

信州大学審査学位論文

木製治山堰堤における腐朽の進行過程の
解明と予測

平成 26 年 9 月

秋 田 寛 己

- 目 次 -

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究史	3
1.3 目的	6
1.4 本研究の流れ	7
第2章 調査地	8
2.1 聞き取り調査の整理対象	8
2.2 腐朽調査の対象位置	8
2.3 腐朽調査の対象地概要	9
2.4 木堰堤の現地状況	11
第3章 調査方法	22
3.1 施工実績の全国聞き取り調査	22
3.2 気候条件及び構造条件の調査	22
3.3 ピロディン貫入量調査	22
3.4 成長錐調査	24
第4章 木堰堤の全国施工実績と経過年分布	25
4.1 整理対象	25
4.2 全国の木堰堤施工実績	25
4.3 構成樹種と防腐剤の有無	30
4.4 施工基数の経過年分布	33
4.5 まとめ	36
第5章 木堰堤の腐朽の進行過程と経年変化	38
5.1 対象地	38
5.2 ピロディン貫入量の相対度数の確率分布	38
5.3 木堰堤の腐朽比率	42
5.4 腐朽の経年変化	43
5.5 まとめ	50
第6章 木堰堤の腐朽の進行程度に及ぼす気候条件と構造条件	51
6.1 対象地	51
6.2 木堰堤腐朽の進行程度の評価	53
6.3 腐朽と気候条件の関係	55
6.4 腐朽と構造条件の関係	60

6.5	気候条件及び構造条件との関係からの重回帰分析	64
6.6	まとめ	66
第7章	木堰堤の腐朽速度の実態と各種条件との関係	68
7.1	対象地	68
7.2	木堰堤の貫入増加量の分布	68
7.3	腐朽速度と各種条件との関係	76
7.4	腐朽速度の重回帰分析	84
7.5	まとめ	85
第8章	長期経過した木堰堤の容積密度数による経年変化と構造計算	87
8.1	対象地	87
8.2	成長錐コアからの腐朽の実態	88
8.3	容積密度数の経年変化	94
8.4	長期経過した木堰堤における構造計算	97
8.5	まとめ	109
第9章	結言	110
9.1	木堰堤の維持管理指針の策定に向けた提言	110
9.2	今後の研究課題	113
摘要		114
謝辞		116
引用文献		120

第1章 緒言

1. 1 研究の背景

1) 木堰堤の特徴

木製治山堰堤（以下、木堰堤と略述するが同義である）とは、木材を組んで構成された谷止工や床固工のことである。一般的なコンクリート堰堤と同じく、堰堤本体の自重で外力に対抗する重力式が主であり、台形型やλ型等の形状へ分類される。木堰堤はこれまで、日本全国で多数設置されてきており、経過年の増大した施設が増加してくる中で、部材の腐朽や摩耗に対する今後の維持管理が最大の問題となっている。木堰堤研究においては、木材工学委員会（2010）が立ち上がり、近年主流の校倉式木堰堤やオールウッドタイプの木堰堤といった新工法の開発と合わせて、設計基準や維持管理指針の策定に向けた検討が鋭意進みつつある。

石川（1998）においては、以下のように木堰堤の適する条件や場所がまとめられている。

<木堰堤の適する条件や場所>

- ・大規模な土石流の発生する可能性の低い小溪流
- ・人家等に近くない森林地域
- ・環境保全、景観保全が重要な溪流
- ・冷涼な気候で常に流水がある溪流
- ・施工後比較的短期間の間に植生が活着、生育する荒廃地
- ・山腹工における谷止工
- ・災害後の応急復旧
- ・仮設として用いる場合
- ・補修や維持管理が容易な場所

屋我ら（1997）において、腐朽の原因となる腐朽菌の適温は一般に 25～40℃であると言われており、適温以下の冷涼気候では腐朽菌の活動が抑制されることになる。木材を常時水中に置き、酸素供給を減少させることも腐朽菌の活動を妨げることになるといわれている。また、木堰堤の利点や欠点については以下にまとめる。

<利点>

- ・水土保持機能と河川生態系の保全の両立が可能である。
- ・木材利用の面からは、木堰堤の施工に間伐材を用いることで林業の振興に寄与することができる。
- ・材料に木材を用いるため施工が容易で、オンサイト施工が可能である。
- ・景観の保全に優れる。

<欠点>

- ・素材が木材であるため、部材の腐朽と流水や土砂による摩耗に弱い。
- ・木材を用いるため、土石流に対して力学的に弱い。
- ・計画や設計、施工、維持管理に関する基礎的な技術が確立されていない。

木堰堤の歴史については石川（1998）が示しており、木堰堤は昭和 20 年代までは青森県坪毛沢流域のヒバ材の木堰堤群や秋田県のスギ材の木堰堤、長野県のサワラ材の木堰堤をはじめとして日本各地で古くから建設されていたが、第二次世界大戦後はほとんど建設されていないようである。その後、治山工事は耐久性の高い石材やコンクリートが主体になっていったため、それ以降の建設は減少している。しかし、最近になり大正から昭和にかけて建設された木堰堤が当時の形状を維持した状態で、次々と日本各地で見つかるようになり、加えて国民の環境保全への意識の高まりに伴い、治山工事にも生態系に配慮した工法が求められつつある。天然素材を用いた木堰堤は水土保持機能と河川生態系の保全の両立が可能であり、景観保全に対しても優れるため、環境保全型の治山工事として期待されている。



図 - 1. 1 昭和年代に施工された木堰堤の様子
(左：青森県坪毛沢流域，中：長野県南木曾町，右：長野県御岳山)

2) 腐朽の形態や定義

木材腐朽の形態や定義については、文部科学省の林産加工（2003）の高等学校用教科書と木材科学ハンドブック（2013）に記述があるため、ここでは以下に引用する。木材腐朽の定義は、木材腐朽菌と呼ばれる菌類が木材中に侵入し、その菌糸が分泌する酵素によってセルロースやリグニンなどが分解され、木材の組織が破壊されていく現象である。腐朽材の外観は、腐朽菌の種類によってほぼ決まった特徴があり、一般に褐色腐朽と白色腐朽に大別される。褐色腐朽はその末期において、材質が脆くなり、黄色、紅色、褐色などを呈する腐朽であり、白色腐朽は材が軟化して白色になる腐朽のことである。褐色腐朽を起こす菌類を褐色腐朽菌、白色腐朽を起こす菌類を白色腐朽菌という。褐色腐朽菌は主に木材中のセルロースやヘミセルロースを分解し、白色腐朽菌は主にリグニンを分解し、ヘミ

セルロースとリグニンを同時に分解する種も存在する。なお、木材腐朽菌には多くの種類があり、大部分は真菌類中の担子菌類に、また一部は同じ真菌類中の子囊菌類、不完全菌類に属している。菌類の生育には、適当な温度、湿度、空気及び栄養分が必要とされる。木材腐朽では、木材中の水分と空気及び木材成分などが関係し、特に自然環境下では水分の多少が最も深く関係するとの記述がある。

上記図書の内容をふまえると、木堰堤の腐朽進行の形態としては、土壌中から木材腐朽菌が部材に付着し、日射による部材温度上昇や周辺の湿度の増加、降雨による部材への水分供給等の影響を受けることで菌類が徐々に繁殖していくことになる。図 - 1. 2 に写真で示すように、木堰堤部材は主として、辺材部から心材部へ向かって同心円状に腐朽が進行していく。本研究での腐朽の進行程度の定義は、部材の辺材部から心材部にかけての半径方向の木材の組織分解である。木材の辺材幅は、島地ら（2002）の木材の構造の図書ではスギで 3.1～4.7cm、カラマツで 2.7～3.4cm との記述がある。



図 - 1. 2 木堰堤部材における辺材部の腐朽の様子
(左：3年経過の浪合，中：7年経過の内山3，右：7年経過の中条)

1. 2 研究史

木堰堤研究は近年になって進められてきており、大きくは木堰堤施工の調査報告、安定性や設計構造条件に関する研究、部材腐朽に関する研究に分けることができる。木材自体の腐朽の研究はこれまで進められているため、部材腐朽の研究史の前段として記述する。

1) 木堰堤施工の調査報告

木堰堤施工の歴史は前述のように古く、大正時代から昭和にかけて全国での施工事例が散見され、施設の樹種や形式は多様である。これまでの施工実績に関する報告を整理すると、唐牛（1999）による青森県坪毛沢流域の木堰堤群の調査報告がある。坪毛沢流域においては、ヒバ材で施工された入型や台形型の木堰堤6基の現存が確認されており、構造調査から当時の復元図が作成されている。その後、奈良岡ら（2002）が坪毛沢下流域を調査し、さらに5基の現存が報告されたことで坪毛沢流域の木堰堤群は11基が確認されている。同じく東北の秋田県においては、木材工学委員会の高奥（2010）により、米代川上流域において昭和30年代に施工された、3基のスギ材木堰堤の施工例の報告がある。さらに千田

ら（2012）によると秋田県内では、平成 23 年度時点の木堰堤の施工実績が約 70 基との記述がある。静岡県では、三輪（2000）による昭和 34～35 年に施工されたベイマツやベイツガの木堰堤 5 基と副堤 1 基の報告があり、現地における構造調査や当時の施工写真が紹介されている。長野県では、秋田ら（2007）が近年実績として平成 21 年までに 91 基の木堰堤の施工があることを報告している。石川ら（2003）は木曽郡王滝村の王滝川上流域において、昭和 60 年に施工されたカラマツ材の木製床固工群の現存を報告している。

2) 木堰堤の安定性や設計構造条件に関する研究

これまでは京都府を主体に、石川ら（2001）により安定計算の方法が検討され、木堰堤の耐力を知るための水平載荷試験等が行われてきた。この研究では木堰堤の構造を鋼製の枠構造砂防ダムと同形状にみなし、越流水深と堤高を組み合わせることで木堰堤底部の必要幅が検討されている。さらに木堰堤の部材の安全性を検討することで、木材を用いてもコンクリートや鋼材で設計するのと同様の安全性を発揮することが可能であると示している。京都府立大学においては、木堰堤の安定性に関する研究が行われており、石川（2001）や岩館（2000）は京都府大演習林内に自力で木堰堤を設置し、水平載荷試験等による安定性調査が実施された。

木堰堤の構造条件に関する研究例では、野田ら（2012）の秋田県における木堰堤の開発と取り組みの報告があり、オールウッドタイプの木堰堤に対し、水平載荷試験を実施することで堤体の安定性が検討され、加えてラグスクリーンの引抜・せん断試験より、接合部の安全性が定量的に評価されている。同様に設計関係では、千田ら（2012）による木堰堤のコスト削減を考慮した最適設計の検討が進められており、FEM 解析から接合ピンに生じる応力分布が求められ、安全率とコストの関係が検討されている。

3) 木材腐朽に関する研究

木材自体の腐朽の研究は、古くから多様な調査方法で議論されている。木材自体の腐朽ではこれまで杭試験が多くなされ、最近になって山腹工等の土木用木製構造物にも対象を拡大して腐朽調査が行われてきている。木材腐朽の研究初期においては目視による判断から、時代を経て近年ではピロディンやレジストグラフ、超音波計測器等の器具による腐朽調査へと移り変わりつつある。

研究初期の段階から、木材の腐朽調査を重ねてきた林業試験場では各種の杭試験が行われ、被害度という 0 から 5 までの 6 段階に目視で腐朽程度を分類し評価する方法が用いられ、木材腐朽の数値化が試みられてきた。これにより、雨宮ら（1963～1970）は、被害度と圧縮強度に相関関係があること、多様な防腐剤の腐朽阻害効果の検討、国産と南洋材それぞれ主要樹種 80 種以上の杭試験による、樹種別の杭の地上・地際・地中それぞれの部位における耐用年数の算定といった継続研究を行った。しかし、ここで用いられた被害度評価法は調査者の主観によるため、調査の習熟が必要であることや、材表面を目視で判断す

るために内部の腐朽を見逃しやすいといった問題があった。

近年になり、器具を用いて腐朽の評価を行うことが一般的となり、中でも作業効率と試験の容易さからピロディンを用いた貫入試験が多い。ピロディン貫入量と木材密度には負の相関があり、密度と強度に正の相関があることが藤原（2006）によって明らかにされており、津島（2002）では貫入量に影響を与えるとされる、樹種、比重・年輪構造、含水率、凍結の諸要因に関して検討がなされた。さらに河津（2005）によって、ピロディン貫入量と木材の代表的な強度指標である曲げ強さと圧縮強さの間に、直接負の相関があることが明らかにされた。以上のことから、ピロディンを用いた貫入試験は木材腐朽を実用的に判断できる基準に達したとされている。この他には近年、レジストグラフを用いた試験方法も実用化されている。レジストグラフを用いた穿孔抵抗試験では、朝田ら（2002）が穿孔抵抗値の大小で木材強度を判定しており、その平均値が 1 mm 未満の部分は腐朽が進んでいると示されている。これらの報告を受け、土木用の簡易木製構造物に対するピロディンやレジストグラフを使用した腐朽調査が近年になり始まりつつある。

土木用の木製構造物は、気候条件等の影響を強く受けるため腐朽の予測が難しく、耐用年数については様々な議論がなされている。ここで木製土木構造物の耐用年数に関する研究史を整理すると、独立行政法人森林総合研究所と林業試験場（1963, 1970, 1984）による被害度評価法を用いた杭試験においては、樹種別や防腐剤の種別で耐用年数が検討されてきた。長谷川ら（1993）は富山県の山腹工を対象に、こちらも被害度評価法を使用し耐用年数を算出している。飯島（1999）は被害度とピロディンによる評価法を併用して丸太の耐用年数を求めている。両者とも、被害度及びピロディン貫入量から求めた使用不能率と経過年数の関係を Richards のロジスティック生長曲線で近似している。海老原（2003）は長野県内のカラマツ製山腹工の木材内部の腐朽について、ピロディンを用いた貫入試験に加え、木口面の腐朽断面積を求めて実態を解明している。この調査によると、施工後 8 年経過した山腹工では断面積の約 54%が腐朽し、強度が健全時の 3 分の 1 以下まで低下すると報告している。津島ら（2005）は、大分県内の木製防護柵等の土木構造物に対し、被害度評価法とピロディン貫入量の腐朽調査から耐用年数を試算している。山内ら（2013）は木製土木構造物の耐用年数とは多少異なるが、長野県におけるカラマツ切り捨て間伐木の分解までの年数について、容積重から算出している。

木材腐朽と気候条件との関連性に関する研究は少なく、長谷川（1989, 1996）は富山県内の木造住宅を対象に、木材腐朽気象指数 Climate index（以下、CI と略称する）と住宅耐用年数の関係が調査されている。結果として、CI が増加するほど、耐用年数が減少する傾向が示されている。

4）木堰堤腐朽に関する研究

木堰堤の腐朽に関する研究事例として、最初に林野庁治山課、森林総合研究所、青森営林局（1998）による青森県坪毛沢流域の木堰堤群を対象とした合同研究がある。ここでの

木堰堤の腐朽調査はピロディンや超音波計測器等を用い、部材内部における腐朽の進行状況を解明するものであった。また、未解明であった坪毛沢流域の下流側 5 基の木堰堤に関しては、後に秋田ら（2006）によって調査が行われ、上流側 6 基と同様に復元図が得られ、摩耗と腐朽の部材残存形状の違いや、 λ 型と台形型による部材残存率の差が明らかにされた。

近年のピロディン貫入試験を用いた木堰堤腐朽の研究としては、秋田ら（2007）が長野県を主な調査地としてこれまで、カラマツ材木堰堤の腐朽の経年変化について報告している。ピロディン貫入量の平均値 μ と標準偏差 σ から求める分布曲線により、腐朽の進行程度は定量化でき、この 2 つの因子は経過年数と関係するため、時間経過による部位別の腐朽進行の予測が可能であることを示してきた。また、田淵ら（2011）の部材強度の研究では、腐朽した木堰堤部材を対象としてピロディン貫入量と曲げ強度の関係が報告され、腐朽部材でもピロディン貫入量と曲げ強度の相関が高いため、ピロディン貫入量から残存強度の推定が可能であることが示唆されている。

一方で、レジストグラフの穿孔抵抗試験による木堰堤腐朽調査では、Dang et al. (2008) が京都府内の 4 基のスギ材木堰堤を対象として、腐朽速度と計画高水位、暖かさの指数、最大積雪深との関係を報告しており、計画高水位と腐朽速度には有意な関係が認められるとし、暖かさの指数と最大積雪深には関係性が認められないことを示している。石川や Dang et al. (2007, 2010) は、レジストグラフによる 95% 確率値から木堰堤の腐朽速度（湿潤本体部：2.7mm/年、乾燥本体部：4.3mm/年、乾燥袖部：5.0mm/年）を求めている。さらにこの研究では、算出した腐朽速度と設計計算によって部材直径別の耐久年数を試算している。木材工学委員会でもレジストグラフを使用した腐朽調査が進められており、山内ら（2013）は長野県内の施工後 6～13 年経過までのカラマツ材木堰堤 10 基を対象として、腐朽速度の調査結果を示し、心材・辺材率の差を影響因子に挙げている。臼田ら（2014）は、岐阜県と秋田県内の施工後 5.5～11.5 年経過までの 8 基のスギ材木堰堤を対象に、こちらも腐朽速度を示しており、流水による影響が大きいことを報告している。

以上の木材自体の腐朽も含めた研究史を概観すると、木堰堤の腐朽に関する研究はまだ少なく、将来的な維持管理指針を策定していく中で、全国の木堰堤施工状況や使用樹種等の基本条件についても整理されていない。さらには、木堰堤部材の腐朽メカニズムや影響因子について、定量的に高い普遍性を持った判断基準・評価手法は未解明である。木堰堤の木材腐朽という問題には課題が多く、腐朽しやすい気候条件や構造条件の解明が不十分であり、腐朽速度の予測も難しいことから部材交換方法等の開発は遅れている。以上の背景より、木堰堤の計画段階においての具体的な腐朽の判断指標や部材交換までの基準は地域レベルも含めて定められていないのが現状である。

1. 3 目的

本研究は現地による腐朽継続調査を行うことで、木堰堤の腐朽の進行過程及び気候条件

や構造条件といった各種条件による腐朽への影響を解明することを目的とする。本研究によって、普遍性のある腐朽指標を分析し、部材交換年数の予測を含めた木堰堤の将来的な維持管理指針の策定に向けた提言を示す。

1. 4 本研究の流れ

本研究の流れについて、図 - 1. 3 に示す。本研究では全国施工実績の聞き取り調査、気候条件及び構造条件の調査、ピロディン貫入量調査、成長錐調査の4つの調査を実施しており、4章から8章にかけて考察を行う。そして最後には、木堰堤の将来的な維持管理指針の策定に向けた提言を示す。

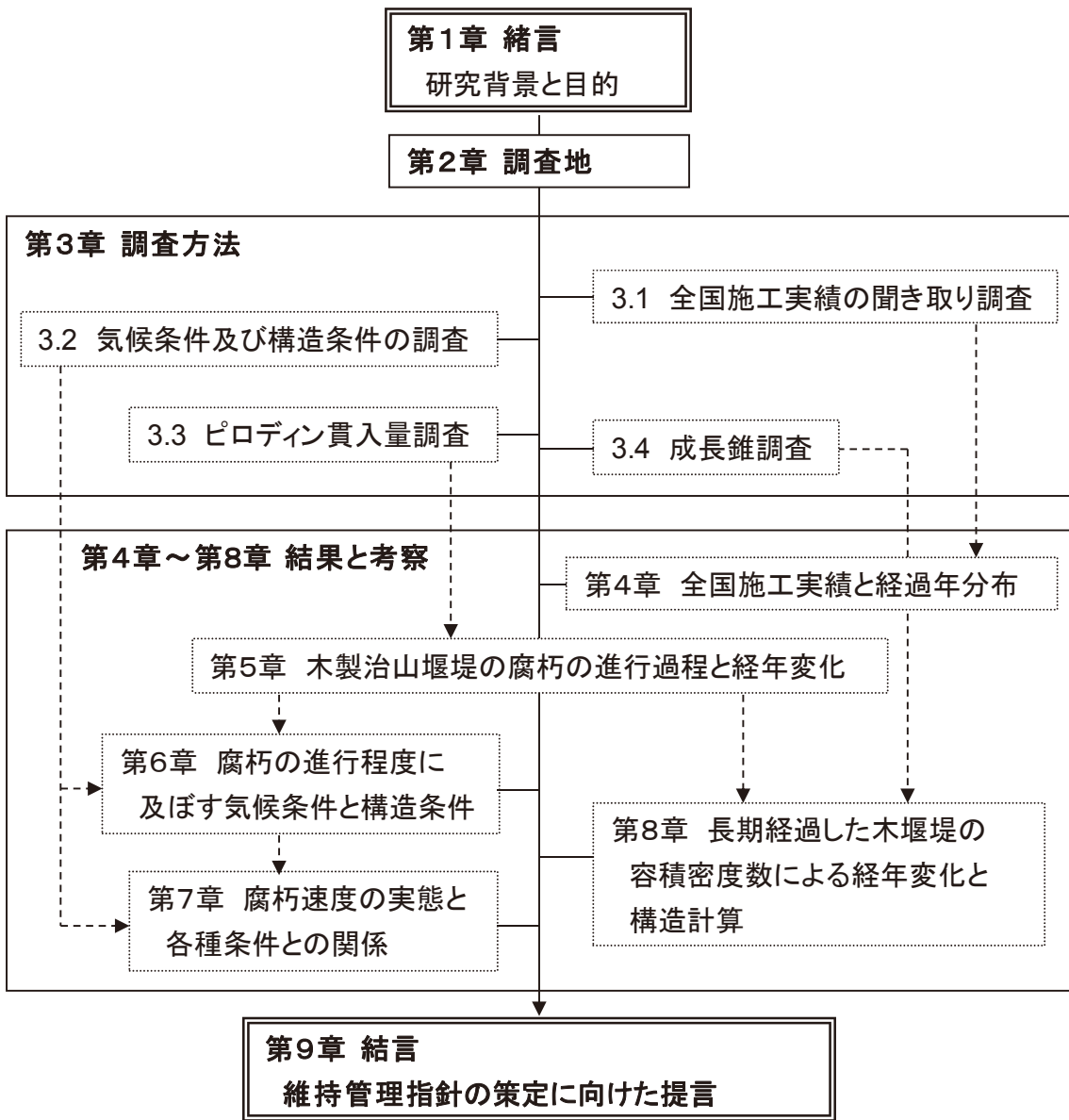


図 - 1. 3 本研究の流れ

第2章 調査地

2. 1 聞き取り調査の整理対象

整理対象は国有林内と民有林内に設置された、日本全国の木堰堤である。本研究における対象施設は堤高 3.0m 程度の木製の堰堤工・谷止工・床固工である。一般的に木堰堤と定義される施設を対象とすることから、木製の帯工や護岸工は対象外とし、木製型枠のコンクリート堰堤工も同様に対象外としている。また、大正年代や昭和前半の古い施設は不明な諸元が多く、現場で流失している可能性もあることから、昭和後半から平成までに入り込む期間に竣工した近年の施設を対象とした。

2. 2 腐朽調査の対象位置

本研究の調査地は、長野県・静岡県・青森県の木堰堤施工地である。本研究では腐朽と気候条件との関係性を明らかにするため、気候条件には幅を持たせることとし、年平均気温の高い静岡県、低い青森県、中間的な長野県という位置付けで3県を対象とした。そのため、4章で示す全国的に継続施工されている北海道や京都府は対象としていない。

本研究における全ての調査対象地について、図 - 2. 1 に示す。調査地は3県の18箇所となり、本論文の結果と考察の各章によって対象地の組み合わせが異なることになる。そのため、各章においてはその章の冒頭で対象地緒元を示している。

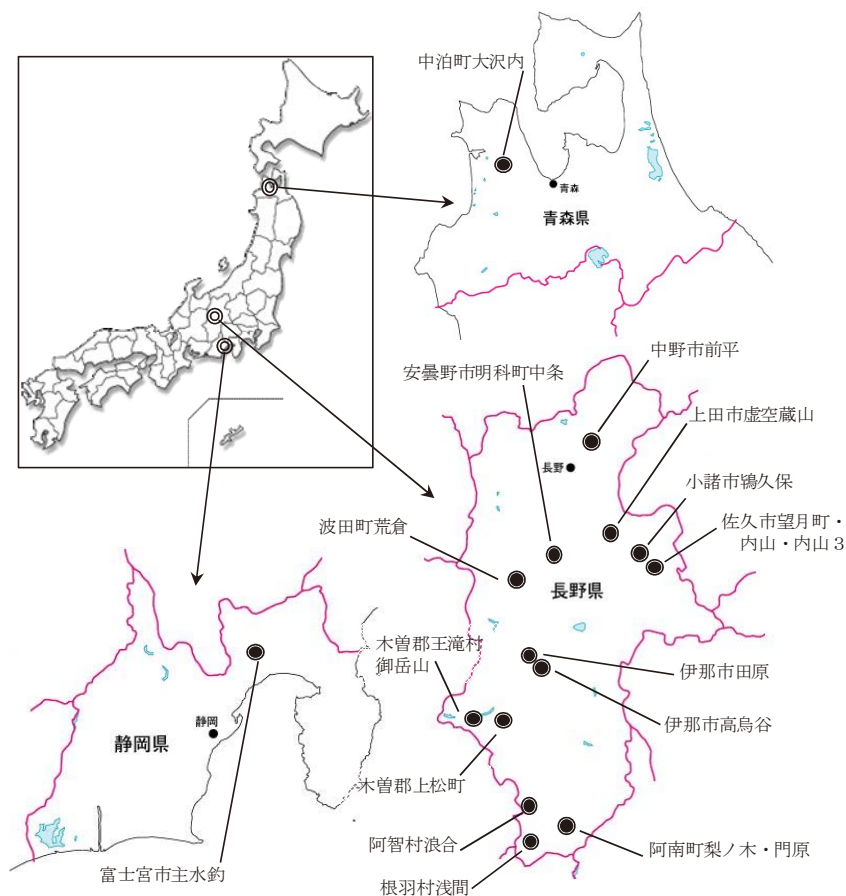


図 - 2. 1 本研究における全調査地の位置

2. 3 腐朽調査の対象地概要

本研究の腐朽調査で対象とした木堰堤の気象条件及び構造条件、使用樹種といった概要について、表 - 2. 1 に示す。この表には全対象地をまとめて示しており、結果と考察の各章ではその章で対象とする木堰堤の一覧表を示すこととする。

施工地の流域面積は電子国土ポータルから図上で計測し、年平均気温や降水量は、設置場所に近いアメダスデータより算出した。アメダスデータの適用期間が異なるのは、腐朽と気象条件の関係を調査した木堰堤は竣工年から腐朽調査年までのデータを採用しているためであり、それ以外の木堰堤は概ね過去 10 年程度の平均値を得るための期間としている。調査地の標高は 500m 以上の山地が多く、長野県内の調査地では大半が 800m 以上の山岳地に位置している。青森県の大沢内の調査地の標高がもっとも低く、20m となっている。流域面積は 1km² 以下の小規模な溪流に施工されているものが多く、集水地形となる箇所を設置されているために、堤体は湿潤な環境条件下にあると推定される。

対象とした木堰堤の形状は全て台形型で、部材はカラマツもしくはスギ間伐材の丸太、もしくは太鼓材の使用という基準に統一し調査することとした。カラマツとスギの木堰堤を選択したのは、4 章で示す全国的に木堰堤での主要な構成樹種のためである。部材径は、丸太で $\phi = 15 \sim 20\text{cm}$ 程度、太鼓材で 2cm ほどカットされている。調査対象の木堰堤は林野庁の施工基準に準じて施工されており、部材径に大きな違いは見られず、防腐剤も使用されていない。腐朽調査時点の木堰堤の経過年は、主に 1 ～ 9 年経過までである。また、御岳山濁沢流域に現存する昭和 60 年度施工の 21 年経過した流路工内の床固工に関しても、多年経過の腐朽実態を把握するために調査を行っている。対象とした経過年には、1 ～ 9 年と 21 年と間が空いており、この年数を選択したのは対象地の青森県、静岡県、長野県において可能な限り長期経過した木堰堤としたためである。施設構造は一般構造図や計画縦断図で確認しており、それぞれ地形条件で堤長や堤高が異なっている。腐朽の比較基準とするため、施工直後のデータが必要になるが、本研究においては 2006 年に上松でカラマツ材の施工直後の調査を行っているため、そのデータを使用する。スギ材では、2009 年に主水釣で施工直後の調査を行っている。これは帯工であるため、袖部の流水の影響が無い部位からデータを取得した。

表 - 2 . 1 腐朽調査における全対象地概要

県名	施工地	竣工年及び調査時経過年										木堰堤構造				立地及び気候条件				アメダス観測所			
		竣工年	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	樹種	堤長 (m)	堤高 (m)	標高 (m)	流域面積 (km ²)	年平均 気温 (℃)	年平均降 水量 (mm)	観測所名	標高 (m)	施工地との 距離 (km)	適用期間
長野	内山 3	2003				●	●	●	●	●	○		8.50	2.10	850	0.17	10.9	1,044	佐久	683	11.4	2003～2010	
	内山	2002					●						9.78	2.10	1,040	0.10	10.9	1,063	佐久	683	12.0	1998～2008	
	望月	2005		●									22.50	2.80	1,350	0.82	10.3	1,096	立科	715	18.6	1998～2008	
	虚空山	2005						●					17.50	3.15	520	3.90	12.2	958	上田	502	3.2	2004～2010	
	碓久保	2008					○						15.50	2.80	750	0.01	9.3	1,039	東御	958	10.7	2008～2012	
	中条	2006		●			●			○			9.00	2.10	620	0.05	12.1	1,093	松本	610	11.4	2006～2013	
	荒倉	2006		●									10.00	3.08	950	0.04	12.2	1,064	松本	610	16.1	1998～2008	
	田原	2003				●					○	カラマツ	10.98	1.96	626	0.09	11.2	1,570	伊那	633	5.5	2003～2007	
	高鳥谷	2005		●			●			○			19.50	3.08	1,080	0.09	11.7	1,498	伊那	633	7.8	2005～2010	
	上松	2006		●				●					8.65	2.52	800	0.02	10.9	1,941	木曽福島	750	14.8	2006～2011	
	御岳	1985	※21年経過											21.00	3.00	1,350	0.87	10.9	3,639	木曽福島	750	26.4	1998～2008
	浪合	2003				●	●	●	●	●	○		16.00	2.00	1,090	0.07	9.7	2,644	浪合	940	2.7	2003～2010	
	梨ノ木	2004				●	●						19.50	3.00	950	0.89	9.6	1,893	阿南	610	4.5	1998～2008	
	門原	2005		●								22.98	3.00	910	0.58	9.6	1,893	阿南	610	3.6	1998～2008		
長野	前平	2003			●							8.50	2.10	660	1.25	11.5	1,396	飯山	313	19.3	2004～2010		
	浅間	2004			●							12.50	3.12	810	0.94	9.5	2,322	浪合	940	25.7	2004～2010		
静岡	主水釣	2008		●		●	●	●					15.00	3.00	600	0.33	16.2	2,426	富士	66	20.1	2008～2011	
青森	大沢内	2006				●	●	●				10.50	2.10	20	0.65	10.6	1,253	五所川原	9	19.4	2006～2011		

調査時経過年：●：ビロデイン貫入量調査、○：成長維調査

調査時経過年; ●:ピロデイン/貫入量調査、○:成長錐調査

2. 4 木堰堤の現地状況

調査対象とした木堰堤の現地状況については、図 - 2. 2～図 - 2. 46 に示す。撮影写真は施工地ごとにまとめ、かつ経年変化がわかるよう上下に掲載している。撮影写真より、年数を経過するにつれて部材の色調の変化が確認され、腐朽が進行している様子がわかる。



図 - 2. 2 中野市前平の木堰堤（スギ材）：2006 年 10 月撮影 3 年経過



図 - 2. 3 中野市前平の木堰堤（スギ材）：2012 年 7 月撮影 9 年経過



図 - 2. 4 上田市虚空山の木堰堤（カラムツ材）：2010 年 7 月撮影 5 年経過



図 - 2. 5 上田市虚空山の木堰堤（カラムツ材）：2012 年 6 月撮影 7 年経過



図 - 2. 6 安曇野市中条の木堰堤（カラマツ材）：2006 年 5 月撮影 1 年経過



図 - 2. 7 安曇野市中条の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 9 月撮影 2 年経過



図 - 2. 8 安曇野市中条の木堰堤（カラマツ材）：2011 年 7 月撮影 5 年経過



図 - 2. 9 波田町荒倉の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 9 月撮影 1 年経過



図 - 2. 10 小諸市鵜久保の木堰堤（カラマツ材）：2013 年 6 月撮影 5 年経過



図 - 2. 11 佐久市望月町の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 11 月撮影 2 年経過



図 - 2. 12 佐久市内山の木堰堤（カラマツ材）：2006 年 11 月撮影 4 年経過



図 - 2. 13 佐久市内山 3 の木堰堤（カラマツ材）：2006 年 12 月撮影 3 年経過



図 - 2. 14 佐久市内山 3 の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 9 月撮影 4 年経過



図 - 2. 15 佐久市内山 3 の木堰堤（カラマツ材）：2009 年 12 月撮影 6 年経過



図 - 2. 16 佐久市内山 3 の木堰堤（カラマツ材）：2010 年 11 月撮影 7 年経過



図 - 2. 17 佐久市内山 3 の木堰堤（カラマツ材）：2012 年 11 月撮影 9 年経過



図 - 2. 18 伊那市田原の木堰堤（カラマツ材）：2006 年 4 月撮影 3 年経過



図 - 2. 19 伊那市田原の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 10 月撮影 4 年経過



