分子系仕上塗材の剥離・剥落は、下地コンクリートの表面の状態や、仕上材の材料、施工及び環境条件に依存する点が大きく、タイルについても、水や温度に起因するディファレンシャルムーブメントの議論があるが、破壊モードでさえ引張・せん断の各論<sup>5-21)</sup> <sup>5-22)</sup>が残る上、剥離の起点となる端部と同程度の特異性をもつ施工欠陥のモデル化は、確率論に依存せざるを得ない。そこで、形式論的な解析であることを前提に、建築・設備維持保全推進協会のデータベース<sup>5-23)</sup>における内外装の破損数量を参考に、浮きの確率を10%以下から乱数で定めるものとする。

なお、劣化体系が同じ場合も塗膜系とタイル系仕上材は修繕方法が異なるため、劣化・修繕プロセスに関し、個別のモデル化を要する。まず、塗膜については、製品を特定しない仮定に照らすと、修繕後の履歴は第一の体系と同じで問題を認めないが、修繕までの状態の記述は一考を要する。現象としては、浮きによる塗膜の膜厚の減少と、水分の集中による物質透過性の低下を生じるので、コンクリートの劣化の観点では、促進、抑制の双方向に作用する。本研究では、作用を限定することによる定性的評価の誤りを回避するため、当該期間の劣化は一般部と同じものと仮定する。

次に、タイルについては、アンカーピンニングの上、樹脂注入するのが一般である。本研究では仕上げモルタルの劣化は馬場式に準じているので、浮きを生じる段階では、仕上材の両面から中性化し、樹脂注入後は外側から中性化し、仕上材の中性化後、コンクリートの中性化が始まるものと仮定する。

最後に、劣化機構に関する第四の体系として挙げた検討不要な対象は、劣化が顕著に遅い保護防水、デッキスラブのデッキとの接触面、仕上材がない打放し、RC造以外の部材である乾式の外装材等とする。

### 5.3.2 修繕を伴う躯体の劣化

#### (1)躯体の劣化の検討方針

鉄筋の腐食を少なくとも部材単位で評価する上で、腐食に関し特殊環境に置かれる、壁部材の乾燥収縮ひび割れと床部材の曲げひび割れ、即ち先行ひび割れ近傍の鉄筋の扱いを、明確にする必要がある。

当該ひび割れ近傍の鉄筋の腐食は、CO<sub>2</sub>の拡散性状や水分の滞留状況等に関する実験的研究が継続されているが、ひび割れからの距離と腐食速度の相関を定量する段階にはなく、一般部より腐食が促進される事実を確認するのみである<sup>5-9)</sup> <sup>5-24)</sup>。そこで、本項では、鉄筋とコンクリートの付着が損なわれる範囲を仮定し、付着消失領域の形状や外的要因の侵入過程によらず、当該範囲が一樣に腐食する前提で、一般部と異なる腐食機構を呈するひび割れ近傍の鉄筋の劣化過程をモデル化する。

#### (2)壁の乾燥収縮ひび割れ部分の劣化

##### a)乾燥収縮ひび割れの検討方針

まず、壁の乾燥収縮ひび割れを観察のレベルに基づいて分類すると、アセトンの噴霧によって初めて視認可能な研究レベルで扱うひび割れ、肉眼で確認できるが、建築物調査では一般に無視するへアクラック、同調査の集計対象となるひび割れに分類できる。相当数がひび割れ本数の増加や温度変化に伴うひび割れ幅の変化に起因して、その分類を変えるのに対し、従来の実験的研究は一般的なひび割れに限定した検討を行ってきたため、基本的には理論研究とのかい離がある。

例えば、筆者は、1 スパンの実大 RC 造壁を構築し、ひび割れ本数の予めの設定が不要な、下記する半無限体付着解析によって、乾燥収縮ひび割れが発生した後のコンクリートと鉄筋のすべり挙動をモデル化し、シェル要素を用いた有限要素法によって、歪みの分布を解析し、歪みの連続性が絶たれる点をひび割れと見なすルールのもと、ひび割れ本数を解析している<sup>5-25)</sup>。

$$\text{弾性域：} P_{sx} = \frac{1}{1+n\phi} \left[ \frac{-kE_s A_s}{e^{k \cdot l} \cdot e^{-k \cdot l_y} - e^{-k \cdot l} \cdot e^{k \cdot l_y}} \{ (\Delta S \cdot e^{-k \cdot l_y} - S_y \cdot e^{-k \cdot l}) \cdot e^{k \cdot x} + (\Delta S \cdot e^{k \cdot l_y} - S_y \cdot e^{k \cdot l}) \cdot e^{-k \cdot x} \} - E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon_{sh} \right] \quad (5-3)$$

$$S_x = \frac{\Delta S \cdot e^{-k \cdot l_y} - S_y \cdot e^{-k \cdot l}}{e^{k \cdot l} \cdot e^{-k \cdot l_y} - e^{-k \cdot l} \cdot e^{k \cdot l_y}} e^{k \cdot x} + \frac{-\Delta S \cdot e^{k \cdot l_y} + S_y \cdot e^{k \cdot l}}{e^{k \cdot l} \cdot e^{-k \cdot l_y} - e^{-k \cdot l} \cdot e^{k \cdot l_y}} e^{-k \cdot x} \quad (5-4)$$

$$\text{塑性域：} P_{sx} = -\phi \cdot \tau_y \cdot x \quad (5-5)$$

$$S_x = \frac{1}{2} \gamma \cdot x^2 - \varepsilon_{sh} \cdot x + S_y + \varepsilon_{sh} \cdot l_y - \frac{1}{2} \gamma \cdot l_y^2 \quad (5-6)$$

$$S_y = \frac{\Delta S \cdot (e^{-k \cdot l_y} \cdot e^{k \cdot l} + e^{k \cdot l_y} \cdot e^{-k \cdot l})}{2} \quad (5-7)$$

$$\sigma = \sigma_{cr} \cdot \{ -\lambda \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cr}) \} \quad (5-8)$$

$$n = \frac{E_s \cdot (1 + \phi)}{E_c} \quad (5-9)$$

$$k = \sqrt{\frac{1+n\phi}{E_s A_s} \phi \cdot \alpha} \quad (5-10)$$

$$\gamma = \frac{1+n\phi}{E_s A_s} \phi \cdot \tau_y \quad (5-11)$$

ここで、 $l$ ：限界すべり到達点、 $l_y$ ：弾塑性域の境界位置、 $P_{sx}$ ：位置 $x$ における鉄筋の引張応力度、 $x$ ：自由端からの距離、 $p$ ：鉄筋比、 $\phi$ ：クリープ係数、 $E_c$ ：コンクリートの静弾性係数、 $E_s$ ：鉄筋の静弾性係数、 $A_s$ ：鉄筋の断面積、 $\Delta S$ ：限界すべり、 $S_x$ ：位置 $x$ における平面位置からの鉄筋の相対変位、 $S_y$ ：位置 $l_y$ における平面位置からの鉄筋の相対変位、 $\varepsilon_{sh}$ ：コンクリートの乾燥収縮歪み、 $\phi$ ：鉄筋の周長、 $\alpha$ ：付着剛性、 $\tau_y$ ：塑性域の付着応力度、 $\sigma$ ：コンクリートの引張応力度、 $\varepsilon$ ：コンクリートの引張歪み、 $\varepsilon_{cr}$ ：ひび割れ発生時のコンクリートの引張歪み、 $\lambda$ ：定数

実験結果と解析結果を Fig.5-7 に示すが、修繕費用と関連付ける意図で、実測した長さの総計を高さで除した本数とは整合しなかったものの、目視でひび割れの連続性が認められる範囲を1本のひび割れと見なすと、ほぼ合致する解が得られた。因みに、実測はへアクラックも含む幅0.05~0.15mmのひび割れを集計しているが、実験式である比較用の修正 Base & Murray 法<sup>5-26)</sup>の結果と合致した。

標本数が少なく、推定の範囲であるが、ひび割れという劣化現象の重要度に鑑み、境界領域に対する物理科学的根拠の議論を高次の課題として避け、人間の視認性に基づいて、実験・調査と定式化を先行させた結果、感性的には高い精度でひび割れの分布を予測できる実用段階まで到達したが、理論研究だけでは、超長期に式を展開できない、物理化学的にガラパゴス化した状況にある可能性がある。

従って、本研究では、乾燥収縮ひび割れの算定方法に関して、新しいモデルの構築やひび割れ幅の議論は避け、汎用される解析手法に準じて、ひび割れ本数のみを求めるものとする。

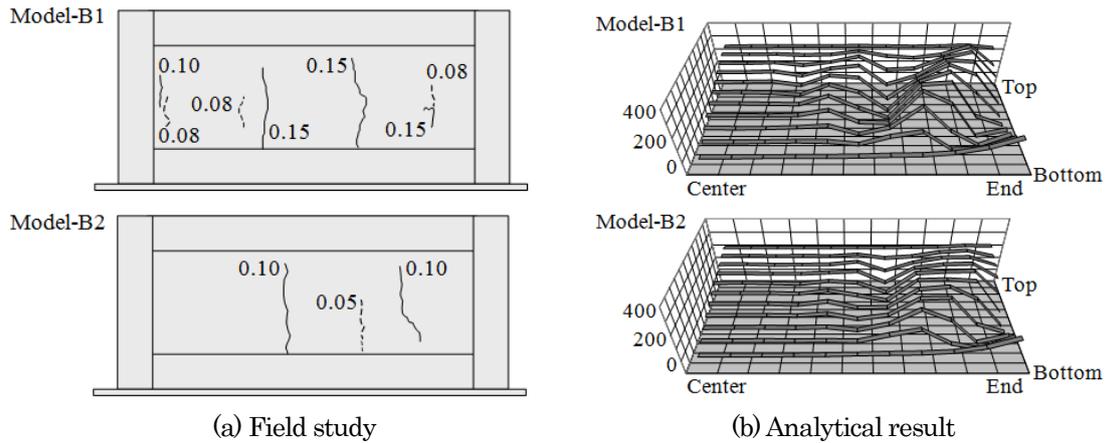


Fig.5-7 Crack distribution of concrete in mock-up walls<sup>5-25)</sup>

### b) 乾燥収縮ひび割れの定量

ひび割れ本数を求めるための実用式としては、上述した修正 Base & Murray 法と大野らの一連の研究<sup>5-27), 5-28), 5-29)</sup>が代表的であるが、本研究では、拘束度に関するモデルを提示していることを根拠に後者を採用する。具体的には、付着解析に基づいて主要な因子の影響を近似した 5-12~20 式である。壁の配置が単純で実態と必ずしも一致しないが、RC 造建築物に不可欠なひび割れ部分を、一般部と同じ解析で扱うために不可欠なプロセスと判断する。

$$W = (0.0018 \cdot f_c + 0.048) \cdot P_t^{-1.79} \cdot K \quad (5-12)$$

$$N = K_{P_t} \cdot K_L \cdot K_{f_c} \cdot K_{sh} \cdot K_\phi \cdot K_R \cdot K_D \cdot n_0 \quad (5-13)$$

$$K_{P_t} = 4.69 \cdot P_t - 0.787 \quad (5-14)$$

$$K_L = 0.16 \cdot L + 0.027 \quad (5-15)$$

$$K_{f_c} = -0.02 \cdot f_c + 1.53 \quad (5-16)$$

$$K_{sh} = 0.003 \cdot \varepsilon_{sh} - 0.82 \quad (5-17)$$

$$K_\phi = -0.36 \cdot \phi + 1.52 \quad (5-18)$$

$$K_R = 3.62 \cdot R - 0.82 \quad (5-19)$$

$$R = 0.45 + 0.090 \cdot (n - 1) + 0.361 \cdot \ln(1/s) - 0.080 \cdot I \\ + 0.018 \cdot (l - 6) + 0.074 \cdot (3 - h) + 0.009 \cdot (15 - t) \quad (5-20)$$

ここで、 $W$  : ひび割れ幅、 $f_c$  : コンクリート強度、 $P_t$  : 鉄筋比、 $K$  : D10...1.00, D13...1.33、 $N$  : ひび割れ本数、 $n_0$  : 乾燥収縮歪み  $600 \mu$  の時のひび割れ本数、 $L$  : 壁長、 $\varepsilon_{sh}$  : コンクリートの乾燥収縮、 $\phi$  : コンクリートのクリープ係数、 $R$  : 拘束度、 $n$  : スパン数、 $s$  : 層数、 $I$  : 中央の壁からの位置、 $l$  : スパン長、 $h$  : 壁高さ、 $t$  : 壁厚さ

次に、5-16~18 式で引用する材料定数について言及すると、3 章でモデル化したコンクリート中の水の移動と関連付けて解析することは不可能ではないが、一年以上かけて、外部環境と拘束条件を変えながら建築物として一体化した上、仕上材や設備で被覆され、更に異なる環境条件で供用される躯体コンクリートを代表する物性を決定論的に特定するのは、合理的とは言えない。そこで、本研究では、他の定数同様に、一般的な範囲から代表値を選択した上、日本建築学会の小委員会の活動の一環として佐藤らが提案した乾燥収縮歪みの予測式の残差<sup>5-30)</sup>、クリープ係数の算定に要するスペシフィッククリープ歪み、弾性係数の予測値の残差<sup>5-31), 5-32)</sup>から、乱数によってひび割れ本数の変動を設定し、確率論的にひび

割れ本数を定量する。なお、乾燥収縮については、今本が例示した様に、仕上材を施したコンクリートの乾燥収縮過程が打放しと異なることは明らかであるが<sup>5-33)</sup>、本研究が超長期を対象とすることを前提に、解析開始時点で乾燥収縮ひび割れは収束しているものと仮定し、収束値のみを扱う。

その上で、ひび割れ本数の変動係数を得るため、4.4 で試算に供した W/C:0.50, 0.65 の二調査に関し、5-12～20 式に基づいて、ひび割れ本数のモンテカルロシミュレーションを行う。乱数は、乾燥収縮歪み、スペシフィッククリープ歪み、弾性係数の佐藤らの 5-21～5-30 式に示す予測式を構築した際の、実験値との残差による。同差は定数であるが、式の構成に照らすと、乾燥収縮歪みはスペシフィッククリープ歪みと正の相関、弾性係数と負の相関がある。そこで、乱数を独立して与える場合と左記の相関に基づいて共有する場合の二種類で検討を行う。この際、乾燥収縮の暴露開始材齢は 5 日、評価時材齢は 10 年、弾性係数の評価時材齢は 28 日、部材は厚さ 180mm の壁を想定し、暴露環境の相対湿度は気象庁つくば観測所の平年値を想定して 75%一定とする。

$$\varepsilon(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left\{ \frac{t - t_0}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + t - t_0} \right\}^{0.8} \quad (5-21)$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (5-22)$$

$$C(t, t'_0) = CR \cdot \log_e(t - t'_0 + 1) \quad (5-23)$$

$$CR = (6.8 \cdot W/C - 0.12 \cdot G + 17.5) \cdot (t'_0)^{-0.33} \cdot \left( 1 - \frac{h}{100} \right)^{0.36} \cdot (V/S)^{-0.43} \quad (5-24)$$

$$E_c = \frac{(1 - V_a) \cdot E_p + (1 + V_a) \cdot E_a}{(1 + V_a) \cdot E_p + (1 - V_a) \cdot E_a} \cdot E_p \quad (5-25)$$

$$E_p = k \cdot (0.036 + 0.66 \cdot C/W) \cdot \frac{t}{1+t} \quad (5-26)$$

$$k = 0.4 \cdot (W/C)^{-0.19} \cdot t^{0.08} \quad (5-27)$$

$$E_a = s/a \cdot E_s + (1 - s/a) \cdot E_g \quad (5-28)$$

$$E_s = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (5-29)$$

$$E_g = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (5-30)$$

ここで、 $t$ :材齢、 $t_0$ :乾燥開始材齢、 $\varepsilon(t, t_0)$ :乾燥開始材齢 $t_0$ 日における材齢 $t$ 日の乾燥収縮歪み、 $h$ :相対湿度、 $V/S$ :体積表面積比、 $W$ :単位水量、 $C$ :単位セメント量、 $G$ :単位粗骨材量、 $t'_0$ :載荷開始材齢、 $h$ :相対湿度、 $E_c$ :コンクリートの弾性係数、 $V_a$ :骨材容積比、 $E_p$ :セメントペーストの弾性係数、 $E_a$ :骨材の弾性係数、 $s/a$ :細骨材率、 $E_s$ :細骨材の弾性係数、 $E_g$ :粗骨材の弾性係数、 $\mu$ :骨材の吸水率

また、その他の定数については、予備的な試算によって、クリープ係数以外の要因は、個々の分布が切断分布になる場合を除いてひび割れ本数の変動係数に与える影響が小さかったことを受け、鉄筋比 0.4%、スパン長 6m、鉄筋径 D10、拘束度 0.6 とし、骨材は石灰岩碎石以外の天然骨材、セメント種類は普通ポルトランドセメントとし、吸水率は、東京大学の Database for Mechanical Properties of Concrete<sup>5-34)</sup>における類似の調査に基づき、粗骨材は 0.67%、細骨材は 1.82%とする。得られた結果を、Fig.5-8 に示す。

同図において、三変数の乱数を個別に設定する場合、切断正規分布となり、平均 1.5 本に対し、最大本数が 8 本近く、参考値として正規分布を仮定した際の変動係数は約 75%に達する。一方、分散の指向性に配慮した上で、乱数を共有した場合、ワイブル分布で平均本数 1 本、最大本数 1.5 本程度、同様の参考値としての変動係数は約 50%になる。本数としては後者が現実的であるが、乾燥収縮ひび割れ本数

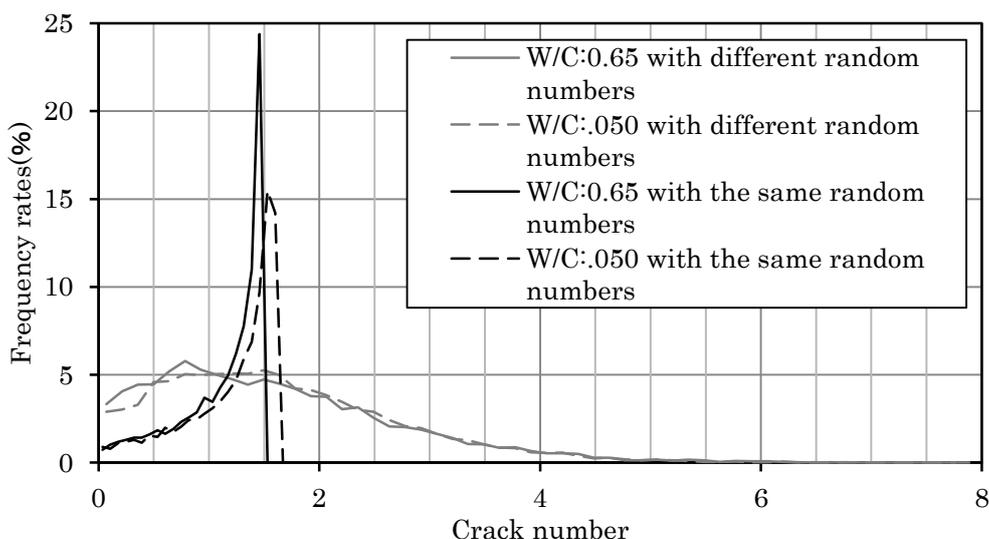


Fig.5-8 Frequency rates of crack number

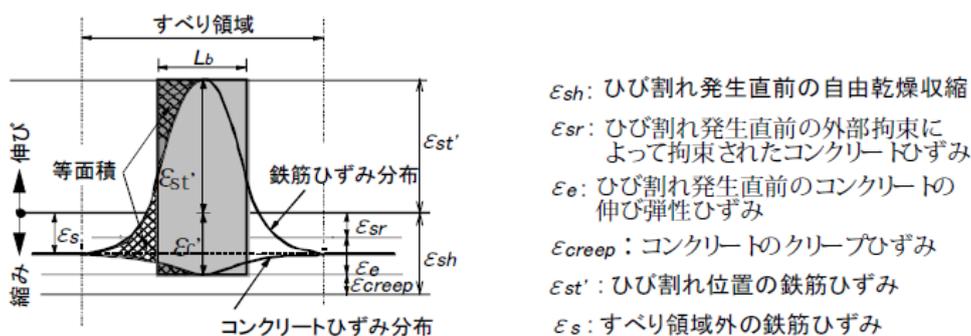


Fig.5-9 Image of the bondless zone between concrete and a reinforcement<sup>5-35)</sup>

の分布をワイブル分布に近似した研究はない。引用した式は、自己収縮を含む高強度コンクリートと、吸水率や剛性が特異な軽量コンクリートの結果を含んでおり、ある程度の外乱を含む中で変動係数が過大になっている可能性がある。ここでは、ピークの位置を信頼した上、正規分布に近い状態を想定し、変動係数を50%の半分程度として、30%と仮定し、解析に供する。

#### c) 乾燥収縮ひび割れ部分の鉄筋の腐食

次に、ひび割れ部分における鉄筋への外的要因の作用過程であるが、ひび割れの伝搬過程で幅が変わる上、ひび割れの概形や水の滞留に起因して拡散性状に差異を生じるため、精緻なモデルを構築することは困難である。ここでは、ひび割れ幅に依らず、鉄筋とコンクリートの付着が損なわれる範囲として汎用される、Fig.5-9に示す大野らの等価付着消失長さ<sup>5-35)</sup>を用い、当該部の鉄筋がひび割れ発生時点でコンクリートによる保護機能を喪失するものとして扱う。

同領域はひび割れ幅の算定のため、コンクリートと鉄筋の歪みの積分値が等しくなる位置に基づいて算出した指標であり、付着消失のフロント迄の距離ではない。但し、面外の曲げが作用しない壁において、同フロントの狭隘部に外的要因が作用する可能性は低く、性能を下限に評価する見地からは十分と考えられる。なお、大野らは等価付着消失長さを5-13式と同じ構成で、コンクリートの乾燥収縮、圧縮

強度、クリープ、鉄筋径、鉄筋応力度の補正係数を基準値である 300mm に乗じることで算出しているが、各変数はひび割れ本数の算定上、既に考慮しているため、本解析の精度と用途に照らし、重複は避けて、300mm を一様に用いる。

この上で、ひび割れ発生部の鉄筋の腐食速度が、ひび割れの概形に起因する外的要因の拡散性状の差異や水の滞留の影響を受けることは前述した通りであるが、ひび割れ上の仕上材の状態や結露の影響を勘案すると、定量は困難である。本研究では、ひび割れ発生部の性能を付着消失長さ同様に下限で評価する観点から、ひび割れとの距離等によらず、邱らが腐食ひび割れ発生からかぶりの剥落までの腐食速度に対して与えた裸鋼材の速度 0.14%/年<sup>5-36)</sup>を、ひび割れ発生直後から付着消失領域に一様に与える。但し、樹脂注入により開口が閉鎖されると、一般部と同じ速度に減速するものとする。なお、邱らは、更に他の文献を参考に、同腐食速度に変動係数 50%の対数正規分布を仮定しており、本研究でもこれに準じる。

因みに、一般部については、既往の研究が海洋環境の暴露実験を基本とする中で、唯一、室内の腐食促進環境で実験した、5-31~33 式に示す米澤らの腐食速度式<sup>5-37)</sup>によって代表値を定め、統計量はひび割れ発生部に準じる。

$$\Delta W = \alpha \cdot icor. \quad (5-31)$$

$$icor. = A \cdot S(H) \cdot K_{95} / R_{ct} \quad (5-32)$$

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad (5-33)$$

ここで、 $\Delta W$  : 質量減少速度、 $\alpha$  : 定数、 $S(H)$  : 湿度補正值、 $K_{95}$  : 湿度 95% の K 値、 $R_{ct}$  : 分極抵抗、 $A_1$  : セメント種別の係数、 $A_2$  : 水結合材比の係数、 $A_3$  : 塩化物量の係数、 $A_4$  : かぶり厚さの係数、

同式の変数である相対湿度については、複層の仕上材の相互作用や防水層、内部結露、空調の影響に照らすと、ひび割れ部の腐食速度にも増して定量は困難である。厳密には、部位毎に鉄筋位置のコンクリートの含水率に換算した条件設定を要するが、各変動要因がコンクリートの含水率に与える影響は増減の双方向に作用すること、本解析は群単位の検討である上、居室の位置を特定していないこと、腐食量に統計量を付与していること、既往の研究において、腐食速度の変数に相対湿度を用いたものが散見され、雰囲気相対湿度とコンクリート中の含水率の巨視的な正の相関は否定されないことから、本研究の様に、群単位で集計する上では問題を認めず、同式をそのまま用いるものとする。

なお、米澤らは 5-31~33 式に示す屋内用の式に加え、5-32 式に屋外の降水期間の影響を補正する補正係数を乗じた式も提案し、雨掛かりの暴露実験との比較から、同補正係数が 0.05~0.15 になることを示した上、雨掛かりのない環境への同式の展開を今後の課題としている。

米澤らの式は、端的には、材料、塩分、かぶり厚さによって定まる基本的な腐食速度に対し、相対湿度の影響を非線形で与えた式である。米澤自身の論文にも記載されている通り、屋外は腐食開始迄の期間が長く、室内の鉄筋と不動態の状態が違う上、4.4 で前述した様に、酸性雨の作用下で空隙率が低下すれば、外的要因の拡散も遅滞するため、室内の高湿定常環境より、室外の非定常環境の腐食速度が遅いという定性的な記述は最もらしいが、相対湿度 40, 60, 80, 95% の定常状態の四水準を、限られた繰返し数で測定している点、屋外暴露の補正係数は、他者の実験結果を自らの相対湿度 95% の結果で除して得た比率である点、表層が飽水する打放しコンクリートによる実験であり、コンクリートに到達する水が限られる仕上材のある建築物の躯体への適性は不明である点を勘案すると、従来知見と異なる評価の採用は一考を要する。そこで、本研究では、相対湿度 95% までの実験結果に基づく 5-31~33 式のみを、一般部の腐食速度として引用するものとする。

次に、腐食に起因して鉄筋に沿うひび割れが発生する腐食量の閾値に関しては、異形棒鋼とコンクリートの断面を二次元の FEM 乃至 RBSM 解析に供した上で、閾値となる腐食量を特定した研究はあるが、Fig.5-10 に示す腐食鉄筋の断面形状<sup>5-38)</sup>や鉄筋周辺のコンクリートの力学特性の寸法効果の議論はなく、乾燥収縮ひび割れの解析的研究と同様に、物理化学的にはガラパゴス化した状況にあり、実験的検討を経ずに超長期を俯瞰した議論を行うのは困難である。そこで、本研究では、日本建築学会の指針に引用されている森永の 5-34 式<sup>5-39)</sup>を引用する。

$$Q_{cr} = 0.602 \cdot (1 + 2 \cdot c/d)^{0.85} \cdot d \quad (5-34)$$

ここで、 $Q_{cr}$  : かぶりコンクリートのひび割れ発生時の鉄筋の腐食減量、 $c$  : かぶり厚さ、 $d$  : 鉄筋径

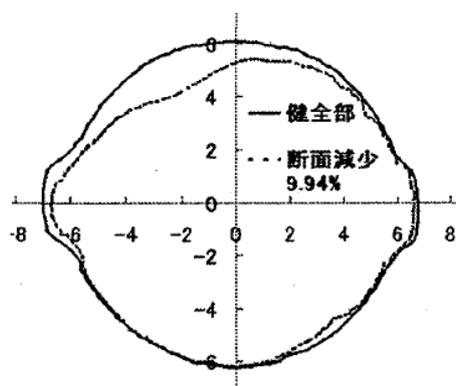


Fig.5-10 Cross section of the corroded rebar<sup>5-38)</sup>

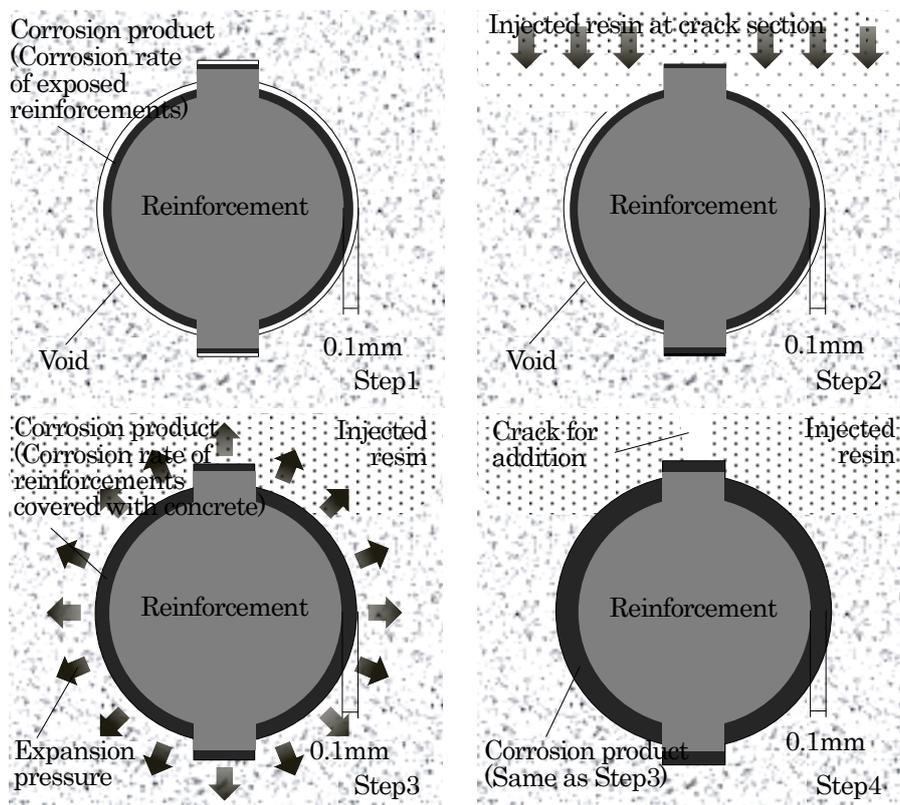
なお、ひび割れにより付着を消失した範囲は、鉄筋とコンクリートの間に隙間を生じており、例えば、後藤らは同隙間の厚さを 0.1mm としている<sup>5-40)</sup>。本研究はひび割れ幅も問わない方針のため、同厚さについても同様の思想で 0.1mm 一定とし、同隙間が腐食生成物で充填されてから、かぶりコンクリートに膨張圧が作用するものと仮定する。腐食生成物の膨張率については、高谷らが各種環境における体積膨張率を測定しており<sup>5-41)</sup>、本研究では、乾湿環境の腐食生成物として一般的なゲータイトとマグネタイトの体積膨張率の平均である 2.5 倍を引用する。

集計対象のひび割れの概念を図示すると、Fig.5-11 の通りとなる。

### (3)床の曲げひび割れ部分の劣化

次に、床の曲げひび割れであるが、小梁を計画しなければ、日本建築学会の関連規準<sup>5-42)</sup>に準ずる限り、基本的に付着消失長さより密な間隔で、引張領域にひび割れが発生するのに対し、一般に、積載荷重は人間の生活様式に依存し、また、小梁の配置も設計変更が頻繁に行われる部位であるため、ともに信頼できる資料はない。一方、前述した通り、床の鉄筋に到達したひび割れに引張荷重が作用する場合、鉄筋の腐食生成物の脆弱のため、 $CO_2$ が一般部以上に侵入する<sup>5-9)</sup>。

そこで、性能を下限評価する見地から、小梁をモデル化せず、床一枚の上下面の引張領域の面積を同一として、引張領域を一律に特定し、ひび割れ幅については壁同様に問わず、引張領域全面の鉄筋周辺に、気密性を損なう程度の剥離が生じるものとする。腐食プロセスを壁と整合させると、引張領域の鉄筋は供用開始時点から裸鋼材の速度で腐食し、樹脂注入によって開口が閉鎖されると米澤の腐食速度に転じて腐食し、鉄筋周辺の空隙の充填と膨張圧の発生を経て、鉄筋に沿う新たなひび割れの発生に至る



Step1: Reinforcements around cracks corrode at the corrosion rate of exposed reinforcements in voids ( $t:0.1\text{mm}$ ) proceeded from the crack formation.  
 Step2: Resin is injected into crack sections and surfaces of cracks are closed.  
 Step3: Voids are filled with corrosion products at the corrosion rate of reinforcements covered with concrete by Yonezawa's method<sup>5-37)</sup> and expansion pressure occurs.  
 Step4: Expansion pressure of corrosion products formulates new cracks along reinforcements by Morinaga's method<sup>5-39)</sup>.

