

研究目的

建物の運用・保全におけるエネルギー及びコストのうち、多くは空調や照明等の建物付帯設備で消費されるが、設備機器は鉄骨や鉄筋コンクリート等の建物躯体に比べて耐用年数が相対的に短く、建物のライフサイクルの中で複数回の更新が必要となるという特徴がある。

そこで本研究は、建物付帯設備のうち多額のコストとエネルギーを消費する空調設備に注目し、空調設備の保全計画において重要な要素である経年に伴う機器の劣化の進展や故障が発生する様子(以下、不具合発生傾向という)を保全データから定量的に評価すること、また、その情報を用いて空調設備の更新周期を最適化する方法を構築する。

研究の背景

空調設備は、建物使用期間中に良好な状態を維持するために定期的なメンテナンスや古くなった機器の取替えが必要となるが、建物管理業務及び予算取得を効率的に行うために図1のような空調設備に関する中長期的な保全の実施内容や実施年度、概算予算等を明らかにする保全計画を策定する必要がある。

この空調設備の保全計画には、主に点検・保守・監視・清掃等に係わる維持管理と機器の修繕・更新・改修等が関係する。その中で特に重要な課題として挙げられるのは、建物のライフサイクルにおけるコスト及びエネルギーへの影響が大きい空調設備機器・システムを更新する最適なタイミングを見定めることである。

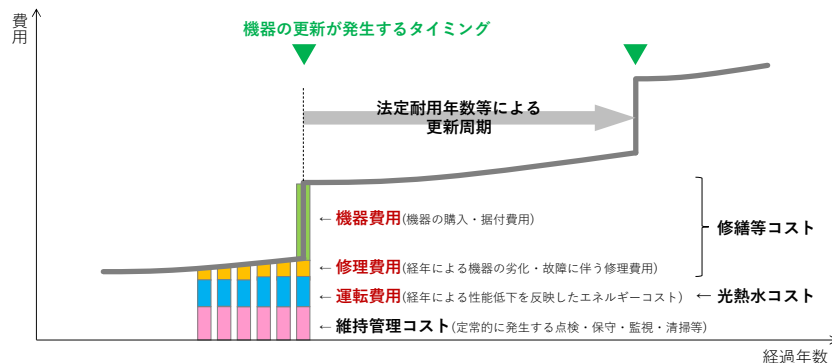
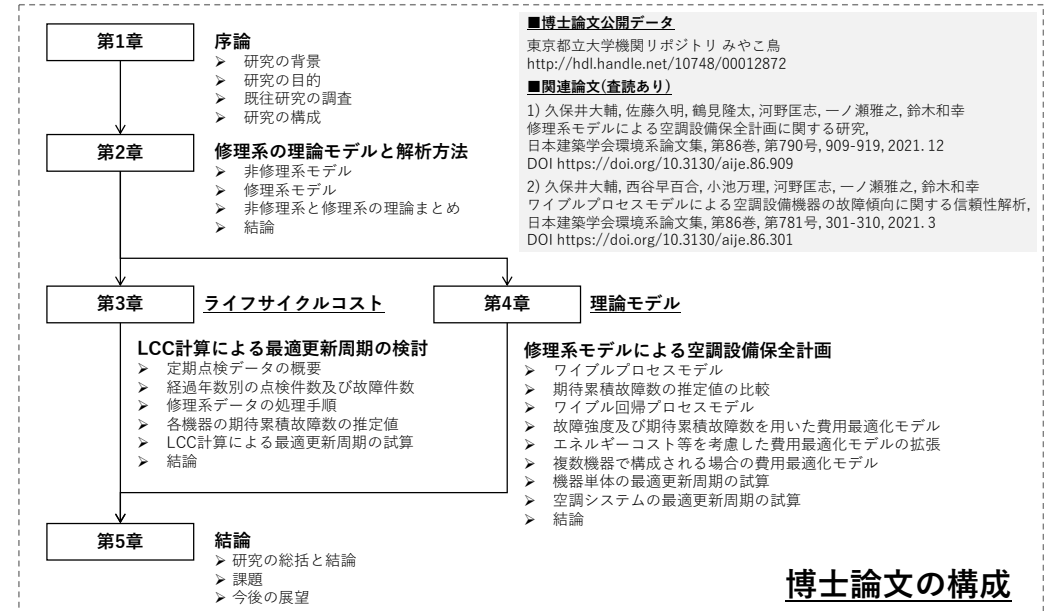


