

地上走行時の超大型航空機荷重に対するライフサイクルコストを考慮した 空港舗装の設計・補修に関する研究

国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室
八谷好高・坪川将丈・江崎 徹
国土交通省航空局飛行場部建設課
菅野谷慎一
関西国際空港株式会社工務部工事企画調整グループ
吉見昌宏

1. はじめに

空港舗装施設は従来より航空機の静止状態を対象として整備されてきている。しかし、空港用地の地盤沈下や航空機荷重の繰返し载荷等に起因する舗装変状が進行すると、その上を航空機が高速走行するときには静止時よりもはるかに大きな荷重が加わることが考えられる。特に、超大型航空機の導入も予定されていることから、航空機地上走行時の運動特性の解明、航空機走行時に舗装構造に加えられる荷重特性の解明、そしてこの荷重に対する舗装構造の動的力学特性の解明が急務となっている。

これに加えて、変状の生じた空港舗装上を航空機が走行する場合には、航空機の振動が大きくなり、パイロットの操縦性は大きな影響を受けるので、地上走行時における航空機事故の発生も懸念される。これを防止するためには、舗装変状がパイロットの操縦性に及ぼす影響を解明することが必要になる。

そのため、本研究においては、航空機走行の安全性を確保するための空港舗装施設の構造設計ならびに補修規準の策定方法として、以下に示す2項目について検討している。

- ① 空港舗装走行時における航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性に基づく空港舗装平坦性の基準化
- ② 航空機の静止・走行時における空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響を考慮した空港舗装構造の設計・評価法の基準化

以下では、それぞれについての概要を紹介する。

2. 航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性に基づく空港舗装の平坦性の基準化

2.1 概要

航空機に対して安全な走行面を提供するという空港舗装の機能を確認するために、その表面状態については定期的に調査を行う必要がある。しかし、空港舗装の利用者たる航空機の乗員・乗客の立場からの機能評価については現状では明確になっていない。そのため、

乗員・乗客のうちで航空機の地上走行に直接関わるパイロットの空港舗装に対する主観的評価を行ない、乗り心地および安全性に影響する表面性状について調査した。その結果に基づき、航空機の地上走行挙動に影響を与える滑走路の平坦性評価を汎用シミュレーションソフト APRas (Aircraft Pavement Roughness assessment software) および路面プロファイルモデルを用いて理論的に実施し、航空機の応答特性に基づく滑走路の平坦性評価値についてまとめた。

2.2 空港舗装の表面性状に関するパイロットの意識調査

2.2.1 アンケート調査

主に国内空港を利用しているパイロットに対して、航空機を舗装上に走行させている際に感じる表面性状に関する事項についてアンケート調査を実施した。その結果、62名から回答を得ることができた。調査項目は、航空機の乗り心地に関する評価と走行安全性に関する評価であり、それぞれ、滑走路、誘導路、エプロン別に調査した。

これらについては、舗装表面における8項目の影響因子(段差、わだち掘れ、波状路面、舗装のひび割れによる破片、走行方向の勾配、湿潤路面、雪氷路面、航空灯火の凹凸)に対する影響程度について、良し悪しの程度を5段階で評価してもらった。評価の回答としては、影響なし、あまりない、普通、ややある、大いに影響の5段階である。

2.2.2 調査結果

表面性状を支配する8項目の影響因子について、舗装施設別の影響程度を「影響なし」1点～「大いに影響」5点とし、数値化によって比較した結果を図-1、図-2に示す。

乗り心地に関しては「波状路面」(3.88)が全ての舗装施設において最も影響が強く現れており、次いで「段差」(3.63)、「航空灯火の凹凸」(3.41)であった。舗装施設別では、滑走路・誘導路に比して、エプロンでの影響は小さい。

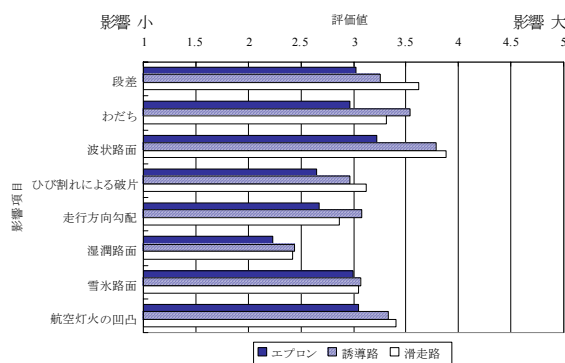


図-1 乗り心地評価 (舗装施設別)

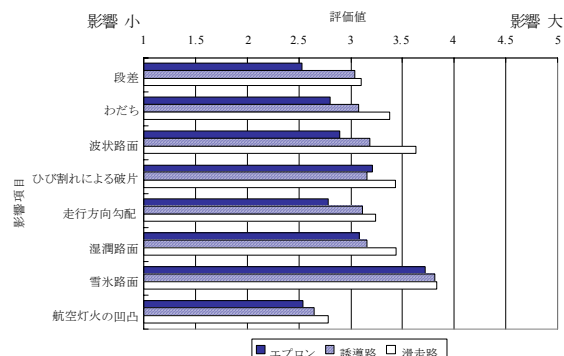


図-2 安全性評価 (舗装施設別)

一方、安全性について検討すると、「雪氷路面」(3.83)が全ての舗装施設において最も影響が強く現れており、次いで「波状路面」(3.63)、「ひび割れによる破片」(3.44)である。舗装施設ごとの影響の違いでは、乗り心地同様、エプロンにおいては、誘導路・滑走路に比べ「ひび割れによる破片」以外は、全体的に影響の程度が低く、誘導路よりも滑走路で表面性状の影響が大きいことがわかった。

2.3 航空機の走行シミュレーションによる舗装プロファイル評価

これまでの調査結果に基づき、表面性状が航空機の地上走行挙動に及ぼす影響を理論的に解明することを目的として、航空機の運動モデルの検討を行った。検討に際しては、汎用性の高い既存のシミュレーションソフトであるAPRasを使用し、離着陸時、滑走路において路面が航空機の乗り心地に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。

APRasとは、滑走路面のプロファイルデータを入力することにより、離着陸時の航空機のパイロット座席における上下方向加速度(PSA: Pilot Station Acceleration)と重心位置における上下方向加速度(CGA: Center of Gravity Acceleration)を算出するシミュレーションソフトウェアである。安全性・快適性を評価するには、パイロットの座席における上下方向加速度(PSA)が重要となり、値が0.4g以内である時に快適であると評価できる。

これまでの調査により、舗装表面の特定周波数(波長)が航空機の乗員の乗り心地に関係のあることがわかった。ここでは、波状特性を加味したプロファイルを作成し、APRasを用いてPSA, CGA, 走行速度, 平坦性の相関について分析を行った。

得られた振幅、波長と航空機の上下方向加速度の関係から、乗り心地の観点から舗装の平坦性評価基準を求めることができる。APRasでは、乗員に作用する上下加速度の限界値を $\pm 0.4g$ に設定しているため、ここでもその値を使用して平坦性の新しい評価基準を検討することにする。図-3は、限界値に達したときの振幅と波長を表したものであるが、図より離陸時においては広範囲の波長域にわたって12~16mm程度であること、定速走行時には5~16mの波長域で8mm程度であることがわかる。

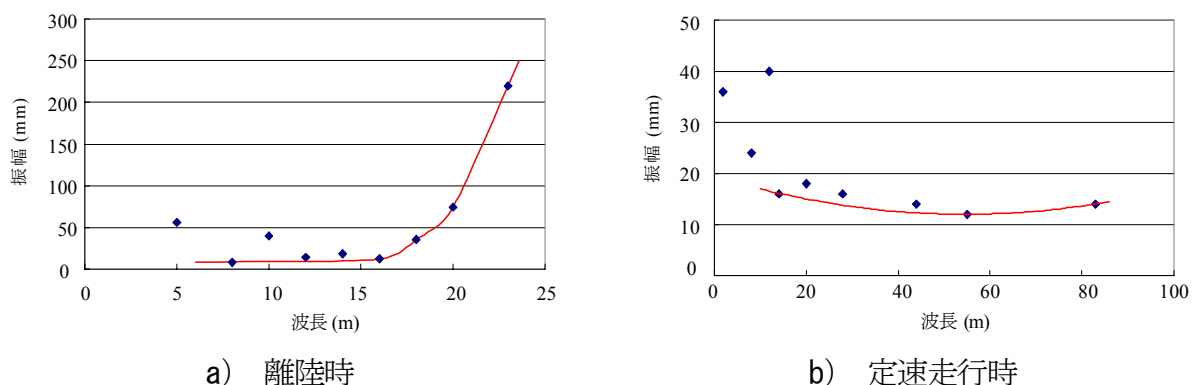


図-3 航空機応答から見た舗装平坦性評価

3. 航空機荷重に対する空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響を考慮した空港舗装構造の設計・評価法の基準化

3.1 概要

航空機が変状のある舗装上を高速走行するとき、制動・曲線走行・着陸時には、空港舗装は静止時よりも大きな荷重を受けることが懸念される。そのため、航空機地上走行時の運動特性の解明、航空機走行時に舗装構造に加えられる荷重特性の解明、そしてこの荷重に対する舗装構造の動的力学特性の解明が急務となっている。このような課題を解決するために、移動荷重に対する空港舗装の応答解析、静的ならびに動的解析による空港舗装構造の評価について研究を行っている。

以下では、まず、最新の空港舗装構造設計法を紹介した後、移動、衝撃といった、荷重が空港舗装に実際に載荷される状況を考慮した舗装構造解析ならびに評価法について取りまとめる。

3.2 最新の空港舗装構造設計法

空港舗装構造の設計法として最近提案されている理論的な方法である、多層弾性理論を用いたものについて、わが国ならびに米国のを以下に紹介する。

3.2.1 わが国の設計法

多層弾性理論を用いた理論的設計法では、航空機荷重が載荷された場合に、路床のひずみとアスファルトコンクリート層の水平ひずみを許容値以下にするように舗装構造が決定される。この設計法は、路盤としての等価値が不明な新しい材料を用いる場合や、より経済的な舗装構造を決定するのに適用可能であり、舗装の設計を合理化することが可能である（図-4）。以下では、空港拡張プロジェクトに使用する場合を想定して、多層弾性理論を用いた設計の考え方を取りまとめた。

滑走路・誘導路の舗装構造を決定するためには、従来の CBR 設計法と同様に、荷重の大きさ（設計航空機荷重）と頻度（設計交通量）が必要であるが、そのうち設計交通量は、既存部分の運用状況を考慮に入れて決定することも可能である。

このほか、多層弾性理論による設計法を採用する場合には、各層の弾性係数と破壊基準が必要となる。

この場合、基準ひずみは、現行の FWD による舗装構造評価法と同様に、CBR 設計法による舗装構造に基づいて決定できる。図-5 は、B747-400 が載荷されている場合に路床上面に発生する鉛直ひずみを多層弾性理論により計算し、繰返し載荷回数に基づいて基準ひずみを決定した場合の例である。

各層弾性係数は、室内試験と現場試験から決定できる。下層路盤に用いる材料の一つとしては、低価格で水硬性が期待できる水硬性スラグも考えられるが、その場合の弾性係数は室内試験による長期材齢時の強度と現場試験における強度の変動を考慮して決定すればよい。セメント安定処理材をアスファルト混合物層の直下に用いると、アスファルト混合

物層に生じるひずみを低減でき、舗装厚を薄くすることが可能となる。図-6 はこのような考え方に従って設計した舗装構造の例である..

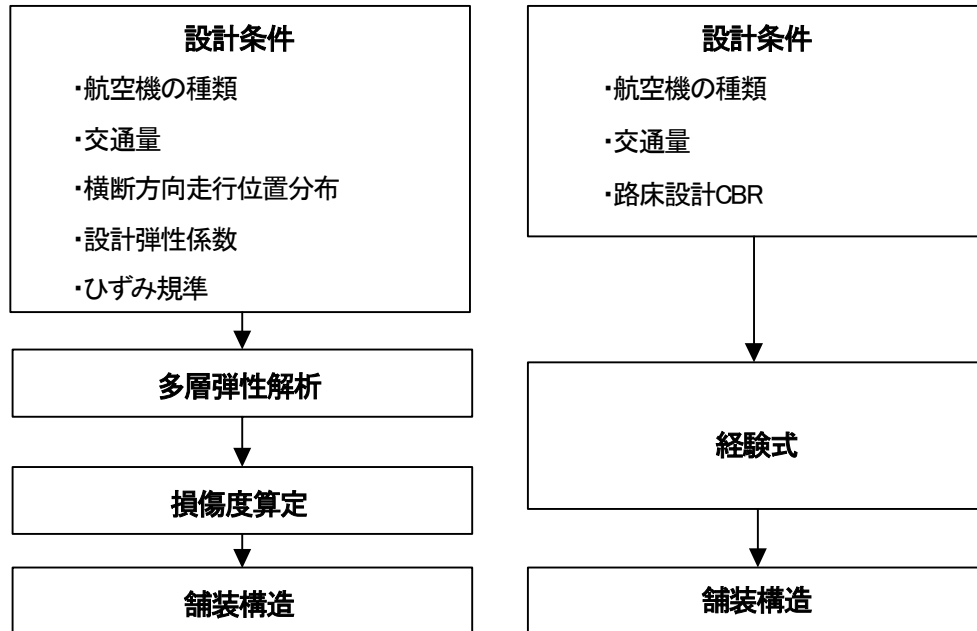


図-4 多層弾性理論による設計法と CBR 法の比較

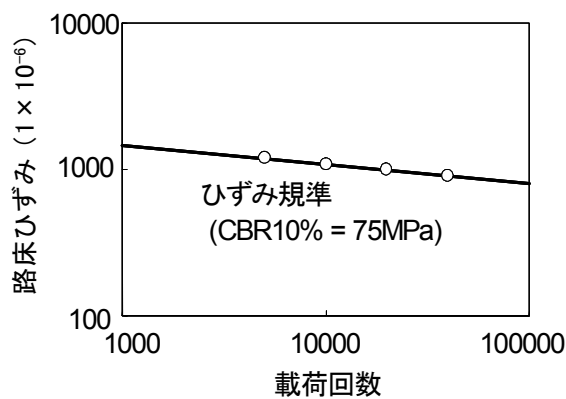


図-5 路床ひずみの規準

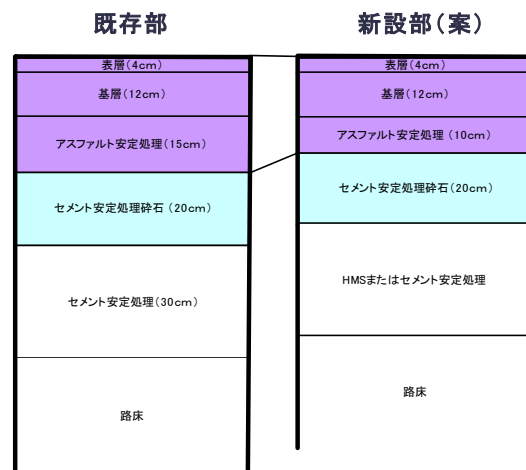


図-6 舗装構造の比較

3.2.2 米国の設計法

米国の設計法である、LEDFAA (Layered Elastic Design - FAA) は多層弾性理論による空港舗装構造設計アプリケーションであり、最初のバージョンは1994年にリリースされ、現在のバージョンは1.3である。LEDFAA1.2では、3軸6輪からなる主脚を持つ航空機 (B777