Fig.5-11 Corrosion process of reinforcements around cracks

ことになる。

#### (4) 躯体の劣化の評価指標

上記の仮定は、解析開始から数十年間の従来の維持保全限界が問われる期間の鉄筋周囲のコンクリートの中性化確率の議論を埋没させる。そこで、コンクリートの中性化確率はひび割れの影響を無視して表層からの進展のみを扱い、コンクリート表層のひび割れ発生量は、一般部については腐食によって鉄筋に沿うひび割れが生じた範囲の鉄筋の表面積、先行ひび割れ発生部は当該部に樹脂が注入され、腐食生成物の膨張圧が作用して生じる鉄筋に沿うひび割れ部分の鉄筋の表面積の割合を集計対象とする。後者については、修繕工程以降に限定するため、正確な定義とは異なるが、一般部と加算することで、広義の加速期到達率と言える。

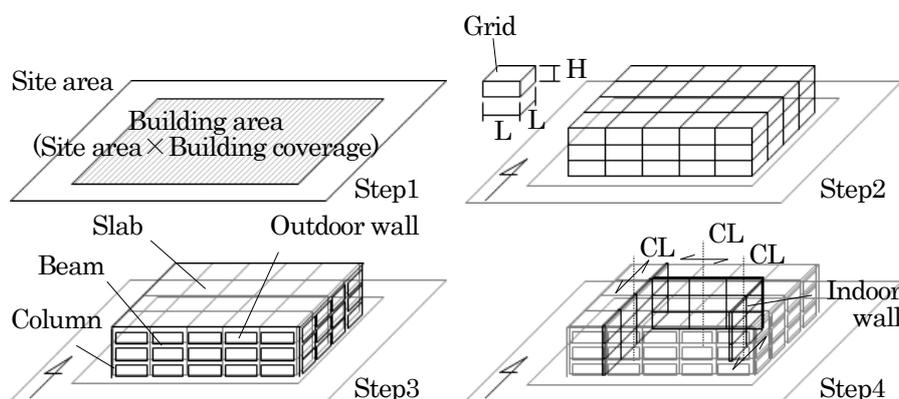
### 5.4 RC 造建築物の基本計画

#### 5.4.1 空間構成の設定

前節までに、材料の経年劣化モデルを部材単位に展開したが、本研究の目的を達成するためには、本

来、建築主や設計者の主観に多分に依存する建築物の空間構成を、何らかの方法で具体化する必要がある。空間を特定するために最低限必要な土地利用計画の研究を2章で前述したが、同章で提案したモデルは志向の推移に関するもので、空間構成まで扱うものではない。

本文では、建築物群として必要な空間構成に関する情報が柱梁壁床の数量であり、群単位で累計する際に個々の建築物の造形、凹凸の意味が無くなる点に着目し、敷地面積と建蔽率、容積率の統計量に基づき、超長期に亘ってプランが変わらない仮想建築物群を作成する。但し、複数の区分所有者の居住を前提とする共同住宅は、局所的かつ無秩序な修繕過程を経る可能性が高いため、非住宅系の建築物群のみを対象とする。建築物群のモデルを機械的に構築するためのフローを、Fig.5-12に示す。



Step1: A building area is selected by a site area and a building coverage based on the statistics randomly.

Step2: A floor area rate is selected randomly by the statistics and a rate of span number in an east-west direction to span number in a south-north direction is selected randomly by a scenario. Grids with a constant height and a constant length are located in order to satisfy the floor area and unify shapes of all layers.

Step3: Columns, beams and slabs are located on all grids and outdoor walls are located on circumferences.

Step4: A rate of number of indoor walls to number of outdoor walls and a rate of number of indoor walls in an east-west direction to number of indoor walls in a south-north direction are selected randomly by a scenario. Indoor walls are located from the center parts to the outer parts in order to calculate crack number of concrete proceeded from drying shrinkage by In's method. Locations of indoor walls irrelevant to restriction on their drying shrinkage of concrete do not matter. If number of consecutive indoor walls agrees with the number of spans, the residual indoor walls are located to the different span.

Fig.5-12 Selecting method of spatial structures

具体的に Step1 では、建築物の建蔽率を 80%一定<sup>5-43)</sup>、敷地面積を大場らの調査における業務施設の平均敷地面積<sup>5-44)</sup>に準拠して算出した対数正規分布が維持されるものとして乱数で得て、建築面積を求める。次に、Step2 では、容積率を宗方らの調査における商業系地域の正規分布<sup>5-43)</sup>から乱数で得て、全フロアの平面計画を同じ方形とし、建築物群で統一したスパン長と階高からなるグリッドを配置する。これは、内外装の仕様や居室の用途の不確実性に照らすと副次的であること、日影対策のセットバックや意匠性を意図した斜柱は、Spatial な検討を伴わない場合、集計上具体化しないこと、シャフトに限らず、ショッピングモールの通路等、チムニー効果が作用する上、半外部的な環境に該当する場合もある吹き抜けは、該当範囲や該当建築物が限定され、群単位の検討では表面化しないことを勘案した結果である。

平面のアスペクト比は協議事項と考えられるが、現実的な範囲として仮に 1~3 を乱数で与え、フロア

内は、居室と廊下等を区別しない。なお、法規制の影響は、乱数で与える上記の統計量に含まれるものと見做し、特別な調整は行わない。Step3では、柱、梁、床を、グリッドの交点を結ぶ様に漏れなく配置する。この際、部材が交差する角度は直角に限定する。また、外壁は、建築物の外周に全て配置する。Step4では、条件設定の簡単のため、外壁と内壁の数量の比、二方向の内壁数の比を乱数で得て、全グリッドに納まる範囲で内壁数を定める。配置は、尹らの解析の仮定<sup>529</sup>を用いるため、壁の乾燥収縮を拘束する方向に関し、中央から外端に向け連続させ、スパン数の上限に達すると、別のスパンに配置する。また、コンストラクションジョイントの設置が推奨される60m程度に渡り地上壁が連続する可能性は低いいため、10スパンを上限として別途設ける。この際、乾燥収縮ひび割れ本数の算定上、同スパン数を境に両構造は独立するものと仮定する。

集計にあたっては、簡単を期して、外周の角柱は室外二面、その他の外周の柱梁は室内外各一面、内部の柱梁は室内二面、壁は室内外、床は上下の各二面を評価し、一部材の評価面積は、階高とスパン長の全長を有効とし、部材交差部の集計上の重複は許容する。

各部材の出隅は鉄筋形状と養生環境、仕上げの納まりが一般部と異なる上、締固め不足によるジャンカ、直交する型枠の隙間からのノロ漏れや脱型後の接触に起因する欠けに対する左官補修が発生しやすい特殊部位であるが、面単位で評価しない部位があることも勘案し、気泡、コールドジョイント又は砂縞等の施工欠陥と同様と位置付け、集計の対象外とする。

また、開口部分は、一般にサッシュを設け、取合いにモルタルを充填するため、劣化の進行方向としては一般部と同様と考えてよく、評価対象の壁面積の割付において、考慮されているものとする。この際、開口補強筋や開口際の目地等も、同様に対象外とする。

建築部材のテクスチャは、外的要因との接触面積という観点で時に議論されるが、建築物のボリュームの影響に照らすと埋没することがある。また、超高層建築物ですら、山頂から建築物群単位で一望すれば、オルゴールのシリンダー上のピンに等しい。議論する技術的階層の整理と必要条件の網羅が前提であるが、群単位の巨視的な検討は、局所的な検討における重要課題の多くを副次的課題に転換し、従来実現できなかった劣化指標を定量出来る貴重なプロセスであり、肯定ありきで解説を進めることを改めて注記する。

## 5.4.2 躯体・仕上材・修繕の仕様の設定

### (1)仕様設定の検討方針

建築物の構成要素のモデル化の対象は、前節迄に修繕後の挙動をモデル化した躯体・仕上材及びそれぞれに付随する修繕の仕様に限られる。本研究の直接的な用途は、法律、条令や学協会の基規準、複数の不動産を所有する企業・団体の設備の運用方針等の群単位の俯瞰的な指針の策定になるため、個々の選択肢は、一建物所有者の志向に依存せず、今後の技術市場を俯瞰した上での一般的な構成であればよい。ここでは、修繕が躯体と仕上材の劣化にとってアッセンブルな技術的要因であることを前提として、躯体の仕様のフォーサイトを通して、躯体、仕上材及び修繕の各仕様をメニュー化する。

### (2)躯体の仕様

そこで、まず躯体に関し、フォーサイトの意味を確認するために、30年前に樫野が公表した未来世紀コンクリートのメニュー<sup>545</sup>を確認すると、コンセプト材料として多様な製品形態が提案されているが、コンクリート自体の性能に関し、実現していない技術は透光性コンクリートだけで、その他についても

30年前の技術で物理化学的には十分実現可能な技術に終始する。また、透光性コンクリートは、外装の開口率の調整やガラス製のパーティション、鉄骨造による大空間化で対応できるため、そもそもコンクリートで実現する必要はないとの見方もある。基本的に耐震性、耐火性、耐久性と経済性を根拠に採用するRC造の仕様の変化の原動力は社会的ニーズであって、技術革新の可能性ではないことを象徴している。

その上で、国内技術のフォーサイトで多用される媒体を参照すると、例えば、経済産業省の技術戦略マップ<sup>5-46)</sup>は2010年以來更新されていないが、同マップに登場するコンクリート技術は、高強度コンクリート、高靱性コンクリート、緑化コンクリート、再生骨材等、実用化後、汎用を待つ特殊コンクリートに限定されており、科学技術・学術政策研究所の分野別科学技術予測<sup>5-47)</sup>においても、コンクリート関連では超高層RC造建築物の解体や居ながら又は過酷環境の補修技術に関する記述に留まり、材料開発のニーズは記載されていない。全ての特殊コンクリートに共通して、建設業が成長段階から成熟段階に入り、開発済みの技術の関係レントの維持が業界の命題になったことと、コンクリート技術に、建築物の付加価値の付与ではなく、入札時の差別化を期待する場合、より細分類である混和剤等の要素技術の開発で対応できることが、主要因と考えられる。また、再生骨材については、人口と不動産ストック及び解体量の不均衡の拡大による、再生骨材を含む解体・補修技術の位置づけの変化が、今後、社会的にインパクトをもつ可能性があること等を反映したものと考えられる。

各技術は、参照した媒体の用途に則し、短期から中期を想定して選択されており、本研究で対象とする超長期に全てが適合するわけではない。超長期に関しては、予期しない状態の出現は不可避であり、選択肢を網羅することは基本的に不可能である。しかし、本研究では、現在汎用されている技術は過去の技術を排除して存在するものではなく、震災や社会構造の変化に伴う市場の要望に対し、過去の技術の一部を補正して対応した、謂わば、過去の技術を積重ねた際の重心がずれた状態であるとの見地に基づいて、モデルを構築する。群単位で俯瞰すると、平均等の統計量に限定した考察に関し、現在の枠組みを大きく外れる可能性は低い。当然、群単位の傾向を変える程インパクトのあるイベントが発生する場合は別であるが、該当するイベントは、ある程度限定されるため、シナリオプランニングにおける合意事項の範疇であるものとする。

その上で要素技術に議論を移すと、まず、静脈物流のキーであるセメントについては、今後も多くの副産物を混和した新製品が誕生する可能性があるが、国内の建設市場が縮小する中で、メーカーの事業統合がない限り、原材料が豊富なバージン材のシェアを更に減らす可能性は低い。また、目下の環境負荷低減のための取引先との絶縁は非現実的であり、豊富な資源のあるバージン材のメーカーは、パイプロダクト、消費エネルギーその他環境負荷を削減できる革新的な生産プロセスの実現に努めるべきである。従って、セメントについては、基本的に国内では現在の仕様の大勢が継続して利用され、仮に変化が見られる際も、ビーライト量の調整等の生産過程の環境負荷低減に寄与する仕様変更に留まるものとする。この場合、セメントの鉱物組成は、3章の解析で再現可能であるため、シナリオによって検討する内容と考える。次に、再生骨材については、現時点で捨コン等に用途が限定されていることから、直近に迫る国内の解体のピーク以降に、普及するシナリオを与える場合に、検討を要する範疇である。現時点で、再生骨材を用いる場合の劣化機構をモデル化していないが、本研究の範囲では同シナリオを検討せず、当該モデルは今後の課題とする。

一方、鉄筋に関しては、RC構造自体が洗練されており、上述したフォーサイトの媒体<sup>5-46)</sup>、<sup>5-47)</sup>においても、新材料の予想はされていない。最大の動向として、日本鉄鋼連盟のCOURSE50プロジェクトが

Table5-3 Specifications for structures<sup>5-8), 5-42), 5-49), 5-50), 5-51), 5-52), 5-53)</sup>

Classification	Application site	Item	Alternatives
Member size (Assuming medium /small scale offices)	Columns	Width	600~700mm (50mm intervals)
	Beams	Height	600~750mm (50mm intervals)
	Walls	Thickness	180mm
	Slabs	Thickness	200mm
Material	Concrete	Compressive strength	18~30N/mm <sup>2</sup> (3N/mm <sup>2</sup> intervals)
Structure (Without reinforcements for cracks or setups, cross ties, joints, bonds)	Columns	Diameter of longitudinal bar	D22, D25
		Beams	Diameter of hoop or transverse bar
	Cover depth(Indoor) <sup>†1</sup>		40~60mm (10mm intervals)
	Cover depth(Outdoor) <sup>†1</sup>		40~70mm (10mm intervals)
	Walls	Bar diameter	D10, D13
		Slabs	Steel ratio of wall
	Cover depth(Indoor) <sup>†1</sup>		30~50mm (10mm intervals)
	Cover depth(Outdoor) <sup>†1</sup>		30~60mm (10mm intervals)
	Crack-inducing joints of walls <sup>†2</sup>		Number (Durability-oriented. The steel ratio is under 0.75%.)
		Number (Not durability- oriented. The steel ratio is under 0.75%.)	2/Span
Number (The steel ratio is over 0.75%.)		0/Span	

†1 : Cover depths are regulated like that outdoor depths are larger than indoor depths and variations of cover depths are set by standard deviation 10mm.

†2 : Cracks are induced in all crack-inducing joints.

†3 : Specifications for analyses of pre-induced cracks are follows.

- a) Water cement ratio of concrete is set by relations between water cement ratio and nominal strength of ready mixed concrete in Kanto area.
- b) Unit water content, bulk volume of coarse aggregate per unit volume of concrete, solid content of coarse aggregate are set by Architectural Institute of Japan guideline about the mix proportion of concrete.
- c) Cement type is Ordinary Portland Cement only.
- d) Adoption rates of gravel and crushed stones are both 0.5.
- e) When durability-oriented building owners adopt crushed stones, crushed lime stones are used.
- f) Creep coefficient and drying shrinkage of concrete are calculated by Sato's method under condition that removal age of supports is 28days and wet cure is finished on 5days.

あるが<sup>5-48)</sup>、コークス改良とコークス製造時のパイプロである水素を活用した鉍石還元技術、スラグ顕熱利用技術と吸収液、物理吸着技術を用いた高炉ガスからのCO<sub>2</sub>分離回収技術に関するものであって、鉄筋の物性に関わる計画ではない。従って、現在の仕様が継続するものと考えられる。

総じて、超長期用の特殊な仕様の準備は優先順位が低いものと判断し、業界の基準及び実務書から現実的な範囲を選択肢として任意に引用し、Table5-3の躯体の仕様を定める<sup>5-8), 5-42), 5-49), 5-50), 5-51), 5-52), 5-53)</sup>。

表中の部材寸法については、RC造建築物の多様な形状に対し、モデル化の限界があるため、あくまで代表的な仕様として、低層から高層の建築物に適用する矩形の標準的な寸法を仮定した。また、コンクリートの設計基準強度についても、現時点で300N/mm<sup>2</sup>まで実用化されているが、高強度コンクリートを使用する事例は少数であるため、計画供用期間が長期に対応する耐久設計基準強度30N/mm<sup>2</sup>に基づいて<sup>5-50)</sup>、劣化の進行が早い側の同強度以下を検討対象とした。更に、ひび割れ誘発目地の設置が普及している前提で、鉄筋比の少ない場合は同目地を設けるものとし、ひび割れ制御のニーズによって、ピッチを変えた。

### (3)仕上材の仕様

次に仕上材の仕様であるが、本研究では、仕上材を劣化機構に基づいて、①仕上材自体の劣化に起因

Table5-4 Specifications for finishing materials

Classification	Initial performance	Imaged application site
Type-A Proceed from deterioration of finishing materials	Permeability rates...0.05~0.3	Multi-layer coatings and thick textured finishing materials for columns, beams and walls
Type-B Proceed from reaction between finishing materials and CO <sub>2</sub>	Permeability rates...0.1~0.3 Carbonation rates by JIS A 1153: 0~20mm/√years(intervals of 5 mm/√years) Divided by 1.6 in the outdoor only	Tile finishes bonded with mortar
Type-C Proceed from de-bondings of finishing materials	Permeability rates...0.6~0.9 Carbonation rates by JIS A 1153: 0~20mm/√years(intervals of 5 mm/√years) Divided by 1.6 in the outdoor only	Cementitious finishes
Type-D No relation with time dependency	De-bonding area rates...0~0.1(0.01 intervals)	All finishing materials
	Permeability rates...0 or 1	Waterproof protections, exposed concrete finishes, curtain walls, sidings and deck slabs, etc.

する体系、②仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因する体系、③仕上材の剥離・剥落に起因する体系、④検討不要の全四体系に分類し、塗装、タイル及び乾式外装のシェア、修繕の要否を判断する閾値や修繕後の劣化プロセスの影響を、群単位で集計できるモデルを構築している。将来、例えば、現在と異なる塗装や張付けモルタルを採用した場合も、修繕の意思決定に比べれば副次的であり、群に与える影響は十分小さいと考えられる。本節では、前節に加えて、新たにバージン材の劣化過程の解析に必要な定数を設定したので、一覧をTable5-4に示した上、以下に解説する。

第一の体系となる高分子系仕上材については、日本建築仕上材工業会の統計<sup>5-54)</sup>において、2000年以降にシェアが全体の1割を超えた薄塗材E、複層塗材E、防水形外装薄塗材E単層弾性、防水形複層塗材Eの4種の中性化率が、建築業協会の資料によると順に1.02, 0.22, 0.68, 0.40であること<sup>5-7)</sup>、建築学会式ではCO<sub>2</sub>濃度の平方根と中性化深さが比例すること<sup>5-8)</sup>を根拠に、各中性化率の二乗の最小値0.05をCO<sub>2</sub>の透過率の初期値の下限として定め、同上限については、中性化率が観測時点によって変わることも勘案して仮に0.3とし、その間から任意に同透過率を選択した。履歴に関する定数は、初期値との組合せを前提に、兼松らの実験<sup>5-10)</sup>から得たウレタン塗装の劣化過程に関する定数と、アクリルシリコン、フッ素塗装の同定数の平均を用いた。上記の設定は、現在汎用される高分子系仕上塗材の物性を参考に、供用開始から15年内の履歴に、相応の多様性を付与することを意図したものである点に留意を要する。

次に、第二の体系となる仕上げモルタルについては、CO<sub>2</sub>の透過率と中性化速度を設定した。因みに、透過率は、接着モルタル等のセメント系材料の中性化が完了した後の下地コンクリートへのCO<sub>2</sub>の到達率に相当する。河野らによると、タイルの目地部分の中性化率は0.316<sup>5-55)</sup>で、建築業協会によると、セメント系の下地調整材の中性化率は最大で0.87に達しており<sup>5-7)</sup>、高分子系仕上塗材同様に二乗すると、前者が0.10、後者が0.76になる。自明であるが、両値は材自体のCO<sub>2</sub>の拡散速度と反応速度の組合せで得られる任意の経年数の値であって透過率と一致せず、また、タイルについては、目地割・形状の三次元的作用を受ける。そこで、高分子系に準じ、履歴の多様性を確保することを意図して、議論の精度も勘案して、中性化の進行が遅い範囲を0.1~0.3、早い範囲を0.6~0.9と大別した上、それぞれをモルタル張りのタイル仕上げ、セメント系仕上材と仮定し、解析に供するものとした。材自体の中性化に要する期間を算定するための中性化速度係数は、井上らの補修モルタルの中性化抑制効果に関する実験結

果<sup>5-19)</sup>からモルタルの中性化速度係数を求め、参考にした。

なお、第三、第四の体系は、5.3.1で上述した通りの値である。

上記のモデルによって、十分な多様性が確保できるものと考えられるが、あくまで建築物群のモデル化の手法を例示したものであって、具体的な都市計画に用いる場合は、全ステークホルダーが合意した範囲のモデルとする必要がある。

#### (4)修繕の仕様

その上で、修繕の仕様に関する既往の研究に目を転じると、例えば、邱らは a)仕上材を更新する表面補修、b)中性化したコンクリートと鉄筋の錆を除去した上での断面修復、c)中性化したコンクリートと鉄筋の錆を除去し、鉄筋を追加した上での断面修復の三水準を設定して、100年間の維持保全計画のメタ解析に供している<sup>5-36)</sup>。同研究は補修方法の詳細を特定せず、技術の変遷を検討対象外としており、本研究もこれに準じるが、仕上材の仕様を劣化体系毎に定めたため、修繕仕様は指定した劣化体系と対を成す必要がある。

そこで、まず、仕上材自体の劣化に起因する体系である高分子系仕上塗材について言及すれば、トップコートと部分的な浮きの更新が必要である。また、仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因して劣化する体系である仕上げモルタルについては、浮きの更新又はアンカーピンニングと樹脂注入が必要であり、このうち浮きに関する体系の補修は既に上記に含まれる。また、各劣化体系で劣化が進行し、コンクリート表面に発生したひび割れ部分については、樹脂注入または鉄筋の防錆措置の上、断面修復する必要がある。更に、修繕周期の当該建築物の所有者が、修繕を必要と判断しない場合は、修繕を見送る選択肢も必要である。以上を整理すると、Table5-5のメニューが具体化する。

順に解説すると、Type-Arは高分子系仕上塗材のトップコートの更新に関するもので、前節で説明した簡易モデルの内容である。Type-Brは仕上材の種類に依らず浮いた部分を撤去、修復する修繕内容で、不具合の再発はない仮定を与えた。前述した様に、作用の限定による定性的評価の誤りを回避するため、修繕までの劣化速度は一般部と同じと仮定する。次にType-Crはモルタルの浮き部分へのアンカーピンニングと樹脂注入に関するもので、浮いた部分は外気と連続し、樹脂注入後は充填の不十分のために、一方からの中性化が継続し、鉄筋の保護機能に関わる仮定を与えた。また、Type-Drはひび割れへの樹脂注入で、同仕様も樹脂注入の不十分により劣化が継続する仮定を与えた。同仮定は、前節に記載した先行ひび割れ部分の鉄筋の腐食による新規ひび割れの必要条件である。更に、Type-Erは鉄筋の防錆措置と断面修復で、仕上材の浮き同様に完全に不具合が是正される仮定である。最後に、Type-Frは修繕見送りである。Type-Cr、Drに仮定した樹脂注入の不具合については、市販の低粘度の樹脂を使用すれば発生しないが、充填範囲の管理の困難のため、中粘度の樹脂を多用することは周知であり、本研究においても同手法に準じた。

#### (5)その他の選択肢

なお、未来を俯瞰すると、修繕過程における仕上材の仕様の変更の他、増改築、減築やコンバージョン、要求性能の引き上げに伴う鉄骨乃至FRPによる補強の検討も想定される。但し、増改築は本研究の手法で処理でき、減築やコンバージョンが建築物群の特性を変える程の大多数で行われる可能性は低く、鉄骨又はFRPによる補強も最小限の面積に留められることに照らすと、本研究の範囲では、特に個別にモデル化する必要はない。また、仕上材の仕様の変更は本研究の大前提であり、体系的に扱うものとし

Table5-5 Specifications for maintenace

	Classification	Treatment for deterioration analysis
Type-A <sub>r</sub>	Recoating of top coatings proceeded from fine views	Carbonation is interrupted for 5~15years and progresses closer to a hysteresis of carbonation with no repair for 50years.
Type-B <sub>r</sub>	Partial repair of under coatings proceeded from de-bondings	Ditto <sup>†1</sup> . But it is selected only once.
Type-C <sub>r</sub>	Anchor pinning and resin injection to cementitious finishes proceeded from de-bondings	Before injections, carbonation of de-bonded cementitious finishes progresses from both sides of members. After injections, carbonation of concrete is interrupted and carbonation of finishing materials progresses from the outer side only. When cementitious finishes are carbonated, carbonation of concrete is started <sup>†2</sup> . It is selected only once.
Type-D <sub>r</sub>	Resin injection for cracks	When resin is injected and corrosion product content reaches the limit content of corrosion, bond loss area is counted among acceleration period arrival rates <sup>†2</sup> . It is selected only once.
Type-E <sub>r</sub>	Corrosion proofing treatment for corroded reinforcements and section re- pair	Partial repaired area of deteriorated finishes is reset and concrete is replaced with repair mortar <sup>†3</sup> .
Type-F <sub>r</sub>	No repair	—

†1 : Because water content and CO<sub>2</sub> concentration of concrete under de-bonded coatings are larger than those under normal coatings together, it is difficult to assess the difference in a uniform manner. The difference between Type-A<sub>r</sub> and Type-B<sub>r</sub> is deterioration of main and under coatings proceeded from deterioration of top coatings. But the speed of their deterioration is too slow to have no effect to this analysis with several repair schemes and without specifications for products.

†2 : Failure of resin injections with middle viscosity is considered seriously.

†3 : Corrosion of reinforcements under edges of repair mortar progresses speedy, but the area is very limited and is not covered in this analysis.

