

地中熱を利用した博物館収蔵施設の動向： 「デンマークモデル」の収蔵施設の特徴と環境評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 末森, 薫 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15021/00009991

地中熱を利用した博物館収蔵施設の動向

— 「デンマークモデル」の収蔵施設の特徴と環境評価

末森 薫

(国立民族学博物館)

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1 はじめに | 4.2 日本における地中熱利用の動向 |
| 2 デンマークにおける収蔵施設の動向 | 5 時間加重保存指数 (TWPI) を用いた収蔵環境の評価 |
| 2.1 デンマークモデル | 5.1 保存指数 (PI) |
| 2.2 ヴァイレ旧収蔵施設 | 5.2 デンマークの収蔵施設の環境評価 |
| 2.3 リーベ収蔵施設 | 5.3 民博の収蔵環境管理における TWPI の活用と課題 |
| 2.4 ヴァイレ新収蔵施設 | 5.3.1 TWPI にみる民博映像音響資料の収蔵環境 |
| 3 オランダにおける収蔵施設建設の動向 | 5.3.2 民博標本資料の収蔵環境における TWPI 活用の課題 |
| 3.1 フリーズランドコレクションセンター | 6 おわりに |
| 3.2 オランダコレクションセンター | |
| 3.3 その他の収蔵施設建設の動向 | |
| 4 日本の気候における地中熱の利用 | |
| 4.1 日本の気候における地中熱活用の課題 | |

1 はじめに

2015年9月に開催された国連サミットにおいて「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が加盟国の全会一致で採択された。その中では地球上の誰一人取り残さない持続可能で多様性と包摂性のある世界を確立するための国際的な目標として「持続可能な開発目標」(Sustainable Development Goals, SDGs)が記載された。現在、17のゴール・169のターゲットから構成されるSDGsを中心として、国や地域レベルでさまざまな施策が実行されており、持続可能な世界をどう確立するかへの関心と危機感が急速な高まりを見せている。

博物館の分野においても持続可能な世界を維持する上で、地球温暖化をはじめとする環境問題を避けて通ることはできない。SDGsの提唱や気候変動・環境問題への国際的な動きに呼応して、博物館の分野でも持続可能性についての議論が広がりはじめている。国際博物館会議(International Council of Museums, ICOM)は、2018年9月に博物館における持続可能性を議論するワーキンググループを設置した。また、2019年9月に開催されたICOM京都大会のプレナリーセッションでは「博物館による持続可能な未来の共創(Curating Sustainable Futures through Museums)」がテーマとなり、さまざまな視点

から話題が提供された(栗原 2020)。佐久間大輔は「(博物館は)他の機関に比べて多分野間の協調した検討に適した機関」であることを指摘し、博物館の役割を提起している(佐久間 2020: 27)。

博物館における資料保存の分野では、気候変動や環境問題の影響を受けて、比較的早い時期から持続可能性の議論が進められてきた。例えば、1987年に採択されたモントリオール議定書に、オゾン層の保護を目的としてその破壊を促す物質を規制する内容が記されたことをきっかけに、オゾン層破壊物質のひとつである臭化メチルを含む殺虫処理薬剤の代替として、さまざまな殺虫処理方法の開発や実験が進められた(木川・三浦・山野 2000)。また、化石資源の消費によって得られるエネルギーを減らす対策等も議論されてきた。ゲティ保存財団(The Getty Conservation Institute)は、2007年4月に「持続可能な環境管理戦略に関する専門家円卓会議(Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies)」を開き、博物館や文化遺産における環境管理について包括的な議論をおこなった(The Getty Conservation Institute 2007)。その中で当時英国のナショナル・トラスト(National Trust)に所属していたSarah Staniforthは、持続可能性には経済、環境、社会の3つの側面があり、博物館は環境の側面において良い事例を示すことで、一般の人々にも影響を与えようことを指摘した(The Getty Conservation Institute 2007)。また、これらの持続的な環境管理の議論を受けて、国際文化財保存学会(International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, IIC)と国際博物館会議・保存国際委員会(International Council of Museums - International Committee for Conservation, ICOM-CC)は、2014年に共同で環境ガイドライン(Environmental Guidelines IIC and ICOM-CC Declaration)を発出し、博物館等の施設は、エネルギー使用量を削減し、再生可能な代替エネルギー源を模索することにより、二酸化炭素排出量を削減し、気候変動を緩和する必要があることなどを提起した(Bickersteth 2016)。

こうした地球環境への関心が全世界的に高まりをみせるなか、デンマークではいち早く2000年代初頭より、博物館の収蔵施設における環境問題に積極的に取り組んできた。2003年には、デンマークのヴェイレ(Vejle)に、地中熱等の自然環境を利用することにより、空調制御をおこなわない受動的な環境管理(以下、Passive Climate Controlの訳として「受動的環境管理」を用いる)を原則とする収蔵施設が建設され、新しい環境管理モデル(デンマークモデル)として注目されてきた。近年、オランダをはじめ欧米諸国では、デンマークの事例にならった収蔵施設が次々と建設されている。筆者は2017年にデンマーク・コペンハーゲンで開催されたICOM-CC第18回大会に参加し、デンマークに建設された収蔵施設について情報を収集した(Knudsen and Lundbye 2017)。また、翌2018年にオランダにて研究動向調査をおこない、オランダに建設された、あるいは建設中の収蔵施設について情報を収集した(末森 2020)¹⁾。

デンマークやオランダに建設された博物館収蔵施設は低エネルギーを実現した持続性

の高い施設であるとともに、複数の機関が共有する施設でもある。本稿では、世界的に注目されている両国の博物館収蔵施設の動向について、建物の特徴および環境管理の方法を中心にまとめる。そして、両国と日本の気候の違いを概観した上で、日本における地中熱利用の動向を紹介する。また、デンマークの博物館収蔵施設において、収蔵環境の評価に用いられる時間加重保存指数 (Time Weighted Preservation Index (TWPI)) の特徴を示し、国立民族学博物館 (以下、民博) の収蔵環境を例に TWPI 活用の可能性と課題を検討したい。

2 デンマークにおける収蔵施設の動向

2.1 デンマークモデル

デンマークでは、Christoffersen の研究に基づき、2000年代初頭より、受動的環境管理を取り入れた新しい博物館収蔵施設の議論がはじまった (Christoffersen 1996)。博物館収蔵施設の要件として主に議論されたのは、建物の重量、建材および収蔵品の吸放湿性、収蔵庫内における活動の制限、床面の非断熱性および不透水性である。また、数年にわたり建物の除湿をおこなえば、それ以降は除湿をおこなわなくても環境のコントロールが可能という予測も議論されたが、この点は後に実現しないことが明らかにされている (Christensen et al. 2010, 2.4参照)。これらの議論を経て、建物の外壁と天井の断熱性を高める一方、床面には断熱層を設けず、地中熱を利用する構造を有する新しい収蔵施設が構想され、後に「デンマークモデル」と称された (図1)。

デンマークでは、2003年にユトランド半島東岸のヴァイレに、2005年にはユトランド半島南西部のリーベ (Ribe) に、「デンマークモデル」の構想を導入した収蔵施設が竣工



図1 「デンマークモデル」の模式図 (筆者作成)

した。さらに、2013年には、ヴァイレの収蔵施設に新しい建物が増設された（以下、もともとあった収蔵施設を「旧収蔵施設」、増設された収蔵施設を「新収蔵施設」と呼称する）。ヴァイレの旧・新収蔵施設、リーベの収蔵施設については、受動的な環境管理の仕組みを取り入れた収蔵施設としてこれまでに多くの論考で取り上げられている（Knudsen and Rasmussen 2005; Rasmussen 2007; Christensen et al. 2010; Christensen and Janssen 2011; Ryhl-Svendson et al. 2011; Ryhl-Svendson et al. 2012; Christensen and Kollias 2015; Christensen et al. 2016; Knudsen and Lundbye 2017; Klenz et al. 2019）。次に、先行研究で提示される情報およびデータをもとに、各収蔵施設の建物の構造、温湿度環境管理、収蔵方法などの特徴について、建設された年代順にまとめる。

2.2 ヴァイレ旧収蔵施設

2003年、ユトランド半島の東岸に位置するヴァイレに、16の博物館とアーカイブズの機関が共同運営する共有型の収蔵施設を開設した（写真1）（Rasmussen 2007）²⁾。この収蔵施設は、ヴァイレ文化遺産保全センター（The Centre for Preservation of Cultural Heritage/the Cultural Heritage Centre Vejle）の一部であり、1975年に設立されたヴァイレ保存修復センター（Conservation Center Vejle）の新しい施設と併設された。

2001年、共有型の収蔵施設の建設に先駆け、ヴァイレ保存修復センターの保存担当スタッフらによって、ヴァイレ近郊に所在する12の博物館が所有する収蔵施設、計11,178m²の収蔵エリアの現状調査がおこなわれた（Knudsen and Rasmussen 2005）。その結果、資料の密な収蔵や多孔質な建材の使用によって87%のエリアで清掃に課題があること、46%のエリアが湿気た環境による被害を受けていること、48%のエリアに給排水用の配管が通っていることなどが分かった。その結果を踏まえて、資料保存の専門家が設計や施工に関わり、博物館の収蔵施設に求められる要件の洗い出しがおこなわれた。

収蔵施設の建設地の要件としては、いずれの博物館やアーカイブズからも近いこと、道路などアクセスの条件が良いこと、セキュリティ上消防署や警察署から近いこと、空



写真1 ヴァイレ文化遺産保全センターの外観
（左：収蔵施設（旧）、中：事務施設等、右：保存修復施設）（Knudsen and Rasmussen 2005）

気汚染が少ないこと、将来的に拡張が可能であることなどが検討され、結果として、最も離れている施設から36km、高速道路の入口から1 km、消防署から2 km、警察署から7 kmの距離にあり、工業地帯から離れた森林に隣接した場所が建設地に選定された。また、収蔵施設の建物の要件として、建設および運用にかかる費用をおさえられること、さまざまな収蔵品に適応する条件が整えられること、資料を移動する導線が確保されていること、照明は必要最低限とすること、清掃がしやすいこと、建築には低価格かつ不活性の材料を用いることが求められた。そして、受動的環境管理を原則とすること、外壁と天井に断熱層を設けて床面以外を周辺環境と絶縁するコンクリート造りの建物とすることが決められた。さらに、耐火性が担保されていること、漏水のリスクが低い屋根であること、再生可能エネルギーを使用することなども検討された (Knudsen and Rasmussen 2005)。

