# 土木分野における木材活用に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 27～令 1
担当チーム：地域景観チーム
研究担当者：笠間聡、葛西聡、松田泰明、
小栗ひとみ、吉田智、榎本碧

【要旨】
土木分野における木材利用の普及拡大にあたっては、木材利用工作物の特性や腐朽劣化の発生に関する知見や技術支援の不足が課題となっている。
本研究では、ピロディン計測器を用いて、北海道内の既存の木製工作物の腐朽劣化状況に関する広範な計測調査を実施し、結果の分析から、部材単位の「経年にともなう腐朽劣化の発生率」の予測式を得た。この予測式を用いることで、経年に伴う部材交換の発生頻度について算定でき、またライフサイクルコスト等の試算も可能となる。これをもとに、維持管理上有利となる木材利用工作物の構造についてケーススタディを行うとともに、これら成果を技術資料に取りまとめ、木材利用の適否や採用の検討の一助となるよう提案を行った。
キーワード： 木材利用、木製、工作物、耐久性、腐朽劣化、ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

木材の利用に関しては、環境負荷の低減や地場木材の利用による地域活性化への貢献のほか、国内林業の再生とそれによる人工林の適切な管理、国土の保全などの観点から、土木分野でも木材利用の促進が求められている [1)2)] 。

しかしながら、木材は強度や品質にばらつきがあるほか、腐朽による耐久性の懸念もあり、公共インフラにおける維持管理費用と手間の縮減という課題もある中、土木分野での普及は期待されるようには進んでいない。他方、木材には景観面での効果も認められ、適切な利用が進めば、環境・林業・観光・地域活性化など幅広い効果が期待されるところでもある(**写真-1**)。

**写真-1 北海道内の木製の防雪柵(上)と鋼製の防雪柵(下)**

そこで本研究では、土木分野における木材利用工作物について、木材が持つ価値や木材利用がもたらす効果、屋外利用における耐久性能、それにより必要となる維持管理などについて明らかにし、木材の適用性の高い土木工作物やその範囲、判断基準を発注者向けに示すことを目的とする。これらにより、木材利用工作物の普及拡大と、土木分野における適切な木材活用の促進を図り、地球環境保全のほか、地域経済、魅力ある公共空間や観光地の形成に貢献することを目指している。

### 1.2 研究内容

前節に述べた目的のため、本研究では、①木材利用による価値や効果の体系化と算定及び定量化、②事例分析に基づく木材利用工作物の耐久性能の評価、③現場条件に合わせた木材利用工作物の適用性評価と提案、④木材を利用した工作物に関する技術資料の取りまとめ、の 4 つの達成目標を設け、研究に取り組んできた。

以下に、本研究で実施した調査研究とその成果につ

いて、上記の 4 つの達成目標ごとに詳述する。

## 2. 木材利用による価値や効果の体系化と算定及び定量化

### 2. 1 木材利用による価値や効果の体系化

既存の資料等から、木材が持つ価値や木材利用による効果に関する記述を広く抽出し、それらをカテゴリ分類することで、木材利用等による価値や効果の項目の体系化を行った。

この抽出にあたり、対象とした資料等の一覧を**表-1** に、抽出された木材利用等による価値や効果の項目を体系化整理したものを**図-1**、**表-2** に示す。文献等から抽出された木材利用等による価値や効果については、**図-1** に示すとおり、「森林等で発現する効果」と「木材の使用場所で発現する効果」の 2 つに大別できる。このうち前者の効果群には、「地球温暖化防止機能」か

表-1 木材利用等の価値や効果に関する記述の抽出元一覧

| No. | 分類 | 編/著 | 資料名 | 発行元 | 発行年月 | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 木材利用 | 林野庁 | **「木づかいパンフレット」デジタルブック** | **www.kidukai.com**/learn/digital_book.php | 不明 | |
| 2 | 森林 | 林野庁 | **森林の有する多面的機能について** | **www.rinya.maff.go.jp**/j/keikaku/tamenteki/index.html | 不明 | |
| 3 | 森林 | 林野庁 | **林野公共事業における事業評価の手法について** | **www.rinya.maff.go.jp**/j/sekou/hyouka/manual.html | 2015.5.29 | 調査時点（最新版は2020.5.9） |
| 4 | 間伐材利用 | 政府広報 | **木材を使用して、元気な森林を取り戻そう！** | **www.gov-online.go.jp**/useful/article/201310/3.html | 2018.3.26 | |
| 5 | 森林・生態系 | TEEB Initiative | **The Economics of Ecosystem and Biodiversity - An Interim Report** | **www.teebweb.org**/our-publications/all-publications/ | 2008.5 | |

※ TEEB：The Economics of Ecosystem and Biodiversity (生態系と生物多様性の経済学) 研究委員会

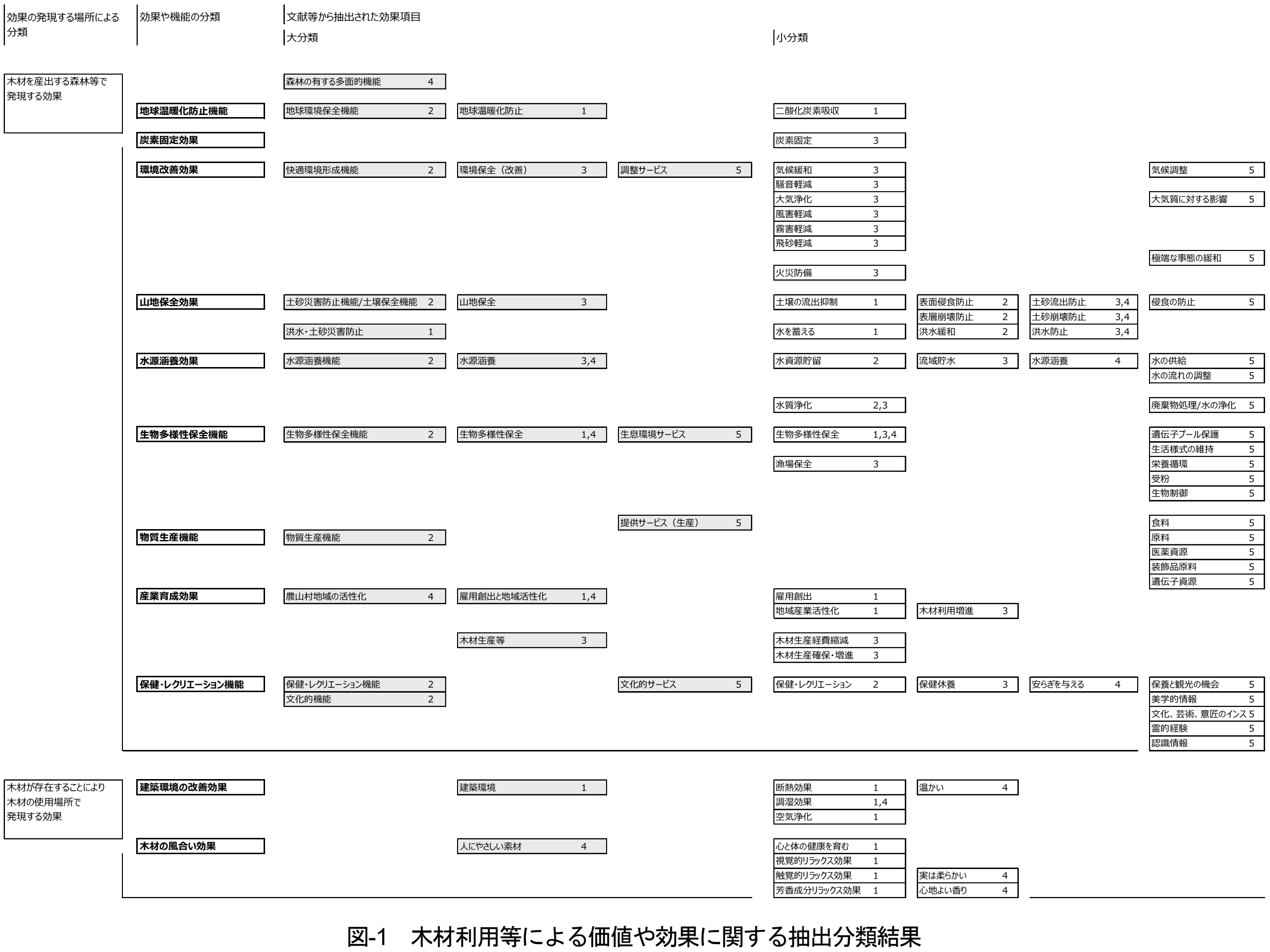


図-1 木材利用等による価値や効果に関する抽出分類結果

表-2　木材利用による価値や効果に関する項目の体系的整理結果

| 効果項目一覧 | | | 機能・効果分類 | | | 効果の定量化 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 大分類 | 小分類 | 細分類・備考 | 森林 | 木材利用 | 間伐材利用 | 試算*1 | 便益算定*2 |
| 森林が持つ多面的機能の保持 | 地球環境保全機能 | 炭素(CO2)固定 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 環境改善機能 | 気候、騒音、大気質 | ○ | | | | ○ |
| | 山地保全機能 | 土砂災害防止 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | 洪水防止 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 水源涵養機能 | 水資源貯留 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | 水質浄化 | ○ | | | ○ | ○ |
| | 生物多様性保全機能 | 森林、河川、海洋 | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| | 物質生産機能 | 木材、きのこ | ○ | | | | |
| | 保健・レクリエーション機能 | | ○ | | | ○ | ○ |
| 農山村地域の活性化 | 地域産業活性化 | | △ | ○ | ○ | | |
| | 雇用創出 | | △ | ○ | ○ | | |
| 人にやさしい素材 | 視覚的快適性 | やすらぎ、景観 | | ○ | ○ | | |
| | 触覚的快適性 | 手触り、ぬくもり | | ○ | ○ | | |

*1　林野庁「森林の有する機能の定量的評価」
*2　林野庁「林野公共事業における事業評価の手法について（事業評価マニュアル）」

ら「保健・レクリエーション機能」までの 9 項目と、後者の効果群には「建築環境の改善効果」と「木材の風合い効果」が確認できた。一方で、これらの効果項目には、抽出元とした資料の関係から、木材利用とは関係なく純粋に森林そのものがもつ効果として整理されたものも含まれる。また、「建築環境の改善効果」に代表されるように木材の建築利用を想定して記述されているものもある。

そこで**図-1** の整理を踏まえ、木材の土木利用に伴う効果としてこれらを置き換えたり、例えば**図-1** の「環境改善効果」のように項目自体を削除したりして整除して取りまとめたのが**表-2** である。なおこの際、**表-1** の資料 4 において、「木材を使うメリット」として、「森林の多面的機能を保持」「人にやさしい素材」「農山村地域の活性化に貢献」の 3 点に整理していたのを踏襲し、**表-2** の整理においてもこれら 3 項目を最も上位の分類として整理した。

## 2. 2　木材利用による価値や効果の算定及び定量化

**表-2** にて整理された項目のうち、同表中の「効果の定量化」欄に○を付したものについては、林野庁の資料等により、その効果の経済的効果の試算結果や便益の算定手法が示されている [3) 4)] 。しかし、これらの算定手法は精緻ではあるものの、価値や効果の比較検証を行うには、項目数の多さや複雑さが課題となる。

そこで本研究では、林野庁の「木材利用に係る環境貢献度の定量的評価手法について（中間とりまとめ）」[5)] に従い、「炭素貯蔵効果」「省エネ資材への代替に伴う $CO_2$ 排出量削減効果」「間伐材利用に伴う間伐貢献度」の 3 点について算定することとした。またこれらに加え、**表-2** に示す「地域産業活性化」効果と、「視覚的快適性」すなわち景観面の効果について算定することとした。

これらをいくつかのケースについて試算した結果とそれに基づく考察を以下に示す。試算は**図-2** に示す「立入防止柵」「防雪柵」「木製シール」の 3 種類について、それぞれ標準工法と木材利用工法の 2 タイプについて試算を行い、双方の比較を行った。各工作物において使用する木材は地場産（北海道産）間伐材を想定した。

### 2. 2. 1　環境面の効果

木材利用による環境面の効果については、前述のとおり、「炭素貯蔵効果」「省エネ資材への代替に伴う $CO_2$ 排出量削減効果」「間伐材利用に伴う間伐貢献度」の 3 点について算定を行った。算定にあたっては、**図-2** の構造図から木材、鋼材、コンクリートなどの材料別の使用数量を算出し（**表-3**）、この使用数量をもとに上記資料 [5)] に示された算定式等を用いて算定した。

**表-4** は、「炭素貯蔵効果」「省エネ資材への代替に伴う $CO_2$ 排出量削減効果」について算定した結果を示したものである。「炭素貯蔵効果」の算定にあたっては、**表-3** の木材使用数量にカラマツの気乾比重 0.58 を乗じた上で、前述算定式 [5)] に従い、木質部重量×0.5×(44/12)にて $CO_2$ 吸収量（t-$CO_2$）として算定した。また、「省エネ資材への代替に伴う $CO_2$ 排出量削減効果」については、**表-3** の材料使用数量に、同表に示した $CO_2$ 排出量原単位を乗じることで $CO_2$ 排出量（t-$CO_2$）とし