等) に対応させたアプリケーションであったが、LEDFAA1.3 では、より複雑な主脚構成の航空機(例えば A380 のように 3 軸 6 輪からなる主脚と 2 軸 4 輪からなる主脚が混在する機種) に対する計算も可能となっている。また、LEDFAA1.2 は Advisory Circular (以下、AC) 150/5320-16 の中で、B777 を想定した舗装の構造設計を行う上での新しい標準設計法として規定され、B777 が利用する空港の建設において、AIP (Airport Improvement Program) からの補助を受ける場合にはこのアプリケーションによる設計が必要とされた。その後、2004 年 5 月の AC150/5320-6D の改訂 (Change3) に伴い、前述の AC150/5320-16 はキャンセルされ、LEDFAA1.3 は B777 だけではなく、全ての航空機を対象とし、AC の第 3 章と第 4 章にある舗装厚設計曲線による設計法の代替的な設計標準ツールとして規定された。

LEDFAA では、空港アスファルト舗装ならびに空港コンクリート舗装の構造設計を対象としており、新規建設ならびにオーバーレイに関する設計が可能である。アプリケーションに用いられている多層弾性理論に関しては、AC150/5320-6D の 7 章に詳細な記載がある。将来、対象とする航空機が増えた場合には LEDFAA で考慮できるように航空機データが追加されるが、AC150/5320-6D の第 3 章と第 4 章に記載のある舗装厚設計曲線図は追加されない予定である。

AC の設計曲線図との対応であるが、AC150/5320-6D に記載のある空港アスファルト舗装の設計曲線は、例えば B747-400 の場合、16 輪 (2 軸 4 輪×4 脚) の影響を考慮した等価単車輪荷重により計算された路床のひずみに基づいている。しかしながら、LEDFAA1.2 では、2 軸 4 輪 (1 脚) に対する計算から路床のひずみを計算し、そのひずみを用いて CDF (Cumulative Damage Factor : 累積損傷度) を計算していた。一方、LEDFAA1.3 では、16 輪全てを考慮して CDF を求めていることから、LEDFAA1.3 で用いられている設計思想と AC の設計曲線は整合している。

路床に生じるひずみ規準について、LEDFAA1.2 では路床の弾性係数により変化するものとしていたが、LEDFAA1.3 では、路床の弾性係数により変化しないものとしている。LEDFAA1.3 で用いられているひずみ規準より、破壊に至るまでのカバレッジは以下のように計算されている。

- ・路床上面の鉛直ひずみについて

$$C = \left(\frac{0.004}{\varepsilon_v} \right)^{8.1} \quad C < 12,100 \text{ の場合}$$

$$C = \left(\frac{0.002428}{\varepsilon_v} \right)^{14.21} \quad C > 12,100 \text{ の場合}$$

ここで、

C : 破壊に至るまでのカバレッジ

ε_v : 路床上面の鉛直ひずみ

- ・アスファルト層下面の水平ひずみについて

$$\log_{10}(C) = 2.68 - 5 \times \log_{10}(\varepsilon_h) - 2.665 \times \log_{10}(E_A)$$

ここで、

C : 破壊に至るまでのカバレッジ

E_A : アスファルトの弾性係数 (psi)

ε_h : アスファルト層下面の水平ひずみ

また、前述の CDF は以下のようにして計算されており、CDF が 1 を超えると、残存寿命がないものと定義されている。

CDF_i = ある航空機によるカバレッジ / 破壊に至るまでのカバレッジ

$CDF = CDF_1 + CDF_2 + \dots + CDF_N$ (全ての航空機に関する CDF_i の和)

アプリケーションでは、[図-7](#) に示すように航空機データを設定し (ライブラリから選択することで航空機の諸元は自動的に入力される。離陸回数等の条件は手動入力である。)、[図-8](#) に示すように、仮の舗装構造を設定する。舗装構造としては、各層の材料 (ライブラリから選択)、路床を除く各層の層厚、路床の CBR (または路床の弾性係数) を入力する。アスファルト混合物ならびにアスファルト安定処理材の弾性係数は変えることができず、粒状材の弾性係数については、材料種類とその厚さにより自動的に設定される。

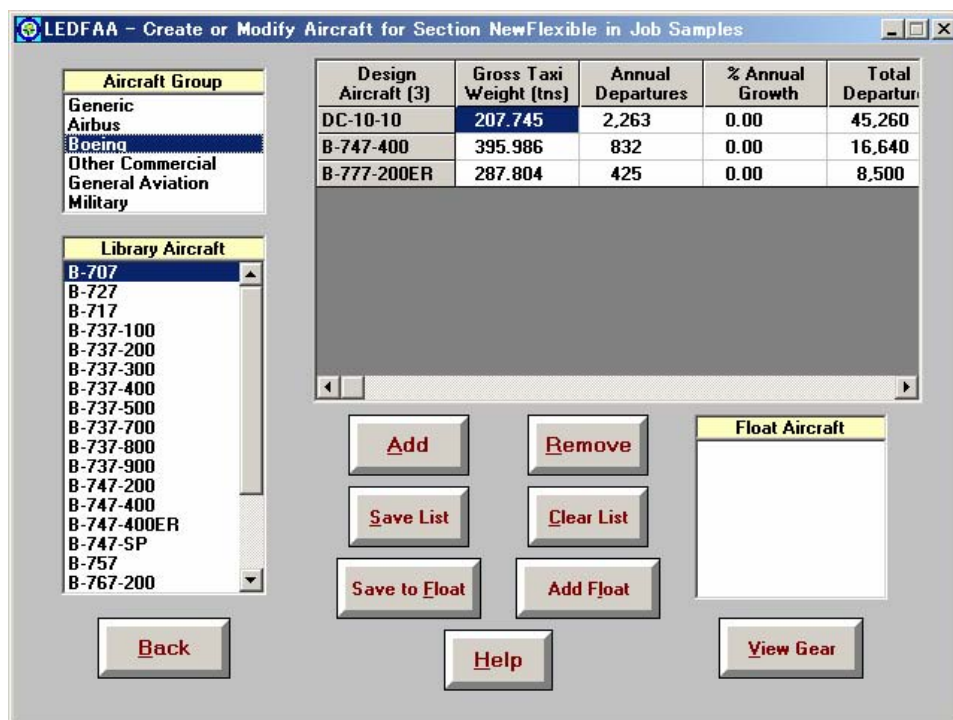


図-7 航空機データ設定画面

設定値を入力した後、厚さを計算したい層（図-8 では「→」印により下層路盤を指定している）を指定して「Design Structure」ボタンを押すと、設定した条件において、指定した層に必要なとされる厚さが自動的に計算されるようになっている。また、「Life」ボタンを押すと、設定した舗装構造の残存寿命が計算される。

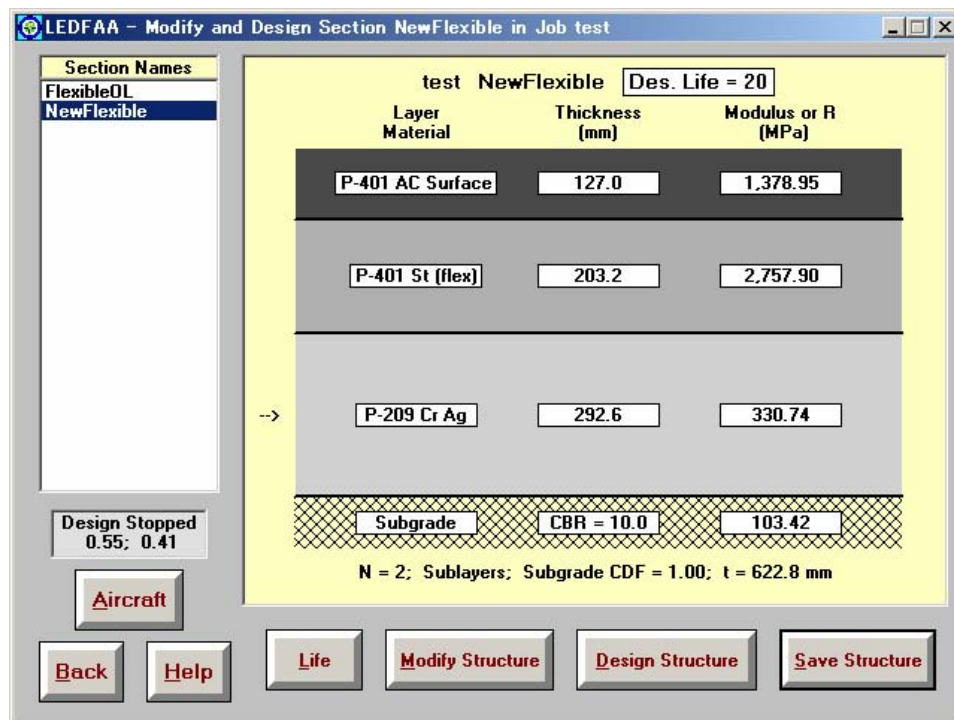


図-8 舗装構造条件設定画面

3.3 移動荷重に対する空港舗装の応答解析

航空機が走行する場合の舗装の動的応答について解析した。具体的には、移動する航空機タイヤの作用する要素と節点を効率的に検出し、舗装の挙動を解析できる3次元FEMプログラムを開発している。タイヤ接地圧は表面に鉛直に分布する荷重として処理している。8節点アイソパラメトリック要素を用いて滑走路をモデル化している。本プログラムの特徴は複雑な荷重条件と自由度が70,000以上になる大きな問題を、PCを用いて効率的に計算できることである。このプログラムを用いて、移動する航空機の輪荷重に対する応答を算出し、移動荷重の速度、アスファルトコンクリート層の厚さ、車輪配置が応答に及ぼす影響について考察した。

空港舗装構造が一定の速度で移動する輪荷重の作用を受けている場合を想定して解析を行った。解析対象区間は長さ20m、幅20m、深さ10mである。幾何学的な対称性を考慮して、図-9のように解析領域の半分を有限要素で離散化して、移動荷重を受ける滑走路の動的解析を行っている。車輪が通過する位置にある要素の長さや幅は、舗装とタイヤの接地面を長方形で近似した長さや幅に等しい。解析で考慮した車輪配置は図-10a)に示すような

単軸荷重である。解析には 8 節点ソリッド要素を用いている。解析に使用する全節点数は 22,540、全要素数は 18,720 となる。ここでは、表面たわみおよび図-10b) に記したタイヤ中心位置に沿ったアスファルト要素 E_A における ε_{xx} と ε_{yy} 、脚中心位置すなわちモデルの対称軸に沿った路床要素 E_S の ε_{zz} を求めた。

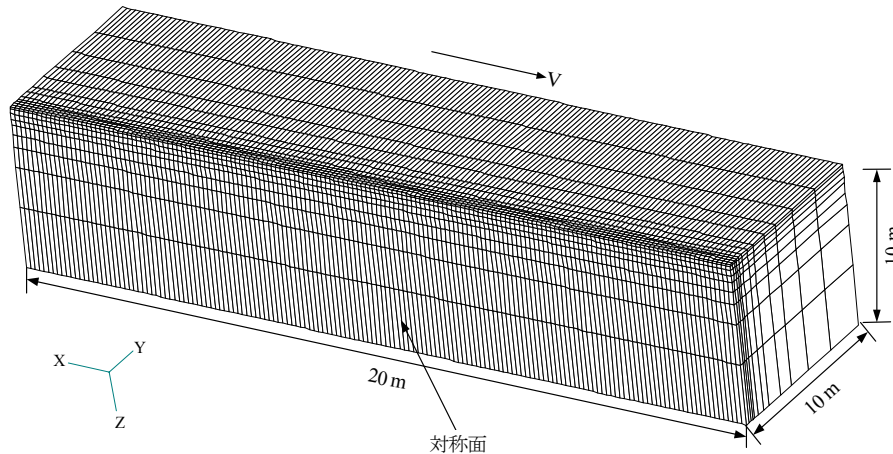


図-9 空港舗装の 3次元有限要素分割

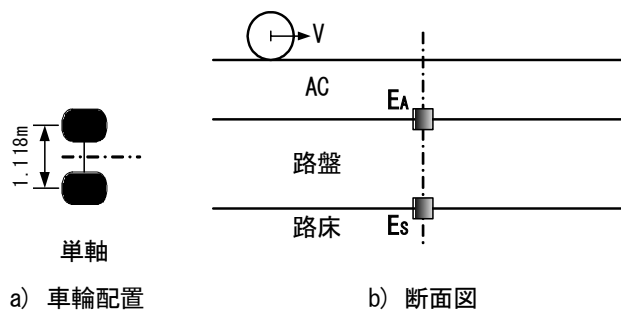


図-10 車輪配置と着目した要素の位置

3.4 静的ならびに動的解析による空港舗装構造の評価

載荷試験、解析方法の違いによる滑走路・誘導路走行時の表・基層、上層路盤、路床の評価について、次の 4 方法による違いを調べた。

- ① 走行載荷試験の走行荷重逆解析弾性係数を用いた走行荷重対応解析
- ② FWD 載荷試験の動的逆解析弾性係数を用いた走行荷重対応解析
- ③ FWD 載荷試験の静的逆解析弾性係数を用いた静止荷重対応解析
- ④ 静的載荷試験の静的逆解析弾性係数を用いた静止荷重対応解析

アスファルト舗装構造の理論的構造設計における研究成果を総合して定めた破壊規準により、載荷試験、解析方法による構造評価の違いに関して比較を行う。載荷速度としては、空港舗装を対象とした米国の設計法で用いられている周波数 10Hz を使用している。

大型航空機が高頻度で使用するわが国の代表的な空港を設計対象にして構造を決定した滑走路舗装を例にとって計算した破壊回数を表-1に示す。

その結果、①～④のいずれの方法においても、路床よりは上層路盤において少ない载荷回数で破壊が生ずること、すなわち、ひび割れが卓越することがわかる。また、評価方法の違いとして、FWDを対象に考えると、動的逆解析を行う場合が厳しい評価となることがわかる。また、走行载荷と静的载荷をみれば、走行载荷のほうが厳しい評価となることもわかる。

表-1 滑走路の破壊回数

	①	②	③	④
表・基層	5.0×10^6	1.5×10^6	2.0×10^5	2.0×10^6
上層路盤	2.0×10^4	2.2×10^4	3.0×10^4	2.8×10^4
路床	2.0×10^6	5.0×10^4	4.0×10^5	1.2×10^8

4. 結論

本研究は次のようにまとめられる。

① 航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性

航空機の地上走行挙動に着目した空港舗装に対するパイロットの主観的評価については、半数近くのパイロットが乗り心地・安全性に対する影響を感じていること、舗装表面からの主要影響因子は乗り心地と走行安全性で異なっていることがわかった。

② 航空機荷重に対する空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響

空港舗装に対する载荷試験により動的解析と静的解析の相違点ならびに構造評価の違いについて検証した。また、三次元有限要素法による空港舗装構造の荷重応答の解析方法ならびに逆解析方法について研究するとともに、移動荷重に対する舗装構造の応答について明らかにした。

5. おわりに

本研究では、航空機が空港舗装上を走行するときに、航空機が舗装の表面形状から受ける影響、反対に航空機の静止、走行の違いによる舗装への影響についてまとめた。今後は、データの蓄積等、研究の熟度を高めることにより、空港舗装施設の設計ならびに補修に関する基準化を図ることとしたい。

港湾施設のライフサイクルマネジメントに関する研究

港湾空港技術研究所	構造強度研究室	横田 弘
港湾局	建設課	宮崎正治
港湾局	環境・技術課	西園勝秀

要 旨

安定的な経済発展を目指す我が国において、港湾施設を適切に維持管理していくことは重要な課題となっている。本研究により、厳しい海洋環境下において、劣化や変状の発生・進行が生じやすいこれら構造物の性能評価を適切に行うことができる。また、最も効果的な維持補修の工法や実施時期を提案することができる。結果として港湾構造物の維持管理業務の合理化が図られ、ライフサイクルコストの低減が可能となる。