新設された建物の壁は三層構造であり、240mm厚のコンクリート製の内壁の周囲にミネラルウールを材料とする250mm厚の断熱層を設け、その外部に35mm厚のシルバーメタリック塗装が施された金属製波板の外壁が敷設されている (図2) (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。また、内壁は、透水性のある白色ペンキで塗工された (Christensen and Janssen 2011)。天井は、TT型の金属製の梁に金属製の波板を敷設し、その上にミネラルウールを材料とする300mm厚の断熱層と二重のアスファルト (ビチューメン) の屋根が覆っている (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。屋根は4度傾斜しており、雨水は建物内外の排水管より排出される (Knudsen and Lundbye 2017; Rasmussen 2007)。

他方、床面には断熱層は設けられておらず、地中熱が伝わる構造である。防水層の上に150mm厚の排水用の砂利層、その上に120mmのコンクリートを施工し、コンクリー



図2 ヴァイレ旧収蔵施設の構造模式図 (筆者作成)



図3 ヴァイレ文化遺産保全センターの平面図
(Rasmussen 2007, 文字筆者加筆)

は、低温処理庫、低温低湿収蔵庫 (Cool Dry, Compact Storage) などが設置されている (図3)。収蔵施設には、Hall A, B, C, Dの4つの収蔵室があり、Hall AとHall Cが各1,060m²、Hall BとHall Dが各383m²である。収蔵室の面積の約75%に収納棚が設置された (Christensen et al. 2016)³⁾。なお、建物は、床面積が3,417m²あり、建設費用は土地代や税金を除いて、1m²辺り780€、収蔵棚含むと1m²辺り593€であった (Knudsen and Lundbye 2017)⁴⁾。

収蔵スペースは二層化され、二層の床面には工業用の格子状金属板が用いられている (写真2)。格子状の金属板は、コンクリート製に比べ安価であり、上層と下層の空気の透過効率が良い。収蔵品は、大中小の大きさ別に区分され、収蔵品へのアクセスが容易であること、できる限り経済的かつ適切な配架システムとすること、収納棚中の資料が動かないことなどを要件とすることが決められた (Knudsen and Rasmussen 2005)。小型と中型の収蔵品は収納棚に、大型の収蔵品は収納棚を設置していないスペースに配置された。また、中型と大型の収蔵品はパレットに載せて置いて保管されている。収蔵庫内の動線は、トラックおよびパレットリフターを用いて簡易かつ安全に運搬をおこなえるように整備された。消火設備は、水害のリスクを減らすためにスプリンクラーではなく、ガス式が採用されている。また、雨水の排水管2本が建物の内部を通っているため、万が一、床面に漏水が確認された場合には、警報が鳴る水害用のアラームが設置された。

トの表面に灰色のエポキシ樹脂が塗工された (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。エポキシ樹脂は不透水性であり、床面からの水分の侵入やコンクリートの摩耗を防ぐほか、掃除がしやすいというメリットがある (Rasmussen 2007)。建設地の地中熱は、年間平均9℃であり、夏場は建物内の空気を冷やし、冬場は建物内の空気を温める効果がある。ただし、結露が発生する可能性があるため、床面に直接モノは置かず、パレットなどに載せて保管することが取り決められた (Knudsen and Rasmussen 2005)。

建物は、保存修復施設、事務施設等、収蔵施設の3つの建物を連結したつくりである (写真1)。保存修復施設と収蔵施設を連結する建物には



写真2 ヴァイレ旧収蔵施設の内観 (Christensen et al. 2016)

作業スペースの蛍光灯照明は、照度70lxに設定され、赤外線センサーによって作業時のみ点灯する仕組みである (Knudsen and Rasmussen 2005)。

収蔵スペースの温湿度管理は、木製品や絵画を収蔵する一般条件のHall A, C, Dと、考古遺物や金属製品などを収蔵する低湿条件のHall Bに分けられた。一般条件の収蔵室は、小型除湿器により湿度の制御だけをおこなう設備であるのに対し、低湿条件の収蔵室には、小型除湿器と小型ヒーターが備えられている。環境制御の目安は、一般条件の収蔵室では温度の設定はなく、湿度が50% RH、低湿条件の収蔵室では10℃以上、40% RHと設定された (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。温湿度の推移は年によって若干の違いはあるが、一般条件の収蔵室では7℃～18℃、50% RH ± 5% RH、低湿条件の収蔵室では10℃～18℃、40% RH ± 5% RH程である (Christensen et al. 2016)⁵⁾。また、現代メディアなどを収蔵する低温低湿収蔵庫は、空調によって12℃、30% RHに制御されている (Knudsen and Rasmussen 2005)。なお、環境管理に要する年間の電力消費量は、一般条件の収蔵室では1.5kWh/m³、低湿条件の収蔵室では4 kWh/m³であることが報告されている (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。

2.3 リーベ収蔵施設

2005年に竣工したリーベ収蔵施設は、南西ユトランド博物館 (Museum of Southwest Jutland) が所有する施設である (写真3)⁶⁾。建物の壁は多重構造であり、内側から吸水性の高い粘土 (moler clay)⁷⁾でつくられたレンガ壁 (110mm厚)、空隙層 (10mm厚)、成型されたコンクリート壁 (正面・背面は200mm厚、側面は150mm厚)、ミネラルウールの断熱層 (250mm厚)、空隙層 (50mm厚)、焼成レンガ壁 (110mm厚) である (図4)。天井は、木毛系セメント板の上に、ミネラルウールを材料とする300mm厚の断熱層を設置している。合板とアルミニウム板でつくられた屋根は、傾斜20度の切妻形であ



写真3 リーベ収蔵施設の外觀 (Ryhl-Svendsen et al. 2011)

り、天井面と屋根の間には空間がある (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。床面に断熱層はなく、300mm厚の砂利層の上に、200mm厚のコンクリート層を施工し、エポキシ樹脂を塗工している (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。

外壁と天井には断熱層が施されているため、壁から1m内側の位置で測定した温湿度データでは外気の影響をほとんど受けていない。また、床面の温度は、夏場は室温よりも低く、冬場は室温よりも高い傾向にあり、室内の温度と床面下部の温度の挙動は一致していることから、床面から伝わる地中熱が室内の温度の推移に関係していることが報告されている (Ryhl-Svendsen et al. 2011)。

建物内部には、天井高6.2mの一般収蔵室(994m²)と天井高2.9mの低湿収蔵室(99m²)の2つの収蔵室がある。一般収蔵室では、収納棚が天井まで設置されている(写真4)。それぞれの収蔵室には、個別の除湿器と空気循環用のファンが設置され、ファンは常時運転、除湿器は室内が高湿になったときのみ稼働する。一般収蔵室におけるファンの風速は0.35m³/sであり、再循環率は0.2(5時間で1回)である。低湿収蔵室には、温水循環放熱器が設置されているが、2009年以降は運用されていない。一般収蔵室には、加温装置は設置されていないが、機器の運転に伴う熱や、壁を伝って隣接する部屋から熱が伝わる可能性が指摘されている。2010年におこなわれたモニタリングのデータによると、一般収蔵室は9℃～15℃、45%RH～55%RH、低湿収蔵室は11℃～22℃、32%RH～38%RHで推移していたことが報告されている (Ryhl-Svendsen et al. 2012)。

建物は総床面積が1,835m²あり、土地代や税金を除いて建設にかかった費用は、1m²辺り収蔵棚含めて1,550€である (Knudsen and Lundbye 2017)⁸⁾。ヴァイレ旧収蔵施設と比較すると、屋根の傾斜や外壁の材料に違いがあり、壁にレンガを用いているために建設費用が高んでいる。なお、除湿器を運転する電力は太陽光発電により賄っており、環境管理に要する年間の電力消費量は、2kWh/m³以下である。



図4 リーベ収蔵施設壁構造の模式図 (筆者作成)



写真4 リーベ収蔵施設の内観 (Klenz et al. 2019)

2.4 ヴァイレ新収蔵施設

ヴァイレの収蔵施設は、収蔵品の数が増えて手狭になったこと、新たに利用を希望する機関が増えたことから、2013年に新収蔵施設が増設された(写真5)。増設後は、20以上の機関が共有する収蔵施設として運用されている (Knudsen and Lundbye 2017)⁹⁾。

増設にあたってはデンマーク工科大学 (Technical University of Denmark) との共同研究が組織され、2003年に竣工した旧収蔵施設の性能が評価された (Christensen et al. 2010; Christensen and Janssen 2011)。その中で、旧収蔵施設においては、数年の間除湿



写真5 ヴァイレの収蔵施設 (手前：新施設, 奥：旧施設) (Knudsen and Lundbye 2017)

器を稼働することにより、建物内の水分量を落ち着かせ、その後は除湿器を運転せずに運用することが想定されていたが、現実には湿度の目標値を保つために除湿器を継続的に運転する必要があることが議論となった。シミュレーションソフトを用いて旧収蔵施設の環境に関する詳細な分析がおこなわれた結果、外部からの湿気の侵入により、完全な受動的環境管理は難しいことが確認され、除湿を続ける必要性が明らかにされた。そして、新しいコンセプトとして、建物の断熱効率および除湿運用の最適化が議論された。シミュレーションの結果、断熱の効果は限定的であるが、気密性を高めることにより、除湿の運用を79%削減できる結果が示された。この結果を受け、新収蔵施設はより軽い構造の建物とすることとなり、旧収蔵施設では240mmあった外壁のコンクリートの厚さは180mmに変更された。その他の基本的な構造は旧収蔵施設と同じである (Knudsen and Lundbye 2017)。