図 - 2. 20 伊那市田原の木堰堤（カラマツ材）：2013 年 4 月撮影 9 年経過



図 - 2. 21 伊那市高鳥谷の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 8～11 月撮影 2 年経過



図 - 2. 22 伊那市高鳥谷の木堰堤（カラマツ材）：2010 年 4 月撮影 5 年経過



図 - 2. 23 伊那市高鳥谷の木堰堤（カラマツ材）：2012 年 4～8 月撮影 7 年経過



図 - 2. 24 木曽郡上松町の木堰堤（カラマツ材）：2006 年 10 月撮影 0 年経過



図 - 2. 25 木曽郡上松町の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 8 月撮影 1 年経過



図 - 2. 26 木曽郡上松町の木堰堤（カラマツ材）：2011 年 5 月撮影 5 年経過



図 - 2. 27 木曽郡上松町の木堰堤（カラマツ材）：2012 年 5 月撮影 6 年経過



図 - 2. 28 阿智村浪合の木堰堤 (カラマツ材) : 2006 年 7~9 月撮影 3 年経過



図 - 2. 29 阿智村浪合の木堰堤 (カラマツ材) : 2007 年 6 月撮影 4 年経過



図 - 2. 30 阿智村浪合の木堰堤 (カラマツ材) : 2008 年 6 月撮影 5 年経過



図 - 2. 31 阿智村浪合の木堰堤 (カラマツ材) : 2009 年 6 月撮影 6 年経過



図 - 2. 32 阿智村浪合の木堰堤 (カラマツ材) : 2010 年 7 月撮影 7 年経過



図 - 2. 33 阿智村浪合の木堰堤（カラマツ材）：2012 年 10 月撮影 9 年経過



図 - 2. 34 阿南町梨ノ木の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 6 月撮影 3 年経過



図 - 2. 35 阿南町門原の木堰堤（カラマツ材）：2007 年 5 月撮影 2 年経過



図 - 2. 36 根羽村浅間の木堰堤（スギ材）：2007 年 11 月撮影 3 年経過



図 - 2. 37 中泊町大沢内の木堰堤（スギ材）：2008 年 8 月撮影 2 年経過



図 - 2. 38 中泊町大沢内の木堰堤（スギ材）：2009 年 5 月撮影 3 年経過



図 - 2. 39 中泊町大沢内の木堰堤（スギ材）：2010 年 8 月撮影 4 年経過



図 - 2. 40 中泊町大沢内の木堰堤（スギ材）：2011 年 8 月撮影 5 年経過



図 - 2. 41 中泊町大沢内の木堰堤（スギ材）：2012 年 5 月撮影 6 年経過



図 - 2. 42 富士宮市主水釣の木製流路工（スギ材）：2009 年 8 月撮影 0 年経過



図 - 2. 43 富士宮市主水釣の木堰堤（スギ材）：2009 年 8 月撮影 1 年経過



図 - 2. 44 富士宮市主水釣の木堰堤（スギ材）：2010 年 5 月撮影 2 年経過



図 - 2. 45 富士宮市主水釣の木堰堤（スギ材）：2011 年 8 月撮影 3 年経過



図 - 2. 46 富士宮市主水釣の木堰堤（スギ材）：2012 年 7 月撮影 4 年経過

第3章 調査方法

3. 1 施工実績の全国聞き取り調査

全国の森林管理局及び全都道府県の農林部局の関係機関へ聞き取り調査を行い、各種の整理項目を集計した。聞き取り調査はこれまで2回実施し、1回目は平成24年4月～8月までであり、平成23年度の完成施設までを調査した。このときには平成24年度完成予定の施設も聞き取りを行っているが、調査期間が8月と年度の半ばであったため、平成24年度の施設数は確定値とはなっていなかった。2回目の聞き取り調査は、平成25年12月～平成26年4月までとして、平成26年度現在までの完成施設を最終的に調査した。1回目の聞き取り調査において施工無しとの回答があった機関においても、その後の施工を確認するため2回目の聞き取り調査を実施している。

整理項目は、施工地住所・予算年度・竣工年度・樹種・基数・工種・防腐剤使用有無の7項目である。聞き取り調査は、国有林内において北海道森林管理局、東北森林管理局、関東森林管理局、中部森林管理局、近畿中国森林管理局、四国森林管理局、九州森林管理局の7機関が対象である。そして民有林内は47都道府県の農林部局となるため、本研究では合計すると54機関からの回答結果を集計した。

3. 2 気候条件及び構造条件の調査

気候条件については調査地の項目で前述したとおり、施工地近傍のアメダス観測所データより気候指数を算出するため、気象データを集計した。項目は気候指数の因子となる、月平均気温、月降水量、月降水日数である。月別の気象データを集計し、合わせて年毎のデータも集計した。集計期間は、木堰堤施工後から腐朽調査時点までの期間に合わせた。開空度は木堰堤1基につき本体及び、袖部両岸の計3箇所の全天空写真を撮影し平均化することで、解析ソフト(CanopOn 2, URL: <http://takenaka-akio.cool.ne.jp/etc/canopon2/>)を使用し算出した。なお、木堰堤構造条件と樹種については、一般構造図や計画縦断図から確認している。



図 - 3. 1 全天空写真撮影と開空度解析の様子

3. 3 ピロディン貫入量調査

ピロディン貫入量調査は、スイス PROCEQ 社製の Pilodyn (ピン打ち込み器) を用いてストライカーピン (max=40mm、 ϕ =2.5mm、6 J) を打ち込み、部材の外側から内側への

半径方向のピロディン貫入量を測定した。ピロディンの最大値は 40mm であるため、測定は木堰堤部材の辺材部における腐朽が主な対象となる。辺材幅は緒言で記述したが、島地ら（2002）の木材の構造の図書によりスギで 3.1～4.7cm、カラマツで 2.7～3.4cm と示されており、辺材部の腐朽は概ねピロディンで測定できる。ピロディン調査状況については、図 - 3. 2 に示す。



図 - 3. 2 ピロディンと貫入量調査の様子

ピロディンの測定単位は 1 mm であり、目盛りの間に入った値は 0.5mm 単位で読み取った。可能な限り正確なピロディン貫入量を得るため、目視で確認できる部材の割れや節は外して打ち込みを行った。ここで、ピロディン貫入量の測定値はばらつきが大きいことが知られているため、測定誤差を平準化するためにも対象 1 堰堤に対し、可能な限り測定値を得るようにした。目安としては、横の部材 1 段につき、 $n=100$ ほどの測定値を部材全体で得るようにした。ピロディン貫入量の測定範囲は 1 ～ 40mm と有限であり、貫入量 40mm 以上は一括して階級値 41mm として評価した。この最大値の当てはめは、ピロディン試験器の使用上での課題となるが、今回は 7 年経過までの腐朽データであり、40mm 以上を一括した場合でも後述の確率分布全体への影響が小さいと判断した。

ここで、測定部材に関して述べると、図 - 3. 3 のように流水方向と平行に配列した部材を縦部材とし、直交する部材を横部材とした。

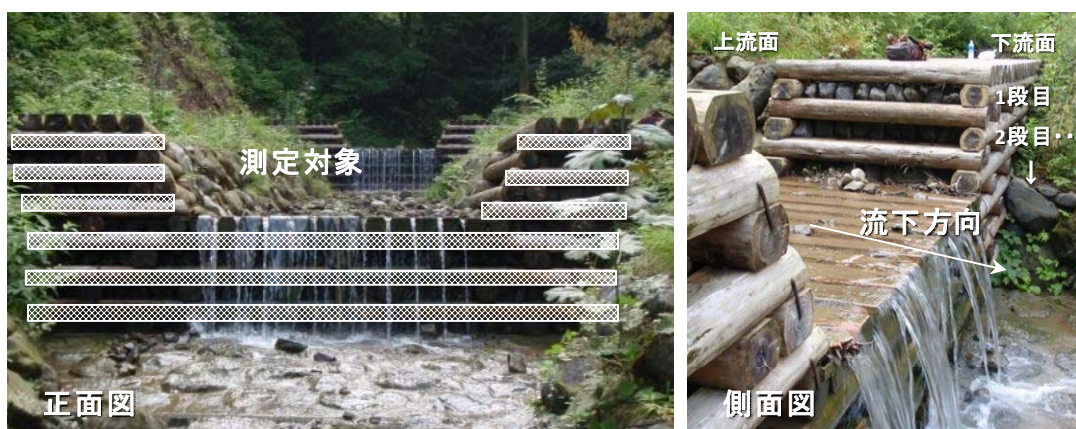


図 - 3. 3 測定部材の位置

本研究においては主に横部材を測定対象としており、その理由として木堰堤に作用する水圧や土圧といった応力は、横部材に対して力学的に関わる場所が大きいと考えられるためである。縦部材の天端位置の部材に関してはこれまでに調査を行っているが、縦位置のいわゆる控材については構造上、データを取得できる箇所は下流面で先端が露出している箇所に限られるため、本研究では対象としない。貫入位置は、横部材の側面に5～20cm間隔で、地際まで、縦方向に3箇所ずつ打ち込んでいった。部材が太鼓材の場合、辺材削除面が測定値に影響することが想定され、削除面には打ち込んでいない。

経過年数が他の木堰堤と異なる御岳堰堤は袖部の無い本体のみの構造であり、本体の横部材は他の木堰堤と同様の方法で打ち込み、データの得られない袖部に関しては堰堤付近に同年代に施工された護岸工と導流堤が存在するため、横部材の方法と同様に打ち込むことで袖部の代替とした。

3. 4 成長錐調査

成長錐調査はスウェーデン Haglof 社製の成長錐（ $\phi=5.0\text{mm}$ ）を使用して円柱状の試験体コアを抜き取り、実験室に持ち帰ることで自然状態のコア重量を求めた。コア採取後は、現場の水分状態を維持するため、アルミ箔に包みポリ袋密封し、速やかに実験室へ持ち帰った。室内乾燥機でコアを全乾させて部材の含水率を求め、全乾重量を算出した。成長錐コアは木堰堤部材の半径分となる $L=10\text{cm}$ の長さを採用し、堤体を構成する部材各段で1試験体を採取した。ピロディンとは異なり、最大値の制限がないため、部材の心材部までの腐朽を対象にできる。1基あたりの成長錐サンプル数は12前後である。コア重量の計測後は、全乾重量と湿潤時のコア体積から容積密度数（ g/cm^3 ）を算出した。図 - 3. 4 には、成長錐調査の様子と室内試験の様子を示す。

本研究の腐朽調査は現地調査主体であり、室内の化学試験等を行っていない。これは、あくまで現地で腐朽程度を定量化することを目的としているためである。



図 - 3. 4 成長錐調査と室内試験の様子

第4章 木堰堤の全国施工実績と経過年分布

日本全国のこれまでの木堰堤施工実績を明らかにすることは、将来的な維持管理を検討していく上で有用な基礎資料となりうる。しかしながら、現在までの日本全国における木堰堤の施工実績は各森林管理局や県レベルの地域単位で管理されているものの、集約的に整理されていないのが現状である。そこで本章では、今後の木堰堤の維持管理指針の策定のための基礎資料とするべく、全国的に聞き取り調査を行うことで近年における木堰堤の施工実績を明らかにすることを目的とする。なお本章は、秋田ら（2012）の資料に対し2回目の聞き取り調査を行い、新規図表と新たな考察を追加して再構成した。

4. 1 整理対象

整理対象については2章に示したが、国有林内と民有林内に設置された日本全国の木堰堤であり、聞き取り調査の対象機関は、3章に示したとおり全国の森林管理局と全都道府県の農林部局である。

4. 2 全国の木堰堤施工実績

1) 国有林内

表 - 4. 1 には、国有林内における木堰堤施工基数を示し、図 - 4. 1 には施工推移を示す。なお、ここでの地域別の区分は、福島県を関東に含めるなど森林管理局管轄内での整理としている。平成 25 年度までの国有林内の施工実績は 248 基であり、長野県では昭和 59 年の古くから施工されている。施工推移では平成 14 年まで徐々に上昇し、多少の変動はあるが平成 21 年度まではほぼ横ばいで推移し、平成 22 年度から現在まで再度増加している傾向が見られる。施工数で見ると、直近の平成 25 年度が最大であり、前年の倍以上となっている。中でも北海道で平成 22 年度に 12 基、平成 23 年度に 14 基と他の年度に比べて施工が多いことが影響しており、平成 25 年度の施工数の半数近くは北海道における施工となっている。国有林内においては毎年、一定基数が施工されており、近年の施工数は増加傾向にあると考えられる。地域別では北海道地方が最も多く、関東地方や中部地方で施工が多い傾向が見られる。東北地方や四国地方、九州地方では比較的施工が少ない。

近年になって国有林内で木堰堤施工が増加している理由は、平成 21 年 12 月に農林水産省で策定した、農林水産省木材利用推進計画が主因になっていると考えられる。この計画は、国として温室効果ガスを 2020 年まで、1990 年比で 25%削減する中期目標達成のために策定されており、農林水産分野として公共事業へ積極的な木材利用を推進している。また、この計画は取り組み期間が平成 22 年度～平成 26 年度までと定められており、今回の調査結果による増加傾向と重なっており、施策の効果が読み取れる。

表 - 4. 1 国有林内の木堰堤施工実績

No.	地域名	竣工年度 基数																								合計						
		S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	
北海道森林管理局																										65						
1	北海道																									65						
東北森林管理局																										26						
2	青森県																									16						
3	岩手県																									4						
4	宮城県																									1						
5	秋田県																									3						
6	山形県																									2						
関東森林管理局																										52						
7	福島県																									12						
8	東京都																									0						
9	神奈川県																									0						
10	埼玉県																									0						
11	千葉県																									0						
12	茨城県																									0						
13	栃木県																									5						
14	群馬県																									9						
15	山梨県																									5						
16	新潟県																									15						
17	静岡県																									6						
中部森林管理局																										55						
18	富山県																									0						
19	愛知県																									2						
20	岐阜県																									7						
21	長野県	9	15											1	1	6	1	6	1	1	2	2	1	2	3	1	2	2	3	46		
近畿中国森林管理局																										26						
22	石川県																									0						
23	福井県																									0						
24	大阪府																									8						
25	奈良県																									0						
26	兵庫県																									3						
27	京都府																									0						
28	滋賀県																									2						
29	和歌山県																									3						
30	三重県																									0						
31	鳥取県																									5						
32	島根県																									3						
33	岡山県																									0						
34	広島県																									2						
35	山口県																									0						
四国森林管理局																										12						
36	徳島県																									2						
37	香川県																									1						
38	愛媛県																									4						
39	高知県																									5						
九州森林管理局																										12						
40	福岡県																									0						
41	佐賀県																									0						
42	長崎県																									3						
43	熊本県																									0						
44	大分県																									0						
45	宮崎県																									4						
46	鹿児島県																									5						
47	沖縄県																									0						
集計		9	15	0	0	0	0	0	0	1	0	1	6	0	1	1	2	3	4	12	12	11	5	12	6	6	11	22	28	23	57	248

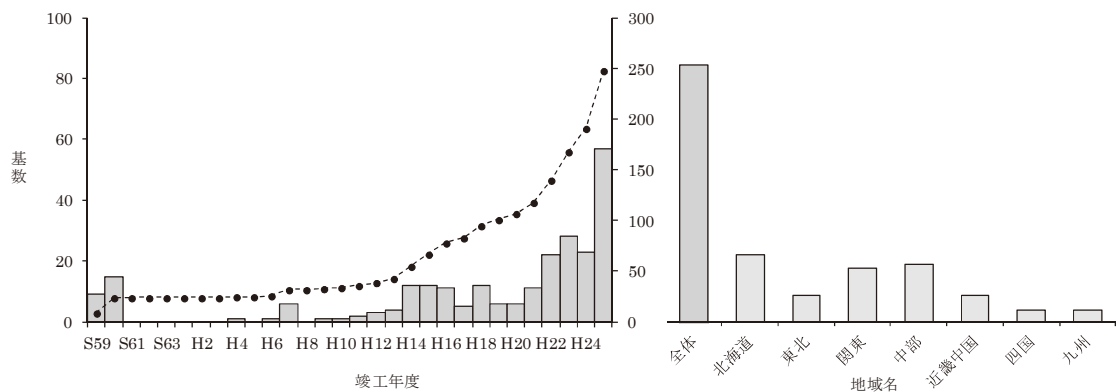


図 - 4. 1 国有林内の施工推移と地域別基数

2) 民有林内

表 - 4. 2 には、民有林内における木堰堤施工基数を示し、図 - 4. 2 には施工推移を示す。平成 25 年度までの民有林内の施工実績は 918 基である。北海道では昭和 62 年度から施工が始まっており、福井県や石川県でも平成 3 年度や平成 4 年度と他県と比較して早くから施工が始まっていることがわかる。施工推移では、平成 14 年度から平成 18 年度の施工基数が特に多く、この 5 ヶ年で 497 基が施工されている。また、施工基数のピークは平成 16 年度となっており、そこから平成 19 年度にかけて減少傾向であり、平成 25 年度の現在まではほぼ横ばいである。平成 16 年度をピークとしてそれまで木堰堤施工が増加していたことは、平成 11 年 4 月の森林土木木製構造物暫定設計指針が出されたことと関係していると思われる。この国の設計指針を参考として、都道府県レベルでも設計指針が作成されており、中でも北海道や京都府では平成 11 年度～平成 12 年度の早い時期に独自の設計マニュアルを作成している。また、施工ピークが平成 16 年度となっていることは、森林土木木製構造物設計等指針の制定年と関連している。この指針は、国や都道府県において木材の有効かつ積極的な利用のため、暫定設計指針の後継として平成 16 年 5 月に正式に通達されたものである。このような設計マニュアルが参考となり、都道府県でも順次木堰堤の施工がこれまで進んできたと考えられる。

地域別の施工基数では北海道や近畿地方が最も多くなり、さらに関東・信越地方でも施工基数が多い傾向がある。これは、京都府や長野県の施工基数が他県より多いことが影響していると考えられる。道府県によって施工数に差がつく一因としては、木堰堤の設計指針や設計マニュアル内容の充実といったことが考えられる。北海道や京都府では他県と比較して早い時期に設計マニュアルが整備されたことから、その分で施工基数が多いと思われる。さらに北海道の設計マニュアル（2000）は、維持管理の項目が充実しており、道内における木製柵工の腐朽調査結果から耐用年数が算出され、研究成果が活かされたマニュアルとなっている。その地域での腐朽調査結果が設計マニュアルに反映されることで、北海道のように地域内での木堰堤施工は増加につながっていくと考えられる。

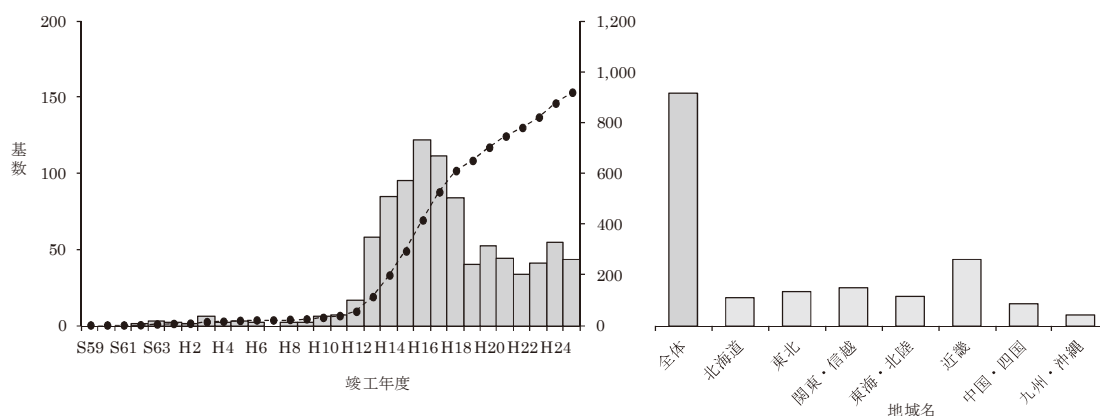


図 - 4. 2 民有林内の施工推移と地域別基数

表 - 4. 2 民有林内の木堰堤施工実績

No.	地域名	竣工年度 基数																									合計						
		S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25		
北海道・東北地方																											247						
1	北海道			1	3	2	1	2	1	1	2				1		4	2	16	9	13	7	5	5	7	5	2	1	9	12	111		
2	青森県																							6	3						7	16	
3	岩手県																				1	2	2			6				2		13	
4	宮城県																				3								2	6	1	12	
5	秋田県																	6	18	9	7	4	1	5	7	4	10	7	3	4		85	
6	山形県																	6	1				2									9	
7	福島県																				1												
関東・信越地方																											153						
8	東京都																															0	
9	神奈川県																															0	
10	埼玉県																					2										2	
11	千葉県																															0	
12	茨城県															2	2	4		3			1	11	1				5	8		37	
13	栃木県																							2	3							5	
14	群馬県																															0	
15	山梨県																					1										1	
16	新潟県															3										1		6	3		1	17	
17	長野県																		2	7	11	8	35	19	2	7						91	
東海・北陸地方																											116						
18	富山県																		3	1	1									3		8	
19	石川県																	2			2	2		8	1							18	
20	福井県																		2	1												9	
21	愛知県							4										3	3							2			2	1		11	
22	岐阜県																															0	
23	静岡県																	1	1	2	5	22	23	4	3	6	3					70	
近畿地方																											266						
24	大阪府														2	2					3	5	8	4	4	7				9	7	51	
25	奈良県																								2				1	1		6	
26	兵庫県																				3	28	2									39	
27	京都府																3	3	7	8	18	8	10	5	6	9	11	13	18	7	8	134	
28	滋賀県																	3	1		1	1					2					8	
29	和歌山県															2																2	
30	三重県																		11	1	6	3	2	3								26	
中国・四国地方																											89						
31	鳥取県																				2											2	
32	島根県																	2			7	2	1	4		1		4				21	
33	岡山県																				1	1	3	1	2							8	
34	広島県																				4	6	3	7								20	
35	山口県																				2	3	3	5	2		2	6	2			25	
36	徳島県																															0	
37	香川県																									2				1		4	7
38	愛媛県																															1	
39	高知県																					5							1			5	
九州・沖縄地方																											47						
40	福岡県																															0	
41	佐賀県																															0	
42	長崎県																																0
43	熊本県																													4		26	
44	大分県																															4	
45	宮崎県																															1	
46	鹿児島県																									4						4	
47	沖縄県																											1	1			10	
集計		0	0	0	1	3	2	1	6	2	3	2	0	2	2	6	7	17	58	85	95	122	111	84	40	52	44	34	41	55	43	918	

3) 全体実績

表 - 4. 3 に国有林内と民有林内における木堰堤施工基数の合計結果を示し、図 - 4. 3 には全体の施工推移と地域別の比較を示す。ここでの地域区分は、民有林に合わせて7区分としている。集計結果として平成 25 年度までに、全国で 1,166 基の木堰堤が施工されている。地域別に国有林内と民有林内を合計すると、近畿地方や関東・信越地方での施工が多い傾向が見られる。県別では 47 都道府県のうち、42 道府県に施工実績があり、これまでに実績がない地域は東京都・神奈川県・千葉県・佐賀県・福岡県の 5 都県となる。北海道や秋田県、長野県、静岡県、京都府といった林業の盛んな県では施工実績が特に多く、北海道が 176 基と最も多くなり、長野県が 137 基、京都府が 134 基となっている。施工推移では、国有林内よりも民有林内の基数が多いためその傾向が顕著に現れており、平成 14 年度から平成 18 年度に集中し、1,166 基に対して 5 ヶ年で 549 基と全体の 5 割近くが施工されていることになる。施工ピークは、平成 16 年度の 133 基である。全国的には平成 19

年度にかけて一旦減少しているが、平成 25 年度の現在までは徐々に増加する傾向である。また、平成 25 年度では、民有林内の施工基数よりも国有林内の施工基数の方が上回っているが、全体的には民有林内の施工基数の方がはるかに多い状況である。木堰堤の設置に適した溪流の条件として、景観保全や環境保全が必要な溪流が考えられることから、下流域に位置する民有林で比較的設置し易いものと考えられる。それに対して国有林は、基本的に山地上流域に位置する場合が多く、急勾配の溪流が多いことが想定される。そのため、上流域の急勾配区間では土石流発生が危惧されることから、木堰堤の被災が想定され、国有林のような山地上流域で設置に適した箇所が少ないということが実績へも影響していると考えられる。

表 - 4. 3 全国における木堰堤施工実績（国有林内と民有林内の合計）

No.	地域名	竣工年度 基数																									合計						
		S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20		H21	H22	H23	H24	H25	
北海道・東北地方																											350						
1	北海道			1	3	2	1	2	1	1	2					1		4	2	19	10	13	8	6	6	7	9	14	15	15	34	176	
2	青森県																	2	2			1	1	6	3		1		3		13	32	
3	岩手県																				1	2	3			6				3	2	17	
4	宮城県																			1	3									2	6	1	13
5	秋田県																	6	18	9	7	4	3	5	7	4	10	7	3	5		88	
6	山形県																	6	2		1	2										11	
7	福島県																				2	1		5	1	1	1		2			13	
関東・信越地方																											233						
8	東京都																															0	
9	神奈川県																															0	
10	埼玉県																					2										2	
11	千葉県																															0	
12	茨城県																	2	2		4		3		1	11	1			5	8		37
13	栃木県																							2	3					2		3	10
14	群馬県																										2	1	1	1	4		9
15	山梨県																					1								1	4	6	
16	新潟県																										2	6	4	1	5	8	32
17	長野県	9	15							1		1	6		1	1	2		4	8	11	8	37	19	2	7		2			3	137	
東海・北陸地方																											131						
18	富山県																			3	1	1								3		8	
19	石川県																	2				2	2		8	1						18	
20	福井県																			2	1							2				9	
21	愛知県																									2			3	1	1		13
22	岐阜県																									3	1					7	
23	静岡県																	1	1	2	5	22	23	4	3	6	3			4	2	76	
近畿地方																											282						
24	大阪府														2	2				2	3	5	8	7	5	9				9	7	59	
25	奈良県																								2				1	1		6	
26	兵庫県																															42	
27	京都府																				3	28	2				3			6		134	
28	滋賀県																															10	
29	和歌山県																	2									2					5	
30	三重県																					11	1	6	3	2	3					26	
中国・四国地方																											111						
31	鳥取県																	1		3	3											7	
32	島根県																	2		7	2	1	4		1		4	3				24	
33	岡山県																			1	1	3	1	2								8	
34	広島県																				4	6		3	7					2		22	
35	山口県																						3	3	5	2		2	6	2			25
36	徳島県																													1	1		2
37	香川県																									1	2			1		4	8
38	愛媛県																			1	1						1		1	1		5	
39	高知県																					10										10	
九州・沖縄地方																											59						
40	福岡県																															0	
41	佐賀県																															0	
42	長崎県																													1	1	1	29
43	熊本県																													4			4
44	大分県																			1												1	
45	宮崎県																					1	1		4					1		8	
46	鹿児島県																					5	3	1				1	2	1	2	15	
47	沖縄県																												1	1			2
集計		9	15	0	1	3	2	1	6	3	3	3	6	2	3	7	9	20	62	97	107	133	116	96	46	58	55	56	69	78	100	1,166	

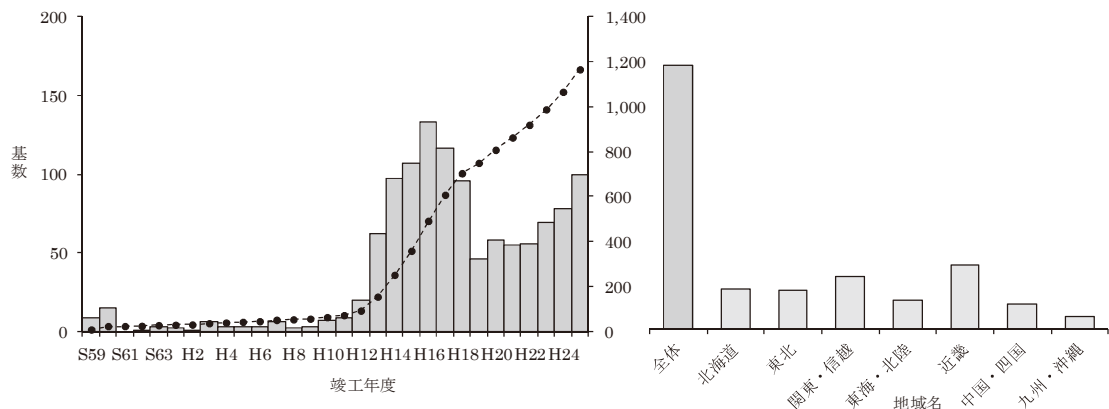


図 - 4. 3 全国の木堰堤施工推移と地域別基数

4. 3 構成樹種と防腐剤の有無

表 - 4. 4 には、樹種別の基数と防腐剤の有無の集計結果を示す。一部の木堰堤では、使用樹種が不明の回答がある。全国の木堰堤に使用されている樹種はスギ・ヒノキ・カラマツ・トドマツ・アスナロの5種となっている。樹種別ではスギが最も多く667基となり、次いでカラマツが229基であり、ヒノキは66基である。また、スギとヒノキの混合が96基であり、トドマツとアスナロを材種とした木堰堤も施工されていることがわかる。このような使用部材への混合樹種は、スギ・ヒノキ以外の組み合わせは見られない。都道府県別の使用樹種では地域の林業特色が表れており、全国的に施工基数の多い京都府や秋田県では全てスギ材で施工されており、長野県ではカラマツ材を使用した施工が主体である。北海道ではカラマツ材やトドマツ材での施工が主体であり、石川県ではアスナロ材の木堰堤が施工されていることがわかる。図 - 4. 4 には、樹種別の施工基数の整理結果を示す。樹種別では全体としてスギ材が半数以上を占めており、平成25年度までの1,166基に対する割合として、スギ材が6割近くであり、カラマツ材を合わせると2樹種で全体の8割程度を占めることになる。国有林内と民有林別に比較した場合、スギ材とカラマツ材が多い傾向は同様であるが、ヒノキ材での施工は国有林内で少ない。トドマツ材とアスナロ材での施工は、北海道や石川県の一部の地域に限られているため、全体に対する基数としては少ない。アスナロ材は一般的にヒノキチオールの効果で腐朽が遅いと考えられるが、全国的に使用例が少ない状況である。地域によって構成樹種に差が有るのは、部材としての調達しやすさが関与していると考えられる。長野県では全域でカラマツ材が多く、秋田県はスギ材が一般的に多いという実情があり、木堰堤の部材としても調達しやすい地域環境にあると推察される。

表 - 4. 4 樹種別の基数と防腐剤の有無

No.	地域名	構成樹種別 合計（基）							防腐剤使用有															
		スギ	ヒノキ	スギ・ ヒノキ	カラマツ	トドマツ	アスナロ	不明	計	スギ	ヒノキ	スギ・ ヒノキ	カラマツ	トドマツ	アスナロ	不明	計							
北海道・東北地方									350								120							
1	北海道	8			96	72			176	1				27	71		99							
2	青森県	28			2			2	32	18							18							
3	岩手県	5			12				17				1				1							
4	宮城県	13							13															
5	秋田県	88							88															
6	山形県	11							11															
7	福島県	13							13	2							2							
関東・信越地方									233								41							
8	東京都																							
9	神奈川県																							
10	埼玉県	2							2	2							2							
11	千葉県																							
12	茨城県	32	5						37	29							29							
13	栃木県	9			1				10	2														
14	群馬県	9							9	2							2							
15	山梨県	5			1				6	5														
16	新潟県	27			5				32	6														
17	長野県	3	1	1	112			20	137		1			7			8							
東海・北陸地方									131								24							
18	富山県	8							8	8							8							
19	石川県	11					7		18	3							3							
20	福井県	9							9															
21	愛知県	11	1	1					13		1	1					2							
22	岐阜県	6						1	7															
23	静岡県	36	9	31					76	10	1						11							
近畿地方									282								64							
24	大阪府	12	30	17					59	12	10	15					37							
25	奈良県	4						2	6	2							2							
26	兵庫県	39			3				42	9		3					12							
27	京都府	134							134															
28	滋賀県	2			4			4	10	2		4				4	10							
29	和歌山県		2	3					5			3					3							
30	三重県	10	16						26															
中国・四国地方									111								29							
31	鳥取県	7							7	5							5							
32	島根県	24							24	3							3							
33	岡山県			8					8															
34	広島県	20		2					22	8		2					10							
35	山口県	25							25															
36	徳島県	2							2	2														
37	香川県	6	2						8	1							1							
38	愛媛県	5							5	5							5							
39	高知県	10							10	5							5							
九州・沖縄地方									59								8							
40	福岡県																							
41	佐賀県																							
42	長崎県	3			26				29	1							1							
43	熊本県	4							4															
44	大分県	1							1															
45	宮崎県	8							8	1							1							
46	鹿児島県	15							15	4							4							
47	沖縄県	2							2	2							2							
集計									667	66	96	229	72	7	29	1,166	150	13	28	35	71	0	4	301