図1 空調設備保全計画の概要

建物寿命は不確定であり、機器の長期にわたる不具合発生傾向を掴むのも容易ではないという課題の下で、建物を保有するなるべく多くの事業者が比較的容易に取り組めるような形を理想として、建物ライフサイクルにおける空調設備の最適な更新周期を求めるために以下に関する理論の構築が求められる。

- 設置から撤去まで機器の耐用寿命に相当する長期観測データが無くても、フィールドデータから空調設備機器の不具合発生傾向を定量的に把握するための評価方法
- 空調設備機器の不具合発生傾向が既知のデータ期間に応じて、不確定な建物寿命を考慮したLCC計算による最適更新周期の算定方法
- 建物寿命や機器のデータ期間には依存せず、空調設備の最適更新周期を求めるための理論モデル

注記) 本研究では、建物利用側の要求に伴い機能・性能改善を目的とした改修の実施については検討対象に含まないものとし、建物管理側の観点から空調設備の保全計画において重要な課題である中長期的に機能・性能水準を維持することを目的とした更新を中心として扱う。



本研究のポイント

信頼性理論の活用

- フィールドデータから機器の不具合発生傾向を定量的に捉える方法として、機器・システムの品質や信頼性の管理技術である“信頼性工学”に着目。
- 空調設備機器は最小限の修復活動の下で継続的に使用されるため、信頼性工学における“修理系”のアイテムとして扱い、フィールドデータから機器の不具合発生傾向に関する信頼性特性値を取得して、建物寿命に依らない解析的な方法により最適更新周期を求める新たな理論モデルを構築した。

保全データの活用

- 過去の機器の状態が把握でき、比較的収集し易いフィールドデータとして“定期点検データ”に着目し、これらのデータを基にした空調設備の最適更新周期に関する評価手法の構築と実務における活用を目指した。
- 限られた期間の定期点検データを基に、機器の使用開始時点を揃えて点検件数及び故障件数の推移を合成し1つの観測データとすることで、長期に及ぶ機器の故障件数の増大を観測することが可能となり、経年に伴う物理的劣化による機器の耐用寿命を評価できると考えた。

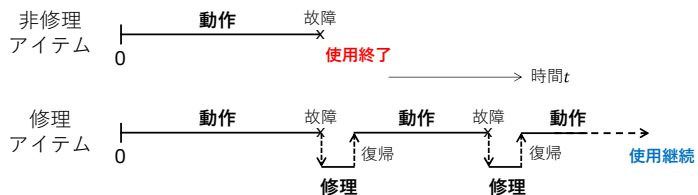
博士論文の構成

信頼性理論

【非修理系と修理系】

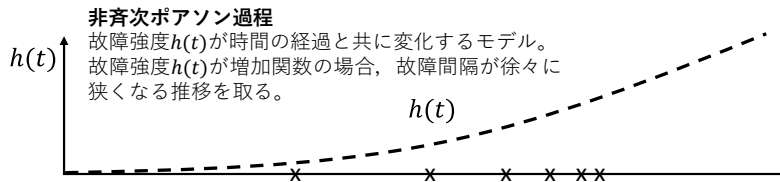
非修理系 運用開始後、故障が起こっても修理不可能か、又は修理可能でも修理しないシステム。信頼性を代表するものはアイテムの寿命分布であり、それは確率密度関数 $f(t)$ で代表される。

修理系 運用開始後、保全によって故障の修理が可能なシステム。アイテムが故障しても直ちに故障部位・部品を取り換えれば、アイテムは故障前の状態に修復して使用が継続される。このような場合の信頼性は故障の発生割合(観測時間と故障回数の関係)により評価される。



【非斉次ポアソン過程(Non-Homogeneous Poisson Process: NHPP)】

一般にシステムは複数のユニットや部品からなる。これらのユニットや部品の1つが故障したとき、その1つのみを新品に交換したとしても、システム全体としての故障率(修理系では故障強度 $h(t)$ と呼ぶ)は下図のように増加し続けることが予想される。