旧収蔵施設と新収蔵施設で大きく変えられた点はその気密性である。旧収蔵施設では、1時間辺りの空気交換率は0.04 (25時間で1回交換)であったが、より気密性の高い空間とすることで省エネルギーを図ることを目指し、新収蔵施設では0.01以下、つまり100時間で1回以下とする空間を実現した (Christensen and Kollias 2015)。

増設した新収蔵施設には、Hall E, F, Gの3つの収蔵室が新たに設置された (図5)。面積は、Hall Eが629m²、Hall Fが691m²、Hall Gが484m²である (Christensen et al. 2016)。建物全体の約90%を収蔵室が占め、残りの10%に梱包・荷解き用のスペースや低酸素処理設備などが設置されている。

旧収蔵施設では、格子状の金属板により空間を二層化していたが、増設した新収蔵施設では二層化せず、背の高い収納棚が導入された (写真6)。また、旧収蔵施設と同様に、作業スペースの照度は70lxに設定され、省エネルギー化と資料保全のために、作業スペース以外は赤外線センサーによって点灯・消灯が管理されている (Chitistensen et al. 2016)。なお、新収蔵施設の床面積は2,535m²、建設費用は1 m³あたり406€であり、

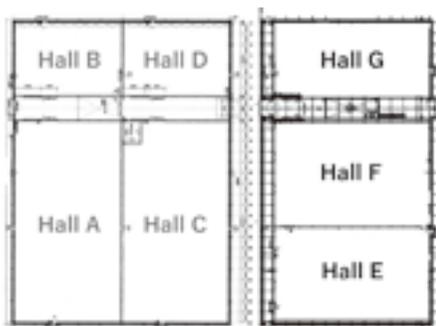


図5 ヴァイレ旧・新収蔵施設の平面図
(左:旧収蔵施設, 右:新収蔵施設保存修復施設)
(Chitistensen et al. 2016)



写真6 ヴァイレ新収蔵施設の内観
(Knudsen and Lundbye 2017)

旧収蔵施設の593€に比べ、約32%削減された (Knudsen and Lundbye 2017)¹⁰⁾。

収蔵室には、20℃・60%RHの条件で7.4kg/h、低湿条件では4.4kg/hの能力を有する小型の除湿器が設置されている。設定値は、木製品、絵画、複合素材を収蔵するHall EとHall Fは50%RHの一般条件、紙や写真、プラスチックなどを収蔵するHall Gは40%RHの低湿条件であり、2013年の実測データでは、一般条件の収蔵室の環境は9℃～15℃、48%RH～51%RH、低湿環境の収蔵室では8℃～16℃、37%RH～42%RHであったことが報告されている (Knudsen and Lundbye 2017)。また、環境管理に要する年間の電力消費量は、50%RHの一般条件の収蔵室で0.4kWh/m³、40%RHの低湿条件の収蔵室で1.4kWh/m³であった。旧収蔵施設の電力消費量は、それぞれ1.5kWh/m³、4kWh/m³であり、気密性を高めたことにより、大幅な省エネルギー化が実現したことが示された。

3 オランダにおける収蔵施設建設の動向

オランダでは、オランダ政府が進めた「文化遺産保護のためのデルタ計画事業 (Delta Plan for the Preservation of the Cultural Heritage)」を契機に、1990年代以降、収蔵施設の役割についての再考と再設計が進められてきた。この事業では、博物館資料を取り巻く課題を洗い出すとともに課題解決のための予算化がなされ、収蔵施設の改修や建設、環境管理システムの導入、予防保存を優先した保存対策が進められた (Kirby Talley 1999)。同時に、博物館資料カタログのデジタル化・データベース化などが進み、収蔵施設に直接訪問する必要性が減り、その結果として博物館から離れたオフサイトの収蔵施設の利用が増加した。一方で、博物館資料に対する方針にも変化があり、新たな資料の収集や収蔵を優先するのではなく、収蔵資料をより広く公開することが求められるようになった。

2007年の経済危機により、政府からの予算が大幅に削減されたことを受け、博物館独自で収入を得るビジネス志向が高まった。その結果、収入源である来館者がアクセスできない収蔵施設に予算をかけることの正当性を示すことが難しくなり、収蔵施設を一般公開する機会が増えた。オフサイトの収蔵施設はただの箱ではなく、より機能的な空間であることが求められるようになり、その名称も「収蔵施設 (storage facility)」から「コレクションセンター (collection centre)」に変わっていくこととなる。このような流れの中、複数の機関が共に運営する共有型の収蔵施設が求められていった。また、化石燃料への依存に対するエネルギー危機への対応として、低エネルギー型の持続可能性の高い建物が求められ、デンマークモデルを参考にした受動的環境管理を導入したフリースランドコレクションセンターやオランダコレクションセンターなどの建設に帰結することになる (Ankersmit et al. 2021)。

3.1 フリーズランドコレクションセンター

2016年5月12日、オランダのフリーズランド州都レーワンデル (Leeuwarden) に、5つの地域博物館が共に運営する共有型の収蔵施設、フリーズランドコレクションセンター (Collection Centre Friesland) が開館した (写真7)¹¹⁾。コレクションセンターの設立前におこなわれた調査では、5つの地域博物館が合わせて30の収蔵施設を有しており、そのうち10の施設については、年間に指で数えられる程度しか訪問していないこと、収蔵品管理に係る費用が増加していること、収蔵品のアクセス・活用に課題があることなどが明らかにされた (Byuynzeel Storage System 2021a)。そこで、最小限の運営費用かつエネルギー効率の良い建物の建設が構想され、「デンマークモデル」を参考にした受動的環境管理を基本とする共有型の収蔵施設が建設されることとなった。収蔵施設の内部環境条件の設定にあたっては、デンマークとの気候の違いが検証され、資料の劣化の原因となるような急激な温湿度の変化がない限り、年間を通した緩やかな挙動は許容する方針が採用された (Byuynzeel Storage System 2021b)。

竣工したフリーズランドコレクションセンターは、ワークスペースと収蔵スペースからなる気密性の高い建物であり、収蔵スペースの床面積は1,920m²、建設費用は1,310 €/m²である (Ankersmit et al. 2021; Byuynzeel Storage System 2021a)¹²⁾。収蔵スペースの建物の構造は、デンマークモデルと同様に、天井、外壁には断熱層を設ける一方、床には断熱層を設けていない。他方、ワークスペースでは床面にも断熱層を設けている (図6)。建物の外観は、美観や周辺環境との調和を保つために、外壁は粉体のアルミニウムで塗装され、つる植物が繁茂できるようにくぼみ状のアルコーブが設けられた。また、屋根には、発電用のソーラーパネルが設置されている (Byuynzeel Storage System 2021b)。

収蔵スペースには、冷却、加熱、除湿をおこなえる空調システムが備えられている。冷却・加温をおこなう設備は、温度制御への要求に応じるために導入された。収蔵スパー



写真7 フリーズランドコレクションセンターの外観 (LEVS Architecten 2021)

スにおける温湿度の目標値は、10℃以上、55% RH 以下である。加熱をおこなわない方法により、収蔵庫内は12℃～22℃の範囲で推移し、電力消費量は年間で32.25kWh/m²であったことが報告されている (Ankersmit et al. 2021)。

収蔵スペースには、絵画用の移動ラックと二層式の集密棚が設置され、棚の全長は16km、さまざまなサイズの引き出しの数は2,400台に及ぶ (写真8)。導入された二層式の集密棚は、上層と下層の棚が同時に動く仕組みであり、収納棚の間の換気などに有効であることが指摘されている (Byuynzeel Storage System 2021a)。フリーズランドコレクションセンターは計画当初45,000m²の床面積が必要と試算されていたが、集密棚の導入により、床面積を65%削減することができた。また、所蔵館別ではなく、形態別に配架をおこなったことにより、40%の省スペース化を実現したことが報告されている (Byuynzeel Storage System 2021b)。

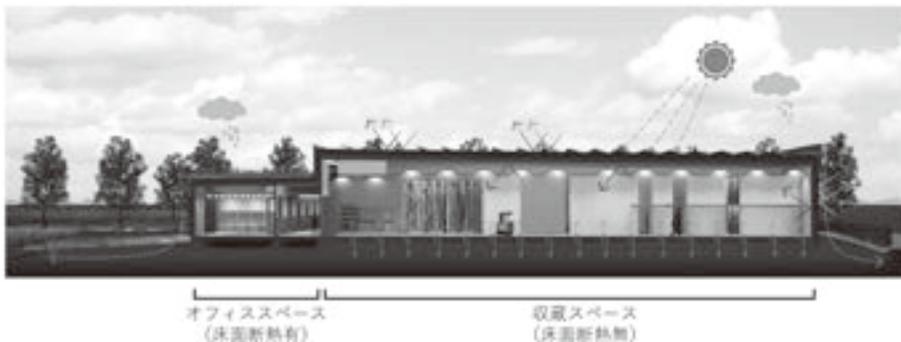


図6 フリーズランドコレクションセンターの構造 (LEVS Architecten 2021)



写真8 フリーズランドコレクションセンターの内観
手前：絵画用移動ラック、奥：二層式集密棚
(LEVS Architecten 2021)

3.2 オランダコレクションセンター

2020年、オランダのアメルスフォールト (Amersfoort) にオランダコレクションセンター (Collectie Centrum Nederland, CCNL) が開館した (写真9)。このセンターは、オランダ野外博物館 (the Nederlands Openluchtmuseum)、ヘットロー宮殿博物館 (Paleis Het Loo museum)、アムステルダム国立美術館 (the Rijksmuseum)、オランダ国文化遺産庁 (the Cultural Heritage Agency of the Netherlands) が共有する施設であり、資料の一般公開、資料の活用、そして、資料の収蔵の3つの機能を支援する。建物は、一般公開スペース、ワークスペース、収蔵スペースの3つに分かれている。高さ25mで4階建ての収蔵スペースは2万5,000m²の床面積があり、67万5,000点の資料が収蔵品される予定である¹³⁾。なお、建物の建設費用は、1,320€/m²であった (Ankersmit et al. 2021)¹⁴⁾。