1. はじめに

港湾は、四方を海洋に囲まれるわが国にとって、安全・安心な生活や円滑な経済社会活動の命運を担っている。港湾は、防波堤等の外郭施設、岸壁等の係留施設、航路・泊地等の水域施設等で構成され、これらがそれぞれにその機能を十分に発揮し、かつ個別の機能が相互に効率的に結びつくことで、港湾自体もまたその使命を十分に果たすことができる。

これら港湾施設のストックは、1998年度に約27.5兆円(1995年価格換算)に達している。中でも、1960年代の高度経済成長期に建設された施設の多くは、建設されてから既に40年余が経過し、これらに対する維持管理費用が今後急増していくことは確実である。過去に実施された港湾施設の維持管理費用(維持、補修、更新に要した費用)から、将来必要な維持管理費用の推計を試みた結果¹⁾によると、今後港湾事業費の伸びが期待できないと仮定すれば、2020年における維持管理費用は全事業費の30%にも達する。この金額は決して小さなものではなく、全国的視野に立って、できる限り小さい負担で計画的かつ戦略的な維持管理を実施していくことの必要性を示唆するものである。

このように、既存施設の有効活用、および適切な補修等の対処による構造物の延命化を実現するための技術として、ライフサイクルマネジメント(LCM)がある。港湾LCMは現状では十分に確立されたものではなく、研究的アプローチと行政的アプローチの両面から、協調してその実現を模索している段階である。本稿では、現在検討中の港湾施設LCMについて概要を述べる。

2. ライフサイクルマネジメントの概念

港湾LCMの概念は、図-1に示すとおりである。目視を主体とする一次点検により、施設、構造物、あるいは構造物を構成する構造要素の状態を「変状度」により区分する。一次点検は、港湾管理者等の点検の複雑化を避けるために、目視を主としており、主観的な判断になりがちである。そのため、目視により判断された変状度と耐力等の構造性能との関係づけを行い、できるだけ客観的な判断となるようにしておく必要がある。これについ

ては現在，研究的に取り組んでいるところである²⁾．一次点検，あるいはそれが十分でない場合に実施する二次点検の結果から，施設全体（係留施設1バース，防波堤の1単位等）の変状度を評価する．その全体的変状度に基づいて対策を検討することとなるが，同時に，今後の変状度の低下の程度を予測する必要がある．その予測結果に基づいて，当該施設が必要な性能を維持してゆくのに最も合理的な対策工法およびその実施時期を提案する．

対策工は，適用可能な対策工データベースから，適用可能な変状度に応じて複数案を提案し，それらに必要なライフサイクルコストを算定する．ライフサイクルコストによって港湾管理者が適当な工法を選定する．その際，必要性能に応じてライフサイクルコストを最小にする解を求める場合と，予算制約下で性能の最大化を解とする場合がある．

港湾構造物に限らず，一般の構造物では，過度の劣化や変状が生じてから対策を講じているのは，コストもかかる上に，工事も大規模になる．そのため，劣化・変状の進行を事前に予測し，最適なタイミングで最適の対策工をとる，いわゆる予防保全的維持管理を行うことが理想である．その結果，ライフサイクルコストも低減することになる．港湾LCMは，まさにこの思想に立脚して構築される一連のシステムと言い換えることができる．

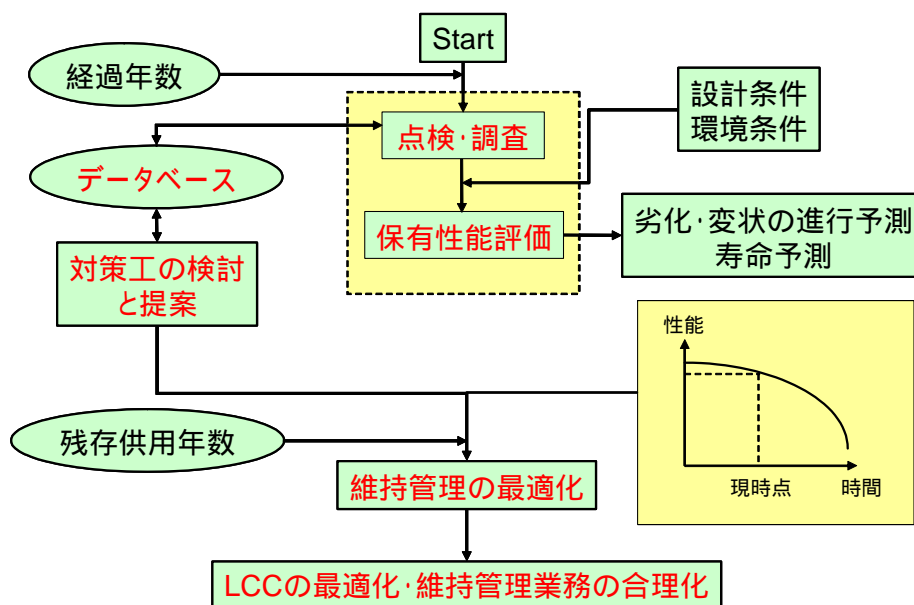


図-1 港湾LCMの概念

3. 点検・調査

点検・調査は構造物の現況を知る上で不可欠の作業で，港湾LCMにおいても諸データの入力となるべく重要な項目である．港湾施設は，常時海水の作用を受ける塩害環境下に位置し，構成材料にとってたいへん過酷な状況に置かれている．加えて，施設の大部分が海水中に没していることや，防波堤などでは作業を妨げる規模の波浪が常時作用することなどにより，日常点検などが十分に行えない状態になる．また，港湾施設はそれを構成する構造物や構造要素が複雑かつ相互に関連し合っているうえに，作用する外的要因が多種多様であり，変状の発生機構が極めて複雑になっている．そのため，効率的な点検・調査を

行うには、重要度の高い主要な変状をその対象として選定することが必要である。すなわち、原因による変状の発生、変状の結果生ずる影響、そして機能の低下へとさらに変状が進行していく過程を変状連鎖として捉え、変状連鎖上における主要な変状に絞ってメンテナンスを行う手法を採るのが効率的である³⁾。つまり、変状が独立して進行していく変状と、互いに関連性を持ち、一つの構成要素の変状が次々と他の要素へと波及していく変状とに大別し、これらの性質を踏まえた点検を行うこととなる。

点検・調査では、このような変状の性質や発生の傾向を十分に理解して、標準的な点検指標、点検頻度、点検箇所などを定めることとなる。構造形式毎に重要な変状を確実に捕捉することで、重大な変状に達する以前に、比較的軽微に対処可能な段階の変状で留めることができると考えられる。

これらを踏まえて、点検を定期的に行う目視による一次点検とより詳細な二次点検に大別し、それぞれ着目すべき点検部位とその項目を整理して提供している。栈橋の一次点検における判定基準(抜粋)を表-1に示す。一次点検は、目視調査等を主体に構造物の部位毎に点検・評価するものであり、同表に示すように、点検結果をa～dの変状度で判定する。aは重度の変状、dは変状のない場合である。同表に示す上部工コンクリートのひび割れのように、定量的な指標で変状度を判断できる項目がある一方、鋼管杭の損傷のように定性的な基準で変状度を判断せざるを得ないものもある。一次点検は、変状の経時変化を把握するために、定期的に行う必要があるが、現在のところ1～2年に1回程度実施することとしている。

表-1 栈橋の一次点検診断表(一部抜粋)

点検項目		点検方法	判定基準
上部工	コンクリートのひび割れ(下面)	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数・長さ と幅	a スラブ: 網目状のひび割れが部材表面の50%以上見られる かぶりのはく落がある 鉄筋が破断している はり: 軸方向の幅3mm以上のひび割れが見られる かぶりのはく落がある ハンチ: 蜘蛛の巣状または鉛直方向の幅2mm以上のひび割れが見られる かぶりのはく落がある
			b スラブ:網目状のひび割れが部材表面の50%未満で見られる はり:軸方向の幅3mm未満のひび割れがある ハンチ:幅2mm未満のひび割れが全体的に広がっている
			c スラブ:一方方向のひび割れもしくは帯状または線状のゲル吐出物が見られる はり:軸と直角な方向のひび割れのみが見られる ハンチ:幅2mm未満のひび割れが部分的に見られる
			d 変状なし
鋼管杭	鋼材の腐食, 亀裂, 損傷	目視 ・穴あきの有無 ・水面上の鋼材の腐食 ・表面の傷の有無	a 腐食による開孔や変形, 損傷が見られる
			b MSWL付近～LWL付近, あるいは全体的に赤橙色の発錆が著しい
			c 部分的に黒または赤褐色の発錆が見られる
			d 付着物は見られるが, 発錆, 開孔, 損傷は見られない

表-2 栈橋上部工の二次点検項目

点検項目	点検方法
コンクリート強度	コアサンプリング，反発度法
コンクリートのひび割れ深さ	超音波法等
かぶり厚さ	電磁波法，はつり試験等
鉄筋の腐食状況	自然電位測定，分極抵抗測定等
コンクリートの分析	塩化物イオン含有量測定，中性化深さ測定等

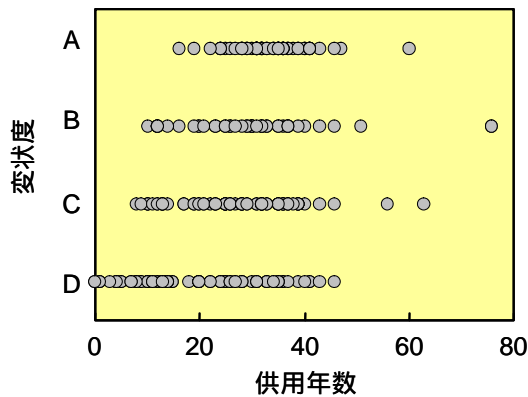


図-2 栈橋の変状度分布

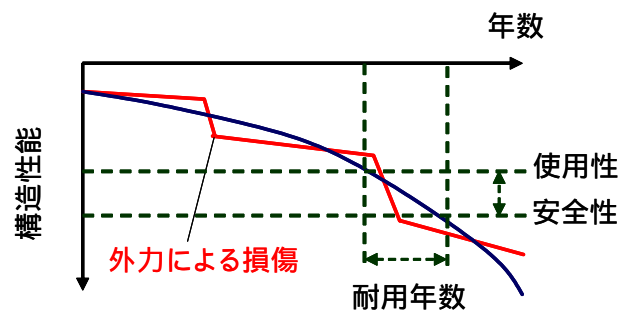


図-3 供用による構造性能の低下

二次点検は、潜水士、機器等を活用して目視困難な部位の劣化の進行等を詳細に点検・評価するものである。一次点検と比較してより客観的かつ数値指標で構造物や構造要素の状態が把握できる。例えば、栈橋のコンクリート上部工は、特に塩害を受けやすい構造様式であるため、劣化事例が極めて多い。コンクリート構造物において、コンクリート中の鋼材に腐食が生じると劣化が急速に進行する。したがって、所定の機能を保持するためには、二次点検により表面に現れる段階以前で劣化を発見し、劣化の程度に応じた適切な対策を施す必要がある。そのために、表-2 に示すような二次点検の項目を与えている。

4. 総合評価

点検・診断から得られた部位毎の評価結果（a～d）を基に、施設や構造物全体の機能・安全性を総合的に評価する。この結果はA～Dのランクで区分する。部位毎の評価結果からどのように施設や構造物全体の性能評価を行うかについては現在検討中であり、未だ定まった基準はできていない。平成15年度より実施中の国有港湾施設の点検・診断結果が蓄積された段階で評価手法を提示する予定である。したがって、現状では、A：性能上問題があり、緊急の対策が必要，B：計画的な対策が必要，C：軽微な劣化・変状が見られ，継続して観察が必要，D：劣化・変状が認められない，というような技術者の官能評価によっている。

栈橋を事例に施設が建設されてからの年数と変状度との関係を整理すると，図-2 に示す

ようになる。これは我が国における252栈橋の評価結果を表したもので、主に上部工の変状に基づいて判定している。必ずしも時間の経過に伴って施設の変状が進行する訳ではないことが分かる。このような傾向は他の施設、他の変状についても同様である。この原因として、もちろん担当者による誤差なども含まれるが、最も大きな要因は施設ごとに変状の進行速度が異なることによる。しかし、個々の施設について変状の進行程度を規定するよりも、このような傾向をばらつきとみなし、確率的に評価を行った方が妥当である。この考え方について以下で述べる。

5．変状の進行予測

施設や構造物に生じる変状の進展を予測することは港湾LCMにおいて重要な項目となるが、同時に非常に困難な課題でもある。コンクリート構造物の塩害劣化に対しては、Fickの拡散則に基づいて鉄筋位置での塩化物イオンの蓄積量を予想し、これがある量を超えると鉄筋に腐食が生じるという考え方がある。この方法はコンクリート構造物では一般的に用いられているものの、鉄筋腐食発生時の塩化物イオン量の設定、外部から供給される塩化物イオン量（表面塩化物イオン量）の設定、コンクリートの塩化物浸入・拡散への抵抗性（拡散係数）の設定などに不明な点が多く、既存構造物の変状予測には未だ解明すべき課題が多い。一方、鋼構造では、腐食速度が性能予測のために用いられているが、集中腐食への対応が難しいなどの点が課題である。

構造物の性能低下の進行は、概念的に図-3のように表すことができる。つまり、初期欠陥の値を初期値として、変状や劣化が時間と共に進行する。また、台風や地震等の大きな荷重作用により損傷が短時間で進行する。そのため、このような荷重作用時の点検（異常時点検）も重要となる。ただし、本稿では、簡素化のため、初期欠陥および荷重作用による損傷の進行は無視し、経時的な変状に関する進行速度と時間とで表現する。

図-4は、マルコフ連鎖という確率論的な考えを用いて変状の進行を再現するモデルの概念を示すものである⁴⁾。これは、ある施設における変状は、A、B、C、Dの独立する変状度のいずれかに存在し、1年経過すると遷移確率 P_x で変状度が1ランク進行し、残りの施設は確率 $1-P_x$ で同じ変状度に留まるというものである。この仮定が成立するかどうかは、各変状度間の遷移確率が等しいかどうかによる。しかしながら、変状度によっては定性的な判断によっているものもあり、現時点では各変状度間の遷移確率をすべて等しいと考えることに大きな誤りはないと判断している。

この仮定に基づく予測に際しては、適切な遷移確率の設定が必要となる。そこで、既往の点検診断結果を最も精度良く再現できるような遷移確率を求める。その結果を図-5に示す。同図は再現性が非常に高かった鋼矢板岸壁と適合度が中程度の栈橋の結果である。ここで、「実際」は、点検の結果得られた変状度の分布を表している。また、「予測」は、マルコフ連鎖モデルに各施設の供用年数を入力して得られた解析結果である。両者が最もよく合致する遷移確率は、鋼矢板岸壁では $P_x=0.036$ 、栈橋では $P_x=0.047$ となる。両施設の遷移確率の大小関係は、栈橋の方が鋼矢板岸壁より変状の進行が速いというこれまでの感覚に一致している。