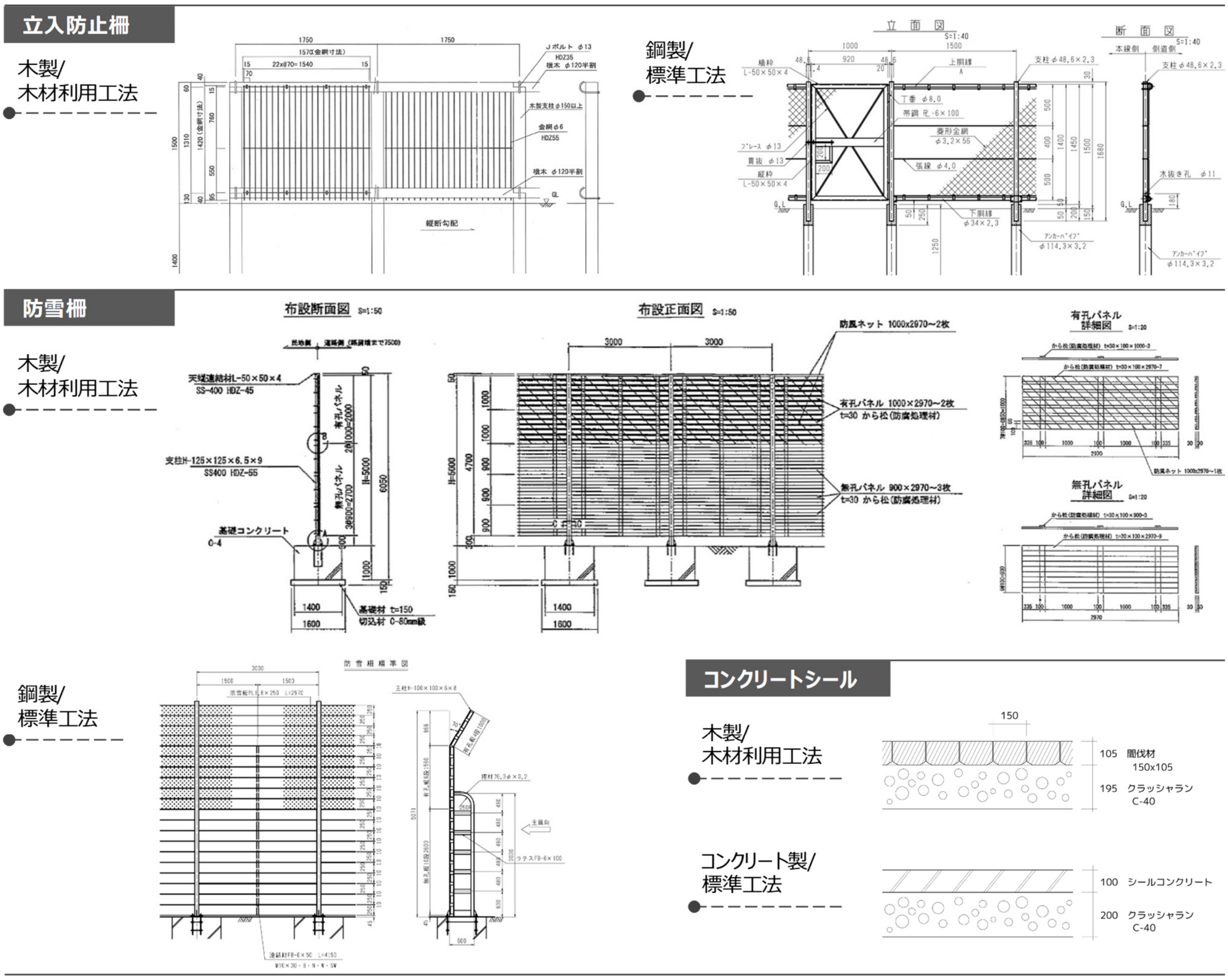


図-2　木材利用にかかる効果の算定に用いた構造物の概略図

て算定し、標準工法と比較することで削減効果を算定した。なお、$CO_2$排出量原単位の引用元は同表下部に示したとおりである。

結果からは、「省エネ資材への代替に伴う $CO_2$ 排出量削減効果」（**表-4** 左半）のみを考慮すると、立入防止柵の場合には約 50%の $CO_2$ 排出量削減効果が見込まれる一方、防雪柵の場合は約 15%の削減効果にとどまっている（**表-4** A 列）。これには、試算に用いた木製防雪柵では体積の大きなコンクリート基礎が $CO_2$ 排出量の多くを占めていることや、支柱には鋼材を用いるままであることなどが一因と考えられる。また、木製シールについては、試算に採用した「木材/合板」の単位体積あたりの $CO_2$ 排出量[5] が、コンクリートよりも大きな値となっていることもあり、$CO_2$ 排出量が逆に増加するという結果となった。

他方、算定をおこなった環境面の効果のうちの「炭素貯蔵効果」も考慮すると（**表-4** 右半）、こんどは木

表-3　算定に用いた材料使用数量および $CO_2$ 排出量原単位

| | | 使用数量 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 木材<br>$m^3$ | 鋼材<br>$m^3$ | コンクリート<br>$m^3$ | クラッシャラン<br>$m^3$ |
| **立入防止柵**<br>L=100mあたり | 標準工法 | 0.0 | 0.4 | 0.3 | 0.0 |
| | **木材利用** | 5.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| | Δ | 5.2 | -0.4 | -0.3 | 0.0 |
| **防雪柵**<br>L=100mあたり | 標準工法 | 0.0 | 1.3 | 65.3 | 0.0 |
| | **木材利用** | 5.4 | 0.7 | 65.3 | 0.0 |
| | Δ | 5.4 | -0.6 | 0.0 | 0.0 |
| **コンクリートシール**<br>A=100$m^2$あたり | 標準工法 | 0.0 | 0.0 | 10.0 | 20.0 |
| | **木材利用** | 10.5 | 0.0 | 0.0 | 19.5 |
| | Δ | 10.5 | 0.0 | -10.0 | -0.5 |

表中 Δ は木材利用工法採用に伴う増減で、
[ 木材利用工法ケース - 標準工法利用ケース ]により算定。
端数処理のため、上表中の数値同士の加減算は一致しないことがある。

| | | 木材 | 鋼材 | コンクリート | クラッシャラン |
|---|---|---|---|---|---|
| **$CO_2$排出量原単位** | kg-$CO_2$/$m^2$ | 579 | 19,507 | 440 | 12 |
| | | *1 *2 | *1 | *1 | *3 |

*1 木材利用に係る環境貢献度の定量的評価手法について（中間取りまとめ）
*2 区分「合板」。区分「人工乾燥資材」の場合は、367kg-$CO_2$/$m^3$だが、防腐処理に際して、合板同等の$CO_2$排出があるとみなして適用した。
*3 カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム 基本データベース ver.1.01

表-4　環境面の効果の試算結果（その 1）: $CO_2$ 排出量抑制・吸収効果

| | | $CO_2$ 排出量 | | | | $CO_2$ 排出量 | | 炭素貯蔵量 | $CO_2$ 排出量-炭素貯蔵量 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 木材<br>t-$CO_2$ | 鋼材<br>t-$CO_2$ | コンクリート<br>t-$CO_2$ | クラッシャラン<br>t-$CO_2$ | 合計<br>t-$CO_2$ | 増減比 | *1<br>t-$CO_2$ | 合計<br>t-$CO_2$ | 増減比 |
| **立入防止柵**<br>L=100mあたり | 標準工法 | 0.0 | 8.6 | 0.1 | 0.0 | 8.7 | | | 8.7 | |
| | **木材利用** | 3.0 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 4.1 | | 5.5 | -1.4 | |
| | Δ | 3.0 | -7.5 | -0.1 | 0.0 | -4.6 | -52.7% | | -10.1 | -116.2% |
| **防雪柵**<br>L=100mあたり | 標準工法 | 0.0 | 25.1 | 28.7 | 0.0 | 53.8 | | | 53.8 | |
| | **木材利用** | 3.1 | 13.7 | 28.7 | 0.0 | 45.5 | | 5.7 | 39.8 | |
| | Δ | 3.1 | -11.4 | 0.0 | 0.0 | -8.3 | -15.5% | | -14.0 | -26.1% |
| **コンクリートシール**<br>A=100$m^2$あたり | 標準工法 | 0.0 | 0.0 | 4.4 | 0.2 | 4.6 | | | 4.6 | |
| | **木材利用** | 6.1 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 6.3 | | 11.2 | -4.9 | |
| | Δ | 6.1 | 0.0 | -4.4 | 0.0 | 1.7 | 36.1% | | -9.5 | -204.6% |
| | | | | | | ↑ **A** | | | ↑ **B** | |

表中 Δ は木材利用工法採用に伴う増減で、
[ 木材利用工法ケース - 標準工法利用ケース ]により算定。
端数処理のため、上表中の数値同士の加減算は一致しないことがある。

***1** 木材使用量(㎥) x カラマツ比重0.58 x **0.5** x 44/12

材の使用数量の多い「木製シール」などにおいて、環境面の効果が大きいという算定結果となった（同表 B 列）。

表-5 は、「間伐材利用に伴う間伐貢献度」について試算した結果である。前掲表-3 の木材使用数量をもとに、前述の算定式 [5] を用いて間伐貢献面積（ha）として算定を行った。結果からは、同様に木材の使用数量の多い木製シールにおいて、間伐貢献度が特に大きいという結果となった。

なお、表-5 には、北海道の計画 [6] における年間の間伐等計画面積および実施面積を参考として示した。これによると、例えば立入防止柵 1km の設置に伴う間伐貢献面積 4.0ha は、年間間伐等未達面積（H17～20 の 3 カ年平均）の 0.16%にあたる量となる。

### 2. 2. 2　地域経済への還元効果

木材は、日本の多くの地域で生産、製造が可能な材料であり、原材料の多くを輸入に頼る鋼製品や生産拠点の限られるセメント材などと比較すると、地元からの調達割合が高い材料と考えられる。このことから木材利用構造物の採用は、地域経済への還元効果が期待できる。

これらの効果の試算は産業連関表を用いて行うことができる。モデル構造物ごとに、その設置にかかる材やサービスの購入額を、見積や積算資料をもとに材種（産業部門）ごとに算定し、「北海道産業連関表（平成 23 年表）」[7)8)] および北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場（以下、「林産試験場」）の提供する道産木材利用による「経済波及効果試算ツール」[9)] に入力して経済波及効果の算定を行った。なお、本分析においては、使用する木材材料はすべて地場産（北海道産）の間伐材を利用する想定としており、域内自給

表-5　環境面の効果の試算結果（その 2）: 間伐貢献度

| | 間伐貢献面積 *1<br>ha |
|---|---|
| **立入防止柵**<br>L=100mあたり | 0.40 |
| **防雪柵**<br>L=100mあたり | 0.42 |
| **コンクリートシール**<br>A=100$m^2$あたり | 0.82 |

参考）
北海道の計画における *2
**間伐等計画面積** ①
42,000 ha/年
**間伐等実施面積** ②
34,400 ha/年
**間伐等未達面積** ①-②
2,533 ha/年

***1** 木材使用量(㎥) / 利用率 0.38 / haあたり存在資源量 199(㎥/ha) / 材積間伐率 0.17
***2** 「北海道間伐等推進計画」(H25.3) におけるH17～19計画および実績の3カ年平均

率を 100%として試算している。

結果を表-6 に示す。結果からは、木材利用工法は総じて比較対象とした標準工法よりも調達額が割高な傾向にあるが（表-6 中の A 列）、調達額の差額以上に域内に生産誘発をもたらす（同、B 列）と見込めることが示された。

### 2. 2. 3　景観面の効果

良好な景観が地域にもたらす効果は広範にわたり、いくつかの調査研究結果 [10) 11) 12)] などはあるものの、その総体を定量的に評価する方法は確立されていない。

したがって、被験者に効果の総体を定性的に説明した上で、当該効果にどの程度の価値を認めるかを、比較可能な形で尋ねる手法がとられる [13)]。この際一般的には、貨幣価値と比較するため「支払意思額」を尋ねる方法が多く採用されるが、本研究においては他の手法の適用が困難であったため、このうちの「仮想的市場評価法（CVM）」[14)] を採用して、試算を行った。

試算については、ウェブアンケートの形式にて、3 カ年のうちの 3 回に渡り、方法等を改善しながら実施したが、算定される便益額が設問の設定次第で大きく異

表-6　地域経済への還元効果の試算結果

| | | 調達額 | | | | 調達額 計 | | 域内生産誘発額 | | | | 域内生産誘発額 計 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 木材 | 鋼材 | セメント系 | 工事費 | 合計 | 増減比 | 木材 | 鋼材 | セメント系 | 工事費 | 合計 | 増減比 | 差額 | 比率 |
| | | 千円 | 千円 | 千円 | 千円 | 千円 | | 千円 | 千円 | 千円 | 千円 | 千円 | | 千円 | |
| **立入防止柵** | 標準工法 | 0 | 1,100 | 0 | 798 | 1,898 | | 0 | 1,356 | 0 | 1,515 | 2,872 | | 974 | 1.513 |
| L=100mあたり | **木材利用** | 745 | 1,020 | 0 | 815 | 2,580 | | 1,414 | 1,258 | 0 | 1,549 | 4,220 | | 1,641 | 1.636 |
| | Δ | 745 | -80 | 0 | 18 | 682 | 36.0% | 1,414 | -99 | 0 | 33 | 1,349 | 47.0% | | 1.977 |
| **防雪柵** | 標準工法 | 0 | 8,465 | 6,164 | 4,103 | 18,732 | | 0 | 10,437 | 10,250 | 7,796 | 28,484 | | 9,752 | 1.521 |
| L=100mあたり | **木材利用** | 6,315 | 4,214 | 9,818 | 2,770 | 23,117 | | 11,992 | 5,196 | 16,327 | 5,263 | 38,778 | | 15,661 | 1.677 |
| | Δ | 6,315 | -4,251 | 3,654 | -1,333 | 4,385 | 23.4% | 11,992 | -5,241 | 6,077 | -2,533 | 10,294 | 36.1% | | 2.348 |
| **コンクリートシール** | 標準工法 | 0 | 0 | 1,739 | 1,724 | 3,463 | | 0 | 0 | 2,891 | 3,276 | 6,167 | | 2,705 | 1.781 |
| A=100m²あたり | **木材利用** | 1,560 | 0 | 4,867 | 2,102 | 8,529 | | 2,962 | 0 | 8,093 | 3,993 | 15,049 | | 6,521 | 1.765 |
| | Δ | 1,560 | 0 | 3,128 | 377 | 5,066 | 146.3% | 2,962 | 0 | 5,202 | 717 | 8,882 | 144.0% | | 1.753 |
| | | | | | | ↑ **A** | | | | | | ↑ **B** | | | |

| | | 木材 | 鋼材 | セメント系 | 工事費 |
|---|---|---|---|---|---|
| **域内生産誘発係数** | | 1.899 | 1.233 | 1.663 | 1.900 |
| | **適用** | ※林産試験場 9) その他の木製品 | ※北海道・平成23年表・104部門 7) 8) 41建設・建築用金属製品 | 32セメント・セメント製品 | 62公共工事 |