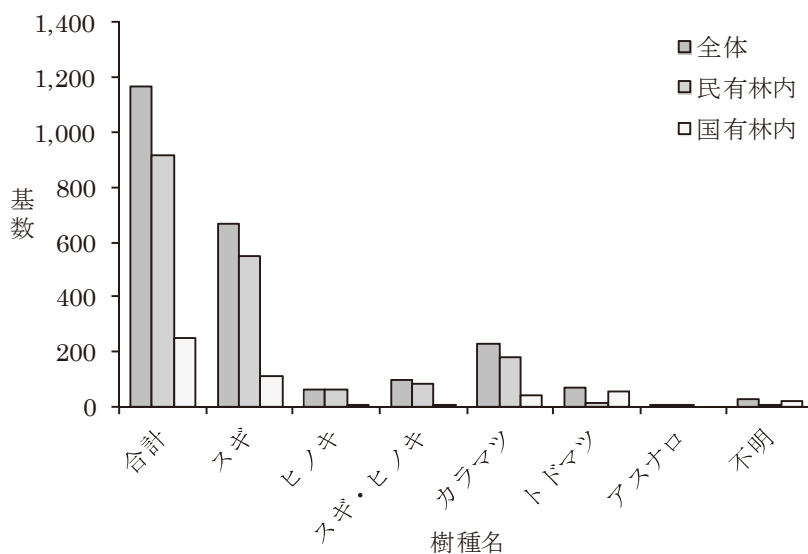


図 - 4. 4 樹種別の施工基数

図 - 4. 5には、地域別の防腐剤の有無を示す。ここでの地域区分は、民有林での7区分としている。木堰堤における防腐剤の使用は近年増加傾向であり、1,166基に対して305基となり、26%程度となっている。また、42基においては防腐剤の有無が不明との回答がある。地域別に比較した場合、防腐剤無の木堰堤がどの地方でも多くなり、唯一北海道では使用割合が高くなっている。防腐剤は試験的に使用されている地域が多く、まだ定着していないことがわかる。北海道で防腐剤有の木堰堤が多いことは、設計マニュアルの内容(2000)が関係していると考えられる。このマニュアル内では薬剤の種別に既往研究成果を参考として木杭の耐用年数が記載されており、現場での活用を考慮した構成となっている。このようなマニュアルの内容充実は、防腐剤の試験施工へつながっていくものと推察される。

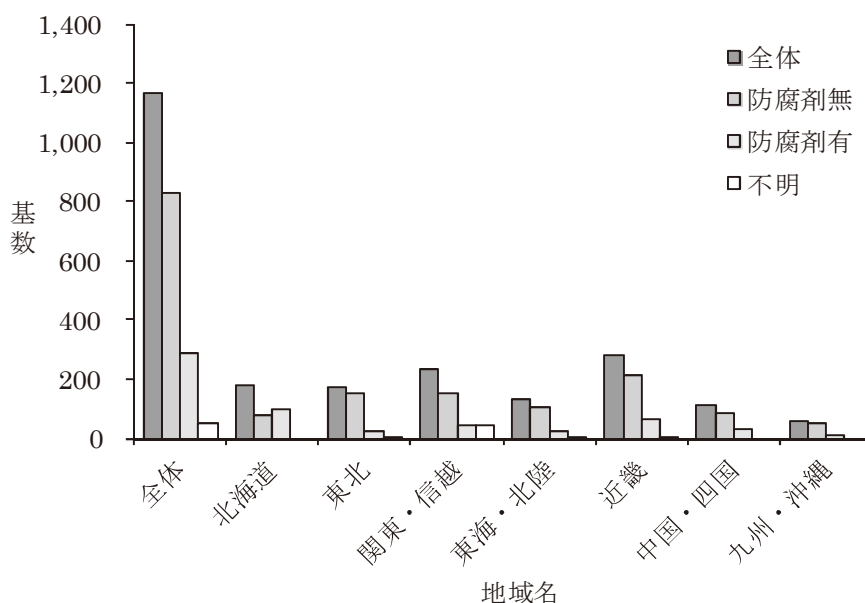


図 - 4. 5 地域別の防腐剤有無

図 - 4. 6には、国有林内と民有林内における防腐剤有無の基数比較を示す。国有林内では民有林内と比較して、防腐剤の使用割合が高いことがわかる。中部地方では使用不明の回答が多く見られたが、国有林内の全体に対する防腐剤割合は58%程度と高くなっている。民有林内では使用割合が低く、全体に対して17%程度にとどまっている。そのため、防腐剤有の基数を考えると、国有林内と比較して民有林内では将来的に腐朽の進行が速くなる施設が多いと推察される。国有林内で防腐剤有りの木堰堤が多くなることは、事業自体のコスト面や防腐剤効果の周知が関係していると考えられる。また、国有林は山地・上流域に位置しており、渓流はほとんど流水の無い0次谷のような地形が多いと考えられ、防腐剤を使用した場合でも渓流水に溶け込む危険性が少ないことが想定される。そのため、下流域の民有林内では防腐剤を使用した木堰堤が少なくなり、上流の国有林内で多くなっ

ているものと思われる。

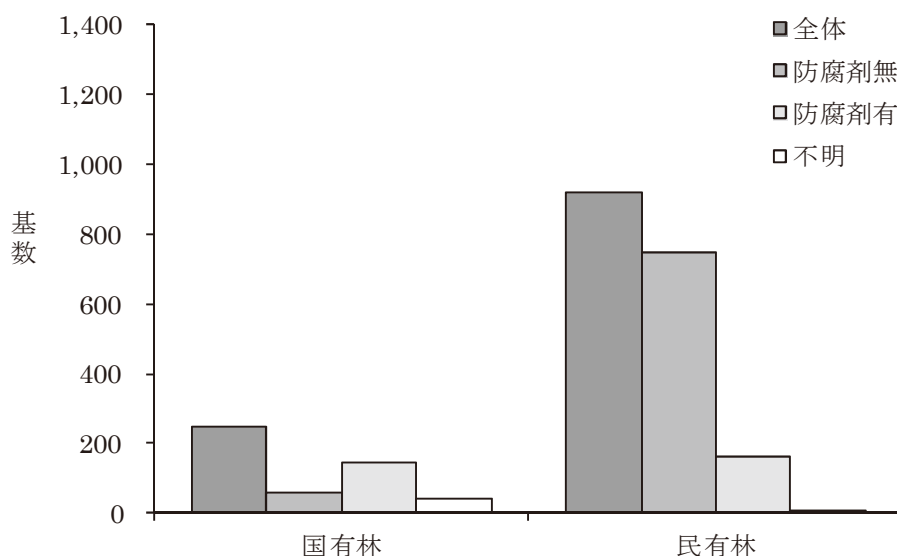


図 - 4. 6 防腐剤有無の基数比較

4. 4 施工基数の経過年分布

1) 地域別の比較

図 - 4. 7 には、国有林内と民有林内や、防腐剤有無の区分を合わせて地域別の経過年分布を示す。ここでの地域区分においても、民有林に合わせて7区分としている。平成 26 年現在において、施工後 8 年～12 年程度経過した木堰堤が多くなっており、施工後 10 年経過が全国的なピーク年となっている。地域により経過年の分布にはばらつきが見られるが、この施工ピーク年は概ね同様の傾向である。地域別では最大 30 年経過した木堰堤が関東・信越地方にあり、近畿地方や関東・信越地方、北海道・東北地方では他の地域と比較して経過年数が増大した施設が多いことがわかる。また、九州・沖縄地方では、他の地域と比較して 10 年以上経過した施設が少ないと考えられる。地域によって経過年の分布にばらつきがあることは、将来的な維持管理を考えていく上でそれぞれの地域の経過年分布傾向に準じて木堰堤の部材交換年を定めていく必要があると思われる。木材腐朽は、地域の気候条件や木堰堤の構造条件によって進行程度が異なると推察されることから、地域条件に即した維持管理指針を策定するとともに、設計マニュアルへ部材交換時期を示す必要があると考えられる。

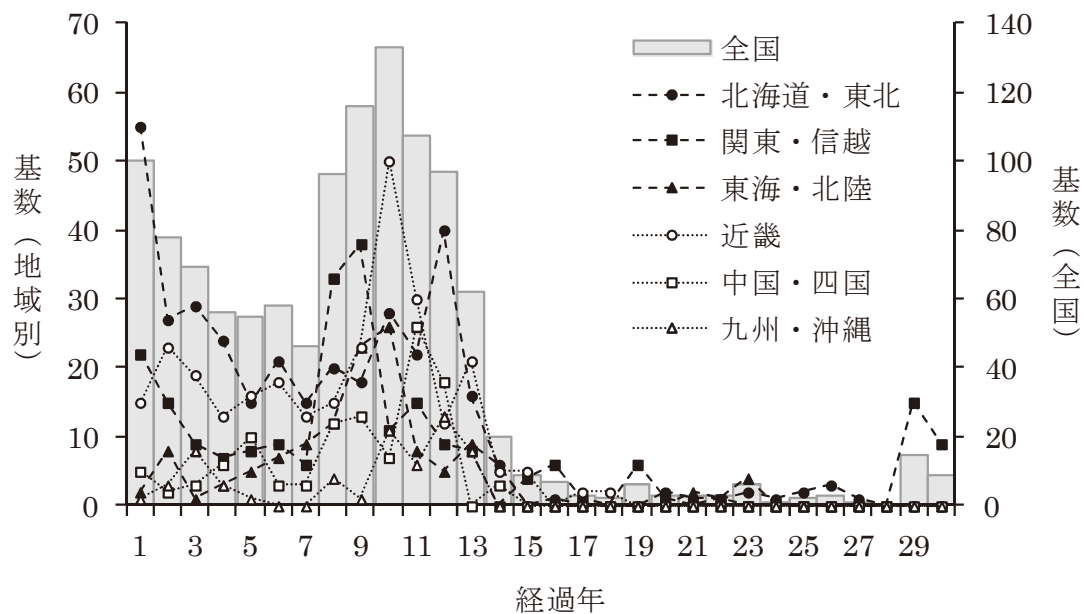


図 - 4. 7 地域別の経過年分布

2) 防腐剤有無を考慮した比較

図 - 4. 8 には、防腐剤有無を考慮した経過年分布を示す。地域別比較に基づき、国有林内と民有林内で区分し、さらに防腐剤有無を考慮した。国有林内では全体に対して防腐剤有の基数が多くなっており、民有林内では防腐剤無の基数が多い傾向が見られる。また、防腐剤使用が不明と回答があった施設は、国有林内の施工後 29 年～30 年が経過した古い施設が多く該当している。防腐剤有の木堰堤は、国有林内と民有林内ともに施工後 13 年経過以前の近年の施設が多く該当しており、使用傾向が近年増加しているといえる。民有林内においても、直近 2 ヶ年では防腐剤有の施設が上回っている。図 - 4. 9 と図 - 4. 10 には、国有林内と民有林内における、防腐剤有無を考慮した経過年分布を示す。防腐剤無の木堰堤では現時点において、施工後 10 年以上経過した施設は国有林内で 16 基あり、民有林内で 352 基ある。民有林内では施工ピーク年が 10 年経過に入り込むため、基数が多くなっている。また、施工後 20 年以上経過した木堰堤は、国有林内では防腐処理されているため該当なく、民有林内では 13 基ある。長期経過した木堰堤では、防腐処理されていない場合に腐朽が大きく進行しているものと推察されるため、これら基数を管理していくことが必要と考えられる。地域別の設計マニュアルにおいては、防腐剤の有無や基数、経過年の情報を加えて整理することで、将来的な維持管理のための指標になると考えられる。

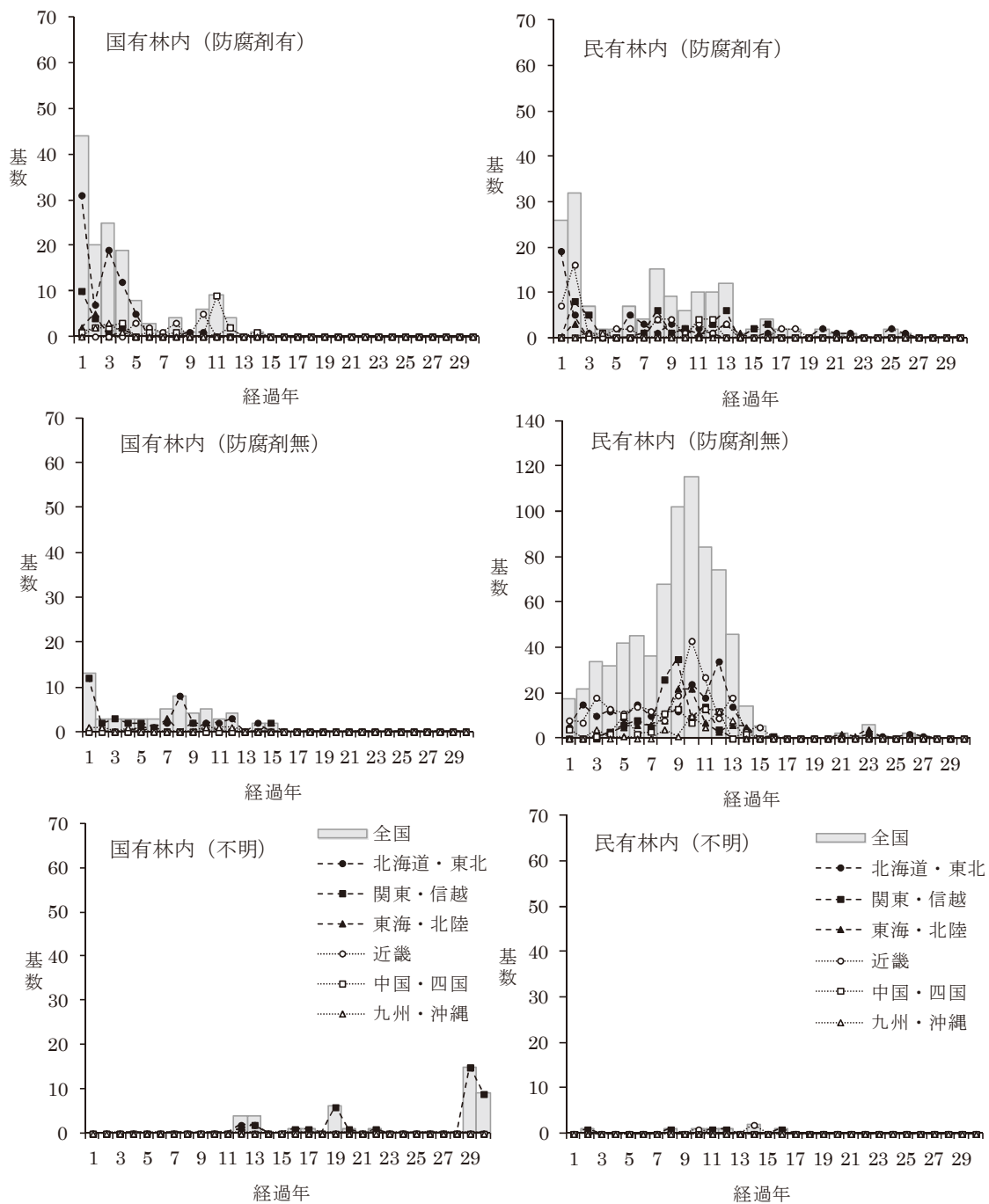


図 - 4. 8 防腐剤有無を考慮した経過年分布

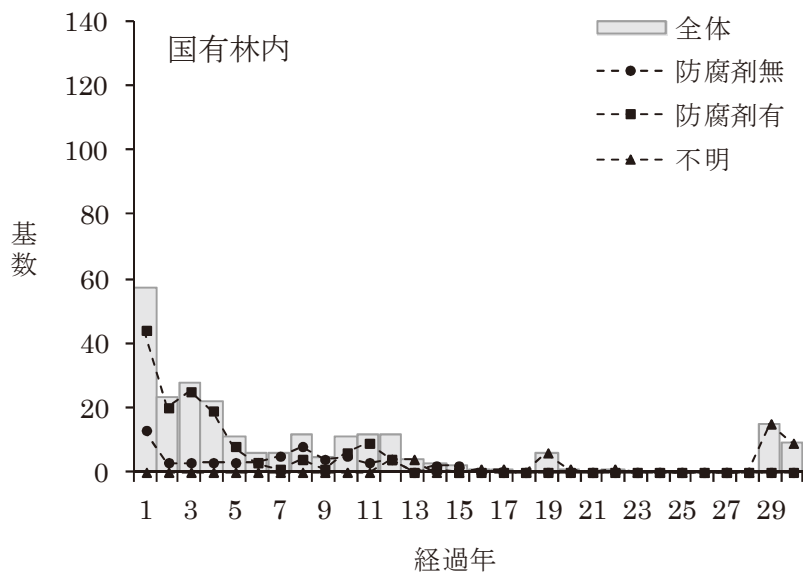


図 - 4. 9 国有林内における経過年分布

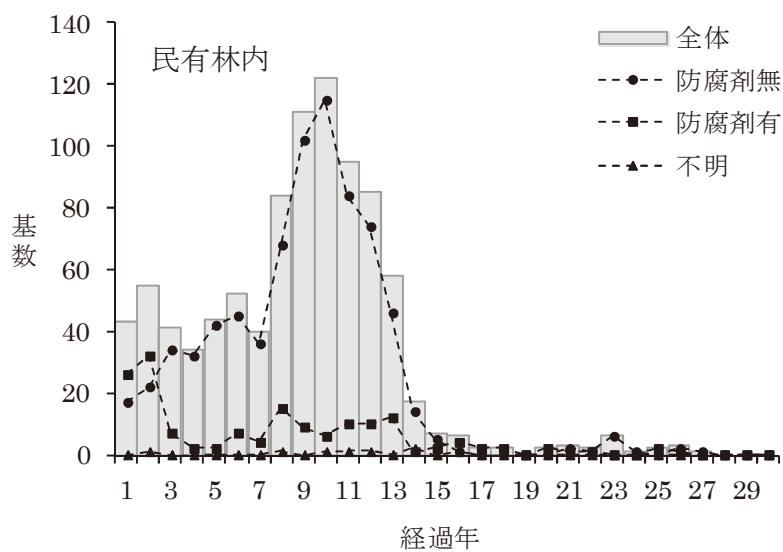


図 - 4. 10 民有林内における経過年分布

4. 5 まとめ

本章では、木堰堤の施工実績について全国的な聞き取り調査を行い、近年施工された施設を地域別に集計し考察した。その結果、地域によって使用樹種や防腐剤の有無をはじめとした全国的な木堰堤の施工実態が明らかとなり、現時点における地域別の経過年分布を示すことができた。また、木堰堤の使用樹種が明らかになったことで、今後の木堰堤腐朽

調査の対象樹種の絞り込みができるものと思われる。以下には本章のまとめを示す。

- (1) 平成 25 年度までに日本全国の木堰堤基数は 1,166 基であり、42 道府県で実績がある。国有林内と民有林内を合計した都道府県別では、北海道が 176 基と最も多く、長野県 137 基、京都府 134 基の順で施工が多い。
- (2) 木堰堤の使用樹種はスギ、ヒノキ、カラマツ、トドマツ、アスナロの 5 種となり、全体に対しスギ材が最も多く 6 割近くで、次いでカラマツ材が 2 割程度である。
- (3) 防腐剤の使用は近年増加傾向であり、1,166 基に対し 305 基と 26%程度になっている。国有林内では民有林内と比較し、防腐剤の使用割合が高い。
- (4) 防腐剤無の木堰堤では平成 26 年度時点で、施工後 10 年以上経過した施設は国有林内で 16 基あり、民有林内で 352 基ある。施工後 20 年以上経過した木堰堤は、国有林内では防腐処理されているため該当なく、民有林内では 13 基ある。地域別の設計マニュアルにおいて、防腐剤の有無や基数、経過年の情報を加えて整理することで、将来的な維持管理のための指標になると考えられる。

第5章 木堰堤の腐朽の進行過程と経年変化

本章では長野県内に施工された木堰堤を対象に継続調査し、設置位置による環境の相違を付加することで、木堰堤の腐朽の進行過程及び腐朽の経年変化の実態を解明することを目的とする。秋田ら（2007）はこれまで、木堰堤の腐朽程度をピロディン貫入量の相対度数の確率分布評価手法にて定量化を試みている。この報告では、施工直後の木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は正規分布を示し、腐朽した木堰堤は対数正規分布を示すことがわかっている。さらに、ピロディン貫入量の大きい度数割合が増すほど、分布曲線は正方向へ歪むことから、分布曲線の形状で腐朽の進行程度を把握することが可能で、施工後4年経過までの木堰堤の袖部と本体において分布曲線を比較すると、袖部では本体と比較して腐朽が大きく進行することが示されている。

5. 1 対象地

本章の調査対象地は、長野県全域の木堰堤施工地である。主な調査対象地は図 - 5. 1 に示すように、調査開始の時点で施工後1～6年経過している施工地とした。内山3地域の木堰堤と浪合地域の木堰堤の2基については、堤体への常水有無の比較も考慮した上で、常水の有る浪合堰堤、常水の無い内山3堰堤としてこの章では4年間の継続調査結果となる。本章で対象とした木堰堤の構造及び設置箇所の立地と気象条件を表 - 5. 1 に示す。年平均気温や降水量は、設置場所に近いアメダスデータ（1998～2008年）より参考値として算出した。標高は620～1,350mであり、長野県内の調査地ということで調査地の大半は800m以上の山岳地に位置している。流域面積では1km²以下の小規模な流域に施工されているものが多く、全て集水地形となる箇所に設置されているために、堤体は湿潤な環境条件下にある。

5. 2 ピロディン貫入量の相対度数の確率分布

本研究では、木堰堤の腐朽の進行程度を定量的に評価するための一手法として、これまでに確率分布を用いた評価手法について腐朽程度への適用を試行してきた。木材の腐朽程度は同じ部材においても箇所によりバラツキが大きくなるため、サンプル的にデータを得るのではなく、1基に対し大量のデータを取得し、腐朽の進行程度を詳細に知る必要がある。そして、こういった大量データの解析には、確率分布手法が適すると考える。

ピロディン貫入量の度数分布を明らかにするため、測定したピロディン貫入量を2mm幅の階級に分け、相対度数を求めてヒストグラムで表現した。ここで比較に用いたピロディン貫入量は天端部材と上流面の値は除外し、環境影響の等しい下流面の横部材における値のみとした。測定結果から得られたピロディン貫入量の平均値 μ と標準偏差 σ から求める確率密度関数 $f(x)$ を適用し、得られる確率分布曲線とヒストグラムを対応させた。確率密度関数は、下式で示される正規分布(1)と対数正規分布(2)を適用した。ここで、 μ は平均値、 σ は標準偏差、 x は階級値である。

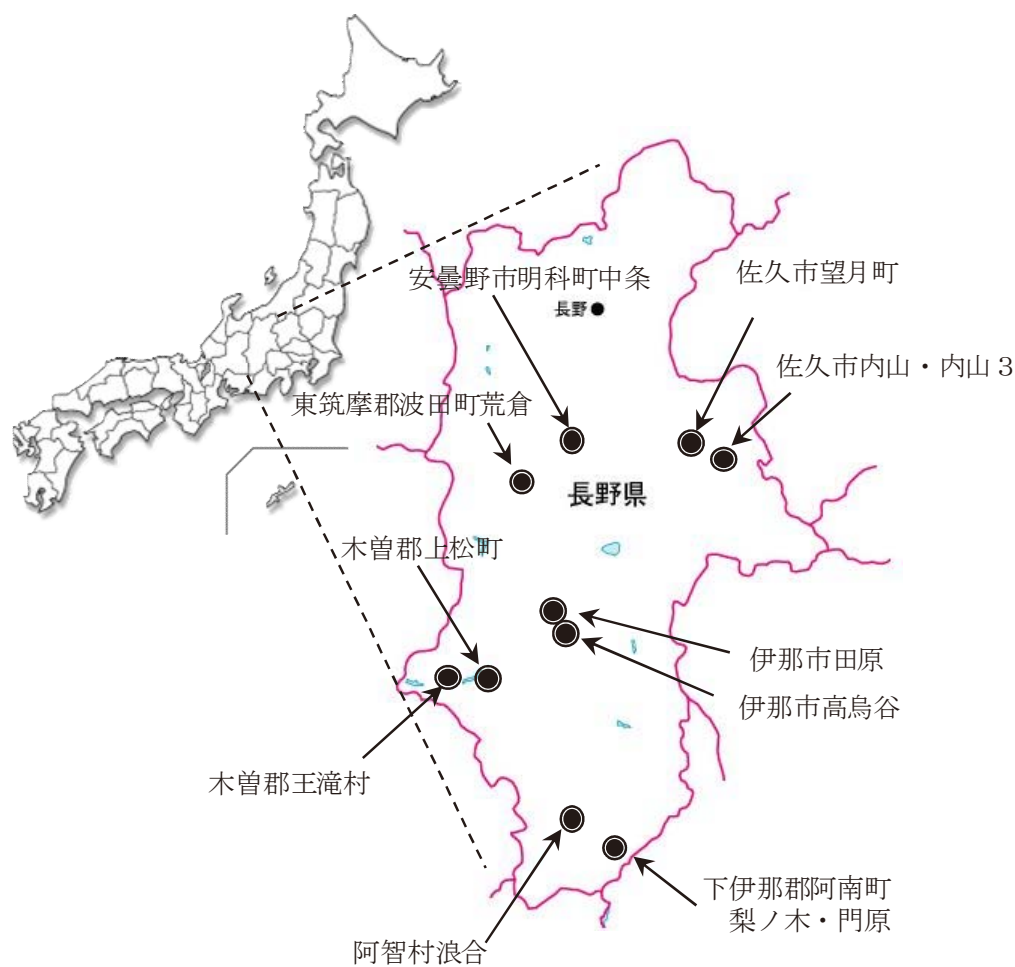


図 - 5. 1 調査対象地

表 - 5. 1 調査対象地の概要

地区名	対象地	木堰堤構造			調査年条件								立地及び気象条件				
		竣工 年度	堤長 (m)	堤高 (m)	調査 年度	調査時経過年							標高 (m)	流域面積 (km ²)	気温 (℃)	降水量 (mm)	常水
佐久	内山	H14	9.78	2.10	H18	-	-	-	-	○	-	-	1,040	0.10	10.9	1,063.3	小
	内山3	H15	8.50	2.10	H18-21	-	-	-	-	○	○	○	850	0.17	10.9	1,063.3	無
	望月	H17	22.50	2.80	H19	-	-	○	-	-	-	-	1,350	0.82	10.3	1,095.8	大
松本	中条	H18	9.00	2.10	H19	-	○	-	-	-	-	-	620	0.05	12.2	1,063.6	無
	荒倉	H18	10.00	3.08	H19	-	○	-	-	-	-	-	950	0.04	12.2	1,063.6	小
上伊那	田原	H15	10.98	1.96	H18-19	-	-	-	-	○	-	-	626	0.09	11.3	1,418.6	小
	高鳥谷	H17	19.50	3.08	H19	-	-	○	-	-	-	-	1,080	0.09	11.3	1,418.6	小
木曽	上松	H18	8.65	2.52	H18	○	○	-	-	-	-	-	800	0.02	10.9	1,871.7	無
	御岳	S60	21.00	3.00	H18	※21年経過時に調査							1,350	0.87	10.9	3,638.9	大
下伊那	浪合	H15	15.30	2.00	H18-21	-	-	-	-	○	○	○	1,090	0.07	9.6	2,524.7	大
	梨ノ木	H16	19.50	3.00	H19	-	-	-	○	-	-	-	950	0.89	9.6	1,893.3	大
	門原	H17	22.98	3.00	H19	-	-	○	-	-	-	-	910	0.58	9.6	1,893.3	大

※調査時を○で表示

1998～2008年のアメダス観測所データを使用

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots(1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} \dots(2)$$

1) 新規調査の木堰堤におけるピロディン貫入量の相対度数の確率分布

図 - 5. 2 に、施工後 5 年および 6 年経過した内山 3，浪合堰堤の確率分布を示し、また御岳堰堤の確率分布も加えて示した。ここでの確率分布は、下流面における袖部と本体の合計である。両堰堤ともに、どちらの経過年にしても確率分布の度数分布は対数正規曲線でよく近似できている。内山 3 堰堤では、6 年経過時において 40mm を超過した割合が増加しており、40mm 以上の度数分布はピロディンの測定値限界を超えることから分布曲線上は示すことができないが、40mm 以下の割合については浪合堰堤にしてもよく近似できていることがわかる。40mm 以上の割合について、それ以下の適合具合から判断すると、対数正規分布曲線の形状で正方向へ延伸していくことが推察される。浪合堰堤においては内山 3 堰堤と比較し、分布曲線の適合が比較的高い。

施工から 21 年経過した御岳堰堤においても、内山 3 堰堤と同様に 40mm 超の割合は多くなるが、ピロディン貫入量の相対度数は概ね、対数正規分布で示すことができると思われる。40mm 以上の割合が突出して多いのは、袖部に代替した護岸工の腐朽が大きいためと考えられる。

2) 分布曲線の比較

以上のように、腐朽した木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は対数正規分布を示したが、ここでは分布曲線を用いて腐朽の進行程度を袖部と本体別に比較する。図 - 5. 3 は、施工後 5 年と 6 年経過した内山 3 堰堤と浪合堰堤、そして御岳堰堤についての袖部と本体別における分布曲線の比較である。年数を経過した木堰堤においては、分布曲線形状が正方向へと歪む様子が顕著に表れている。腐朽した全ての木堰堤において、施工直後の上松堰堤の正規分布曲線形状から、対数正規分布の形状へと大きく変化していることがわかる。内山 3 堰堤と浪合堰堤の分布曲線を比較すると、袖部・本体のどちらにおいても内山 3 堰堤の分布曲線はより正方向へと歪んでいる。本体においてはどの木堰堤も袖部と比較して分布曲線は立ち上がっており、特に御岳堰堤の本体部では、施工から 21 年が経過しているにも関わらず、分布曲線の形状は 5 年、6 年経過の木堰堤と大差なく、それほど腐朽が進行していない。このような腐朽の進行が遅くなった要因としては、御岳堰堤の本体は常時、全て流水に触れていたことが考えられる。

以上のように、ピロディン貫入量の大きい度数割合が増すほど、分布曲線は正方向へ歪んでいくため、この曲線の移動より腐朽の進行程度を判断できる。ピロディン貫入量の相対度数は施工直後の正規分布から、年数を経て腐朽が進行すると、徐々に正に歪みをもつ

対数正規分布へと変化する。また、袖部と本体の腐朽速度には差が生じる。年数を経過した木堰堤ほど、高いピロディン貫入量の出現する割合が増していく様子がわかる。このように、腐朽した木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は対数正規曲線で近似できるため、ピロディン貫入量の平均値 μ と標準偏差 σ の両方を求めることで腐朽の進行程度を定量化することができる。この μ と σ による評価手法は腐朽の分布、すなわちバラツキを考慮している点に特徴がある。腐朽した木堰堤のピロディン貫入量の確率分布は正規分布ではなく、対数正規分布で表現されるため通常の μ のみの評価では腐朽程度の評価に当てはまりにくい。木材腐朽は部位や設置環境によってバラツキが大きい現象であるため、その点で $\mu \cdot \sigma$ の評価手法は腐朽程度の定量化に適していると考えられる。