たが、修繕に際し、例えば、高分子系塗材をタイルに変更する様な大規模な変更は、コンバージョンと同様の理由で、本文の範囲ではモデル化の対象外とした。

## 5.5 建物所有者の意思決定

### 5.5.1 意思決定のモデルの位置づけ

本節では、建築物群を構成する各建築物に割当てる、数世代に亘る建物所有者の意思決定のモデル化を試みる。2章では、人工社会を構成するエージェントの特性や意思決定上の相互作用を社会規模で定量出来るため、政策立案に汎用されるマルチエージェントシステムを利用し、ヒエラルキーのある複数のエージェント内の利己的行動に対するサンクション行動が、フロー志向とストック志向に二極化した群の志向を誘導し、CGMによって更新時の構造に反映されるプロセスを表現したが、前節で整理したメニューから仕様を選択するためには、より技術的な意思決定に関するモデルを補足する必要があるため、以下に解説する。

なお、本章迄に構築してきた解析は劣化過程を問うもので、棄却の意思決定まで対象としていない。棄却を扱わない場合、更新の動機を議論しないため、建設時期の概念がなく、2章で示したストック・フロー志向のモデルの有意性が低下し、結果的に、エージェント間の影響は建築物の劣化状態による次世代への一方向の作用に限定される。また、仕様選定や劣化環境・部位の不確実性を排除するために群単位の解析に拡張した経緯から、個々のエージェントの設定には独立性がなく、実像としては建築物群という単一の存在しか許容できないと言う見方もあることを注記する。

## 5.5.2 志向する性能

モデリングのコアとなるのは、新築時の躯体と仕上材の仕様選定と、その後の劣化過程における修繕の時期と仕様選定であり、エージェントに分権するとすれば、各仕様に対する志向と修繕の判断の基準である。志向については、耐久性に関わる全ての要因を抽出する必要があるので、本研究では、Table5-6に示すISO19208<sup>5-56)</sup>が例示する要求性能を精査して得た、力学的安定性、視覚、耐久性、経済性によって、エージェントの志向の状態を記述する。因みに、その他の火災安全性、使用安全性、水密・気密性、温湿度、空気の清浄性、音響、触覚、動作、衛生、専有室の適性、アクセシビリティ、持続的発展への貢献度は、物理的な供用の可否という観点では、高次な性能であると同時にアッセンブルなため、本解析上に表面化しないと考える。

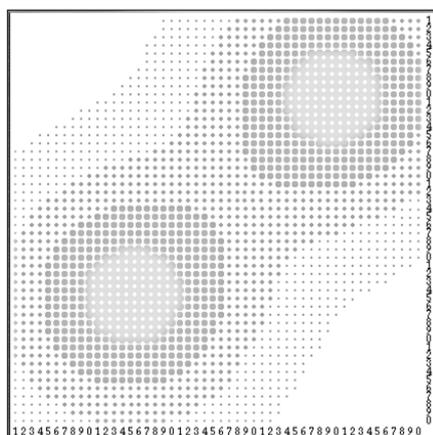
Table5-6(1) Examples of subject matter of objectives<sup>5-56)</sup>

Category	Subject matter of objectives
1 Stability	Mechanical resistance to static and dynamic actions, both individually and in combination. Resistance to impacts, intentional and unintentional abuse, accidental actions. Cyclic (fatigue) effects.
2 Fire safety	Risks of outbreak of fire and of spread of fire. Physiological effects of smoke and heat. Alarm time (detection and alarm systems). Evacuation time (escape routes). Survival time (fire compartmentation).
3 Safety in use	Safety in respect of aggressive agents (protection against explosions, burning, sharp points and edges, moving mechanisms, electrocution, radioactivity, inhalation or contact with poisonous substances, infection). Safety during movements and circulation (limitation of floor slipperiness, unobstructed passage, guard rails, etc.). Security against human or animal intrusion.
4 Tightness	Water tightness (rain, ground water, drinking water, waste water, etc.). Air and gas tightness. Snow and dust tightness.
5 Hygrothermal	Control of air temperature, thermal radiation, air velocity and relative humidity (limitation of variation in time and in space, response of controls). Control of condensation.
6 Air purity	Ventilation. Control of odours.
7 Acoustical	Control of external and internal noise (continuous and intermittent). Intelligibility of sound. Reverberation time.
8 Visual	Natural and artificial lighting (required illuminance, freedom from glare, luminance contrast and stability). Sunlight (insolation). Possibility of darkness. Aspect of spaces and surfaces (colour, texture, regularity, flatness, verticality, horizontality, perpendicularity, etc.). Visual contact, internally and with the external world (links and barriers for privacy, freedom from optical distortion).
9 Tactile	Surface properties, roughness, dryness, warmth, suppleness. Freedom from discharges of static electricity.

Table5-6(2) Examples of subject matter of objectives<sup>5-56)</sup>

Category	Subject matter of objectives
10 Dynamic	Limitation of whole body accelerations and vibrations (transient and continuous). Pedestrian comfort in windy areas. Ease of movement (slope of ramps, pitch of staircases). Manoeuvrability (operation of doors, windows, controls on equipment, etc.).
11 Hygiene	Facilities for human body care and cleaning. Water supply. Cleanability. Evacuation of waste water, waste materials and smoke. Limitation of emission of contaminants.
12 Suitability of spaces for specific uses	Number, size, configuration, subdivision, and interrelation of spaces. Service and equipment. Furnishability, flexibility.
13 Durability	Retention of performance over required service life subject to regular maintenance. Adaptability for changed usage.
14 Economic	Capital, running and maintenance costs. Maintainability Demolition costs.
15 Accessibility	Access for disabled persons, equity.
16 Contributions to sustainable development	Usage of resources, such as energy and water. Choice of building materials. Choice of construction methods and resources. Waste disposal. Resilience.

NOTE User requirements can be driven by societal expectations.

Fig.5-13 Spatial distribution of sugar capacities in the Sugar scrape<sup>5-57)</sup>

### 5.5.3 志向のモデル化の方法論

#### (1) Sugar scrape

エージェントに対し、ISO から抽出した四性能に対する志向を与えるに当たり、まず、複数のエージェントの記述を主とするマルチエージェントシステムの代表である Epstein の Sugar scrape<sup>5-57)</sup>を参考にすると、エージェントは、Fig.5-13 に示す様な二次元空間内で、見渡す限り遠くまで見渡し、最も砂糖の多い場所へ移動して砂糖を食べ、移動の都度、自分の代謝率に応じた砂糖を燃焼させ、全ての砂糖

が燃え尽きると死ぬという、時間軸を持つ抽象的な基本ルールを与えられる。その上で、観察したい社会構造をボトムアップ的に考察するために、交配と視力・代謝率の選択、文化属性と局所伝搬、異文化間の戦争を再現するルール、その他の食料と砂糖を取引するルール等の一つずつ積み重ね、複雑な人工社会を再現している。

同手法を本研究に当てはめると、複数のエージェントが相互に影響を及ぼしながら、動的に仕様を選定する構図は参考になるが、本研究との最大の差異として、**Sugar scrape** は、生物の生存の根本となる特性を扱うため、万人に動機があり、与えたモデルが再現される可能性が高いのに対し、本研究は、建築主が、建築に関する一般的な選択肢に対する志向によって、最低限確保されるべき安全・安心を実現する方法に関する意思表示を求められるので、各仕様に対する行動のトリガーにも個人差があり、モデルの再現性が判断できないことは無視できない。

## (2)QOL

そこで、エージェントによる建築空間に対する評価を定量した研究を俯瞰すると、例えば、森田らが、名古屋市中区錦二丁目地区を例に、2010年から50年迄の任意のシナリオに基づく住環境の変遷に相応するQOLを、アンケートに基づいて重みづけしたTable5-7に示す空間使用性、景観調和性、自然環境性、局地環境性、防災機能性によって、定量的に予測している<sup>5-58)</sup>。

Table5-7 Assessment indices for amenity improvement opportunities<sup>5-58)</sup>

機能	評価内容	測定指標	概要及び算出方法
空間使用性	住宅のゆとり	1人あたり延べ床面積 (m <sup>2</sup> /capita)	1人あたりが専断的に占有できる面積であり、各住宅延床面積から1世帯に必要な住宅設備面積(15 m <sup>2</sup> と仮定)を減じたのち、世帯人員で除したものである。
	街路の柔軟性	ln(飲食店・商店数)	街区群内(歩いて通える範囲)に存在する飲食店数、商店数
景観調和性	街並みの連続性	景観調和性(0~1)	街区群内で最も多い建築物タイプ(形式および用途)が占める敷地面積を、街区群全体の面積で除したものである。
自然環境性	敷地内の緑	緑地占有性(0~1)	個人が管理・利用できる屋外空間の有無、一戸建ては1、共有庭の場合は0.5、敷地内に緑がない場合は0。
	屋外の開放感	オープンスペース率(0~1)	街区群におけるオープンスペース(広場、歩道、中庭など)が占める面積を、街区群内全体の面積で除したものである。
局地環境性	日あたりのよさ	平均日照時間 (h)	居住用途の建築物が日照を確保できる平均時間数。各建築物の日照時間を3Dシミュレーションにより算出。
	外の過こやすさ	8月の外気温(°C)	8月における平均最高気温、気候値メッシュ統計より算出。
防災機能性	地震時の死亡リスク	期待損失余命 (year)	地震発生による死亡確率と、それによる損失余命を乗じたもの。内閣府地震被害想定支援ツールより算出。
	延焼の危険性	隣棟間隔 (m)	隣り合う建築物間の距離。住宅地図データを用いて、GIS上で計測・集計。

※着色部は建物寿命に対する影響要素と同様の指標

対象地域が狭く、評価期間も短いため、本研究に直接用いることが出来ないが、容積率消化率、用途転換構造、日照時間、耐震性能、断熱性能、バリアフリー設計、維持管理実施率、容積率消化率、オープンスペース率、景観調和性、隣棟間隔、地区エネ技術導入、街路バリアフリー設計等の評価結果を、上述した5つの性能に集約する点は留意を要する。これは、価値観を定量するプロセスをコンジョイント分析に依存する他ないため、俯瞰的な指標への抽象化を行なった結果である。

同研究は、生存に関わる様な深刻な課題ではない場合も、意思決定の基本方針に関わるシナリオを与えた上、膨大な選択肢における意思決定の結果を、数種の体系的な指標に統合すれば、エージェントの感性を画一的に表現出来ることを示唆している。本節で構築するプロセスと逆行しているが、建築物の仕様とエージェントの感性の関係性を定量する点で、本法の技術的思想の妥当性を示していると言える。

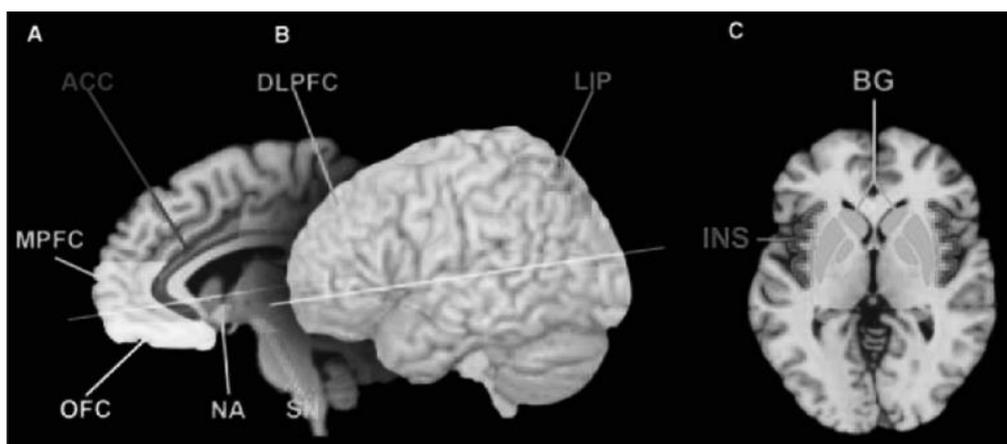
## (3)BIM

その上で、仕様の具体的な決定方法の解を、近年、汎用段階に入ったBIMに求めると、例えば、からは環境シミュレーション用の建材及び設備機器の情報データベースを統合する技術としてBIMに着目し、供用環境の規模に応じて段階的に活用可能な、データ抽出から単目的乃至多目的最適解のシミュレーション

ョン、評価の重みづけ、更には、設計者の意図とのマッチングまで一貫して行う最適設計支援システムの構築を試みている<sup>559)</sup>。同研究は、データベースの諸元と統合技術の構想に注力するもので、エージェントという観点では、一設計者の意思決定のみを想定し、環境毎のデータベースから、任意の評価基準に基づいて適応度を判定し、パレート最適解を求める解析になっている。本研究は群単位の解析であるため、個々のエージェント単位のメタ解析は計算容量的に困難であるが、適応度の判定というプロセスは重要であると考えられる。

#### (4) Prospect 理論

ここで、例えば、Sanfey は、意思決定時に活性化される脳内の位置を Fig.5-14 の通り図示した上で、意思決定の瞬間において、一つには報酬の評価、もう一つには得られた報酬に相応しい行動を選択する判断が、脳内の別系統で行われる可能性を指摘している<sup>560)</sup>。これは、Kahneman らが提唱した、人間は、当人のフレーム毎の基準となる利益との乖離を各領域の評価モデルで把握した上で意思決定を行うとする Prospect 理論<sup>561)</sup>の構図と合致している。また、刁らの適応度の判定は、このフレーミングのプロセスに相当するものと考えられる。



(A) shows the location of the anterior cingulate cortex (ACC), medial prefrontal cortex (MPFC), orbitofrontal cortex (OFC), nucleus accumbens (NA), and substantia nigra (SN).

(B) shows the location of the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and lateral intraparietal area (LIP).

(C) shows the location of the insula (INS) and basal ganglia (BG).

Fig.5-14 Map of brain areas commonly found to be activated in decision-making studies<sup>560)</sup>

当然、Prospect 理論については幾つかの背理も公表されているが、各建築物の建物所有者は、実際は有識者を含むステークホルダーと協議の上、一団体の総意として意思決定するため、事前協議の段階で殆どのアノマリーを排除し、一般論として設定したシナリオに近いフレームのもと、想定に近い決断をする可能性が高いと考えてよい。

然るに、建物所有者の意思決定を群単位で一括した経緯に照らすと、本研究で示す解法は、あらゆるアルゴリズムによる解も平均は同じとする No-Free Lunch Theory<sup>562)</sup>の範疇を出ないため、志向の推移の設定において、遺伝的アルゴリズムや免疫的アルゴリズム等の進化論的解析手法を適用することを避

け、解析のユーザーと合意したシナリオプランニングによって意思決定を記述するのが妥当と判断する。

そこで、本研究では、シナリオプランニングによって、四性能に対する志向をフレーミングした上で、所定の確率論的手法で、建設及び修繕等の意思決定時点の志向を特定し、これに適合する躯体、仕上材、修繕の仕様を割当る段階的な意思決定モデルを構築する。

#### 5.5.4 意思決定のルール

ここでは具体的なルールを示すが、区分所有者の協議の複雑を伴う住宅系建築物のシナリオプランニングは難易度が高いため、建築物を資産として客観的に扱うことが想定される非住宅系建築物に限定して、モデルを例示する。

具体的には、本研究では抽象的な概念に対する志向を扱うことに配慮し、建物所有者の志向が緩やかに反映される仕組みを準備する。即ち、

- ・ エージェントの状態を、対象性能に対する志向の有無とその意思表示の有無により四分
- ・ エージェントが、四性能に対する認識を新築時及び大規模修繕周期毎に表明（乱数で定める、志向する性能に対し、1点ずつ配点）
- ・ 意思表示の結果は、一世代内累積し、都度最高得点をもつ意思表示する志向を採用
- ・ 修繕仕様は、志向に沿わない選択肢を削除した上、乱数で設定
- ・ 修繕の可否を判断する劣化度の閾値は、志向する性能に応じて設定
- ・ エージェントの志向の群によるフレーミング効果を、各志向に対する配点の発生確率で設定

上記の仮定により、建築物群で醸成される建築物の仕様に関するトレンドに感化されつつ、修繕を重ねる過程で、各建築物の営繕の基本方針が、ハードコアの継続的なリードによって固まり、建築物の仕様と劣化状態によって、次世代に意思決定の基本条件を継承する、基本ルールが確立される。同ルールは、配点時のアルゴリズムによって、広域なシナリオが設定可能で、例えば、100年経過時に建築物群が景観財となり、耐久性志向に偏重するシナリオや、人口減少や中低度移民の受入によるスラム化により、一切の修繕が放棄される建築物の割合が増加するシナリオ等も表現できる。また、都市計画法の用途地域や地方公共団体の景観条例の影響についても、乾式の外装、化粧打放し仕上げ、仕上げモルタルを使用する仕上げの採用確率を、群のシナリオとして与えることで評価できる。

上記を整理した施設運営のフローを、Fig.5-15に示す。

なお、一般に、シナリオプランニングにおいては、フォーサイトの根拠とした過去・現在の状態量に関するデータの信頼性が問われるが、新築時の志向と仕様との関係性については、評価対象の建築物群の調査によって得られるものの、志向と修繕仕様との関係性に関する情報は、現時点で存在しない。従って、本法は、国、自治体や大量な不動産ストックをもつ企業が、本法で得られた結果を法規、条例や営繕方針の策定に供し、解析結果に則したマネジメントを実践し、現実を調整することで有意性をもつ点に留意を要する。その上で、各性能を志向する際に選択する仕様との関係性の一例をTable5-8に示す。

因みに、同フォローを効率的に行うため、一連のプロセスを予めシステム化するには、あらゆる用途で採取されている国内の環境因子やインフラのモニタリング情報を共有し、建築物に劣化の特異値が確認された際に、連動する特異値を自動的にスクリーニングし、劣化モデルを照査するディープラーニングに相当するシステムが必要になる。現時点で該当する情報は限定されるため、当面はフィールドワークが不可避であり、今後の課題である。

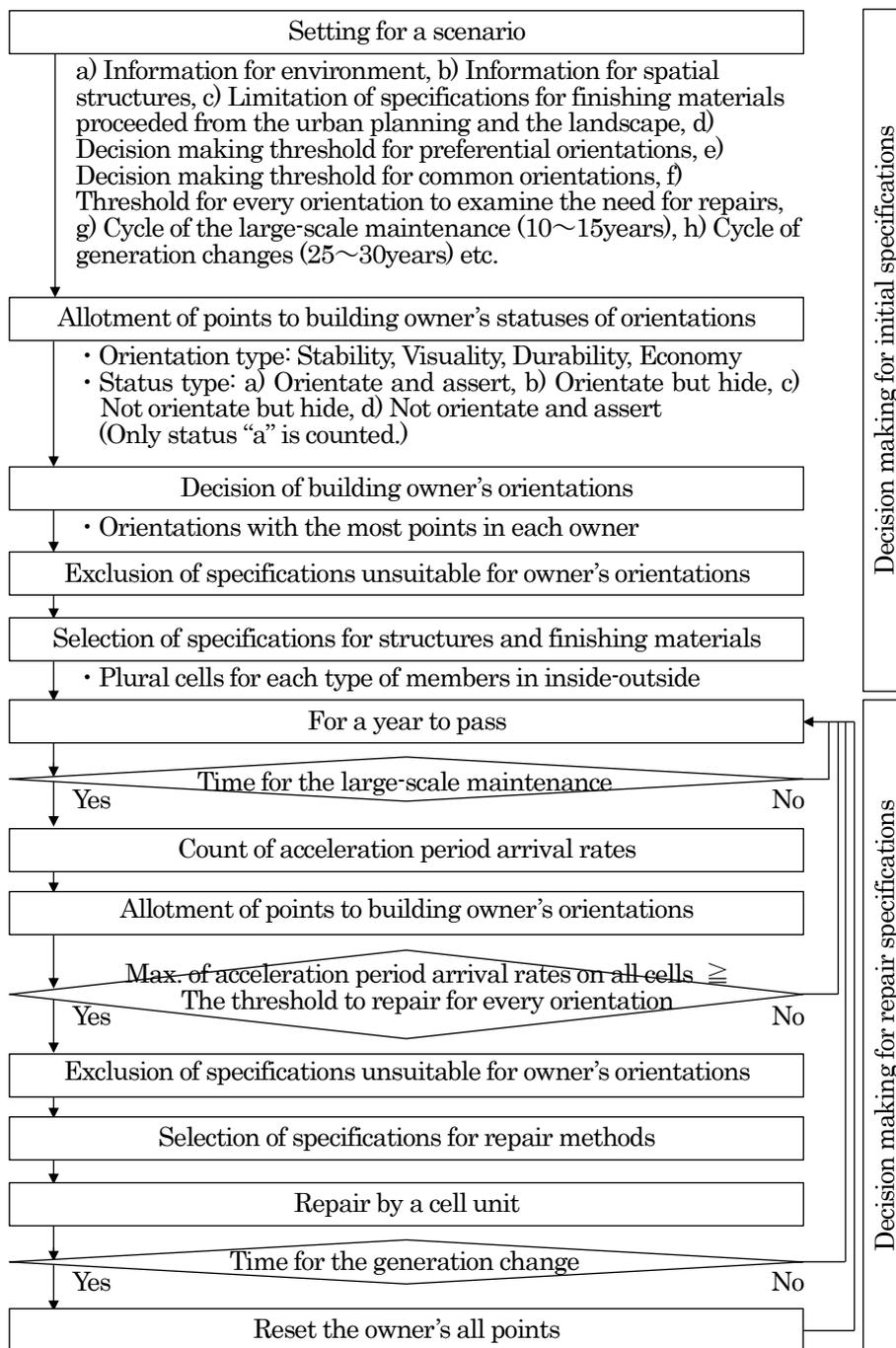


Fig.5-15 Flow of reflection methods of owner's orientations

## 5.6 鉄筋の加速期到達率の試算

### 5.6.1 建築物群のシナリオの概要

以下に、前節迄に構築した方法に拠り、志向として経済性を優先する、長期の供用を期待せず、直近の建設・修繕費用を最小限に抑制する施設運営をイメージした Case I, 志向として力学的安定性, 視覚, 経済性を優先する、長期の供用は期待せず、直近の建設・修繕費用を極力抑えるが、安全と美観は求める、現在の標準的な施設運営をイメージした Case II, 力学的安定性, 視覚, 耐久性を優先する、長期の

Table5-8 Relations between specifications and owner's orientations

Owner's orientation	Structures					Finishing materials		Maintenance	
	Highly rated specifications					Permeability	Deterioration speed of permeability	Highly rated specification	Low rated specification
	Member size	Reinforcement content	Strength	Rebar diameter	Cover depth				
Stability	Large	—	—	—	—	—	—	Type-B <sub>r</sub>	
Visuality	Large <sup>†1</sup>	Small <sup>†1</sup>	Large	—	—	—	Type-A <sub>r</sub>	—	
Durability	—	Ditto	—	Small	—	—	—	Type-F <sub>r</sub>	
Economy	Small	—	Small	Large <sup>†2</sup>	—	—	—	Type-B <sub>r</sub> , C <sub>r</sub> , E <sub>r</sub>	

† 1 : All relations are about cracks with rust fluid and suitable for Walls<sup>5-63</sup>.

† 2 : The gap between products is ignored in conformity to No Free Lunch Theory<sup>5-62</sup>.

Table5-9 Scenarios for calculation of acceleration period arrival rates in the building group

Case	Orientations	Features
I	Economy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cracks of concrete occur easily.</li> <li>• Permeability of finishing materials are high.</li> <li>• Deterioration of finishing materials occurs easily.</li> <li>• Repairs except slight repairs like a recoating of top coatings or a resin injection to cracks are hedged.</li> </ul>
II	Stability Visuality Economy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Specifications of finishing materials are same as Case I .</li> <li>• Hedged specifications are same as Case I .</li> <li>• Degree of crack density is normal.</li> <li>• Top coatings are repaired frequently.</li> </ul>
III	Stability Visuality Durability	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientations for specifications about cracks and finishing materials are reverse to Case I .</li> <li>• Top coatings are repaired frequently.</li> <li>• All parts reaching repair limits are repaired in each large-scale repair.</li> </ul>

供用を想定し、積極的に修繕する施設運営をイメージした CaseIIIの 3 シナリオを建築物群に与え、鉄筋の加速期到達率の試算を行う。

全てのシナリオの優先する志向、仕様との関連を、Table5-9 に示す。感覚的に、群の加速期到達率は、Case I > Case II > Case IIIの順に大きくなる。なお、優先する志向の時間依存性については、2 章と異なり、解析と考察の簡単を期して、設定していない。また、各シナリオにおいて、設定した統計量の再現性確保と計算資源の節約を勘案し、部材毎に仕上材と修繕の 100 の選択肢を設けた 1,000 棟の建築物の 200 年分のパスを設定し、納まりと施設運営上の都合に起因する修繕不能な状態も想定して、修繕プロセスを全く含まない事例も解析する。

志向については、優先する志向の意思表示の閾値を 8 割、一般的な志向の同値を 5 割として差別化を図り、修繕を検討する加速期到達率については、力学安定性と経済性を志向する建物所有者に関して 33 ± 5%、美観と耐久性を志向する所有者に 3% 以下から、各々乱数で与える。加速期到達率に関する 2 つの閾値のうち、前者は、日本建築防災協会の耐震診断手法において、表面が劣化した部材の割合が最も著しい分類を想定した値<sup>5-64</sup>で、後者は腐食によるひび割れ発生直後の修繕を想定し、日本建築学会の関

連指針で定められた中性化深さに対する維持保全限界状態に設定した値<sup>5)8)</sup>を引用したものである。

建築物の具体的な仕様に関する追加モデルとして、全 Case に共通して、内壁と外壁の比、東西方向と南北方向の壁の比は3以下と仮定する。仕上材の仕様に関するシナリオは、非住宅系建築物を想定し、外壁をカーテンウォール等の乾式の仕上材にする確率に5割、化粧打放し仕上げにする確率に1割、仕上げモルタルを採用する確率に3割を、仮定値として与える。また、環境シナリオは、考察の簡単のためRCP8.5に限定する。

解析のフローを、Fig.5-16に示す。

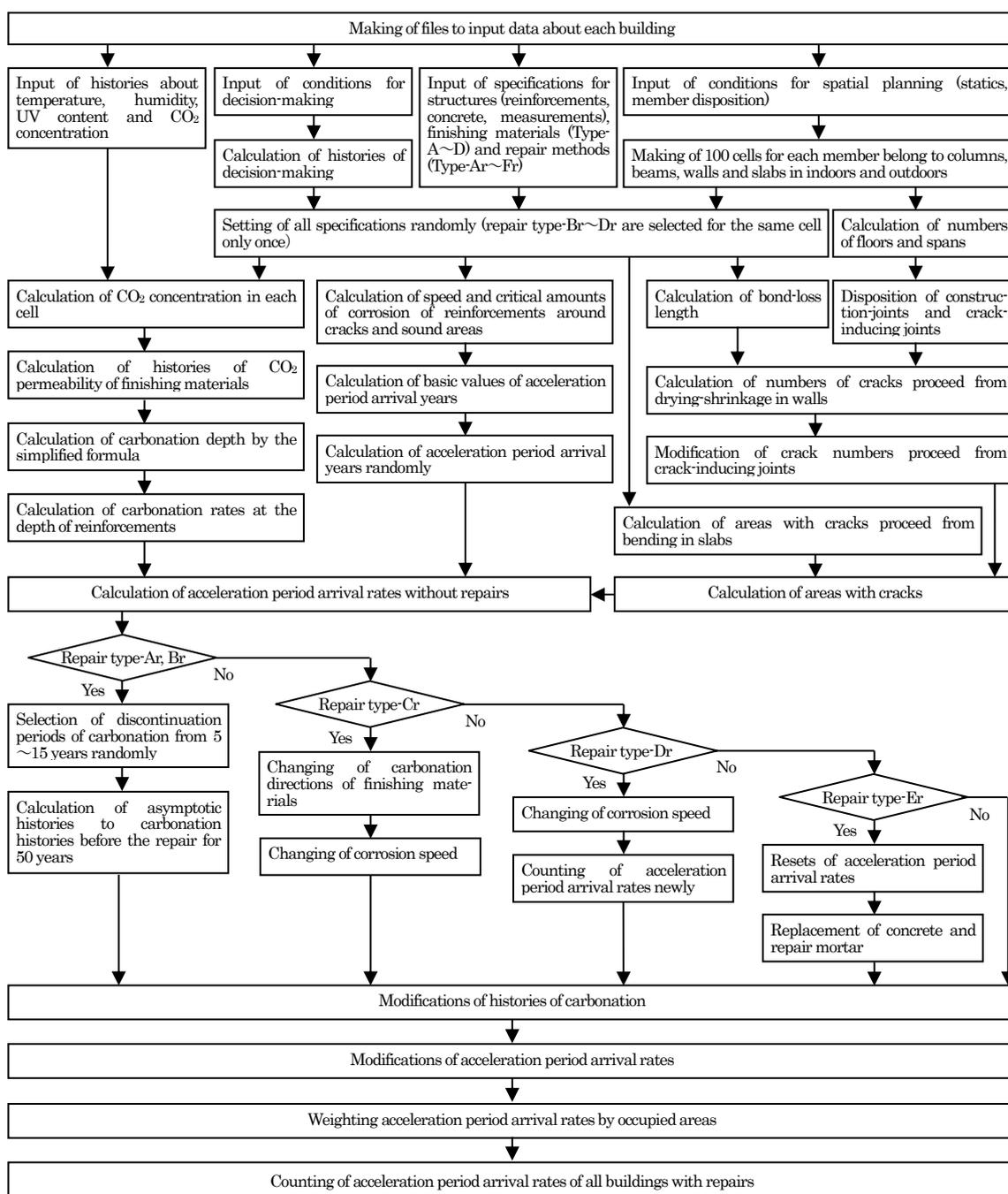


Fig.5-16 Flow of Calculation of acceleration period arrival rates

### 5.6.2 加速期到達率の群単位の集計

建築物群の加速期到達率は、各技術的階層における巨視的な仮定に配慮し、原則として平均値によって考察する。但し、標準偏差、最大値及び正規分布を仮定した3%上方信頼限界も統計量として得られるので、参考値として比較する。得られた結果を、修繕の有無の別毎に Fig.5-17, 18 に示す。なお、一般に、劣化の程度は、劣化した部材の一建築物内に占める割合で評価するため<sup>56)</sup>、全建築物の加速期到達率を、個々の表面積に依らず同等に扱う。