※ 上表中 Δ は木材利用工法採用に伴う増減で、
[ 木材利用工法ケース - 標準工法利用ケース ]により算定。
端数処理のため、上表中の数値同士の加減算は一致しないことがある。

なる、便益額が著しく過大など、信頼できると考えられる試算結果は結局得られなかった。

景観面の効果の経済的価値の評価手法については、研究・検討上の課題が多いと言える。

### 2. 3　木材利用による価値や効果の体系化と算定及び定量化に関するまとめ

2.1 節から 2.2 節に示したとおり、従来の鋼製やコンクリート製の土木工作物の代替として、木製の部材を含む土木工作物を採用した場合の効果について、既存の評価手法等を用いた試算を行った。試算は、北海道内に実際の採用例がある土木工作物や、それをもとに独自に構造の検討を行った工作物である（**図-2**）。

結果からは、木材製品は地場（市町村内、圏域内あるいは北海道内）でほとんどの原材料が調達できることなどから、その投資額に対して、大きな地域経済への還元効果が期待でき、多くのケースにおいて木材製品の採用によるコスト増分以上の域内生産の誘発が見込めることが明らかとなった（2.2.2 項）。このように、木材製品の採用は、地域経済に対して投資額以上のフロー効果が期待できることから、特に地方自治体の実施する公共事業においては、積極的に採用を検討していくことが望ましいと言える。

一方、木材利用による環境面の効果については、その効果が非常に多岐に渡ることから、その評価に際しては評価項目の絞り込みが必要である。近年、林業の衰退とそれによる林業用人工林の荒廃、それによる山地保全上の課題などが指摘されているが、間伐材利用の土木工作物の導入による人工林の維持管理への貢献効果は決して小さくはなく（2.2.1 項）、公共事業における木製土木工作物の広範な採用は、これらの社会問題の解決の一助となる可能性がある。

## 3. 事例分析に基づく木材利用工作物の耐久性能の評価

既存の木製工作物を対象に経年と腐朽劣化の程度について、北海道立林産試験場と共同で計測調査を行い、木製部材の設置条件および設置からの経過年数と、腐朽劣化の程度の関係について分析を行った。

この際、短い研究期間で木製部材の設置からの経過年数と腐朽劣化の程度の関係について分析するにあたっては、既存の構造物を調査対象とし、設置からの経過年数と腐朽劣化の現状を調査するのが有効である。したがって調査にあたっては、当該木製部材の設置年が明らかになっていることと、同様の工作物が複数年にわたって設置され続けており、設置からの経過

写真-2　調査対象とした木製工作物
（左列：立入防止柵、右上：防雪柵、右下：歩道舗装）

年数が異なる構造物を並列で調査することにより腐朽劣化の傾向を比較できることが条件となる。

そこで、平成 12 年頃から北海道の高規格幹線道路に継続的に設置が行われている木製の立入防止柵（**写真-2** 左列）を主たる調査の対象とした。また、これらの調査で得られた傾向を確認するため、他の構造の工作物として木製の防雪柵と木製の歩道舗装について

調査の対象とした（**写真-2** 右列）。

### 3. 1 調査対象とした構造物の仕様等

本研究で調査対象とした木製工作物の一覧を**表-7** および**表-8** に示す。材種は北海道産のカラマツないしはトドマツ、防腐処理は防腐剤の加圧注入処理（JIS A 9002 [15]）によるもので、この防腐剤（木材保存剤）には ACQ、AAC、AZNA が用いられていた（JIS K 1570 [16]）。また、一部にはこれらの防腐処理の上に着色塗装が行われているものがあったほか、防腐剤加圧注入の下処理として、インサイジング加工ないしは圧縮加工

表-7　調査対象とした木製工作物の一覧および概要

| | 材 | 構造 | 設置年 | 調査年 | 経過年数 | 調査数量 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **木製立入防止柵** | カラマツ(間伐材)<br>防腐薬剤加圧注入処理 | H=1.5～2.5m<br>柱：φ100～180<br>梁：φ100～160半割 | 平成12年度<br>～26年度 | 平成27年度<br>～31年度 | 2年～16年 | 3000体*<br>(計測72000点) |
| **木製防雪柵** | 同上 | 支柱は鋼製<br>防雪板：t30xW100xL2970 を<br>ユニット化 | 平成16年度 | 平成29年度 | 13年 | 23体<br>(計測69点) |
| **木製歩道舗装** | 同上 | H18施工： t140xW200xL2000<br>砕石路盤の上に敷き並べ<br>H19施工： t120xW180xL2500<br>デッキ構造(コンクリート基礎の上にボルト留め) | 平成18・19年度 | 平成29年度 | 10年～11年 | 25体<br>(計測200点) |

＊概数。延べ調査数量。

表-8　調査対象とした木製立入防止柵の仕様等一覧

| ロット No. | 施工年度 | 加工形状 | 樹種 | 防腐処理 | 前処理 | 寸法 | | 構造 | 鹿対応 | 調査/設置地点 | 調査年度/経過年数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 支柱 | 横梁 | | | | H28 | H29 | H30 | R1 |
| 1 | H12 | 剥皮丸太 | カラマツ | AAC | − | 160 | 160半割 | A | | 愛別 | 16 | | | |
| 2 | H12 | 剥皮丸太 | カラマツ | AAC | − | 180 | 160半割 | A | H | 比布 | 16 | | | |
| 3 | H13 | 剥皮丸太 | カラマツ | ACQ | − | 140 | 140半割 | A | | 愛別 | 15 | | | |
| 4 | H14 | 剥皮丸太 | カラマツ | ACQ | − | 140 | 140半割 | A | H | 上川 | 14 | | | |
| 5 | H15 | 円柱加工材 | カラマツ | AAC | − | 140 | 140半割 | A | | 比布 | 13 | | 15 | 16 |
| 6 | H16 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 140 | 140半割 | A | | 上川 | 12 | | 14 | 15 |
| 7 | H17 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 100 | 100半割 | B | H | 上川 | 11 | | 13 | 14 |
| 8 | H18 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 150 | 120半割 | C | | 幸福 | 10 | | | |
| | H18 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | − | 150 | 120半割 | C | | 幸福 | 10 | | | |
| 9 | H19 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 150 | 120半割 | C | | 幸福 | 9 | | | |
| 10 | H17 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | − | 125 | 90半割 | C | | 幸福 | 11 | | | |
| 11 | H19 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 100 | 100半割 | B | H | 上川中越 | 9 | | | |
| 12 | H20 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 100 | 100半割 | B | H | 上川中越 | 8 | | | |
| 13 | H24 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | インサイジング | 150 | 120半割 | C | | 忠類 | 4 | | | |
| 14 | H25 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | インサイジング | 150 | 120半割 | C | | 忠類 | 3 | | | |
| 15 | H21 | 円柱加工材 | **トドマツ** | ACQ | 圧縮処理 | 150 | 120半割 | C | | 中札内 | 7 | | | |
| 16 | H22 | 円柱加工材 | **トドマツ** | ACQ | 圧縮処理 | 150 | 120半割 | C | | 中札内 | 6 | | | |
| 17 | H24 | 円柱加工材 | **トドマツ** | ACQ | 圧縮処理 | 150 | 120半割 | C | | 更別 | 4 | | | |
| 18 | H13 | 剥皮丸太 | カラマツ | AAC | − | 160 | 160半割 | B | H | 名寄 | | 16 | | |
| 19 | H17 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 140 | 140半割 | B | H | 上川 | | 12 | | 14 |
| 20 | H17 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 125 | 90半割 | C | | 幸福 | | 12 | | |
| 21 | H18 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 140 | 140半割 | A | H | 下白滝 | | 11 | | 13 |
| 22 | H20 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 100 | 100半割 | B | H | 白滝 | | 9 | | |
| 23 | H21 | 円柱加工材 | カラマツ | ACQ | − | 100 | 100半割 | B | | 白滝 | | 8 | | |
| 24 | H22 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | インサイジング | 160 | 120半割 | C | | 中札内 | | 7 | | |
| 25 | H23 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | インサイジング | 160 | 120半割 | C | | 更別 | | 6 | | |
| 26 | H26 | 円柱加工材 | カラマツ | AZNA | インサイジング | 150 | 120半割 | C | | 忠類 | | 3 | | |

| **※ 防腐処理** | |
|---|---|
| 水溶性木材保存剤 種別 | |
| **AAC** | 第四級アンモニウム化合物系 |
| **ACQ** | 銅・第四級アンモニウム化合物系 |
| **AZNA** | アゾール・第四級アンモニウム・ネオニコチノイド化合物系 |

が行われているものがあった（**表-8**）。

### 3. 2　調査の方法

木材の腐朽劣化の診断・調査方法としては、目視触診による方法（腐朽被害度判定）[17]、抵抗貫入試験（ピロディン）、穿孔抵抗試験（レジストグラフ）などがあるが、現場で非破壊で調査ができること、計測機器を用いた定量的なデータが得られること、また、計測機器の普及の状況なども考慮してピロディン（**図-3**）による方法を主とした。

ピロディンによる計測値は、一定エネルギー（6 ジュール）で直径 2.5mm の計測ピンを木材に打ち込んだときのピンの貫入深さ（略称：Pe、単位：mm）である。この計測値には、木材の強度や密度が影響し、材種樹種によっても計測値は異なるが、同一の材であれば腐朽劣化の進行とともに木材の強度や密度が低下することで、ピロディンによる計測値は増大する。このため、特定の材種樹種について、健全状態の材のピロディン計測値と、調査対象の材のピロディン値を比較することで、材の健全度・腐朽度を近似的に診断できる。

調査は、主に平成 28 年度に行い[17]、平成 29 年度～令和元年度については、木製防雪柵や木製歩道に関する計測調査や、木製立入防止柵に関する補足調査を実施した（前掲の**表-7** および**表-8**）。

### 3. 3　ピロディンによる計測値の取り扱い

木材の強度には部材ごとにばらつきがあり、また同一部材内でも木材組織には硬いところ、柔らかいところがある。加えて、木材の腐朽や虫害による劣化は当初局所的に発生するため、部材内に劣化部分と健全部分が共存する。一方で、ピロディンによる計測で得られるデータは、計測ピンが打ち込まれた点のデータである。

したがって、経年と腐朽劣化の関係をピロディン計測値を用いて評価するにあたっては、木材の腐朽劣化状況と照らし合わせて、的確な場所で多数の計測を行い、ピロディン計測値の分布の傾向を踏まえた上で、腐朽劣化状況の評価を検討する必要がある。

### 3. 4　木製柵に関するピロディン計測値の分布

前掲の**表-8** および**表-9** と**図-4** は、本研究で取り組んだ木製柵に関する腐朽劣化状況調査の概要および一覧を示したものである。調査対象とした木製柵の構造にはいくつかのバリエーションがあるが、調査部位は**表-9** および**図-4** に示すようにおおむね統一されている。計測点数は、調査ロットごと、調査部位ごとに**表-9** のとおり 64～100 点程度であり、全体では極めて多数の計測を行った。調査は、林産試験場との共同研究の一環として実施した。

**図-3　ピロディン計測器の概要と計測例**

**図-5～図-8** は、調査部位別に、調査ロットごとに、ピロディン計測値の分布を累積構成比率で示したものである。経年が浅く、腐朽劣化がほとんど進行していないと考えられるロットでは、おおむね同じ分布曲線を描いている。一方で、経年を経て腐朽劣化が進行しつつあるロットでは、ピロディン値が増大した材の比率が段々と増加し、ばらけた分布に移行していっているのが読み取れる。

これらの結果から、屋外環境に設置された木製構造物については、全部材の腐朽劣化が一様に進行するのではなく、部材ごとばらつきをもって腐朽とそれによる強度の低下、ピロディン値の増大が進んでいることが改めて明らかとなった。このことから、腐朽劣化状況の評価を行うにあたっては、部材単位や計測部位ごとの評価結果のばらつきを考慮せず、平均等の代表値一つで評価することは好ましくなく、ロット全体の腐朽劣化傾向の評価は慎重に行う必要があることがわかる。

なお、これらの調査結果のうち、健全と考えられる材（ロット 6～9 の柱中部および梁上段/上端）での

**表-9　木製柵調査：調査ロットごとの計測内容一覧**

| 計測箇所 | | | GLからの高さ(mm)** | 計測数 | 計 |
|---|---|---|---|---|---|
| 柱 | 上部 | 左右 | 1,450 | 各2カ所（柱左右または前後）x100ユニット = 200 | 調査ユニットあたり24または30カ所 x100ユニット<br>各調査区間ごと 2,400または3,000カ所 |
| | | 前後 | 1,350 | | |
| | 中部 | 左右 | 800 | | |
| | | 前後 | | | |
| | 下部 | 前後 | 25～200 | | |
| | | 左右 | 25 | | |
| 梁 | 上段 | 上端 | 1,450 | 各2カ所（スパン左右）x100ユニット = 200 | |
| | | 下端 | | | |
| | | 裏 | | | |
| | 中段 * | 上端 | 1,000 | | |
| | | 下端 | | | |
| | | 裏 | | | |
| | 下段 | 上端 | 100 | | |
| | | 下端 | | | |
| | | 裏 | | | |

＊ Aタイプ仕様（H11～16）のみ　　＊＊ おおよその目安

分布を取り出すと、**図-9**、**表-10** のような分布となっており、平均値 15.4 程度、標準偏差 2.5 程度の正規分布形状となっていることが読み取れる。今後はこの値を基準としてピロディン計測値を用いた腐朽劣化状況の診断を行うことが可能である。