建物の建築にあたっては、持続可能性を実現することが重要な命題とされ、イギリス建築研究所 (Building Research Establishment, BRE) が1990年に開発した建築物の環境性能評価手法である BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) の評価において、最も高い「outstanding」の評価を取得することが目指された (Ankersmit et al. 2021)。BREEAM では、管理、健康と快適性、エネルギー、交通、水、材料、廃棄物、土地利用と生態系、汚染の9つの項目により5段階で評価される¹⁵⁾。

オランダコレクションセンターの建物は、フリーズランドコレクションセンターと類似した構造を有し、一般公開スペース、ワークスペースでは外壁、天井、床面に断熱層を設けているが、収蔵スペースでは外壁と天井に断熱層を設ける一方、床面には断熱層を設けていない。断熱層の厚さは、外壁が200mm、天井が300mm~1,000mmである。また、屋根には2,180枚、計3,600m²のソーラーパネルが、天井と床のコンクリートには



写真9 オランダコレクションセンターの外観 (Rijksmuseum 2021)

冷水・温水を流すパイプが設けられており、蓄熱エネルギーにより建物内の温度を制御するシステム (Concrete Core Activation) が採り入れられている (Rijksmuseum 2021)。温湿度制御の設定値は、17°C~23°C、50% RH であり、42% RH~58% RH を外れた場合にのみ、空調運転による制御がおこなわれる。なお、年間の電力消費量は、42.70kWh/m² であることが報告されている (Ankersmit et al. 2021)。

3.3 その他の収蔵施設建設の動向

オランダでは、フリーズランドコレクションセンターとオランダコレクションセンター以外にも、受動的環境管理や共有型の収蔵施設建設の事業が進められている。オランダ国立図書館 (National Library) では、自動化された集密収蔵システムを導入した施設を建設し、受動的環境管理の導入が計画されている。また、ユトレヒト市とブレダ市は、市政のアーカイブと考古資料、美術品を一同に収蔵する共有型の収蔵施設の建設を進めている (Ankersmit et al. 2021)。

オランダコレクションセンターと同年の2020年に、ロッテルダムにボイマンス・ヴァン・バーニンゲン博物館の収蔵施設 (Depot Boijmans Van Beuningen) も開設した。この施設は一般公開に焦点を当てた施設であり、来館者は多くの収蔵品にアクセスすることができる。受動的環境管理は導入していないが、持続可能性が意識されており、天井、外壁、床に断熱層を設け、ソーラーパネルと蓄熱システムを併設している。また、冷気、暖気、乾いた空気の3種類の空気を混ぜて、調整した空気を流す新しい空調システムが導入されている (Ankersmit et al. 2021)。

4 日本の気候における地中熱の利用

ここまで、デンマークとオランダに建設された地中熱を用いた収蔵施設の動向をみてきた。両国の収蔵施設では、建物の周囲に断熱層を設けて外気と縁切りする傍ら、床面には断熱層を設けず地中熱を利用することで建物内部の温度環境を整え、除湿のみを機械で制御する方法により、受動的環境管理を実現している。しかし、ヴァイレ保存修復センターのKundesnが「デンマークと同様の気候ゾーンにある博物館にとって重要な情報」と指摘するように、異なる気候にある地域で同様の仕組みをそのまま導入できるかについては議論を要する (Knudsen and Lundbye 2017)。

本章では、デンマーク・オランダの気候と、日本の気候を比較し、日本において受動的環境管理を導入する上での課題を提示する。また、デンマークモデルでも用いられた地中熱を利用した環境管理について、三重県総合博物館の事例などを取り上げ、日本における動向を概観する。

4.1 日本の気候における地中熱活用の課題

デンマークのスクリュストルプ (Skrydstrup, ヴァイレの南方約70km), オランダのレーワルデン (Leeuwarden, フリースランド州の州都) そして、民博が所在する大阪の年間の気温と湿度の推移と、各地における月間平均最高温度の最高値と最低値, 月間平均相対湿度の平均値を示す (図7~12) (表1) (World Weather & Climate Information 2021)。デンマークとオランダは年間を通して温度と湿度の推移が類似しており、月間

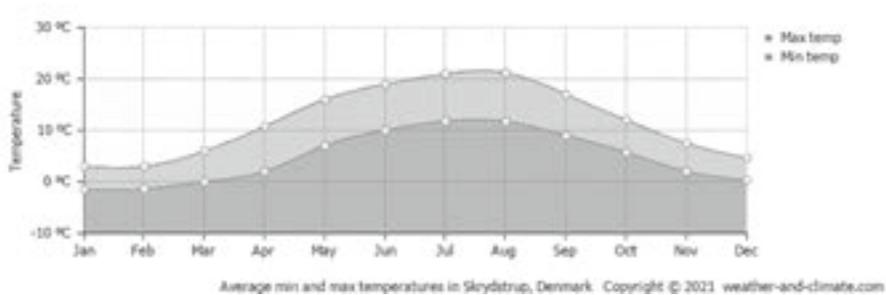


図7 デンマーク・ヴァイレ (スクリュストルプ) の月間平均最高温度・月間平均最低温度の年間推移 (World Weather & Climate Information 2021)



図8 デンマーク・ヴァイレ (スクリュストルプ) の月間平均相対湿度の年間推移 (World Weather & Climate Information 2021)

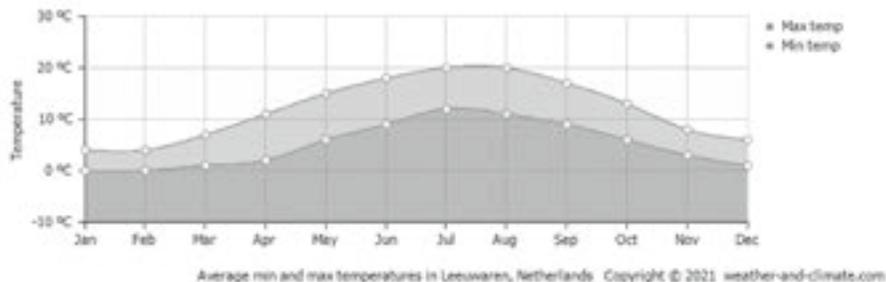


図9 オランダ・フリースランド (レーワルデン) の月間平均最高温度・月間平均最低温度の年間推移 (World Weather & Climate Information 2021)

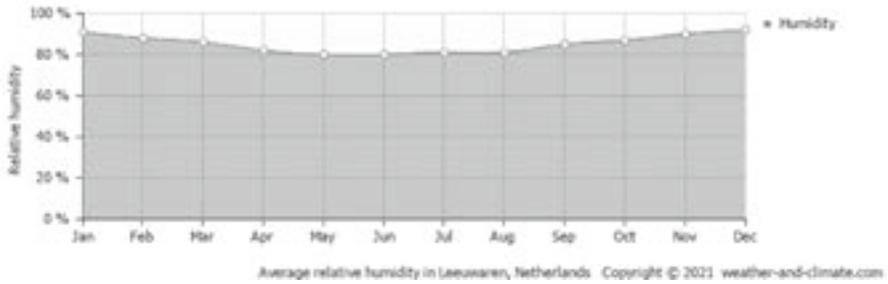


図10 オランダ・フリースド（レーワルデン）の月間平均相対湿度の年間推移
(World Weather & Climate Information 2021)

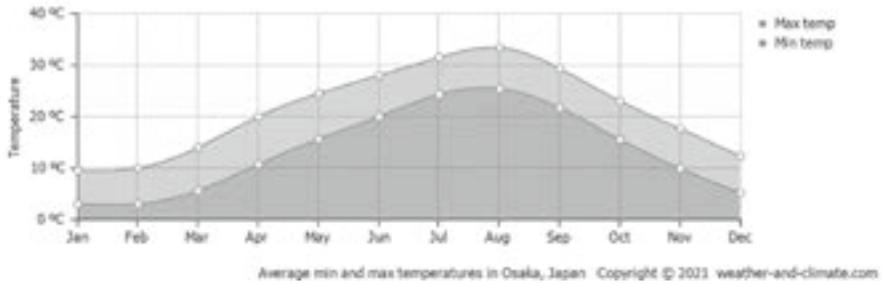


図11 大阪の月間平均最高温度・月間平均最低温度の年間推移
(World Weather & Climate Information 2021)

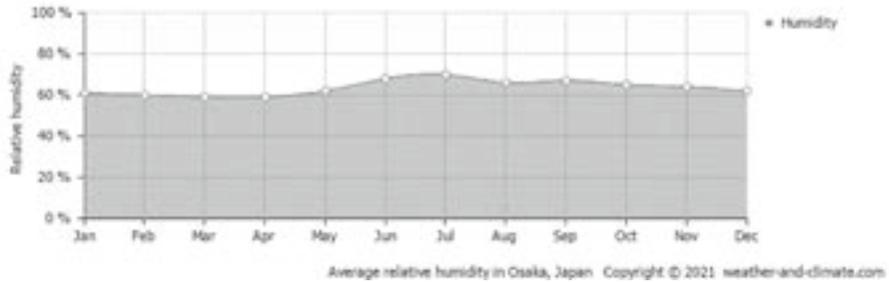


図12 大阪の月間平均相対湿度の年間推移
(World Weather & Climate Information 2021)

表1 デンマーク、オランダ、日本の気候数値の比較

場所	月間平均最高温度の最高値 (°C)	月間平均最高温度の最低値 (°C)	月間平均湿度の平均値 (% RH)
デンマーク ヴァイレ	21.2	3.0	81.0
オランダ フリースランド	20.0	4.0	85.0
日本 大阪	33.4	9.5	64.0

(World Weather & Climate Information 2021)

平均最高温度の最大値が20℃前後、月間平均湿度の年間平均が80%RH台である。一方、大阪は月間平均最高温度の最大値が33.4℃、月間平均湿度の年間平均が64%RHであり、デンマークやオランダと比べて温暖な気候であることが分かる。特に、4月から10月にかけての年間の半分以上は、月間平均最高温度が20℃を超えている。一方、大阪の月間平均相対湿度は、夏場に上昇する傾向にあるが、デンマークやオランダと比べると年間を通して低い。