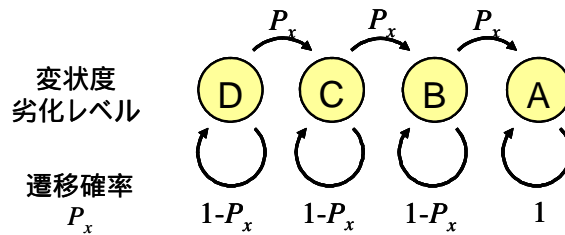


図-4 マルコフ連鎖モデル

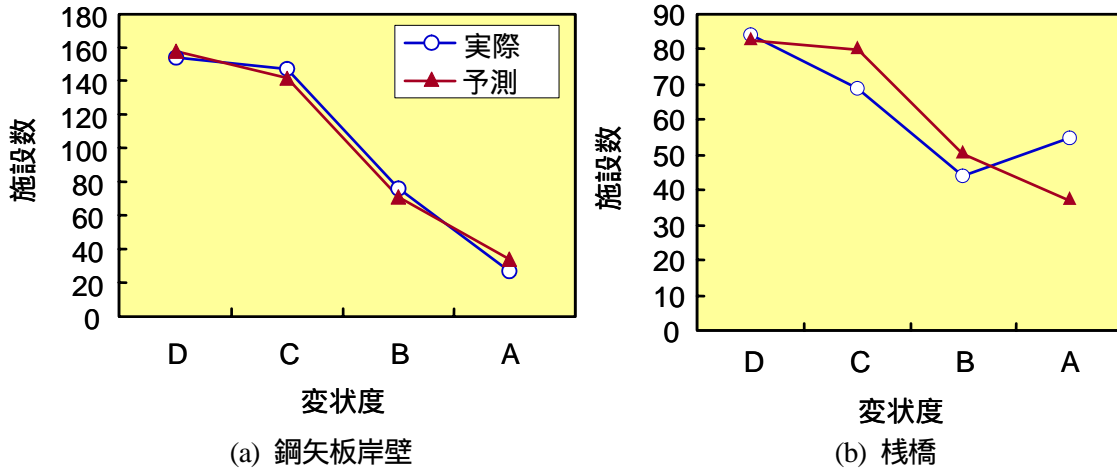


図-5 マルコフ連鎖モデルによる変状度の再現性

マルコフ連鎖モデルにより得られた変状の分布は、実際の調査結果から得た分布を近似し、遷移確率は各施設の変状進行速度の全国的なレベルでの平均値を示すものである。実際には施設や構造物の置かれた環境条件や用いられた建設材料の品質条件等によって遷移確率は異なる。今後、いろいろな条件下でデータの蓄積がなされればより精度良く個別の施設の変状進行を予測することが可能となるが、現時点ではそこまでのレベルの解析には至っていない。言い換えれば、これまでの検討では、我が国における全国平均としての港湾施設の変状度の進行の傾向をつかむことができるというものである。

この結果に基づいて、構造性能の低下曲線を求める。そのためには、変状度と数値的な構造性能とを結びつける必要がある。栈橋上部工を構成するはりの暴露試験体での変状度と耐力との試験結果⁵⁾を図-6に示す。縦軸は、設計時の設計耐力と実験値との比である。変状度がAの場合には、鉄筋の断面積が10%程度低減するといった大きな変状を示したため、載荷実験を行うことが困難であった。そのため、やや精度的に問題があるものの、おおむねの傾向として、栈橋の上部工では、変状度がBの後半以降になると耐力の低下、すなわち構造性能の低下が顕著になることがわかった。

この結果から、当初の構造性能に比較して、変状度Dでは100%、変状度Cでは99%、変状度Bでは95%、および変状度Aでは80%に低減すると仮定する。また、変状度Aに到達してから5年後に0%となり、完全に構造性能が失われるものとする。

上述の仮定から得られる構造性能低下曲線の一例を図-7に示す。同図では使用限界 (SLS) を80%低下時点、終局限界 (ULS) を60%低下時点としている。鋼矢板岸壁および

栈橋では、それぞれ55年程度あるいは40年程度で使用限界に、80年程度あるいは60年程度で終局限界に達すると推定される。これは、鋼矢板岸壁あるいは栈橋の平均的な劣化・変状の進行を表すものであり、個別の施設では、これより速く、あるいは遅く劣化・変状が進行する。このばらつきを個別の施設でどのように評価するためには、今後のデータの蓄積が必要である。

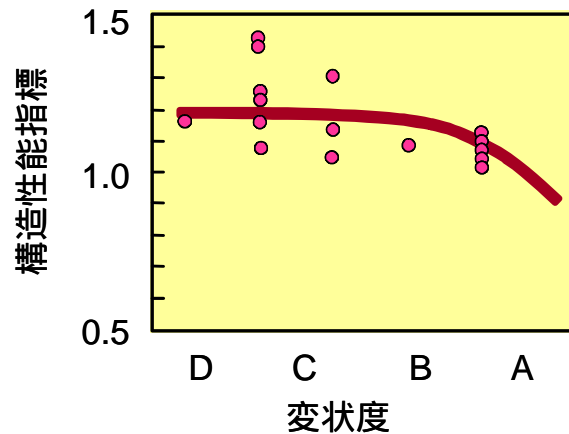


図-6 栈橋上部工はりでの構造性能と変状度との関係

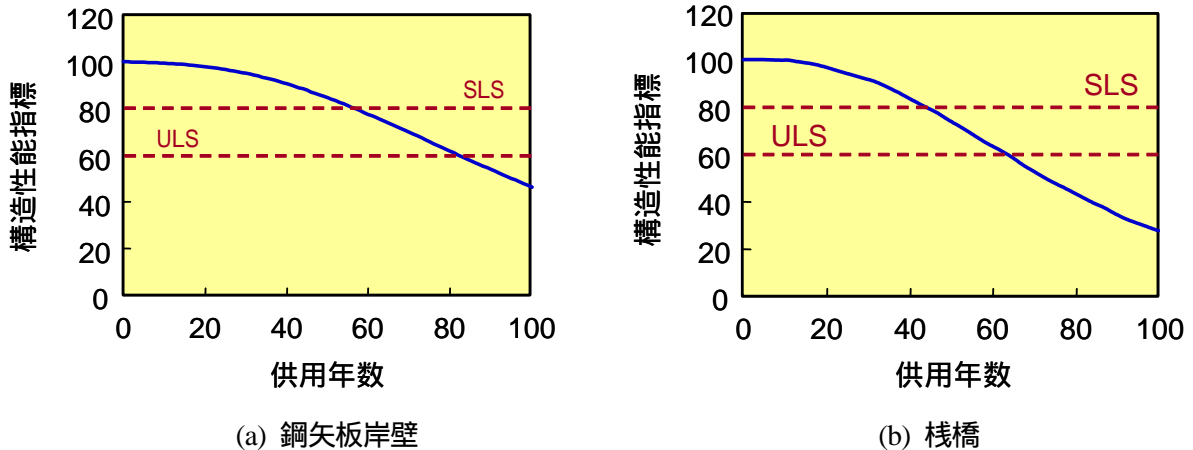


図-7 構造性能低下曲線

5 . データベース

データベースは対策工を効果的に選定するために必要となる。特に、これまでに港湾構造物に適用された補修や補強のための工法について、初期コスト、設計供用年数、適用範囲等の情報を収集し整理している。これらの情報を多数収集することがデータベースの良否に関わっているので、現在港湾局環境・技術課主催のライフサイクル評価に基づく施設整備・補修技術WGの活動の一環として事例の収集に努めている。また、合わせて国有港

湾施設の維持管理データベースとして施設の現況として変状度等の経時変化を蓄積できるシステムを開発し、運用中である。

6．劣化予測とライフサイクルコスト評価

構造物のライフサイクルは、構造物が計画・建設されてからその役割を終えて撤去されるまでの過程と定義され、この間に生じた費用、あるいは生じると予想される費用の総和がライフサイクルコストと言われるものである。これまで、港湾施設の建設において、ライフサイクルコストが十分に考えられてきたわけではない。これは、そもそも構造物の設計供用期間が明示されていないことや、供用中の機能変化を考慮する手段がなかったことなどがその理由であると思われる。しかし、効率的な港湾整備のためには、初期建設費のみではなく、使用中に係る費用や解体撤去に係る費用を評価することが重要である。同時に、当然ではあるが、新規に建設される施設だけでなく、既に建設され使用されている既存施設の運用管理段階でのライフサイクルコスト（狭義のライフサイクルコストであり、ここではこの意味で用いる）を検討し、最適な維持管理戦略を検討することも、ライフサイクルコストを低減するために重要である。これまでの事例分析⁶⁾によれば、供用開始後25年程度経過した係留施設では、初期建設費に対し約13%程度のメンテナンス費用が必要であると試算できる。

4.で述べたような手法で、港湾施設の将来的な変状程度の分布が予測されると、将来AあるいはBの変状度と判定されて、対策を必要とする施設数およびそれに要する費用が推定できる。一例として、表-3に示す計算の仮定を設定して、以後30年間に予想される対策費用を算出すると、施設の種類によっても若干異なるが、すべての施設を更新する場合に比べて、計画的な維持補修で対応する場合、防波堤では約40%、岸壁では20～60%程度のコスト低減が見込める計算となる⁷⁾。すなわち、問題が起こってから生じる事後保全に比べて、変状の軽微な段階から計画的に実施する予防保全を行うことの影響が顕著に現れている。

表-3 予防保全によるコスト縮減効果試算の仮定

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1) 変状度B判定：優先度の高いものから5年ごとに30%を補修。2) 変状度A判定：優先度の高いものから毎年30%を補修。3) 更新：A判定後5年を経過すると、補修では対応できず、更新を要する。4) 対策済み施設：補修や更新を行った施設は、変状度がD判定に戻る。5) 対策費用：過去の実績等を参考に、平均的な構造物の補修費用と更新費用を設定する。 |
|---|

4.で示したマルコフ連鎖モデルを利用して対策法の検討を行ってみる。対策を行うことにより、変状度が小さくなる効果あるいは変状の進行速度、すなわち遷移確率が低減する効果が期待できる。栈橋のコンクリート上部工のはりを対象として、断面修復、電気防食、部分更新のそれぞれの対策を行った場合のライフサイクルコストを比較する⁸⁾。ここで、

断面修復は変状度C以上を対象とし，塩分を多く含むコンクリートを除去し，鉄筋に発生した錆をある程度除去することによって，変状度を1ランク戻すことができると考える．また，遷移確率を50%に低減する効果があると仮定する．電気防食は，変状度D～Aのいずれの変状にも適用でき，断面修復と同様に変状度を回復させる．また，効果的に作用した場合，遷移確率を10%に低減できるとする．部分的更新は劣化度B以上を対象とし，対策を行った全ての部材が変状度Dに戻るものの，特に耐腐食性の高い鉄筋や防錆材などを使用しない限り，遷移確率は変化しないとする．

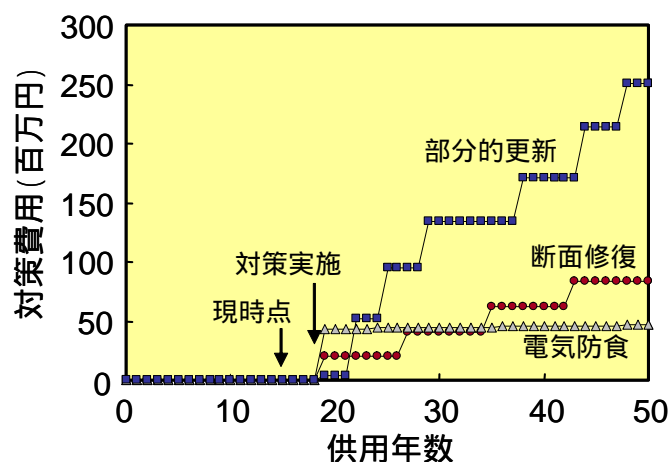


図-8 栈橋上部工はりの対策費用比較

このようにして得られたライフサイクルコストの算定結果を図-8に示す．ライフサイクルコストは工法ごとに大きな差が見られる．対策のための初期コストは，部分的更新，断面修復，電気防食の順で安価であるが，50年目までの最終的なコストでは，電気防食，断面修復，部分的更新の順であり，その費用は電気防食を基準に，断面修復が1.7倍，部分的更新が5倍強となっている．また，対策を行う回数を見てみると，電気防食1回に対し，断面修復4回，部分的更新7回となっており，非常に劣化速度の速いはりでは，劣化速度を効果的に抑える工法が有効である結果となっている．この結果から，変状の速度を示す遷移確率，今後の供用年数によって最小のライフサイクルコストを与える対策工法が異なることを示唆している．また，設計供用年数の長短によって，最小となるライフサイクルコストを与える工法が異なることも示している．このような解析を行うことによって，効果的な対策が実現できることの可能性が示される．

7. まとめ

我が国全体で港湾構造物の維持管理に対する負担を軽減し，費用の最適化や平準化を図る必要があることはいうまでもない．現在検討している港湾LCMの適用によりライフサイクルコストが低減できる可能性が示された．また，あくまで試算ではあるが，早い段階に

おける対策で、港湾構造物においてライフサイクルコストを低減できる可能性が定量的に示されている。これを受けて、わが国全体で港湾構造物のメンテナンスに対する負担を軽減し、費用の最適化や平準化を図る方策を提示することが、研究においても港湾行政においても今まさに求められている。特に、研究的には、供用中の港湾施設、構造物の点検・診断手法、特に、劣化・変状を非破壊的に検出・モニタリングできる実用的な技術およびこれらの高精度な数値化技術等の確立、将来の劣化・変状の進行や寿命の予測モデルの高精度化、ライフサイクルコスト算出手法の際の各対策工法の時期別コストの検討や各種補修工法の性能評価など、LCMを構築するための個別技術に関する課題があげられる。これらについては行政部局のご協力を得ながら港湾空港技術研究所において研究を進めている。今後のご支援とご協力をお願いする。

参考文献

- 1) 高橋宏直，横田 弘：港湾施設の維持補修費の推計モデル構築および将来動向の推計，土木学会論文集，No.679/VI-51，pp.135～140，2001.6．
- 2) 加藤絵万他：繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1079，2004.6．
- 3) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術研究センター，1999.6．
- 4) 小牟禮建一他：RC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，コンクリート工学論文集，Vol.15, No.1，pp.13～22，2004.1．
- 5) 横田 弘他：海洋環境（酒田港20年）に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，Vol.38, No.2，1999.6．
- 7) 横田 弘，小牟禮建一：計画的な維持修繕によるライフサイクルコストの低減，港湾，Vol.79, No.8，pp.14～17，2002.8．
- 8) 小牟禮建一，浜田秀則，横田 弘，山路 徹：塩害を受ける栈橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づくLCC算定に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1，pp.2061～2066，2004.7．

「改修工事における環境負荷低減技術の検証・有効性に関する調査研究」

国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課

課長補佐 関本 昌弘

機械技術係長 ○一戸 明

1、はじめに

官庁施設のストックは、5,000万㎡を超える膨大な床面積となっており、官庁施設による環境負荷を低減するには、新築時における対策だけでなく、既存官庁施設の性能について適切に診断し、必要な改修を計画的に進めるとともに、当該施設の運用管理を適切に行うことが必要となる。

官庁営繕部においては、「官庁施設の環境配慮診断・改修計画指針（グリーン診断・改修計画指針）」を策定し、効果的なグリーン化技術を採用したグリーン改修を計画的に実施して、官庁施設整備に取り組んでいる。

このような背景のもと、改修工事において採用した建築機械設備の環境負荷低減技術について検証を行い、地球温暖化対策の有効性の評価を行った。

2、研究方針と体制

本テーマの研究にあたり、次に示すサブテーマ及び各地方整備局等の個別テーマを設定し、グループ毎に調査研究を進めた。

- ① 個別技術の有効性に関する調査・研究
 - 1) 寒冷地における環境負荷低減技術の検証
 - 2) 冷温水二次ポンプのインバーター制御に関する調査・研究
 - 3) グリーン1次診断結果と改修工事後の消費エネルギーに関する比較検討
 - 4) グリーン改修を実施したN庁舎のグリーン化技術の効果・検証
- ② 最適運用に関する調査・研究
 - 1) グリーン庁舎におけるコミッションングに関する調査研究
- ③ 検証・評価手法に関する調査・研究
 - 1) グリーン改修による効果のマクロ的（簡易的）検証方法の調査研究