さて、改めて**図-5**～**図-8** であるが、これらの図からは、腐朽劣化が最も著しいのは、**表-8** で調査ロット 1～3 とした H12～H13 に設置され 15～16 年が経過した剥皮丸太構造のもの、次いで調査ロット 4～5 であることが読み取れる。調査ロット 1～3 のものについては、**図-5** 右上の柱中部と**図-6** の梁半割面を除いて、腐朽劣化が大きく進行しており、ピロディン計測値が 40（計測限界）に達する計測結果も数%～数十%となっている。

部材部位による差については、腐朽劣化が著しく、傾向の分析が困難なロット 1～3 を除いて見てみると、腐朽劣化が比較的大きいのは、**図-5** の柱地際部、柱下部、次いで、**図-8** の梁下段、**図-7** の梁上段および中段の上端側の計測点という順となった。その他の部位については、ロット 1～3 を除き、顕著な腐朽劣化の傾向は確認されなかった。

以下、次項にて詳しく結果を考察していく。

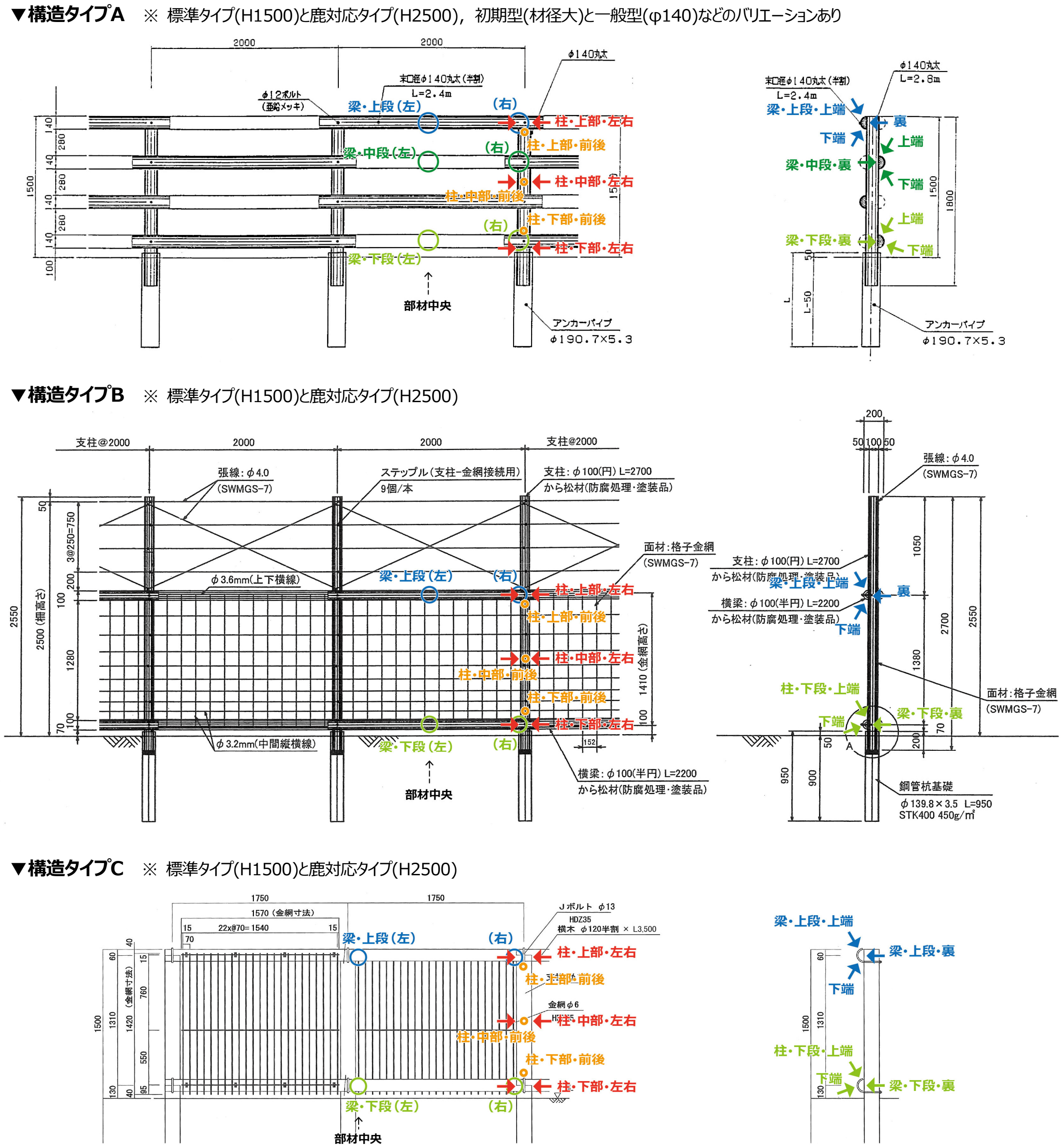


図-4　調査対象とした木製立入防止柵の構造およびピロディン計測位置

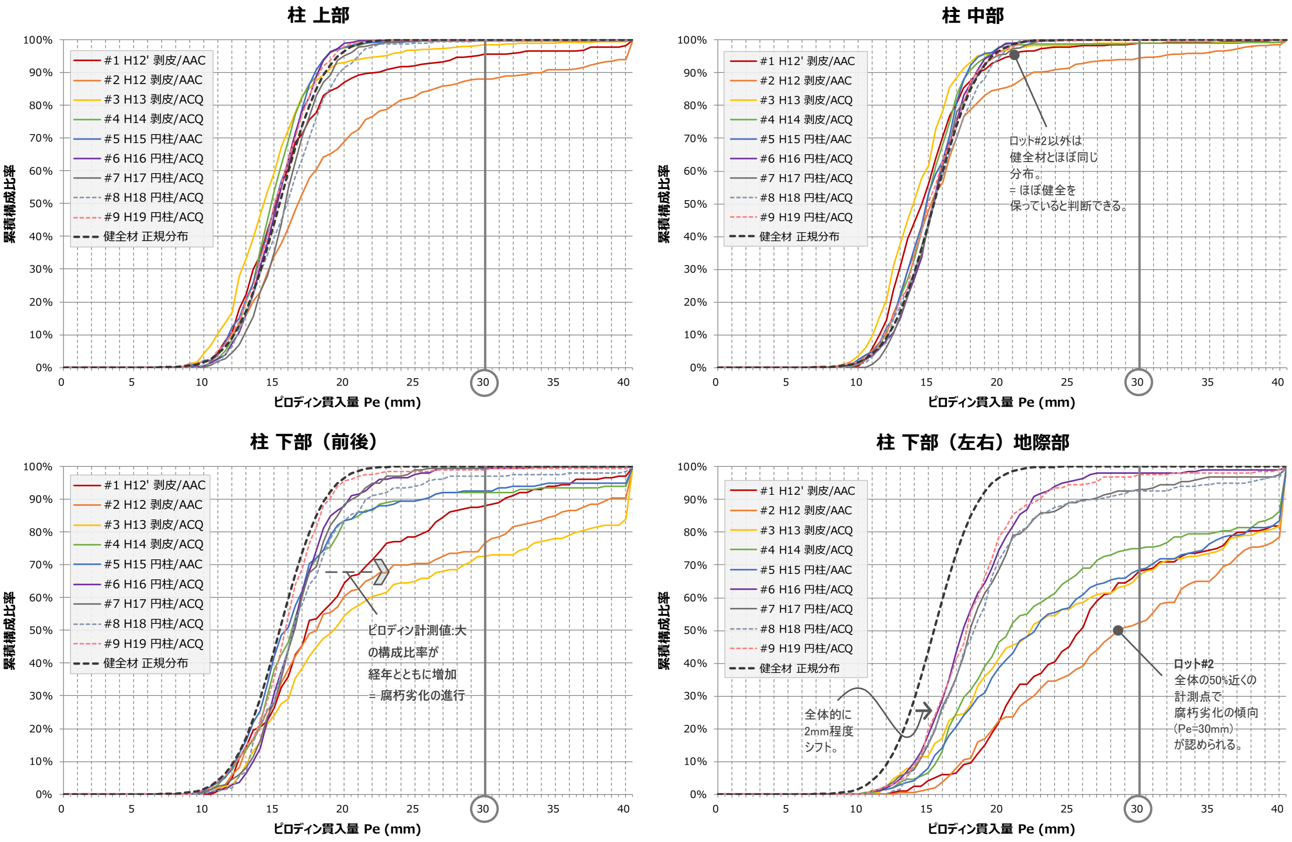


図-5　柱部材の計測結果（ピロディン計測値の累積分布）　左上：柱上部、右上：柱中部、左下：柱下部、右下：柱地際部

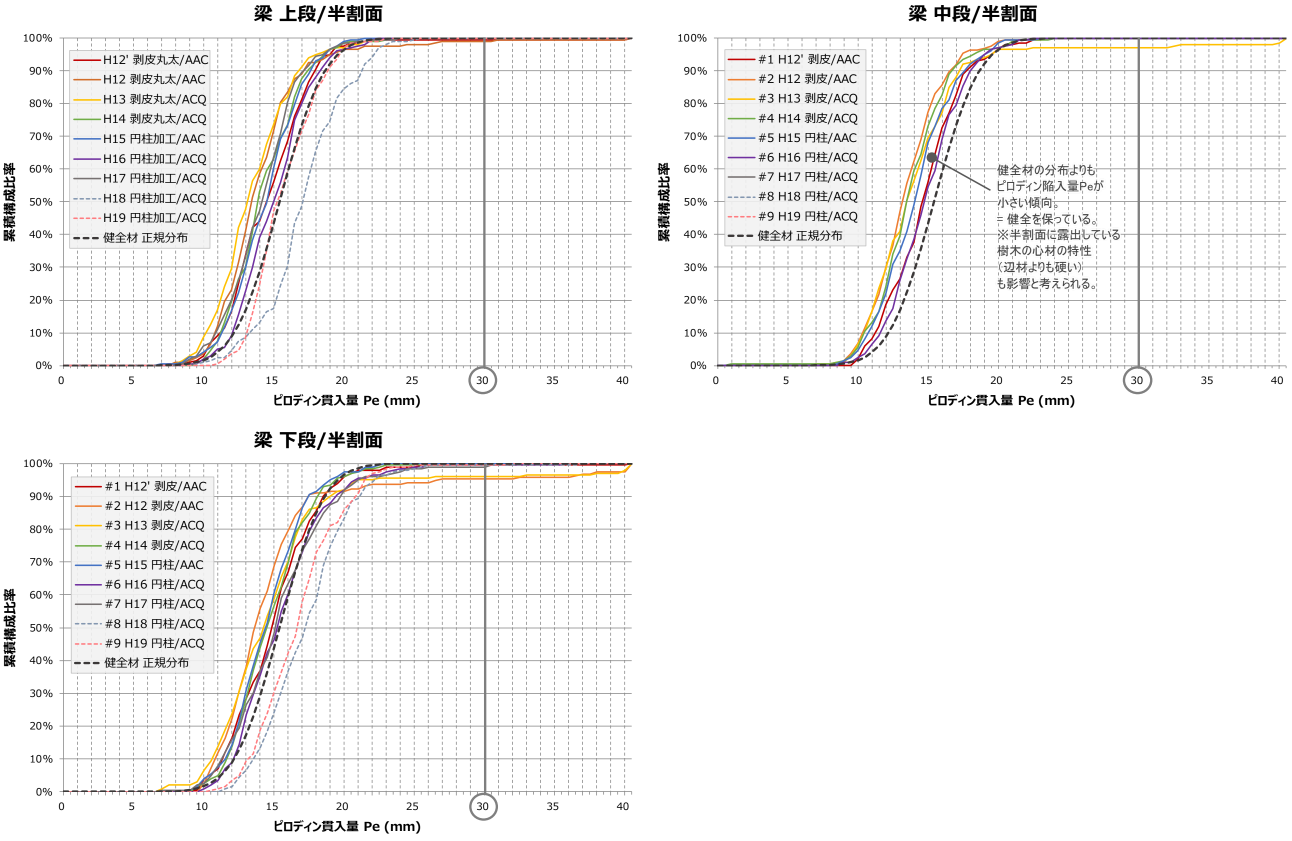


図-6　梁部材半割面の計測結果（ピロディン計測値 の累積分布）　左上：梁上段、右上：梁中段、左下：梁下段

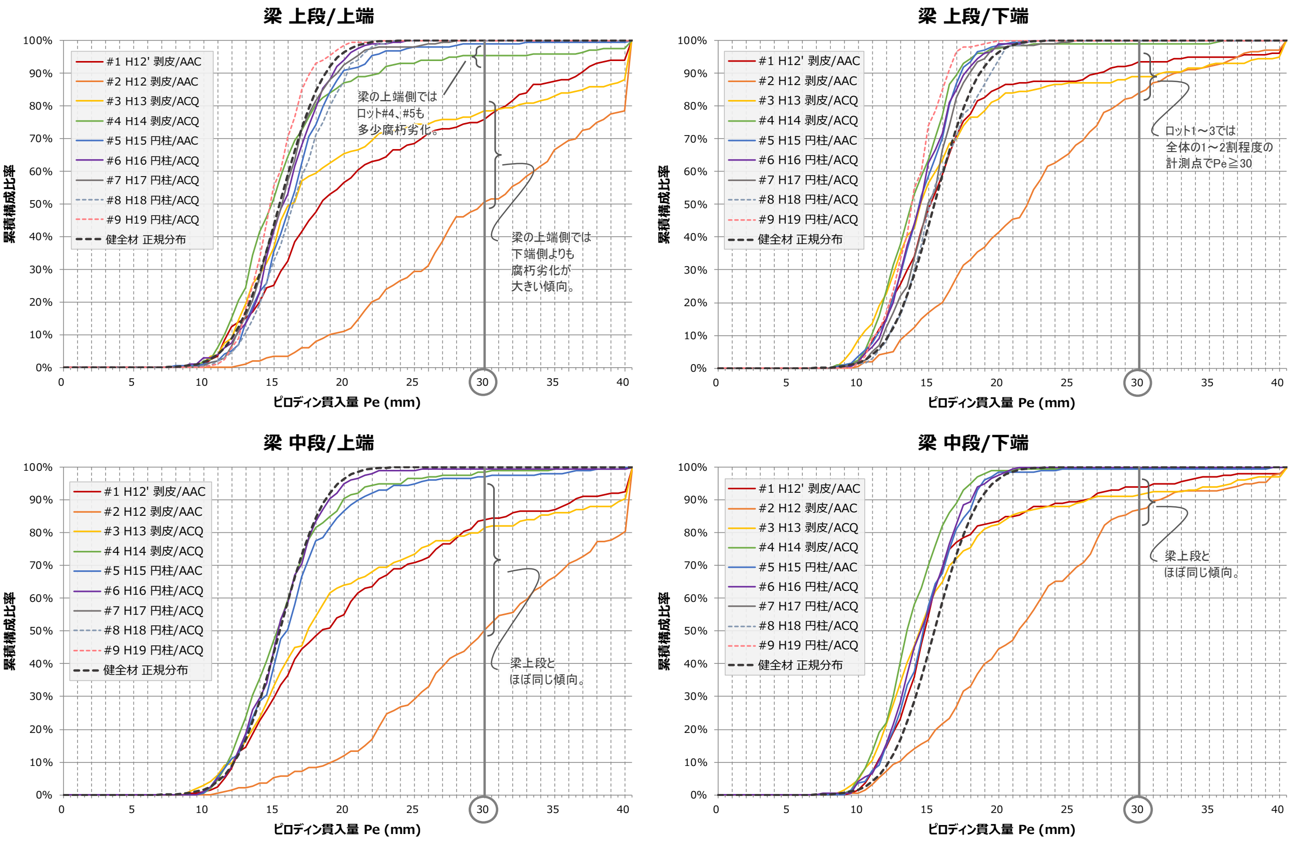


図-7　梁上段・中段部材の計測結果（ピロディン計測値の累積分布）
左上：梁上段/上端，右上：梁上段/下端，左下：梁中段/上端，右下：梁中段/下端

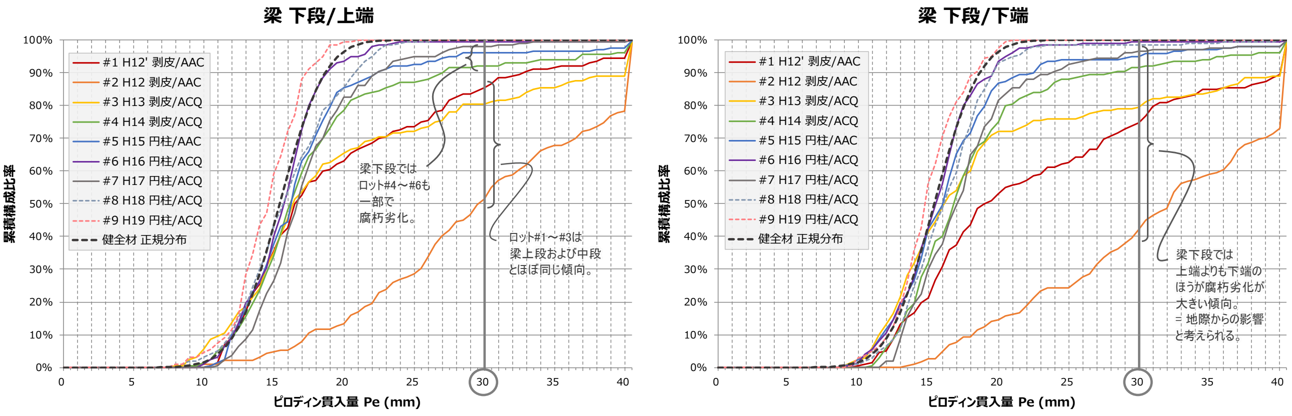


図-8　梁下段部材の計測結果（ピロディン計測値の累積分布）　左：梁上端，右：梁下端

### 3. 4. 1　柱部材の部位ごとの腐朽劣化傾向

柱部材の計測結果（**図-5**）によると、柱の根元など地面に接する部位の腐朽劣化が最も著しく（**図-5** 右下、一例**写真-3**）、ピロディン計測値が 30mm 以上の計測点が全体の 3 割を大きく超えたロットもある。一方で、同じ柱の根元近くでも、地面から 20cm 程度も離れればそれほど腐朽劣化は顕著ではない（柱下部、**図-5** 左下。ロット 1～3 は除く）。また、柱の上部と中部（同、左上と右上）を比較すると、上部のほうが腐朽劣化がやや進行しており、天端木口面からの雨がかりの影響がうかがえる。

なお、ここで言うピロディン計測値 30mm 以上とは、カラマツ材を対象とした腐朽劣化に関する既往研究において、腐朽劣化の判断の目安として示されているものである [18)]。

このピロディン計測値 30mm 以上の計測点の割合で

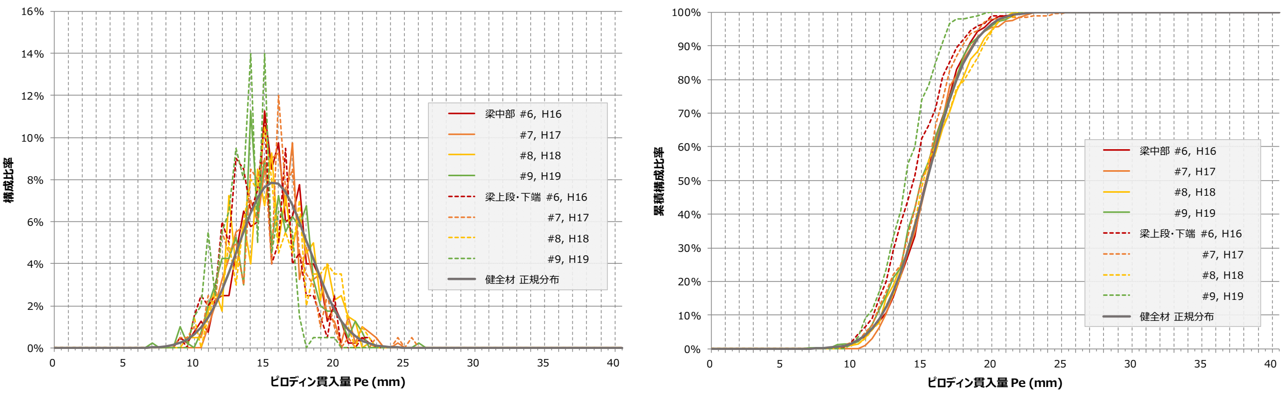


図-9　健全部材のピロディン貫入量分布とそれらから算出した平均値･標準偏差に基づく正規分布モデル

表-10　健全部材のピロディン貫入量の平均値および標準偏差

| | 柱中部 各4点 x 100スパン | | | | | 梁上段/下端 各2点 x 100スパン | | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | H16 | H17 | H18 | H19 | Total | H16 | H17 | H18 | H19 | Total | |
| 平均 | 15.6 | 15.7 | 15.8 | 15.4 | 15.6 | 14.7 | 15.3 | 15.8 | 14.1 | 15.0 | 15.4 |
| 標準偏差 | 2.37 | 2.43 | 2.63 | 2.65 | 2.52 | 2.42 | 2.54 | 2.66 | 1.93 | 2.48 | 2.53 |
| 最大値 | 22.5 | 24.5 | 22.5 | 26.0 | 26.0 | 22.5 | 25.5 | 22.5 | 20.0 | 25.5 | 26.0 |
| 最小値 | 9.0 | 11.0 | 9.5 | 7.0 | 7.0 | 9.0 | 9.0 | 10.0 | 10.0 | 9.0 | 7.0 |

見ると、柱中部では調査ロット 2 のものを除き、16 年経過の材でも、30mm 以上の計測点は 1%程度以下であるが、柱上部では調査ロット 2 で 10%超、調査ロット 1 で 5%程度となる。柱地際部では、調査ロット 2 の材では 5 割近くにのぼり、他の調査ロット 1～5 の材でも 3 割程度、一方で調査ロット 6～9 では 1 割以下である。