デンマークモデルは、デンマークやオランダなど比較的寒冷の地域であることを前提として構築された仕組みである。より温暖な気候にある地域においては、気密性の高い空間であったとしても、地中熱の熱伝導のみを利用する仕組みでは対応しきれず、機械による制御が不可欠になることが想定される。例えば、日本の夏季において建物内部を適切な温度に制御するには、地中熱による冷却のみでは目標値を保つことができず、空調による冷却が必要になるであろう。また、空間の温度を下げると必然的に相対湿度はあがる。デンマークの事例では、気密性の高い建物であっても、外部からの湿気の侵入を遮断するには限界があることが示されており、冷却とともに、恒常的な除湿をおこなうことが必要となることも想定される。デンマークモデルと同様に気密性や断熱性を高めた建物にて、地中熱による環境制御の仕組みを導入する場合には、その土地の気候や地質などさまざまな要素を勘案した上で、建物の構造や空調システムの選定などを慎重におこなうことが求められる。

4.2 日本における地中熱利用の動向

地中熱などの自然エネルギーを利用した建物内部の環境管理の方法は、日本においても取り入れられている。環境省が2018年度に実施した調査によると、2017年度末における地中熱を利用した施設は7,748件であり、その数は年々増加している（環境省 2019）。その方式は多い順に、ヒートポンプ式（2,662件、34.4%）、空気循環式（2,060件、26.6%）、水循環式（2,024件、26.1%）、熱伝導式（830件、10.7%）、ヒートハイブ式（172件、2.2%）である。地域ごとに採用される方式には特徴があり、例えば、北海道では762件中714件がヒートポンプ式、山形県では724件中652件が水循環式、千葉県では652件中548件が熱伝導式であり、各地域の環境に合わせて選定されていることが分かる。デンマークモデルと同様の自然の熱伝導を使用する熱伝導式は、日本においては土間床などを有する住居などに多く使用されており、空調機と併用されることが多い。

近年、導入が増えている方式はヒートポンプ式であり、2016年度と2017年度の2年間で設置件数が約20%増加し、特に東日本での顕著な増加が報告されている。ヒートポンプ式の場合、夏は外気温に比べて低温になる15℃～20℃、冬は外気と比べて高温となる10℃～15℃の安定した地中熱が利用可能であり、空気を熱源とするシステムと比べて25%程度、二酸化炭素の排出量を削減できるとされる（環境省 2019）。

博物館施設では、2014年にリニューアルオープンした三重県総合博物館「MieMu」がヒートポンプ式を導入している。三重県総合博物館の建物は、地下1階、地上2階の3層構造であり、建築面積は6,889.63m²、延床面積は11,582.82m²である（図13）。断熱層は、屋根と外壁の他、半地下の1階に位置する収蔵庫の床面に敷設されている。また、屋根には太陽光発電設備が設置されている（安藤他 2015）。この建物は、実設計の段階で、博物館施設としてはじめて建築環境総合性能評価システム（Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency, CASBEE）の最高評価を受けた（一般社団法人日本サステナブル建築協会 2021）¹⁶。

三重県総合博物館では、収蔵庫および展示室での冷房と暖房の年間積算負荷が概ね同量であり、地中への再熱と放熱による年間の熱収支のバランスがとれていること、また、里山に囲まれ、比較的浅いところに地下水が流れている立地条件などを背景に、地中熱を用いる空調システムが導入されることとなった（安藤他 2015; 三重県 2014）。駐車場の下部に埋設された熱交換井（ボアホール）の中に採熱管（ダブルUチューブ：高密度ポリエチレン管）を敷設した構造であり、水蓄熱槽（300m³+200m³）と併用することで、冷房時は地中へ放熱、暖房時は地中より採熱した熱源水によりヒートポンプを介して空調をおこなうことができる。安定した地中との熱交換により年間を通じて効率よく空調を運転することが可能となり、蓄熱なしの電気・ガス併用式と比べ6割程度のコスト削減が見込まれた（三重県 2014）。

日本の気候において、デンマークモデルと同様の熱伝導式の収蔵施設が実現可能かについてはさらなる検討が必要であるが、三重県総合博物館のようにヒートポンプ式の地中熱の利用においても大きく電力消費量を削減できることが確かめられたことは、博物館における持続可能性を議論する上で意義深い。ただし、近年その導入事例が増えているヒートポンプ式については、耐用年数やメンテナンスの方法、既存の建物への導入の可否などが課題となることも想定され、今後の動向が注目される。

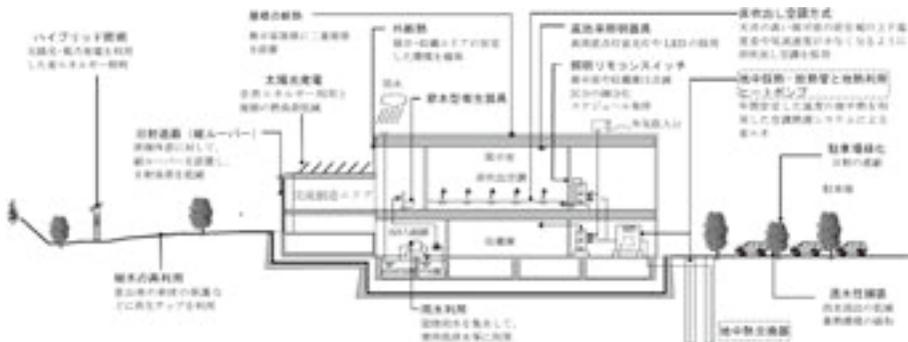


図13 三重県総合博物館の環境モデル（日本設計 2010）

5 時間加重保存指数 (TWPI) を用いた収蔵環境の評価

デンマークおよびオランダに建設された収蔵施設では、竣工後の温湿度データを記録するなど継続的な環境モニタリングがおこなわれてきた。ヴァイレ保存修復センターのKundsénは、ヴァイレの新旧収蔵施設、リーベ収蔵施設の温湿度環境を比較し、2017年におこなわれたICOM-CCコペンハーゲン大会で発表した (Knudsen and Lundbye 2017)。同発表では、3ヶ所の温湿度環境を比較する指標として、Image Permanence Institute (IPI) が開発したTWPIを用いた。本章では、TWPIの特徴をまとめた上で、デンマークに建設された3つの収蔵施設の環境評価を概観する。そして、民博の収蔵環境を例として、日本の収蔵環境におけるTWPI活用の可能性と課題を検討する。

5.1 保存指数 (PI)

IPIは、米国・ロチェスター工科大学 (Rochester Institute of Technology, RIT) の芸術デザイン学科に拠点を置く研究センターであり、図書館、アーカイブ、博物館の資料保存を支援することを目的とする。IPIは資料の劣化要因を、化学反応に伴う自然劣化、有害ガスによる劣化、光劣化、生物劣化、物理的劣化に分類し、化学反応に伴う自然劣化を評価する指標として、保存指数 (Preservation Index (PI)) を提唱した (Reilly et al. 1995)。PIは、有機材料で構成される資料 (動植物製品、プラスチック、紙、染料など) を保管する環境の「質」を示す指標であり、資料に極端な劣化が生じるまでの平均時間の目安を年単位で示している。PIは、温度・湿度の条件による化学反応速度論に基づき計算され、温湿度の変化に敏感な酸性木材パルプ紙、カラー写真、ニトロセルロースフィ

表2 温度・湿度の条件による Preservation Index (PI) の数値

保存指数 (PI) (year)	湿度 (%RH)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0	2241	1613	1170	853	624	459	339	252	188	163	
5	1066	775	569	419	310	230	172	129	97	85	
10	521	382	283	211	158	118	89	68	52	45	
15	263	193	145	109	82	62	48	36	28	25	
20	134	100	76	58	44	34	26	20	16	14	
25	70	53	40	31	24	19	14	11	9	8	
30	38	29	22	17	13	10	8	6	5	5	
35	21	16	12	10	8	6	5	4	3	3	
40	12	9	7	6	4	4	3	2	2	2	
45	7	5	4	3	3	2	2	1	1	1	
50	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	

	TWPIで「GOOD」と判定される範囲
	TWPIで「OK」と判定される範囲
	TWPIで「RISK」と判定される範囲

(eClimateNotebook[®]で算出したデータを用いて筆者作成)

ルム、アセチルセルロースフィルム、植物標本、磁気テープなどの資料を20℃・45%RHの環境に保管した際の値が50、つまり50年になるように設計されている (Nishiura 2011)。PIの値は、低温低湿環境であるほど高く、高温高湿環境であるほど低くなる (表2)。

PIがある一定の温度・湿度の条件による数値であるのに対し、TWPIは、温度・湿度の変化が加味された数値であり、ある特定の期間におけるPIの平均値を示す指標である。TWPIは、温度と湿度の推移を含めた環境をひとつの数値として評価する指標であり、資料の保管環境の質を相対的に比較することが可能となる (Reilly 2019)。IPIが提供するウェブ版の温湿度環境評価システム「eClimateNotebook[®]」では、化学反応に伴う自然劣化の評価指標としてTWPIを用いており、45以下を「RISK」、46～75を「OK」、76以上を「GOOD」と位置付けている (IPI 2021)¹⁷⁾。

5.2 デンマークの収蔵施設の環境評価

Knudsenらは、デンマークに建設された受動的環境管理を取り入れた3つの収蔵施設 (ヴァイレの新旧収蔵施設とリーベ収蔵施設) の保存環境を評価するにあたり、数値として相対的な比較が可能であるTWPIを用いた (Knudsen and Lundbye 2017)。各収蔵施設について、50%RHを設定値とする一般条件の収蔵室と40%RHを目標値とする低湿条件の収蔵室の2つの条件における温湿度の実測データを基に、TWPIを算出している (表3)。なお、ヴァイレの旧収蔵施設およびリーベの収蔵施設のデータは2007年から2011年に国立デンマーク博物館によって実施された調査で提示された数値 (Ryhl-Svendsen et al. 2012)、ヴァイレの新収蔵施設は2016年のデータに基づき算出されたものである (Knudsen and Lundbye 2017)。