このようなシステムのある一部が故障したときは、故障部位のみを交換あるいは修理し、システム全体の故障強度 $h(t)$ の推移を考えればよい。このときの故障に対する修理は小修理(minimal repair)と呼ばれる。ここで大切なことは、故障強度 $h(t)$ が小修理によって何ら影響を受けず、すなわち、故障強度 $h(t)$ が0(ゼロ)には戻らず、そのまま継続されるということである。

【ワイブルプロセスモデル】

非斉次ポアソン過程(NHPP)の下で故障強度 $h(t)$ が次式にて与えられるモデルをワイブルプロセスと言う。

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

このとき時間 $(0, t]$ における累積故障数 $N(t)$ の期待値を $E[N(t)] = H(t)$ と定義すれば、期待累積故障数 $H(t)$ は、

$$H(t) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

として与えられる。ここで、 β : 形状パラメータ、 θ : 尺度パラメータである。

保全データ活用

機器・システムの不具合発生傾向を表す指標として、信頼性工学の修理系で用いられる“故障強度 $h(t)$ ”及び“期待累積故障数 $H(t)$ ”に着目し、図2のように多数の機器に対する限られた期間の定期点検データの情報を適切に組み合わせて処理することで、機器の経年に伴い劣化や故障が発生する傾向を定量的に評価する方法を提案した。

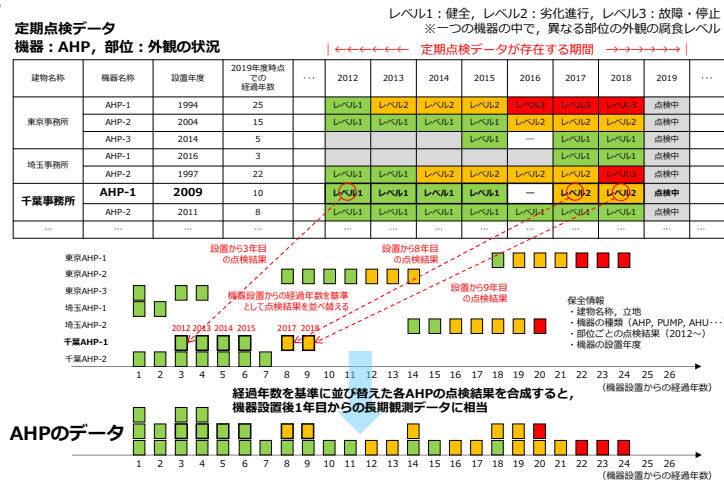


図2 長期観測データとしての定期点検データ処理手順

空調設備機器の定期点検データ(予め部位毎に設定された対象機器の状態に応じた判定基準「機器劣化レベル1・2・3」から点検結果を選択)は、2012~19年度までの8年分、計64,929件を収集、得られた有効データ件数は40,240件となった。

セントラル空調システムを構成する5機種(AHP・PUMP・AHU・FCU・HEX)を対象として、定期点検データを処理して得られたデータを修理系データとして扱い、各機器の点検部位毎に故障強度 $h(t)$ ・期待累積故障数 $H(t)$ の推定値を求めた。