したがって、材を縦に用いる柱状の部材では、天端面からの雨がかりと、地面からの水分の供給が腐朽劣化の大きな要因であると言える。特に、地中に打ち込まれるなど地面と接する部位では腐朽劣化が特に顕著で、長期の耐久性を期待する上では大きな課題であることが確認できた。

### 3. 4. 2　横架部材の部位ごとの腐朽劣化傾向

横架部材（梁部材）については、円柱半割材を調査の対象としたが（**図-4**）、上端と下端、半割面とで大きく異なる計測値の傾向となった（**図-6～図-8**）。雨がかりのある上端面では多少の腐朽劣化の傾向がみられる一方（**図-7** 左列）、下端ではそれほどではない（同、右列）。また、半割面については、耐腐朽性に優れた心材部分で、雨がかりもない部位であるためか、他の部位では腐朽劣化の傾向がみられる 15 年程度経過の材でも影響はほとんどみられなかった（**図-6**、**写真-4**）。

写真-3　柱部材の地際部の腐朽劣化の一例

なお、これら横架部材の調査結果では、調査ロット 2 の結果が著しく悪く、梁上端に関するものや、梁下段に関するものをはじめとして、**図-5** 右下の柱地際部と同等の腐朽劣化傾向となっている。ただし、他の調査ロットではこのような傾向は確認できない。

横架部材については、地面からの離隔が 5cm 程度の材も計測調査の対象としたが（**図-8**）、上部に設置された材（**図-7**）と比較して、腐朽劣化は多い傾向にあるものの、柱地際部（**図-5** 右下）の場合ほどには顕著ではない（調査ロット 2 を除く）。

ピロディン計測値 30mm 以上の部材については、調査ロット 1～3 のものを除くと横架部材ではごく一部であり、多くが横架部材の上端に見られる。したがっ

て、横架部材では腐朽劣化の影響は、地中埋設の柱ほどには深刻に考える必要はなく、さらには天端面の雨水処理について工夫を検討することができれば、より長期の耐久性を期待できる。

### 3. 4. 3　木製部材の仕様の違いによる腐朽劣化傾向

3.4.1 および 3.4.2 でも言及したとおり、ロットごとに腐朽劣化の傾向をみると、ロット 2 で腐朽劣化が最も著しく、次いでロット 1・3 とロット 4・5 で腐朽劣化が進行している（一例**写真-5**）。逆に、これらのロット 1〜5 を除くと、腐朽劣化の進行はごく限られ、柱下部のロット 8（**図-5** 左下）、柱地際部のロット 6〜9（同、右下）、梁下段のロット 7（**図-8**）でみられる程度である。

このうち、ロット 6〜9 に共通するのは、円柱加工材と ACQ 防腐処理である（**表-8**）。一方でロット 1〜4 は剥皮丸太加工形状（間伐材などの小径材丸太から、表皮（樹皮）のみ除去した材。形状を整えるための切削などの加工を行っていないもの。）であり、これらの違いが腐朽劣化の進行に悪影響を及ぼしている可能性がある。なお、ロット 5 は円柱加工材を AAC により防腐処理したものであるが、腐朽劣化の傾向としては、剥皮丸太のロット 1〜4 に近い悪い結果となっている。

### 3. 5　防雪柵防雪板の腐朽劣化傾向

**図-10** は、北海道オホーツク地方の道路に設置された防雪柵（**写真-2** 右上、**図-11**）の木製防雪板に関する計測調査結果である。計測位置等は**図-11** に示したとおりで、計測点数は**表-7** に示したとおり約 70 点である。同構造の木製防雪柵自体は他にも設置事例があるものの、事前調査で、ほとんど腐朽劣化がみられないことを確認していたので、設置が最も古いもの（平成 16 年）のみを計測調査の対象とし、調査時点での経過年数は 13 年であった。

**図-10** の計測結果および他の目視調査の結果からは、これらの木製防雪柵について、腐朽劣化の傾向は見当たらなかった。最上段以外は雨がかりのない横架部材であることなどが寄与していると考えられ、このような構造では、優れた耐腐朽性が期待できる。

### 3. 6　歩道舗装の腐朽劣化傾向

北海道上川地方の道路に設置された、木製歩道舗装を対象に計測調査を行った（**写真-2** 右下）。設置は平成 18 年度および平成 19 年度で、調査時点における経過年数は 10 年および 11 年であった（**表-7**）。計測調査結果を**図-12** に、調査対象とした木製工作物の構造および計測位置を**図-13** および**図-14** 示す。計測点数は**表-7** に示したとおり、計 200 点である。

このうち、18 年度設置の歩道舗装は砕石路盤の上に直敷設の構造（**図-13**）、19 年度設置の歩道舗装はコンクリート布基礎のデッキ構造（**図-14**）であるが、調査時点での経過年数の差は 1 年であり、しかしながら前