3つの収蔵施設のモニタリングデータより算出されたTWPIは、一般条件および低湿条件のいずれにおいても最も高い評価基準 (76以上) を超えている。3つの収蔵施設を比較すると、ヴァイレでは新旧ともに一般条件より低湿条件の方がTWPIの数値が高い

表3 デンマークの収蔵施設における環境評価

収蔵施設	環境条件	温度 (°C)	湿度 (%RH)	TWPI (year)	電力消費量 (kWh/m ³ /year)
ヴァイレ (旧)	一般	7～17	45～55	115	1.5
	低湿	10～18	35～45	130	4.0
リーベ	一般	9～15	45～55	115	1.5
	低湿	11～22	32～38	88	?
ヴァイレ (新)	一般	9～15	48～51	116	0.4
	低湿	8～16	37～42	156	1.4

(Knudsen and Lundbye 2017)

のに対し、リーベ収蔵施設では一般条件の方が高い。これは低湿収蔵室が、一般収蔵室よりも小さいため、温度が上昇しやすい傾向にあることに起因すると考えられる。ヴァイレの新収蔵施設は、一般条件、低湿条件ともに電力消費量は3館の中で最も低く抑えられ、かつTWPIの値は最も高いことから、低エネルギーと良好な保存環境が両立できていることが確認できる。

5.3 民博の収蔵環境管理における TWPI の活用と課題

デンマークの収蔵施設の評価では、3つの収蔵施設ともにTWPIの値は76以上の最も高い評価であったが、TWPIの評価基準となる数値は温湿度の変化に敏感な資料を対象として、北米や欧米などの気候を背景に定められたものである。さまざまな素材からなる資料を収蔵する環境の評価に、この基準をそのまま当てはめることが妥当であるかについては検討を要する。そこで、民博の収蔵庫における温湿度環境より、TWPIを用いた評価をおこない、その活用の可能性と課題を考察する。

5.3.1 TWPIにみる民博映像音響資料の収蔵環境

民博では、文化人類学や民族学およびその関連分野に関する学術資料を、生業、生活、儀礼、製作技術にかかわる用具類などを含む標本資料、書籍や雑誌といった図書資料、そして、映像や音声としてメディア媒体に記録された映像音響資料の3つに分けて管理しており、それぞれで収蔵する施設や、環境管理の方針・方法が異なる。IPIが提唱するTWPIは、もともとはニトロセルロースフィルムやアセチルセルロースフィルムなど温湿度の変化に敏感な資料の保存を念頭に設計されたものである。そこで、民博でフィルム等の映像音響資料を収蔵する場所の環境について、TWPIを用いて評価を試みたい。

民博の映像音響資料は、資料の性質やメディアの種類により、フィルム収蔵庫と映像音響資料収蔵庫に分けて収蔵されている¹⁸⁾。双方とも24時間空調運転をおこなっており、目標値は、フィルム収蔵庫が $12^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $40\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$ 、映像音響資料収蔵庫が $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $45\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$ である(表4・5)。フィルム収蔵庫の目標値におけるPIの範囲は117~224であり、目標値内であれば「GOOD」の環境を保ち続けることができる。また、映像音響資料室の目標値におけるPIの範囲は48~114であり、「GOOD」と「OK」の間の評価である。両収蔵庫の目標値は、フィルム等を収蔵する環境としてIPIが提示する指標の範囲内であると言える。

他方、上記2つの収蔵庫以外に、映像音響資料を保管する部屋として映像音響資料室保管庫がある。この部屋では、劣化の進行がはじまっていると判断された資料の処理や、新たに寄贈された資料を一時的に保管しており、24時間空調にて $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $50\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$ の目標値での制御をおこなっている。映像音響資料室保管庫の目標値におけるPIの範囲は37~52であり、「OK」と「RISK」の閾値程度の評価である。映像音響資料室保

管庫は、日常的な業務でも出入りがある部屋であり、一時的な収蔵場所としては許容できる温湿度設定と判断される。

各収蔵場所に設置したデータロガーで取得した2020年の年間温湿度データを用いて、温度および湿度の実測値の範囲、TWPIを算出した(表4)。フィルム収蔵庫は11.6℃～12.7℃、38%RH～46%RHで推移し、TWPIは146であった。フィルム収蔵庫の目標値中央値(12℃、40%RH)におけるPIの161と比較するとやや低いが、それでも「GOOD」と「OK」の閾値よりは大分と高い値であり、保存環境は良好であると判断される。フィルム収蔵庫における2020年の年間平均温度は12.1℃、同湿度は43%RHであり、目標値よりもやや高温・高湿ぎみに推移したことがTWPIの値がやや低く算出された原因と考えられる。一方、映像音響資料収蔵庫は、17.6℃～18.4℃、43%RH～48%RHで推移し、TWPIは64であった。TWPIの値は、目標値中央値(12℃、45%RH)のPIと同じであり、また年間の温湿度の実測値はほぼ目標値の範囲内であることから、映像音響資料庫の環境は年間を通じて安定してしたことが確かめられる。

表4 民博の映像音響資料を収蔵する収蔵庫の環境評価(目標値および2020年実測値)

収蔵場所	条件	温度(℃)	湿度(%RH)	PI/TWPI(year)
フィルム収蔵庫	目標値	12±2	40±2	117~224
	実測値	11.6~12.7	38~46	146
映像音響資料収蔵庫	目標値	18±2	45±2	48~88
	実測値	17.6~18.4	43~48	64
映像音響資料室保管庫	目標値	20±1	50±2	37~52
	実測値	16.5~21.7	44~65	41

(筆者作成、TWPIはeClimateNotebook®を用いて算出)

表5 民博映像音響資料関連収蔵庫のPIの閾値

保存指数(PI) (year)	湿度(%RH)								
	38	40	42	43	45	47	48	50	52
10	224	211	199	193	182	172	167	158	149
12	171	161	152	148	140	132	128	121	115
14	131	124	117	114	108	102	99	94	88
16	101	96	90	88	83	79	77	72	69
18	78	74	70	68	64	61	59	56	53
19	69	65	62	60	57	54	52	50	47
20	61	58	54	53	50	48	46	44	42
21	54	51	48	47	44	42	41	39	37



(eClimateNotebook®で算出したデータを用いて筆者作成)

他方、映像音響資料室保管庫は、16.5℃～21.7℃、44%RH～65%RHで推移し、TWPIは41であった。このTWPIは「RISK」の範疇にあり、目標値中央値（20℃、50%RH）のPI値よりも若干低い値であった。映像音響資料室保管庫における年間平均温度は20℃、年間平均湿度は52%RHであり、やや高湿傾向であったことが認められる。フィルム収蔵庫や映像音響資料収蔵庫に比べ、映像音響資料室保管庫は温度および湿度ともに標準偏差が大きく、両収蔵庫が0.1℃、1%RHであるのに対し、保管庫は1.1℃、2%RHであった。この温湿度のばらつきは、映像音響資料室保管庫が日常的に人の出入りがおこなわれる場所であることに起因し、目標値よりもやや高湿に推移した要因となった可能性が考えられる。

民博の映像音響資料を収蔵する3つの場所の環境についてTWPIを用いて比較した結果、各場所の目標値から算出したTWPIは、フィルム収蔵庫は「GOOD」、映像音響資料収蔵庫は「GOOD」と「OK」、映像音響資料室保管庫は「OK」と「RISK」に該当しており、各場所の収蔵環境の特性の違いがTWPIの値および評価基準にあらわれていることが確認できた。また、異なるパラメーターである温度と湿度の推移を1つの数値として比較することができ、ある期間における温度・湿度の推移と目標値との比較をおこなうことにより、目標値との差が生じた原因の推定などをおこなう上で有効な指標であると考える。

5.3.2 民博標本資料の収蔵環境における TWPI 活用の課題

次に、TWPIを用いて、民博の標本資料の収蔵環境を検証したい。標本資料を収蔵する場所には、24時間空調をおこなっている特別収蔵庫5室（銃刀、絨毯、漆器、毛皮・皮革、衣類）と、8時間空調をおこなっている一般収蔵庫7室（第1～第7）がある¹⁹⁾。ここでは、大多数の標本資料を収蔵する一般収蔵庫の収蔵環境を取り上げる。

民博の一般収蔵庫では、資料がさまざまな材質から構成されていること、また、収蔵庫内で作業をおこなう際の作業環境などを考慮して温湿度の目標値を定めている（表6）。

表6 一般収蔵庫における温湿度設定

8時間空調		第1, 2, 3, 6, 7収蔵庫	第4, 5収蔵庫
温度 (℃)	冬期	20 ± 2	20 ± 2
	夏期	26 ± 2	26 ± 2
	中間期 (春期・秋期)	空調を停止	週ごとに0.5設定値を変更
湿度 (%RH)	冬期	52 ± 5	52 ± 5
	夏期	52 ± 5	52 ± 5
	中間期 (春期・秋期)	空調を停止	52 ± 5

(Sonoda et al, 2018)

2014年からは、第1, 2, 3, 6, 7 収蔵庫において、電力消費量の削減を目的として春と秋の中間期に空調を停止する運用をおこなっている(園田 2014; Sonoda 2016)。冬期と夏期における目標値は全一般収蔵庫で共通であり、温度は冬期が $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、夏期が $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度は年間を通じて $52\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$ である。冬期の目標値におけるTWPIの範囲は「OK」と「RISK」の範疇にある29~61であり、目標値中央値は「RISK」に該当する42である(表7)。また、夏期の目標値におけるTWPIの範囲は、14~29であり、全範囲が「RISK」に該当している。

一般収蔵庫における湿度の目標値は年間を通じて $52\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$ であるが、中央値の $52\% \text{RH}$ を維持した上で「OK」の閾値となる46以上にPIを保つには、温度を 19.4°C 以下に保つ必要がある。大阪の環境において、年間を通して 19.4°C 以下を保つには空調運転が不可欠であり、広い空間を有する一般収蔵庫においてその環境を継続するには電力消費量を大幅に増やさねばならない。特に、高温多湿の夏期においては、温度および湿度の双方を低く保つためには、膨大なエネルギーが必要になることが想定される。また、収蔵庫内と外との環境の差が大きくなり、作業への負担や、資料を収蔵庫から移動する際に資料への負荷が大きくなることも懸念される。