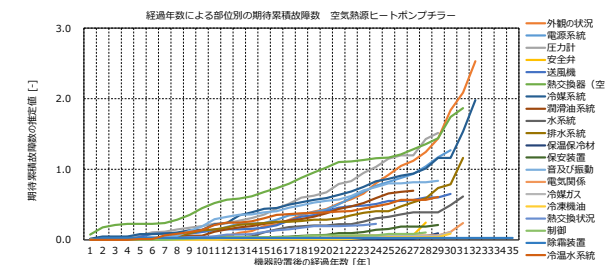


図3 AHP点検部位毎の期待累積故障数 $H(t)$ の推定値

修理系データに対しワイブルプロセスモデルによる解析を行い、各機器の点検部位毎に信頼性特性値である形状パラメータ β ・尺度パラメータ θ の推定値を求めた。

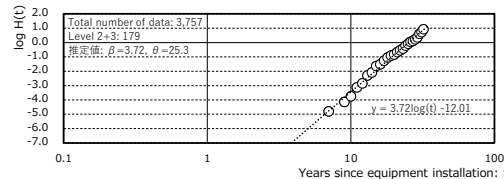


図4 AHP外観の状況 β, θ の推定値

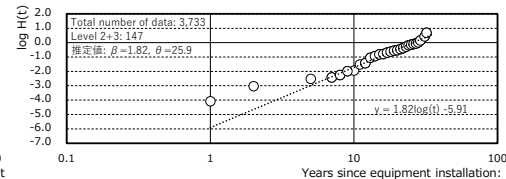


図5 AHP冷媒系統 β, θ の推定値

■LCC耐用年数

ライフサイクルコスト(LCC)の観点を取り入れた空調設備の最適な更新周期を求める方法として、建物寿命を有限の50年から75年とし、機器の更新周期を15年から30年で変化させた場合の建物寿命毎のLCCを算出し、最も安価となる更新周期を本研究では“LCC耐用年数”と定義した。修理費用に実際の機器の不具合発生傾向を反映するため経過年数毎の故障強度 $h(t)$ の推定値を活用して計算を行い、機器の更新周期をLCC耐用年数で設定した場合のLCC削減効果を明らかにした。

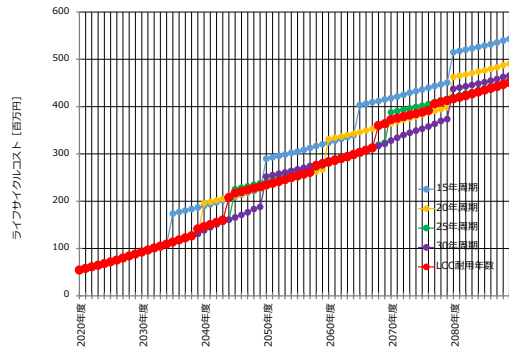


図6 LCC計算結果(建物寿命70年とした場合)

LCC耐用年数の課題：建物寿命が有限期間であり、長期間(ここでは30年間)の機器の不具合発生傾向が既知であることが前提となる。

事務所ビル(5,000m²規模)の蓄熱式セントラル空調システムを想定し、建物寿命70年とした場合の空調設備の更新周期別のLCCは、

- 15年周期 : 5.43億円
- 20年周期 : 4.91億円
- 25年周期 : 4.54億円
- 30年周期 : 4.66億円
- LCC耐用年数 : 4.51億円

法定耐用年数やメーカー推奨年数の15年周期に比べて、LCC耐用年数で更新を行った場合は約0.92億円(▲17%)削減。

研究成果① 機器の不具合発生傾向に関する評価方法

- 限られた期間の定期点検結果を基に、空調設備機器の長期観測データとして活用するための定期点検データ処理方法を提案した。
- 信頼性工学における修理系アイテムとして空調設備機器を扱うことで、修理系データである機器の不具合発生傾向を表す故障強度 $h(t)$ 及び期待累積故障数 $H(t)$ の推定値を求めるデータ解析方法を明らかにした。
- ワイブルプロセスモデルを用いて修理系データの解析を行い、機器の信頼性特性値である形状パラメータ β 及び尺度パラメータ θ の推定方法を明らかにした。
- 空調設備機器の使用環境条件による影響評価を行うための“ワイブル回帰プロセスモデル”を提案した。
- フィールドデータを基にした修理系データに対するワイブルプロセスモデル及び回帰モデルによる解析結果を示し、同モデルの妥当性と有効性を示した。

研究成果② データに基づく機器・システムの最適更新周期の算出方法

- LCCが最も安価となる空調設備機器の更新周期を“LCC耐用年数”と定義し、修理費用の算出に故障強度 $h(t)$ を用いたLCC計算により、建物寿命が有限の50~75年の場合における各機器のLCC耐用年数を明らかにした。
- 建物寿命や機器の不具合発生傾向が既知である期間に依存せず、機器の信頼性特性値や費用情報を用いて空調設備機器・システムの経済合理性の高い更新周期を求める理論モデルとして“費用最適化モデル”を提案した。
- LCC耐用年数及び費用最適化モデルによる計算結果を示し、同方法により求めた空調設備の最適更新周期による費用削減効果を示した。