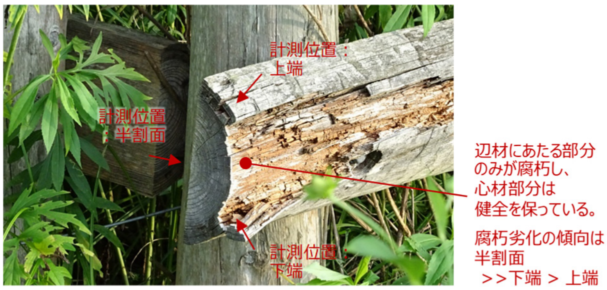


写真-4　横架部材の腐朽劣化の一例

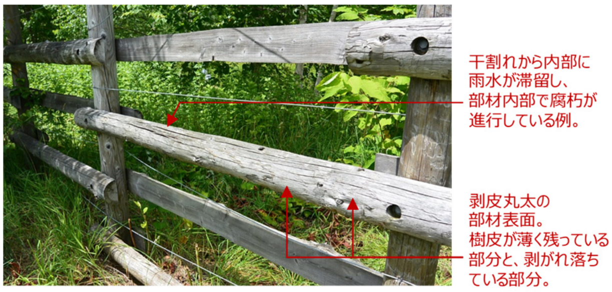


写真-5　剥皮丸太材の腐朽劣化の一例

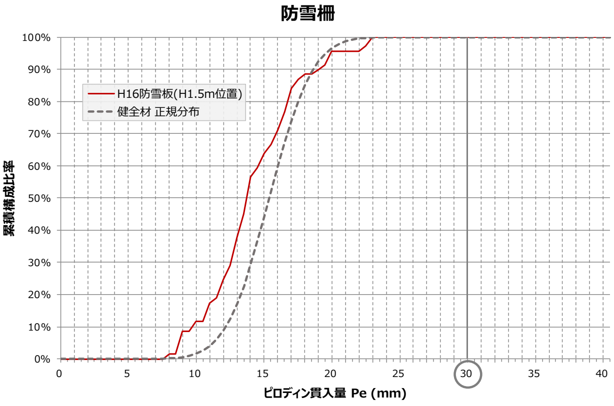


図-10　防雪柵防雪板に関するピロディン計測値の分布

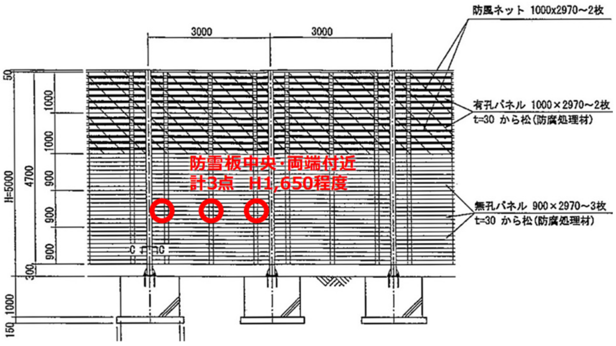


図-11　調査対象とした防雪柵の構造と計測位置

者のほうが腐朽劣化の進行が顕著であるように読み取れる。

また、いずれの舗装も、片方の端はコンクリート縁石に接し、もう片方の端は土に接している。このうち土に接しているほうの端部（材端部/接地側）で腐朽劣化が特に著しい（写真-6）。一方で、それ以外の部位でも、3.4.2 の横架部材の傾向などと比較しても、腐朽劣化は少なからず進行していることが確認できる。

路面敷設材としての木材の利用においては、長期の耐腐朽性を確保するためには、相応の構造上等の工夫が必要であることを示している。

## 3.7　木製部材の経年による腐朽劣化の予測式

3.4 節に示したピロディン計測値と経年の関係から、木製部材の腐朽劣化の発生の予測式の作成を試みた。

### 3.7.1　分析に用いた計測データ

3.4 節の調査結果から、縦部材および横架部材の標準的な腐朽劣化の傾向を示すものとして、「柱中部」および「梁上段」、最も腐朽劣化が顕著である一方で、構造物の構造上最もクリティカルな部位でもある「柱地際」の 3 カ所を対象とした選んだ。

用いたデータは、木製立入防止柵に関する計測データのうち、樹種をカラマツ、部材の加工形状を円柱加工材とするものである（表-8）。トドマツは、設置が最も古いものでも平成 21 年度であり、7 年までの経年のデータしか得られないため分析に採用していない。また、調査対象としたものの中には、部材の加工形状を剥皮丸太とするものがあったが、近年は採用がなく、また 3.4 節の調査結果からも耐腐朽性という面でも非常に不利な加工形状で、同列で分析することは妥当でないと考えられることから、分析には採用しなかった。

他方、インサイジング加工および圧縮加工については、木材の表面組織を破壊して防腐剤の注入性を高める処理であるが、この加工処理が木材の表面強度を低下させることでピロディン計測値に影響を与える可能性がある。現状この影響について把握しきれていないが、腐朽劣化の判定にまで影響を与えるものではないと考えられることから、今回の分析には含めている。

### 3.7.2　腐朽劣化の判定方法

本研究においては、土木分野における木製部材の耐用年数あるいは必要となるメンテナンスの頻度を明らかにすることを研究の目的としていることから、木材の強度および腐朽劣化の発生にばらつきがあることも考慮し、部材単位で腐朽劣化の発生頻度を評価することとする。その際、木製の構造物の設計においては一般的には多くの安全側の設計が盛り込まれてい

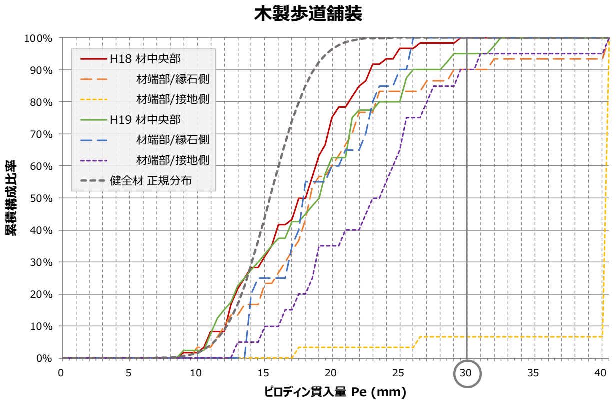


図-12　歩道舗装に関するピロディン計測値の分布

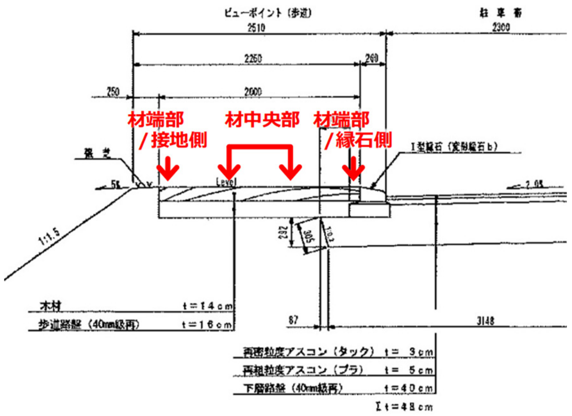


図-13　木製歩道(H18 設置)の構造と計測位置

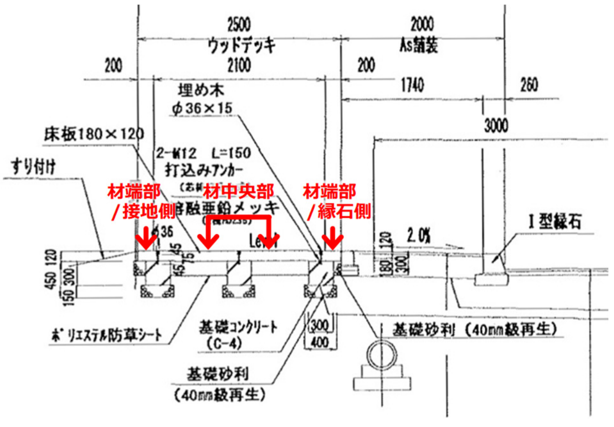


図-14　木製歩道(H19 設置)の構造と計測位置

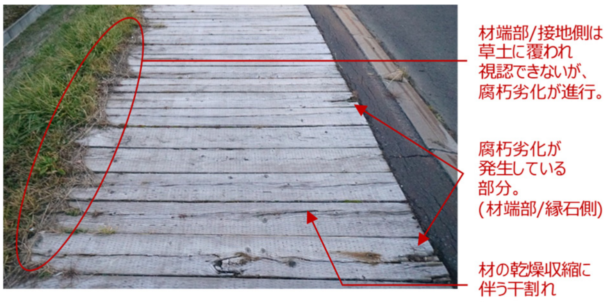


写真-6　木製歩道舗装の腐朽劣化の一例

ることから、多少の腐朽の発生による断面の欠損、強度の低下は、部材および構造物の安全性に即座に影響を与えるものではないと考えてよい（接合部等は除く）。

そこで、同一部材、同一断面における複数のピロディン計測点のデータを参照し、過半数の計測点で計測値が 30mm 以上となったときを [18]、その部材の耐用限界として判定することとし、分析を行った。先述の 3 カ所の部材部位ごと、具体的の耐用限界の判定基準は、**図-15** に模式図で示したとおりである。

### 3. 7. 3　腐朽劣化の予測式（回帰式）

以上の条件の下、経年と、ピロディン計測値に基づき耐用限界と判定された部材の発生比率の関係を、調査ロットごとに図示したのが**図-16** である。なお、グラフには 3.6.1 において除外するとした剥皮丸太形状の材に関する調査結果も、白抜き丸プロットにて結果を併記しているが、以降の分析には用いていない。

結果からは、経過年数が同一でも、ロットごとに耐用限界と判定された部材の発生比率（以下、単純に「腐朽発生率」と呼ぶ）が大きく異なるものがあることから、調査ロットごとにこれらの腐朽発生率の上位グループと下位グループに分け、それぞれごとに予測式（回帰式）の導出を行った。

なお、回帰式の関数形状については、腐朽発生率を $y$、設置からの経過年数を $x$ として、以下を用いた。

$$\begin{cases} y = 0 & (x < 5) \\ y = a(x-5) & (x \geq 5) \end{cases}$$

これは、腐朽発生率のプロット（**図-16**）が、経過年数 5 年程度以下では、最も腐朽劣化が著しい柱地際部でもほぼゼロである一方、これを境に、経年とともに腐朽発生率が上昇を始めるように見て取れるためである。

これにより得られた、部材ごとの腐朽劣化の発生率の予測式を**表-11** に示す。また、これらの予測式については、**図-16** 内にも図示して示した。

なお、横架部材一般の腐朽発生率下位グループおよび縦部材一般については、経年による腐朽発生率がゼロであることから、予測式算定の対象としなかった。

## 4. 現場条件に合わせた木材利用工作物の適用性評価と提案

### 4. 1　設計検討用／腐朽劣化の発生率の予測値の設定

木製工作物の設計検討時に、維持管理の発生頻度やコストを算定するのに利用するための「腐朽劣化の発

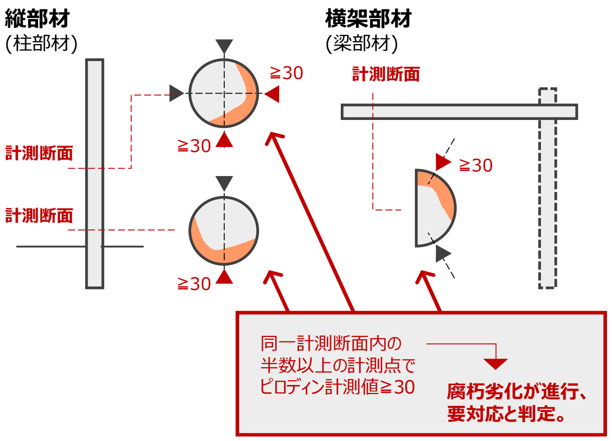


図-15　本分析における腐朽劣化の判断基準の考え方

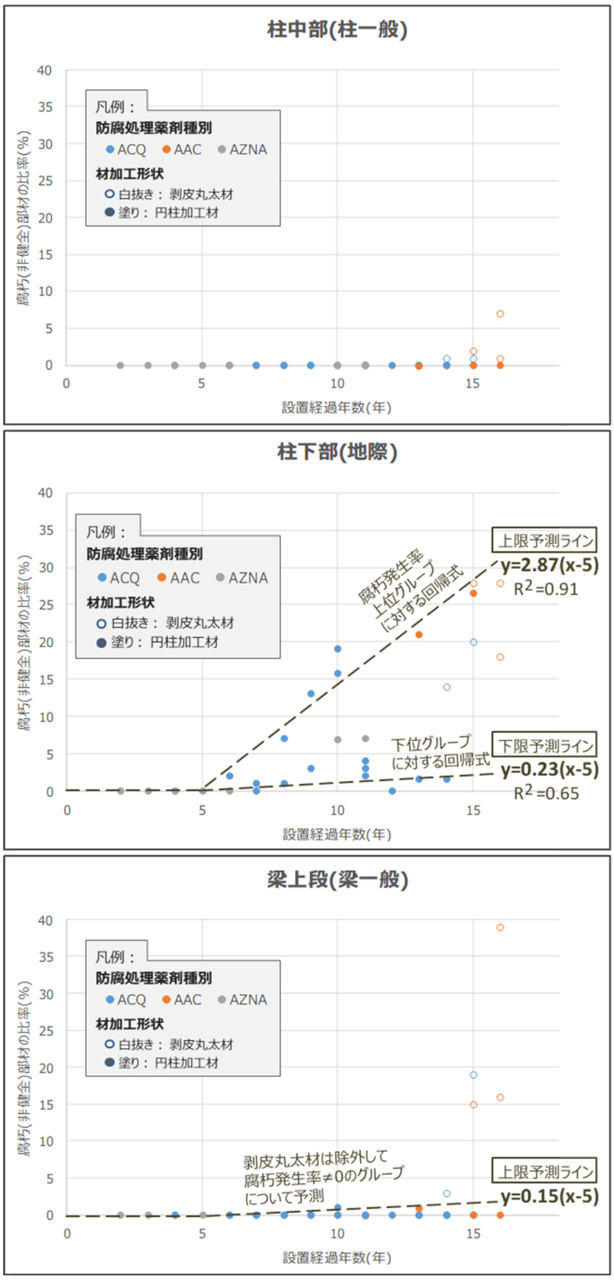


図-16　経年と部材の腐朽発生率の関係およびその予測式

表-11　得られた腐朽劣化の発生率の予測式

| 設置区分 | 予測区分 | 予測式 (x≥5) |
|---|---|---|
| **地際部**<br>*柱下部(地際) | ▲上限ライン | y = **2.87** (x-5) |
| | ▼下限ライン | y = **0.23** (x-5) |
| **横架部材一般**<br>*梁上段 | ▲上限ライン | y = **0.15** (x-5) |
| | ▼下限ライン | – |
| **縦部材一般**<br>*柱中部 | | – |

*予測式算定に用いた
ピロディン計測データの調査区分。

y：部材単位の腐朽発生率
x：設置からの経過年数(年)

生率の予測値」について、3.7.3 の予測式をもとに検討を行い、表-12 のとおりとした。

ここでは予測値を、部材の設置条件別に「地際部材」、「一般部材」、「良環境部材」の 3 区分とし、それぞれ、3.7.4 の予測式における柱地際部、梁上段（横架部材一般）、柱中部（縦部材一般）に対応して設定した。ここでいう「良環境部材」とは、柱中部すなわち雨がかりや地面からの水分の影響のない柱部材のほか、3.4.2 項の雨がかり・雨水の滞留のない横架部材も含むものとする。