3、研究結果

3. 1、各個別テーマの研究結果を次に示す。

- ① 個別技術の有効性に関する調査・研究
 - 1) 寒冷地における環境負荷低減技術の検証
 - ・室内外温度差の大きい冬期の寒冷地での全熱交換器による環境負荷低減効果が検証された。
 - ・今後は、夏期の計測を含めて年間の環境負荷低減効果が必要と考える。
 - 2) 冷温水二次ポンプのインバーター制御に関する調査・研究

- ・VWV 制御による環境負荷低減効果が検証された。
 - ・VWV 制御の採用に当たっては、建物の負荷変動を予測して建物規模・用途と併せて検討する必要があると考える。
- 3) グリーン1次診断結果と改修工事後の消費エネルギーに関する比較検討
- ・高効率熱源及びVWV 制御の採用による環境負荷低減効果が検証された。
 - ・グリーン1次診断結果に対して実際のCO₂削減量が低くなったが、原因の検証が必要と考える。
- 4) グリーン改修を実施したN庁舎のグリーン化技術の効果・検証
- ・VAV 制御, コイル面風速低下及び高効率熱源の採用による環境負荷低減効果が検証された。
 - ・機器更新等に併せてグリーン改修を実施することで, 少しの上乗せ予算でCO₂削減が図れると考える。
- ② 最適運用に関する調査・研究
- 1) グリーン庁舎におけるコミッショニングに関する調査研究
- ・モニタリング手法の提案とコミッショニング普及に対する課題の整理を行った。
 - ・今後のグリーン改修における効果検証のためにも, モニタリングレベルのアップとコミッショニングの普及が必要と考える。
- ③ 検証・評価手法に関する調査・研究
- 1) グリーン改修による効果のマクロ的(簡易的)検証方法の調査研究
- ・現状で測定している基礎的データを用いた簡易的検証手法の提案を行った。
 - ・今後もデータ収集を継続し, 検証方法を確立する必要があると考える。
3. 2、それぞれのグリーン改修技術による従来改修に対するCO₂削減量は、次のとおりとなった。
- ① 寒冷地における環境負荷低減技術の検証
- ・全熱交換器の採用 7.02 kg-CO₂/m²・年
- ② 冷温水二次ポンプのインバーター制御に関する調査・研究
- ・冷温水VWV 制御の採用 0.62 kg-CO₂/m²・年
(3施設の平均)
- ③ グリーン1次診断結果と改修工事後の消費エネルギーに関する比較検討
- ・冷温水VWV 制御の採用 0.51 kg-CO₂/m²・年
 - ・高効率熱源の採用 0.55 kg-CO₂/m²・年
- ④ グリーン改修を実施したN庁舎のグリーン化技術の効果・検証
- ・VAV 制御の採用 4.68 kg-CO₂/m²・年
 - ・コイル面風速低下の採用 0.16 kg-CO₂/m²・年
 - ・高効率熱源の採用 1.11 kg-CO₂/m²・年
 - ・外気量制御の採用 2.39 kg-CO₂/m²・年

3. 3、冷温水 VVW 制御について 3 地方整備局にて検証を行った結果から、次のような結論を推測する。

- ・CO2 削減量効果は、延べ面積当たりのポンプ電動機容量が大きいほど効果が高くなり、採用するメリットがあると考えられる。

- ・各施設とも夏季より冬季の方が CO2 削減量が多くなっている。

これは、夏季の最大負荷が日中であるため、外気温の上昇と共に負荷が増えてポンプが全台稼働する時間が長くなるが、冬季は最大負荷が朝の立ち上がり時なので、日中は外気温の上昇と共に負荷が減少してポンプの稼働台数が減るのと併せてインバーターにより流量が絞られるためと思われる。

このため、冬季の日中の外気温がある程度高くなる温暖な地域で、採用するメリットがあると考えられる。

建物名称		H 合同庁舎	O 合同庁舎	N 合同庁舎	彦根地方合同庁舎
2 次ポンプ合計電動機容量[kW]		11×5+5.5 ×3=71.5	3.7×2= 7.4	18.5+30 =48.5	2.2×2=4.4
延べ面積[m ²]		27,484	3,311	24,378	2,448
延べ面積当たり電動機容量[kW/m ²]		0.00260	0.00223	0.00199	0.00180
CO2 削減量	夏期平均[kg-CO2/m ² ・月]	0.039	0.046	0.088	0.049
	冬期平均[kg-CO2/m ² ・月]	0.146	0.085	0.090	0.092
	年間[kg-CO2/m ² ・年]	0.70	0.62	0.55	0.51

4、今後の課題

今回、本研究において改修工事に採用した建築機械設備における環境負荷低減技術の有効性を確認したわけであるが、設計時点で想定した CO2 削減効果に対して、実際の削減量は概ね少なくなる傾向にあることも確認された。

このことを踏まえつつ、設計時点での想定値を適切に設定できる診断手法や数値の算出方法を確立する必要があると考える。

また、改修後における削減効果を正確に判定するためには、モニタリングのレベルアップが必要となるが、コストをかけずに正確な判定が出来るような、適切なモニタリングレベルの設定や代替手法(現状レベルの計測での簡易検証法)の確立も急務であると考えられる。

今後も継続的な調査研究を行い、今回検証しなかった環境負荷低減技術の有効性を検証していき、有効性の確認された技術を積極的に官庁施設整備の中で採用していく必要があると考える。

目 次

「改修工事における環境負荷低減技術の検証・有効性に関する調査研究」			
国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課	関本 昌弘	一戸 明	
「寒冷地における環境負荷低減技術の検証」			
北海道開発局営繕部設備課	千明 勝彦	好田 裕喜	
東北地方整備局営繕部設備課	五十嵐 聡	加藤 政昭	
「冷温水二次ポンプのインバーター制御に関する調査・研究」			
中部地方整備局営繕部設備課	杉江 英治	北川 善文	
中国地方整備局営繕部設備課	大西 昇	前田 真史	
「グリーン1次診断結果と改修工事後の消費エネルギーに関する比較検討」			
近畿地方整備局営繕部設備課	大音 裕一	北野 規城	
「グリーン改修を実施したN庁舎のグリーン化技術の効果・検証」			
九州地方整備局営繕部設備課	北原 良夫		
沖縄総合事務局開発建設部営繕課	棚原 勇		
「グリーン庁舎におけるコミッションングに関する調査研究」			
四国地方整備局営繕部設計課	神原 治之		
「グリーン改修による効果のマクロ的（簡易的）検証方法の調査研究」			
関東地方整備局営繕部設備第一課	高宮 正能		
北陸地方整備局営繕部設計課	宮田 健一		

「寒冷地における環境負荷低減技術（全熱交換器）の検証」

1、はじめに

本研究ではグリーン改修工事をもとに、実測データより低減されたエネルギー量を算出し、空調設備におけるLCC・LCCO2の削減効果を検証する。

2、施設概要・工事内容

北海道釧路市にあるK合同庁舎は昭和46年竣工、RC-5-2、4,415 m²の建物である。平成14年にグリーン改修工事が実施された。主な工事内容は外断熱改修・サッシ改修、空調設備の更新、全熱交換器の採用である。

3、計測結果及びLCC・LCCO2の検証

温湿度状況を表-1に示す。日中の平均室温が約26°Cとなっており設計条件(22°C)より高い状態であった。外気温度は約-14°Cであり設計温度(-15°C)とほぼ同じである。

イニシャルコストは全熱交換器を設置した場合、約3,146千円UPとなり投資金額は約13~14年で回収することができる。

LCCを図-1に示す。全熱交換器に伴う費用が増額となるが燃料消費量は削減されほぼ同額となった。

LCCO2を図-2に示す。燃料消費量の減少に伴いCO2排出量の差は大きくなるのが伺える。年間約31,000kg-CO2の削減効果が得られる。燃料の消費によるCO2排出量が大半を占めており全熱交換器を採用したことにより約20%の削減となった。

4. まとめ

全熱交換器は室内・外の温度差が大きい寒冷地では環境負荷低減に効果が認められた。また、適切な室内温度にすることにより更に効果を得る事が可能である。冷房時期における有効性、イニシャルコストと設置スペースの確保を検討する必要がある。

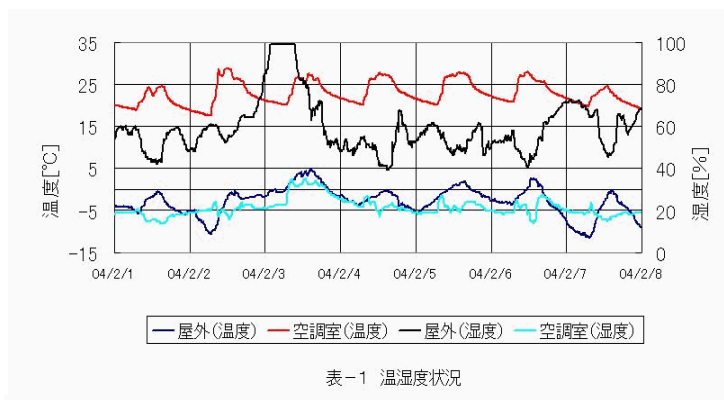


表-1 温湿度状況

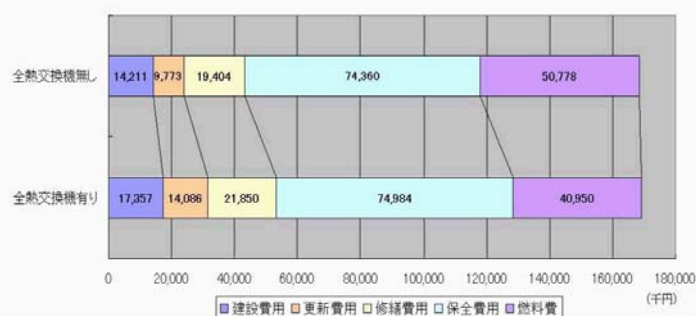


図-1 ライフサイクルコスト(LCC)削減額(25年)



図-2 ライフサイクルCO2(LCCO2)削減割合

「冷温水二次ポンプのインバーター制御に関する調査・研究」

1. 研究の方法

中部及び中国地方整備局管内の冷温水二次ポンプのインバーター制御を採用した施設において、運用状況及び電力消費量について調査を行い、設計時にグリーン診断・改修計画指針より想定した各数値とそれらに対応する実測によって得られた値と比較することで、同システムの有効性について評価を行う。

2. 施設概要

表-1 調査施設概要

施設名	0 合同庁舎	H 合同庁舎		N 合同庁舎
所在地	広島県尾道市	広島県広島市		愛知県名古屋市
構造-階数(地上-地下)	RC-4	2号館 SRC-1-11	3号館 RC-1-4	SRC-8-2
延べ床面積	3,311 m ²	2号館 19,843 m ²	3号館 7,641 m ²	24,378 m ²
改修完成年・月	1999年8月	2003年3月		2000年3月

3. システム概要

表-2 冷温水2次ポンプ仕様

		形式	口径[φ]	水量[L/min]	揚程[m]	電動機[kW]	台数
0 庁舎		片吸込渦巻形	65	565	16	3.7	2
H 庁舎	2号館用	片吸込渦巻形	125	1,500	24	11.0	5
	3号館用	片吸込渦巻形	80	810	20	5.5	3
N 庁舎	新館	片吸込渦巻形	125	1,830	35	18.5	1
	旧館	片吸込渦巻形	150	4,270	30	30.0	1

4. 調査・解析の結果

冷温水2次ポンプのVWV制御における過去1年間ごとの消費電力量を実測し、VWVを使用しなかった時の電力量と比較することにより、実際にどれだけ消費電力量が削減できたかを検証し、これをもとにLCCO2の削減量を延べ床面積当たりでの削減効果に換算してグリーン診断・改修計画指針の診断結果と比較した結果を表-3に示す。結果は、延べ床面積の大きいH庁舎はグリーン診断の想定値に近いことが分かるが、0庁舎はグリーン診断の値よりも低い値となった。

表-3 グリーン指針と実測値によるLCCO2削減効果の比較
LCCO2(kg-CO2/年・m²)

	②グリーン改修	①従来改修	②-①
グリーン指針	47.07	48.11	1.05
0庁舎実測値	1.14	1.76	0.62
H庁舎実測値	1.08	1.78	0.70
N庁舎実測値	0.40	0.95	0.55

5. 考察

グリーン診断・改修計画指針のVWVによる想定値は、15,000 m²クラスの庁舎で想定されており、0庁舎の場合は、3,000 m²クラスの庁舎であり、ポンプ自体の台数及び電動機出力の合計が少ないため、エネルギー原単位比較での削減効果は上記の結果になったといえる。また、15,000 m²クラスのH庁舎、N庁舎でも期待された効果が出ていなかった。しかし、削減効果はあり、エネルギーの削減に寄与していることがいえる。

「グリーン1次診断結果と改修工事後の消費エネルギーに関する比較検討」

1. 目的

彦根地方合同庁舎の改修時に採用した建築機械設備の環境負荷低減技術について、グリーン1次診断結果と改修工事後のエネルギー消費量のデータ収集及び分析を行う。

2. 検証方法と結果

2. 1 VWV 制御に対する効果の検証

冷温水2次ポンプの消費電力を把握し、定格運転で稼働させた場合との消費電力の削減率を確認する。

2. 2 熱源機器の運転効率の検証（設計値との比較による効果検証）

吸収式冷温水機の燃料消費量と供給熱量の比較をし、運転効率の確認を行う。

2. 3 年間エネルギー消費量と施設の負荷熱量との比較

改修前と改修後で熱源のエネルギー消費量の比較検討を行い、エネルギー消費量の低減が図れているか確認する。また、設計時の負荷熱量と実際の負荷熱量の比較検証を行う。

2. 4 改修前後とグリーン1次診断のCO2削減量の比較

改修前後の庁舎全体のCO2発生量、実際の冷温水ポンプのインバーター制御による効果、熱源の高効率化による効果とグリーン1次診断との比較を表1に示す。

表1 CO2削減量

	CO2削減量 (kg-CO2/年)	CO2削減量 (kg-CO2/m ² 年)
改修前後(冷温水ポンプ)	1,238.16	0.51
グリーン1次診断(冷温水ポンプ)	2,334.02	0.95
改修前後(熱源の高効率化)	1,346.77	0.55
グリーン1次診断(熱源の高効率化)	3,231.73	1.32
改修前後(庁舎全体)	2,585.18	1.06
グリーン1次診断(庁舎全体)	5,565.74	2.27

3. 考察

冷温水2次ポンプのCO2削減量は、グリーン1次診断の約1/2程度になっている。これは、グリーン1次診断のVWVシステムが1次ポンプシステムで常時70%まで削減出来るとして算出しているため、今回の彦根地方合同庁舎でいうと、冷温水1次・2次ポンプの容量を合計したものがインバーター制御の対象で、常時70%まで削減出来ることになる。また、グリーン1次診断の運転期間は10h/日×20日/月×8月/年=1,600時間/年として算出している事も影響していると考えられる。

熱源の高効率化によるCO2削減量は、グリーン1次診断の削減量と比較すると約1/2になっている。これは、冷房時の成績係数が悪いことから、供給熱量に比べてガスの使用量が増えCO2発生量が多くなったためと、冷房時に関して運転効率が悪い7月の測定結果から8~10月の想定値を出しているためと考えられる。

4. 今後の課題

運用時のCO2発生量はグリーン改修を行ったことにより改修前よりも削減されたことが確認できた。しかし、グリーン1次診断の結果と比較すると削減量は小さく、考察で述べた原因を検討し今後改善する必要がある。

「グリーン改修を実施したN庁舎のグリーン化技術の効果・検証」

1 はじめに

平成 14 年度にグリーン改修を実施した N 庁舎について、採用したグリーン化技術の効果を実測したデータを基に検証を行い、CO₂ 削減効果、費用対効果からグリーン改修技術の有効性を確認する。