修繕しない建築物群に関する Fig.5-17 において、加速期到達率の平均値、標準偏差、3%上方信頼限界は、志向の意思表示をする機会が新築時のごく一部の建物所有者に限定されるため、シナリオ間の差が殆どない。最大加速期到達率には差があるが、乱数に依存するため、シナリオの特性に則した相関は認められない。また、平均に対し、標準偏差は5割、3%上方信頼限界は2倍に達している。

一方、修繕を行う建築物群に関する Fig.5-18 において、平均加速期到達率は Fig.5-17 と比べて全般に小さいが、シナリオ間の差が比較的大きい。また、劣化速度のばらつきと修繕の意思決定の閾値の存在により、従来の部材単位の検討<sup>58)</sup>と異なり、履歴はバイリニア状を呈しており、収束値は、視覚や耐久

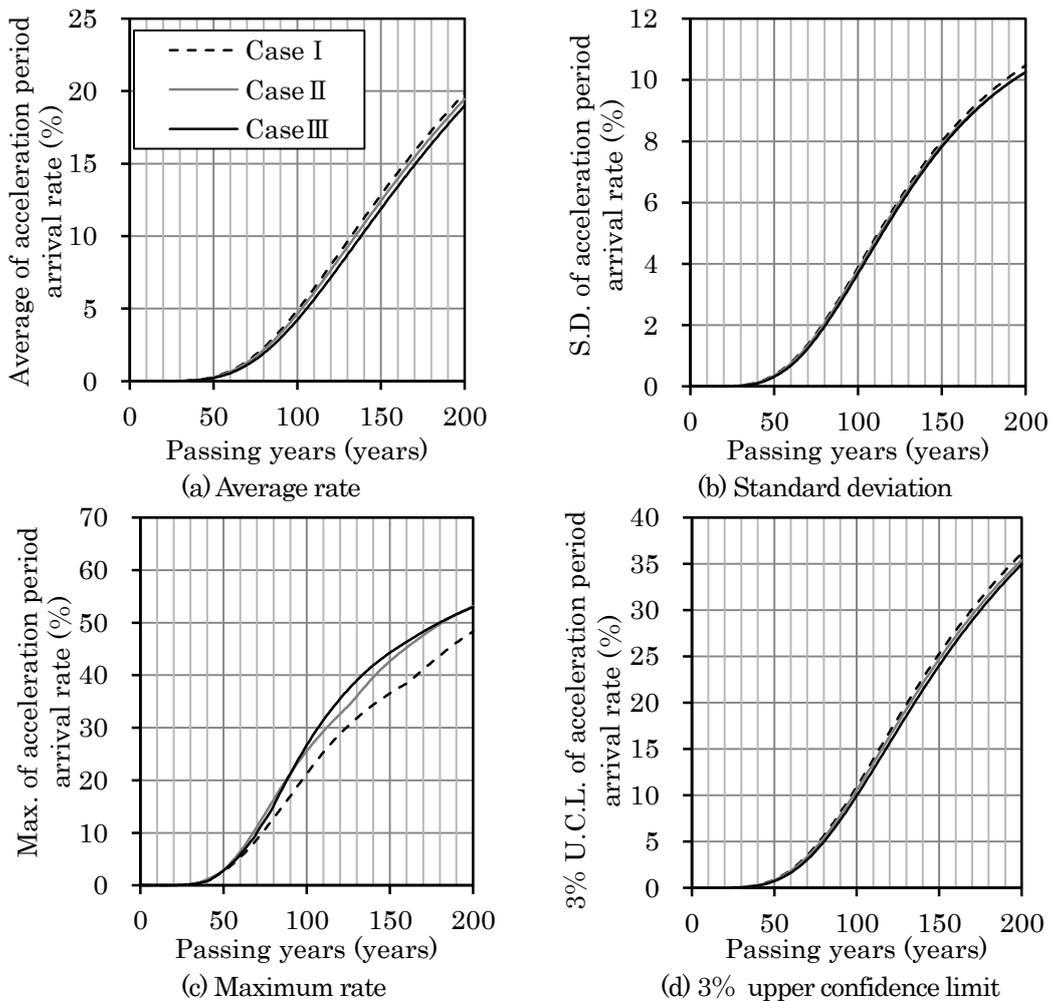


Fig.5-17 Indices about acceleration period arrival rates of RC building group without maintenance

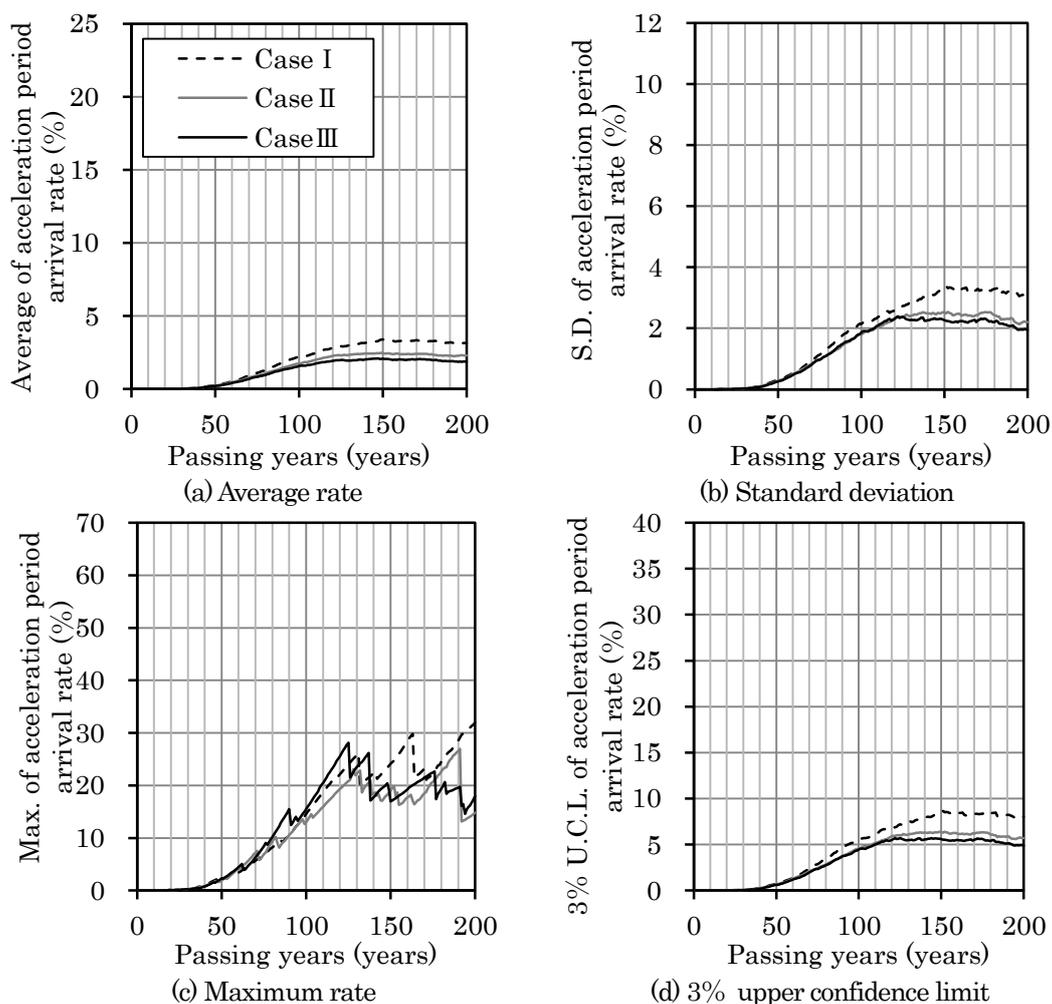


Fig.5-18 Indices about acceleration period arrival rates of RC building group with maintenance

性を重視する Case II, IIIで閾値 3%を下回り、経済性だけを重視する Case I も約 3%になる。修繕の閾値は二種類設けたが、大値に達する迄に意思決定の機会が複数ある上、世代交代時に志向をリセットするため、小値に偏重したものであるが、建物所有者の設備投資を回避する意思決定を、他と同等に扱った影響が大きい。本研究は、持続可能社会への移行を前提としているが、現在の常識に照らすと、商業建築や研究施設以外の中小企業の建築物に関し、設備投資を回避する志向をもつ意思決定者はかなりのハードコアであり、世代を超えて翻意しない可能性もある。本解析の条件と結果は一つの試算として問題を認めないが、耐久性を志向しない建物所有者を記述するには、Fig.5-17, 18の結果を任意の割合で統合する方が、現状に近いと考えられる。なお、従来は屋外暴露乃至は同環境を想定した再現実験による鉄筋の腐食速度しか実験値がなく、屋内では鉄筋の腐食が始まっても加速期に至らないものとされてきた。しかし、屋内の腐食速度を測定した米澤らの研究<sup>5-37)</sup>によると、超長期では室内の腐食が具体化する場合があり、本文の2章では、維持保全の普及を前提に、敢えて、同環境を対象に物理的耐用年数を算定している。こうした価値観の影響については、シナリオプランニングの上、検討を要するものとする。

次に、その他の指標についてであるが、Fig.5-18の標準偏差に関し、シナリオ間の関係性は、平均値

と同様であるものの、Fig.5-17 と異なり、200 年時の標準偏差は平均値と同等に達する。最大値に関しては、修繕の影響で Fig.5-17 より小さいが、部材内のパス単位の加速期到達率がリセットされる際のクリフエッジが残っている上、平均値、標準偏差において見られたシナリオ間の関係性から外れる領域がある。また、3%上方信頼限界は、平均加速期到達率の 2 倍以上に達しており、修繕しない場合より比率が高い。総じて、修繕による加速期到達率の激減が群の絶対量と分布幅に作用しており、平均加速期到達率は小さいが、相対的に不確実性は大きくなると考えられる。

## 5.7 小結

本章では、仕上材の無い鉄筋コンクリートの超長期の経年劣化モデルを建築物単位に拡張するため、解析対象を群単位とし、技術市場のフォーサイトを経て、躯体、仕上材及び修繕の仕様をメニュー化した上、建築学的アプローチにより、部材単位の劣化現象、鉄筋の腐食とひび割れの伝搬過程、修繕を伴う劣化過程、建築物の構成や仕様の意思決定プロセスをモデル化し、鉄筋の加速期到達率を群単位で算定する手法を示した。また、試算により、建築物群に与えた力学的安定性、視覚、耐久性、経済性に対する建物所有者の志向に関するシナリオの差異が、群単位の加速期到達率の統計量において具体化出来ることを確認した。

なお、仕上材の劣化過程のモデル化は、同過程が建物所有者の主観に依存する修繕の影響下にあり、かつ、修繕時期により影響が全く異なる点、超長期に亘って同じ製品を継続して使用できる可能性がない点を重視し、材料学的アプローチではなく、本章で検討している。物性の再現性という観点では、仕上材の種類に起因して、物性の幅が広く、建築物群を対象として解析する際、仕様選定の影響が支配的になるという特殊性があるため、既往の実験から透過性の劣化過程の概形を参考として得て、実験に基づく定数である中性化率を勘案した絶対値との組合せによって、多様な履歴を設定している。短い周期の修繕を前提とするため、超長期的時間軸に展開する上で、材料学的に新たに確認を要する現象もない。即ち、躯体、仕上材、修繕の仕様に関するシナリオが問われているので、萌芽期にあっては帰納的シナリオとして扱い、実用段階にあっては、供用環境と劣化状態の継続的なデータ収集に基づく、定期的な入力値の補正によって、実態と解析結果を漸近させ、信頼性を保証することが望ましい。

また、RC 造部材の劣化過程のモデルのうち、コンクリートのひび割れに関しては、アセトン噴霧で視認可能な研究レベルのひび割れが既往の式では評価されていないため、同式を超長期的時間軸に解析的に展開出来ない状態にある。鉄筋の腐食速度に関しても、本章中の記載から類推すると、超長期の鉄筋の不動態の状態を腐食促進試験で再現できないため、解析的な検討は信用できないというパラドックスが生じる。本研究では、前者は、ひび割れ幅を問わず下限評価する方針、後者は、仕上材の影響下で相対湿度と腐食量の相関の連続性を認める方針のもと、劣化モデルを具体化している。共に、既往の知見に基づく帰納的なシナリオとして妥当と考えるが、実際の性能を過小評価する構成であるため、仕上材の劣化過程同様に、既往のひび割れや鉄筋の腐食に関する調査研究の時間軸を超長期的時間軸に拡張し、劣化モデルの精度の向上を図る必要があると考える。

その他、建築物群に適用するイベントや建物所有者の意思決定等はシナリオそのものであって、ステークホルダーの同意を前提に帰納的シナリオとして認められるが、定期的に予測と実際の整合性を確認の上、その影響範囲を定量的に評価し、シナリオを見直す必要がある。

総じて、本章で決定したモデルは帰納的なシナリオと言えるが、シナリオプランニングと安全側の下限評価の根本的な課題を解決し、解析結果の信頼性を確保するために、継続的な情報収集と定期的な入

力値の補正を行うことが望ましい。

なお、本章の仮定には Spatial な定義がないが、個々の建築物でも、テナントの介在により、複数の施設運営システムが共存し、修繕の意思決定が区画単位で行われれば、建築物群と同じ構図を内包するものと見なされ、群単位の解析の解がフラクタルに展開できるとの見方もある。既往の研究では、個々の建築物の鉄筋の腐食に関するリスク曲線は、修繕の都度、リスクがほぼ解消されては増す鋸状の履歴を呈していたが、本解析の解が適用されると、建築物単位の腐食のリスクも漸増する。内装・設備を含む建築物単位の LCC が漸増する例は多いが、躯体単体で同様の履歴を呈することは、大規模な修繕を想定する建築物に、経済的耐用年数に加えて、物理的耐用年数の概念を生じさせるため、重要である。

次章では、本章で具体化した群単位のリスクに基づいて、修繕が普及した建築物群内の個々の建築物の耐用年数を具体化する手法について、総合科学的に検討する。

※解析上採用した先行研究の式

- ・小池らの合成高分子防水層の光熱劣化を予測する化学反応速度論的手法
- ・富板の化学反応速度論的手法の熱影響のアレニウス則への変換
- ・富板の紫外線の推定手法
- ・尹らの壁の乾燥収縮ひび割れ幅の算定式
- ・大野らの等価付着消失長さの算定式
- ・米澤らの屋内環境まで対応する鉄筋の腐食速度の算定式
- ・森永のひび割れ発生時の鉄筋の腐食減量の算定式

※解析上の仮定

- ・高分子系材料の劣化モデル…小池らの化学反応速度論的手法を基本とし、熱影響の項を富板らに準じてアレニウス則に変換した上、過酷環境の補正係数を追加
- ・高分子系材料の劣化モデルの定数…履歴に関する定数は、兼松らの紫外線照射後の促進中性化試験の結果に準拠し、絶対量は建築業協会の報告書に準拠
- ・紫外線量…日射量の気象庁観測値から推定した外部環境の紫外線量と劣化促進試験の紫外線量の関係に関する補正係数によって表現
- ・高分子系材料の破壊モード…トップコートに吸収能があり、屋外暴露時は一般部の膜厚は変わらず、顔料や塵埃を起点としてピンホールが拡大
- ・物質透過特性の推移が仕上材自体の劣化で決定する体系の簡易モデル…塗替え時は5～15年間中性化が進行せず、同年数経過後、非修繕時との差が50年間で解消される様に差分を漸減
- ・物質透過特性の推移が仕上材とCO<sub>2</sub>の反応で決定する体系の簡易モデル…仕上材の中性化完了後に下地コンクリートの中性化が打放しと同じ速度で進行
- ・物質透過特性の推移が仕上材の剥離・剥落で決定する体系の簡易モデル（塗膜の浮き）…修繕時は5～15年中性化が停滞中性化再開後、仕上材を施工したコンクリートの中性化の履歴に、50年かけて漸近
- ・物質透過特性の推移が仕上材の剥離・剥落で決定する体系の簡易モデル（タイルの浮き）…セメント系仕上材の表裏が中性化して、樹脂注入後は表面だけが中性化し、セメント系仕上材が全面中性化すると、下地コンクリートの中性化が開始
- ・物質透過特性の推移の考慮が不要な体系…劣化が顕著に遅い保護防水、デッキスラブのデッキとの接触面、仕上材がない打放し、RC造以外の部材である乾式の外装材等
- ・壁のひび割れの数量…尹らの壁の乾燥収縮ひび割れ幅の算定式により、本数を算定
- ・壁の乾燥収縮ひび割れ部分の腐食…乾燥収縮ひび割れ発生時点で、幅に依らず、等価付着消失長さが発錆
- ・床の曲げひび割れ部分の腐食…床一枚の面積を二分して引張領域を仮定し、同領域が発錆
- ・一般部の鉄筋の腐食速度…米澤らの腐食速度（雨掛かり用の補正は適用対象外）
- ・一般部のコンクリートへの腐食に起因するひび割れの発生条件…森永式
- ・ひび割れ部分の鉄筋の腐食速度…0.14%/年、変動係数50%の対数正規分布
- ・ひび割れ部分の鉄筋とコンクリートの隙間…後藤らの測定に準じて0.1mm
- ・腐食による鉄筋の体積膨張率…ゲータイトとマグネタイトの平均である2.5

- ・ひび割れ部分のコンクリートへの腐食に起因するひび割れの発生条件…樹脂注入後、一般部の速度で腐食が進行し、腐食生成物が鉄筋周囲の隙間 0.1mm を充填した時点から森永式以上腐食した時点
- ・加速期到達率…鉄筋の腐食によるコンクリートの表面ひび割れの発生面積率（ひび割れ近傍の腐食は、樹脂注入後に発生したひび割れのみ集計）
- ・空間構成…敷地面積と建蔽率、容積率の統計量に基づき、超長期に亘り同じプランとして作成
- ・平面のアスペクト比…1~3 を乱数で仮定
- ・外壁…建築物の外周に全て配置
- ・内壁…外壁数に対する比、二方向の内壁数の比を乱数で仮定し、中央から外端に向け連続させ、スパン数の上限に達すると別のスパンに配置（コンストラクションジョイントを想定した上限 10 スパンも別途仮定）
- ・集計面積の重みづけ…外周の角柱は室外二面、その他の外周の柱梁は室内外各一面、内部の柱梁は室内二面、壁は室内外、床は上下の各二面を評価し、一部材の評価面積は、階高とスパン長の全長を有効とし、部材交差部の集計上の重複は許容（各部材の出隅・開口、開口補強筋や開口際の目地対象外）
- ・躯体、仕上材、修繕の仕様…学協会の指針、業界の実務書に準拠した一般的な仕様を選定
- ・意思決定のモデル…群内で各志向を選択する確率をシナリオで付与し、個々の建物所有者の志向を決定する二段階のモデル
- ・建物所有者の状態…力学的安定性、視覚、経済性、耐久性に対する志向の有無とその意思表示の有無により状態を四分し、建設時、大規模修繕周期毎に、乱数によって志向することを意思表示する志向に 1 点配点し、最高得点の志向によって状態を特定（得点は一世代内累積）
- ・志向と仕様の関係性…シナリオで設定した上、個々は乱数で設定
- ・修繕の要否を判断する劣化度の閾値…志向する性能に応じてシナリオで設定

## 参考文献

- 5-1) 野口貴文, 兼松学, 黄光律, 丸山一平, 長井宏憲: 性能設計に基づく建築材料選定支援システム構築に関する研究, 住総研 研究年報, No.29, 2002.1
- 5-2) 西山卯三: 建築の造形・機能・経済, 建築雑誌, Vol.74, No.875, pp.31-34, 1959.10
- 5-3) 田村恭: Building Elements の評価, 建築雑誌, Vol.72, No.845, 1957.4
- 5-4) 内田祥哉: 計画の方法論 Building Element, 建築雑誌, Vol.78, No.923, pp.175-178, 1963.3
- 5-5) 池辺陽: 建築設計論, 精密機械, Vol.43, No.1, pp.14-20, 1977.1
- 5-6) 藤井正一: 材料設計に関する研究 (その 5・「建物またはその部分に要求される条件」の「材料または BE に要求される性能」への変換), 日本建築学会論文報告集号外, Vol.40, p.5, 1965.9
- 5-7) 社団法人建築業協会技術研究部会材料施工専門部会中性化抑制評価研究会: 躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上材の評価研究会 活動報告書, 2009.4
- 5-8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016
- 5-9) 小林良輔, 西村次男, 蔵重勲, 加藤佳孝: ひび割れと鉄筋界面からの中性化進行に及ぼす乾湿繰返しの影響, 生産研究, Vol.61, No.4, pp.649-652, 2009.8
- 5-10) 矢部政実, 田桐澤根, 岡本好広: 各種耐候性試験による塗膜の劣化メカニズムの解析, 塗料の研究, No.146, pp.8-15, 2006.10
- 5-11) 松本悠実, 野口貴文, 北垣亮馬, 金谷瞳: 建築用塗料の紫外線劣化に関する統合的分析手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1077-1078, 2014.9
- 5-12) 日本ウエザリングテストセンター: 材料の耐候性データ集, 参照 2018.10, <<http://www.jwtc.or.jp/gijutsu/06.pdf#search=%27%E6%9D%90%E6%96%99%E3%81%AE%E8%80%90%E5%80%99%E6%80%A7%E3%83%87%E3%83%BC%E3%82%BF%E9%9B%86%27>>

- 5-13) 小池迪夫, 田中享二: 合成高分子防水層の耐候性 (その 6): 光熱劣化における光と熱の定量的評価, 日本建築学会論文報告集, No.289, pp.1-10, 1980.3
- 5-14) 富板崇: 気象データに基づく全国劣化因子マップ, 日本ゴム協会誌, Vol.68, No.5, pp.307-317, 1995.5
- 5-15) 石田哲也, 李春鶴: 微細空隙構造と物質平衡・移動の熱力学強連成に立脚したコンクリートの炭酸化反応モデル, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.274-286, 2007.5
- 5-16) 兼松学, 李佑眞, 鶴木圭一, 長井宏憲, 野口貴文, 紫外線照射による高分子系仕上材の中性化抑制効果の変化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1063-1064, 2009.7
- 5-17) 富板崇: 傾斜・垂直面における紫外線量の推定手法, 日本建築学会構造系論文集, No.535, pp.29-34, 2000.9
- 5-18) 馬場明生, 千歩修: 各種の表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定方法に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1. pp.333-338, 1987.6
- 5-19) 井上和政, 三井健郎, 柳橋邦生, 池尾陽作, 三好徹志: 各種補修モルタルを用いたコンクリート躯体の延命化予測に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.70, No.592, pp.7-12, 2005.6
- 5-20) 安伸二, 小林一輔: ポリマーディスパージョンによって形成されたポリマーフィルムの耐アルカリ性に関する 2, 3 の考察, コンクリート工学論文集, Vol.5, No.1, pp.99-108, 1994.1
- 5-21) 渡部嗣道: 建築仕上端部の特異性応力場における破壊力学的パラメータの算定に関する解析的研究: タイル張り仕上げの変形追従性能試験を事例として, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.616, pp.49-56, 2007.2
- 5-22) 稲葉洋平, 佐々木正治, 閑田徹志: タイルの剥離評価に関する研究 その 2 - 確率論に基づく剥離率推定手法の提案 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.695, pp.27-35, 2014.7
- 5-23) ロングライフビル推進協会: 建築物の LC 評価用データ集 (改訂第 4 版), 1999
- 5-24) 林和彦, 椿龍哉, 細田暁: 鉄筋コンクリート部材の鋼材腐食に及ぼす曲げひび割れの内部構造の影響, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.577-588, 2009.12
- 5-25) 三好徹志, 井上和政, 上林厚志, 三井健郎: 鉄筋コンクリート造無開口壁部材の乾燥収縮によるひび割れに関する解析的検討, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.941-942, 2010.7
- 5-26) 橋田浩, 鉄筋コンクリート造外壁の収縮ひび割れ幅と本数の簡易推定式の提案, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.645-646, 2005.7
- 5-27) 大野義照, 徐泰錫, 中川隆夫: 外部拘束を受ける鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅の予測, 日本建築学会構造系論文集, N.616, pp.9-16, 2007.6
- 5-28) 徐泰錫, 大野義照: 鉄筋コンクリート壁における乾燥収縮ひび割れ算定式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.626, pp.497-504, 2008.4
- 5-29) 尹重建, 岸本一蔵, 大野義照: RC 造壁の乾燥収縮ひび割れ本数算定のための拘束度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.685-690, 2009.7
- 5-30) 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 寺西浩司, 今本啓一, 三橋博三, 岡田秀敏: 国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式に関する研究—乾燥収縮ひずみの予測式—, 日本建築学会構造系論文集, No.597, pp.9-15, 2005.11
- 5-31) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推

- 定式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.69, No.576, pp.7-14, 2004.2
- 5-32) 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 今本啓一, 寺西浩司, 三橋博三, 濱永康仁: 国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式に関する研究: クリープひずみの予測式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.599, pp.9-15, 2006.1
- 5-33) 今本啓一: 表面仕上げを施したコンクリートの乾燥収縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.471-476, 2004.6
- 5-34) 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻建築材料研究室: Database for Mechanical Properties of Concrete, 参照 2018.10, <[http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index\\_jp.html](http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index_jp.html)>
- 5-35) 大野義照, 中川隆夫, 劉勇, 岸本一蔵: 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れ幅の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.513-518, 2004.6
- 5-36) 邱建國, 兼松学, 野口貴文, 長井宏憲: 免疫的アルゴリズムによる RC 建築物の中性化に対する維持保全計画最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.624, pp.173-180, 2008.2
- 5-37) 米澤敏男, 押田文雄, 本間大輔, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純: コンクリートの中性化後における鉄筋の腐食速度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.704, pp.1405-1414, 2014.10
- 5-38) 金螢来, 野口貴文, 長井宏憲: 腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.624, pp.181-188, 2008.2
- 5-39) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1986
- 5-40) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.294, pp.85-100, 1980.2
- 5-41) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013.4
- 5-42) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 5-43) 宗方淳, 吉澤望, 小島隆矢, 豊原寛明, 石井儀光, 勝又済, 平手小太郎: 地域性を考慮した都市街路空間の圧迫感と開放感の要因に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.627, pp.687-693, 2008.5
- 5-44) 大場亨, 田草川信慈, 鈴木義昌: 地域地区や都市基盤が新築建築物の敷地面積に与える影響の分析, GIS-理論と応用, Vol.3, No.1, pp.45-52, 1995.1
- 5-45) 檜野紀元: 未来世紀コンクリートへの展望—建築の立場から—, コンクリート工学, Vol.26, No.1, pp.12-16, 1988.1
- 5-46) 経済産業省: 技術戦略マップ 2010, 参照 2018.10, <[http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu\\_kakushin/kenkyu\\_kaihatu/str2010.html](http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010.html)>
- 5-47) 文部科学省科学技術・学術政策研究所科学技術動向研究センター: 第 10 回科学技術予測調査分野別科学技術予測, 参照 2018.10, <<http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-RM240-FullJ1.pdf>>
- 5-48) 日本鉄鋼連盟: COURSE50, 参照 2018.10, <<http://www.jisf.or.jp/course50/index.html>>

- 5-49) SE 委員会：新構造計算の実務 知っておきたい根拠と常識，2006
- 5-50) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015
- 5-51) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事，1993
- 5-52) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，2015
- 5-53) 日本砕石協会：骨材供給構造の推移，参照 2018.10，<<http://www.saiseki.or.jp/kotsujukyu.html>>
- 5-54) 日本建築仕上材工業会：生産数量，参照 2018.10，<<http://www.nsk-web.org/seisansuu.tpl>>
- 5-55) 河野政典，榎田佳寛：タイル張りコンクリートの中性化進行予測に関する解析的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.705-706，2015.9
- 5-56) International Standard Organization: ISO19208 : Framework for Specifying Performance in Buildings, 2016
- 5-57) J.M., Epstein, R., Axtell (服部正太，木村香代子訳)：人工社会 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション，1999 (原著 1996 年)
- 5-58) 森田紘圭，加藤博和，村山顕人，柴原尚希，林良嗣：クオリティ・ストックの実現に向けた街区群の動学的更新・評価モデルの構築，都市計画論文集，Vol.48, No.3, pp.1071-1076, 2013.10
- 5-59) 刁芸婷，加藤信介，樋山恭助：BIM 概念に基づく最適建築設計支援システムの開発，日本建築学会技術報告集，Vol.16, No.34, pp.1065-1068, 2010.10
- 5-60) A.G., Sanfey : Decision Neuroscience- New Directions in Studies of Judgment and Decision Making, Decision Neuroscience, Vol.16, No.3, pp.151-155, 2007.1
- 5-61) D., Kahneman, A., Tversky : Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, Econometrica, Vol.47, No.2, pp.263-292, 1979.3
- 5-62) D.H., Wolpert, W.G., Macready : No Free Lunch Theorems for Search, 1995
- 5-63) 中川隆夫，大野義照，徐泰錫：鉄筋コンクリート壁における収縮ひび割れ近傍の等価付着消失長さと収縮ひび割れ幅の算定，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.624, pp.165-172, 2008.2
- 5-64) 日本建築防災協会，耐震改修支援センター：2017 年改定版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断規準同解説 耐震改修促進法に基づく高度降雨大臣認定耐震診断及び耐震改修に関する指針と解説，2017.7

# 第6章 経年劣化のリスク分析に対する

## 総合科学的アプローチ

### Chapter6: The Approach to the Risk Analysis of Aging Deterioration by Synthetic Science

#### 6.1 小序

前章までに、材料学、自然科学、及び、建築学的アプローチにより、鉄筋の加速期到達率を、建築物群単位で定量する方法を示したので、本章では、同情報を社会的影響として可視化し、建築物の耐用年数まで関連付けることを目的とする。