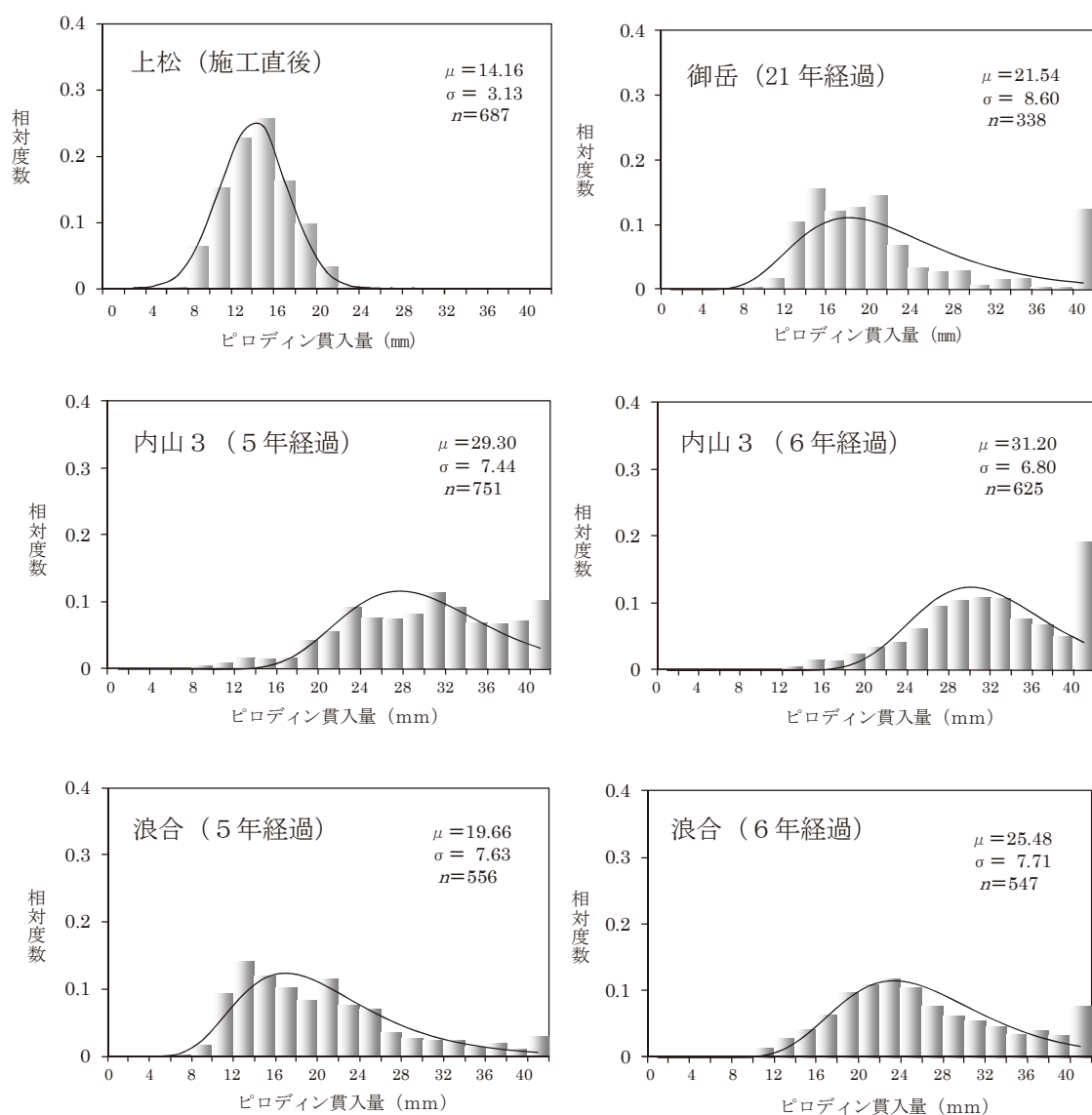


図 - 5. 2 相対度数の確率分布

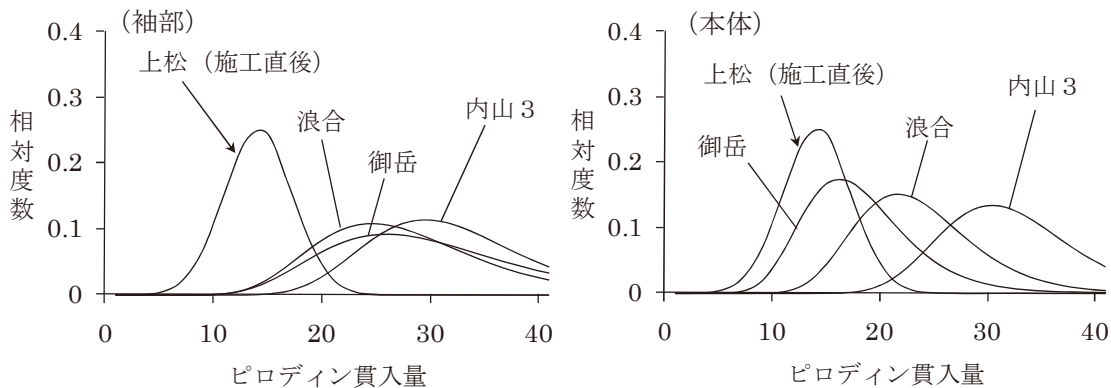


図 - 5. 3 分布曲線の比較

5. 3 木堰堤の腐朽比率

木堰堤の部位別の腐朽割合を比較するため、施工直後の腐朽していない上松堰堤のヒストグラムには見られない、ピロディン貫入量 26mm 以上の相対度数の積算値、つまりピロディン貫入量 26mm 以上の比率を腐朽比率と定義して百分率で求めた。これは、秋田ら (2007) による施工直後の健全な上松堰堤のピロディン貫入量で 25mm までの調査データであったためである。すなわち、腐朽比率 (%) は(3)式となる。

$$\text{腐朽比率 (\%)} = 26\text{mm 以上の相対度数積算値} \times 100 \quad \dots(3)$$

腐朽比率と定義した範囲内の各階級において符号検定を行った結果、一部本体の腐朽比率 0% の部位を除き、その他全ての木堰堤部位で貫入量の実測値と分布曲線からの推定値に有意差が見られないため、この推定値を用いて、木堰堤の腐朽程度を部位別に比較することとした。表 - 5. 2 に、施工後 5 年および 6 年経過した内山 3、浪合堰堤の腐朽比率について示し、また御岳堰堤の腐朽比率についても加えて示す。

袖部と本体ともに、上部から下部へ向かい順に、1 段目・・・としている。内山 3、浪合堰堤ともに、5 年経過、6 年経過するにつれて腐朽が大きく進行している。特に内山 3 堰堤では袖部・本体ともに腐朽が大きく、6 年経過では腐朽比率 90% 以上の部位が確認できる。浪合堰堤では、6 年経過までに流水の触れる本体についても徐々に腐朽が進む様子がわかる。流水の有る本体部で腐朽比率が上昇している要因としては、部材の流水に触れていない箇所の腐朽が進行し上昇率に寄与していることが挙げられる。内山 3 堰堤において、6 年経過時で腐朽比率が低下している部位が散見されるが、これは測定箇所におけるバラツキが影響していると思われるが、袖部・本体という区分で考えた場合、経過年で腐朽は上昇している。

次に施工から 21 年が経過した御岳堰堤では、袖部に代替した導流堤と本体の腐朽の差は大きく、腐朽比率が本体の約 7 % に対して、導流堤では 50% 超と測定した貫入量の半数が

26mm 以上となっている。このことから、通常の河川流水の多い場所に設置された木堰堤ほど、腐朽の進行が遅いため、木堰堤の腐朽速度は河川流水の有無に大きく左右されると考えられる。これまでも、木堰堤本体のような流水部では腐朽の進行が遅滞することは、石川（2001）や秋田（2007）、Dang et al.（2007）でも報告されており、今回の調査結果においても同様であった。

表 - 5. 2 5 年及び 6 年経過した木堰堤（下流面）の腐朽比率

	腐朽比率（％）				
	内山 3		浪合		御岳
	5 年経過	6 年経過	5 年経過	6 年経過	
袖部	56.55	68.35	25.56	48.33	50.88
1 段目	76.36	79.39	23.15	57.09	-
2 段目	20.14	43.53	19.71	36.32	-
3 段目	94.97	84.58	20.77	49.08	-
4 段目	-	-	41.78	59.42	-
本体	66.92	77.75	4.67	29.34	6.96
1 段目	85.82	84.57	0.71	17.82	-
2 段目	75.40	96.92	4.77	37.47	-
3 段目	63.72	86.90	8.74	31.65	-
4 段目	14.62	63.28	-	-	-
5 段目	82.97	47.02	-	-	-

※御岳堰堤は 21 年経過

5. 4 腐朽の経年変化

1) 全調査地からの腐朽の経年変化

ピロディン貫入量の μ と σ には経過時間との間に一定の関係があるものと考え、それぞれ経過年数との関係を調べた。図 - 5. 4 に、木堰堤の袖部の上・下流面、本体別の μ 、 σ と経過年数の関係を示し、表 - 5. 3 に μ 、 σ の数値をまとめ、確率分布の Kolmogorov-Smirnov 検定の有意点 α を付記する。全ての部位において、 μ と σ は経過年数との間に線形関係が認められ、危険率 1% で有意であった。また、袖部の上・下流面の μ と σ は F 検定により危険率 1% で併合できたため、一つの線形とし、図 - 5. 5 において本体も加え示す。

袖部と本体の回帰直線は年数を経るほど開きが生じるため、双方の腐朽速度には相違があり、 μ 、 σ と経過年数は関係するため、施工から年数を経過するにつれて徐々に腐朽が進行していくと考えられる。 σ と経過年数の関係では、袖部と本体で大きな開きがあり、

本体の σ が全体的に小さい。 σ の値が小さいということは、本体のピロディン貫入量が平均値付近に多く分布していると考えられる。袖部では年数を経過するほど、腐朽が最大40mmと局所的に大きく進む箇所とそうでない箇所の差がつくことになり、同調して σ も上昇することになる。本体では木堰堤によって常水の影響があるため、局所的に腐朽が進む箇所が少なくなることで、平均値の上昇に合わせて徐々に腐朽し、結果的に本体の σ は小さくなると考えられる。

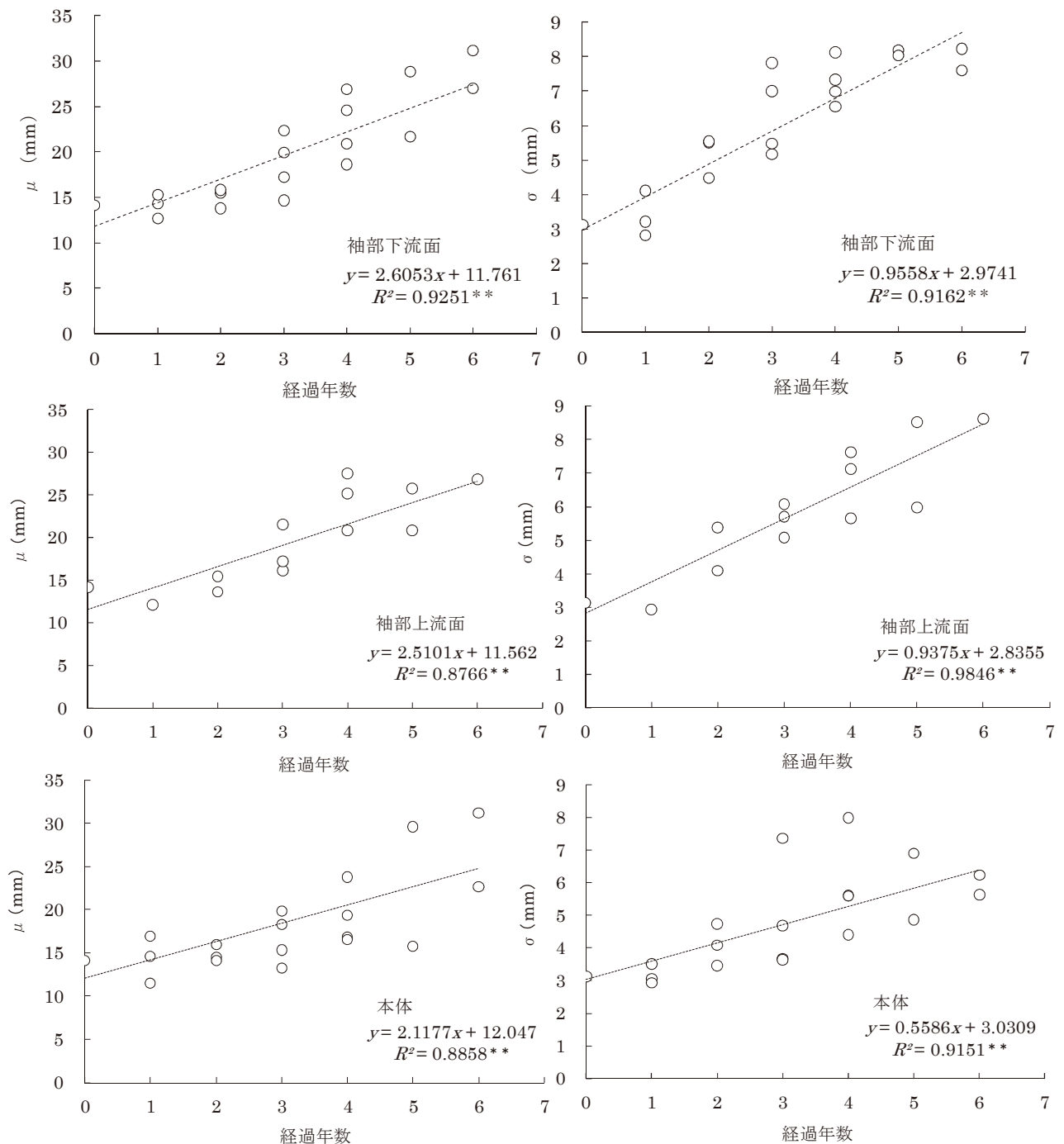


図 - 5. 4 部位別における μ 及び σ と経過年数の関係

表 - 5. 3 μ と σ の集約

	n			μ			σ			α
	袖下流	袖上流	本体	袖下流	袖上流	本体	袖下流	袖上流	本体	
6年経過										
内山3	245	-	380	31.15	-	31.23	7.60	-	6.24	n.s.
浪合	356	212	191	27.00	26.78	22.64	8.23	8.62	5.63	0.060
5年経過										
内山3	297	266	454	28.85	25.74	29.59	8.19	5.98	6.90	n.s.
浪合	367	215	189	21.64	20.85	15.81	8.03	8.52	4.87	0.070
4年経過										
内山	196	-	650	20.91	-	16.80	6.55	-	5.61	0.002
内山3	310	253	500	24.55	25.17	23.78	8.12	5.66	7.99	n.s.
田原	326	183	349	26.90	27.53	19.36	6.98	7.13	5.59	0.007
浪合	365	218	188	18.62	20.87	16.56	7.34	7.61	4.40	0.074
3年経過										
内山3	310	286	502	19.95	16.14	19.82	7.82	5.08	7.36	0.100
田原	512	198	554	22.34	21.53	18.33	7.00	5.70	4.68	0.120
浪合	366	210	188	14.65	17.17	15.34	5.17	6.07	3.68	0.003
梨ノ木	902	-	588	17.21	-	13.29	5.47	-	3.64	n.s.
2年経過										
望月	535	350	459	13.79	13.62	14.47	4.48	4.09	3.46	n.s.
高鳥谷	402	215	359	15.46	15.44	14.10	5.51	5.38	4.74	n.s.
門原	578	-	572	15.82	-	15.95	5.54	-	4.09	n.s.
1年経過										
荒倉	280	-	389	14.33	-	14.58	3.22	-	3.50	0.003
上松	323	-	369	15.26	-	16.96	4.12	-	3.06	n.s.
中条	255	156	279	12.68	12.08	11.53	2.82	2.94	2.94	0.004
施工直後										
上松		687			14.16			3.13		0.009

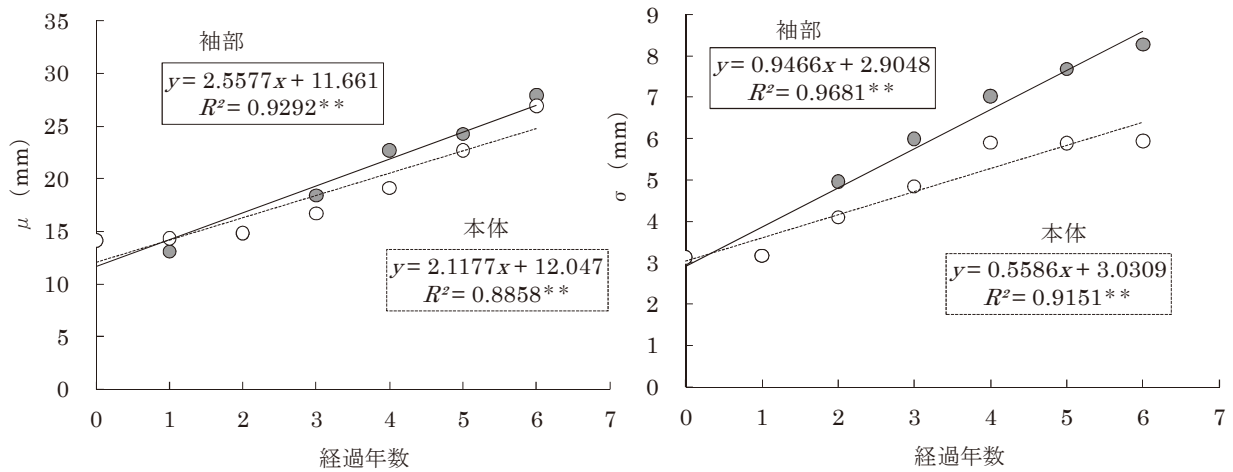


図 - 5. 5 μ 及び σ と経過年数の関係 (集約)

今回までの調査結果により, μ と経過年数の関係について以下の(4)式と(5)式が得られた。ここで, y は μ であり, x は経過年数である。

$$(\text{袖部}) \quad y = 2.56x + 11.7 \quad \dots(4)$$

$$R = 0.96^{**} \quad P = 0.0005 \quad (P < 0.01)$$

$$\begin{aligned} & \text{(本体)} \quad y=2.12x+12.0 \quad \dots(5) \\ & R=0.94^{**} \quad P=0.0016 \quad (P<0.01) \end{aligned}$$

σ と経過年数の関係については、以下の(6)式と(7)式が得られた。ここで、 y は σ であり、 x は経過年数である。

$$\begin{aligned} & \text{(袖部)} \quad y=0.947x+2.90 \quad \dots(6) \\ & R=0.98^{**} \quad P=0.0001 \quad (P<0.01) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{(本体)} \quad y=0.559x+3.03 \quad \dots(7) \\ & R=0.96^{**} \quad P=0.0007 \quad (P<0.01) \end{aligned}$$

これらの式の構成を考えると、切片は施工時の状態を示しており、傾きは1年経過における μ と σ の変化値、すなわち腐朽速度を意味していると考えられる。集約結果では、全ての調査した木堰堤からの結果であって平準化されているが、例として μ を考えた場合、概ね袖部で 2.6mm、本体で 2.1mm につき各年で上昇していると考えられる。

2) 継続調査からの腐朽の経年変化

内山3堰堤と浪合堰堤の2基において、4年間の腐朽調査結果より、経年変化を確率分布の分布形状の変化から考察する。図-5.6において、袖部と本体別に確率分布の推移を示す。両堰堤とも、袖部、本体の分布曲線は年数を経過するにつれて、貫入量の大きい数値の割合が増し、分布形は正方向へと徐々に移行していく。腐朽の進行しやすい袖部では、腐朽初期ですでに、分布形が施工直後の正規分布形から平らになり、年数を経過しても同形状の歪んだ分布形状のまま正方向へと移っていく様子がわかる。本体の分布形状を見ると、常水が無く腐朽の進行の早い内山3堰堤では、袖部と大きな形状の違いはないが、本体に常水が有り腐朽の遅い浪合堰堤の本体部では、6年経過でも分布形は左肩に最頻値をもった形状で正方向へと移行している。腐朽の進行の速い木堰堤袖部では、腐朽の初期において分布形状が歪み、年数を経過しても同じ形状のまま正方向へと推移していき、常水の有る木堰堤本体では、6年経過しても腐朽の分布形状に大きな違いが見られないことがわかる。

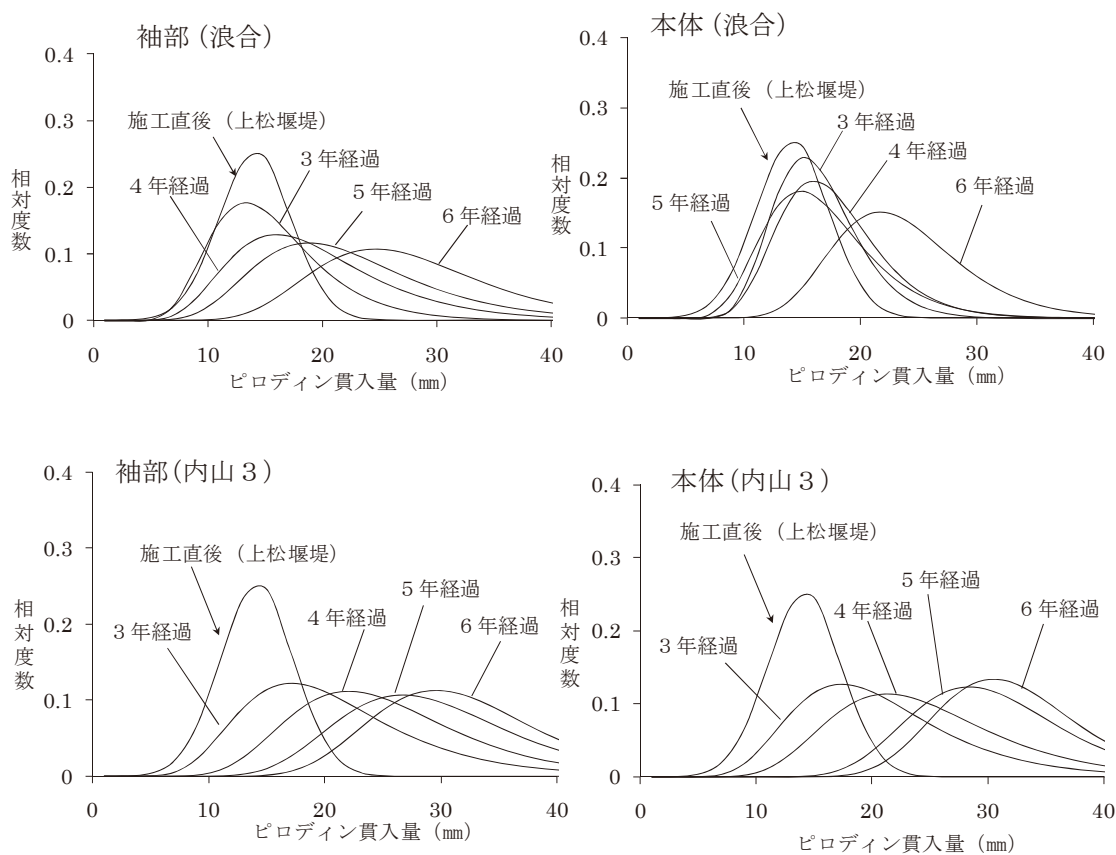


図 - 5. 6 分布曲線の推移

次に、図 - 5. 7 と図 - 5. 8 には内山 3 堰堤と浪合堰堤において、袖部と本体別の腐朽比率の経年変化を示す。両堰堤ともに、腐朽比率と経過年とは相関関係にあり、腐朽比率で考えると 6 年経過までに、経年変化による腐朽増加は直線的ではなく、指数関数的に上昇し、年数を経過するほど上昇割合が増していくことがわかる。腐朽の進行の速い内山 3 堰堤では、袖部と本体の近似曲線に大きな差はなく、浪合堰堤では袖部と本体において、年数を経過するほど差が生じることが顕著に表現されている。また、腐朽の進行程度の違いも良く現れており、浪合堰堤と比較し内山 3 堰堤では、近似曲線の上昇割合が急激である。ここまでで、腐朽の経年変化について考察してきたが、 $\mu \cdot \sigma$ は直線関係であるのに対し、腐朽比率は指数関数的な関係にあり、両者には進行過程の違いが見られる。この違いはピロディン貫入量の確率分布は対数正規曲線で表現されることを考えると、 $\mu \cdot \sigma$ の増加はあくまで一定であるが、一定ライン（今回はピロディン貫入量 26mm）以上の割合を評価した際には、分布形の山型が次第に超過していくためにその割合は指数関数的である。そのため、腐朽の進行程度を適切に評価する際には、 $\mu \cdot \sigma$ および腐朽比率の両者を明らかにすることが重要であり、 $\mu \cdot \sigma$ にて腐朽の時間的進行を明らかとし、腐朽比率にてその進行割合を評価する必要があると考えられる。

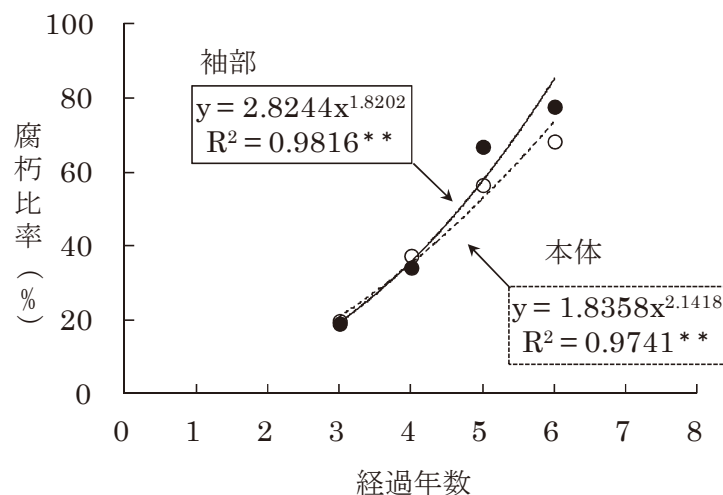


図 - 5. 7 内山 3 堰堤における腐食比率の推移

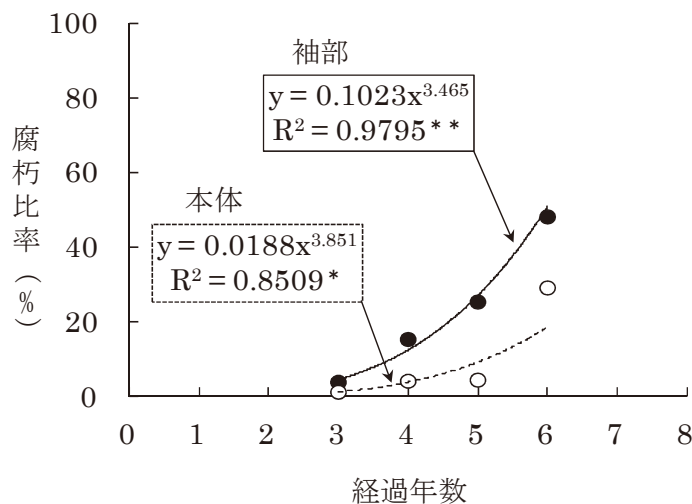


図 - 5. 8 浪合堰堤における腐食比率の推移

木堰堤の腐食過程を定量的に評価し、施工環境や部位別の腐食の進行速度の違いを判断していく上で、各年の腐食量の実態を定点的に計測していくことが重要と考える。本研究では、施工環境および部位別の腐食の進行速度の違いを解明するため、内山 3 堰堤（常水無）と浪合堰堤（常水有）における継続調査を実施中であり、ここでは各年のピロディン貫入増加量を示し、これを腐食の進行速度と近似し考察した。表 - 5. 4 に内山 3 堰堤、表 - 5. 5 に浪合堰堤のそれぞれ各年（4 年間）のピロディン貫入量の段数別の増加量平均を示す。表の下部には貫入増加量の累積値と平均値も各々示す。

流水のある本体部などでは地際のみ腐食が見られ、ピロディンを打ち込む位置の若干の違いにより増加量が増えるため、前年より貫入量が減少した箇所が現れ、そのような箇所は 0 として評価した。これまでに貫入量の確率分布を考察してきたが、経過年と平均値 μ は相関関係にあること、本研究では標本数 N を多分にとっていること、ある程度の部位別に腐食の傾向を整理していくことが必要である、といった理由から、増加量は部位に

おける平均値を適用しても差し支えないと判断した。

どちらの木堰堤においても、各年の貫入増加量には幅があるが、累積値や平均値は、腐朽比率の傾向と同じく、共通に袖部上部で増加量が大きく、流水の無い本体では小さい。袖部では内山 3 堰堤において、3.0～4.9mm/year、浪合堰堤では 3.7～4.7mm/year である。流水の無い内山 3 堰堤では袖部上部から下部へ向かい、貫入増加速度が順に低下することがわかる。浪合堰堤では、水通し位置と同じ高さの袖部 3 段目では再度増加し、1 段目以上に腐朽の進行が速いことがわかる。ここで、内山 3 堰堤の袖部は、腐朽比率の算出結果では 3 段目において腐朽が大きい傾向があったが、貫入増加速度では上部から下部へ向かい、順に減少するといった違いがある。腐朽比率にて高い傾向を示した理由としては、元々の木材密度が低かったことが原因として考えられる。次に本体の貫入増加速度では、内山 3 堰堤で 3.9～4.8mm/year であり、浪合堰堤では 2.7～2.9mm/year である。腐朽比率の傾向と同じく、流水の有る浪合堰堤では本体の貫入増加速度が遅くなり、内山 3 堰堤では本体と袖部は同等の増加速度である。これは流水の有無により、年間の腐朽量に対して本来ならば袖部と同等であるものを 2.7mm 程度まで減少させることができることを示していると判断できる。

以上のように、数年の継続調査からの結果を用いることで、貫入量増加速度として各堰堤の腐朽に対して具体的に優劣をつけることが可能と考えられる。この貫入量増加速度については、7 章でさらに調査地を追加し腐朽速度として考察する。

表 - 5. 4 部位別の貫入量上昇値（内山 3 堰堤）

経過年数 (year)	貫入量上昇値 (mm)							
	1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
3→4	5.54	3.15	5.00	4.06	3.38	4.29	2.07	6.27
4→5	5.47	3.22	4.01	6.33	5.55	4.77	6.84	5.75
5→6	3.72	4.32	0.00	2.85	2.84	4.13	5.48	0.00
sum.	14.73	10.69	9.01	13.24	11.77	13.20	14.39	12.02
ave.	4.91	3.56	3.00	4.41	3.92	4.40	4.80	4.01

※マイナスの箇所は、0 とする
縦罫線は袖部と本体の境を示す

表 - 5. 5 部位別の貫入量上昇値（浪合堰堤）

経過年数 (year)	貫入量上昇値 (mm)						
	1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目
3→4	3.08	3.90	3.48	6.06	1.56	1.58	0.28
4→5	2.72	2.32	2.96	4.41	0.00	0.00	0.50
5→6	5.97	5.02	6.54	3.60	6.42	7.00	7.29
sum.	11.77	11.23	12.98	14.07	7.98	8.58	8.07
ave.	3.92	3.74	4.33	4.69	2.66	2.86	2.69

※マイナスの箇所は、0 とする
縦罫線は袖部と本体の境を示す

5. 5 まとめ

ピロディン貫入量の μ と σ の両方から求める分布曲線により、腐朽の進行程度は定量化でき、この2つは経過年数と関係するために、時間経過による部位別の腐朽進行の予測が可能といえる。今回の継続調査の結果より、施工後6年経過までの木堰堤の腐朽の進行程度が明らかになり、4年間の定点調査を実施した木堰堤においては、未だに指数関数的に腐朽が進行中であることがわかった。本研究で検討した、 μ と σ を用いた確率分布及び腐朽比率の適用はこれまでに検討事例がなく、今後の腐朽評価手法のひとつとして評価できると考えられた。また、貫入量速度による部位別の比較では、流水の無い木堰堤では袖部3.0~4.9mm/year、本体3.9~4.8mm/yearと同程度であり、流水が有ることで本体部の腐朽は2.7mm/year程度まで減少させることが可能と判断された。継続調査からの貫入量増加速度を用いると、元々の木材密度の差を除外できるため、精度よく腐朽の進行程度を表現できると考えられた。本章のまとめとして、以下に示す。

- (1) 施工直後の木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は正規分布を示し、腐朽した木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は対数正規分布を示す。分布曲線の形状より、腐朽の進行程度を推定することができる。
- (2) 木堰堤の袖部は、最上段と下部で腐朽の進行が速い。本体は流水の有る木堰堤でも腐朽が徐々に進行しており、流水の無い木堰堤では均一に腐朽が進行し、部位による差が小さくなっている。
- (3) 袖部と本体を比較した場合、6年経過までに流水の有る木堰堤では本体で腐朽が大きく減少するが、流水の無い木堰堤では逆に、本体の腐朽の進行が速い。設置環境における流水の有無は、腐朽の進行過程を左右する。
- (4) μ と σ は経過年数と線形関係にあり、経過年数から μ と σ を推定することができる。
- (5) 内山3と浪合における継続調査より、腐朽比率と経過年数にも相関関係があることがわかり、年数を経過するほど腐朽比率は指数関数的に上昇する。

第6章 木堰堤の腐朽の進行程度に及ぼす気候条件と構造条件

木堰堤の構造や安定性検討の研究は徐々に進んでいるものの、木堰堤部材の腐朽に関する研究事例は少なく、かつ気候条件や構造条件と腐朽との関係は未解明である。そこで、本章では気候条件の異なる長野県・静岡県・青森県の3県における木堰堤を調査対象とした腐朽の実態調査結果より、木堰堤の腐朽の進行程度に及ぼす気候条件と構造条件を明らかにすることを目的とする。

6. 1 対象地

本章の調査対象地は、長野県・静岡県・青森県の木堰堤施工地である。調査対象地については図 - 6. 1 に示すとおりであり、腐朽調査時点において施工後5年経過のカラマツ材及び3年経過のスギ材の施工地とした。木堰堤の樹種による影響を除き、気候条件及び構造条件の違いによる腐朽の進行程度を明らかにするため、比較においては施工後の経過年数を合わせた上で評価することとした。

本章で対象とした木堰堤の気象条件及び構造条件、使用樹種を表 - 6. 1 に示す。根羽村浅間の施工地のみ、根羽村の観測所データがないことから、近隣の浪合観測所を援用している。なお、施工後5年経過の内山3と浪合の2基は、5章の調査結果を用いており、その他のスギ材木堰堤を含む8基は本章の報告となる。本章においては、袖部の横部材を腐朽調査の測定対象としており、本体については流水有無の影響が大きいと考えられるため、気候条件で腐朽程度を比較することから測定対象としていない。