2 調査施設概要及びグリーン改修項目

2. 1 調査施設概要

N 庁舎 (改修) 昭和 45 年竣工 RC 造 3 階、地下 1 階 延べ面積 2,245 m²

2. 2 グリーン改修項目

2. 2. 1 VAV 制御

- ・非常使用室の不使用時の空調送風カットを行う。

2. 2. 2 空調機コイル面風速の低速化

- ・空調機コイル通過面風速を 2.5m/s (標準) から 2.0m/s の機器を採用する。

2. 2. 3 熱源の高効率化

- ・高効率型小型吸収冷温水機ユニットを採用する。(成績係数 1.12 採用)

2. 2. 4 外気量制御

- ・非常使用室の不使用時の空調送風カット量に合わせ、外気量カットの制御を行う。 3

研究方法及び結果

3. 1 研究方法

改修計画時の CO₂ 削減効果予測と実測の CO₂ 削減効果を比較する。

3. 2 結果

- ・CO₂ 削減効果及び費用対効果

グリーン化技術	改修計画時の削減予測 (kg-CO ₂ /年)	実測の削減量 (kg-CO ₂ /年)	費用対効果 (kg-CO ₂ /年・千円)
VAV (実測値)	8,808	10,513	6.18
コイル面風速低下	3,046	351	0.59
熱源の高効率化	2,963	2,483	3.71
外気量制御	データ無し	5,368	6.71
計 (外気量制御除く)	14,817	13,347	
外気量制御含めた場合		18,715	4.97

- ・改修前後のエネルギー消費量から算出した CO₂ 発生量

改修前後の	改修前	改修後	CO ₂ 削減量
CO ₂ 発生量	158,742 kg-CO ₂ /年	142,991 kg-CO ₂ /年	15,751 kg-CO ₂ /年

5 まとめ

今回採用したグリーン化技術は、CO₂ 削減効果が大きく、費用対効果からみても、その有効性が確認できた。特に、VAV 制御と外気量制御が有効であった。

「グリーン改修による効果のマクロ的（簡易的）検証手法の調査研究」

1. はじめに

現在、順次グリーン改修計画が立てられ、工事として執行されている。この改修工事による効果の検証が必要であるため、簡易的な検証手法の調査研究を行った。

2. 調査・研究方法等

グリーン一次診断結果等を活用し、改修前後のエネルギー消費量を調査し、この結果から、運用状況、気象条件等の影響などを考慮した改修効果の検証手法を検討する。

3. 調査結果及び考察

表-1 に今回調査した建物の改修概要、改修前後の CO2 排出量を示す。

A 合同庁舎は、灯油炊きの冷温水発生機の更新を行い COP が 0.9 から 1.1 に向上しており、空調シーズンにおいて CO2 排出量及び灯油使用量が削減されているため、熱源の高効率化による効果が検証できる。

B 合同庁舎は、夏期に CO2 排出量が増えているが、平均気温、真夏日等は過去とほぼ同じであることから、内部負荷増や運用状況に影響を受けていると思われる。冬期は、気温が過去 3 年の平均気温より 1.3℃ほど高いこと、冬日が過去より 20 日ほど少ないことから、効果を検証するためには、気温による影響を考慮する必要があると思われる。

C 気象台においても、過去 3 年と改修後の平均気温差の推移と CO2 排出量差の推移がほぼ同じ傾向を示していることから、B 合同庁舎の冬期同様に気温による影響を考慮する必要があると思われる。

D 気象台は、熱源の高効率化、変風量等の複合改修を行っており、気象条件の変化は改修前とほとんど同じにもかかわらず、夏期の CO2 排出量が増えている。24 時間系統を持つ気象台という特殊な運用に影響されている可能性が高いと考えられるため、運用状況のヒアリングが必要と考えられる。

4. 検証手法の提案

今回は空調改修の検証を行ったが、外気条件及び運用状況が大きく影響されることが解った。また、改修以外の要素がエネルギー使用量に新たに影響を与えている場合も考えられるため、あらかじめ省エネ計算を行い、当該庁舎の各エネルギー使用量の傾向を把握する必要があると考える。以上より、以下のように提案したい。

- (1) 予算要求時点（少なくとも設計時）に、改修前後の省エネ計算を行い各設備の運用時のエネルギー使用量、改修に該当する設備の削減エネルギー量及び CO2 削減量の目標値を設定する。
- (2) 一次診断結果をもとに改修前後のエネルギー使用量（できれば 3 カ年程度）及び運用状況のヒアリングを行う。
- (3) 各年度の気象条件として、平均気温、夏日、冬日等のデータ整理を行う。

表-1

建物名	延べ面	グリーン化	改修前	改修後	改修前後差	削減率
	積[m ²]	技術	CO2 排出量	CO2 排出量	[kg-CO2]	
A 合同庁	2,562	熱源高効率化	237,249	216,271	-20,978	9%
B 合同庁	3,451	熱源高効率化	192,930	183,483	-9,447	5%
C 気象台	1,092	熱源高効率化	68,278※	58,436※	-9,842	15%
D 気象台	2,245	熱源高効率化 VAV コイル面風速	142,066◆	142,024◆	-42	1%

注) 1. ※は、冬期（11月から3月まで）のデータ。

2. ◆は、3月を除く

「グリーン庁舎の環境性能水準に関する調査研究」

官庁営繕部設備・環境課営繕環境対策室

課長補佐	村上 幸司
環境調整係長	○矢島 俊明
建築環境係長	梅村 啓二
設備環境係長	塚田 茂
国土交通技官	藤原 章成

1. はじめに

官庁営繕部においては、喫緊の課題である地球環境問題等に対処するため、1998年3月に、環境保全の模範となる官庁施設の計画・設計の指針として「環境配慮型官庁施設計画指針」(以下「グリーン指針」)を制定した。新地球温暖化対策推進大綱では、民生部門全体のエネルギー起源CO₂排出量を1990年比で2%削減することを目標としているが、2001年現在30.9%の増加となっており、目標達成が厳しいものとなっている。

官庁施設の整備にあたっては、グリーン指針に基づき、環境負荷低減対策の推進に寄与することを目的にグリーン化を推進し、新築庁舎は全てグリーン庁舎として整備を進めることとしたところであるが、今後とも、より効率的かつ効果的な環境負荷低減対策を推進するには、これまでに整備された庁舎の環境性能の実態を的確に把握し、今後の計画に反映する必要がある。このため本研究においては、調査・計測データ等に基づき、整備済み庁舎の環境性能に関する分析を行い、その環境性能についてマクロ的な検証をし、得られた知見に基づき、「グリーン庁舎」として求められる環境性能水準について検討する。

2. 対象施設の概要

グリーン庁舎とは、官庁施設の環境負荷の低減に配慮し、施設の位置、規模及び構造を勘案し、環境負荷低減技術を積極的かつ効果的に採用した庁舎である。その計画・設計にあたっては、「周辺環境への配慮」、「運用段階の省エネルギー・省資源」、「長寿命化」、「エコマテリアルの使用」及び「適正使用・適正処理」の5つの観点から対策を講じ、LCCO₂(ライフサイクル二酸化炭素排出量)を主たる指標としている。(図-1参照)。

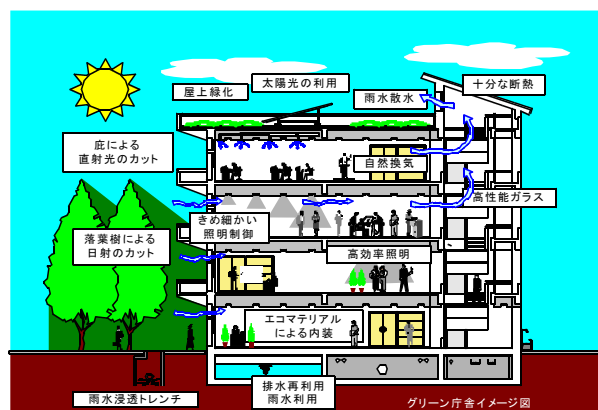


図-1 グリーン庁舎のイメージ

本研究にあたって、調査対象庁舎を官庁営繕部で建設実績が多数ある、概ね3,000形及び6,000形に該当する、延べ床面積2,500m²～12,000m²程度の合同庁舎を抽出し、建設年次と環境性能水準に応じ、表-1に示す5つの庁舎区分に分類している。グリーン対

策庁舎とは、グリーン指針に基づき1999年以降に環境負荷低減技術を積極的に採用して建設した庁舎、標準庁舎とは、同年代に建設した庁舎、従来庁舎は、1990年代前半に1980年に制定した「省エネルギー建築設計指針(以下「省エネ指針」)に基づき建設した庁舎、1980年代庁舎は、1980年代に建設した庁舎、1970年代庁舎は、省エネ指針が策定される前の1970年代に建設した庁舎とし、調査・分析を行った。

表-1 対象庁舎一覧

庁舎区分	施設数	延べ床面積	延べ在館人員	気候区分
グリーン対策庁舎	6	34,954	644	Ⅱ、Ⅲ
標準庁舎	7	39,620	901	Ⅱ、Ⅲ
従来庁舎	10	40,511	902	Ⅱ、Ⅲ
1980年代庁舎	19	91,671	2,580	Ⅱ、Ⅲ
1870年代庁舎	13	59,800	1,884	Ⅱ、Ⅲ

表-2 影響要因項目

建設年次、延べ床面積、在館人員、来庁者数、気候区分・条件、立地条件、方位、建物容積、表面積、地整設計格差、設備容量・方式、熱源運転時間、設定温度、空調面積、照度、深夜電力利用の有無、厨房・理髪の有無、特殊機器の有無、入居官署、勤務時間、省エネ対策の実施、施設管理者の適性管理、環境負荷低減技術の採用数及び量、老朽度、改修工事実績、建設費
--

3. データ及び換算係数

データについては、グリーン対策庁舎・標準庁舎は2003年度、従来・1980・1970年代庁舎は、2002年度に実施したグリーン診断(1999～2002年度の平均)の実測値を用いている。

各庁舎における光熱水データ等は、表-2に示す項目が複雑に影響しており、不変的な数値を予測をするのは困難を要する。今回は、本研究対象母集団が少ないこともあり、光熱水費量等を決定する要因の重み付けができなかったが、その中で大きく影響すると思われる建設年次、延べ床面積、人員、気候区分のみを考慮し、分析を行っている。

なお、エネルギー消費量及びCO2排出量の算定にあたっては、表-3に示す換算係数を用いて算出を行った。

表-3 換算係数

種別	エネルギー消費量換算係数	CO2排出量換算係数	
電気	10.25 MJ/kWh	0.3780 Kg-CO2/kWh	
ガス	13A	46.05 MJ/m3	0.0513 Kg-CO2/MJ
	13A(LPG希釈)	62.90 MJ/m3	0.0581 Kg-CO2/MJ
	12A	41.90 MJ/m3	0.0518 Kg-CO2/MJ
	L1(7C、6B、6C)	19.00 MJ/m3	0.0507 Kg-CO2/MJ
	L2(5A、5B、5AN)	19.00 MJ/m3	0.0602 Kg-CO2/MJ
	L3(4A、4B、4C)	15.10 MJ/m3	0.0601 Kg-CO2/MJ
	5C	18.80 MJ/m3	0.0547 Kg-CO2/MJ
油	6A	29.60 MJ/m3	0.0584 Kg-CO2/MJ
	プロパン	101.73 MJ/m3	0.0598 Kg-CO2/MJ
	灯油	36.70 MJ/L	0.0679 Kg-CO2/MJ
A重油	39.10 MJ/L	0.0693 Kg-CO2/MJ	

4. 定量的評価による環境性能評価

4-1. エネルギー消費量及びCO2排出量の分析

(1) 延べ床面積との相関

図-2、3及び表-4に、延べ床面積と年間エネルギー消費量及びCO2排出量との関係を示す。延べ床面積あたりの関数として算出するために、切片を0とし、一次近似式として求めている。各庁舎区分とも相関Rは概ね90%を超えることとなり、グリーン対策庁舎にあっては、エネルギー消費量が1,000(MJ/m2・年)、CO2排出量が40(kg-CO2/m2・年)を下回る結果となった。また、図-4に標準庁舎を基

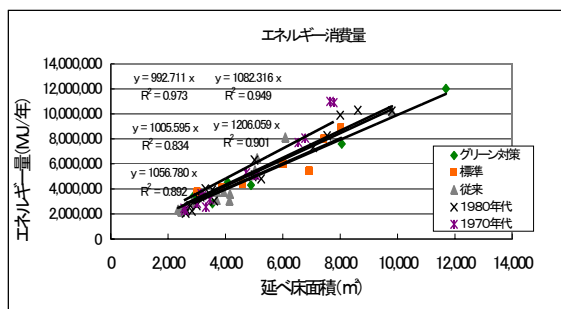


図-2 延べ床面積とエネルギー消費量

準とした庁舎区分別CO₂排出比率を、図-5、6に電気と燃料(ガス・油)に区分した、エネルギー別CO₂排出量及び割合を示す。概ね年代が新しい方が環境負荷低減を配慮した設計思想であること、機器の技術革新等により、エネルギー消費量及びCO₂排出量が少ない結果となったが、従来庁舎が1980年代庁舎より多い結果となった。これは1980年代の庁舎は、オイルショックによる省エネ意識や省エネ指針が設計・施工等に反映していたことが要因であると推測されるのに対し、1990年代はバブルの影響もあって、その意識が薄れたこと、特に燃料の消費が多いことから、建物の熱負荷の増大等が要因と考えられる。また、エネルギー別CO₂排出割合は、概ね電気が7割、燃料が3割程度であり、近年の庁舎ほど電化率が進んでいるといえる。

グリーン庁舎は、整備済みグリーン対策庁舎の実績値から、年間エネルギー消費量が1,000 (MJ/m²・年)、CO₂排出量が40(kg-CO₂/m²・年)以下であることが望ましい。

本研究においては、庁舎における年間エネルギー消費量は、延べ床面積に対す一次近似式で示しているが、表-4の算出値はすべての規模に対し、適用できるものではない。図-7に示すとおり、延べ床面積が大きくなるにつれて、増加(55kg-CO₂/m²・年、1.24倍)する傾向がある。スケールメリットにより設備容量等が減少するが、その運転管理が複雑であること、一般に大規模庁舎は主要都市にあり出先順位が高い庁舎であることが要因であると思われる。

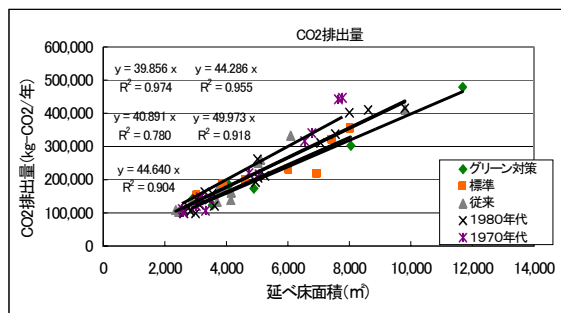


図-3 延べ床面積とCO₂排出量

表-4 庁舎区分別一覧

庁舎区分	延べ床面積あたりエネルギー消費量(MJ/m ² ・年)		
	電気	燃料	合計
1970年代	922	284	1,206
1980年代	823	259	1,082
従来	789	268	1,057
標準	780	226	1,006
グリーン対策	783	210	993
区分	延べ床面積あたりCO ₂ 排出量(CO ₂ /m ² ・年)		
	電気	燃料	合計
1970年代	33.8	16.2	50.0
1980年代	30.2	14.1	44.3
従来	28.6	16.1	44.6
標準	28.6	12.4	40.9
グリーン対策	28.7	11.2	39.9