また、3.7.3 項の分析結果および予測式同様、予測区分には上限と下限の 2 種類を設定し、構造物の重要度や設置環境、品質・信頼度に応じて、これらの間の任意の値を採用できることとした。

## 4.2　木製工作物のライフサイクルコストの試算

4.1 で設定した腐朽劣化の発生率の予測値をもとに、いくつかのモデル構造物を対象として、ライフサイクルコストの試算と、木材利用でない通常構造の工作物との比較を行った。

なお、ライフサイクルコストの試算については、期間 35 年にて行った。3.章の調査でも設置後 16 年経過の材までしか調査できていないことから、長期の腐朽劣化の傾向については予測が困難なためである。また結果の分析と考察を容易にするために、「将来費用に関する現在価値化」は行っていない。

試算にあたっては、2.2.1 項の算定と同様に、図面等をもとに数量を算出し、材料費および工事費の単価を乗じることで算定した。単価については、市販の単価資料、国土交通省の積算基準書、見積などを適宜参照して設定した。部材交換の際の工事範囲については、4.2.1 から 4.2.3 に示すようにそれぞれに設定した。

### 4. 2. 1　木製柵

試算の対象としたモデル構造物の一覧を表-13 に示す。2.章の調査にも用いた従来構造の立入防止柵と木製立入防止柵（2.章の図-2）のほか、図-17 に示した 3 種の構造について試算の対象とした。これらについて、ライフサイクルコスト（35 年）の試算を行った結果を表-14 に示した。

なおこの際、図-2 および図-17 における支柱部材に

表-13　ライフサイクルコスト試算対象のモデル構造物

| | 試算対象 | 概要 | 参考図 |
|---|---|---|---|
| 立入防止柵 | 標準工法 | 鋼製、標準図 | 図-2 |
| | 木材利用1 | | |
| | 木材利用2 | 別構造、部材φ100 | 図-17 |
| | 木材利用3 | 2を基に、支柱二重化 | |
| | 木材利用4 | 2を基に、鋼管基礎の立上 5cm→15cm | |
| 防雪柵 | 標準工法 | 鋼製、標準図 | 図-2 |
| | 木材利用1 | 「良環境部材」を適用して試算 | |
| | 木材利用2 | 「一般部材・下限」を適用して試算 | |
| コンクリートシール | 標準工法 | シールコンクリート舗装 | 図-17 |
| | 木材利用 | カラマツ t120 | |

表-12　維持管理コスト算定用に設定した「腐朽劣化の発生率の予測値」

| | | 予測区分 | 経過年数 5年 | 10年 | 15年 | 20年 | 25年 | 30年 | 35年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 地際部材 | 地面に接する、または、地面から概ね15cm以内の範囲 | 上限 | 0% | 15% | 30% | ／ | | | |
| | | 中位 | 0% | 8% | 16% | 24% | ／ | | |
| | | 下限 | 0% | 2% | 4% | 6% | ／ | | |
| 一般部材 | 他に該当しない部材 | 上限 | 0% | 1% | 2% | 3% | 4% | 5% | ／ |
| | | 下限 | 0% | 0.5% | 1% | 1.5% | 2% | 2.5% | ／ |
| 良環境部材 | 部材上面に雨水の滞留が生じない構造の部材 | – | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | ／ |

| 実測調査に基づく回帰分析 | 回帰分析に基づく予測値 |
|---|---|

ついては、地面に接する部分を持つことから、腐朽劣化の発生率すなわち部材交換の発生率は**表-12** における「地際部材」を適用することとした。予測区分については、柱根元部の腐朽劣化は構造物全体の健全性に深刻な影響を及ぼすことを考慮する一方、立入防止柵に求められる安全性はさほど高くないことから、予測区分：上限と下限の中間の値（**表-12** の中位の値）を用いることとした。その他の材については、前述のとおり立入防止柵に求められる安全性はさほど高くないことから、「一般部材」の予測区分：下限を用いることとした。

**表-14** の結果からは、やはり支柱の腐朽劣化に伴う部材の交換費用（同表、25 年目列の太字部分）が、木製立入防止柵のライフサイクルコスト上の課題となっている。試算では、耐用年数を 25 年として、25 年経過時点で柵全体を更新するモデルとしたことから、木材利用 1～3 については 35 年で初期費用の 2 倍以上のコストとなっている。一方で、このコストを除けば部材の交換費用の負担はそれほど重くなく、更新前の 25 年時点で試算したライフサイクルコストでは、初期費用の 1 割増程度におさまっている。

木材利用 3 の木製柵は、支柱を二重化することで、2 本組のうちの両方の支柱が腐朽劣化により要交換とならない限りは、部材の交換が不要となるように計画したものである（**図-17**）。**表-14** の試算結果からは、維持管理費用の低減に効果があることは確認できたものの（木材利用 2 との比較）、25 年でも 35 年でも初期費用の増分を逆転するほどにはなっていない。

一方、木材利用 4 の木製柵においては、支柱根元の鋼管基礎を高さ 15cm まで延長して立ち上げることで地際に由来する腐朽劣化のリスクを軽減するよう工夫を施したものである（**図-17**）。したがって、支柱の腐朽劣化の発生率について一般部材の予測区分：上限を採用して試算することとした。これにより、25 年目の全面更新を見込む必要がなくなったので、ライフサイクルコストとしては大幅に改善している（**表-14**）。

以上により、木製柵については今回想定した木製立入防止柵以外にも、公園や広場などにおける手すりや進入防止柵としての採用が多く見受けられるが、柱根元部分に関する構造的な工夫を加えることで、より長期の耐久性と維持管理コストの低減を見込めることが試算から明らかとなった。

### 4. 2. 2　木製防雪柵

算定に用いた標準工法および木材利用工法の防雪柵は 2.章の分析に用いたもの（**図-2**）と同様である。防雪板のみ木製で、厚さ 3cm のカラマツ板がビス留めでユニット化されて用いられている。各防雪板ユニット自体は、支柱に小幅の鋼製山形鋼で押さえ込まれる

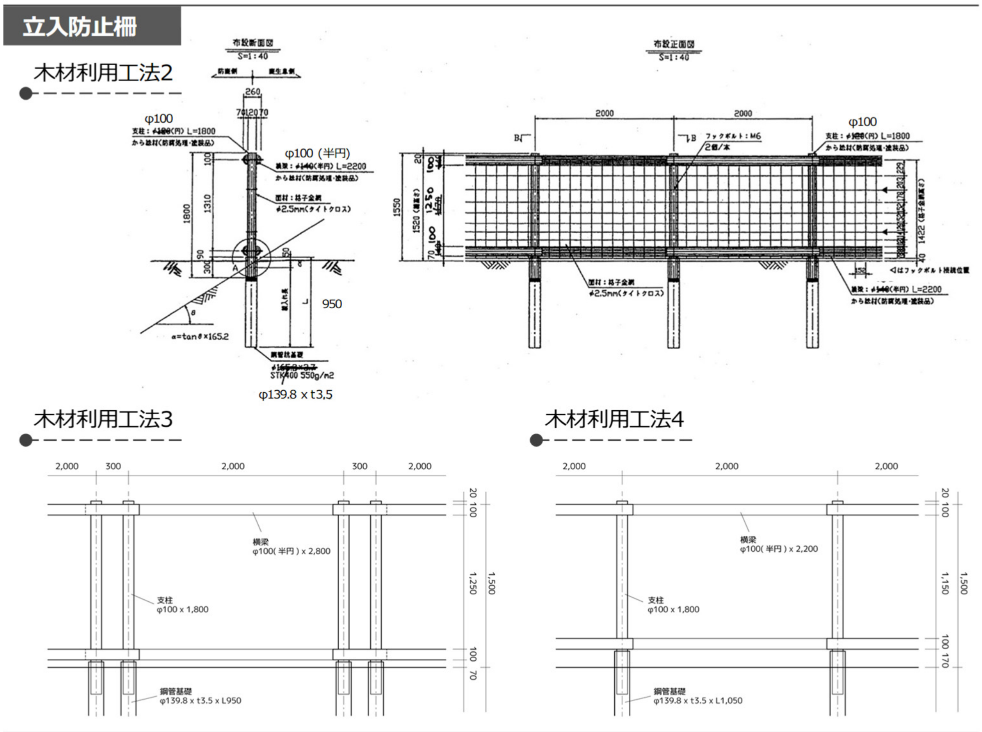


**図-17　ライフサイクルコストの算定に用いた構造物の概略図（立入防止柵）**

表-14　モデル構造物に関するライフサイクルコストの試算結果

| | | 初期費用 | 部材交換費用内訳 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (円) | 交換部材(1) | | | | 交換部材(2) | | | |
| | | | 単価(円) | 適用 | 数量 | 交換頻度区分 | 単価(円) | 適用 | 数量 | 交換頻度区分 |
| **立入防止柵** | 標準工法 | 12,108 | | | | | | | | |
| L=1mあたり | 木材利用1 | 16,190 | 9,826 | 支柱 | 0.57 本/m | 地際･中位 | 5,578 | 梁 | 1.14 本/m | 一般･下位 |
| | 木材利用2 | 12,378 | 7,746 | 支柱 | 0.50 本/m | 地際･中位 | 4,058 | 梁 | 1.00 本/m | 一般･下位 |
| | 木材利用3 | 17,288 | 7,746 | 支柱 | 0.87 本/m | 地際･中位(ダブル) | 4,178 | 梁 | 0.87 本/m | 一般･下位 |
| | 木材利用4 | 12,608 | 7,746 | 支柱 | 0.50 本/m | 一般･上位 | 4,058 | 梁 | 1.00 本/m | 一般･下位 |
| **防雪柵** | 標準工法 | 128,161 | | | | | | | | |
| L=1mあたり | 木材利用1 | 123,161 | ＜ 良環境部材 ＞ | | | | | | | |
| | 木材利用2 | 123,161 | 5,835 | 防雪板 | 13.7 本/m | 一般･下位 | | | | |
| **シール舗装** | 標準工法 | 19,530 | | | | | | | | |
| L=1mあたり | 木材利用 | 40,327 | 3,955 | 舗装板 | 6.67 本/m | 地際･下位 | | | | |

| 部材交換費用 (円) 5年目 | 10年目 | 15年目 | 20年目 | 25年目 | 30年目 | 部材交換費用計 (円) 35年 | (円) 25年 | ライフサイクルコスト (円) 35年 | 25年 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 12,108 | | 標準工法 | **立入防止柵** |
| 0 | 481 | 481 | 517 | **16,190** | 0 | 17,669 | 1,479 | 33,859 | 17,669 | 木材利用1 | L=1mあたり |
| 0 | 330 | 330 | 355 | **12,378** | 0 | 13,393 | 1,015 | 25,771 | 13,393 | 木材利用2 | |
| 0 | 104 | 104 | 119 | **17,288** | 0 | 17,616 | 328 | 34,904 | 17,616 | 木材利用3 | |
| 0 | 59 | 59 | 60 | 60 | 60 | 298 | 178 | 12,906 | | 木材利用4 | |
| | | | | | | | | 128,161 | | 標準工法 | **防雪柵** |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 123,161 | | 木材利用1 | L=1mあたり |
| 0 | 399 | 399 | 401 | 403 | 405 | 2,006 | 1,198 | 125,167 | | 木材利用2 | |
| | | | | | | | | 19,530 | | 標準工法 | **シール舗装** |
| 0 | 527 | 527 | 538 | **40,327** | 0 | 41,920 | 1,593 | 82,247 | 41,920 | 木材利用 | L=1mあたり |

※ 太字は100%交換で、初期費用同等額を積算

ように固定されており、これを一時的に緩めることで、防雪板はユニット単位あるいは1本単位で交換を行うことが可能な構造である。

これらの構造図をもとに、ライフサイクルコスト（35年）の試算を行った結果を**表-14**に示した。

この際、防雪板については、最上段以外は部材上面に雨がかりを受けない材であるため、**表-12**の良環境部材を適用することができると考えられるが、参考として、一般部材の予測区分：下限（個々の防雪板の腐朽劣化が構造物全体の健全性に影響を与えるものではないため）を適用した場合の算定結果についても示した（**表-13**の木材利用工法2）。木製防雪板の交換については、1本単位を想定した。

**表-14**の結果からは、**図-2**の木材利用の防雪柵については、防雪板の腐朽劣化とそれによる部材交換がほとんど発生しないと見込まれることから、35年間のライフサイクルコストでも従来構造の鋼製の防雪柵を下回るという算定結果となった。

### 4.2.3　木製シール

ここでは、小幅員の中央分離帯等において採用される、コンクリートシールを想定し、これを木製に置き換えた場合（**写真-7**）のライフサイクルコストについて試算を行った。算定に用いた標準工法のコンクリートシールと、木材利用の木製シールの構造図を**図-18**に示す。

これらの構造図をもとに、ライフサイクルコスト（35年）の試算を行った結果は前掲の**表-14**である。

この際、舗装材とした木材については、地面に接する材でありながら、単一の材の腐朽劣化が構造物全体の健全性に影響するものではないこと、利用者等に致命的な被害をもたらすものではないことから、**表-12**