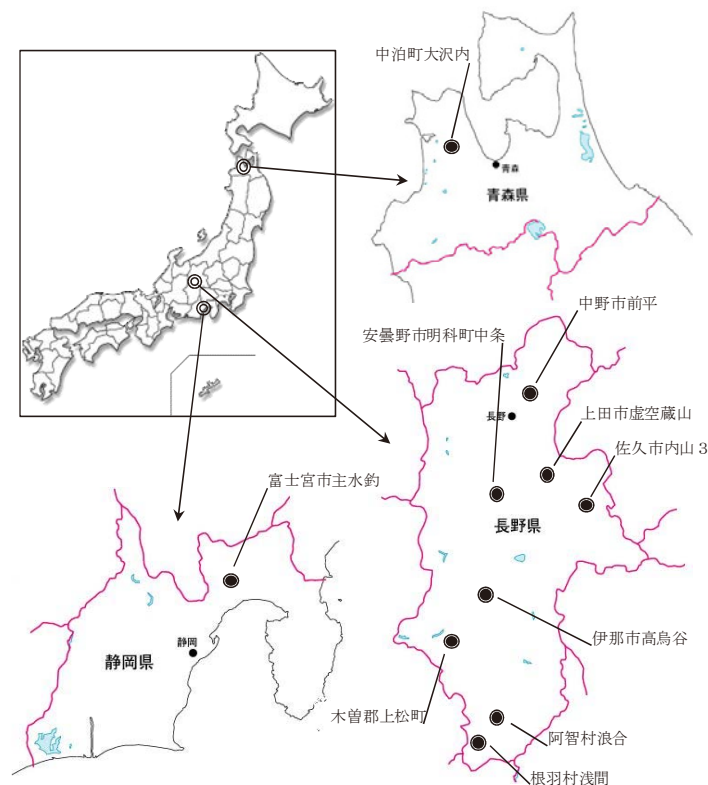


図 - 6. 1 調査対象位置

表 - 6. 1 調査対象概要

県名	対象地名	木堰堤構造				立地及び気候条件					最寄りの気象 観測所
		竣工年	調査年	堤長 (m)	堤高 (m)	標高 (m)	流域面積 (km ²)	年平均気温 (℃)	年平均降水量 (mm)	年平均降水 日数 (day)	
長野県	調査時	施工後5年経過				カラマツ材					
		H15	H20	8.5	2.1	850	0.17	10.8	956.8	102.8	佐久
		H17	H22	17.5	3.2	520	3.90	12.2	958.1	109.4	上田
		H18	H23	9.0	2.1	620	0.05	12.2	1,118.3	108.0	松本
		H17	H22	19.5	3.1	1,080	0.09	11.8	1,627.9	126.0	伊那
		H18	H23	8.7	2.5	800	0.02	11.0	1,905.0	138.0	木曽福島
長野県		H15	H20	16.0	2.0	1,090	0.07	9.5	2,322.2	144.0	浪合
	調査時	施工後3年経過				スギ材					
		H15	H18	8.5	2.1	660	1.25	11.5	1,395.9	169.8	飯山
		H16	H19	12.5	3.1	810	0.94	9.5	2,322.2	144.0	浪合
静岡県		H20	H23	15.0	3.0	600	0.33	16.3	2,363.0	132.0	富士
青森県		H18	H21	10.5	2.1	20	0.65	10.8	1,287.7	187.3	五所川原

6. 2 木堰堤腐朽の進行程度の評価

木堰堤腐朽の評価として、本章では秋田ら（2007）で報告してきた確率分布手法を用いる。腐朽の進行程度は、ピロディン貫入量の分布曲線から推定可能であることから、分布曲線の平均値 μ と標準偏差 σ の値を木堰堤腐朽の評価値として、気候条件および構造条件との関係を考察する。本論文の5章において、ピロディン貫入量の確率分布は、施工直後は正規分布の確率密度関数、腐朽の進行した木堰堤は対数正規分布で各々表現でき、腐朽の進んだ木堰堤ほど確率分布曲線は正方向へ歪むことを示している。以下には、適用した正規分布(1)式と対数正規分布(2)式の確率密度関数式を再掲する。ここで、 μ は平均値、 σ は標準偏差、 x はピロディン貫入量の階級値となる。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \dots(1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad \dots(2)$$

施工直後と腐朽の進行した木堰堤の確率分布の適用例について、図 - 6. 2a と図 - 6. 2b に示す。施工直後のカラマツ材木堰堤は秋田ら（2007）の調査結果であるが、スギ材木堰堤の施工直後の結果は新規調査結果である。スギ材木堰堤の施工直後の確率分布においても、ピロディン貫入量は正規分布で表現できることから、カラマツ材木堰堤と同様に分布曲線の μ と σ から腐朽程度を評価できると考えられる。施工直後の分布曲線を比較すると、カラマツ材とスギ材では σ の差は上松: 3.13mm に対し、主水釣: 3.67mm と 0.54mm の差であり比較的近いが、 μ は上松: 14.16mm に対し、主水釣: 20.62mm と 6.5mm 程度の差が見られる。 μ においては、材種による差が 6.5mm 程度生じてくると考えられる。図 - 6. 2 に例示している3年経過の大沢内のスギ材木堰堤では、施工直後である主水釣の $\mu = 20.62\text{mm}$ と比較し 15.73mm と施工直後の数値より低くなっている。これは元々の健全材の部材密度が影響していると考えられるが、3年経過時の μ は小さい値であり、腐朽速度も遅いと考えられるため、気候条件及び構造条件と腐朽の関係の解析へ加えても支障はないと思われる。腐朽の進行した木堰堤はスギ材木堰堤を含め、これまで同様に対数正規曲線で近似できるため、腐朽程度の評価値としては μ と σ を使用することができる。

ここで図 - 6. 3において、新規調査結果に対し、これまでの5章の結果も統合し μ と σ の関係を示す。ピロディン貫入量の μ と σ は以下の(3)式で表される。

$$\sigma = 0.209 (\mu) + 1.85 \quad \dots(3)$$

$$R=0.71^{**} \quad P=0.0005 (P<0.01)$$

μ が増加するほど σ も緩やかに増加し、線形関係には危険率 1% で有意性が認められた。 μ と σ は相互に関係することから、木堰堤の腐朽程度の評価値としては、本章では σ と比

較し図 - 6. 3のようにレンジが 10mm から 40mm と幅広い μ を使用することとし、以降では気候条件及び構造条件との関係性を明らかにする。

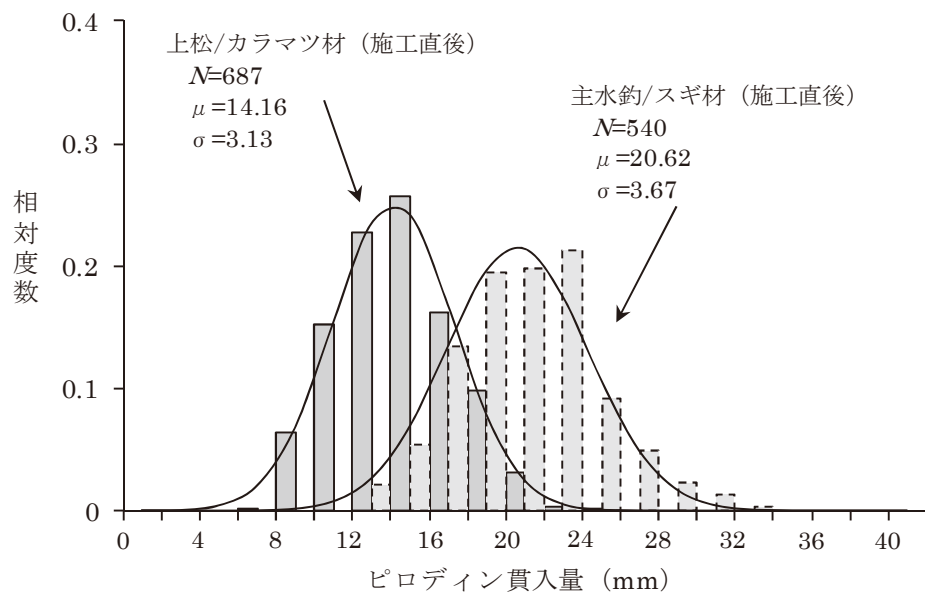


図 - 6. 2a ピロディン貫入量の相対度数の確率分布 (施工直後)

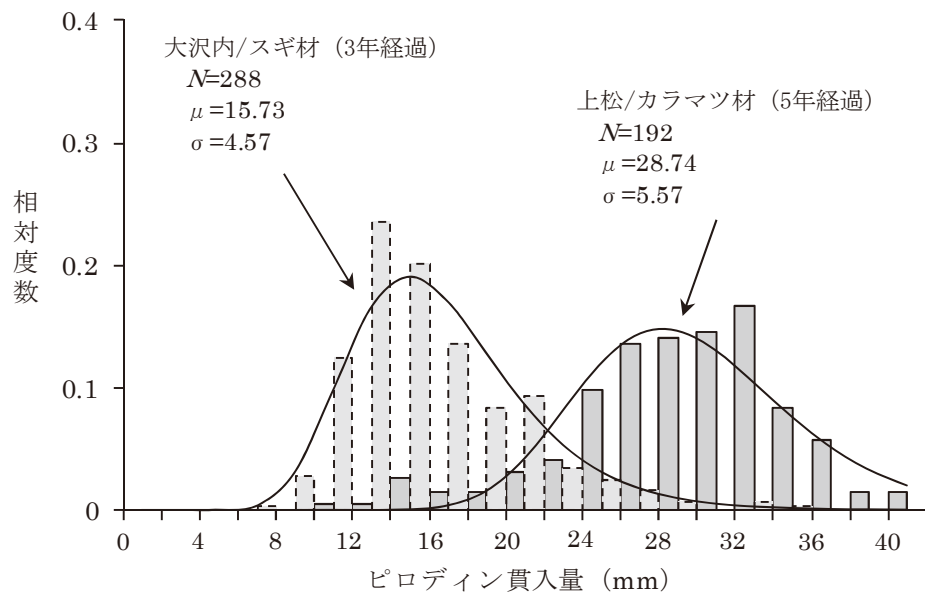


図 - 6. 2b ピロディン貫入量の相対度数の確率分布 (腐朽した木堰堤)

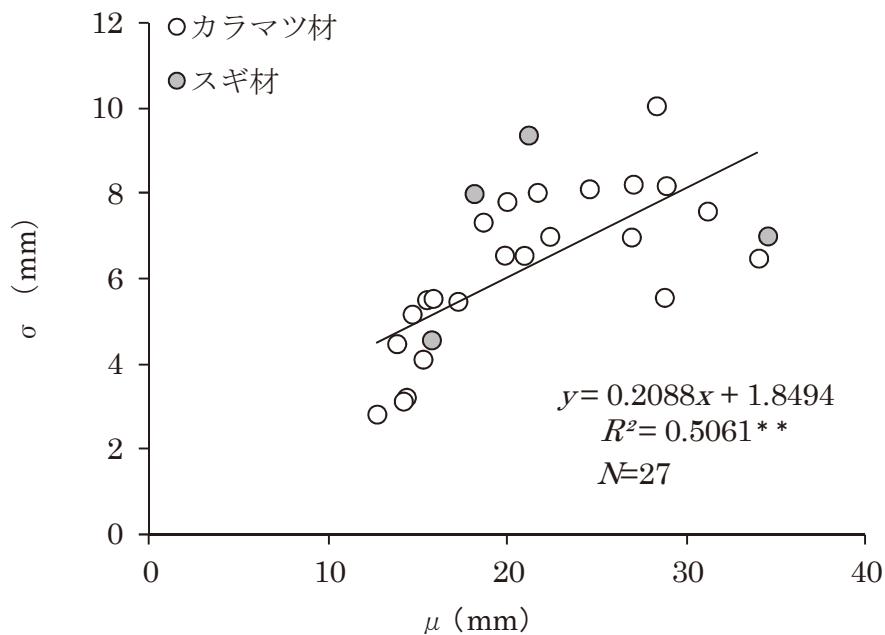


図 - 6. 3 ピロディン貫入量の μ と σ の関係

6. 3 腐朽と気候条件の関係

1) 気候指数の算出

木堰堤の腐朽の進行程度に影響を与える気候条件を明らかにするため、アメダス観測所データより気候因子を整理し各種気候指数を算出した。ここで気候指数は木材腐朽と関連性が高いと推定される、木材腐朽気象指数 Climate Index (CI), 乾燥指数 Aridity Index (AI), 温量指数 Warmth Index (WI) とした。各気候指数について略述すると CI は T.C.Sheffer (1971) が定義した指数であり、木材腐朽菌の活動量を気温と降水日数の積、つまり温度時間積から求めたものである。AI は E.de Martonne (1942) が Lang の雨量因子 (RF) を改良したもので土壤気候を表現する指標として考案されている。WI は森林科学分野では一般的な指数で、植生の変化と気温との相関関係を表現するための指標として多く利用されており、木材腐朽菌についても高温環境下ではその活動が活発になると考えられるため、合わせて算出することとした。以下の(4)式～(6)式には、各種気候指数の算出式を示す。ここで、(4)式の t は月平均気温 (°C), d は月降水日数 (day) である。(5)式の P は年降水量 (mm), T は (1～12 月までの月平均気温が正の月の合計) を 12 で除した値 (°C) である。(6)式の a は月平均気温 (°C) である。

$$\text{Climate Index (CI)} = \frac{\sum(t - 2.0)(d - 3.0)}{16.7} \quad \dots(4)$$

$$\text{Aridity Index (AI)} = \frac{P}{T + 10.0} \quad \dots(5)$$

$$\text{Warmth Index (WI)} = \Sigma(a - 5.0) \quad \dots(6)$$

2) 各種気候条件と腐朽程度の関係

表 - 6. 2 には気候指数および開空度等の算出結果と $\mu \cdot \sigma$ を一覧として示し、図 - 6. 4a と図 - 6. 4b には、 μ と各種気候条件の関係について示す。統計的にはサンプル数が少ないこともあり、危険率 5% 以内での有意性は見られなかったが、CI (スギ材) と開空度 (スギ材) では危険率 10% で有意性が見られた。

日本の CI 分布状況は長谷川 (1989) が Scheffer 分布図を論文に示しており、長野県付近は 50~60、静岡県付近は 70~80、青森県は 40~50 の範囲であり、今回の筆者算出結果と概ね一致している。

気候指数である CI, AI, WI と μ の関係性をそれぞれ考察すると、CI との関係性が特に強い傾向が見られ、カラマツ材及びスギ材ともに CI が上昇するほど μ も増加している。WI についても μ との関係が見られ、カラマツ材では長野県のみの数値であるため WI のレンジが狭く、やや関係性が薄れてはいるが、スギ材の全国データも総合し考察すると、WI が上昇するほど μ も増加すると思われる。ただし、 μ と AI については明瞭な関係が認められなかった。ここで指数以外の各気候因子とも μ との影響性を検討したが、年平均気温と標高には右上がりの傾向が確認できたものの、降水量及び降水日数には明瞭な関係性が見られなかった。降水量や降水日数にはアメダスデータでは降雪も含まれており、影響を受けていると推察される。水の因子としての降水量や降水日数は、それぞれ単独の因子としての関係性が得られなかった。

CI は月平均気温と月降水日数の積であり、つまり気温と水の因子のため、木材腐朽と関連している項目である。CI と μ の関係より、複数の因子を掛け合わせた場合の方が、気候因子単独よりも腐朽程度との関係性がよいことがわかる。一方で Dang et al. (2008) の京都府におけるスギ材木堰堤の報告では、WI と腐朽速度には関係性が認められていないが、本研究において長野県のみで比較した場合には関係性がやや弱い、全国データを総合すると、WI と木堰堤腐朽には関係性が認められた。他の気候因子として開空度、標高とも各々 μ と比較したところ、標高には関係性が認められたが、開空度は気温と降水量の因子も相互に影響してくることから強い関係が見られない。標高が高い地域では気温が低下する一方、降水量が多い環境になりやすいため、木堰堤の腐朽が進行しやすくなっていると考えられる。

表 - 6. 2 気候指数等算出結果

対象地	μ (mm)	σ (mm)	CI	AI	WI	年平均気温 (°C)	年平均降水量 (mm)	年平均降水日数 (day)	開空度 (%)	標高 (m)	アメダス 観測所
調査時	施工後5年経過	カラマツ材									
内山3	28.85	8.19	52.3	45.5	87.3	10.8	956.8	102.8	18.7	850	佐久
虚空蔵山	28.30	10.07	57.7	43.1	97.3	12.2	958.1	109.4	12.5	520	上田
中条	19.81	6.56	52.8	50.2	97.4	12.2	1,118.3	108	46.3	620	松本
高島谷	34.01	6.49	64.5	74.3	93.6	11.8	1,627.9	126	28.9	1,080	伊那
上松	28.74	5.57	65.0	90.1	86.7	11.0	1,905.0	138	13.1	800	木曽福島
浪合	21.64	8.03	54.8	117.4	74.2	9.5	2,322.3	144	24.1	1,090	浪合
調査時	施工後3年経過	スギ材									
前平	18.11	8.01	63.3	64.4	93.8	11.5	1,395.9	169.8	15.7	660	飯山
浅間	21.15	9.38	54.8	117.4	74.2	9.5	2,322.3	144	18.9	810	浪合
主水釣	34.51	7.01	90.9	89.9	135.1	16.3	2,363.0	132	41.2	600	富士
大沢内	15.73	4.57	56.1	61.4	80.7	10.8	1,287.7	187.3	22.5	20	五所川原

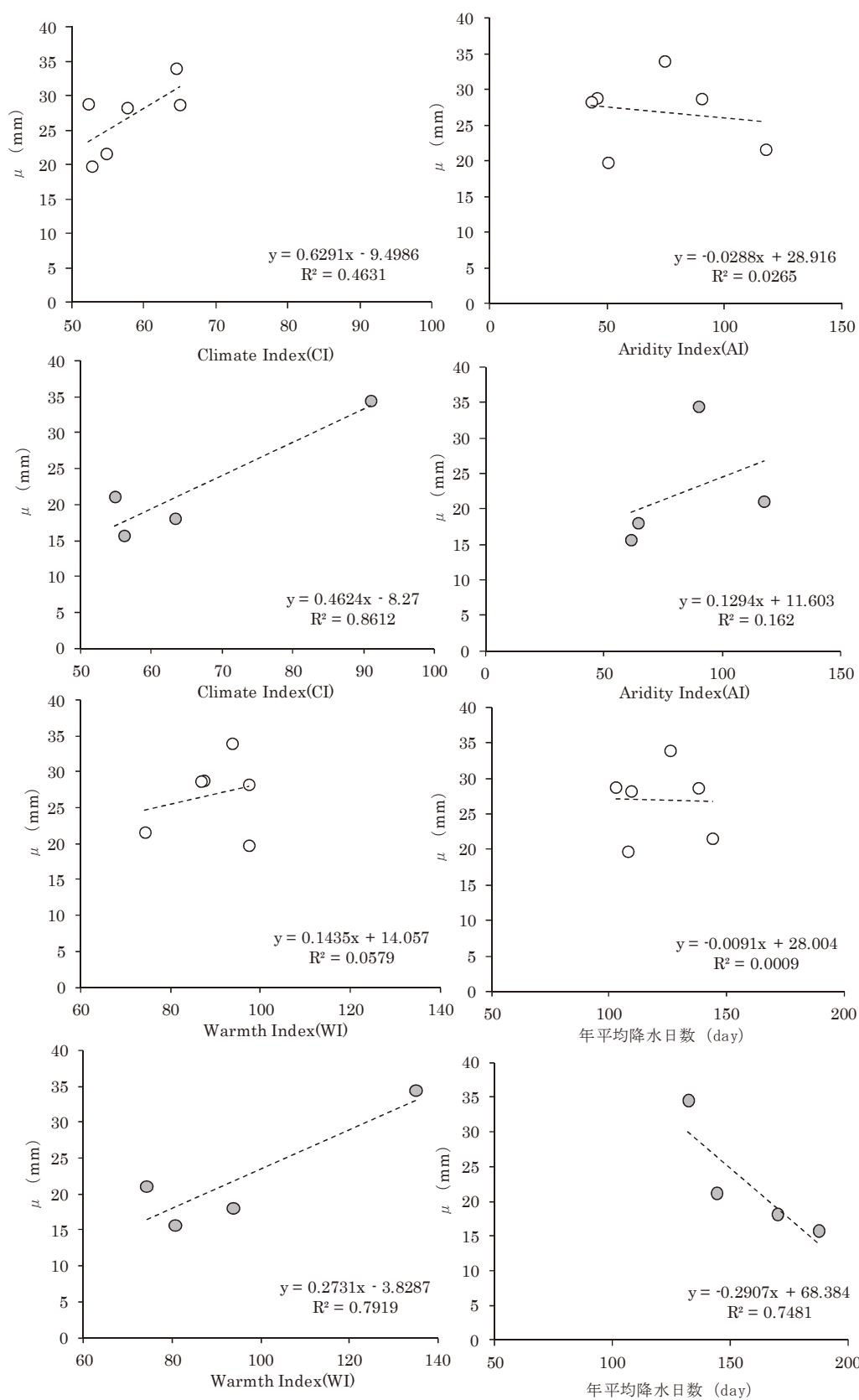


図 - 6. 4a μ と気候条件の関係

○ : カラマツ材 (5 年経過), ● : スギ材 (3 年経過)

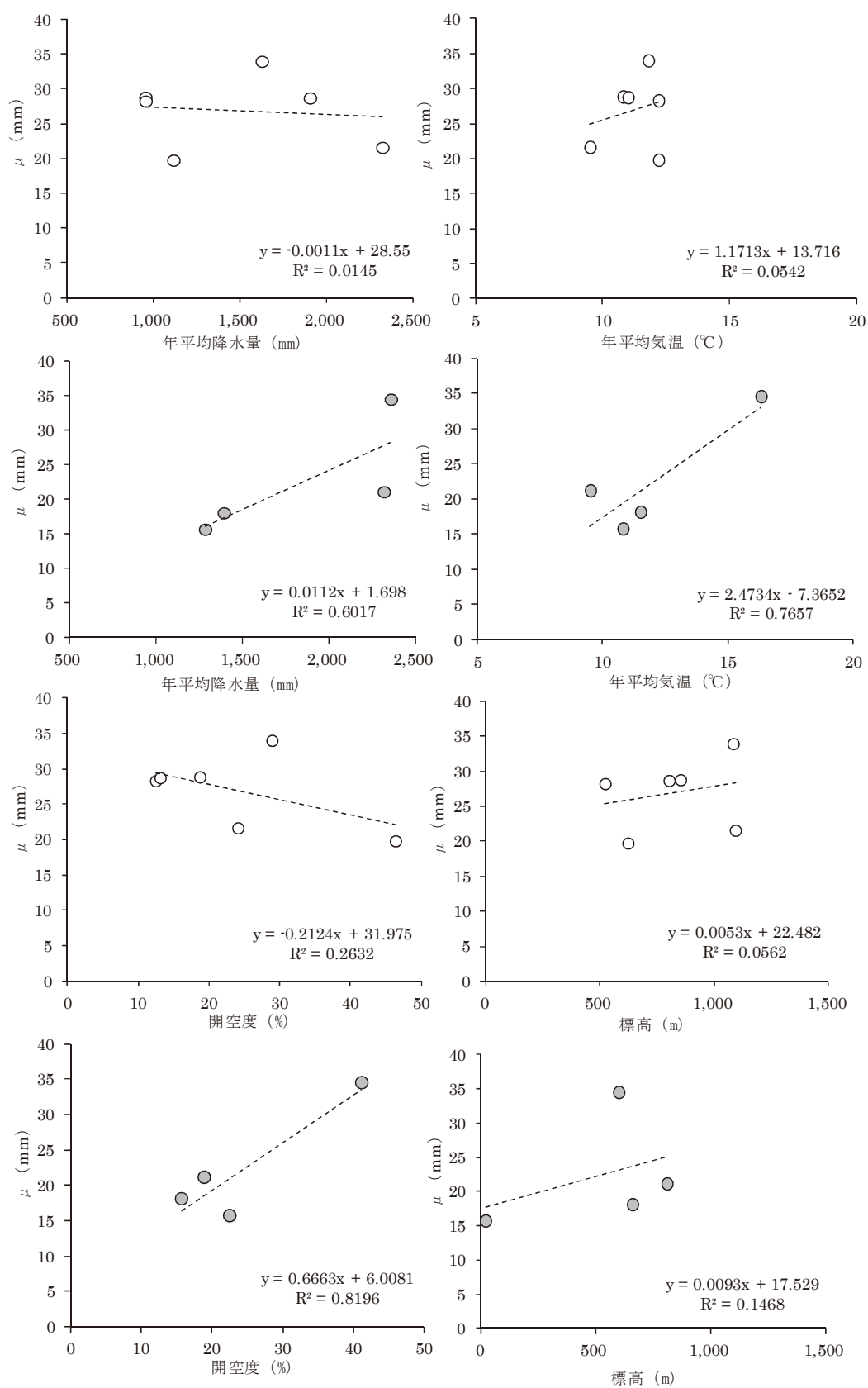


図 - 6. 4b μ と気候条件の関係

○ : カラマツ材 (5 年経過), ● : スギ材 (3 年経過)

6. 4 腐朽と構造条件の関係

1) 木堰堤の構造条件

木堰堤の腐朽の進行程度と構造条件の関係を明らかにするため、一般構造図と計画縦断面図から水通し幅や堤長、堤高等の木堰堤施設規模を集計した。構造条件の項目として、合理式から算出した清水流量に基づき、比流量と洪水時水深（等流水深）を加えた。清水流量の算出においては各地域別の降雨強度式より 100 年超過確率雨量を地域毎に定め、洪水到達時間及び平均雨量強度を算定した。等流水深の算出にはマニング式を使用し、粗度係数は山地流路 0.03～0.05（河川砂防技術基準調査編 2012）の平均値をとり、0.04 を適用した。

2) 各種構造条件と腐朽程度の関係

表 - 6. 3 及び表 - 6. 4 には清水流量の計算結果と木堰堤構造条件、 $\mu \cdot \sigma$ の一覧を示し、図 - 6. 5 a と図 - 6. 5 b には、 μ と構造条件の関係についてそれぞれ示す。 μ と構造条件の間には、比流量（スギ材）が危険率 5 % で有意となる。サンプル数が少ないことがあり、その他の因子は統計的に危険率 10 % 以内での有意性が認められない。

木堰堤施工地は 1 次谷以下の小溪流が多いため、比流量は概ね $7.1 \sim 34.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ と大きく、等流水深も 1.0m 以下である。ただし上流域のため、設置位置は急勾配地点が多い。

各種の構造条件と μ を比較したところ、比流量との間に関係性が見られるが、現河床勾配や等流水深とは関係が認められなかった。さらに、袖部の高さとは関係性が弱い。水通し幅、堤長、堤高については規模が大きくなるほど μ も増加する傾向が見られる。木堰堤構造条件は堤体への直接的な水分環境に関わると考えられ、比流量との間に関係が見られることから、流域面積や降水量といった水の因子は腐朽に影響を及ぼすことがわかる。一方で現河床勾配や、計算から求める等流水深は μ との関係性が弱いために腐朽への影響は小さい。また、 μ と水通し幅、堤長、堤高といった因子との間にも関係性が認められることから、木堰堤の規模自体も腐朽程度に影響を及ぼすといえる。施工地の川幅が広く、ある程度の高さを堤体に与えた場合には袖部に湿潤な環境が維持されることになり、腐朽が進行しやすくなると考えられる。目安として、堤長 15m 以上、堤高 3m 以上となる木堰堤構造条件から腐朽程度が大きくなることがわかる。

表 - 6 . 3 比流量の計算結果

対象地	降雨強度式 領域名	流域面積 (km ²)	確率日雨量 (mm/day)	係数 (Kp1)	洪水到達 時間 (min)	定数 (Kp2)	平均雨量 強度 (mm)	流出係数 (Kf1)	有効雨量 強度 (Pe)	清水流量 (m ³ /s)	比流量 (m ³ /s/km ²)
調査時	施工後5年経過	カラマツ材									
内山3	南佐久	0.17	191.3	120	19.6	-0.5	68.3	0.85	57.8	2.7	15.9
虚空蔵山	上田	3.90	138.5	120	52	-0.5	30.4	0.85	25.7	27.8	7.1
中条	松本	0.05	146.9	120	15.9	-0.5	58.2	0.85	49.4	0.7	14.0
高島谷	飯伊	0.09	252.9	120	14.7	-0.5	104.3	0.85	88.2	2.2	24.4
上松	木曽	0.02	227.9	120	10.3	-0.5	112.3	0.85	95.0	0.5	25.0
浪合	飯伊	0.07	252.9	120	13.8	-0.5	107.6	0.85	91.2	1.8	25.7
調査時	施工後3年経過	スギ材									
前平	野沢温泉	1.25	156.7	120	36.4	-0.5	41.1	0.85	34.8	12.1	9.7
浅間	飯伊	0.94	252.9	120	27.5	-0.5	76.2	0.85	64.5	16.8	17.9
主水釣	三島	0.33	384.5	120	17.4	-0.5	145.8	0.85	123.3	11.2	34.4
大沢内	青森	0.65	200.9	120	27.5	-0.5	60.6	0.85	51.3	9.2	14.2

表 - 6. 4 木堰堤構造条件

対象地	μ (mm)	σ (mm)	比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)	現河床勾配 (1/n)	現河床勾配 ($^\circ$)	等流水深 (m)	水通し幅 (m)	堤長 (m)	堤高 (m)	袖部高 (m)
調査時	施工後5年経過	カラマツ材								
内山3	28.85	8.19	15.9	2.4	22.3	0.23	2.00	8.50	2.10	0.84
虚空藏山	28.30	10.07	7.1	7.0	8.2	0.83	4.00	17.50	3.15	1.50
中条	19.81	6.56	14.0	2.2	24.7	0.10	2.00	9.00	2.10	0.98
高鳥谷	34.01	6.49	24.4	4.1	13.8	0.18	3.12	19.50	3.08	0.98
上松	28.74	5.57	25.0	2.7	20.6	0.15	0.84	8.65	2.52	0.70
浪合	21.64	8.03	25.7	6.1	9.4	0.18	3.00	16.00	2.00	1.20
調査時	施工後3年経過	スギ材								
前平	18.11	8.01	9.7	21.0	2.7	0.70	4.00	8.50	2.10	0.84
浅間	21.15	9.38	17.9	3.3	16.9	0.75	2.00	12.50	3.12	1.08
主水釣	34.51	7.01	34.4	8.3	6.9	0.60	3.00	15.00	3.00	1.00
大沢内	15.73	4.57	14.2	21.4	2.7	0.91	2.00	10.50	2.10	1.05

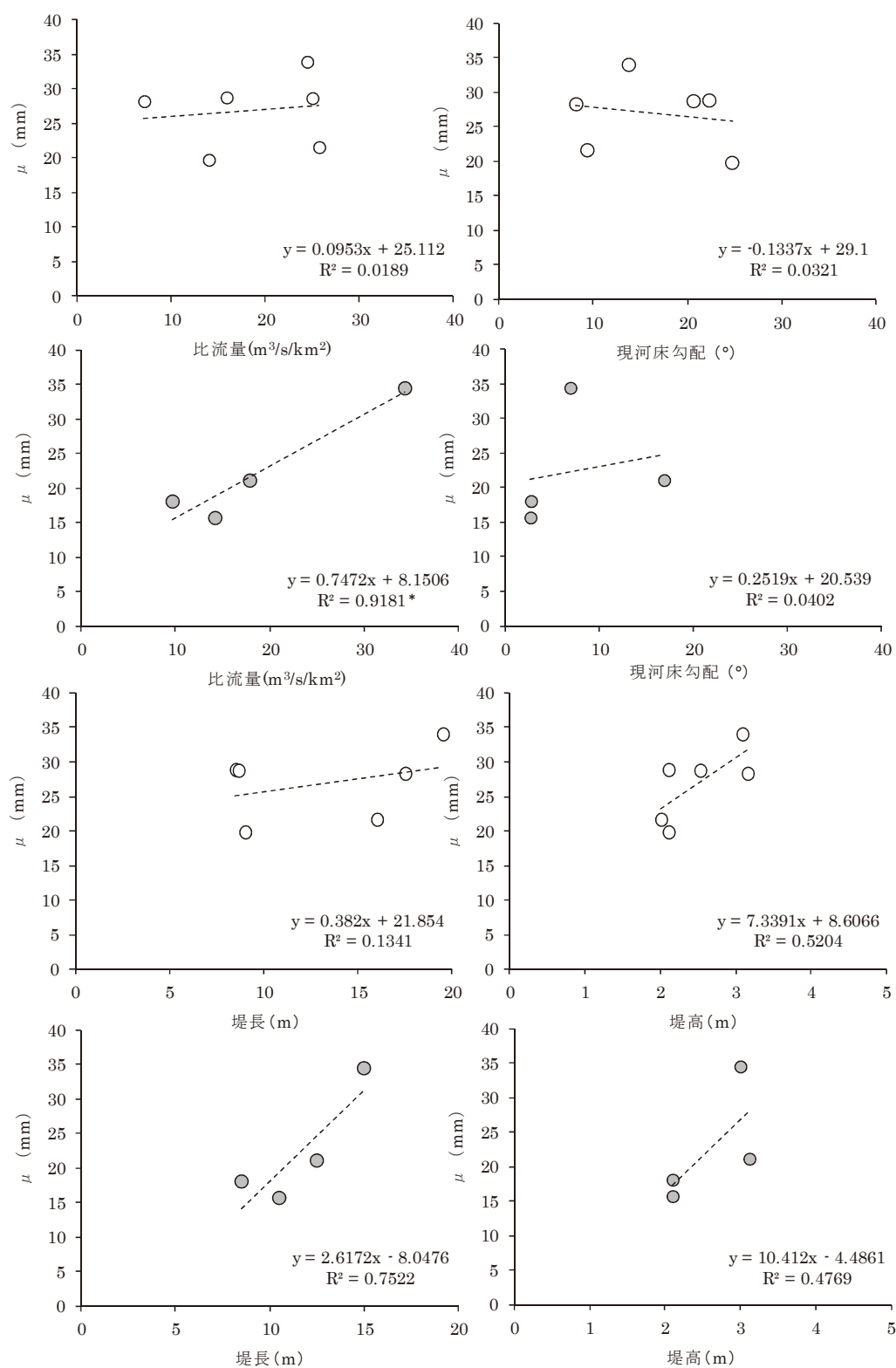


図 - 6. 5a μ と構造条件の関係

○ : カラマツ材 (5 年経過), ● : スギ材 (3 年経過)