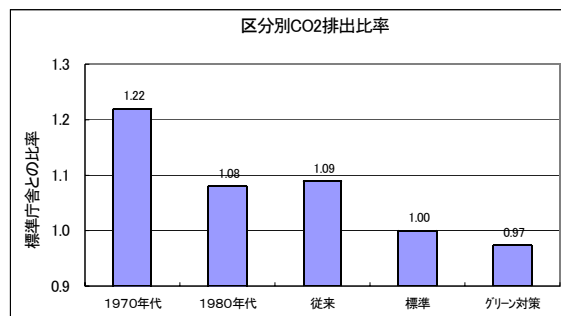


図-4 庁舎区分別CO₂排出比率

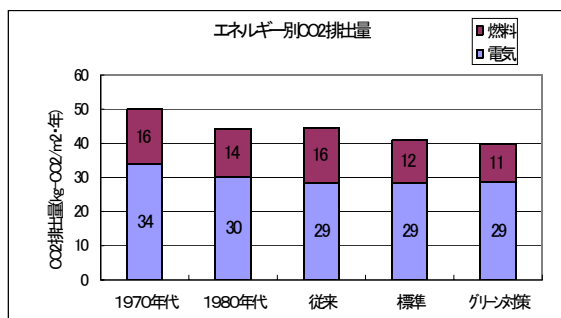


図-5 エネルギー別CO₂排出量

(2) エネルギー消費量及びCO₂排出量の詳細分析

日別・時刻別データが存在する5庁舎より、一般的な地方庁舎の執務時間である平日8

30～17:00まで、平日執務時間外、休日（閉庁日）に区分し、電力消費量割合を算出した。図-8に示すとおり、庁舎区分に関係なく、概ね執務時間内は67%、執務時間外は23%、休日は10%の消費内訳であった。燃料消費量においては予冷予熱運転時の消費もすべて執務時間内として、執務時間における延べ床面積あたりの年間エネルギー消費量及びCO2排出量を求めた。図-9, 10に示すとおり、グリーン対策庁舎は、おのおの750 (MJ/m²・年)、31(kg-CO₂/m²・年)を下回る結果となった。

また、図-11に具体的なグリーン対策庁舎の期間・時刻別電力消費量(日負荷曲線)を示す。各ピーク時の電力消費量から機器やシステムの消費量を推測して、今後作成するベンチマーキングと比較して消費の多い項目の削減方策を検討することが可能となる。その具体例を表-5に示す。

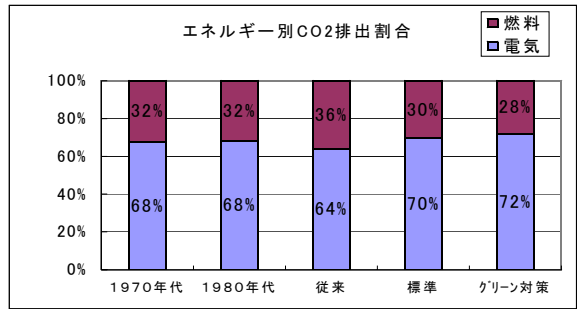


図-6 エネルギー別CO2排出割合

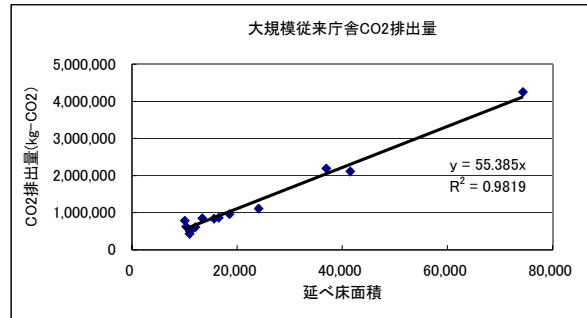


図-7 延べ床面積とCO2排出量(大規模従来庁舎)

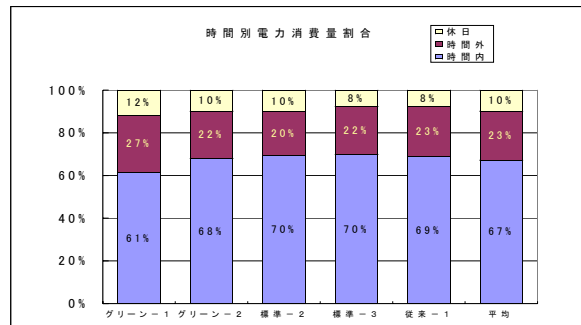


図-8 時刻別電力消費量内訳

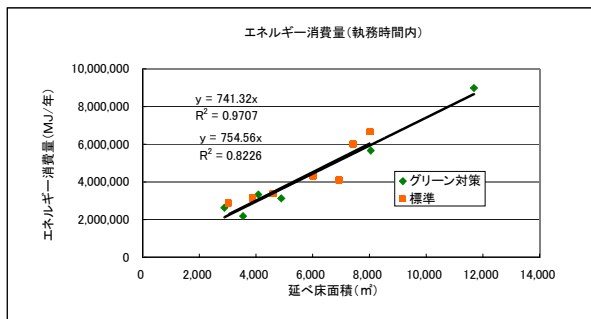


図-9 延べ床面積とエネルギー消費量(執務時間)

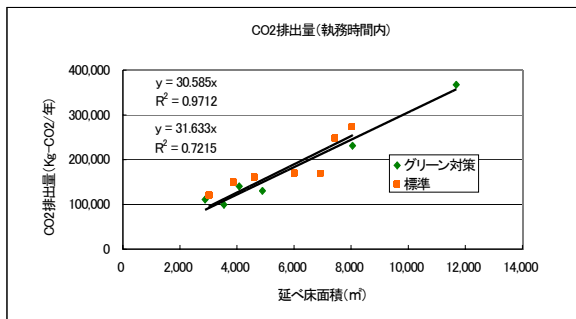


図-10 延べ床面積とCO2排出量(執務時間)

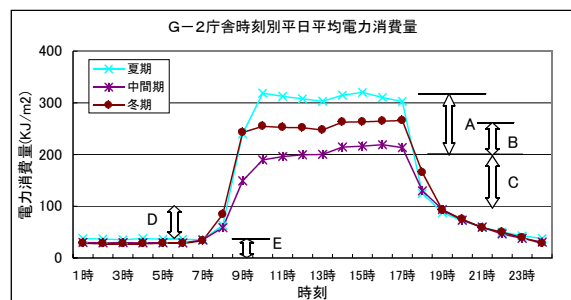


図-11 時刻別電力消費量

表-5 電力消費量具体例

項目	相当する機器・系統	電力消費量 (kWh/m ²)
A: 夏期の最大と中間期の最大の差	冷房機器	12
B: 冬期の最大と中間期の最大の差	暖房機器	7
C: 中間期の最大と空調停止時間の差	空調機・換気ファン	10
D: 空調停止時間と深夜との差	照明・コンセント	8
E: 深夜時間	待機時消費電力・24時間系統	2

4-2. 水消費量の分析

図-12, 13に、延べ床面積及び在館人員と年間水消費量との関係を示す。これより水消費量に対する相関は、概ね在館人員の方が高い結果となった。グリーン対策庁舎においては、おのおの0.6(m³/m²)、34(m³/人)であり、年間の業務日数を240日とし算出すると140(L/人・日)となった。電気、燃料と比較して庁舎のCO₂排出量に占める割合は低い、特に渇水地域においては消費削減方策の検討が必要である。

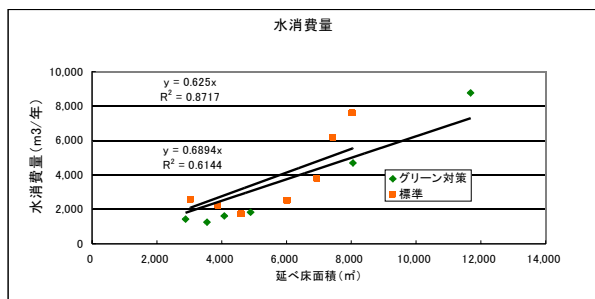


図-12 延べ床面積と水消費量

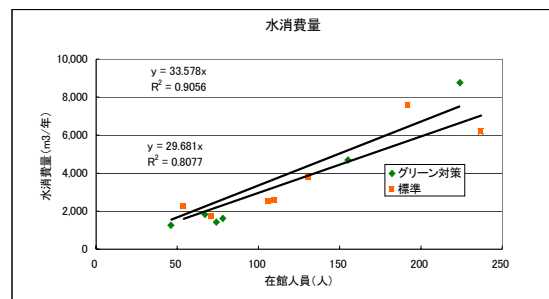


図-13 在館人員と水消費量

また、水は飲用や雑用に消費するだけではなく、夏期における冷却塔補給水としても消費され、図-14に示すとおり、年間消費量の12%を占める。これより、飲・雑用水消費量は123(L/人・日)となったが、グリーン庁舎は、計画基準値の100(L/人・日)を下回る環境性能が望ましい。

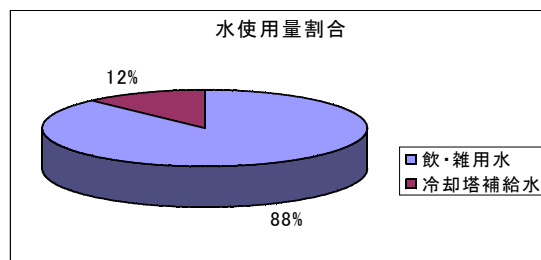


図-14 水消費量割合

4-3. 自治体や一般事務所とのエネルギー消費量の比較

図-15に、本研究で分析した標準庁舎、2002年度に実施した中央官庁庁舎のグリーン診断結果及び一般事務所における在館人員1人あたりの年間エネルギー消費量を示す。標準庁舎は41.5(GJ/人・年)となり、一般事務所(官民含む)や中央庁舎と比較して少ない結果となった。

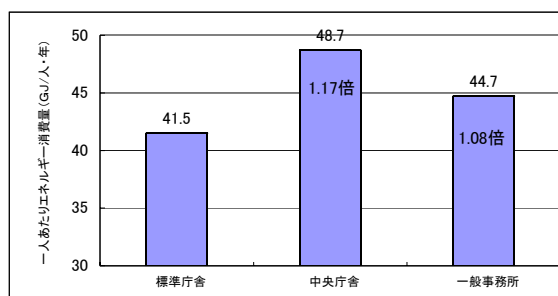


図-15 庁舎区分によるエネルギー消費量

5. 省エネルギー基準による定性的評価

表-6に示すとおり、省エネルギー基準には「建築物の外壁、窓等を通じての熱の損失防止の措置」及び「エネルギーの効率的利用の措置」(空調、換気、照明、給湯、昇降機)について数値基準が定められており、省エネ・リサイクル支援法では、建築主の努力指針として、より一段厳しい値が定められている。平成11年以降に官庁営繕部が整備又は計画

中である、グリーン対策庁舎19施設、標準庁舎28施設について、PAL、CEC値について調査・分析を行った。

各評価対象事項毎の努力指針値に対する平均達成率を図-16に示す。グリーン対策及び標準庁舎とも、努力指針値を平均値ではクリアしており、すべての評価対象事項で10%以上下回る結果となった。ただし、CEC/L及びCEC/EVについては、標準庁舎の方が性能が高い数値を示しているが、CECは仮想エネルギー消費量との比較のため、勤務実態や来庁者数の増大を考慮に入れた計算による影響を受けている可能性がある。また、個々の庁舎では図-17に示すとおり、グリーン対策及び標準庁舎とも、約20%の庁舎のみが、すべての項目の努力指針値を満足しているにすぎず、約75%は判断基準値のすべてを満足している。約5%は1つの判断基準値を満足していない庁舎であり、ともに1施設が該当した。

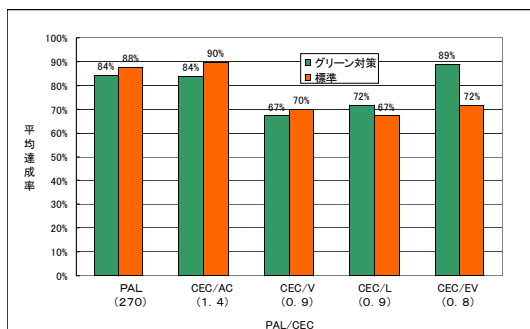


図-16 努力指針値に対する達成率

グリーン庁舎は、すべての項目について努力指針値を満足することが望ましい。

表-6 省エネ基準

数値基準	建築物の断熱性能の向上 (建築物の外壁、窓等を通じての熱の損失の防止)			建築設備の省エネルギー性能の向上 (空調設備等に係るエネルギーの効率的利用)		
	年間熱負荷係数(PAL)で規定			エネルギー消費係数(CEC)で規定		
	PAL = $\frac{\text{屋内周囲空間の年間熱負荷 (MJ/年)}}{\text{屋内周囲空間の床面積 (m}^2\text{)}}$			CEC = $\frac{\text{年間エネルギー消費量 (MJ/m}^2\text{)}}{\text{年間仮想エネルギー消費量 (MJ/m}^2\text{)}}$		
	建築物が1年間の冷暖房を必要とする単位床面積当たりの外部から侵入する熱と内部で発生する熱の合計を示すもので、建築物の外壁等の断熱性能が高いほど値は小さく(=省エネルギー性能が高くなる)。			設計された建築物の各種設備が1年間に消費するエネルギー量を、一定の基準で算出したエネルギー消費量で除したもので、効率性が高いほど値は小さく(=省エネルギー性能が高くなる)。		
事務所	PAL	CEC/AC	CEC/V	CEC/L	CEC/HW	CEC/EV
判断基準	300	1.5	1.0	1.0	-	1.0
努力指針	270	1.4	0.9	0.9	-	0.8

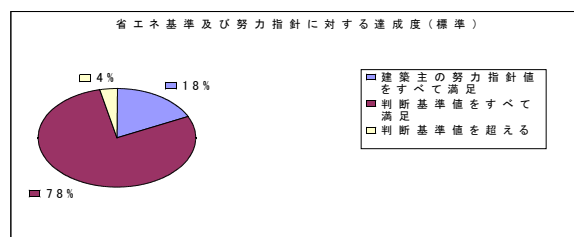
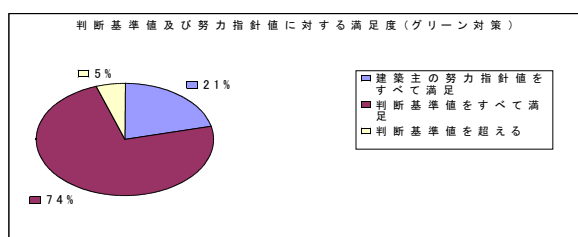


図-17 判断基準値及び努力指針値に対する満足度

6. グリーン指針による環境配慮度合いによる定性的評価

グリーン庁舎の基本計画・設計を行う際に、グリーン指針によって示された内容が反映されているかをチェックをするためのツールがグリーン庁舎チェックシートであり、本チェックシートを用いて、設計者自らが環境への配慮度合いの確認を行うものである。自己評価の欄は考慮の度合いに応じて0~2点で評価を行い、各項目とも10点満点で定性的に評価を行う。図-18に環境配慮度合いの評価結果を示す。グリーン対策庁舎は、主に省エネ(2.