但し、ここまでに示した方法は、材料の経年劣化の定量という観点では包括的であるが、加速期到達率によって直接議論可能な現象はかぶりコンクリートの剥離・剥落に留まるため、建築物の利用者にとっては、タイルの剥落、外装材のビスの破断や内装材の下地からの脱落等の施工不良と同次元の問題である。また、RC造建築物に限定する場合も、鉄筋の継手、定着、幅止め筋、開口補強筋、添え筋等の設計要因や過密配筋、コンクリートの施工欠陥等の施工要因の不確実性を検討していないため、加速期到達率と剥離・剥落の発生確率の相関は、建築物の棄却の参考になる程高くない。少なくとも、加速期到達率に基づくリスクの議論には、上述した設計・施工要因を超越する巨視的な性能により、総合科学的にアプローチする必要がある。

そこで、建築物の維持保全過程の評価指標として多用されるLCAによる環境性、LCCによる経済性に着目すると、群単位の超長期の検討では、少子化、資源の枯渇、工法の変化、法改正等の社会情勢によって市場構造が変化するため、従来、主要な課題としてきた建設投資の頻度と同等に、マテリアルフローや資材・工法の価格変動の影響が大きくなる。当該分野では、例えば、藤本らがコンクリート製造に関連するマルチエージェントの人工市場<sup>6-1)</sup>を、また、筆者らが意思決定に行動経済学と進化論的手法を用いる人工市場におけるコンクリート用材料の価格変動の予測手法<sup>6-2)</sup>を提案し、同課題への一つの解を既に示している。

こうした人工市場が成立するのは、例えば、Westらが、巨大哺乳類の成長が緩慢で、低心拍数である

が長寿である様な、所謂生き物の時間軸と、動物の体格が **Maturity** 則で成長する、成長の限界の二つの原理を例示した上で、都市においても、人口と犯罪、GDP、収入、特許の対数に線形の相関があり、大都市で効率が一定割合増す Fig.6-1 に示す単純な数学的法則があり、都市開発の意思決定において無視できないことを説明した様に<sup>6-3)</sup>、人間活動のマクロな特性に普遍性があることに基づいている。

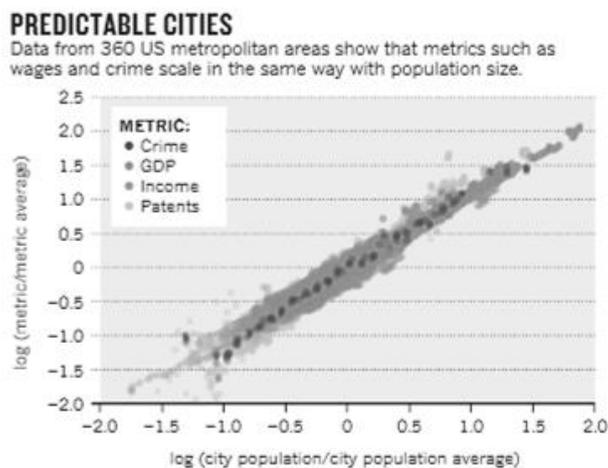


Fig.6-1 Relation between metric average and city population<sup>6-3)</sup>

しかし、仮に建築学会会長の環境声明に準じて、建築物が高経年化し、建設に関わるエネルギー投資が超長期的に3分の1になるとすれば、Westの共通則を確実に逸脱する。実際に、人間の生活様式を根底から変える環境の革新が本当に実現するのかが定かではなく、人口減少に伴う都市のコンパクト化やスポンジ化等の都市計画的要因によって創発される複数の下位の建築物群に着目する必要があるのか、または、建設投資の激変が表面化しない、より上位の階層の巨大建築物群で評価する必要があるのかは、議論が分かれるところである。即ち、人工市場によるアプローチは、都市計画上のフレーミングに決定的な論点をもつため、コンセンサスの統合を前提とする本研究に適用するには、時期尚早と考えられる。

然るに、環境、経済性と剥離・剥落の中間階層に位置する性能をISO19208<sup>6-4)</sup>が例示する要求性能に求めると、殆どが躯体の劣化との関係性の欠如、設計行為への依存、評価対象の局在に類し、対象は耐震性を含む力学的安定性に限られる。耐震性は唯一の選択肢であるが、外的要因が自然現象であるため、人間活動の予測が求められる範囲を最小限に留められる上、都市復興における環境及び経済負荷は維持保全段階より顕著に大きいため、被災を前提にすると、前述した人工市場によるLCA、LCCの精度向上の効果を超越して、環境、経済性を論じられる利点がある。また、耐震性という国民的関心事による評価軸に変換することで、複数の建築物の所有者や自治体の施設運営の合理化、専門業者の技術提案の合理化、保険会社の地震保険の高度化、群内に居住する全住民の生活の質の向上等において、トランスディシプリナリーが期待される。

従って、本章では、RC造建築物群の超長期経年劣化のリスクを耐震性によって評価するため、同性能の推移を可視化する手法を構築し、更に、群単位の耐用年数の在り方を具体化することを試みる。

## 6.2 耐震性による評価の課題と対策

なお、加速期到達率を耐震性に反映する上で、同率を直接入力可能な日本建築防災協会の経年指標<sup>6-5)</sup>

は、経年数 30 年程度迄の建築物を想定しており、超長期への適性は検討されていない。耐震性の推移を扱う研究には、村尾<sup>6-6)</sup>による年代別の建物被害関数や川瀬ら<sup>6-7)</sup>の新耐震を境とする建物被害床面積の集計等の研究もあるが、建築法規の影響を考察するもので、耐震改修促進法が使命を終える将来の建築物群には適合しない。腐食と修繕による直列系の建物破壊確率の推移を免疫的アルゴリズムによって定量する邱らの研究<sup>6-8)</sup>や、任意の位置の鉄筋の腐食確率と応力比に基づく構造・耐久性能指数を、相乗平均と応力負担割合に基づいて割増し、全体系として平均化する日本コンクリート工学会の手法<sup>6-9)</sup>等もあるが、前者は直列系の検討で側柱以外の情報を扱わないのに対し、建築物単位の変換を要するため、同様に、後者は複数の仕上材が混在する建築物の腐食の位置情報を必要としながら、構造性能評価を簡易な被災度判定基準によるため、ともに本研究の用途では過不足がある。

そこで、本文では、前章の建築物群の加速期到達率の解析過程で得た鉄筋の腐食モデルを日本建築防災協会の二次診断法<sup>6-5)</sup>に導入し、所定の地震を与えた際の被害を、部材内の鉄筋の最大腐食量に基づいて時系列で解析し、超長期に亘る耐震性の推移を群単位で定量する。この際、地震に関する国家プロジェクトの最新の成果や将来の地震によって、予想期間内の確率論的想定地震が変化し得る地震学的な手法は避け、新築時の建築物群の地震による人的被害をシナリオとして設定し、行政の調査<sup>6-10)</sup>に基づいて、同シナリオを実現する構造耐震判定指標の統計量を逆算して得る、被害に基づく確率論的な手法を採用する。

## 6.3 耐震診断用モデル

### 6.3.1 耐震性関連の仕様

本文では、原則として、日本建築防災協会の二次診断法<sup>6-5)</sup>によって耐震診断を行い、せん断終局強度に限って、トラス・アーチ理論式を適用するため、日本建築学会の関連指針<sup>6-11)</sup>に準じる。また、解析の効率化と計算資源の節約のため、全ての建築物において、靱性指標に基づき、経年数毎に全部材を均等な数の 6 グループに分けた上、最大 3 グループの全数組合せで構造耐震指標を求める。本設定に起因し、破壊モードが変わる際に、時系列で不連続な解が得られる建築物は、評価の対象外とする。

ここで、前章で定めたモデルは、RC 造の非住宅系建築物群を想定したもので、全層を均一なグリッドの方形の平面計画と仮定した上、敷地面積、容積率等の既往の統計に準拠して、階数及びスパン数を設定し、実務書や学協会の指針に基づく部材断面寸法、コンクリート、配筋、仕上材、修繕の仕様のうち建築物の所有者の志向に沿う選択肢から、乱数で仕様を決定している。結果的に、鉄筋の腐食や乾燥収縮ひび割れの算定に必要な情報に偏重し、耐震診断に必要な情報が不足しているため、Table6-1 の情報を補足する。また、前章のモデルは、群単位の解析の有意性を確認するプリミティブな構成のため、今回の追加条件だけに破壊形式、余裕度の調整等の設計行為を含めることは避ける。

なお、部材性能を鉄筋の最大腐食量の関数とする仮定に起因する耐震性の過小評価を避けるため、表中の鉄筋の定数は材料試験の平均とし、曲げ終局強度は解析値の 1.08 倍、せん断終局強度は 1.28 倍、付着信頼強度は、一段目はサイドスプリット破壊と仮定して 1.43 倍、二段目は 1.06 倍し、実験値と解析値の関係を補正するものとする<sup>6-11)</sup>。また、鉄筋が腐食すると一柱部材のうち耐震性に決定的になる位置が変動するため、柱端部の帯筋間隔の上限 100mm に加え、柱中央の同 150mm の場合も検討する。両者は混在するが、ヒンジの位置情報は設計行為の範疇のため、簡単に努めて、全柱の帯筋間隔が 100mm でヒンジを設ける場合と 150mm 間隔でヒンジを設けない場合の解析を個別に行い、傾向を考察する。因みに、解析対象は二次診断で扱う耐震壁の縦横筋と柱の主筋、帯筋とし、腐食の影響が外周の帯筋と

Table6-1 Specifications for seismic evaluation

Weight for unit floor area	12,000N/m <sup>2</sup> <sup>6-5)</sup>
Orientation for evaluation	The shorter direction
Number of main reinforcements in one column	The number is selected randomly to meet the following conditions. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rates of reinforcements are more than 0.8%. <sup>6-12)</sup></li> <li>• Rates of reinforcements are less than the half of BS standard value 4%. <sup>6-13)</sup></li> <li>• The number of reinforcements in XY orientations in one column are the same.</li> </ul>
Yield strength of main reinforcements of columns before deterioration	390N/mm <sup>2</sup> (as the medium value for SD345) <sup>6-11)</sup>
Spacing of hoops of columns	100mm, 150mm (for hinge regions and others)
Yield strength of hoops of columns before deterioration	380N/mm <sup>2</sup> (as the medium value for SD295) <sup>6-11)</sup>
Number of tie bars in one column	0
Rates of shear walls for all walls	10%
Yield strength of shear reinforcements of walls before deterioration	380N/mm <sup>2</sup> (as the medium value for SD295) <sup>6-11)</sup>
Rotation angles in the hinge region at the ultimate limit state	1/75rad

異なる中子筋は、設計行為の範疇として扱わない。その他、本文の建築物の平面計画は全層同一のため、被害が最も大きい1層の短辺方向だけを解析対象とし、壁開口、変動軸力、第2種構造要素は高次の課題とする。また、内外壁のうち耐震壁は一部に限定されるが、前章の仕上材の仕様の選定段階で、湿式の壁の乾式への置換を終えていることを勘案し、全壁に占める割合を仮に1割一定として解析に供する。

本文の建築物群は、上記の情報に基づく構造耐震指標と、別途定める構造耐震判定指標によって具体化するが、用途は経年劣化に関する一般論に限定しており、具体的な群を評価する際は、対象とする建築物群の調査結果に準じる必要がある。

### 6.3.2 鉄筋の腐食による強度低下

柱の鉄筋の腐食による強度低下は、邱らが加速期まで解析した事例に準じ、曲げ終局強度に用いる主筋の降伏点強度とせん断終局強度に用いる帯筋の降伏点強度の低下を6-1式<sup>6-8)</sup>、せん断終局強度に用いる主筋の付着強度の低下を6-2式<sup>6-14)</sup>によって、部材単位で表現する。また、帯筋間隔は、帯筋の腐食率が100%に達した時点で設計値の倍になるものと仮定する。

$$\sigma_y = (1 - 0.0217 \cdot r) \cdot \sigma_{y0} \quad (6-1)$$

$$\tau_{bu} = \exp(-0.0607 \cdot r) \cdot \tau_{b0} \quad (6-2)$$

ここで、 $r$  : 重量減少率、 $\sigma_y$  : 腐食した鉄筋の降伏点強度、 $\sigma_{y0}$  : 健全な鉄筋の降伏点強度、 $\tau_{bu}$  : 腐食した鉄筋の付着強度、 $\tau_{b0}$  : 健全な鉄筋の付着強度

壁の終局強度は、曲げ機構とせん断のトラス及びアーチ機構が柱と複合的に構成される上、壁のトラス機構の役割が明確にされていないため<sup>6-11)</sup>、鉄筋の局所的腐食の影響を具体化し難いことを受け、柱に準じ、部材単位で最大の腐食率を定め、曲げ終局強度の計算に用いる柱主筋と壁縦筋の降伏点強度の低下、せん断終局強度に用いる壁縦横筋の降伏点強度の低下を、6-1式で表現する。

鉄筋の腐食の履歴は、前章で用いたCO<sub>2</sub>、熱、紫外線、酸性雨による経年劣化に対するシナリオのうち、躯体にひび割れが生じ易く、仕上材の透過率が大きく劣化速度が早い上、トップコートの更新やひび割れの樹脂注入等の比較的軽微な修繕以外を敬遠した結果、群の平均加速期到達率が最大となった、経済志向のCase Iの結果を用いる。同履歴は、建築物の室内外の別と部材種類以外の情報のないセル毎に集計した結果であるため、1層のみを対象とする解析に適用する上で、補正は不要である。また、解析開始時点で全建築物の劣化が一斉に開始する仮定も、考察の簡単のため踏襲する。

### 6.3.3 地震時被害

#### (1) 構造耐震判定指標

地震時被害のモデルの検討にあたり、狭域で相当規模のRC造建築物群を設定でき、地盤に関する仮定を最小限に留められる地域はある程度限定される。ここでは、東京23区のうち、夜間人口が中央になる新宿区を参考地域として選定する。

新宿の地震に関しては、例えば、藤田らがFig.6-2に示す様な1.25km角の地盤の非線形三次元有限要素モデルを作成し、1995神戸波と1968八戸波を与え、建築物の応答から被害を求めている<sup>6-15)</sup>。

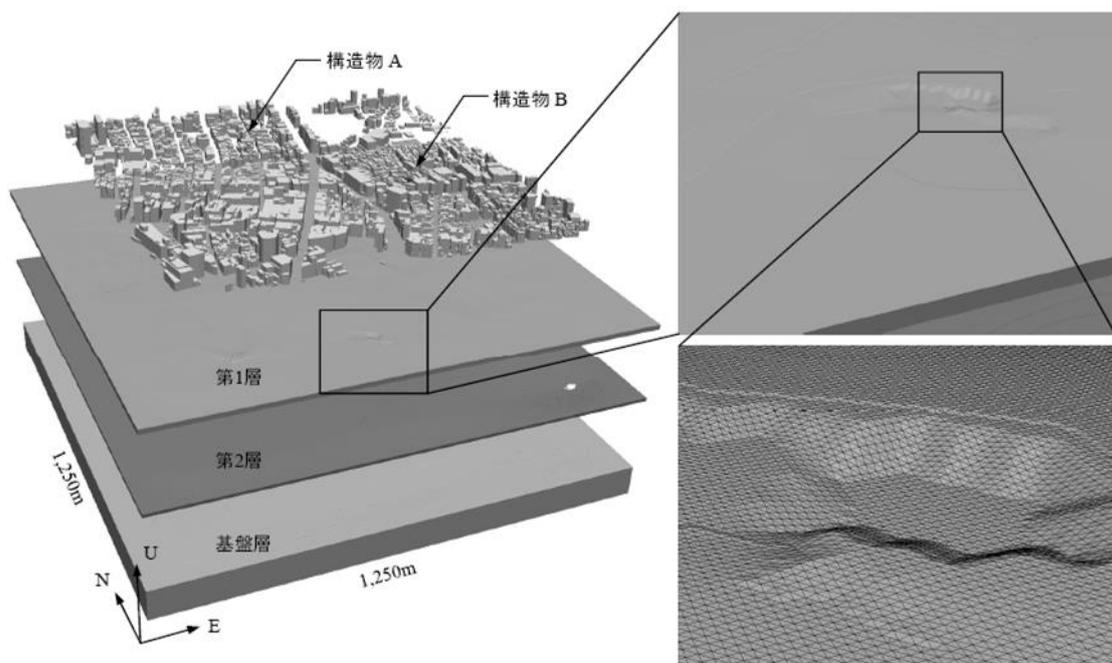


Fig.6-2 3D non-linear ground model around Shinjuku<sup>6-15)</sup>

但し、建築物の物性を固有周期のみで表現する上、地震も限定しているが、解析に京コンピュータを要している。本研究は、建築物を部材・材料単位までモデル化した上、超長期に亘る繰返し解析を要するので、藤田らの解析手法の踏襲を試みても、解析に必要な計算機は存在しない。国民の最大関心事で

ある地震研究の将来を俯瞰すると、新しい計算システムを開発し、現時点で地震現象に則した群単位の経年劣化をモデリングしても、近い将来に信頼性を完全に喪失する可能性が高い。

そこで、本研究では、超長期に及ぶ震源や発生確率に関する議論を避け、任意の人的被害を生じる構造耐震判定指標によって地震を特定する。具体的には、同判定指標の最小値を二次診断の基準となる0.6とした上、健全な状態で被災した際に、群で死者を1名生じる連続確率分布の標準偏差を収斂計算により求め、同分布に基づく乱数によって、各建築物の構造耐震判定指標を設定する。これは、第一に、力学特性の劣化を一切生じさせない様な完全な修繕は期待できないこと、第二に、劣化を前提に全壊棟数を閾値とする場合、復興のキャパシティ等で同数を定義する必要を生じるが、経済的負荷の参照が不可避であり、耐震性を検討する前提と矛盾すること、第三に、死者を基準とすると、0名は劣化の全否定で前述の通りであり、また、小数点以下の死者は存在しないことから、結果的に1名の死者も出さないという技術的思想に至ったものである。なお、分布の種類は、数学的な取扱いを簡単にするために、対数正規と仮定する。同指標は経年時も同じとし、鉄筋の腐食状態に応じて、建築物の性能を推移させ、経年劣化の影響を具体化する。

但し、既往の知見に基づく制約の範囲では、想定した人的被害が再現されない建築物群もある。行政がM7クラスの地震を想定していることに起因するが、原理上、地球上の全ての断層がずれればM10クラスの地震が発生する可能性が指摘されており<sup>6-16</sup>、断層に関連しない揺れも対象にすると、地球表面に残る隕石の衝突の痕跡によれば、M10を上回る事態も想定される<sup>6-17</sup>。そこで、全ての可能性を認めて、地震学的な一切のアプローチを避け、構造耐震判定指標の上限は考慮しないものとする。

当然、本仮想地震は人的被害を特定する群毎の方便であって、現象としての普遍性はなく、耐震性の推移等の相対比較に限定して成立する概念である点に留意を要する。

## (2)人的被害

人的被害は、鳥取、東南海、南海、福井、兵庫県南部地震に基づく中央防災会議の手法や静岡県被害想定等を補正した全壊棟数と非木造建築物内の死者数の関係、兵庫県南部地震における市区別の揺れ・液状化による建築物全壊率と非木造建築物内の重傷者数の関係に関する6-3～6-7式によって予測する<sup>6-10</sup>。なお、全壊は、地震時に倒壊又は崩壊する危険性が高い状態の目安として行政が推奨する、構造耐震指標を構造耐震判定指標で除した値が0.5以下になる場合とする。

$$D_n = t_n \cdot NC_n \cdot S_n \quad (6-3)$$

$$t_n = 0.0084 \cdot (P_{n0}/B_n)/(P_{w0}/B_w) \quad (6-4)$$

$$S_n = S_{ne}/S_{n5} \quad (6-5)$$

$$NI_n = S_{ne} \cdot RI_n \quad (6-6)$$

$$RI_n = 0.0309 \cdot RC_n \quad (6-7)$$

ここで、 $D_n$ ：死者数（非木造）、 $t_n$ ：全壊建築物一棟当たりの死者発生割合（非木造）、 $NC_n$ ：区市町村別のゆれによる全壊棟数（非木造）、 $S_n$ ：建築物内滞留率（非木造）、 $P_{n0}$ ：夜間人口（非木造）、 $B_n$ ：建築物棟数（非木造）、 $P_{w0}$ ：夜間人口（木造）、 $B_w$ ：建築物棟数（木造）、 $S_{ne}$ ：発生時刻の建築物内滞留人口（非木造）、 $S_{n5}$ ：朝5時の建築物内滞留人口（非木造）、 $NI_n$ ：重傷者数（非木造）、 $RI_n$ ：重傷者率（非木造）、 $RC_n$ ：ゆれによる建築物全壊率（非木造）

6-3～6-7式に必要な新宿区を想定した定数は、行政等の調査<sup>6-18)～6-21)</sup>に基づいて、Table6-2の通り定める。非木造建築物内のRC造とS造の比率は同調査報告に記載されていないので、着工量と経験的耐

Table6-2 Data for seismic evaluation<sup>6-18)~6-21)</sup>

Night-time population of employee (persons)	137,299
Night-time population of students (persons)	31,090
Night-time population of others (persons)	77,018
Rate of persons at home at 5:00 a.m. (%)	93.5
Area of wooden houses ( $\times 10^4 \text{m}^2$ )	392,660
Area of non-wooden houses ( $\times 10^4 \text{m}^2$ )	181,227
Number of wooden buildings (buildings)	403,748 $\cdot A^{\dagger 1}$
Number of non-wooden buildings (buildings)	433,017 $\cdot A^{\dagger 1}$
Staying rate of employee in buildings at the outbreak (%) $\dagger 2$	76
Staying rate of employee in buildings at 5:00 a.m. (%)	3
Staying rate of students in buildings at the outbreak (%)	87
Staying rate of students in buildings at 5:00 a.m. (%)	0
Staying rate of persons at home at the outbreak (%)	26.3
Number of buildings in the ward (buildings)	50,478

$\dagger 1$  : Building numbers are made in proportion to total floor area.

$\dagger 2$  : It is postulated that all working employee stay in buildings.

用年数等に基づく筆者らの方法<sup>6-22)</sup>により、現在の全国の非住宅系の建築物の構造の割合を試算して得た2:3と仮定する。また、建築物群の構成は前章に準じ、棟数のみ新宿区と整合する様に比を乗じて割増し、予想被害の規模を調整する。

#### 6.4 地震時被害の試算

本節では、上述してきた手法に基づいて、RC造建築物群の地震時被害を試算する。計算のフローを、Fig.6-3に示す。

##### 6.4.1 健全な建築物群の地震時被害

解析開始時点の構造耐震指標  $I_s$  のヒストグラムを、柱帯筋の間隔毎に、Fig.6-4に示す。ビンの幅は、帯筋間隔 100mm の解析結果に対し、Freedman-Diaconis の手法を適用して得る。同図には、中桠らが調査した静岡県内の未補強の公共建築物 1,615 棟、耐震補強後の 242 棟の構造耐震指標 2.5 以下の分布を、百分率に換算して併記する<sup>6-23)</sup>。

本文で得られたピークは、帯筋間隔 100mm は中桠らの耐震補強後の建築物群のピーク近傍、同 150mm は中桠らの二建築物群のピーク間に位置する。構造耐震指標が 0.6 未満の建築物は、中桠らが未補強で 39%、補強後でほぼ 0%であるのに対し、本文の帯筋間隔 100mm は、同指標が 2.5 以下の建築物群の 15%、同 150mm は 21%を占める。また、本文の建築物群は、構造耐震指標が 1.5 超の領域が中桠らの二建築物群より多い。建築物を方形の均質なグリッドで構成した上、断面寸法や配筋量等を、正規乱数ではなく、現在の設計基準の一般的な範囲から無作為に設定し、合理化のプロセスを設けなかった結果が、分散に反映されたものと考えられる。

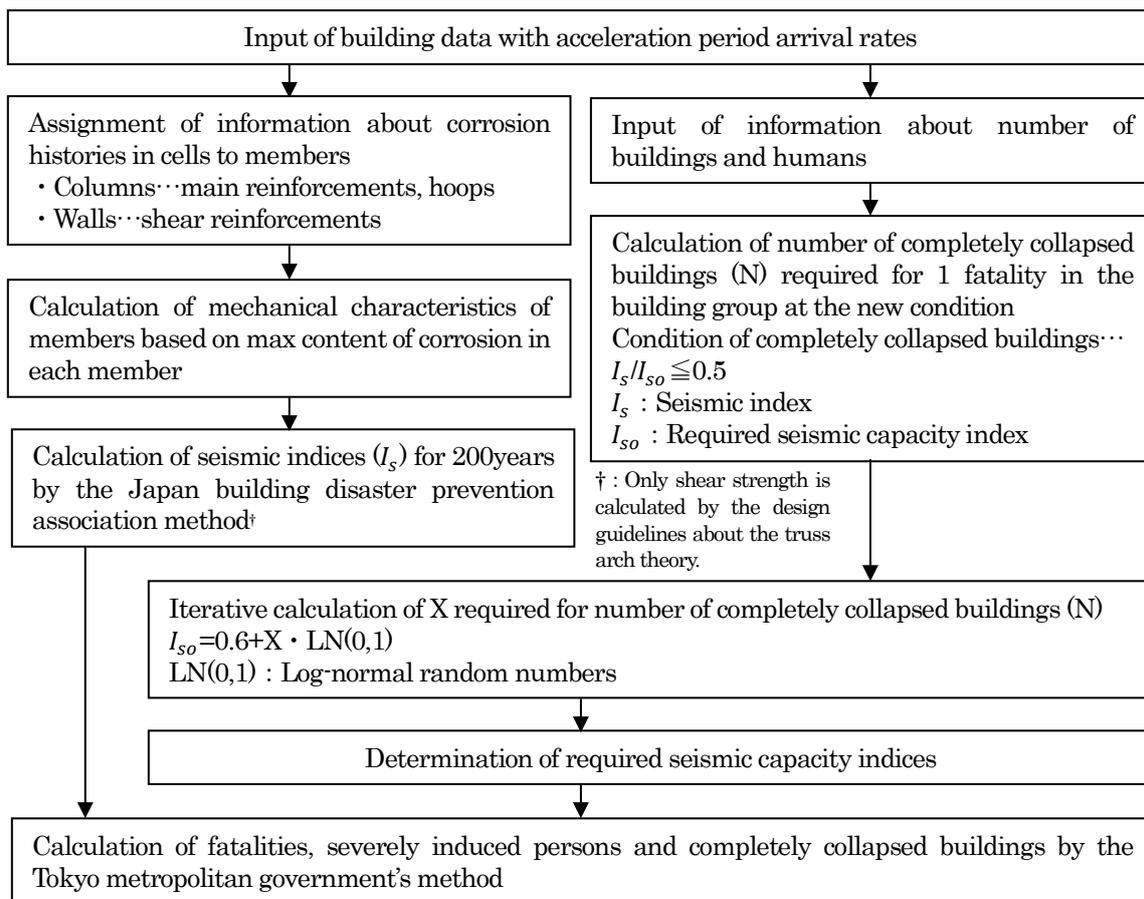


Fig.6-3 Flow of calculation of damage of the virtual earthquake

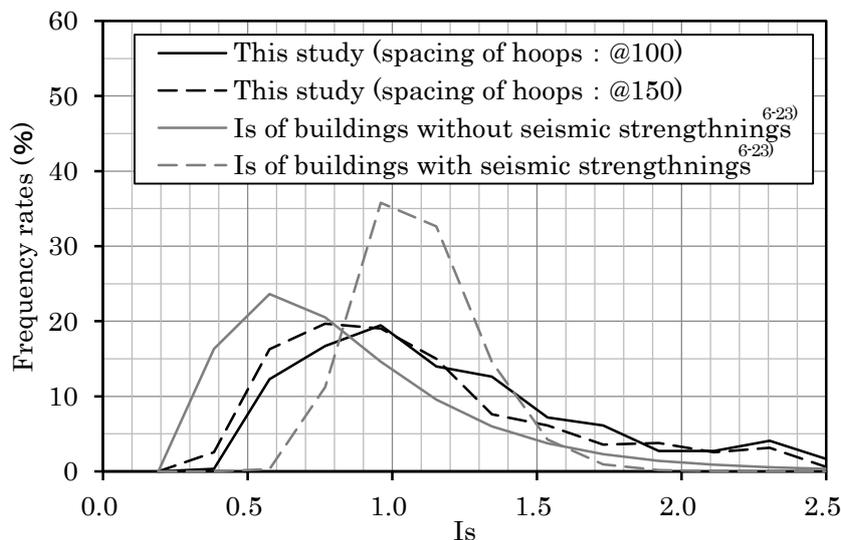


Fig.6-4 Frequency rates of  $I_s$

次に、構造耐震判定指標の統計量に基づいて算出した、帯筋間隔毎の人及び建築物の予想被害の分布を Fig.6-5 に示す。ビンの幅は、Fig.6-4 同様に、帯筋間隔 100mm の解析結果に対し、Freedman-Diaconis の手法を適用して得るが、併せて、頻度 0 の域が出ないことを条件とした。死者数が 1 名出る際の標準偏差は帯筋間隔 100mm で 0.17、150mm で 0.14 となり、1,000 本のパスを与えた。なお、Table6-2 に基づく死者が 1 名出る全壊棟数は、区内 50,478 棟中の非住宅系 RC 造建築物 10,449 棟に対し 311 棟で、兵庫県南部地震の西宮市の新耐震以降に建設した建築物の被害のプロットの震度 6 弱相当である。