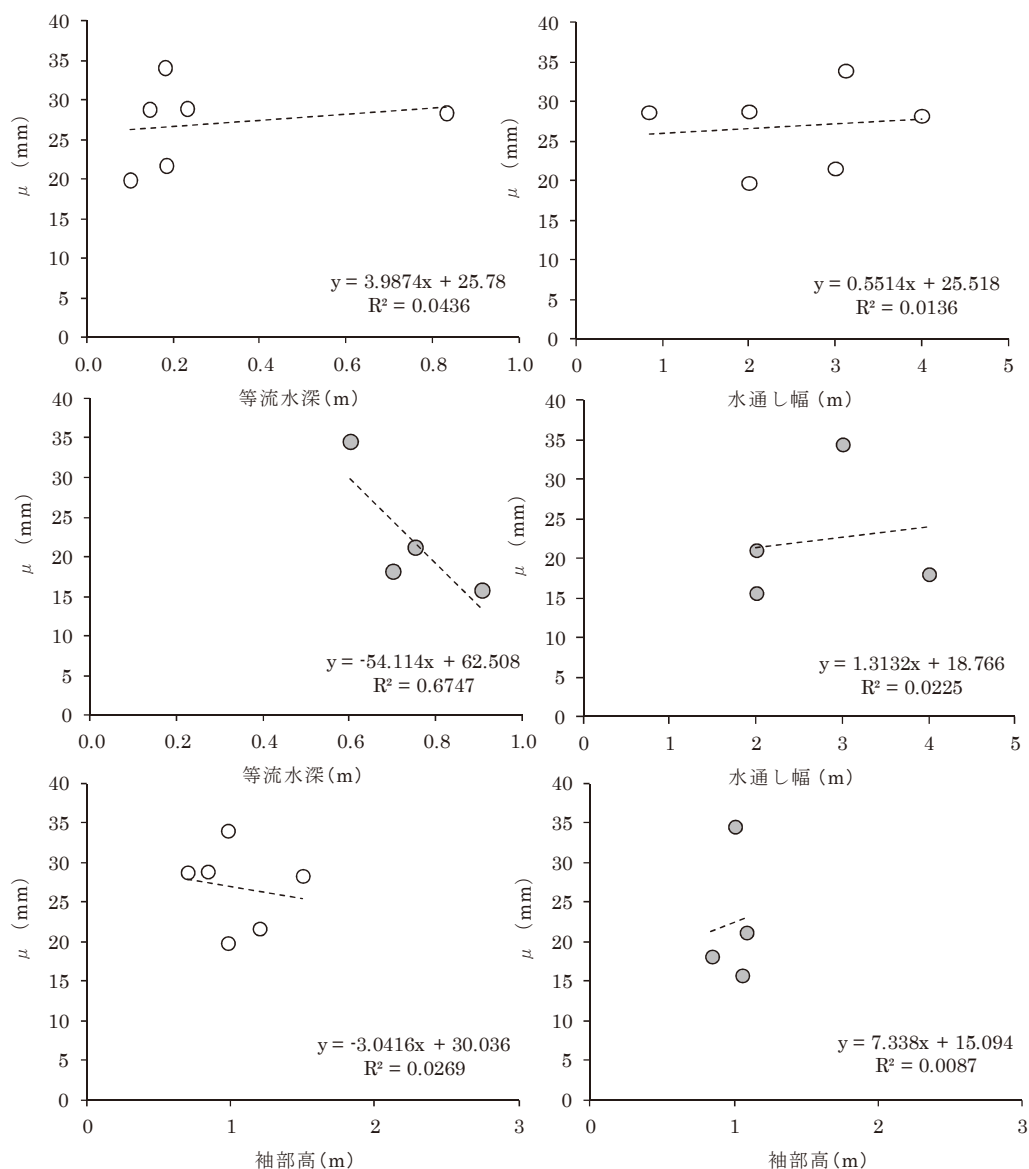


図 - 6. 5b μ と構造条件の関係

○ : カラマツ材 (5 年経過), ● : スギ材 (3 年経過)

6. 5 気候条件及び構造条件との関係からの重回帰分析

ここまでの木堰堤の腐朽と気候条件及び構造条件との関係を総合的に考察するため、条件毎に重回帰分析を行い μ に対する影響を明らかにする。重回帰分析は変数減少法に基づくこととし、まず環境条件及び構造条件のそれぞれ全因子を説明変数として分析を行い、算出される t 値から影響性の低い因子を徐々に外していき、最終的な説明変数を求めた。分析においては多重共線性を考慮し、気候指数の場合は関連性の高い CI を選び、CI の因子となる気温と降水日数は重複するため先に除外することとした。ここでは木堰堤の腐朽程度に及ぼす環境条件と構造条件の因子を明らかにすることが目的であるため、経過年数 3

年と5年の違い及び、スギ材とカラマツ材の樹種の違いは考慮せず、統合して重回帰分析を行なった。

表 - 6. 5 には気候条件と構造条件それぞれの μ との重回帰分析結果を示す。変数減少法の結果、気候条件では説明変数として、CI と標高の2因子が残り、以下の(7)式を求めた。ここで、 $x1$ は CI であり、 $x2$ は標高である。

$$\mu = 0.35x1 + 0.01x2 - 3.44 \dots (7)$$

$$R = 0.75 \quad P = 0.0571 \quad (P < 0.1)$$

表 - 6. 5 気候条件及び構造条件の重回帰分析結果

項目	重回帰式 符号	回帰係数	t	p	単相関係数		
					μ	CI	標高
切片		-3.44	-0.34	0.74			
μ	y				1.00		
CI	$x1$	0.35	2.41	0.05	0.59	1.00	
標高	$x2$	0.01	1.84	0.11	0.44	-0.04	1.00

項目	重回帰式 符号	回帰係数	t	p	単相関係数		
					μ	比流量	堤高
切片		1.07	0.12	0.90			
μ	y				1.00		
比流量	$x1$	0.36	1.79	0.12	0.56	1.00	
堤高	$x2$	6.83	2.04	0.08	0.61	0.21	1.00

説明変数として選ばれた CI と標高は危険率 10%以内で有意である。(7)式の P 値より、環境条件のみとしては CI の影響が大きいことがわかる。ここで因子として選ばれた標高は、標高が上がるほど、一般的に気温低減率 $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ と降水量増加があることから、CI とは重複する部分がある。

次に構造条件では説明変数として、比流量と堤高の2因子が残り、以下の(8)式を求めた。ここで、 $x1$ は比流量であり、 $x2$ は堤高である。

$$\mu = 0.36x1 + 6.83x2 + 1.07 \dots (8)$$

$$R = 0.76 \quad P = 0.0511 \quad (P < 0.1)$$

説明変数として選ばれた比流量と堤高についても、危険率 10%以内で有意である。(8)式の P 値より、構造条件のみでは堤高による影響が大きいことがわかる。堤高を上げることで下流面側の河床と袖部の比高差がつくことになり、袖部の部材温度が下がりにくくな

と考えられる。堤高を抑えると袖部は下流面側の河床と近付き、結果として冷涼な環境に置かれることで袖部の腐朽の進行が抑えられていると思われる。

最後に、気候条件と構造条件を統合して考察することとし、双方の前述で選ばれた説明変数から重回帰式を求めたところ、以下の(9)式が得られた。 P 値の結果から、比流量は説明変数から外れる。ここで、 $x1$ はCI、 $x2$ は標高、 $x3$ は堤高である。

$$\mu = 0.23x1 + 0.01x2 + 5.04x3 - 8.46 \dots (9)$$

$$R = 0.82 \quad P = 0.0691 (P < 0.1)$$

表 - 6. 6 には、最終的な重回帰分析結果を示す。説明変数としたCIと標高、堤高については、危険率10%以内で有意である。(9)式の t 値より、気候条件と構造条件を合わせた場合には、木堰堤腐朽に対しCIと標高が最も影響することになる。回帰係数は堤高が5.04と、CIの0.23より高いが、木堰堤の堤高は安定上ほぼ3m以内で抑えられるため、CIの値によって木堰堤の腐朽の進行程度が左右されることが考えられる。

影響因子としては t 値からも気候条件が最も効くことになり、木堰堤の腐朽程度は μ を評価値とした予測式により、アメダス観測所データからCIを求めることで推定できると考えられる。

表 - 6. 6 重回帰分析統合結果

項目	重回帰式 符号	回帰係数	t	p	μ	単相関係数		
						CI	標高	堤高
切片		-8.46	-0.91	0.40				
μ	y				1.00			
CI	$x1$	0.23	1.71	0.14	0.59	1.00		
標高	$x2$	0.01	1.70	0.14	0.44	-0.04	1.00	
堤高	$x3$	5.04	1.41	0.21	0.61	0.42	0.13	1.00

6. 6 まとめ

本章では、施工後5年経過したカラマツ材木堰堤と施工後3年経過したスギ材木堰堤におけるプロディン貫入量平均値 μ と気候条件及び構造条件の関係性を明らかにした。スギ材木堰堤においても、カラマツ材木堰堤と同様に施工直後は正規分布となり、腐朽した木堰堤は対数正規分布で近似でき、元々の μ の値に6.5mm程度の差はあるが μ と σ から腐朽の進行程度の推定が可能であった。重回帰分析はスギ材とカラマツ材を合わせた結果ではあるが、両者に対する影響因子としてCI、標高、堤高が抽出された。統計解析上では、CIが最も腐朽に影響を及ぼす因子となっている。CIはアメダス観測所のデータからある程度簡便に算出することが可能であり、腐朽との間に関係性が得られたということは実質的に施工地の気温と降水量の高低が影響していることにつながっている。ここで関係性が見出

されたことには意義が有り、地域による木堰堤の腐朽の進行程度をある程度推定できる可能性が示されたといえる。

今後は CI の異なる他県でも幅広く木堰堤の腐朽調査を実施し、データをさらに蓄積する必要がある。今回、重回帰分析から得られた μ の予測式は経過 5 年程度までであり、スギ材とカラマツ材を合わせた式である。重回帰分析からの 3 因子よりある程度の腐朽の予測が可能であるが、厳密には樹種や長期経過したデータを集積し、将来的には予測式の精度を向上させる必要がある。本章のまとめとして、以下に列記する。

- (1) スギ材木堰堤のピロディン貫入量の相対度数はカラマツ材の木堰堤と同様に、確率分布による表現が可能である。
- (2) ピロディン貫入量の μ と σ は直線関係にあるため、木堰堤腐朽の評価値としては、分布曲線からの μ との比較だけでよいと考えられる。
- (3) 腐朽と気候条件の関係では、CI, WI, 年平均気温, 標高が木堰堤腐朽に影響を及ぼす因子と考えられる。CI のように温度と水の因子を掛け合わせた指数の方が、降水量等の単独因子よりも、腐朽との関係性がよいと考えられる。
- (4) 腐朽と構造条件の関係では、比流量, 水通し幅, 堤長, 堤高と木堰堤腐朽の間に関係性が認められる。
- (5) 重回帰分析の結果として CI, 標高, 堤高が説明変数として抽出され、 μ の予測式が得られた。 μ の予測式は、アメダス観測所からの CI を求めることで地域別に木堰堤腐朽を推定できると考えられる。

第7章 木堰堤の腐朽速度の実態と各種条件との関係

木堰堤の腐朽のメカニズムを解明する上で腐朽速度は重要な要素であるが、調査の蓄積データが少なく、複数年調査からの検討報告はほとんどない。加えて、木堰堤の腐朽速度と気候条件や構造条件といった各種条件との関係性についても未解明である。本章では、長野県・静岡県・青森県の3県におけるカラマツ材とスギ材の木堰堤の継続調査結果より、腐朽速度の実態や影響を及ぼすと考えられる各種条件との関係性を解明することを目的とする。なお、本章での新規データは施工後7年経過の内山3、中条、浪合と、主水釣の1年・2年経過時、大沢内の4年・5年経過時の7データであり、考察する上での基礎データとして5章と6章の調査結果を加えた。6章では、3年及び5年経過の単年調査による腐朽データであったが、本章ではこれまでの継続調査という点で異なる。

7. 1 対象地

本章の調査地は長野県・静岡県・青森県の木堰堤施工地であり、調査位置を図-7. 1に示す。対象とした木堰堤はカラマツ材及びスギ材施工であり、施工後0年経過から7年経過までの施設となる。カラマツ材の木堰堤は長野県内を対象とし、スギ材の木堰堤は青森県と静岡県を対象とした。木堰堤構造はこれまでの章と同様で林野庁の森林土木木製構造物施工マニュアルに準拠して施工されている

調査地の気象条件や施設の構造条件、使用樹種を表-7. 1に示す。なお、6章で対象とした木堰堤の基礎データでは、気候条件と腐朽の関係を解明することを目的としていたため、流水の影響のある本体を外した袖部のみの調査データとなっている。表中の調査時経過年は、内山3と浪合が5年間の継続調査となり、その他の木堰堤は2年～4年間の継続調査である。適用期間は、施設が竣工した年から腐朽調査年までの期間がそれぞれの腐朽速度へ効いてくると考えられるため、該当する期間の気象データを使用した。そのため、田原と高鳥谷はどちらも伊那観測所が最寄りではあるが、適用期間が異なる。

7. 2 木堰堤の貫入増加量の分布

木堰堤の貫入増加量 $\Delta \mu$ の定義として、ピロディン貫入量の平均値 μ における前回調査からの増加量として求めた。ここで、 $\Delta \mu$ の算出式を以下の(1)式に示す。 μ の増加分が測定誤差により翌年度にマイナスとなる場合には、腐朽が進行していないと判断しゼロとした。

$$\Delta \mu \text{ (貫入増加量)} = \text{調査当年の} \mu \text{ の値} - \text{前年の} \mu \text{ の値} \quad \dots(1)$$

前年から調査期間の空いた中条、上松、高鳥谷の $\Delta \mu$ は μ の増加分を期間で除すことで求めた。その他の5基は連年調査であるため、(1)式による差分が $\Delta \mu$ となる。表-7. 2～表-7. 4にはカラマツ材木堰堤とスギ材木堰堤の $\Delta \mu$ 算出結果を示す。

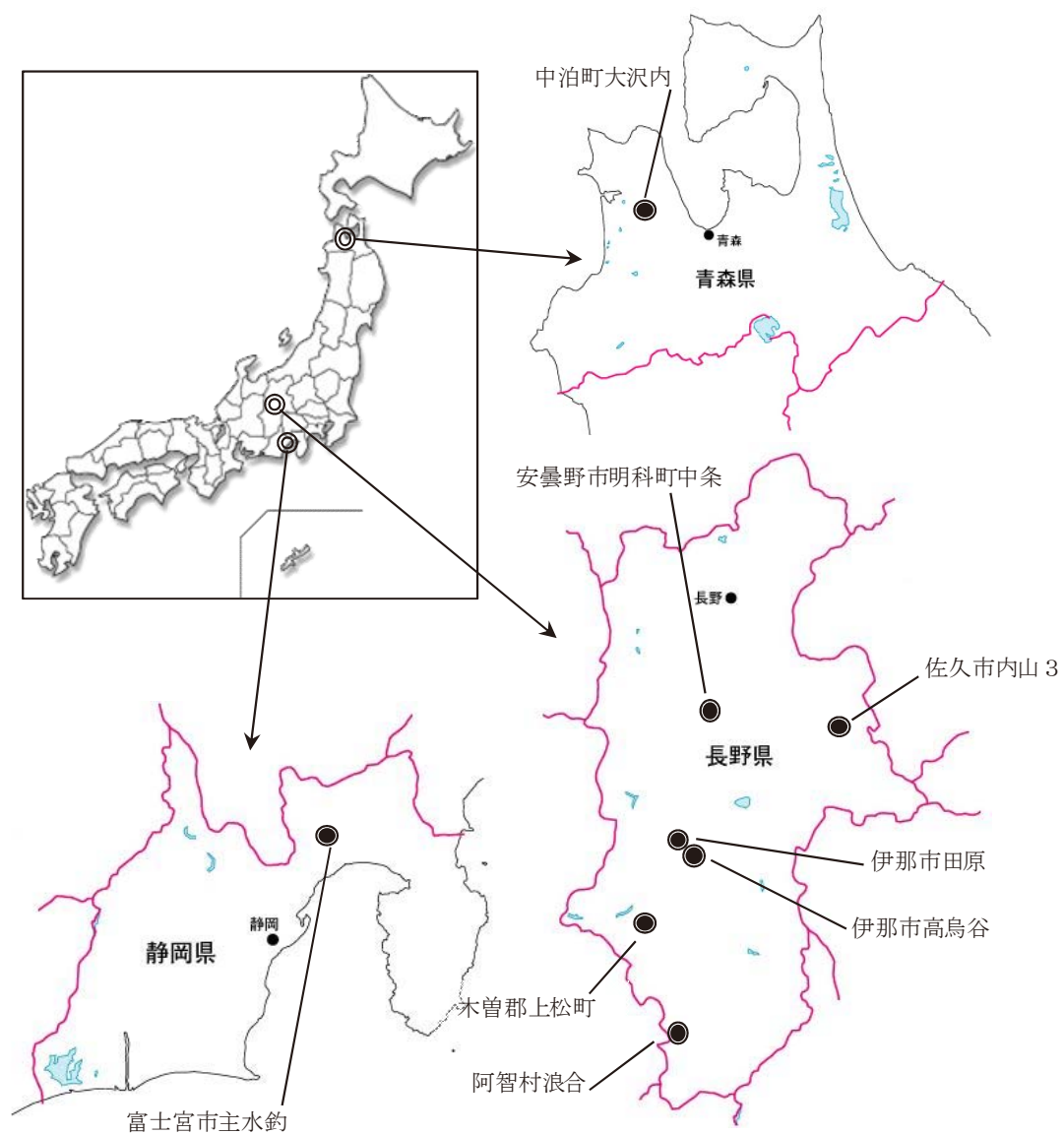


図 - 7. 1 調査対象位置

表 - 7 . 1 調査対象概要

県名	施工地	竣工年及び調査時経過年										木堰堤構造				立地及び気候条件				アメダス観測所		
		竣工年	0	1	2	3	4	5	6	7	樹種	堤長 (m)	堤高 (m)	標高 (m)	流域面積 (km ²)	年平均 気温 (℃)	年平均降 水量 (mm)	年平均降水 日数 (day)	観測所名	標高 (m)	施工地との 距離 (km)	適用期間
長野	内山 3	2003			●	●	●	●	●	●		8.50	2.10	850	0.17	10.9	1,044	109	佐久	683	11.4	2003～2010
	中条	2006		●				●	●	●		9.00	2.10	620	0.05	12.1	1,093	109	松本	610	11.4	2006～2013
	田原	2003			●		●				カラマツ	10.98	1.96	626	0.09	11.2	1,570	111	伊那	633	5.5	2003～2007
	高鳥谷	2005			●			●				19.50	3.08	1,080	0.09	11.7	1,498	121	伊那	633	7.8	2005～2010
	上松	2006	●	●			●	●				8.65	2.52	800	0.02	10.9	1,941	141	木曾福島	750	14.8	2006～2011
	浪合	2003			●	●	●	●	●	●		16.00	2.00	1,090	0.07	9.7	2,644	149	浪合	940	2.7	2003～2010
	主水釣	2008		●	●						スギ	15.00	3.00	600	0.33	16.2	2,426	128	富士	66	20.1	2008～2011
静岡 青森	大沢内	2006			●	●	●	●				10.50	2.10	20	0.65	10.6	1,253	186	五所川原	9	19.4	2006～2011

表 - 7. 2 常水の無いカラマツ材木堰堤の $\Delta \mu$ (貫入増加量)

経過年数 (year)	n	内山 3 μ (mm)							
		1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
3	812	20.68	14.20	25.33	23.68	19.74	18.37	11.94	21.74
4	810	26.22	17.36	30.33	27.74	23.12	22.66	14.01	28.01
5	751	31.69	20.57	34.35	34.07	28.67	27.43	20.85	33.76
6	625	35.41	24.90	33.43	36.92	31.51	31.56	26.33	26.15
7	323	27.79	27.60	34.13	35.32	33.56	32.72	30.37	35.31

経過年数 (year)	$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)							
	1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
3→4	5.54	3.15	5.00	4.06	3.38	4.29	2.07	6.27
4→5	5.47	3.22	4.01	6.33	5.55	4.77	6.84	5.75
5→6	3.72	4.32	0.00	2.85	2.84	4.13	5.48	0.00
6→7	0.00	2.70	0.70	0.00	2.05	1.15	4.04	9.16
sum.	14.73	13.40	9.71	13.24	13.82	14.35	18.43	21.17

経過年数 (year)	n	中条 μ (mm)						
		1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目
1	534	13.52	12.44	11.93	12.26	10.65	10.71	12.73
5	203	18.99	22.55	17.99	-	-	-	-
7	101	21.19	22.50	17.62	-	-	-	-

経過年数 (year)	$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)						
	1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目
1→5	5.47	10.11	6.07	-	-	-	-
5→7	2.19	0.00	0.00	-	-	-	-
sum.	7.66	10.11	6.07	-	-	-	-
$\Delta \mu$ (1→5)	1.37	2.53	1.52	-	-	-	-
$\Delta \mu$ (5→7)	1.10	0.00	0.00	-	-	-	-

経過年数 (year)	n	上松 μ (mm)							
		1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
0	687	14.16	14.16	14.16	14.16	14.16	14.16	14.16	14.16
1	692	14.50	17.96	13.36	19.14	15.86	16.84	13.71	18.00
5	192	27.00	29.17	30.25	-	-	-	-	-

経過年数 (year)	$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)							
	1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
0→1	0.34	3.81	0.00	4.99	1.70	2.69	0.00	3.84
1→5	12.50	11.21	16.88	-	-	-	-	-
sum.	12.84	15.02	16.88	4.99	1.70	2.69	0.00	3.84
$\Delta \mu$ (0→1)	0.34	3.81	0.00	4.99	1.70	2.69	0.00	3.84
$\Delta \mu$ (1→5)	3.13	2.80	4.22	-	-	-	-	-

Note: 縦罫線は袖部と本体の境を示す。

表 - 7. 3 常水の有るカラマツ材木堰堤の $\Delta \mu$ （貫入増加量）

経過年数 (year)		n	浪 合 μ (mm)									
			1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目			
3	554	554	15.42	13.75	13.81	15.83	14.22	17.18	15.04			
4	553	553	18.50	17.65	17.29	21.89	15.78	18.75	15.32			
5	556	556	21.23	19.97	20.25	26.31	14.96	16.96	15.82			
6	547	547	27.20	24.99	26.79	29.90	21.38	23.96	23.11			
7	528	528	31.47	28.88	34.55	31.20	24.19	23.45	23.31			
経過年数 (year)			$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)									
			1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目			
3→4			3.08	3.90	3.48	6.06	1.56	1.58	0.28			
4→5			2.72	2.32	2.96	4.41	0.00	0.00	0.50			
5→6			5.97	5.02	6.54	3.60	6.42	7.00	7.29			
6→7			4.27	3.89	7.76	1.30	2.82	0.00	0.20			
sum.			16.04	15.13	20.73	15.37	10.80	8.58	8.27			
経過年数 (year)		n	田 原 μ (mm)									
			1段目	2段目	3段目		1段目	2段目	3段目	4段目	5段目	
3	1066	1066	27.21	20.61	19.62		19.07	18.36	17.77	21.38	14.20	
4	675	675	30.83	23.56	25.68		20.16	18.73	19.57	21.48	15.30	
経過年数 (year)			$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)									
			1段目	2段目	3段目		1段目	2段目	3段目	4段目	5段目	
3→4			3.61	2.95	6.07		1.09	0.38	1.80	0.10	1.09	
sum.			-	-	-		-	-	-	-	-	
経過年数 (year)		n	高 鳥 谷 μ (mm)									
			1段目	2段目	3段目	4段目		1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
2	761	761	15.06	16.66	14.12	15.52		12.85	16.75	12.85	13.43	15.36
5	366	366	32.95	36.69	32.81	33.44		-	-	-	-	-
経過年数 (year)			$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)									
			1段目	2段目	3段目	4段目		1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
2→5			17.89	20.03	18.69	17.92		-	-	-	-	-
sum.			-	-	-	-		-	-	-	-	-
$\Delta \mu$			5.96	6.68	6.23	5.97		-	-	-	-	-

Note: 縦罫線は袖部と本体の境を示す。

表 - 7. 4 スギ材木堰堤の $\Delta \mu$ (貫入増加量)

経過年数 (year)	n	主水釣 μ (mm)					
		1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目
1	367	21.05	21.49	24.61	18.21	25.60	20.64
2	489	22.57	24.27	25.91	18.93	20.85	21.32
3	215	33.18	32.41	37.98	-	-	-

経過年数 (year)	$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)					
	1段目	2段目	3段目	1段目	2段目	3段目
1→2	1.51	2.78	1.30	0.72	0.00	0.68
2→3	10.61	8.14	12.07	-	-	-
sum.	12.12	10.93	13.37	-	-	-

経過年数 (year)	n	大沢内 μ (mm)						
		1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目
3	438	15.10	16.09	16.60	15.18	26.31	24.31	22.60
4	430	24.39	26.26	26.56	24.67	32.01	30.47	24.44
5	270	21.04	24.34	25.94	22.85	-	-	-

経過年数 (year)	$\Delta \mu$ 貫入増加量 (mm/year)						
	1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目
3→4	9.29	10.17	9.96	9.49	5.70	6.16	1.84
4→5	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-
sum.	9.29	10.17	9.96	9.49	-	-	-

Note; 縦罫線は袖部と本体の境を示す。

木堰堤別の $\Delta \mu$ 算出結果に基づき、常水有無と部位別、樹種別にヒストグラムの分布形による比較を行った。図 - 7. 2 には常水の有無で分割した $\Delta \mu$ 分布の比較を示す。カラマツ材の袖部では、常水の有無による分布差が見られ、常水の有る場合で袖部の腐朽が進みやすいことがわかる。本体では秋田ら（2007）や臼田ら（2013）の報告と同様に常水の有る場合で腐朽が遅いといえる。常水が有ることで本体の腐朽を遅らせることにつながるが、袖部では部材へ水分が供給されやすくなり、腐朽速度が速くなると推察される。スギ材の袖部でも、カラマツ材の分布傾向と比較的近く、常水の有る場合では無い場合よりも $\Delta \mu$ の分布は腐朽が大きい傾向にある。また、本体では常水が無い場合で腐朽が進みやすいといえる。

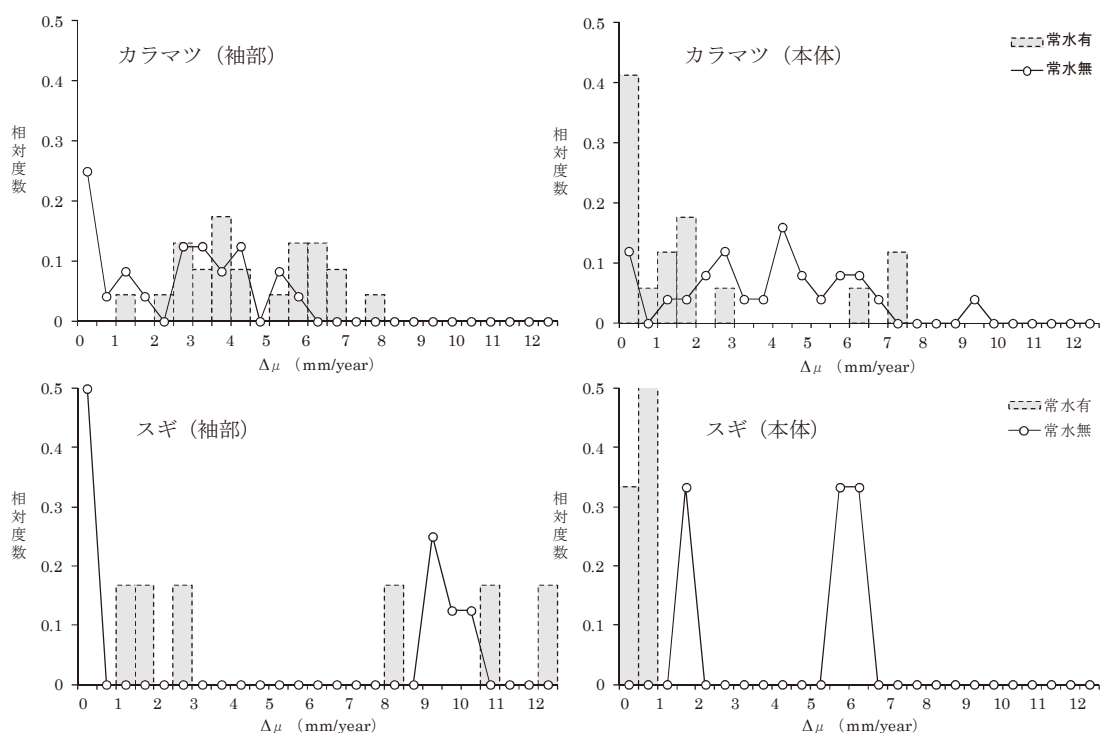


図 - 7. 2 常水有無による $\Delta\mu$ ヒストグラムと比較

図 - 7. 3 では常水有無で分割した $\Delta\mu$ を統合し、カラマツ材及びスギ材の木堰堤の部位別で比較する。カラマツ材木堰堤では袖部及び本体ともに、 $0\sim0.5\text{mm/year}$ の分布が多く、これは本体の常水の影響で腐朽が遅い部位があるためと考えられる。やや幅は広いが、 $2.5\sim4.5\text{mm/year}$ までの分布が全体的に多い傾向がある。カラマツ材木堰堤の $\Delta\mu$ は、最大 9.5mm/year までの範囲であった。カラマツ材木堰堤の袖部と本体の $\Delta\mu$ 分布は、相対度数の出現傾向がよく似ており、分布上で特に大きな差は見られない。これは本体においても、常水の無い場合で腐朽が速く、常水が有る場合であっても堤体下部で腐朽が速くなるものが分布形に影響していると考えられる。スギ材の木堰堤では、 $0\sim0.5\text{mm/year}$ の分布が特に多く、本体の常水の影響が強いと考えられる。 $\Delta\mu$ の分布は本体の $5.5\sim6.5\text{mm/year}$ が最も多くなり、さらに袖部では $8\sim12.5\text{mm/year}$ の範囲でも $\Delta\mu$ が分布する傾向が見られる。

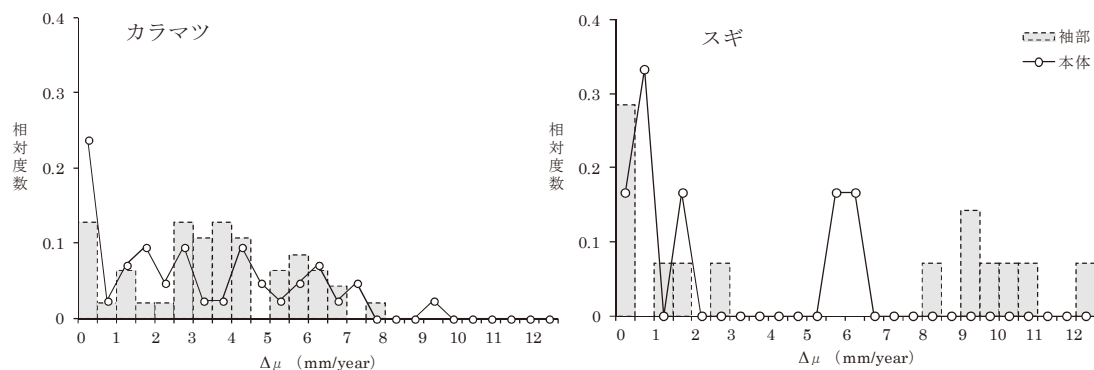


図 - 7. 3 部位別による $\Delta \mu$ ヒストグラムの比較

図 - 7. 4 には、樹種による $\Delta \mu$ ヒストグラムを示す。ここで樹種として比較するため、袖部と本体の調査結果を合わせている。カラマツ材の木堰堤の $\Delta \mu$ は指数分布に比較的近い傾向が見られる。分布形に凹凸が生じるのは、施工地によって気候条件や構造条件の影響を受けているためと考えられる。1 基の木堰堤でも、部位における微小な気温条件や水分状態の差によって $\Delta \mu$ は変動することが推察される。スギ材木堰堤の $\Delta \mu$ はカラマツ材と異なり、9 mm/year 以上の出現率が高くなり、2 樹種において分布形を比較した場合には、カラマツ材よりも腐朽が速いと考えることができる。今回の比較において、スギ材の木堰堤は静岡県と青森県のデータであり、一方カラマツ材は長野県となり、厳密には気候条件や木堰堤の構造条件が影響を及ぼしている面もある。冷涼気候の青森県の木堰堤データを加えた今回の場合であっても、スギ材木堰堤の分布形が総合的に腐朽傾向を示すことから、カラマツ材以上に腐朽しやすい可能性が高いと思われる。