■費用最適化モデル

修理系モデルによるフィールドデータの解析から空調設備機器の不具合発生傾向に関する信頼性特性値を取得し、関係する修理費用や運転費用等のコスト情報を組み合わせることで、機器単体及び空調システムとして経済合理性の高い最適更新周期を定量的に得るための費用最適化モデル(一年間の費用の期待値が最も小さくなる年数を求める理論式)を提案した。

対象機器の故障回数がNHPPになっているものとし、機器の購入・据付後の経過年数を t として、故障強度を $h(t)$ 、機器費用を K 、修理費用を r 、そして運転費用を $e(t)$ 、点検費用を I とする。なお、金利や経済変動は無視するものとする。

t 年毎に機器を更新するものとして、一年間の費用の期待値 $c(t)$ は累積故障数の期待値 $E[N(t)]$ を用いて次式で表すことができる。

$$c(t) = \frac{K + r \cdot E[N(t)]}{t} + \frac{e(t)}{t} + \frac{I \cdot t}{t} = \frac{K + r \cdot E[N(t)]}{t} + \frac{e(t)}{t} + I$$

この場合、費用対効果が最も高い機器の更新周期は、一年間の費用の期待値が最も小さい $\frac{dc(t)}{dt} = 0$ となる時点の経過年数 $t = t^*$ を求めれば良い

- 故障強度 $h(t)$ 及び期待累積故障数 $H(t)$ による機器更新時間関数 $\xi(t)$

$$r(\beta - 1) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta + \frac{1}{6}pW(4\epsilon^2 t + 3\epsilon^2 + 3\epsilon)t^2 = K$$

- n 個の部位で構成される機器の場合

$$\sum_{i=1}^n r_i(\beta_i - 1) \left(\frac{t}{\theta_i}\right)^{\beta_i} + \frac{1}{6}pW(4\epsilon^2 t + 3\epsilon^2 + 3\epsilon)t^2 = K$$

- n 個の部位で構成される機器が m 台で構成されるシステムに適用する場合

$$\sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n r_{i,j}(\beta_{i,j} - 1) \left(\frac{t}{\theta_{i,j}}\right)^{\beta_{i,j}} + \frac{1}{6}p_j W_j(4\epsilon_j^2 t + 3\epsilon_j^2 + 3\epsilon_j)t^2 \right] = \sum_{j=1}^m K_j$$

- β : 形状パラメータ
- θ : 尺度パラメータ
- p : 電力量料金単価
- W : 年間消費電力量
- ϵ : 機器の性能低下係数

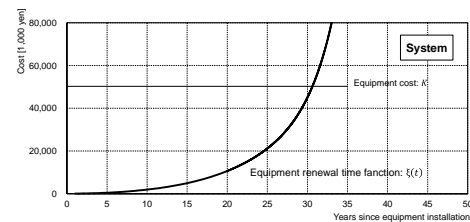


図7 機器更新時間関数 $\xi(t)$ の計算結果

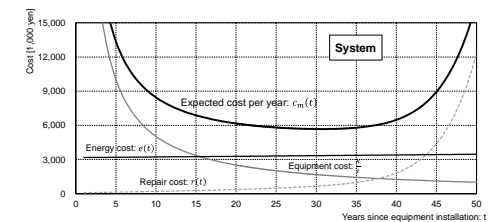


図8 一年間の費用の期待値 $c_m(t)$ の計算結果

事務所ビル(5,000m²規模)の性能低下係数 $\epsilon=5\%$ とした蓄熱式空調システムに関する更新周期毎の一年間の費用の期待値 $c_m(t)$ は、法定耐用年数である15年周期の6,881千円/年に対し、費用最適化モデルによる最適更新周期30.56年の場合は5,677千円/年となり1,204千円/年(▲18%)削減。

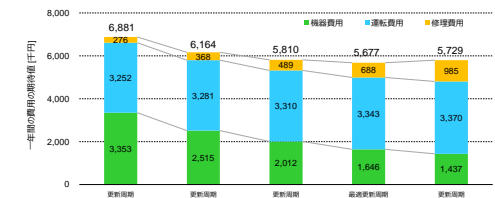


図9 更新周期毎の $c_m(t)$ 及び内訳