1～2.3)に重きをおいたグリーン化技術を採用してきたので、従来庁舎、標準庁舎と比較して、省エネに関する得点が高いことがわかる。総合得点の平均は、グリーン対策庁舎は7.3点、標準庁舎は5.4点、従来庁舎は3.9点となった。グリーン庁舎は、7つのすべての評価項目で5点(平均点)以上で、総合得点が7.0点を超える環境性能が望ましい。

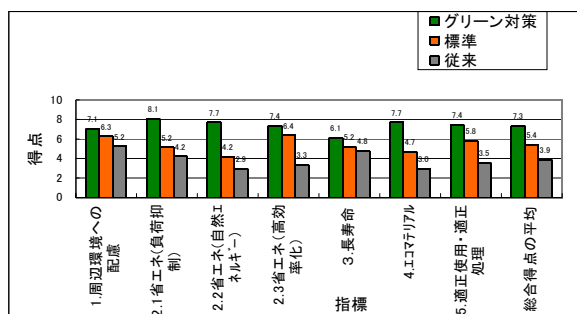


図-18 環境配慮度合いに対する得点

7. 建築物総合環境性能評価システムによる定性的評価

建築物総合環境性能評価システム(以下「CASBEE」)は、環境影響・環境品質を環境性能効率(BEE)をはじめとする尺度により評価するもので、各項目に対し1～5点で評価し、重み係数を用いて5点満点で定性的評価を行う。BEEとは分子を「建築物の環境品質・性能(Q)」(ユーザーのアメニティにおいて評価される居住環境)、分母を「建築物の外部環境負荷(L)」とすることにより算出されるもので、Qの値が高くLの値が低いほど、即ちBEEの値が大きいほど、グラフの原点と評価結果を結ぶ直線の傾きが大きくなり、環境性能が高い建築物と判断される。BEE値が増加するにつれて領域別にCランク、B-ランク、B+ランク、Aランク、Sランクとしてラベリングされる。図-19に庁舎区分毎の各評価項目に対する得点を、図-20に総合評価を示す。

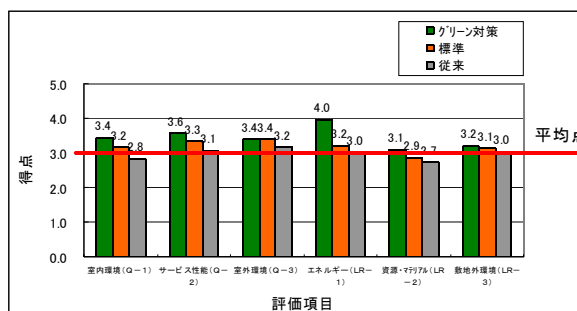


図-19 各評価項目に対する得点

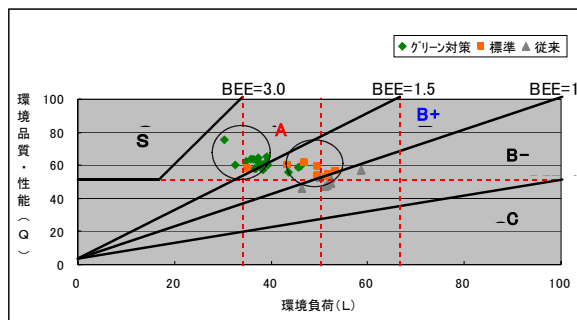


図-20 CASBEE総合評価

これより、グリーン対策庁舎は各評価項目において、平均点である3.0点以上であり、ランクは概ねAランクに集中している。また、標準庁舎にあつてはB+ランク、従来庁舎にあつてはBランクという結果となった。グリーン庁舎は、環境負荷(L)が40以下、環境品質・性能(Q)が50以上でAランクであることが望ましい。

8. 環境配慮度合いとCASBEEの定性的評価の相関

先に述べたように、グリーン指針による環境配慮度合いとCASBEEは、ともに環境性能を定性的に評価するツールであり、両者で異なる環境性能が提示されることは設計者等にとって混乱する要因となる。図-21～23に環境配慮度合いとCASBEEとの関係を示す。こ

れより、概ね庁舎区分毎に集中し、顕著な傾向が現れているといえる。また、環境配慮度合いとCASBEEの各項目を評価軸とした場合の関係を表-7に示す。いずれの場合も、両者の評価の相関が見られた。

表-7 環境配慮度合いとCASBEE

x軸	y軸	一次近似式	決定係数 (R ² 乗値)
環境配慮度合い	CASBEE		
総合	総合	$y = 0.189x + 0.24$	0.683
省エネ省資源	環境品質・性能	$y = 2.35x + 43.4$	0.583
総合	環境品質・性能	$y = 2.94x + 40.0$	0.601
省エネ省資源	環境負荷	$y = -3.00x + 62.0$	0.622
総合	エネルギー	$y = -3.81x + 66.6$	0.664
省エネ省資源	環境負荷	$y = 0.149x + 0.471$	0.640
総合	環境性能効率	$y = 0.189x + 0.241$	0.683
省エネ省資源	エネルギー	$y = 0.213x + 2.26$	0.481

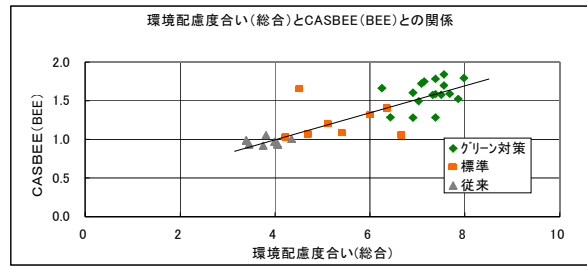


図-21 環境配慮度合いとCASBEE (BEE)

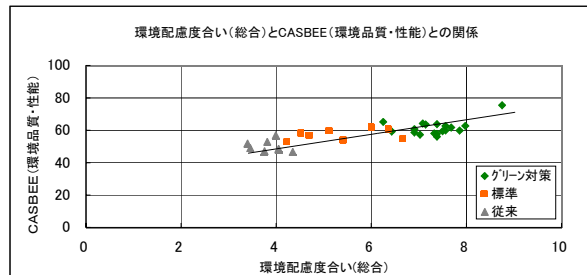


図-22 環境配慮度合いとCASBEE (環境品質・性能)

9. 環境配慮度合い及びCASBEEの定性的評価とCO2排出量との相関

定性的評価同士の相関もさることながら、実際のCO2排出量に対しても相関が認められる場合、定性的評価も有効な判断指標となる。図-24, 25にCO2排出量と関連が深い環境配慮度合い(省エネ省資源)、CASBEE(エネルギー)との関係を示す。両者とも概ね庁舎区分毎に集中し定量評価における得点が高い方がCO2排出量が少なく、環境配慮度の方が、より庁舎区分毎の傾向がわずかだが見られた。

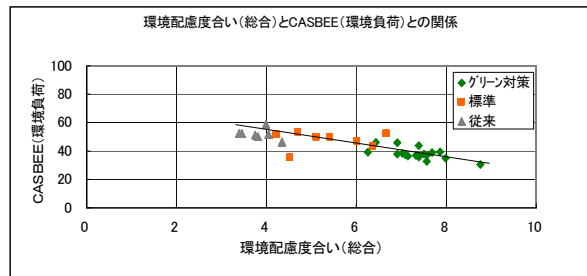


図-23 環境配慮度合いとCASBEE (環境負荷)

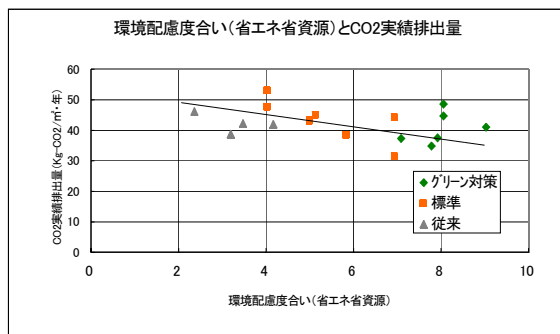


図-24 環境配慮度合いとCO2排出量

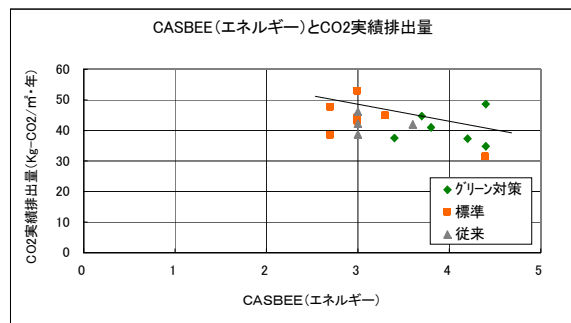


図-25 CASBEEとCO2排出量の関係

10. 環境性能評価・表示手法のソフトウェアによるLCCO2の算出

庁舎のCO2排出量を算出する際は、通常、運用に係るCO2排出量で評価しがちであるが、庁舎のライフサイクルにおける各段階(企画・設計→新営工事→建替工事→運用→維

持管理→修繕→改修工事→廃棄処分)を通して排出されるCO2の総量を指標として評価することが必要であり、本算出値の少ない庁舎がライフサイクルを通じたCO2排出量が少ない庁舎といえる。図-26に、「環境性能評価・表示手法研究会」で開発されたソフトウェアで算出したLCCO2(以下「計算値」)を、図-27には運用に係る排出量を、先に算出した執務時間内における実績排出量におき換えたLCCO2(以下「実績値」)を示す。標準モデル(2002年度ベースモデル庁舎)と比較して、グリーン対策庁舎にあっては、計算値においてはLCCO2では22.4%、運用に係るCO2では26.7%、実績値においてはLCCO2では2.5%、運用に係るCO2では6.3%、が削減される結果となった。

グリーン庁舎は標準モデルと比較して、計算値でLCCO2が20%、運用に係るCO2では25%以上の削減が図れる環境性能が望ましい。

1.1. まとめ

本研究は、グリーン指針が制定されて十分な時間が経過していないため、グリーン指針に基づいて官庁営繕部で建設したグリーン対策庁舎の絶対数が少ないため、精度の高い環境性能水準を設定するには至らなかった。また、本来の分析においては、特殊用途、24時間系統、特異な勤務実態等のデータを取り除き、「平均的な庁舎」として分析することが必要だが、そのような個別詳細データを計測・保有している庁舎がほとんどないため、庁舎全体のマクロデータで分析を行わざるを得なかった。

グリーン庁舎の環境性能においては、あなたがち、個別グリーン化技術を採用したことによって、採用しなかった場合と比較してエネルギーや水消費量がどれだけ削減できたかということが評価の対象となりやすいが、官庁庁舎全体からのCO2削減という観点からは、行政サービス

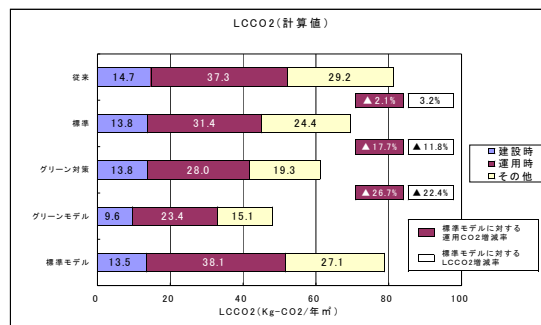


図-26 LCCO2(計算値)

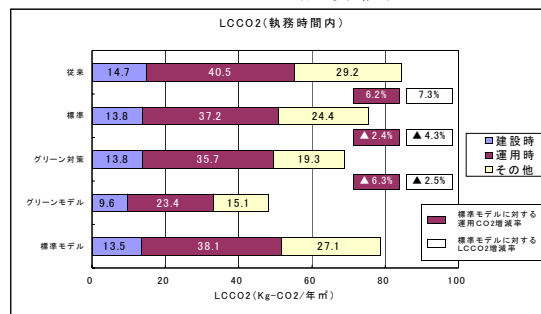


図-27 LCCO2(実績値)

表-8 環境性能水準(案)

	項目	環境性能水準	
定庁舎的建設評価時	省エネ指針努力指針値(PAL, CEC)	各項目をすべて満足	
	環境配慮度合い	総合7点以上 各項目5点以上	
	CASBEE		評価Aランク以上
			各項目3点以上
			環境負荷(L)40以下 環境品質・性能(Q)60以上
		LCCO2(年間計算値)	20%以上
	LCCO2(年間運用計算値)	25%以上	
定庁舎的運用評価後	エネルギー消費量(年間)	100MJ/m2以下	
	CO2排出量(年間)	40kg-CO2/m2以下	
	エネルギー消費量(年間執務時間)	750MJ/m2以下	
	CO2排出量(年間執務時間)	31kg-CO2/m2以下	
	水使用量(年間)	120L/人・日以下	
	水使用量(年間飲・雑用水)	100L/人・日以下	

表-9 定量的評価指標(案)

定量的指標
LCC(ライフサイクルコスト)(千円/m2・年)
LCW(ライフサイクル廃棄物処分量)(kg-W/m2・年)
LCR(ライフサイクル投入資源量)(kg-R/年m2)

に必要不可欠な庁舎を建設するにあたって、いかにCO2排出量が少ない庁舎であるかが問題であって、限られた予算の中で決められた敷地内での施設の位置、規模及び構造を勘案し、環境負荷低減に配慮した庁舎でなければならない。グリーン庁舎としての環境性能にあつては、具体的な項目の環境性能値を設定し、その水準値を満足することで、望ましい環境性能を発揮することができる。

表-10 定性的評価指標(案)

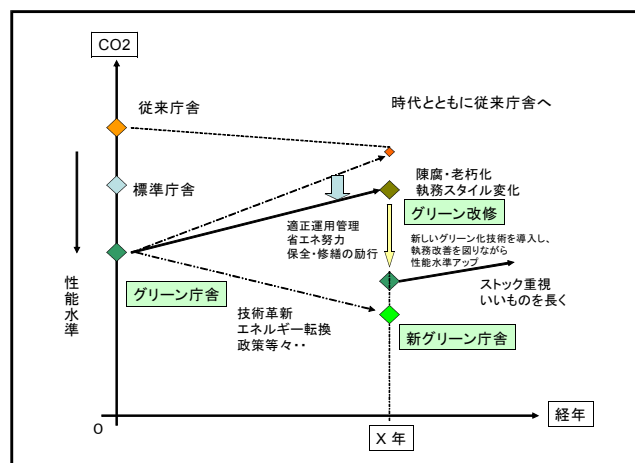
定性的指標
グリーン改修等によって環境性能が向上しない初期性能の確保
・躯体等
・改修の容易性、スペースの確保
・修繕しやすい、解体しやすい
適正管理のための手段(BEMS(ビルエネルギーマネジメントサービス))の有無
・保守管理機能(機器稼働履歴、台帳管理、保守スケジュール管理)
・運用管理機能(計量管理、エネルギー解析機能)

本研究は、上記の制約や課題のなかではあるが、グリーン指針に基づいて設計された庁舎の環境性能が向上していることが認められ、グリーン対策庁舎の環境性能の高さを実証することができた。

また、整備済みの各庁舎の環境性能より、現時点で考えるグリーン庁舎としての環境性能水準を表-8に示すことができた。今後は、この環境性能水準を一つの指標として企画・設計に反映させ、現在整備中の庁舎の完成後に得られる各種データを収集・分析してフィードバックすることにより、より確かな環境性能水準を示していきたいと考える。

さらに、定量的な評価についてはCO2を主な指標として分析を行ったが、今回示せなかった、表-9に示す他の定量的評価指標についても併せて検討する必要がある、表-10に示す定性的評価指標についても、十分な初期性能を有しているかを評価することも必要である。

グリーン庁舎は、図-28に示すとおり、個々の庁舎の環境性能が経年とともに低下していき、執務者からの快適性のますますの向上を要求されつつ、時代とともに高い環境性能水準が求められていく。建設という初期のハード的な施策だけにとどまらず、グリーン庁舎の環境性能を十分発揮させるには、施設管理者等とともに庁舎の適正管理や計画的なグリーン改修を実施することが必要不可欠であり、それによってグリーン庁舎としての環境性能が維持・向上されるものである。



＝参考文献＝
 環境配慮型官庁施設設計計画指針 平成11年版 (社)公共建築協会
 官庁施設の総合的な環境負荷性能評価・表示手法研究会最終報告書 平成15年3月
 建築物の省エネルギー基準と計算の手引き 平成15年版 (財)建築環境・省エネルギー機構
 電設技術 平成16年9月号P12～22 (株)オーム社
 (財)建築環境・省エネルギー機構 ホームページ
 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(ver1.5) 環境省地球環境局

図-28 グリーン庁舎の環境性能水準ライフサイクルイメージ