民博の一般収蔵庫における現行の目標値に対してTWPIの評価を適用した場合、季節によっては必然的に「RISK」となる可能性が高い。空調を運転することにより「OK」の範囲を保つことは不可能ではないが、電力消費量や作業への負担、資料移動時のリスクなどを考慮すると現実的な運用とは言えない。一般収蔵庫の収蔵環境の評価においてTWPIの指標を用いる上では、既定の評価基準で判断するのではなく、目標値や実測値を根拠とした独自の評価基準を設けるなどの工夫が必要になる。

表7 民博一般収蔵庫の温湿度目標値におけるPIの閾値

保存指数(PI) (year)	湿度(%RH)											
	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	
18	61	59	58	56	55	53	52	50	49	48	47	
19	54	52	51	50	48	47	46	45	43	42	41	
20	48	46	45	44	43	42	40	39	38	37	36	
21	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	
22	37	36	35	34	33	33	32	31	30	29	29	
23	33	32	31	30	30	29	28	27	27	26	25	
24	29	28	28	27	26	26	25	24	24	23	22	
25	26	25	25	24	23	23	22	22	21	21	20	
26	23	22	22	21	21	20	20	19	19	18	18	
27	20	20	19	19	18	18	18	17	17	16	16	
28	18	18	17	17	16	16	16	15	15	14	14	

TWPIで「OK」と判定される範囲
 一般収蔵庫 冬期における設定値範囲
 TWPIで「RISK」と判定される範囲
 一般収蔵庫 夏期における設定値範囲

(eClimateNotebook[®]で算出したデータを用いて筆者作成)

6 おわりに

本稿の前半では、デンマークとオランダに建設された地中熱を利用した受動的環境管理を運用する収蔵施設を取り上げた。気密性と断熱性を高めた建物と地中熱を利用したデンマークモデルは、受動的な環境管理を実現する低エネルギー型の収蔵施設として機能しており、持続可能な資料保存を進めていく上で大きな可能性を提示するものである。日本の環境においてデンマークモデルと同様に地中熱の熱伝導を利用した環境管理を実現できるかさらなる検証が必要であるが、三重県総合博物館のようにヒートポンプ式で地中熱を利用する方法でも大きな節電効果があることが認められており、今後新たな博物館や収蔵施設を建設する際などの重要な参考事例になるはずである。一方、地中熱を用いることが想定されていない既存の建物においては、建物の構造や特性を考慮に入れた上で空調の運用方法などを検討することが電力消費量の抑制につながる手段となる。先に少し言及したが、民博では電力消費量を抑える取り組みとして、一般収蔵庫における空調運転を春期と秋期に停止する運用をおこない、一般収蔵庫における年間の電力消費量は約30%低減した(園田 2014; Sonoda 2016)。既存の建物において資料保存の環境づくりと電力消費量の低減を両立して実現させるには、建物の状態や気候・環境の状況に応じて、継続的に対策を検討し講じていくことが求められる。

本稿の後半では、デンマークの収蔵施設の環境評価で使用されているTWPIの特徴を概観するとともに、民博の収蔵環境を例に、その活用の可能性と課題を示した。民博の映像音響資料の収蔵環境の評価において、TWPIは目標値の異なる3つの収蔵場所の特性を把握する上で有用であった。異なるパラメーターである温度と湿度がひとつの数値として比較できる点はTWPIの大きな利点であり、例えば、収蔵場所ごとの環境の比較や、期間別の環境の相対的な比較を容易におこなうことができる。また、目標値の範囲と実測値より算出したTWPIの比較により、当該期間における全体的な傾向や、誤差があった場合の原因推定などにも活用できる。他方、TWPIはもともと温湿度の変化に敏感な資料の保存を念頭に設計された指標である。TWPIをさまざまな材質の資料を収蔵する民博の一般収蔵庫の収蔵環境などに適応する場合には、現状よりも低温とする目標設定が求められることとなり、特に高温傾向にある夏期などには、恒常的な空調運転が求められることになる。空調の過度の運用は、持続可能性を担保するための電力消費量の削減とは逆行する対策であり、TWPIの評価基準のみで、収蔵環境を評価することは必ずしも現実的とは言えない。収蔵する建物の構造や資料の特性、当該地の気候や周辺の環境など、さまざまな条件を鑑みて、それぞれに適した収蔵環境を模索していく必要がある。

最後に、デンマークとオランダの博物館収蔵施設について、もう1つの特徴に言及しておきたい。デンマークとオランダの収蔵施設建設にみられた共通する特徴として、収

蔵施設の課題を明らかにする事前調査がおこなわれその結果が公表されたこと、単位面積あたりにかかる建設費用などのコストを明確に提示されたことが挙げられる。これらは、公共の機関である博物館が、市民らからの理解を得るための取り組みであり、予算化に繋がる対策でもある。博物館の資料保存において持続可能性を実現するには、建物などのハード面における持続可能性とともに、博物館に携わるスタッフの教育や来館者からの理解、一般社会への発信などソフト面の施策が重要となる。博物館において継続的に持続可能性を担保していく上では、施設における電力消費量の削減などの具体的な対策の他に、社会からの理解を得ることも不可欠となる。デンマークモデルの方法論や考え方を参考にしつつ、日本の気候に適した地中熱を利用方法や、既存の施設にも適応することのできる方法について議論を深めていくとともに、継続的に持続可能性を担保できる仕組みを関係者と協力して模索していきたい。

謝辞

本稿の記載内容のもととなる現地調査や情報収集においては、オランダ文化遺産局 (Cultural Heritage Agency of the Netherlands) の Bart Ankersmit 氏、オランダ世界文化博物館 (National Museum of World Cultures) の Cindy Zalm 氏、ヴァイレ保存修復センター (Conservation Centre Vejle) の Lise Ræder Knudsen 氏、国立文化財機構・文化財活用センターの間瀬創氏、三重県総合博物館の甲斐由香里氏をはじめ、多くの方にご協力を賜りました。また、写真および図の掲載について、出典元の機関や執筆者に許諾を賜りました。ここに記して感謝を申し上げます。

注

- 1) 文化財保存修復学会第41回大会 (帝京大学・八王子キャンパス (東京), 2019年6月22日~23日) において、「オランダにおける資料管理・収蔵施設の動向—持続可能な共有型収蔵施設の建設」(末森薫・園田直子・日高真吾『文化財保存修復学会第41回大会 研究発表要旨集』pp. 272-273) の発表をおこなった。
- 2) 16の機関には、7つの歴史博物館、3つの美術館、そして地域のアーカイブズが含まれる (Rasmussen 2007)。ヴァイレ保存修復センターのウェブサイト (デンマーク語) では、主なユーザーとして下記を挙げている (Conservation Centre Vejle 2021)。

デンマーク看護史博物館 (Danish Museum of Nursing History, Dansk Sygeplejehistorisk Museum)、ギヴ・エグネンス博物館 (Give-Egnens Museum)、グルッド博物館 (Glud Museum)、ホーセンス美術館 (Horsens Art Museum, Horsens Kunstmuseum)、ホーセンス博物館 (Museum Horsens, Horsens Museum og Horsens Byarkiv)、デンマーク産業博物館 (Denmark's Industrial Museum, Danmarks Industrimuseum)、コリング市アーカイブ (Kolding City Archives, Kolding Stadsarkiv)、ミゼルフアート博物館 (Middelfart Museum)、フレデリシア博物館 (Fredericia Museum, Museerne i Fredericia)、西フネン博物館 (Museum of West Funen, Museerne på Vestfyn)、コリング博物館 (Museum of Koldinghus, Museet på Koldinghus)、現代美術館

(Trapholt Museum), ヴァイレ地域文化遺産アーカイブ (The Vejle Local Heritage Archive, Vejle Stadsarkiv), ヴァイレ博物館 (Vejle Museums, VejleMuseerne)

また、これら以外にも、博物館、美術館、アーカイブズ、教会、企業、個人の資料を収蔵する。なお、日本語名称は筆者訳であり、必ずしも公式の名称ではない。

- 3) 床面積の大きさは文献により、違いがある。本稿では、床面の大きさを記載した最新の文献 Christensen *et al.* 2016の数値を記載する。
- 4) デンマークやオランダにおいて建設費用が細かく提示されている背景には、公共の機関である博物館に対する市民らからの理解を得ること、予算化に繋げることなどが想定されている。なお、2003年の対ユーロの平均取引価格は約131円であり、780€≒10万2,180円、593€≒7万7,683円である (三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2021)。
- 5) 温湿度の設定値は文献により若干の違いがある。本稿では、設定値が記載された最新の文献 Christensen *et al.* 2016の数値を記載する。
- 6) ユトランド南西博物館は、デンマーク西海岸のエスビャウ市にある、国が認証する文化史博物館である。同博物館は、エスビャウ博物館 (Esbjerg Museum)、エスビャウ給水塔 (Esbjerg Water Tower)、リーベヴァイキング博物館 (Ribe Viking Museum)、リーベ大聖堂博物館 (Ribe Cathedral Museum)、ブラミング地域博物館 (Bramming Regional Museum) を傘下に置く (Museum of Southwest Jutland 2021)。なお、日本語名称は筆者訳であり、必ずしも公式の名称ではない。
- 7) moler clay はデンマーク西部で採石される粘土成分に富む珪藻土である (Padfield and Jensen 2011)。
- 8) 2005年の対ユーロの平均取引価格は約137円であり、1550€≒21万2,350円である (三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2021)。
- 9) Knudsenらの論文が出された2017年時点では20と記載されているが、現在はさらに増えている。注2) 参照。
- 10) 2013年の対ユーロの平均取引価格は約130円であり、406€≒5万2,780円である (三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2021)。
- 11) 5つの博物館は、フリースランド博物館 (Friesland Museum)、フリースランド歴史・文学センター (Friesian History and Literature Centre)、フリースランド自然史博物館 (Friesland Museum of Natural History)、フリースランド海洋博物館 (Friesian Maritime Museum)、フリースランド農業博物館 (Friesland Agricultural Museum) である。なお、日本語は筆者訳であり、必ずしも公式の名称ではない。
- 12) 本価格は共有部等を含むグロス面積のものである。主要スペースのみのネット面積では、1,420 €/m²である (Ankersmit *et al.* 2021)。なお、2016年の対ユーロの平均取引価格は約120円であり、1,310 €≒15万7,200円、1,420 €≒17万400円である (三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2021)。
- 13) Rijksmuseumのウェブサイトでは、収蔵品数は5万点、収蔵エリアの面積は3万 m²とされる (Rijksmuseum 2021)。
- 14) 本価格は共有部等を含むグロス面積のものである。主要スペースのみのネット面積では、1,506€/m²である (Ankersmit *et al.* 2021)。なお、2020年の対ユーロの平均取引価格は約121円であり、1,320€≒15万9,720円、1,506€≒18万2,226円である (三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2021)。
- 15) 日本では国土交通省住宅局の支援のもと、産官学共同プロジェクトにより2002年に開発された建築環境総合性能評価システム (Comprehensive Assessment System for Built Environment