結果としての Fig.6-5 の被害の分布であるが、標本数が少ないため、多峰性を呈しているものの、最大のピークの位置は、帯筋間隔に依らず 1 名弱である。

また、全壊棟数は 715 棟以下、重傷者数は 85 名以下で変動するが、死者数は 2.3 名以下の範囲に分布しており、地震動の不確実性に対する死者数の感度は鈍いことが分かる。なお、帯筋間隔 150mm の分布幅が比較的小さいのは、劣化前の人的被害予想の平均が 1 名になる様に補正した影響である。

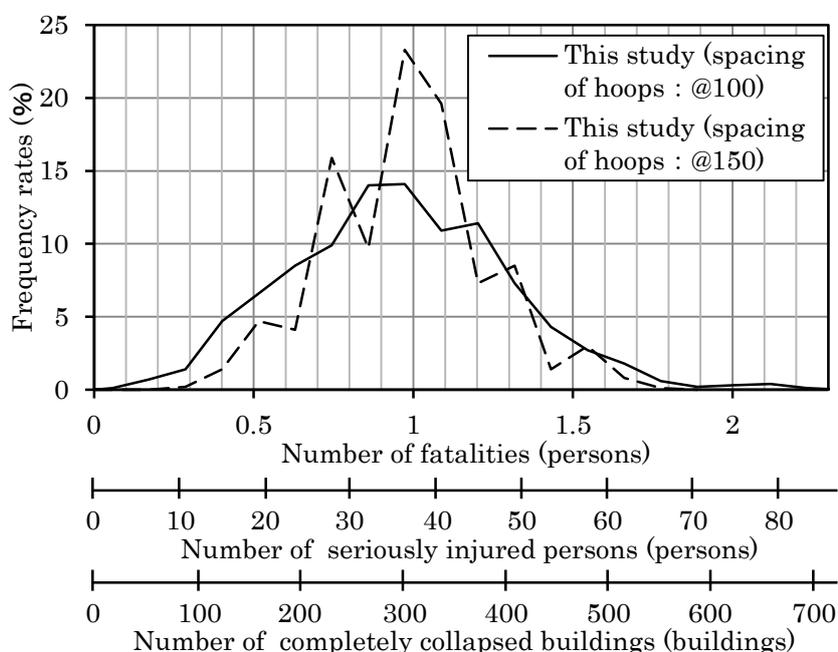


Fig.6-5 Frequency rates of human and building damage

#### 6.4.2 経年劣化した建築物群の地震時被害

構造耐震指標の平均値, 3, 10%の上方及び下方信頼限界の推移を、帯筋間隔と修繕の有無毎に Fig.6-6 に示す。図中、修繕しない建築物群の構造耐震指標はほぼ線形に漸減するが、修繕する建築物群ではバイリニア状に推移し、100~150年以降は安定する。後者の200年間の変量は僅かで、各信頼限界の差に照らすと小さい。

ここで、鉄筋の腐食量の影響を確認するため、各図の3%上方信頼限界及び平均値の履歴と残差の最も近い建築物のデータに関し、重量減少率の推移を Fig.6-7 に図示する。対象とする面は、外壁、柱の外皮、外壁、柱及び内壁の屋内側表面、セルは解析期間中に腐食量が最大になるセル、鉄筋は表層から二段目までとする。この際、帯筋間隔の影響は表面化しない。また、一層目と二層目の最大値は必ずしも同じ部位で確認されるわけではないこと、腐食量に変動を反映したことから、重量減少率と鉄筋の位置に定

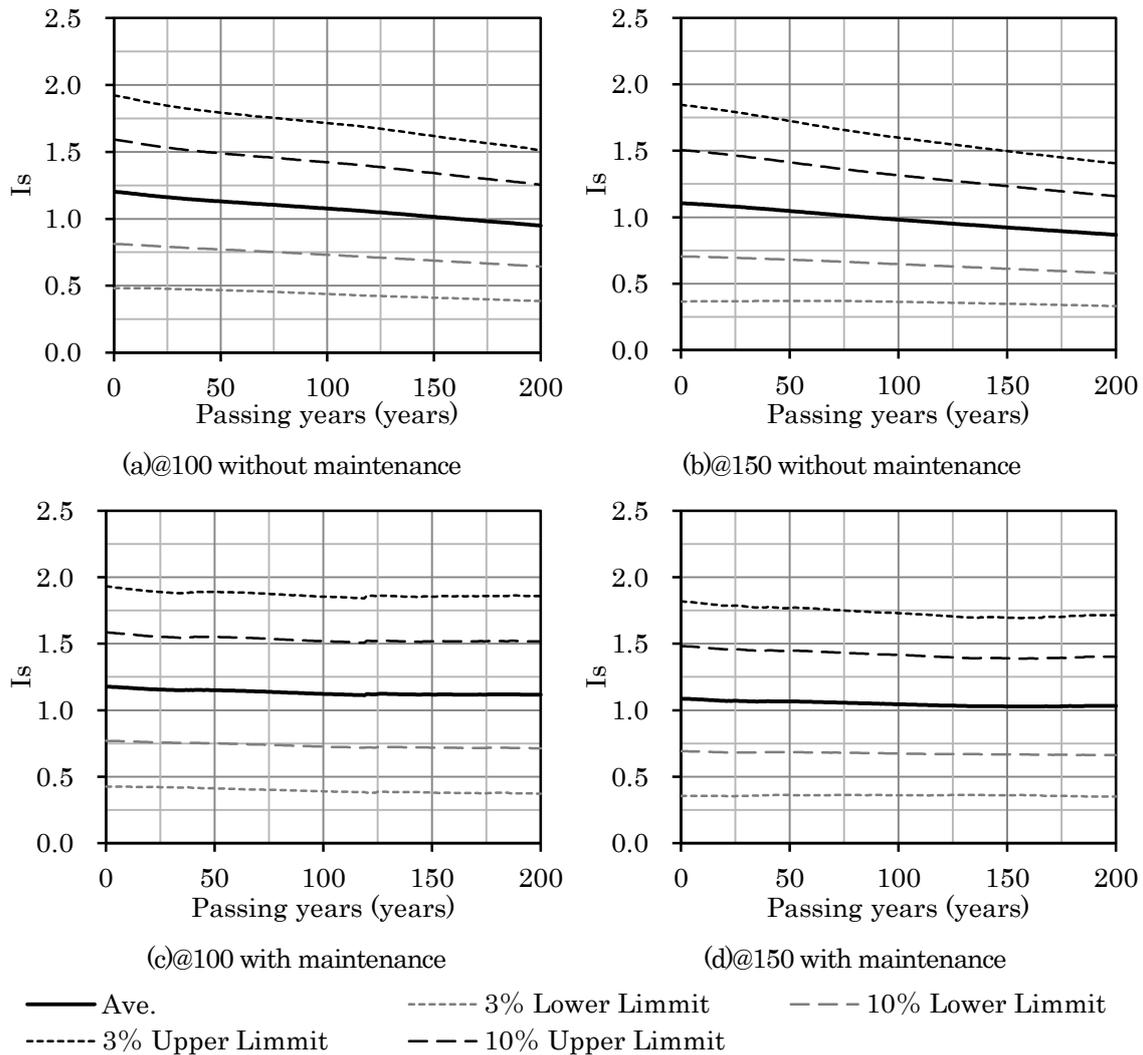


Fig.6-6 Transition of  $I_s$

性的な相関はない。

構造耐震指標の大小においては初期値が支配的であり、重量減少率の影響を確認し難いが、総じて、非修繕時の重量減少率は5%以下、修繕時は3%以下で、ともに横筋の乾燥収縮ひび割れ近傍の腐食量が具体化する壁の二層目の配筋で最大となる。

また、Fig.6-6は建築物群の解析結果であるため表面化しないが、Fig.6-7には修繕による重量減少率のクリフエッジが認められ、修繕の閾値は修繕時の二建築物共に3%より低い。因みに外壁の重量減少率の折れ点は樹脂注入の影響である。実際は、より多くの鉄筋の同率を解析に供しているため、一建築物において修繕の影響はより緩やかに作用する。

なお、修繕の有無に依らず、帯筋間隔の違いによって、劣化過程の概形に差異は認められず、死者数の変換時に同じ代表値を目指すため、以後は同間隔100mmの結果のみを論じる。

その上で、新築時の構造耐震指標に対する同指標の比 $I_s(t)/I_{s,ini}$ の推移を、修繕の有無毎にFig.6-8に示す。信頼限界はFig.6-6中の各限界の値の比を求めたもので、比自体の信頼限界ではない。

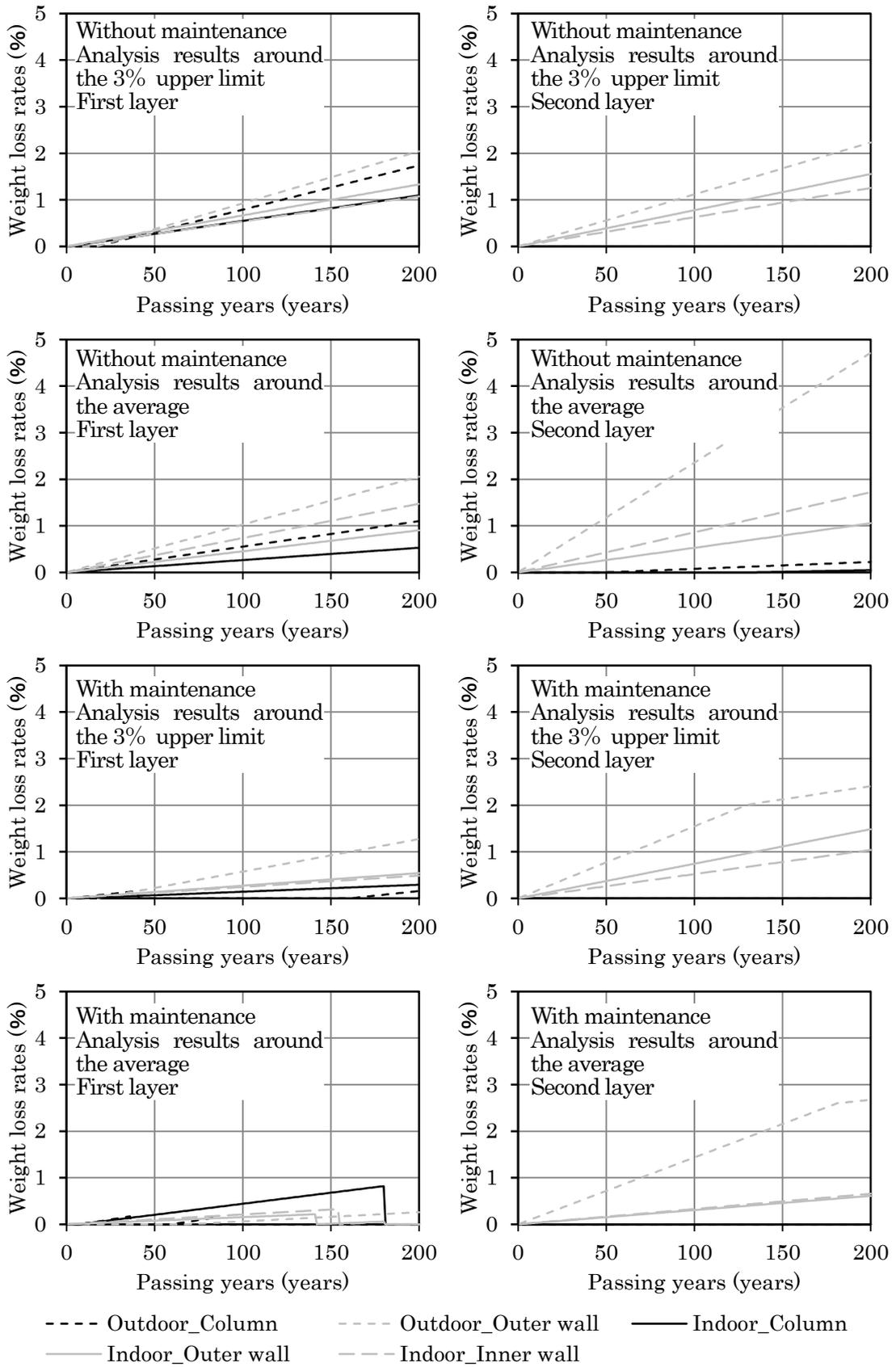


Fig.6-7 Samples of weight loss rates of reinforcements

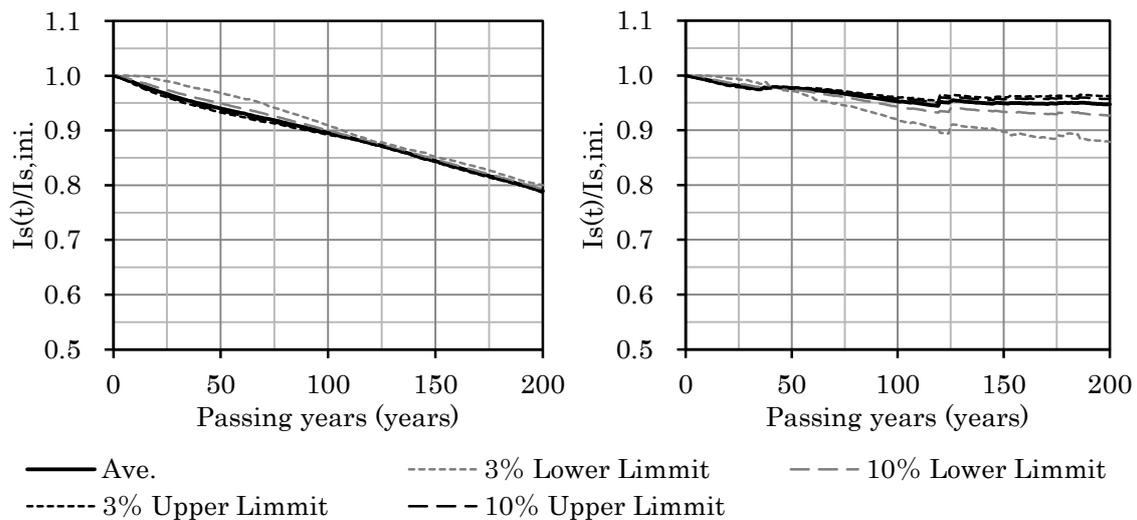


Fig.6-8 Transition of  $I_s(t)/I_{s,ini}$ .

同図より、非修繕時は200年経過時点の $I_s$ が20~22%、修繕時は4~12%低下することが分かる。前者で100年以前、後者で50年以後の分布幅が大きいのは、劣化が顕在化する過程の差異と劣化後の修繕仕様の差異の影響である。

ここで、供用開始直後から指標が変動するのは、壁のひび割れ部分の発錆を解析開始時点とした上、局所的な腐食により部材の性能を代表した影響が大きい。コンクリートの乾燥収縮ひび割れの数年に及ぶ進展と仕上材への伝搬、ひび割れの概形に起因する外的要因の拡散性状の差異、水の滞留、局所的劣化と部材性能の相関をモデル化すると、より緩慢に進展するため、あくまで下限評価として理解する必要がある。但し、3%以上の上下方信頼限界で比較する限り、仕上材の多様性に起因して劣化速度に差がある上、並列系の解析を行ったため、非修繕時も日本建築学会の保有水平耐力余裕度のアンケート<sup>6-24)</sup>で得られた平均的な余裕度に相当する2割程度の耐力低下に留まる点にも留意を要する。

次に、死者数、重傷者数、全壊棟数の平均値、3、10%の上方及び下方信頼限界を、修繕の有無毎にFig.6-9、6-10に示す。Fig.6-9において、非修繕時の死者数を整数で評価すると、3%下方信頼限界で200年間0名、同10%で130年頃に0名から1名、平均で150年頃に1名から2名、10%上方信頼限界で155年頃に2名から3名、3%上方信頼限界で160年頃に3名から4名に増加する。重傷者数換算の増分は200年間で25~53名、全壊棟数換算の増分は204~443棟に達する。また、Fig.6-10において、修繕時の死者数を同様に評価すると、3、10%下方信頼限界で0名、平均は1名、10%上方信頼限界は2名、同3%は3名である。即ち、修繕した場合、死者数は200年間変わることがなく、地震動のばらつきの影響が支配的であると言えるが、重傷者数は0~15名、全壊棟数は45~116棟増える。

Table6-2に準じて計算すると母数は1万棟にのぼるが、非修繕時の全壊棟数の増分が経年によって数百棟に達し、修繕時の増分は百棟以上減ることから、群に対する修繕の影響が類推される。また、Fig.6-5の人的予想被害の分布域をピークからの増減で解釈すると、平均死者数で±1名、平均重傷者数で±40名程度のため、修繕しない建築物群における経年劣化の影響は、健全な建築物群における地震時被害の代表値からの上方の分散と同等以上と言える。重傷者数と建築物の全壊棟数の増加については、コンクリート表面のひび割れの発生状況に応じた事後対応となるため、腐食による耐力低下が前提となることによるのは自明である。

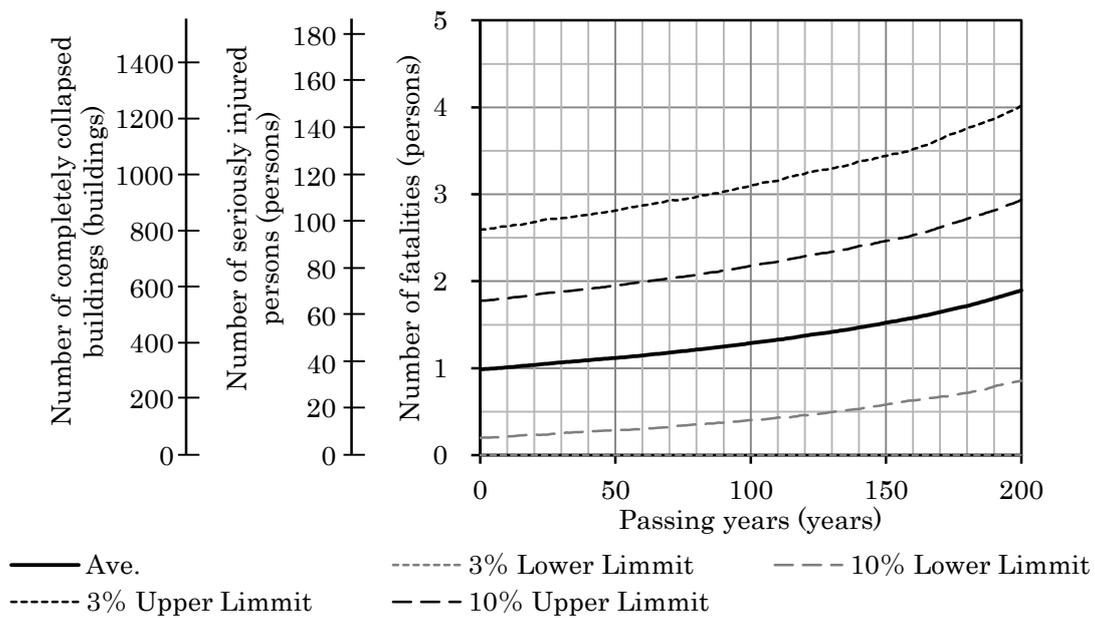


Fig.6-9 Transition of damage of buildings without maintenance

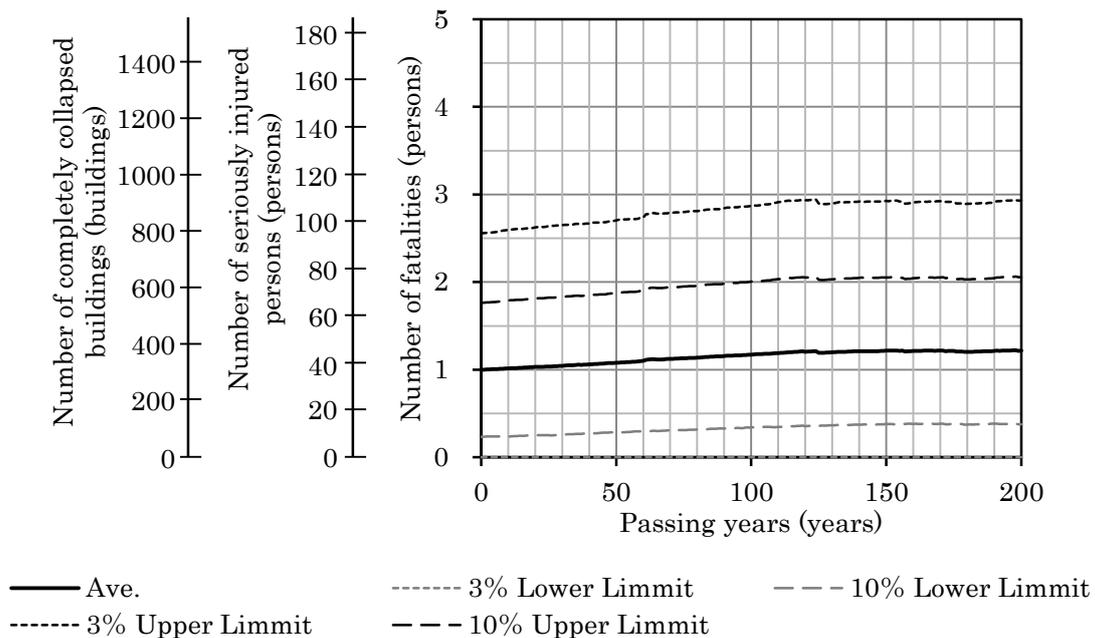


Fig.6-10 Transition of damage of buildings with maintenance

保有水平耐力余裕度を勘案すると、一般的な設計を行う限り、経年劣化がクライテリアに関わる可能性は低いが、地震の不確実性を前提にすると、経年劣化の影響が不可避であると言える。

なお、Fig.6-9の非修繕時の予想被害が放物線状に増加するのに対し、Fig.6-10に示す修繕時は当初から非修繕時の結果より増加速度が小さい上、修繕を選択する建築物が増える高経年時は被害者数が停滞し、バイリニア状の履歴になる。仮想地震と地震時被害の設定は既往の統計に基づく帰納的なものであるため、関係者の合意に対する依存度は大きい。修繕しない建築物の群内の割合によって、地震時予

想被害のリスクカーブの概形が明らかに変わるため、建築物群単位の施設運営における意思決定の判断材料としては有意であると考えられる。

### 6.4.3 耐用年数の定義

本研究の命題である耐用年数に回帰すると、本解析は帰納的であるため、原則として定性的な評価に終始するが、建築物群の仕様に言及可能な人間、企業、団体、行政等が、建築物群に推奨する修繕仕様に積極的に関与し、トランスディシプリナリーを実践すれば、死者数、重傷者数や全壊棟数が閾値以下になる期間を耐用年数とすることは、合理性があるものと考えられる。

但し、同年数に法的拘束力を期待するのは困難であり、実際に運用する際は、建築物群全体の推定被害が閾値に達した時点で、仕様が類似し、同程度に危険な複数の建築物を抽出し、社会的価値を勘案した上で、検査頻度の増加等の経済的なペナルティを付与し、建物所有者を更新の意思決定に誘導する環境を醸成するための、間接的な概念になるものと考えられる。

## 6.5 超長期修繕プロセスの考察

### 6.5.1 超長期修繕プロセスの検討方針

前節までに、群単位の環境及び経済性の代替指標としての耐震性を、一定の不良率を許容する全体論の見地からモデル化し、建築物群の耐用年数としての有意性を示したが、耐震性だけを根拠に、当該年数で建築物群を一括で棄却する街たたみに至ることはない。従って、修繕時も経年に伴い増加した重傷者数や全壊棟数は、建築物群に居住する住民に直接影響する問題となる。

仕様や志向のモデル化において、群単位の考察を前提としたため、特異値の信頼性は低いが、本条件設定の範囲で確認される超長期修繕プロセスの留意点について、本研究で用いた経年劣化に関するマルチプルなリスクの比較を通じて、以下に考察する。

### 6.5.2 中性化確率と構造耐震指標の対初期値比

まず、全建築物に関し、加速期到達率の前段階である中性化確率と $I_s(t)/I_{s,ini}$ の相関を確認する。前者の対象は修繕しない建築物群の鉄筋位置の中性化確率が全部材又は柱壁で最大になるセルの確率とし、鉄筋位置の最大中性化確率が等しいセルが複数ある場合は、劣化速度が最速のセルの値を用いる。視認性の向上のため、20年毎のデータを抽出し、Fig.6-11に示す。

図中、対象部材に依らず、 $I_s(t)/I_{s,ini}$ が1及び中性化確率が100%の部分にデータが集中し、L字状の高頻度の帯を形成している。鉄筋位置の中性化後の腐食速度が耐力低下に支配的であり、中性化の最大値が100%に達しても耐震性が低下しない建築物が多いためである。

一方、日本建築学会の関連指針<sup>6-25)</sup>では不確実性に配慮して中性化確率3%を維持保全限界とするが、同時点の $I_s(t)/I_{s,ini}$ は一部で1.0を下回っている。また、 $I_s(t)/I_{s,ini}$ の最小値は、Fig.6-8では全ての条件で8割程度に留まるのに対し、中性化確率100%の時点で3割未満に達する。

そこで、中性化確率3%未満のデータのうち $I_s(t)/I_{s,ini}$ が最小になる建築物、及び、 $I_s(t)/I_{s,ini}$ が全体で最小になる建築物に関し、屋内外の壁柱の各面の層毎の最大腐食減少率を示すセルの同率の推移をFig.6-12に示す。Fig.6-7と比べて絶対量に特異性はなく、壁の重量減少率が他部材より大きい程度である。両建築物はともに1スパンであるため、部材内の鉄筋の最大腐食量によって、部材の力学特性を決定する下限評価により、建築物の耐震性が一鉄筋の局所的な腐食の従属下になったものと考えられる。

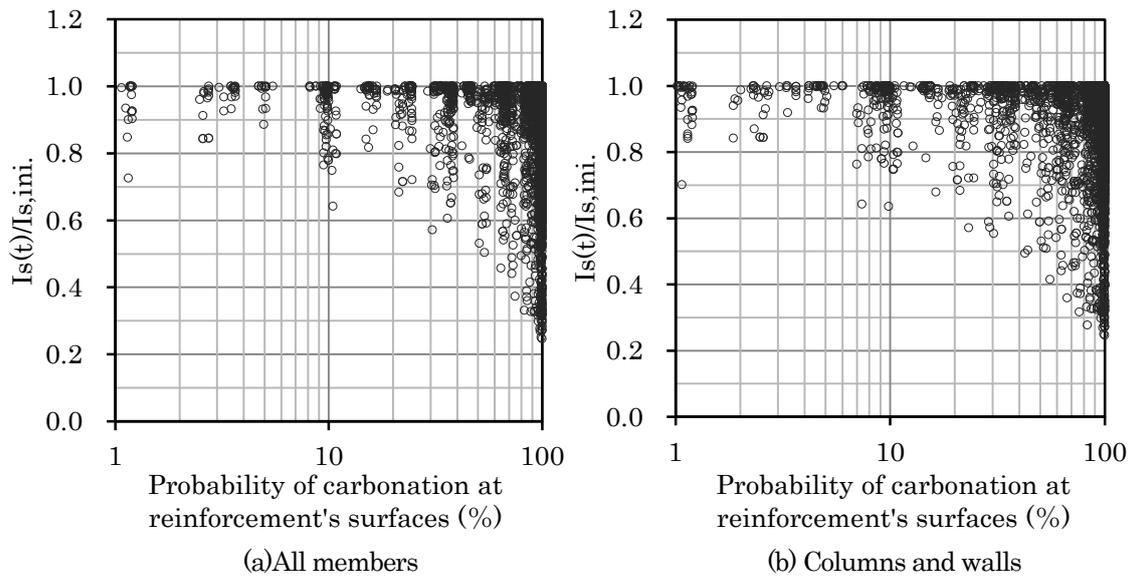


Fig.6-11  $I_s(t)/I_{s,ini.}$  and probability of carbonation

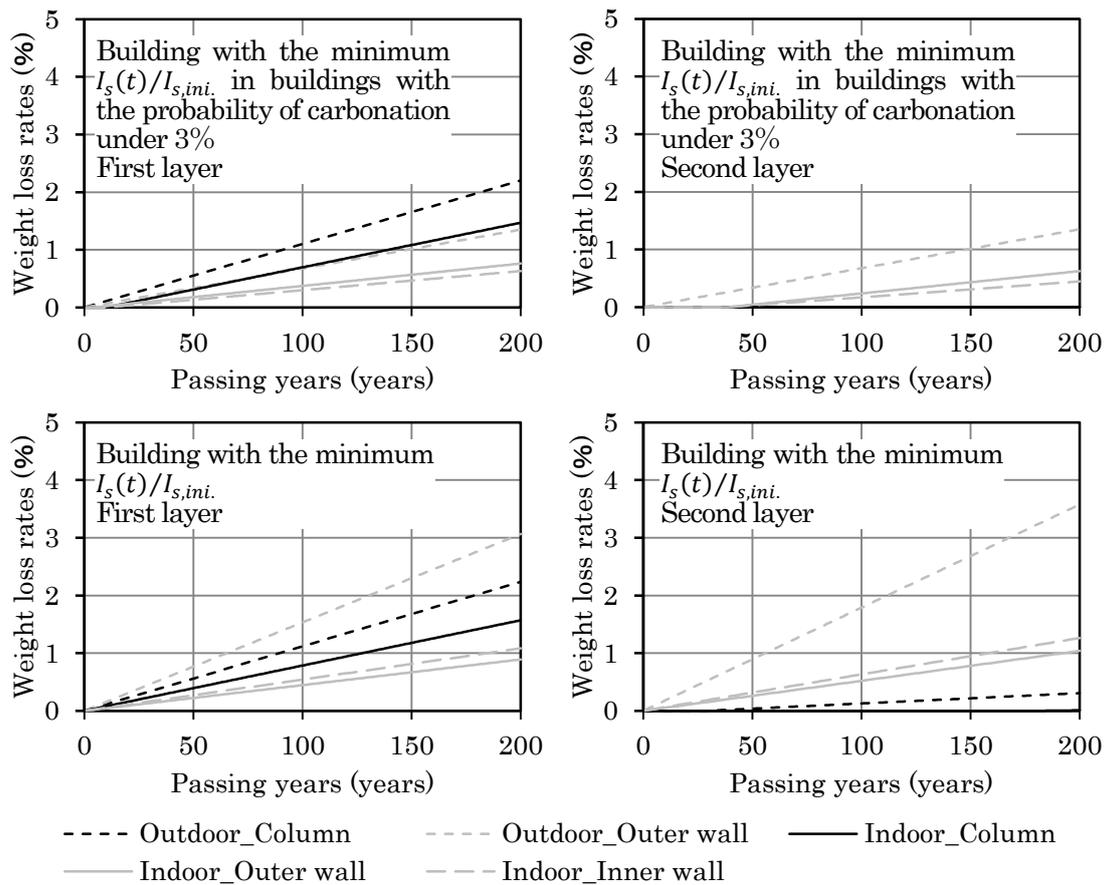


Fig.6-12 Weight loss rates of reinforcements in buildings with the extremal value in building group without maintenance