**写真-7　木製シールのイメージ（フォトモンタージュ）**

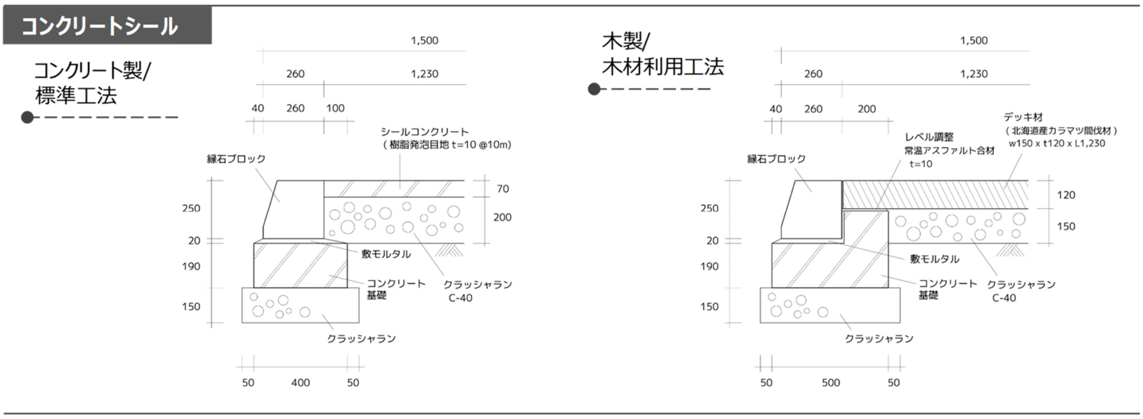


図-18　ライフサイクルコストの算定に用いた構造物の概略図（コンクリートシール）

の「地際部材」の予測区分：下限を適用した。試算にあたっては、25 年経過時点で、一度交換済みのものも含めて全交換するものとしてここでは算定している。

**表-14** の結果からは、やはり 25 年目の更新費用がライフサイクルコスト上の大きな負担となっているが、それを除いても初期費用面等で標準工法よりも費用増となっているため、全体としてコスト面で大きく不利という試算結果になった。

近年、中央分離帯については植栽されずにコンクリートシールとされるケースが多く見受けられ、特に広幅員の中央分離帯の場合には景観的影響が大きいように見受けられることから、なんらかの景観的対策が期待されるところである。しかしながら、この結果を見る限り、これを今回検討した構造の木製舗装に置き換えるには相応のコスト増が発生すると予測され、さらなる検討が必要である。

### 4. 3　土木分野における木製工作物の適用性に関する考察

4.2 節のライフサイクルコストの試算結果からは、柱の地際部に木材を用いると、腐朽劣化の発生上不利であるばかりでなく、部分的な部材の交換が困難で、上部構造を含めた構造物全体の補修とならざるを得ない点で不利である。したがって、柱あるいはその地際部には鋼材やコンクリートなどの材料を用いた構造が有利であり、長期の耐久性が求められる場合にはこの部位に木材を使うことは好ましくない。

一方で、地際部を除けば、腐朽劣化の発生は限定的であると期待でき、今回の試算では、点検費用等を除く限定的な試算ではあるものの、35 年間で初期費用の 1 割以下に収まった。さらなる構造上の工夫を導入することで、すべての部材を 4.1 節および**表-12** に示す「良環境部材」に該当するものとすることができれば、超長期の耐久性も期待できる。これらの構造上の工夫としては、北海道および道立林産試験場の提案するピン支柱や木口笠置 [20] が採用できるほか、**図-19** のような工夫も検討できる。4.2 節で試算した中では、柱を鋼材、横架材のみ木材とする構造物で、長期の耐久性が見込め、4.2.2 の木製防雪柵などでは 25 年以上のメンテナンスフリーでの維持管理が可能と期待できる。

## 5. 木材を利用した工作物に関する技術資料の取りまとめ

以上の研究で得られた知見を取りまとめ、土木分野における木材利用にあたっての留意事項や配慮事項と、望ましい木材利用の方法を提案するものとして、「土木・屋外空間における木製材料の利用に関する検討用資料」を取りまとめた。

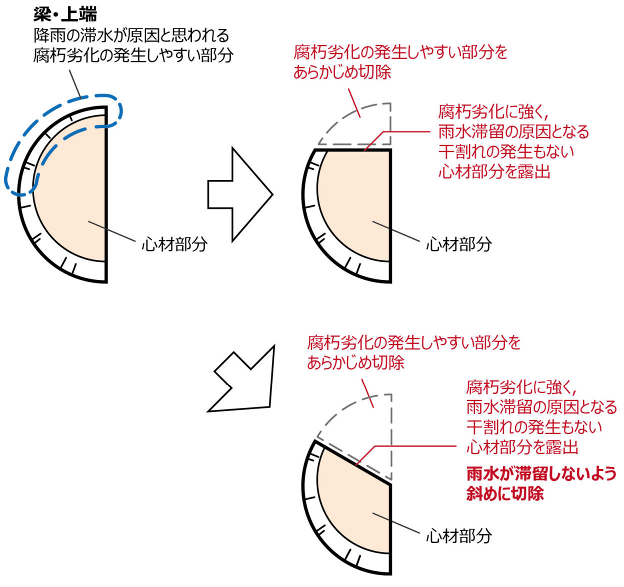


図-19　腐朽劣化の進行を抑制する横架材構造の試案

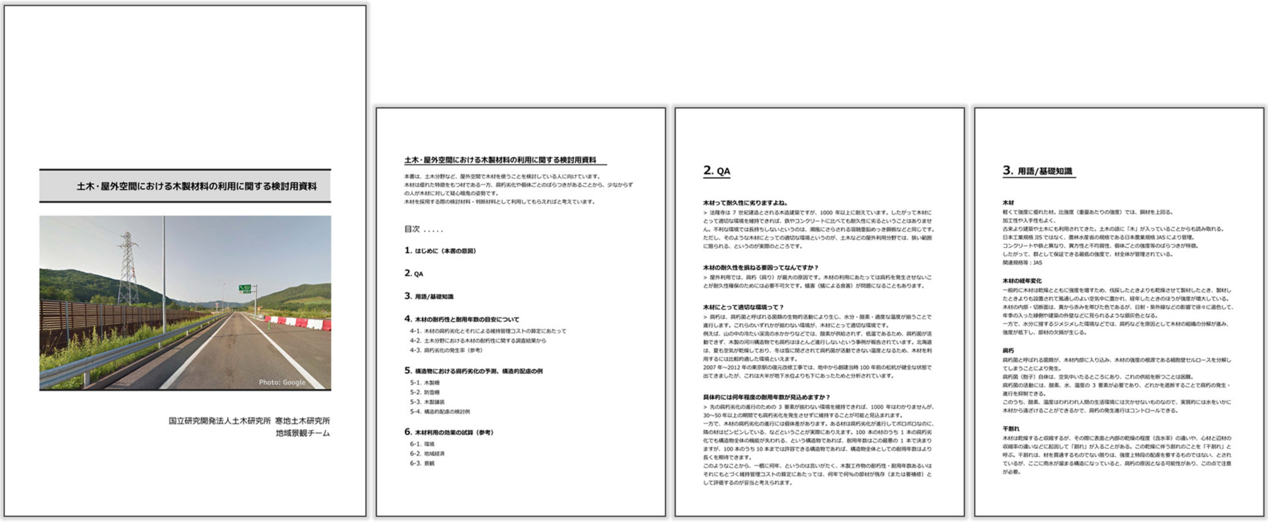


**図-20　取りまとめた技術資料の構成イメージ**

本書の構成イメージを**図-20** に示す。

資料には、研究成果をもとに、土木分野で木材を利用した場合の耐久性の見込みや想定される部材の交換頻度、維持管理コスト等の試算値や試算手順について示しており、木材利用の適否や採用の検討に際して参考となるものを意識した。これらの成果は主に、本稿の 3.章および 4.章の調査分析結果に対応する。

また本書は、木材に馴染みのない技術者や担当者を読者として想定しているため、「用語/基礎知識」の章を設けて、どのような習熟度の読者でも本書の内容を理解してもらえるように配慮した。このほか、冒頭に「QA」の章を設け、読者の主な関心事項に即座に回答を提示するような構成としている。

本資料で示した、部材部位別の経年による腐朽劣化の発生頻度の予測値を用いては、木材の腐朽劣化の進行を抑制する構造の検討や、ライフサイクルコスト等の算定、将来維持管理計画の検討などが可能となる。

今後の活用と普及により、木材利用の検討の機会が増加し、ひいては木材利用が適切に増進され、地域活性化や地域の魅力向上に寄与することを期待する。

## 6. まとめ

本研究では、ピロディン計測器を用いて、北海道内の既存の木製工作物の腐朽劣化状況に関する広範な計測調査を実施し、結果の分析から、部材単位の「経年にともなう腐朽劣化の発生率」の予測式を得た。この予測式を用いることで、木材を利用した土木工作物における、経年に伴う部材効果等の発生頻度について算定でき、またライフサイクルコスト等の試算も可能となる。本研究でもこれを用いて、維持管理上有利となる木材利用工作物の構造についてケーススタディを行うとともに、これら成果の技術資料への取りまとめを行った。

本研究成果および取りまとめた技術資料を参照することで、木材に馴染みのない技術者や担当者においても、木材の採用を検討する一助となることを期待している。これにより、土木分野における木材利用の普及拡大や、魅力ある公共空間の形成に貢献できると考えている。

なお、本研究で示した腐朽劣化の予測式や予測値（4.章**表-11** および**表-12**）については、今回調査を行った既存の木製工作物の腐朽劣化状況に基づくものである。現時点では、16 年経過を超える木製工作物の計測調査は実施できていないことから、これより長期間の腐朽劣化の予測については、推測を含むものとなる。今後いずれかの時点で再度同様の調査を行うことで、より精度の高い予測式の算定と提示を目指すことも可能である。

## 謝辞

本研究の成果には、地方独立行政法人北海道立総合研究機構　森林研究本部　林産試験場との共同研究として実施した調査研究の成果を含んでいる。林産試験場においては、特に 3.2～3.4 に示した計測調査の企画立案、調査の実施において主導的な立場で取り組んでいただいたほか、木材を専門とする立場から、研究の全般について幅広く助言助力をいただいた。本稿に示した研究成果は、共同で行った調査計測等の結果を寒

地土木研究所の視点から分析を行い、取りまとめたものであるが、林産試験場の皆様の助言助力なくしては得られなかった成果も多くあり、ここに深く感謝を申し上げる。なお、林産試験場においては、同調査の結果をもとに別途研究成果を取りまとめており [21]、これもここに紹介する。

**参考文献**


1) 平成 28 年 5 月 24 日閣議決定：森林・林業基本計画、2016 年
2) 公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律（平成 22 年法律第 36 号）第 18 条、2010 年
3) 林野庁：森林の有する機能の定量的評価、https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/con_3.html（2020 年 7 月 20 日確認）
4) 林野庁：林野公共事業における事業評価マニュアル、2019 年 5 月
5) 林野庁：木材利用に係る環境貢献度の定量的評価手法について（中間とりまとめ)、2009 年 2 月
6) 北海道水産林務部：北海道間伐等推進計画、2013 年 3 月
7) 北海道開発局：平成 23 年北海道産業連関表、https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/keikaku/u23dsn0000001ma0.html（2020 年 7 月 20 日確認）
8) 北海道経済部経済企画局 経済企画課 経済分析グループ：経済波及効果分析ツール、2016 年 9 月、http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kks/ksk/tgs/renkanhyou23.htm（2020 年 7 月 20 日確認）
9) 北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場：公共建築物に地域材を利用するための”経済波及効果試算ツール”、2019 年 5 月
10) 笠間聡、松田泰明：自然景観・農業景観に関する良好な景観が地域にもたらす効果について、第 56 回北海道開発技術研究発表会、2013 年
11) 笠間聡、松田泰明：良好な景観が地域にもたらす効果の発現プロセスと把握モデルについて、寒地土木研究所月報、No.734、pp.2～9、2014 年
12) 笠間聡、松田泰明：事例分析に基づく景観形成の取組みの効果に関する分析整理、第 58 回北海道開発技術研究発表会、2015 年
13) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 No.1 公共事業評価手法の高度化に関する研究、2005 年 3 月
14) 国土交通省：仮想的市場評価法（CVM）適用の指針、2009 年 7 月
15) 日本工業規格 JIS A 9002 木質材料の加圧式保存処理方法
16) 日本工業規格 JIS K 1570 木材保存剤
17) 笠間聡、小林裕昇、今井良、松田泰明：北海道の高規格幹線道路に設置されたカラマツ製立入防止柵の劣化状況調査について、土木学会 第 16 回 木材利用研究発表会、2017 年
18) 今井良、小林裕昇、宮内輝久、伊佐治信一、戸田正彦：木製立入防止柵の劣化調査におけるピロディンの有効性、日本木材保存協会 第 33 回年次大会、2017 年
19) 森 満範、宮内輝久、杉山智昭、前田典昭、藤原拓哉、今井 良：北海道内で土木資材として使用されているカラマツの耐朽性、林産試験場報、第 20 巻 第 1 号、2006 年
20) （地独）北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場：木製遊具の耐久性向上を図る設計資料集、2013 年 4 月
21) 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 森林研究本部・林産試験場：耐用年数推定による柵状構造物の維持管理の手引き、資料 1、2020 年

# A STUDY ON THE WOOD MATERIALS AND ITS USABILITY IN THE CIVIL ENGINEERING SECTOR

**Research Period**： FY2015 - 2019
**Research Team**： Director for Special Research
( Scenic Landscape )
**Author**： KASAMA Satoshi
KASAI Satoshi
MATSUDA Yasuaki
OGURI Hitomi
YOSHIDA Satoshi
ENOMOTO Midori

**Abstract** ： Wood material varies in strength and quality by each individual and it also comes with concerns about durability due to decay.

In order to promote use of wood materials in the civil engineering sector, there is a need to improve understandings about the characteristics of wooden structures as well as their decay and deterioration, and provide such knowledge to the managers of civil engineering structures.

In this study, measurement using Pilodyn wood tester was carried out to investigate the extent of decay of existing wooden structures in Hokkaido, and the relationship between the extent of the decay and the service time since the installation was obtained. By using these results, prediction equations for the rate of occurrence of decay and deterioration against aging was obtained which is to apply to each member of the wood structures. Using these prediction equation enables to estimate the probability of future replacement of parts in wooden structures and its life-cycle cost. Based on these results, a case study on the constructions of wooden structures that are advantageous in terms of maintenance was presented. In addition, these results were complied into a technical document and released aimed for manegers of civil engineering structures.

**Key words** ： Wood Matrial, Wooden Structure, Durability, Decay and Deterioraion, Life-cycle cost