- Efficiency, CASBEE) などの評価手法が用いられている (一般社団法人日本サステナブル建築協会 2021)
- 16) 注15) を参照。
- 17) eClimateNotebook[®]では自然劣化の評価指標である時間加重保存指数 (TWPI) の他, 最低平衡含水率 (Minimum% Equilibrium Moisture Content, % EMC Min), 最高平衡含水率 (Maximum% Equilibrium Moisture Content, % EMC Max) および寸法変化率 (%Dimensional Change, %DC) より計算される物理劣化の指標, カビの発生リスクを数値化した生物劣化の指標 (Mold Risk Factor), そして, 最高平衡含水率により評価される金属サビの発生リスクの指標を提供している (IPI 2021)。
- 18) 映像音響資料の分類や保管状況などの詳細については, 本書に掲載されている「A-D Strips を用いた映像フィルム調査—国立民族学博物館の事例からの考察」(園田直子) を参照。
- 19) その他, 大型の船などを収蔵する多機能資料保管庫, レプリカなどを収蔵する仮設テントがある。

参考文献

〈日本語〉

安藤亨・神宮司高久・今井正次

2015 「三重県総合博物館の建設における建築設計に関する研究—博物館整備に関する研究 (2)」『日本建築学会東海支部研究報告集』53: 425-428。

一般社団法人日本サステナブル建築協会

2021 「CASBEE の概要」https://jsbc.or.jp/research-study/casbee/about_cas.html (2021年9月30日閲覧)

環境省

2019 地中熱利用システム パンフレット。

木川りか・三浦定俊・山野勝次

2000 「文化財の生物被害対策の現状—臭化メチル燻蒸の代替対応策について」『文化財保存修復学会誌 (古文化財之科学)』44: 52-69。

栗原祐司

2020 「ICOM 京都大会と今後の我が国の博物館」『博物館研究』55(別冊): 18-21。

佐久間大輔

2020 「博物館は持続可能性を社会にもたらすか?」『博物館研究』55(別冊): 27-30。

未森薫

2020 「オランダにおける資料管理等に関する研究動向調査報告」『民博通信 Online』1: 36-37。

園田直子

2014 「持続的な資料管理に向けた収蔵庫『再』編成」園田直子・小長谷有紀・I. Lkhagvasuren 編『アジアにおける博物館・博物館学の「いま」—モンゴル, ミュージアム・クリルタイ』, pp. 19-27, ウランバートル: モンゴル国立文化遺産センター。

日本設計

2010 「新県立博物館 (仮称) 詳細設計 [建築] 最終報告」
<https://www.bunka.pref.mie.lg.jp/common/content/000113592.pdf> (2021年11月29日閲覧)

三重県

2014 「三重県総合博物館」『蓄熱情報誌 Cool & Hot』47: 60。

三菱UFJリサーチ&コンサルティング

2021 「外国為替相場情報」<http://www.murc-kawasesouba.jp/fx/index.php> (2021年12月7日閲覧)

〈外国語〉

Ankersmit, B., M. Loddo, M. Stappers, and C. Zalm

2021 Museum Storage Facilities in the Netherlands: The Good, the Best and the Beautiful. *Museum International* 73(1-2): 132-143.

Bickersteth, J.

2016 IIC and ICOM-CC 2014 Declaration on Environmental Guidelines. *Studies in Conservation* 61(1): 12-17.

Byuynzeel Storage System

2021a Inspiration for a New Type of Museum Store. <https://bruynzeel-storage.com/inspiration-for-a-new-type-of-museum-store/> (2021年10月30日閲覧)

2021b Friesland Collection Center, The Netherlands. <https://bruynzeel-storage.com/project/friesland-collections-centre-the-netherlands/> (2021年10月30日閲覧)

Christoffersen, L. D.

1996 *Zephyr: Passive Climate Controlled Repositories: Storage Facilities for Museum, Archive and Library Purposes*. Byggnadsfysik LTH: Lunds Tekniska Högskola.

Christensen J. E. and C. G. Kollias

2015 Hygrothermal Evaluation of a Museum Storage Building Based on Actual Measurements and Simulations. *Energy Procedia* 78: 651-656.

Christensen J. E., L. R. Knudsen, and C. G. Kollias

2016 New Concept for Museum Storage Buildings: Evaluation of Building Performance Model for Simulation of Storage. *Proceedings of 2016 International Conference on Architecture and Civil Engineering*. Dordrecht: Atlantis Press.

Christensen J. E. and H. Janssen

2011 Passive Hygrothermal Control of a Museum Storage Building. *Building Simulation 2011: Sydney, Australia. November 14-16. Proceedings of the 12th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 1848-1854. Melbourne: IBPSA Australasia and AIRAH.

Christensen J. E., H. Janssen, and B. Tognolo

2010 Hygrothermal Performance Optimization of a Museum Storage Building. *Hygrothermal Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI Conference Proceedings*, pp. 1-10. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Conservation Centre Vejle

2021 Referencer. <http://www.konsv.dk/referencer/> (2021年12月17日閲覧)

Image Permanence Institute (IPI)

2021 eClimateNotebook[®]. <https://www.eclimatenotebook.com/fundamentals.php> (2021年9月30日閲覧)

- Kirby Talley, Jr., M.
1999 The Delta Plan: A Nationwide Rescue Operation. *Museum International* 51(1): 11-15.
- Klenz L. P. and M. Ryhl-Svendsen
2019 Low-Energy Museum Storage. *The Mechanics of Art Materials and Its Future in Heritage Science*, pp. 57-64. Washington DC: Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Knudsen, L. R. and S. R. Lundbye
2017 Performance of Danish Low-Energy Museum Storage Buildings. *ICOM-CC 18th Triennial Conference, Copenhagen, Denmark, 4-8 September, 2017 Preprints* (1515_200_KNUDSEN_ICOM-CC_2017.pdf).
- Knudsen, L. R. and M. H. Rasmussen
2005 Building a New Shared Storage Facility for 16 Museums and Archives. *ICOM-CC 14th Triennial Conference, The Hague, Netherlands, 12-16 September, 2005 Preprints*, pp. 648-654. London: James and James/Earthscan.
- LEVS Architecten 2021
2021 Collection Centre Friesland // LEVS Architecten. <https://architizer.com/blog/inspiration/industry/collection-centre-friesland/> (2021年10月29日閲覧)
- Museum of Southwest Jutland
2021 Our Museums. <https://www.sydvestjyskemuseer.dk/en/> (2021年12月20日閲覧)
- Nishimura, W. D.
2011 *Understanding Preservation Metrics*. Rochester: Image Permanence Institute, Rochester Institute of Technology.
- Padfield, T. and L. A. Jensen
2011 Humidity Buffering of Building Interiors by Absorbent Materials. *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*, vol. 1, pp. 475-482. Tampere: Tampere University of Technology.
- Rasmussen, M. H.
2007 Evaluation of the Climate in a New Shared Storage Facility Using Passive Climate Control. In T. Padfield and K. Borchersen (eds.) *Museum Microclimate*, pp. 207-212. Copenhagen: National Museum of Denmark.
- Reilly, J. M.
2019 Theory and Practice of Sustainable Preservation. *Conservation of Cultural Heritage in a Changing World* (Senri Ethnological Studies 102), pp. 11-24. Osaka: National Museum of Ethnology.
- Reilly, J. M., D. Nishimura, and E. Zinn
1995 *New Tools for Preservation: Assessing Long-term Environmental Effects on Library and Archives Collections*. Washington DC: Commission on Preservation and Access.
- Rijksmuseum
2021 Collectiecentrum Nederland: The Physical Memory of the Netherlands. <https://www.rijksmuseum.nl/en/about-us/what-we-do/ccnl> (2021年9月30日閲覧)
- Ryhl-Svendsen, M., L. A. Jensen, B. Bøhm, and L. P. Klenz
2012 Low-Energy Museum Storage Buildings: Climate, Energy Consumption and Air Quality. *UTMS Research Project 2007-2011: Final Data Report: Project no. 10821521*. Copenhagen:

Nationalmuseet, Bevaringsafdelingen.

Ryhl-Svendsen, M., L. A. Jensen, P. K. Larsen, B. Böhm, and T. Padfield

2011 Ultra Low Energy Museum Storage. *ICOM-CC 16th Triennial Conference, Lisbon, Portugal, 19–23 September, 2011 Preprints*. Almada: Critério.

Sonoda, N.

2016 Managing and Analyzing Museum Environmental Data. *New Horizons for Asian Museums and Museology*, pp. 97–109. Singapore: Springer Open.

Sonoda, N., S. Hidaka, and K. Suemori

2018 Continuous Efforts over 10 Years for Storage Re-organization at the National Museum of Ethnology, Japan, Preventive Conservation. *The State of the Art, IIC 2018 Turin Congress Preprints (Studies in Conservation 63(1): S234–S241)*. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1471886>

The Getty Conservation Institute

2007 Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies. https://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/climate_experts_roundtable.html (2021年9月30日閲覧)

World Weather & Climate Information

2021 Worldwide Weather Forecasts and Climate Information. <https://weather-and-climate.com/> (2021年10月29日閲覧)