実在時は、損傷が著しく、立入禁止措置がとられ、人的被害と直結しない可能性が高いが、確率論的に発生するこれら低耐久の建築物の存在は、予防保全の観点からは、中性化深さの管理に加え、ひび割れの早期修繕が重要であることを示唆している。

なお、Fig.6-11 に回帰し、対象部材を柱壁に限定すると、かぶり厚さの比較的小さい床が対象外になるため、中性化確率が全般に小値にシフトするが、上述した傾向は変わらない。

### 6.5.3 加速期到達率と構造耐震指標の対初期値比

次に、修繕しない建築物群の加速期到達率に対し同様の比較を行い、Fig.6-13 に示す。全部材に関し、中性化確率同様に高頻度のL字状の帯が認められるが、経年数の上限に起因するもので、原則として、耐力低下する部材の占有率の増加に伴い、 $I_s(t)/I_{s,ini.}$ の幅は広がる。

一方、柱壁に関し、 $I_s(t)/I_{s,ini.}$ が0.8未満のデータが比較的小さい加速期到達率まで分布し、見かけの負の相関は無い。解析上劣化過程を反映する柱壁で両指標の相関が低いのは、かぶり厚さが小さい床が対象外になり、先行ひび割れ近傍の鉄筋の腐食が $I_s(t)/I_{s,ini.}$ だけに作用する上、一般部の腐食が別の機構で進行する壁の影響が強まるためである。

並列系の評価では、鉄筋の腐食した部材の占有率が支配的になるので、一般部の腐食が比較的早期から計上され、経年数の重みづけの作用をする床の影響は重要と考えられる。また、二次診断では、修繕の影響は考慮せず、柱壁の物性に依存する保有性能基本指標と形状指標の積に全部材の劣化度に基づく経年指標を乗じるが、Fig.6-13における全部材に対する $I_s(t)/I_{s,ini.}$ の下限と加速期到達率の明瞭な負の相関に照らすと、超長期においても、劣化機構を超越して、経年指標の技術的思想で高い相関が得られると言える。

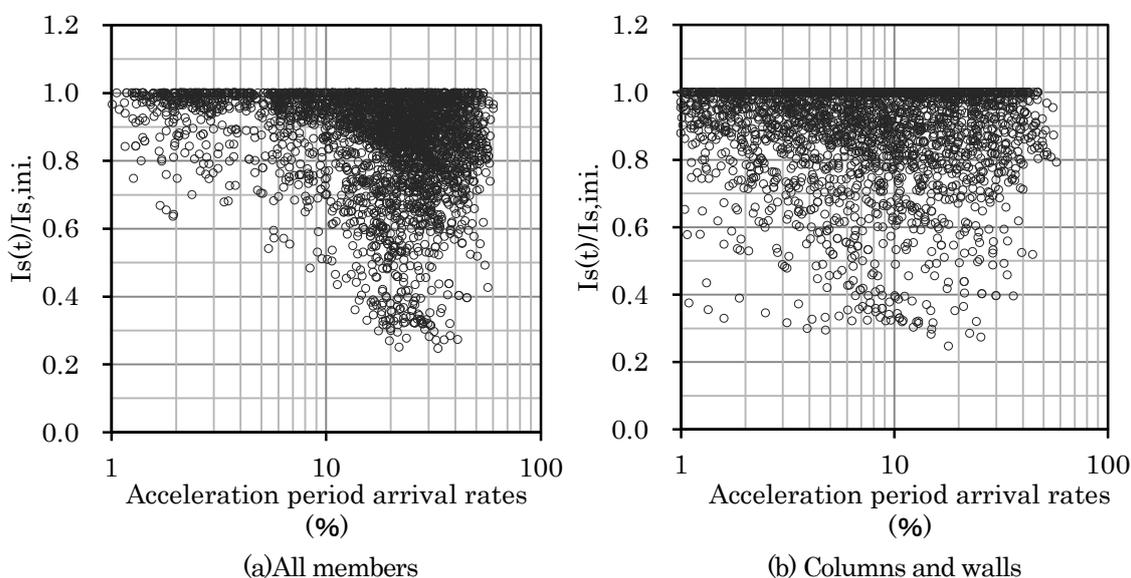
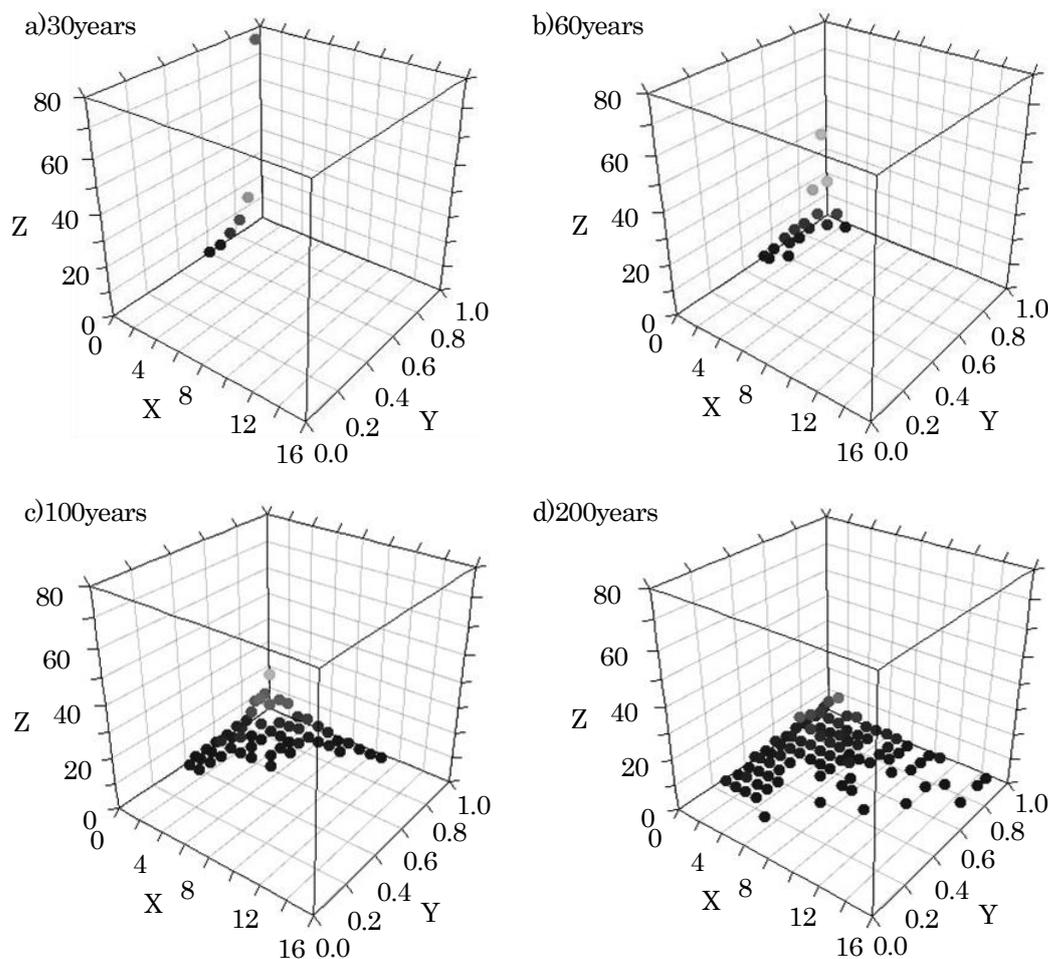


Fig.6-13  $I_s(t)/I_{s,ini.}$  and acceleration period arrival rates

ここで、超長期では修繕の影響が不可避であるため、修繕する建築物群の加速期到達率と $I_s(t)/I_{s,ini.}$ の関係性を確認する。複数の修繕仕様の影響が加わると、Fig.6-13 の相関がより難解になるのは自明のため、Fig.6-14 に示す 30, 60, 100, 200 年経過時の二次元ヒストグラムによって、時間軸を勘案した比



X: Acceleration period arrival rates(%), Y:  $I_s(t)/I_{s,ini}$ , Z: Frequency rates(%)

Fig.6-14 2 Dimensional frequency rates of seismic indices

較を行う。なお、対象部材は全部材、ビンの幅は経年数、指標毎に Freedman-Diaconis 法で得た最大値とした。

同図より、局部的腐食で部材性能を代表したため、 $I_s(t)/I_{s,ini}$  の下限が非修繕時に近いこと、同一経年数内の加速期到達率と  $I_s(t)/I_{s,ini}$  に正の相関を呈する矛盾があること、ピークの頻度は日本建築防災協が二次診断の適性の判断を求めている経年数 30 年から 60 年にかけて半減し、分布幅は 100 年以降急激に増加すること、各経年数内の  $I_s(t)/I_{s,ini}$  の最小値と経年数には負の相関があることが分かる。

参考に、全期間で  $I_s(t)/I_{s,ini}$  が最小となる建築物、経年数 100 年において、加速期到達率が最大及び最小になる建築物の屋内外の柱壁の鉄筋層毎の最大重量減少率を示すセルの同率の推移を、Fig.6-15 に示す。全期間で最小を示す建築物の鉄筋の重量減少率は、解析が終了する経年数 200 年近傍で一度修繕によるクリフエッジを示しているが、基本的に減少率が漸増しており、非修繕時と同じである。

また、経年数 100 年における加速期到達率の極値を示す建築物の重量減少率に明確な差はなく、二次診断で直接扱わない床や梁、特に曲げひび割れにより、腐食が先行する床の鉄筋の腐食が影響を及ぼしていることが分かる。

実質、加速期到達率から直接耐震性を評価できないのは、非修繕時の留意事項に加え、修繕の判断基

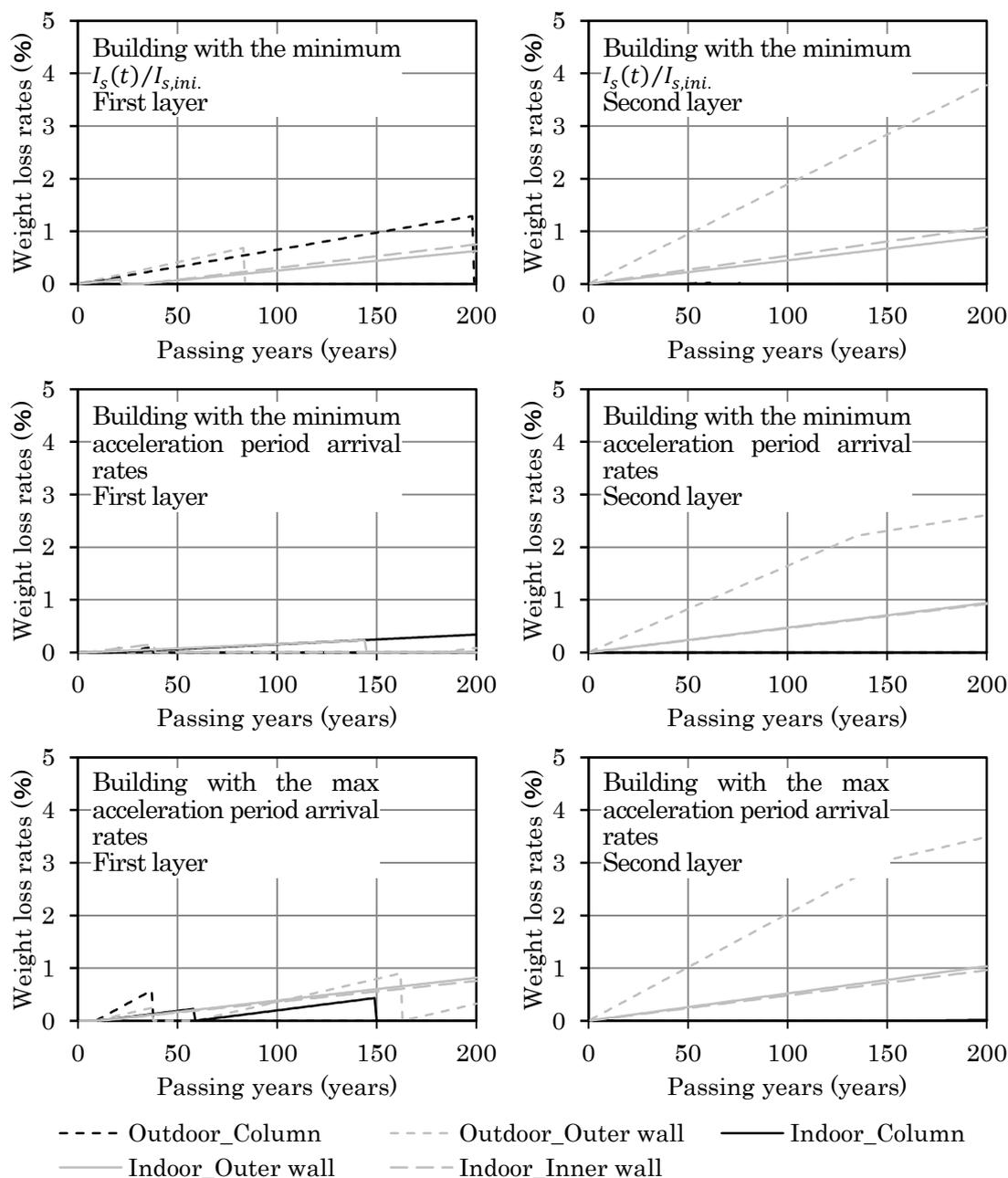


Fig.6-15 Weight loss rates of reinforcements in buildings with the extremal value in building group with maintenance

準である加速期到達率と、鉄筋の腐食した部材の占有率に支配的な経年数に相関がないため、当然である。同占有率に関わる建築物の空間構成は乱数で構成したが、超長期の群単位の検討では決定的になるため、今後の課題である。

なお、経年指標で標準的に扱う経年数 30 年では、 $I_s(t)/I_{s,ini.}$  の大勢は健全なビンに属し、加速期到達率の分布幅は狭いが  $I_s(t)/I_{s,ini.}$  の下限も大きいため、複数の劣化の兆候に基づく下限評価による経年指標の概念が十分適用出来る。一方、経年数 100 年以上では、分布幅が大きい上、 $I_s(t)/I_{s,ini.}$  の下限も小さく、下限評価は不合理である。超長期では、建築物単位の変状だけで棄却を結論するのは困難なため、

地震時の予想被害と環境、経済性を勘案して、修繕周期や仕様の指針を示した上、修繕費用と人員を群単位で確保し、各建築物の個々の不具合を都度確実に修繕しつつ、マルチプルな耐用年数の概念に基づき、総合的に棄却の要否を判断する必要がある。

即ち、本研究で示してきた、超長期経年劣化による建築物群のリスクの確率論的考察が、日常の管理の円滑化のためにも有効な可能性を確認できたと言える。

## 6.6 小結

本章では、前章で得た RC 造建築物群の加速期到達率を、日本建築防災協会の二次診断法に供して、新築時の人的被害に関するシナリオを再現する仮想地震が発生した際の被害の推移を解析し、超長期経年劣化の影響を、確率論的に考察した。

棟数、人口動態を、夜間人口が東京 23 区の間になる新宿区に準じた建築物群に、新築時の被災で群内に 1 名の死者が発生する地震を与え、直近の出費や手間を抑制する経済志向の修繕シナリオに則して劣化する過程の人及び建築物の予想被害の平均値、3、10%上下方信頼限界を試算した結果、非修繕時は 100 年以降 200 年までに、経年劣化により死者が 1 名増えるが、修繕時は人命に関わらないこと、非修繕時の重傷者数は 200 年間で数十名増え、修繕時も重傷者の増加が避けられないこと、非修繕時の全壊棟数は経年により 200~400 棟増え、修繕時は同数が百棟以上減ること、地震時の予想被害のリスクカーブが修繕の普及率によって変わること等を確認した。

また、建築物群の仕様に言及可能な人間、企業、団体、行政等によるトランスディシプリナリーを前提に、建築物群全体の死者数、重傷者数が閾値に達した時点で、仕様が類似し、同程度に危険な複数の建築物を抽出し、社会的価値を勘案した上で、検査頻度の増加等の経済的なペナルティを付与する、間接的な耐用年数の概念を示した。

更に、全データに関し、中性化確率、加速期到達率と構造耐震指標の対初期値比の比較を行い、予防保全上、建築物の空間構成によっては、ひび割れの早期修繕が必要であること、群単位で修繕周期や仕様の指針を定め、予算と人員確保により、都度の修繕を徹底した上、総合的に棄却を判断するのが望ましく、本法に示す解析的手法が有効であることを、定量的に確認した。

本章の信頼性については、二段階で論考する必要がある。即ち、解析に供した耐震診断の手法や人的被害の算定法等の工学的手法の信頼性と、これを妥当とした場合の本研究で得られる解の信頼性である。

基本的に、耐震診断法は、設計用の判断材料であって、先の大戦以来の貴重な調査・研究の成果を参考にした安全側の意思決定が随所にあるため、一建築物の状態を厳密に再現するものではない。1977 年に初版が刊行された後、耐震改修の効果が過去の大地震で立証され、広く普及しているが、最新の研究動向を反映した改定は現在も続けられている。

本研究では、材料定数に実験の平均値を採用し、俯瞰的ではあるが、実験と解析の力学特性の相関を補正する仮定も与えることで、材料に関わる設計的な要因を排除している。また、構造に関わる設計的な要因については、同法の改定が継続されている実情に照らすと、検証プロセスが機能していると言えるので、その精度を非難されることはない。超長期的時間軸への適性については検証されていないが、高次の課題とした疲労現象であり、今後の課題である。

なお、人的被害の算定方法については、兵庫県南部地震を含む関西の地震時被害の統計に基づいて、本試算で示した東京都他、全国の被害を扱うことには各論がある。しかし、内外装及び設備の破壊モードや避難時の群衆の行動、隣接建築物の破壊状況、火災や液状化、避難時との区分を含む人的被害の集

計方法他、課題が山積する中、中央防災会議が数度の報告書において採用し、合意形成した同手法は、活動が継続していることも勘案し、参照するシナリオとして妥当と考える。

次に、本研究で新たに仮定した内容であるが、部材内の鉄筋の最大腐食量に基づいて、部材の物性を特定した点は、事実との乖離がある。少なくとも柱は1本につき、4本以上の主筋によって支持されており、帯筋が全面的に錆びる可能性も低い。しかし、鉄筋の腐食位置を特定する研究も見られるものの、仕上材の多様性に照らすと再現性はなく、下限評価に位置づけられ、方法論としての優位性をもつ本法は、一つの解として妥当と考える。この際、1スパンの建築物は、一鉄筋が局所的に錆びると全壊する不合理を生じるが、従来の当該分野の研究が、こうした直列系の検討、更には腐食の前段階である中性化による対応を求めてきた事実と照らすと、より実態に近づいたものと考えることが出来る。

なお、経年劣化の影響を定量するために仮想した地震動は、試算した建築物群においては、震度6弱に相当する現実的なものであった。算定手法自体は、地震学と独立した、相対比較に限定して成立する数学的な概念であり、その解に対する信頼性を問うものではないが、根拠となる上述した人的被害の予測式に関し、大地震に際する校正の結果や防災活動の効果等に関するシナリオを導入することで、議論を実態のある範囲に補正する作業を行うことが望ましい。

最後に、建築物の仕様に対して統計的な設定をした点については、5.3.2(2)で前述した壁の乾燥収縮ひび割れ本数の標準偏差の選定において、影響因子の関連性を考慮すると分布形状が激変したことから類推される様に、構造耐震指標の極値近傍の解の発生頻度を増し、被害の過大評価を誘発した可能性が否定されない。本研究の是非を問う上で、解析方法の構築という観点で問題を認めないが、実際の修繕計画に適用する際は確認を要する課題である。しかし、この場合も、耐用年数に係わる一連の現象を連成した本法は、高次の課題としたフィールドワークによって、これをより効果的に解決できる。建築物の経年劣化が社会に与える影響は、街に出て、建築物の空間構成、仕様、劣化状態等の在り方を見て、定量的に評価・分析することで、飛躍的に信頼性を向上できるのである。

本章をもって、将来の計算機の能力の発展により、建築物群単位で耐用年数を求めるためのオントロロジーを全て提示出来たものと考ええる。

※解析上採用した先行研究の式

- ・日本建築防災協会の耐震診断法（二次診断）
- ・日本建築学会鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説に基づくせん断終局強度の算定式
- ・日本コンクリート工学会の鉄筋の重量減少率と降伏点強度、付着強度の関係式
- ・中央防災会議の全壊棟数と非木造建築物内の死者数、重傷者数の関係式

※解析上の仮定

- ・構造耐震指標の算定上の仮定…1層の短辺方向のみを対象とし、靱性指標に基づき、経年数毎に全部材を均等な数の6グループに分けた上、最大3グループの全数組合せで算定
- ・対象の鉄筋…耐震壁の縦横筋、柱の主筋、帯筋
- ・耐震壁…全体の壁の一割と仮定
- ・構造耐震判定指標…最小値0.6に対し、対数正規分布の変動係数を変え、評価対象の建築物群に想定被害を与える地震を特定
- ・地震時の想定被害…全壊棟数を中央防災会議の関係式に入力して算定
- ・全壊の条件…構造耐震指標を構造耐震判定指標で除した値が0.5以下

## 参考文献

- 6-1) 藤本郷史, 北垣亮馬, 兼松学, 野口貴文, 間宮尚, 鈴木宏一: マルチエージェントシステムを応用した資源循環シミュレーション手法によるコンクリート関連廃棄物の動向予測, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No.3, pp.222-228, 2006.7
- 6-2) 北垣亮馬, 三好徹志: マルチエージェント人工市場への行動経済学的手法の導入による建設資材の市場価格変動の再現に関する研究, 第 40 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 2017.12
- 6-3) L., Bettencourt, G., West : A Unifies Theory of Urban Living, Nature, Vol.467, pp.912-913, 2010.10
- 6-4) International Standard Organization : ISO19208: Framework for Specifying Performance in Buildings, 2016
- 6-5) 日本建築防災協会: 2017 年改定版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, 日本建築防災協会, 2017
- 6-6) 村尾修: 兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究, 東京大学博士論文, 1999
- 6-7) 川瀬博, 那仁満都拉: 時系列的な建物被害床面積予測とその環境負荷の評価—巨大地震被害予測スキームを用いた時系列被害予測とその環境負荷評価への応用に関する研究 その 2—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.645, pp.1957-1965, 2009.11
- 6-8) 邱建國, 兼松学, 野口貴文, 長井宏憲: 免疫的アルゴリズムによる RC 建築物の中性化に対する維持保全計画最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.624, pp.173-180, 2008.2
- 6-9) 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化研究委員会: 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化, コンクリート工学, Vol.52, No.3, pp.243-250, 2014.3
- 6-10) 東京都防災会議: 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 参照 2018.10, <<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>>
- 6-11) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 丸善出版, 1999
- 6-12) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 丸善出版, 2010
- 6-13) The European Committee for Standardization : BS EN 1992, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, 2004
- 6-14) 邱建國, 兼松学, 野口貴文, 長井宏憲: 塩害に伴う劣化リスクを包含した LCC を最小化する維持保全計画最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.616, pp.41-47, 2007.6
- 6-15) 藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, L., Madgededara : 3次元地盤震動解析と多数シナリオの構造物応答解析による都市地震シミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.I\_680-I\_688, 2015
- 6-16) D.D., Jackson, Y.Y., Kagan : 10, AGU Fall Meeting Abstract, S24A-08, 2012.12
- 6-17) B.A., Ivanov : Numerical Modeling of the Largest Terrestrial Meteorite Craters, Solar System Research, Vol.39, No.5, pp.381-409, 2005.9

- 6-18) 東京都：平成 22 年国税調査による東京都の昼間人口，参照 2018.10，<<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tyukanj/2010/tj-10index.htm>>
- 6-19) NHK 放送文化研究所：2015 年国民生活時間調査報告書，参照 2018.10，<[https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20160217\\_1.pdf](https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20160217_1.pdf)>
- 6-20) 国土交通省：建築物ストックの統計，参照 2018.10，<[http://www.mlit.go.jp/report/press/joho04\\_hh\\_000706.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_000706.html)>
- 6-21) 東京都：東京の土地利用 平成 23 年 東京都区部，参照 2018.10，<[http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi\\_c/tochi\\_3.htm](http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi_c/tochi_3.htm)>
- 6-22) 三好徹志，北垣亮馬，野口貴文：下方 OFT による建築物群の更新過程のエージェントベースモデリング，社会技術研究論文集，Vol.14，pp.146-155，2017.6
- 6-23) 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.406，pp.37-43，1989.12
- 6-24) 石川孝重，平田京子，太田博章，片桐靖夫，菊池正彦，坂本成弘，戸澤正美：建築確認申請図書における保有水平耐力の余裕度—指定確認検査機関へのアンケート調査—：指定確認検査機関へのアンケート調査—，日本建築学会技術報告集，Vol.16，No.33，pp.457-461，2010.6
- 6-25) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，丸善出版，2016

## 7. 結論

### Chapter7: Conclusions

#### 7.1 研究の結論

本研究では、RC造建築物の超長期に亘る経年劣化過程を、仕上材の修繕の影響を反映して、群単位で解析的に可視化する方法の構築を試みた。本節では、各章毎に得られた結論を整理し、各章の執筆の参考にした公表済みの論文の出典を示す。

第1章では、耐用年数評価に関する先の大戦以降の学協会の動向を概説した上で、持続可能社会への移行等の社会情勢の変化に応じた、超長期供用が必要な新市場が日々創発される中であって、研究成果を実構築物と関連付ける際の抽象を忌避した結果、全分野に亘る共通則を確立できず、トランスディシプリナリーが停滞していることを問題として提起した。その上で、最大の抽象的要因である建築主や建物所有者の意思決定を確率論的にモデル化するための群単位の解析に着目すれば、近年の計算機的能力向上に照らして、上記の課題を解決できる見込みがあることに言及し、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、フロー志向とストック志向に二分される建物所有者と、後者を奨励する行政で構成する、ヒエラルキーのあるマルチエージェントの意思決定に依存する、ストック志向への移行の過渡期にある建築物群の500年間の更新過程を、ストック志向の奨励条件の異なる複数のシナリオを与えて試算した。建物所有者は、経験的、物理的、法的耐用年数を勘案した社会的耐用年数で建築物を更新し、このうち、ストック志向の建物所有者は、更新時に翻意した場合は、竣工から100年前後の大規模修繕周期まで供用するRC造建築物に更新し、修繕時に翻意した場合は、建築物を物理的耐用年数まで供用するものとした。また、志向の推移は、集団の繰返し囚人のジレンマに学習機能を付与した、間接的互惠関係に関するアルゴリズムである下方OFTを、更新計画用に修正してモデリングした。人口動態が安定した都内

の市区町村から、フーリエ変換によって特徴的な建設投資の推移が認められた 8 市区町村を選択して試算を行い、基準となる建築物群から、ストック志向の比率、経年数の平均及び標準偏差が 3~4 割乖離する期間がある旨の結論を得て、建設業の CO<sub>2</sub> 排出量の対国内排出量比に照らして、高経年化の社会的影響が有意であることを示した。また、同モデルにおいて、超長期に亘って供用する RC 造建築物が群の供用年数の平均や標準偏差に与える影響が大きいことにも言及し、既存の耐用年数評価手法の超長期への適性の検証が、建築物群の更新プロセスとこれに付随する研究、延いては複数の社会的問題にとって重要である旨の主張を展開した。

<公表済みの論文>

- ・三好徹志, 北垣亮馬, 野口貴文: 下方 OFT による建築物群の更新過程のエージェントベースモデリング, 社会技術研究論文集, Vol.14, pp.146-155, 2017.6

第 3 章では、超長期に亘り継続供用するコンクリートの非定常環境下の劣化過程を再現するため、日本国内の一般的な地域で検討を要する外的要因を整理した上で、丸山、野口らによる Parrot の反応速度式に基づくエーライト、ビーライト、アルミネート相、フェライト相の水和反応率を横関らの毛細管空隙率に入力して得たセメントペースト部分の空隙率と、加藤らが提案したセメントペーストと骨材間の距離から得た Wall effect による水量にブリーディング水量を加算して得た遷移帯空隙量を、容積比に基づいて統合し、コンクリート中の物質移動特性をモデル化した。得られたモデルは、小林らのスランプ 18cm のコンクリートの酸素の拡散係数と粗大な空隙率の相関に関し、他の手法と比べて、高い寄与率を示すことを確認した。