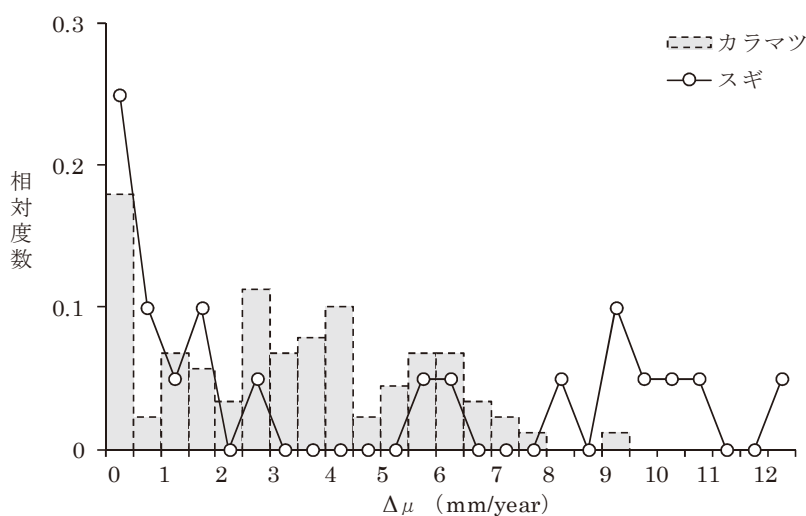


図 - 7. 4 樹種による $\Delta \mu$ ヒストグラムの比較

7. 3 腐朽速度と各種条件との関係

5章で考察したようにピロディン貫入量の平均値 μ は、経過年との間に関係性が認められる。そのため、木堰堤の腐朽速度 $\Delta \mu_v$ は一次式の傾きとして(2)式で定義できる。ここで、 y は腐朽後の μ 、 x は経過年、 b は腐朽前の μ である。 $\Delta \mu$ は単年度の貫入増加量であったが、 $\Delta \mu_v$ は複数年の継続調査による μ を傾きで平均化し、かつ腐朽前の μ に左右されないため、本研究では腐朽速度と定義した。

$$y = \Delta \mu_v \cdot x + b \quad \dots(2)$$

図 - 7. 5～図 - 7. 10 には木堰堤ごとの μ と経過年の関係を示し、表 - 7. 5 には $\Delta \mu_v$ の算出結果を示す。なお、田原と高鳥谷は2回の調査結果であるため、貫入増加量 $\Delta \mu$ を腐朽速度とした。

1) カラマツ材木堰堤の腐朽速度

常水の無い木堰堤では、内山3と中条、上松の $\Delta \mu_v$ より、袖部で1.03～3.50mm/yearの範囲となり、本体で0.0～4.99mm/yearとなることがわかる。最大値で比較すると、袖部よりも本体の腐朽が速い傾向がある。通常、木堰堤は袖部で降雨や日射の影響を強く受けるため、本体と比較して腐朽が大きくなる。本体に常水が無い場合には、堤体下部へ移行するほど腐朽速度が速く、内山3の4段目で4.92mm/year、上松の5段目で3.84mm/yearと高くなる。内山3の本体5段目では6年経過時の μ に増加が確認できず、最下部の部材で腐朽速度が落ち込んでいる。堤体下部では、湿った環境が持続し易いために腐朽が速くなると考えられる。中条では5年経過以降の本体の腐朽調査を行っていないが、袖部は2mm/year未満の腐朽となり、内山3や上松と比較して腐朽速度が明らかに遅い。ここで、山内ら(2013)のレジストグラフからの調査結果(常水無し)と比較すると、袖部で3.36～4.83mm/year、本体で1.77～2.88mm/yearと示されており、袖部のオーダーは近いが、本体は筆者らの調査結果が大きくなった。同じ樹種でかつ同一県内の調査結果ではあるが、設置環境の違いが影響していると考えられる。

常水の有る木堰堤では、浪合と高鳥谷、田原の $\Delta \mu_v$ より、袖部で2.95～6.68mm/yearの範囲となり、本体で0.10～2.55mm/yearとなることがわかった。最低値及び最大値で比較すると、袖部の方が本体と比較して腐朽が速いことになる。本体では常水の影響があるため、3.0mm未満まで腐朽速度が遅くなると考えられる。山内ら(2013)のレジストグラフからの調査結果(常水有り)と比較すると、袖部で1.78～6.22mm/year、本体で0.56～2.33mm/yearと示されていることからオーダーは極めて近くなった。そのため、前述の常水が無い木堰堤結果と合わせて考察すると、ピロディン貫入量からの腐朽速度とレジストグラフからの腐朽速度は、調査器具が異なるものの、オーダーで見ると精度的には近くなるといえる。常水の有る木堰堤では、袖部で湿った環境になり易く、本体と比較して腐朽

速度が速くなると考えられる。

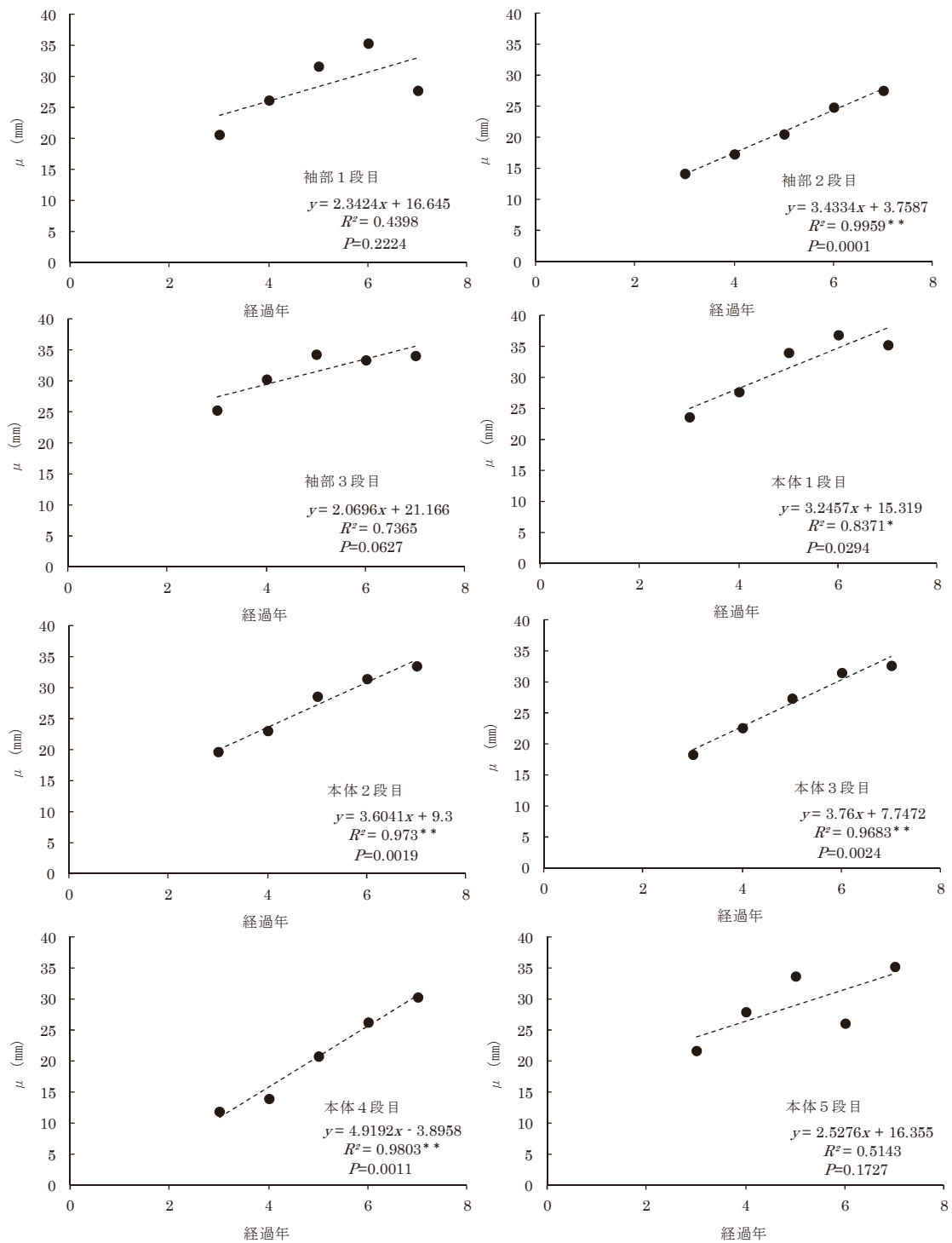


図 - 7. 5 内山 3 における腐朽速度 (カラマツ材)

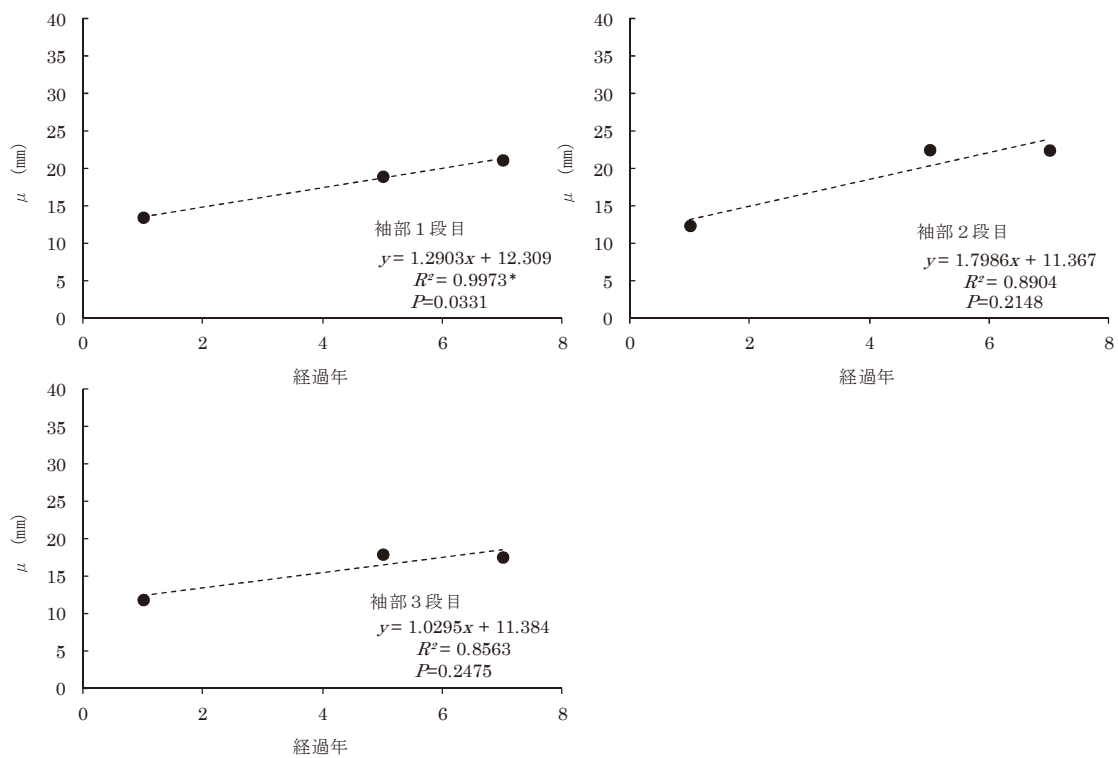


図 - 7. 6 中条における腐朽速度（カラマツ材）

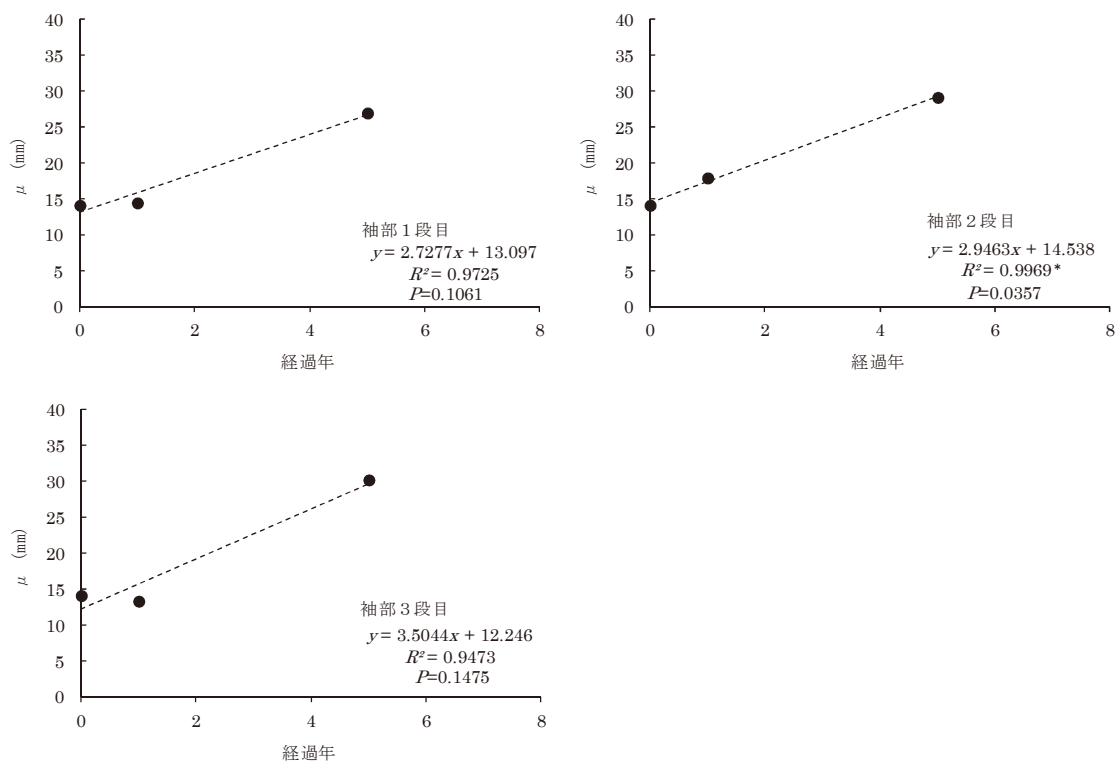


図 - 7. 7 上松における腐朽速度（カラマツ材）

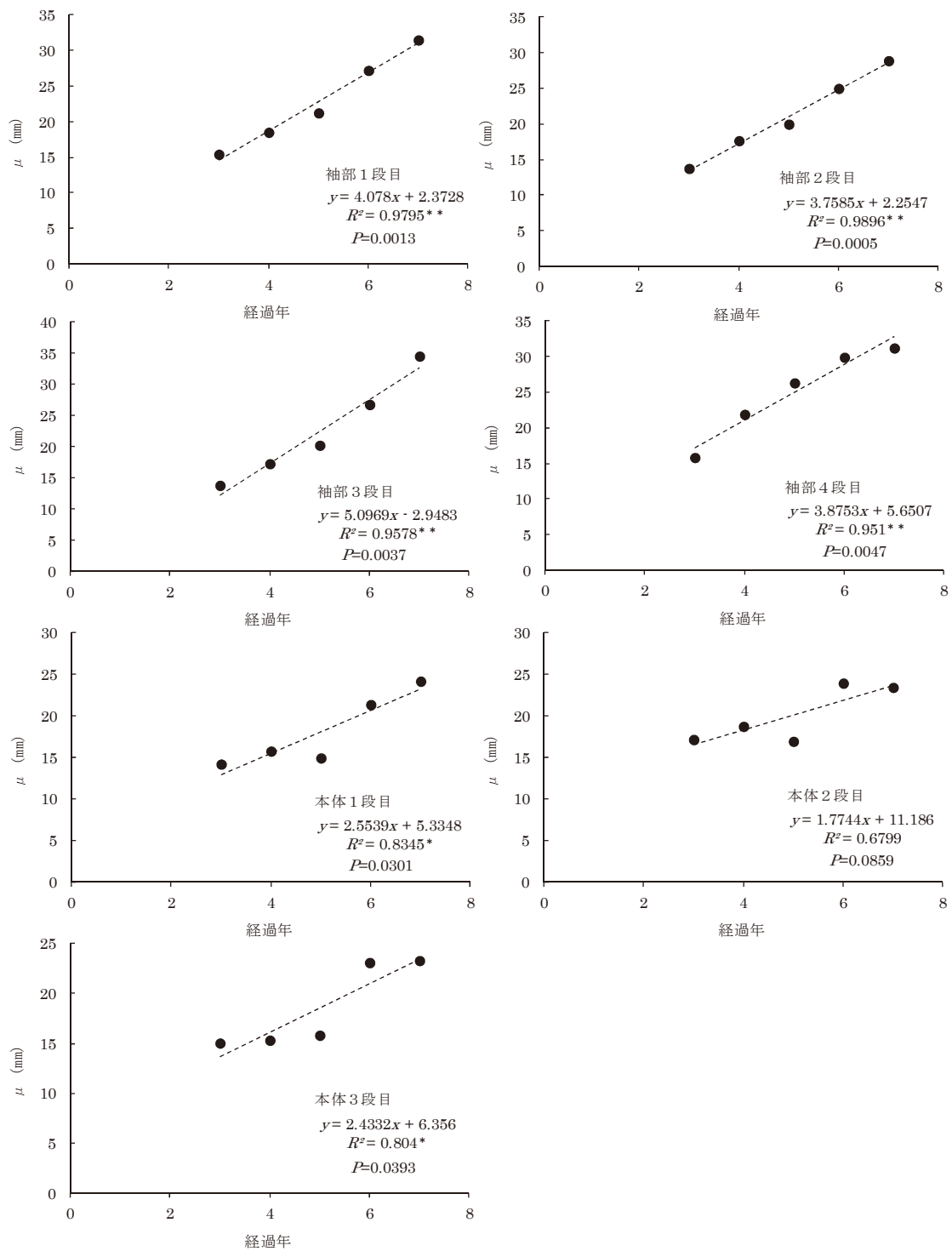


図 - 7. 8 浪合における腐朽速度 (カラマツ材)

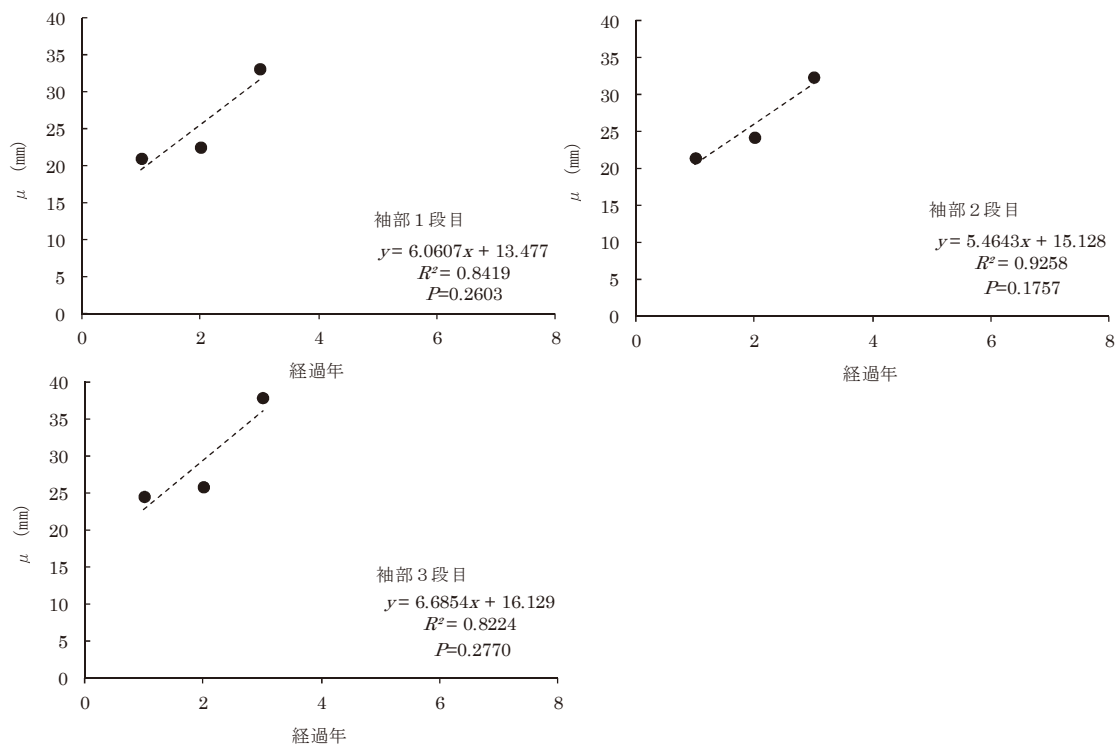


図 - 7. 9 主水釣における腐朽速度 (スギ材)

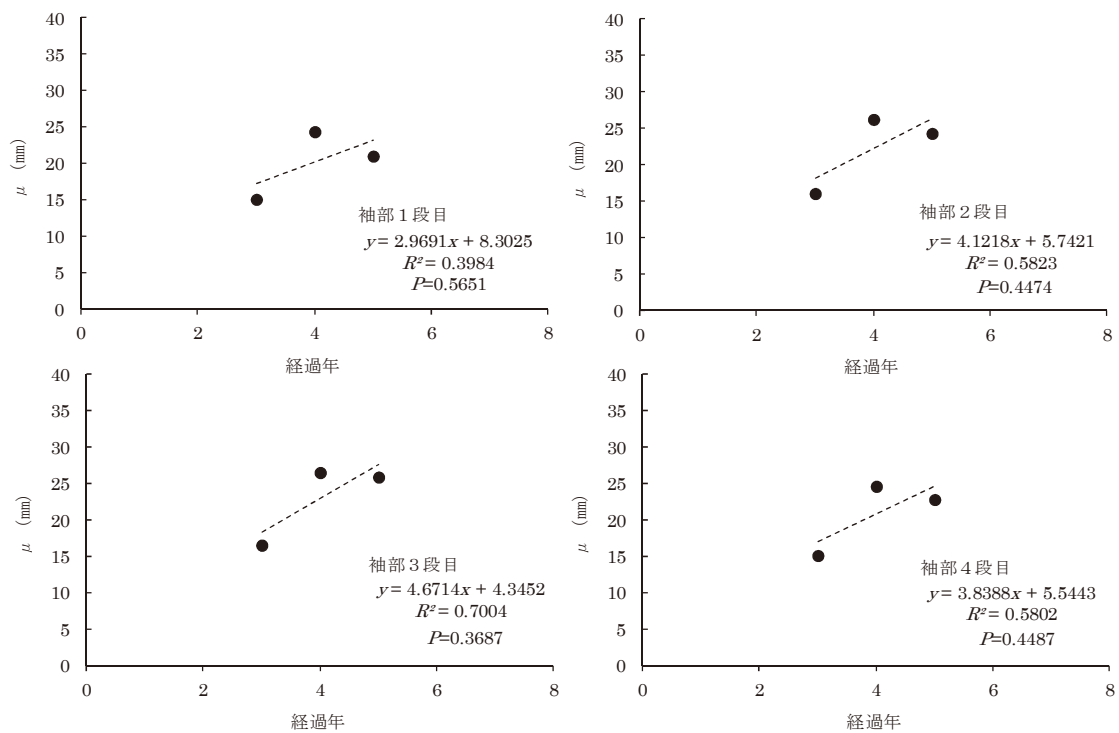


図 - 7. 10 大沢内における腐朽速度 (スギ材)

表 - 7. 5 $\Delta \mu_v$ の算出結果

施工地	樹種及び 設置環境	$\Delta \mu_v$ (mm/year)									
		1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目	
内山 3	カラマツ材 常水無	2.34	3.43	2.07	-	3.25	3.60	3.76	4.92	2.53	
中条		1.29	1.80	1.03	-	-	-	-	-	-	
上松		2.73	2.95	3.50	-	4.99	1.70	2.69	0.00	3.84	
浪合	カラマツ材 常水有	4.08	3.76	5.10	3.88	2.55	1.77	2.43	-	-	
田原		3.61	2.95	6.07	-	1.09	0.38	1.80	0.10	1.09	
高鳥谷		5.96	6.68	6.23	5.97	-	-	-	-	-	
主水釣	スギ材 常水有	6.06	5.46	6.69	-	0.72	0.00	0.68	-	-	
大沢内	スギ材 常水無	2.97	4.12	4.67	3.84	5.70	6.16	1.84	-	-	

※表の縦罫線は袖部と本体の境界を示す

施工地の気候条件等で腐朽の差は見られるが、袖部の腐朽は最大で高鳥谷の 6.68mm/year であった。袖部の腐朽速度は全体的に 3.0～7.0mm/year の範囲に収まることになり、常水の無い木堰堤と比較して袖部の腐朽速度が速いといえる。木堰堤の腐朽速度は内山 3 や浪合の調査結果より、一様に上昇しない部材が散見されることから環境変化を受けていると考えられ、年によって変動すると推察される。

表 - 7. 6 には、切片 b の算出結果を示す。 b がマイナスを示す部材はゼロとした。切片 b の数値は、同じ調査地でもばらつきが見られており、カラマツ材では内山 3 と中条の平均値で 11.3～11.7mm 程度、上松で 13.3mm 程度となる。浪合では他の調査地より低く、平均値で 4.7mm 程度となる。(2)式の切片 b は腐朽前の μ を示しており、一次式中の回帰係数 $\Delta \mu_v$ は、元々の木材密度に影響されないことになる。そのため、 b の部材によるばらつきを考慮すると単年度調査の μ は、元々の木材密度の高低を含んだ値となるが、継続調査による μ は腐朽指標としての精度が高いものと考えられる。

表 - 7. 6 切片 b の算出結果

施工地	樹種及び 設置環境	切片 b (mm)									
		1段目	2段目	3段目	4段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目	
内山 3	カラマツ材 常水無	16.65	3.76	21.17	-	15.32	9.30	7.75	0.00	16.36	
中条		12.31	11.37	11.38	-	-	-	-	-	-	
上松		13.10	14.54	12.25	-	-	-	-	-	-	
浪合	カラマツ材 常水有	2.37	2.25	0.00	5.65	5.33	11.19	6.36	-	-	
田原		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
高鳥谷		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
主水釣	スギ材 常水有	13.48	15.13	16.13	-	-	-	-	-	-	
大沢内	スギ材 常水無	8.30	5.74	4.35	5.54	-	-	-	-	-	

※表の縦罫線は袖部と本体の境界を示す

2) スギ材木堰堤の腐朽速度

スギ材木堰堤では主水釣で常水が有り、大沢内は上流側で伏流水通しからの落下水は見られない。スギ材木堰堤では 2 基の $\Delta \mu_v$ より、袖部で 2.97～6.69mm/year の範囲となり、本体で 0.0～6.16mm/year になることがわかる。常水のある主水釣では、本体の腐朽速度が 0.0～0.72mm/year と 1 mm 未満まで遅延している。上流で伏流している大沢内では、

本体と袖部を比較すると本体で腐朽が大きくなっている。大沢内の本体最下部の部材では、伏流水の影響で 1.84mm/year と小さくなっている。図 - 7. 9 の主水釣では 1 年経過から 2 年経過までに袖部で 1.3~2.78mm/year の増加に対し、2 年経過から 3 年経過では 8.14~12.07mm/year と大きく腐朽が進行している。図 - 7. 10 の大沢内では 3 年経過から 4 年経過までに袖部で 9.29~10.17mm/year と腐朽が速いが、4 年経過から 5 年経過ではほとんど腐朽が進行していない状態であった。このことから、スギ材の木堰堤はカラマツ材の木堰堤と同様に、腐朽速度が一樣ではなく年の気候変化による影響を受けているものと考えられる。切片 *b* の平均値は、主水釣で 14.9mm 程度、大沢内で 6.0mm 程度となり、大沢内の部材は元々の木材密度が高いことがわかる。スギ材においても、腐朽前の木材密度にはばらつきが生じていると考えられる。

3) $\Delta \mu_v$ と気候条件及び構造条件の関係

木堰堤の腐朽と気候条件及び構造条件の関係については 6 章で重回帰分析を行い、最終的に木材腐朽気象指数 Climate Index (T.C.Sheffer (1971) が定義した指数であり、以下 CI と略述)、標高、堤高の 3 指標を関係因子として選び出した。6 章では、3 年及び 5 年経過時かつスギ材とカラマツ材を合わせた μ との関係を明らかにしたが、本章では腐朽速度 $\Delta \mu_v$ との関係性を考察する。 $\Delta \mu$ の分布傾向より、スギ材とカラマツ材で差が見られたことから、本章ではカラマツ材の木堰堤の調査データに絞り込むこととする。図 - 7. 11 は、対象施設の最寄りのアメダス観測所における気候条件の算出結果を示す。

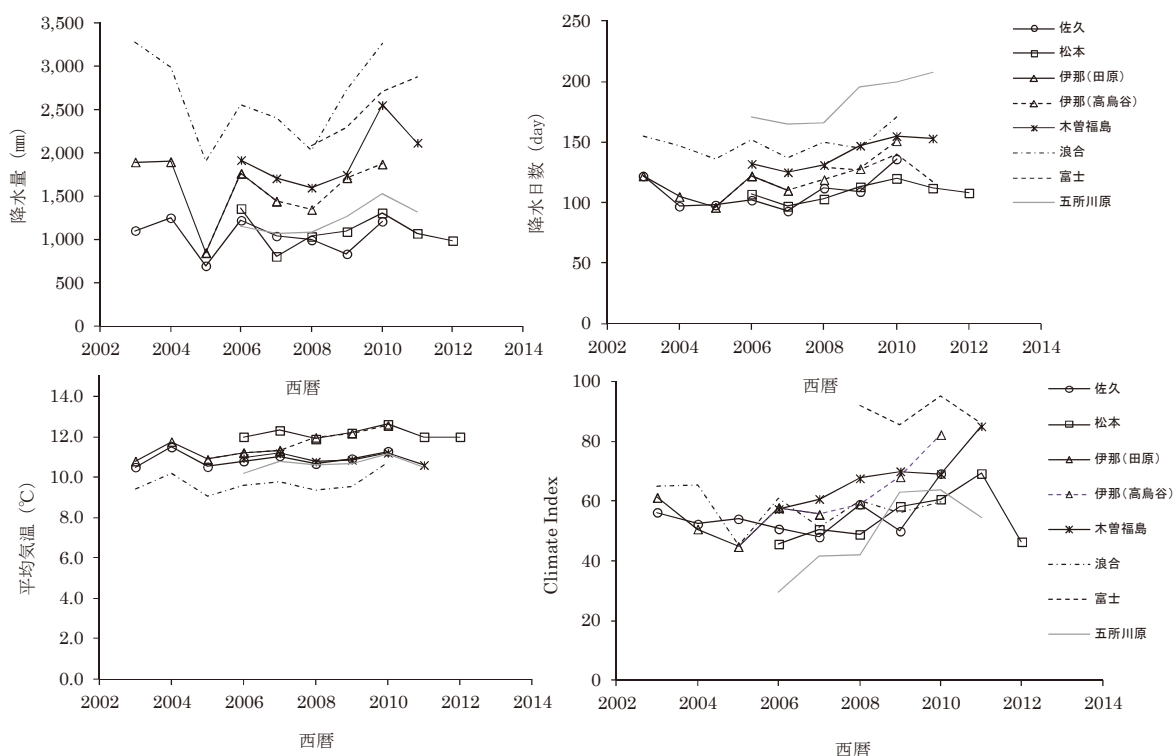


図 - 7. 11 対象地の気候条件

対象期間が異なるのは、施設によって竣工から腐朽調査時点までを期間に設定しているためである。平均気温や降水日数の推移と比較して、降雨量の推移は年によって大きく変動している。CI は年によって変動し、気温の高い 7 月～8 月の夏場の雨が多いと CI が急激に高くなる計算上の特性をもつ。また、降水日数に強く依存する指数でもある。

図 - 7. 12 には、 $\Delta \mu_v$ と気候条件及び構造条件の関係を示す。本体の $\Delta \mu_v$ は常水の影響を受けることから、ここでは除外して袖部のみとする。

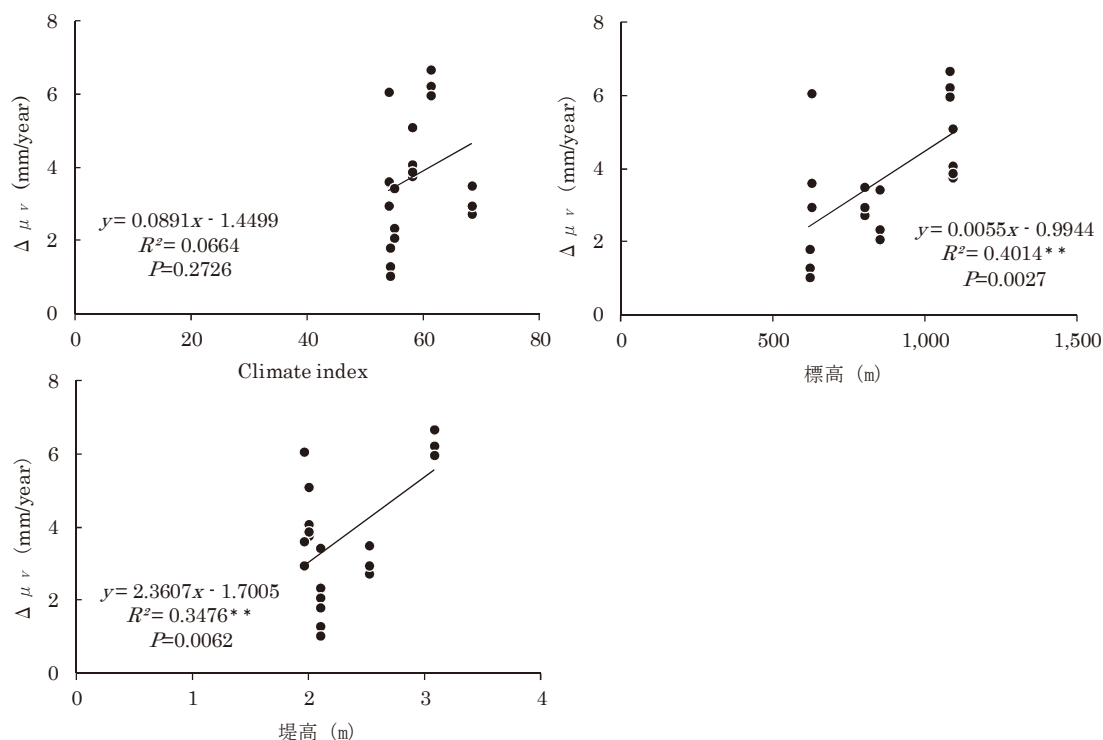


図 - 7. 12 $\Delta \mu_v$ と気候条件及び構造条件との関係

CI・標高・堤高の各因子が上昇するほど、 $\Delta \mu_v$ も増加する傾向が見られる。 $\Delta \mu_v$ と標高及び堤高の間には、危険率 1 % で相関関係が認められた。CI は 6 章と異なり同一県のみデータとなるため、レンジが狭くなり統計上の関係性が得られなかった。6 章では青森県と静岡県調査データを加えたため、CI のレンジが広くなり、最も影響のある因子となっていたが、カラマツ材に絞った同一県とした場合には標高及び堤高と比較し影響性が低下することとなった。標高の因子は一般的に、標高の高い地域ほど降水量が多くなり、気温が低下すると考えられる。 $\Delta \mu_v$ と標高との間で関係性が見られることは、気温の影響よりも雨の影響が腐朽の進行には関係している可能性がある。6 章では平均降水量や降水日数の単独因子としての関係性が見られなかった。これは、木堰堤の腐朽が一つの単独因子のみで進行程度を表現できないことを示している。木堰堤の腐朽は CI や標高の因子のように、気温と雨の両方が含まれた複合的な因子との関係性が強い傾向にあり、腐朽の進行として