また、尾崎らの気液相水分流に関する水分収支式、伝導及び水分流による熱流に関する熱収支式によって、コンクリートの吸水過程と放湿過程の熱水分連成解析を行って、既往の研究の実験データを補い、コンクリート中の水の移動のデータベースを構築した上で拡散方程式に近似し、水分の見かけの拡散係数をコンクリートの空隙率と含水率の関数として定式化した。この際、外皮については、水中に降雨の酸性三成分 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl) が含まれるものとして、各酸とセメント水和物との反応過程をモデリングし、容積変化が顕著な CaSO<sub>4</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>・nH<sub>2</sub>O, CSH の増減を空隙率に反映した。その上で、CO<sub>2</sub> と Ca(OH)<sub>2</sub>, CSH, フリーデル氏塩の反応型拡散方程式、エアロゾル中の Cl<sup>-</sup> と AFm の反応型非定常拡散方程式を、水の拡散方程式又は酸性雨とセメント水和物の反応型拡散方程式に統合し、コンクリートによる鉄筋の防食機能の経年劣化モデルとした。

更に、得られたモデルによって、日本建築学会の仕様書の中性化速度係数の算定根拠となった実験のうち、打放しコンクリートを屋外暴露した 3 例の中性化深さの再現を試み、同会の耐久設計関連指針の予測式と同等以上の整合性を確認した。また、最も解析と乖離した実験結果に対し、JIS A 5308 に定めるセメント、骨材、水の計量誤差、練混ぜ時の単位粗骨材量と空気量の変動、普通ポルトランドセメントの比表面積の変動、細骨材の表面水率の最大日変動幅を与えて、調合のモンテカルロシミュレーションを行い、空隙率に関する極値を示す調合の中性化深さを改めて計算して、再現性を確認した上で、精緻化の限界と多様な入力値に対応する総体的な本法の合理性を示した。

<公表済みの論文>

- ・三好徹志, 北垣亮馬, 野口貴文: 鉄筋コンクリートの超長期複合劣化過程の反応型非定常拡散方程式による解析的考察—超長期複合劣化による建築物群のリスクの確率論的考察 その 1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.735, pp.625-632, 2017.5

第4章では、第3章で得た非定常環境下のコンクリートによる鉄筋の防食機能の経年劣化モデルを用いて、熱・水・大気環境のうち、同劣化に影響する要因を精査し、RCPシナリオの適性を勘案した上で、超長期の気候変動モデルを構築した。

まず、外皮の熱環境は、土地利用から街区形態、外皮へとスケールダウンしながら主要因を考察し、実測や風洞実験の検証不足から慣習的に用いられる、Jürges式を含む相当外気温によるものとした。個々の入力値は、気象庁観測値に基づく気温、風速、相対湿度、11年周期の黒点の影響や火山噴火等による大気混濁係数の増減の影響に配慮したAnisotropicモデルによる斜面日射量等とした。仕上材の日射吸収率、長波長放射率については、相当外気温に基づくアレニウス則による温度補正が、CO<sub>2</sub>の拡散係数、CaCO<sub>3</sub>の反応速度、吸・放湿の拡散係数に及ぼす影響のケーススタディを行い、CO<sub>2</sub>の拡散係数、CaCO<sub>3</sub>の反応速度の変動幅はコンクリート工学的に小さいこと、吸・放湿の拡散係数は数割の変動を生じるが、降雨自体の環境モデルの不確実性に埋没することから、相当外気温に材料の仕様が与える影響のモデル化は高次の課題として、塗装を施したコンクリートを想定した定数を一義的に用いるものとした。また、このうち外気温は、RCPシナリオの安定性を考慮し、気象庁の観測値に基づく年内周期に対し、長期挙動として、2100年までは環境省による日本国内の年平均気温の増分、同年以降は海洋研究開発機構の地球システム統合モデル(MIROC-ESM)によるRCP4.5の2300年までの試算に基づく増分を一律に与えるものとした。屋内の熱環境については、屋外の履歴を基本として、屋内外の温度差に関する羽原らの研究、RC造に特化した白石の実測や空調の法規を参考に、空調時の室内の高さ方向の温度差がCO<sub>2</sub>の拡散係数、CaCO<sub>3</sub>の反応速度、吸・放湿の拡散係数に与える影響が小さいことを解析的に確認した上、室内の代表値のみで表現するものとした。

次に水環境は、気象庁の転倒ます型雨量計の最小測定値に配慮し、降雨量が確認される時点で、外皮を流下する水によって水膜が形成され、一定の拡散係数でコンクリートに吸水され、深さ方向の含水量に傾斜性が形成されるものと仮定し、気象庁の降雨の持続時間で表現するものとした。気象庁の1日、1時間、10分毎の観測値に関し、つくば観測所の値と太平洋側の酸性成分の観測値に基づいて、W/C:0.50、0.65のコンクリートの50年間の含水率、中性化の履歴を解析し、10分毎の記録を正とすると、1時間毎の記録に基づく計算により、中性化深さに関し、十分な精度が得られることを確認した。また、冬季の越境汚染の影響が大きい山陰の酸性成分と前述の太平洋側の酸性成分、酸性成分のない場合の三条件で同様の解析を行い、反応速度の設定の影響で地域間の差は認められないが、酸がない場合の中性化深さが50年間で他の倍近くに達することを確認し、CSHの炭酸化の影響によるものと結論した。その上で、降雨時間の気象庁観測値は乱数により1年単位で与え、長期挙動については、RCPシナリオによって定性的傾向が異なるため、モデル化しないものとした。

更に大気環境は、CO<sub>2</sub>と風の影響を含む飛来塩分を検討し、まず、CO<sub>2</sub>については、外気の濃度は、温室効果ガス資料センターのデータに基づく年内周期とRCPシナリオによるものとし、室内の濃度は、国内法規、ASHRAE換気規格、東日本大震災後の動向、白石のRC造建築物の実測を参考に、将来に亘る外気の濃度を下限、国内法規と現在の外気中濃度の差分である600ppmを下限に加算した値を上限として、居室毎の濃度をその間で乱数によって求めるものとした。この際、換気、気流と人間活動に依存して発生する室内の濃度分布について、週内サイクルを模擬した計168時間のCO<sub>2</sub>濃度の累積値の高さ方向の分布を設定し、ピークが最大及び最小になるレベルの履歴に関し、W/C:0.65のコンクリートの50年間の中性化深さを試算し、室内のCO<sub>2</sub>濃度の履歴や高さ方向のばらつきは検討不要と判断した。

なお、飛来塩分については、非降雨日に打放しコンクリート表層の空隙部分に飛来した塩化物が、鉄

骨表面と異なり、捕集率に依らずに全量付着するものとし、水の移流のない状態で自己拡散して、AFmと反応してフリーデル氏塩となり、改めて炭酸化する際にCO<sub>2</sub>を消費するプロセスがコンクリートの中酸化やCl<sup>-</sup>濃度の分布に与える影響を解析し、検討の要否を確認した。この際、飛来塩分の先行研究の流体解析は定性的な解しか得られないため、形状を問わない本検討では過剰と見做し、大屋らが提案した、式としてはプリミティブな風力発電に関する飛来塩分量と風速及び風向の関係式を用いた。W/C:0.65のコンクリートを2000年から50年間つくば市の屋外に暴露することを想定した試算を行い、同濃度を0とした場合と比較すると、イオンの自己拡散が、CO<sub>2</sub>が継続して供給される表層に留まり、フリーデル氏塩の炭酸化が具体化しないことを確認した。また、水の移流による見かけのCl<sup>-</sup>の拡散を扱う場合、飛来塩分と大気中のHNO<sub>3</sub>の反応生成物であるHClを含む降雨のモデル化を要し、多大な計算資源を消費する上、酸性雨として検討済みであることを勘案し、飛来塩分は一般環境では検討不要と判断した。

最後に、上述してきた環境条件により、RCPシナリオ2.6, 4.5, 6.0, 8.5を基本として、つくば市の南面の外皮の環境をモデル化し、打放しコンクリートの状態を200年間に亘って解析し、RCP2.6, 4.5, 6.0を適用した際のコンクリートの中酸化深さは放物線則に近い履歴を呈するが、RCP8.5は大気中のCO<sub>2</sub>濃度の履歴に即して、3次曲線状の履歴を呈すること、シナリオ間の差が100年以降に拡大し、RCP8.5では有意な差に達することを確認した。また、建築物の修繕過程の解析に必要な、群単位の検討に供するための、超長期的時間軸の中酸化用の簡易式を示した。

<公表済みの論文>

・3章に同じ

第5章では、第4章で得た超長期非定常環境下のコンクリートの経年劣化モデルを、材料から部材、建築物単位に拡張した上、仕上材や修繕の仕様選定における数世代に亘る建物所有者の主観を確率的に扱うため、更に建築物群単位に拡張した。

まず、仕上材に関し、超長期に亘る人間活動の可能性に配慮し、製品を特定した議論を離れ、劣化機構毎に四種に体系化して扱うものとし、第一に、仕上材自体の劣化に起因する体系に分類される高分子系仕上塗材に関し、劣化促進試験の劣化機構の暴露試験時との相違により、劣化予測が性能本位の巨視的な考察に依存する点に着目し、熱と紫外線の累積量と不特定の性能の時間依存性に関する小池らの化学反応速度式に、酸性雨の影響に関する補正係数を与えて、コンクリート表層への外的要因の到達率を定量する方法を示した。その上で、仕上材の紫外線劣化とコンクリートの中酸化を組合せた兼松らの劣化促進実験と建築業協会の委員会報告を参考に、複層仕上塗材の各層の物性を仮定し、主材の分布が同材の距離以深で影響しないことを、二次元反応型拡散方程式によって解析的に確認した。更に、顔料や塵埃を基点としてピンホールが広がる破壊モードを想定して、下層への劣化の伝搬をモデル化し、経年数15年以降の修繕時期の違いがコンクリートの中酸化深さに与える影響を試算し、修繕時に一定期間中酸化が停滞し、反応速度の濃度依存性に起因し、修繕前の履歴に漸近すること、打放しコンクリートの中酸化に対する比の履歴が修繕時期によって異なることを確認し、修繕後5~15年間中酸化が停滞し、その後50年間で修繕前の履歴に漸近する簡易モデルを設定した。第二に、仕上材とCO<sub>2</sub>の反応に起因する体系に分類される、セメント系仕上材とタイル接着用モルタルを想定し、厚さ10mmのモルタルをコンクリート表層にモデル化し、反応型拡散方程式によって、前中酸化の有無を因子として、中酸化の履歴を解析し、モルタルの全量中酸化後に、下地のコンクリートが中酸化する、馬場らの式が妥当と判断し、簡易モデルを設定した。第三に、仕上材の剥離・剥落に起因する体系は、対象を全材料とし、建

築・設備維持保全推進協会のデータベースにおける内外装の破損確率を上限として乱数で不具合部を定めた上、細分類として、高分子系仕上塗材の地下からの浮きの更新、タイルの浮きへのアンカーピンニングと樹脂注入を想定し、第一及び第二の体系に準じて、修繕後の劣化モデルを与えた。第四の体系として挙げた検討不要な対象は、劣化が顕著に遅い保護防水、デッキスラブのデッキとの接触面、仕上材がない打放し、RC造以外の部材である乾式の外装材等とした。

次に、仕上材を施したコンクリートの劣化過程に部材の特性を付与するため、壁の乾燥収縮ひび割れと床の曲げひび割れをモデル化した。前者は、建築物の規模に応じた外部拘束度を設定可能な尹らの予測式に、確率論的に設定した物性を入力して、ひび割れ本数を得て、大野らによる等価付着消失領域の鉄筋の保護機能が失われるものとし、後者は、積載荷重、小梁及び増打ちのモデル化は煩雑を伴うため避け、上下面の引張領域の面積を同一として引張領域を特定し、同領域全体で、鉄筋の保護機能が失われるものとした。なお、一般部の鉄筋は、室内の腐食速度を実測した米澤らの式、ひび割れ発生部は邱らによる裸鋼材の腐食速度に準じるものとし、ともに変動係数50%の対数正規乱数で設定した。鉄筋に沿うひび割れが発生する腐食量は、一般部は汎用される森永の式に準拠し、ひび割れ発生部は、後藤らが実測したひび割れに起因する鉄筋周囲の空隙の厚さ0.1mmが腐食生成物で充填された上、ひび割れ表層が樹脂注入で封じられた後、一般部と同量腐食した時点とした。

次に、部材単位の劣化を建築物単位の劣化に拡張するため、区分所有者の介在を避けて、対象を非住宅系に限定し、RC造建築物群を設定する方法を定めた。具体的には、①建築物の建蔽率を宗方らの調査に基づき80%一定、敷地面積を大場らの調査に基づく業務施設の平均敷地面積に準拠して算出した対数正規分布が維持されるものとして乱数で得て、建築面積を求める、②容積率を宗方らの調査に基づく商業系地域の正規分布から乱数で得て、全フロアの平面計画を同じ方形とし、建築物群で統一したスパン長と階高からなるグリッドを配置する、③平面のアスペクト比は、現実的な範囲として1~3を乱数で与え、フロア内は、居室と廊下等を区別せず、法規制の影響は、乱数で与える上記の統計量に含まれるものと見做す、④柱、梁、スラブを、グリッドの交点を結ぶ様に漏れなく配置し、外壁は、建築物の外周に全て配置する、⑤条件設定の簡単のため、外壁と内壁の数量の比、二方向の内壁数の比を乱数で得て、全グリッドに納まる範囲で内壁数を定める、⑥コンストラクションジョイントの設置が推奨される60m程度に亘り地上壁が連続する可能性は低いため、10スパンを上限として設ける等のルールによって、群単位で建築物の空間構成を設定した。

更に、Sugar Scrape, BIM, QOL, プロスペクト理論, No Free Lunch Theory の視点から方法論を整理した上、躯体・仕上材・修繕の仕様を採用する建物所有者を、躯体の劣化に関わる力学的安定性、視覚、耐久性、経済性に対する志向によってモデル化した。具体的には、対象性能に対する志向の有無とその意思表示の有無により、建物所有者の志向に対する状態を4分し、新築時と10~15年毎の大規模修繕の都度、意思表示される志向に対して加点し、評価時点で最高点の志向によって、建物所有者の状態を記述した。この際、シナリオに基づいて、特定の志向を意思表示する確率を増減するフレーミング効果と、配点を世代交代時にリセットする人間活動の時間軸を導入し、建築物群で醸成される建築物の仕様に関するトレンドに感化されつつ、修繕を重ねる過程で、各建築物の営繕の基本方針が、ハードコアの継続的なリードによって固まり、建築物の仕様と劣化状態によって、次世代に意思決定の基本条件を継承する、基本ルールを確立した。具体的な仕様については、国内で多用されるフォーサイトの報告書から、躯体関連技術の動向を俯瞰した上で、現在の技術は過去の技術を排除した別の存在ではなく、過去の技術の一部の性能を調整したものであり、群単位では、コアとなる部分の蓄積が群の特性を決定

する基本的な考え方を導いた。その上で、同特性が変わる程のイベントはシナリオで外挿するものと考え、本研究では、イベントがない前提で、関連学協会の指針や実務書から汎用される範囲を抽出し、建物所有者の志向と各仕様の優先度の関係性を設定し、乱数で選択するものとした。

得られたモデルで、経済性を優先する Case I、力学的安定性、視覚、経済性を優先する Case II、力学的安定性、視覚、耐久性を優先する Case III の 3 シナリオを構築し、RCP8.5 に則した環境下にある、屋内外、部材毎に仕上材と修繕の 100 の選択肢を設けた 1,000 棟の建築物の 200 年分のパスを解析し、ディテールの取扱いの議論を避け、主要な面の加速期到達率を集計し、比較を行った。この際、先行ひび割れ発生部は、樹脂注入後に発錆し、新たにひび割れた部位のみ加算した。結果として、加速期到達率の平均値が、修繕工程の有無によらず漸増し、シナリオから想定される定性的相関を再現することを確認した。また、建築物の仕様と解の安定に必要な標本数の関係の確認、各物性の統計量への Spatial な定義の設定、修繕を完全に行わない解析結果との統合の必要性を課題として指摘し、Spatial な定義のない建築物群の解析結果の個々の建築物とのフラクタル性から、修繕する建築物の躯体の劣化のリスクが漸増する可能性を指摘した。

<公表済みの論文>

- ・三好徹志, 北垣亮馬, 野口貴文: RC 造建築物群の超長期修繕プロセスに関するエージェントベースモデリング—超長期複合劣化による建築物群のリスクの確率論的考察 その 2—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.749, pp.953-961, 2018.7

第 6 章では、第 5 章で得られた建築物群の加速期到達率と棄却の意思決定を関連付けるために、設計・施工的要因の不確実性を超越する巨視的な性能への転換が不可欠であることと、同用途で期待される LCC, LCA 等の既往のマクロな評価指標が、マテリアルフローや資材・工法の価格変動の影響により信頼性を喪失する超長期特有の課題をもち、改善策としての人工市場を用いた検討が過渡期にあることを指摘した上、ISO19208 が例示する要求性能を精査し、群単位の耐震性への転換を試みた。具体的には、前章の建築物群の加速期到達率の解析過程で得た鉄筋の腐食モデルを日本建築防災協会の耐震診断の二次診断法に導入し、所定の地震を与えた際の予想被害を、部材内の鉄筋の最大腐食量に基づいて時系列で解析し、超長期に亘る耐震性の推移を群単位で定量した。この際、地震研究の国家プロジェクトの最新の成果や超長期に亘る将来の地震によって、解析期間内の確率論的想定地震が変化し得る地震学的アプローチは避け、新築時の建築物群の地震による人的予想被害をシナリオとして設定し、行政の調査に基づいて、同シナリオを実現する構造耐震判定指標の統計量を逆算して得る、予想被害に基づく確率論的アプローチを採用した。また、材料の物性には、設計時の汎用値の根拠とした実験の平均値を与え、鉄筋の腐食による物性の低下については、降伏点強度と付着強度の腐食量との相関を設定し、同設定を入力するため、せん断終局強度のみ、トラス・アーチ理論に置換して解析を行った。

新築時の被災で群内に 1 名の死者が発生する地震を与え、直近の出費や手間を抑制する経済志向の修繕シナリオに則して劣化する過程の人及び建築物の予想被害の統計量を試算し、修繕時と非修繕時で概形の異なるリスクカーブを得た上で、死者数、重傷者数が閾値以下になる期間で耐用年数を定義し、修繕の厳格化により更新に誘導する間接的な耐用年数の新たな解釈を示した。

また、中性化確率、加速期到達率と構造耐震指標の初期値に対する比からなるマルチプルなリスクの指標の比較を行い、超長期では建築物単位の変状だけで棄却するのは不合理で、群単位で修繕周期や仕様の指針を定め、予算と人員確保により、都度の修繕を徹底した上、総合的に棄却を判断するのが望ま

しく、本法に示す解析的手法が有効であることを示した。

<公表済みの論文>

- ・三好徹志, 北垣亮馬, 野口貴文: 地震時被害に基づく RC 造建築物群の超長期修繕プロセスのリスク分析—超長期複合劣化による建築物群のリスクの確率論的考察 その 3—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.755, pp.1-8, 2019.1

第 7 章は本章であり, 本研究で得られた成果を章ごとに整理し, 今後の課題と展望を記した。

## 7.2 今後の課題と展望

本研究は, 全ての構成技術の技術的階層の整合を優先した解析的研究であるため, 個々の技術に対する最新の専門的研究に比べて粗放な部分が残る点や, 超長期に及ぶ予測の精度が実験的に立証されていない点を問題視すれば, 容易に虚構と評することが出来る。

しかし, 童心に返り, より根本的な構図で論考すれば, 例えば, Leibniz が Clark との往復書簡で述べた時空論によると, 時間は空間の連続であり, その相関を経験に照らして, 人間は時間の前後関係を認識する。ここで, Newton の運動の第三法則を, 観測によるバイアスを回避するため, エネルギーの増減だけで捉え, 個の存在は他との相互作用によって初めて具体化するものとし, かつ, 宇宙の膨張や起源の異なる重力他, 一切の外乱を除外できる場合, エネルギーを付与した際の逆方向のエネルギーの発生は, フレーミングの方法によっては空間上に相似性を生み, 空間の関係性で認識する時間は進行と同時に逆行する。この観点では, 全ての瞬間が時間の起点と言え, 日常生活で体感する時間の概念は消失する。逆説的に, 我々が認識する空間では膨大なエネルギーの授受が同時に進行しており, 空間の相似性の軸が複雑に交錯するため, その空間認識能力も影響して, 人間が完全な空間の相似性に遭遇することは不可能であり, 総体としての時間の矢だけが認識されているものと考えられる。

更に, 上記を前提とすると, 仮に将来, 人間の生活レベルで必要とする以上に分析技術や数学が進歩し, クォークの直接的観察が実現し, 更なる内部構造の有無まで解明され, 真の最小単位のエネルギーの授受を, 一切の外乱を排除して観察できる領域に達すると, 時間が, 認識する階層に有意性を依存する抽象的な存在であることが実験的に証明される。また, 時間の概念が消失すれば, 現代科学の一般常識である超弦理論による空間の説明も表現が変わる。単純化を続ける先には真理が待っているが, 得られた真理に基づいて, 既往の知見を再考すると, 始まりも終わりも知らずに定めた時間と, 自分がどの様に存在するかも知らずに定めた空間において, 装置の性能の範囲の観察に基づいて構築してきたルールは, おそらくは脆弱である。

本題に回帰すれば, 如何なる精緻や洗練も, 超長期を対象とする研究に限れば, 人類の進歩による陳腐化を避けられないため, 粗大な仮定が内在しても, 懸案の課題に対する明瞭な解を含む俯瞰的な解析的研究と比較した場合, 現時点での有意性という点で大差はない。2 世紀前まで欧州で主流であった Aristotelēs が提唱した四元素説が, 現在では荒唐無稽の誹りを免れないことは偶然ではない。

その上で, 本研究では, 材料学, 自然科学, 建築学, 総合科学的アプローチを通じて, 影響因子の重層構造とその不可分性, 更に総合的な議論の有意性を提示して, 耐用年数に関するオントロジーを構築している。コンクリート工学的な耐用年数に関する研究の進展は, 分析機器の開発方針に依存するため, 時に独善に陥る危険性があるが, 本研究は, 計算機の能力と社会シナリオによって限界が定まるので, 計算機の能力の向上に応じて, 都度, モデルの容量を拡大し, 新たな社会問題を解析的に考察すれば,

客観的に未知の知見が得られる特殊性がある。

但し、敢えて、一つの方向性に言及すれば、本文中で高次の課題とした、建築物群の **Spatial** な描写と、解析に用いた都市計画や社会心理学等に属する統計量の洗練により、建築物をより具体的に描写するプロセスは、早い段階で通過することが望ましい。本法は、決定論的な検証によって構築した劣化の簡易モデルを、シナリオプランニングと統計量に基づく仮想環境下の建築物群に与え、劣化過程を定量するものであるが、更新プロセスまで視野に入れると、仕様選定の影響が最も大きい。本文では根拠となる統計量を得るフィールドワークを高次の課題として解析に注力したが、得られるモデルを、鉄骨造や木造建築物、区分所有者間の意思決定機構を内包する住宅系建築物と併せた上、通信網、電力供給網、交通他の社会インフラに関する同種の解析モデルと統合すれば、経済、環境、文化に関わる人間活動に対する具体的な議論を超長期的時間軸で実現し、世間一般の関心事を直接検討するための枠組みを提供できるようになる。2章で示した建築物群の更新過程の解析は、本来は、そうした枠組みで議論されるべきである。

なお、再三述べてきた様に、本法は、気候変動が躯体の劣化過程に与える影響に関し、超長期的時間軸で従来と異なる知見を得たので、物理化学的な信頼性を確保するためには、理論上、計算機の能力の向上を待って、資源循環シミュレーション用人工社会や地球シミュレータと連成した収斂計算を行う必要がある。

RCP シナリオ他、複数のシナリオを採用したため、シナリオプランニングに基づく帰納的検討として、看過する見地もあるが、当該分野の解析を有意な技術として普及させるためには、IPCC の試みがそうである様に、法規、条例や営繕方針の策定に関与できる国、自治体や大量な不動産ストックをもつ企業が、本法の結果を意思決定に実際に反映した上、解析と実態の乖離を定期的に補正する必要がある。

具体的には、あらゆる用途で採取されている温湿度、風、降雨、日射等の環境情報や、修繕、改修時の工事内容及び費用、ひび割れを解析可能な解像度の、建築物の位置情報と関連付けた写真を共有し、特異値が確認された際に、関係する値を自動的にスクリーニングして、解析条件と結果を照査するデータベースに相当するシステムを構築することで、シナリオプランニングの不確実性を軽減し、物理化学的信頼性の議論に回帰することが出来る。当然、データ収集のインフラ整備は過渡期にあるため、得られた事実から確度のある母集団を可視化するための分析技術が必要になる。同システムは、国土交通省が、**Society5.0** の一環として、スマートシティのモデル事業に着手した現況に照らすと、近未来に実現する可能性がある。

他にも、本研究において高次の課題と評し、検討対象外にした項目は幾つかあり、列記すると、疲労現象、風速、曇天及び降雨の熱環境に与える影響、降雨中の酸性成分とセメント水和物の反応速度、建築物の仕様の超長期的動向、再生骨材を用いたコンクリートの劣化現象のモデル化が挙げられる。何れも、単独で重要な成果が得られる研究分野であり、上述した包括的な対応の過程において、学協会の最新の動向を反映するべきものとする。

我が国が迎えた人口減少社会において、人口と **QOL** に基づく過疎の自治体の淘汰の後に、都市が空洞化することは確からしい未来であり、社会インフラとこれに付随する建築物群の効率的な棄却の議論が必要になる。従来の建築物の棄却は、前世代が構築した資産との、経済性を根拠とする絶縁であったが、本研究に基づいて、新築の計画段階から地域のスマートシュリンクを議論すれば、棄却は、将来世代の経済、環境、文化への影響の調整行為になり、社会的関心事として迎えられるものとする。

地球規模では今後も人口が増加するが、その後、確実に減少する。現在の日本は建設のピークを経過

しているが、発展途上国では本研究の成果がより効果的に適用できる。建築物は、他の環境貢献技術と異なり、数世代に亘って供用されるため、直接、将来世代に影響する点を改めて記し、本研究で示した手法または技術的思想が、国際的にも展開されることを切に望むものである。

## 謝辞

本論文を審査して頂きました主査野口貴文博士（東京大学大学院工学系研究科教授）、副査北垣亮馬博士（北海道大学大学院工学研究科准教授）、副査高田毅博士（東京大学大学院工学系研究科教授）、中埜良昭博士（東京大学生産技術研究所教授）、石田哲也博士（東京大学大学院工学系研究科教授）、本学への進学を頂いた大野義照博士（大阪大学大学院工学研究科名誉教授）、横田隆司博士（大阪大学大学院工学研究科教授）に深甚なる感謝の意を表します。

野口貴文博士、北垣亮馬博士には、当方が社会人ドクターとして、長期履修制度を申請して研究室に所属した4年の間、全ての研究段階において、数々の貴重な御指導を頂きました。入学時の主査を担当して頂いた北垣亮馬博士には、分野横断的な研究論文に共同執筆者として連名する機会を頂戴し、視野を広げる貴重な体験をさせて頂きました。また、最終年度の北垣亮馬博士の北海道大学への異動に伴い、博士論文の執筆の見通しがつかなくなった折、野口貴文教授に主査の担当を快諾頂き、本日につながる事が出来ました。万謝致します。

高田毅博士、中埜良昭博士、石田哲也博士には、本論文をまとめるに当たり、御多忙の中、副査を務めて頂き、幾多の貴重な御指導を頂戴しましたことを、心より御礼申し上げます。

大野義照博士、横田隆司博士には、就職後、共同研究の機会がなかった当方の相談に応え、博士後期課程への進学の推薦を頂きました。特に、大野義照博士には、進路や研究方針に関し、多大な示唆を頂きました。深く感謝致します。

社会人ドクターとして研究室に在籍する上で、研究室の勉強会や学会発表等、他のメンバーの皆様が鋭意努力する催事に参加できない不遜もありましたが、皆様の幾多の受賞や素晴らしい研究論文を拝見することで、大いに刺激を受けました。謝意を表します。

最後に、本学に進学する上で、親族の支えが不可欠であったことを、付記します。

父三好恒明（岡山大学教育学部名誉教授）からは、妻子のある当方の無計画な進学に際し、研究方針に関する助言を受けました。学者として、自宅でも勉強を続けた父と過した少年期の記憶が、今回の進学に影響したことも否定しません。また、母淳子も、不惑に至った当方の進学に理解を示し、折に触れ、励ましの言葉をかけてくれました。

妻祐子は、大野義照博士への相談、東京大学への進学準備から博士後期課程の長期履修終了までの6年間、仕事以外はほぼ自宅で研究に従事する当方の生活を受入れた上、職につき、家計を支えてくれました。自ずと、長女優乃、長男耕太郎と共に過ごす時間が減りましたが、彼らは論文が学会誌に掲載される度に、素直な賛辞を当方に向けてくれました。本研究が、彼らの世代の主要な課題の一つの解決に貢献すること、本論文がいつか彼らの目に留まり、当方の考えを最も詳細に伝えること、そして、彼らの記憶に、父同様に勉強を続けた当方の姿が残る、当方が受けた様に、彼らにも影響を与えるであろうことを確信しています。

謝辞を執筆するまで、この様な心境になるとは夢にも思いませんでした。感謝します。