温度と水分の双方が必要であることが関連していると思われる。構造条件として堤高と関係性が見られることは、6章で記述したが、堤高を上げることで下流面側の河床と袖部の比高差がつくことになり、袖部の部材温度が上がりやすくなると考えられる。堤高を抑えると袖部は下流面側の河床と近付き、結果として冷涼な環境に置かれることで袖部の腐朽の進行が抑えられていると思われる。

7. 4 腐朽速度の重回帰分析

6章と同様に本章では $\Delta \mu_v$ とCI・標高・堤高の各因子との間で関係性が得られたため、重回帰分析を行うことでそれぞれの影響度を明らかにする。重回帰分析は変数減少法に基づき、3指標を説明変数として分析し、統計量の t 値より影響性の低い因子の除外を試みる。重回帰分析は多重共線性を考慮して、説明変数の間で重複するものは除外を行うことになる。

表 - 7. 7 には CI・標高・堤高の3指標による重回帰分析結果を示す。3指標の分析結果より、以下の(3)式が得られた。ここで、 $x1$ はCIであり、 $x2$ は標高、 $x3$ は堤高である。

$$\Delta \mu_v = -0.072x1 + 0.004x2 + 1.985x3 - 0.169 \quad \dots(3)$$

$$R = 0.73^{**} \quad P = 0.005 \quad (P < 0.01)$$

表 - 7. 7 重回帰分析結果 (3指標)

項目	重回帰式 符号	回帰係数	t	p	$\Delta \mu_v$	単相関係数		
						CI	標高	比流量
切片		-0.169	-0.05	0.96				
$\Delta \mu_v$	y				1.00			
CI	$x1$	-0.072	-0.97	0.34	0.26	1.00		
標高	$x2$	0.004	2.47	0.03	0.63	0.35	1.00	
堤高	$x3$	1.985	2.18	0.04	0.59	0.61	0.47	1.00

重回帰式は本来線形式であり、腐朽と各種条件との間には直線関係が認められていることから、本研究では加算の式とする。説明変数として3指標を選択した場合、重回帰式は危険率1%で有意となる。6章で樹種や経過年を考慮せずに重回帰分析を行った結果では危険率10%で有意であったが、カラマツ材に絞り込んだ結果、 P 値による有意性が強くなった。表 - 7. 6の t 値より、標高と堤高の影響が大きいことになる。本章ではカラマツ材のデータに絞り込んだため、CIは長野県内のデータのみとなっており、6章の3県の分析結果と比較するとレンジが狭くなり影響度が低くなったと考えられる。CIと標高は6章でも記述しているが、両者はいずれも気温と降水量に関係する因子であり、多重共線性の面でやや重なる。また、CIの回帰係数は負の値となっており、CIが高い地域ほど腐朽が進みやすいと考えられることから、腐朽との関係上で式に矛盾が生じる。そのため、本章の Δ

μ_v の重回帰分析としては長野県のカラマツ材のみに絞り込んだこともあり、CIの因子をここで除外する。

表 - 7. 8には標高・堤高の2指標による重回帰分析結果を示す。2指標の分析結果より、以下の(4)式が得られた。ここで、 $x1$ は標高であり、 $x2$ は堤高である。

$$\Delta \mu_v = 0.004x1 + 1.507x2 - 3.171 \quad \dots(4)$$

$$R = 0.72^{**} \quad P = 0.002 \quad (P < 0.01)$$

表 - 7. 8 重回帰分析結果 (2指標)

項目	重回帰式 符号	回帰係数	t	p	単相関係数		
					$\Delta \mu_v$	標高	堤高
切片		-3.171	-1.85	0.08			
$\Delta \mu_v$	y				1.00		
標高	$x1$	0.004	2.40	0.03	0.63	1.00	
堤高	$x2$	1.507	1.97	0.07	0.59	0.47	1.00

説明指標を2指標へ絞り込んだ場合、重回帰式は危険率1%で有意となり、ピロディン貫入量からの μ は腐朽指標として妥当と考えられる。6章の重回帰式では統計上の高い有意性が得られなかったが、継続調査結果による $\Delta \mu_v$ は元々の木材密度の影響が切片として除かれているため、関係性が得られたと考えられる。 t 値は標高の方が高くなるため、腐朽には構造条件よりも気候条件の影響が大きくなる。同一県のカラマツ材に樹種を絞り込んだ結果として、木堰堤の腐朽速度は標高と堤高の2指標で説明できることになる。この2指標はいずれも簡便に算出可能な因子であり、木堰堤の計画段階である程度の腐朽速度を予測できると考えられる。腐朽速度を計画段階で推定することで、あとは実際の木堰堤の部材直径の情報があれば、部材消失までの年数を計算することができる。木堰堤の部材交換までの年数は、直径が消失するまでの年数の間に設定することが妥当と考えられる。

7. 5 まとめ

本章ではこれまでの腐朽継続調査からの貫入増加量 $\Delta \mu$ を計算することで分布を明らかにし、常水有無や部位、樹種別に比較した。 μ の一次式による傾きから $\Delta \mu_v$ を求め、気候条件や構造条件との関係性を明らかにして腐朽速度の重回帰分析を行った。6章ではCI・標高・堤高の3指標が腐朽と関係していたが、本章では $\Delta \mu$ に樹種による違いが見られたことで、カラマツ材に絞り込んで考察した。CIと標高は多重共線性から統計的にCIを指標から外し、標高と堤高の2指標で式を組むことができ、有意性が高くなった。重回帰式は統計的に有意性が示されたことから、ピロディン貫入量からの μ は腐朽指標として妥当と考えられた。この2指標は木堰堤の計画段階で簡便に算出可能な因子であり、簡易的に Δ

μ_v を予測できると考えられた。本章におけるまとめを以下に示す。

- (1) 貫入増加量 $\Delta \mu$ の分布では、常水の有無による分布差が見られ、常水の有る場合で袖部の腐朽が進みやすい。スギ材木堰堤の $\Delta \mu$ はカラマツ材と異なり、9 mm/year 以上の出現率が高くなり、カラマツ材より腐朽が速いと考えられる。
- (2) μ と経過年は直線関係であるため、一次式の傾きから腐朽速度 $\Delta \mu_v$ を定義し、施工地ごとに比較することができる。この一次式における切片 b は腐朽前の μ を示すため、 $\Delta \mu_v$ は元々の木材密度に影響されないことになる。そのため、 b の部材によるばらつきを考慮すると、継続調査による μ は腐朽指標としての精度が高いと考えられる。
- (3) Climate Index・標高・堤高の各因子が上昇するほど、 $\Delta \mu_v$ も増加する傾向が見られる。中でも、 $\Delta \mu_v$ と標高及び堤高との間には、危険率1%で相関関係が認められる。
- (4) カラマツ材のデータに絞り込んで重回帰分析を行った結果、 $\Delta \mu_v$ は標高と堤高の2指標で説明でき、この2指標はいずれも簡便に算出可能な因子であるため、木堰堤の計画段階である程度の腐朽速度を予測できると考えられる。

第8章 長期経過した木堰堤の容積密度数による経年変化と構造計算

本章では、長野県内における施工後9年経過した木堰堤の腐朽調査を行うことで、将来的な木堰堤の耐用年数や部材交換年数を予測するべく、長期経過した木堰堤の腐朽の実態を解明することを目的とする。

8. 1 対象地

本章で対象とした木堰堤は施工後5年から、最大で9年が経過した施設であり、筆者が平成18年から調査を継続している佐久市内山3、安曇野市中条、伊那市田原、伊那市高鳥谷、阿智村浪合の5基と、新規の小諸市鴛久保の1基の合計6基である。調査地の位置図を図-8.1に示す。腐朽調査時点の施工年数は、小諸市鴛久保が5年経過、安曇野市中条と伊那市高鳥谷が7年経過、その他の3基は施工後9年が経過している。また、腐朽の比較対象とするため、阿智村浪合の施工地近傍のカラマツ林から3箇所で健全材のサンプル調査を行った。

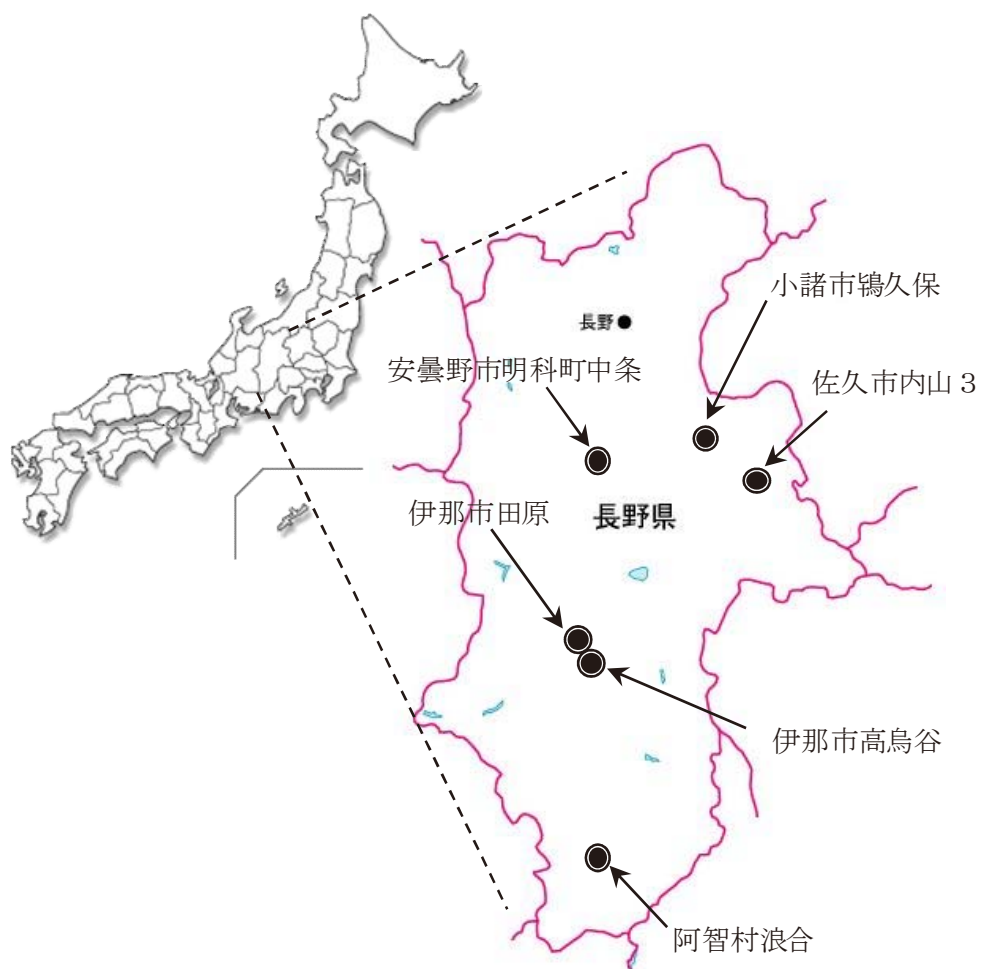


図 - 8. 1 腐朽調査の対象地

対象とした木堰堤の構造及び設置箇所の立地と気象条件を表 - 8. 1 に示す。年平均気温や降水量は、設置場所に近いアメダスデータより算出した。これまでの章と同様で木堰堤の形状は全て台形型で、部材はカラマツ間伐材の丸太、もしくは太鼓材の使用という基準に統一して調査した。部材径は全て $\phi = 20\text{cm}$ 程度であり、部材の接合部が 2 cm ほどカットされた太鼓材であり、防腐処理は行われていない。長野県内の木堰堤は全て、林野庁の施工基準に則して施工されており、部材の形状に大きな違いは見られない。

表 - 8. 1 腐朽調査の対象地概要

施工地	木堰堤構造					立地及び気候条件				
	完成年	調査年	調査時 経過年	堤長 (m)	堤高 (m)	標高 (m)	流域面積 (km^2)	年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)	年平均降水量 (mm)	アメダス観測所
鵜久保	2008	2013	5	15.5	2.8	750	0.01	9.3	1,080.3	東御
中条	2006	2013	7	9.0	2.1	620	0.05	12.1	1,092.6	松本
高鳥谷	2005	2012	7	19.5	3.1	1,080	0.09	11.7	1,497.6	伊那
内山3	2003	2012	9	8.5	2.1	850	0.17	10.9	1,043.5	佐久
田原	2003	2012	9	11.0	2.0	626	0.09	11.2	1,569.6	伊那
浪合	2003	2012	9	16.0	2.0	1,090	0.07	9.7	2,643.7	浪合

8. 2 成長錐コアからの腐朽の実態

図 - 8. 2 には健全材の成長錐コアの様子を示し、図 - 8. 3～図 8. 8 には、5 年～9 年経過の成長錐コアの採取時の様子を写真で示す。腐朽した木堰堤の成長錐コアではいずれも外側の辺材部から腐朽が進んでいる様子が確認でき、心材部は健全な状態を維持している部材が多かった。腐朽した部分は明らかな黒色を呈してコアの円柱形状を維持しておらず、袖部の部材については内部まで腐朽が進んでいる様子が確認できた。木堰堤の腐朽形態としてはいずれも、部材外側の辺材部から内側の心材部へ向けて進行している様子が読み取れ、内部のみ腐朽している部材は見られなかった。



図 - 8. 2 健全材の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 3 鍋久保（５年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 4 高鳥谷（７年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 5 中条（７年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 6 内山３（９年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 7 田原（９年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）



図 - 8. 8 浪合（9年経過）の成長錐コアの様子（全乾前）

1) 容積密度数と含水率の算出

表 - 8. 2には、腐朽した木堰堤の容積密度数 ρ と含水率の算出結果を示し、表 - 8. 3に健全材の算出結果を示す。ここで ρ と含水率は、以下の(1)式と(2)式による。含水率の数值は、調査当日や前日までの天候や成長錐サンプルの採取時間によっても変動すると想定されるが、今回の調査では降雨前後を避けているため、含水率の数值は極力平時に近付けている。

$$\text{容積密度数 } \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{全乾重量 (g)} / \text{湿潤時のコア体積 (cm}^3\text{)} \quad \dots(1)$$

$$\text{湿潤時のコア体積 (cm}^3\text{)} = \pi r^2 \times \text{コア長}$$

$$\text{含水率 (\%)} = (\text{自然時のコア重量} - \text{全乾時のコア重量}) / \text{全乾時のコア重量} \times 100 \quad \dots(2)$$

健全材の ρ は3つのサンプルを平均すると 0.5g/cm^3 となり、含水率は 40%程度である。木材の ρ について、津島(2002)の報告ではスギ材で $0.27 \sim 0.42\text{g/cm}^3$ であり、北原ら(1998)によるヒバ材で $0.34 \sim 0.43\text{g/cm}^3$ であり、今回のカラマツ材はスギ材やヒバ材と比較し ρ が大きいといえる。カラマツ健全材の ρ は海老原(2003)の報告と比較しても 0.48g/cm^3 とほぼ同値となる。

腐朽した木堰堤の ρ は、健全材の数値からいずれも減少していることがわかる。9年経過の田原と浪合ではともに、左岸袖部の上部から3段目の部材で ρ が 0.07g/cm^3 , 0.15g/cm^3 と 0.2g/cm^3 未満が出現しており、健全時から大きく減少していることがわかる。7年経過の木堰堤では、中条の本体水通しの位置で 0.18g/cm^3 と小さい値が確認されるが、9年経過の ρ と比較すると腐朽が小さいことがわかる。5年経過の鵜久保では $0.4 \sim 0.5\text{g/cm}^3$ 程度の範囲であり、7年経過や9年経過の木堰堤と比較して腐朽が小さく、成長錐コアも健全な状態を維持しているのを確認している。

含水率の分布には全体的に、袖部の上部で高く、下部ほど低くなる傾向がある。上段の部材ほど水が滞留しやすい条件下にあると考えられ、降雨の際には上段の部材が屋根のように影響を受けやすいことが効いていると思われる。

表 - 8. 2 容積密度数と含水率の算出結果

段数	部位	鍋久保 (5年経過)		中条 (7年経過)		高鳥谷 (7年経過)		内山3 (9年経過)		田原 (9年経過)		浪合 (9年経過)	
		容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)	含水率 (%)
1		0.47	17.24	0.34	47.72	0.32	71.20	0.38	70.20	0.24	46.00	0.38	139.79
2	左岸袖部	0.50	17.28	0.38	18.75	0.34	126.03	0.37	67.11	0.36	33.82	0.36	95.45
3		0.49	15.11	0.44	23.58	0.43	26.81	0.36	78.90	0.07	101.28	0.15	85.43
4		0.49	16.41			0.33	28.52					0.45	46.18
1		0.43	16.91	0.41	23.02	0.34	91.11	0.27	94.65	0.15	106.07	0.32	109.33
2	右岸袖部	0.37	19.21	0.33	21.18	0.36	91.74	0.24	74.24	0.19	202.04	0.38	111.39
3		0.50	16.44	0.50	17.98	0.38	23.62	0.32	70.96	0.36	104.33	0.37	136.99
4		0.48	16.49			0.34	55.22					0.16	232.17
1		0.40	16.75	0.18	61.40	0.31	94.14	0.27	111.84	0.33	132.81	0.31	59.35
2	本体	0.42	17.36	0.42	17.83	0.27	118.60	0.40	85.84	0.43	77.45	0.26	167.67
3				0.49	18.35	0.44	70.21	0.22	158.06	0.43	94.43	0.25	208.71
4				0.41	21.18	0.44	36.38	0.33	86.93	0.32	124.13		
5								0.34	124.83				

表 - 8. 3 健全材（浪合）の容積密度数と含水率

No.	成長錐重量 (g)		含水率 (%)	容積密度数 (g/cm ³)
	自然時	全乾時		
1	1.31	0.94	39.52	0.48
2	1.38	0.98	40.47	0.50
3	1.41	1.03	37.02	0.52
ave.	1.36	0.98	39.00	0.50

田原の左岸袖部や浪合の右岸袖部では、逆に下部ほど含水率が高い傾向にある。田原や浪合では水通しを溪流水が流下しており、溪流水からの水分供給が影響していると推察される。本体では中条や田原において、最上段の水通し位置での部材で含水率が高くなる。また、内山3や田原、浪合では部材の下部へ向かうほど、含水率が上昇している傾向が見られる。木堰堤が設置された環境は谷地形を呈しており、常水が無い施工地でも伏流水による影響や、降雨で地面に浸透した水が蒸発する際に本体下部の部材へ水分を供給することが考えられる。一般的に繊維飽和点以下では腐朽菌の活動が阻害されることが知られており、既往の鈴木ら（2008）の報告では含水率 20～30%の間で腐朽が進行しない可能性が示唆されている。林業試験所木材部・木材利用部（1982）により、カラマツ材の繊維飽和点は約 28%と報告されており、この数値以下に含水率を抑えた場合には腐朽が進行しないと考えられる。今回の ρ の調査結果より、中条や鵜久保では繊維飽和点未満で ρ が大きくなる部材が多いことから、含水率が低下するほど腐朽が遅くなる可能性がある。

2) ρ と含水率及び、含水率と経過年の関係

図 - 8. 9 には、 ρ と含水率の関係を示す。統計的には、中条は危険率 1%で有意となり、鵜久保は危険率 5%で有意となった。内山3と浪合は、危険率 10%で有意性が示されたが、田原と高鳥谷ではデータにばらつきがあり、危険率 10%以内での有意性が示されなかった。

施工後 5 年から 9 年経過の木堰堤では ρ が低い部材ほど、含水率が高くなる傾向がある。施工後 7 年経過から 9 年経過の木堰堤では、含水率 50%前後で $\rho = 0.4\text{g/cm}^3$ 、100%で $\rho = 0.3\text{g/cm}^3$ と 0.1 減少し、200%で $\rho = 0.2\text{g/cm}^3$ と半減していることがわかる。中条では ρ が 0.4g/cm^3 周辺に分布しており、含水率 20%程度の部位が多くなっている。同じ 7 年経過の高鳥谷と比較して中条では腐朽の進行が遅く、含水率も低い範囲に分布している。木堰堤部材における含水率の差は木材密度が関係していると考えられ、一般的に密度が減少すると内部の空隙が多くなり含水率が高くなる。 ρ と含水率に関係性が見られたことから、腐朽の進行程度は、部材内部の含水率からも推定できる可能性があると思われる。

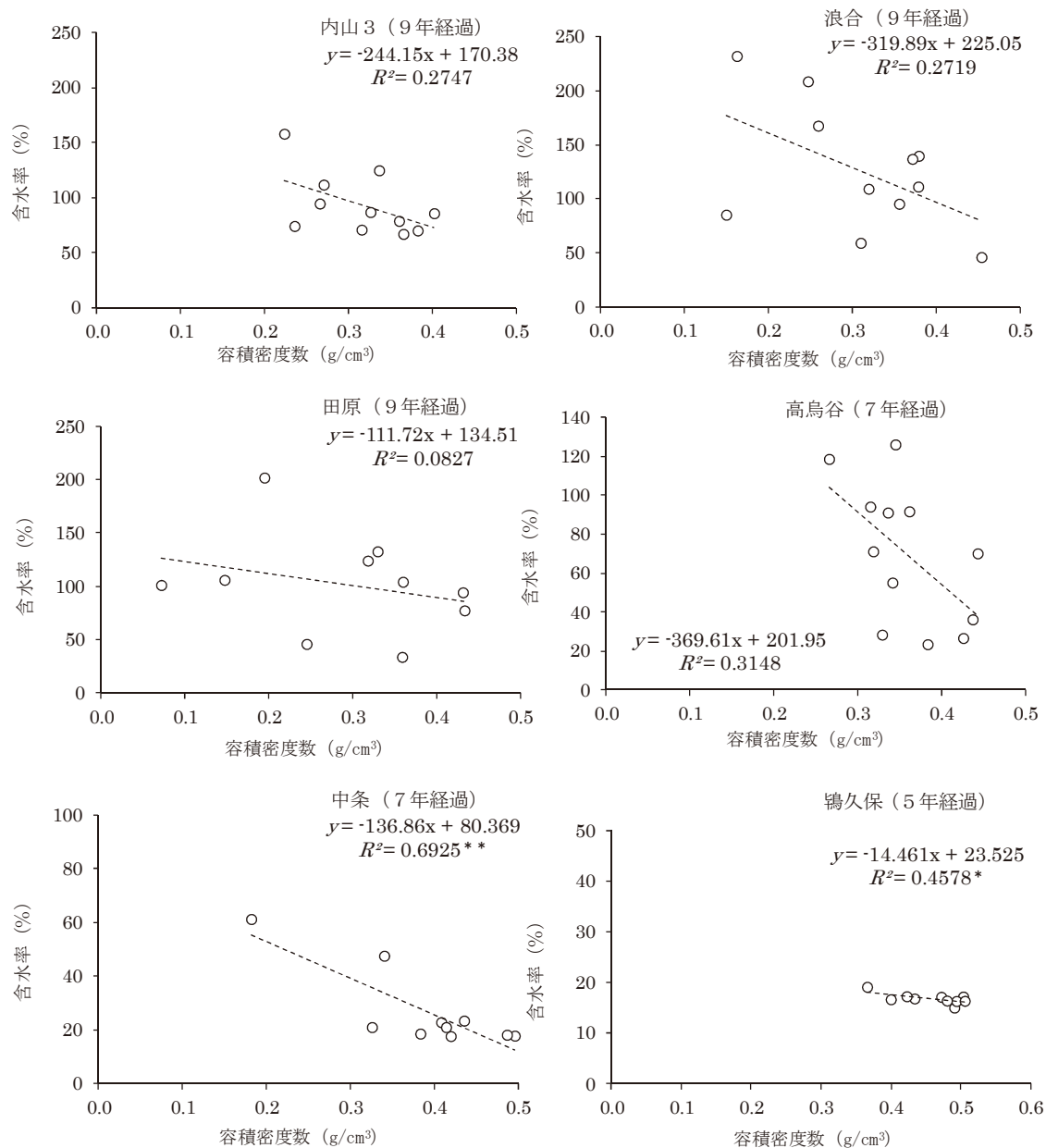


図 - 8. 9 容積密度数と含水率の関係

図 - 8. 10 には、含水率と経過年との関係を示す。含水率と経過年の間には危険率 1 % で相関関係が示され、腐朽して年数を経過するほど含水率が上昇することになる。また、9 年経過の木堰堤では 5 年経過や 7 年経過と比較し含水率が高いことに加えて、ばらつきも大きくなっている。腐朽した部材では密度が減少することで木材内部の空隙が多くなり、代わりに水分が充填されることで含水率が高く、腐朽がさらに進みやすい条件へと変わっていくと推察される。袖部と本体で含水率を比較した場合、本体で高い傾向となっている。これは常水有の木堰堤の影響が大きく表れていると考えられ、本体では部材の含水率が高い条件下にあることが示される。

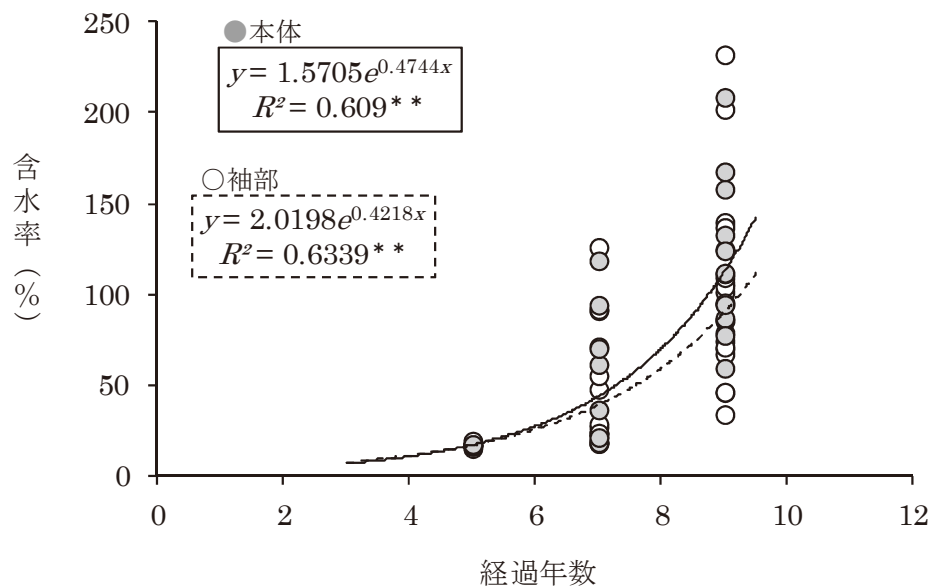


図 - 8. 10 含水率と経過年数の関係

8. 3 容積密度数の経年変化

1) ρ と経過年数の関係

健全材の容積密度数に対して、腐朽した部材の容積密度数の比の分布推移を明らかにする。ここで健全密度比は、以下の(3)式によって求める。

$$\text{健全密度比} = \text{腐朽した木堰堤の容積密度数 (g/cm}^3\text{)} / \text{健全材の容積密度数 (g/cm}^3\text{)} \quad \dots(3)$$

図 - 8. 11 には、健全密度比の分布推移を示す。健全密度比は、施工後 5 年から 9 年経過するにつれて、比の分布はゼロに近付いていくことがわかる。5 年経過の木堰堤までは、健全材の密度と比較し、袖部と本体ともに 0.7 以上の密度範囲に入っており、腐朽が小さいと考えられる。7 年経過の木堰堤では、本体の一部で 0.4 未満の密度範囲に入る部材が出現しており、経年変化により腐朽が進行している様子が読み取れる。9 年経過の木堰堤では一部の部材で 0.2 未満まで腐朽が進行しており、袖部として田原で 0.14、浪合で 0.3、内山 3 で 0.47 までの比となる。本体では田原で 0.64、浪合で 0.49、内山 3 で 0.45 までの比となっている。9 年経過した木堰堤では、健全材の密度に対し、当初の 0.59~0.65 程度まで減少していることになる。健全密度比の低下傾向より、腐朽した木堰堤では部材強度も合わせて減少している可能性が高く、密度の低下は単位体積当たりの木材重量の減少につながり、構造物としての安定性を阻害する一因になると推察される。

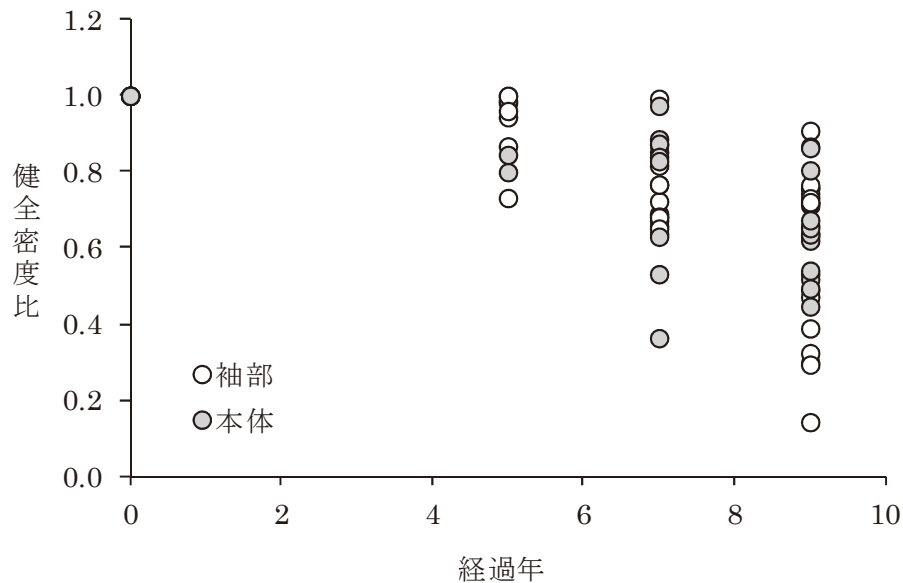


図 - 8. 11 健全密度比の分布推移

袖部及び本体の ρ と経過年の関係について、図 - 8.12 に示す。両者の関係から以下の(4)式と(5)式が得られ、ここで x は経過年、 y は ρ である。

$$(\text{袖部}) \quad y = -0.0282x + 0.5628 \quad R = 0.65^{**} \quad P = 0.00001 \quad (P < 0.01) \quad \dots(4)$$

$$(\text{本体}) \quad y = -0.0198x + 0.5046 \quad R = 0.61^{**} \quad P = 0.002 \quad (P < 0.01) \quad \dots(5)$$

ρ と経過年との間には、袖部と本体ともに危険率 1 % で有意性があることから直線関係が認められ、 ρ は年数を経過するほど減少するといえる。 ρ にはばらつきが見られるが、これは施工地の気候条件や構造条件の影響を受けているためと推察される。袖部と本体の回帰係数には差が見られ、本体の -0.0198 と比較し、袖部は -0.0282 と単年度あたりの ρ の減少量が多いことがわかる。このことから、長期経過した木堰堤の腐朽は、袖部の腐朽進行が速いといえる。この結果は、秋田ら (2007) による腐朽初期のプロディン貫入量調査からの報告と同様の結果である。これまでは、木堰堤の施工後 6 年経過までの腐朽初期における経年変化が明らかにされていたが、長期経過した木堰堤で ρ を指標とした場合でも、腐朽と経過年との間には関係性が示される。

2) 木堰堤の限界年数

図 - 8. 12 における ρ と経過年の関係より、木堰堤の部材消失までの限界年数を考察する。限界年数は ρ と経過年の関係からの回帰式を使用することで、部材密度が消失するまでの年数を計算したところ、袖部で約 20.0 年、本体で約 25.5 年となる。ここでの試算値は

防腐剤無の木堰堤を対象としたものとなる。袖部と本体には5年程度の差が生じており、部位による年数の違いが表れている。 ρ がゼロになった場合には、部材密度が消失することになり、密度を失うことで部材応力が限りなくゼロへ近付いているものと推察される。また、木堰堤の腐朽は設置された地域の気候条件の影響を強く受けるため、腐朽の進行には施工地によるばらつきが生じることが想定される。ばらつき程度は、図 - 8. 12 から読み取れるように、年数を経過するほど徐々に大きくなる。これは設置環境によって木堰堤の限界年数が異なることを示唆している。

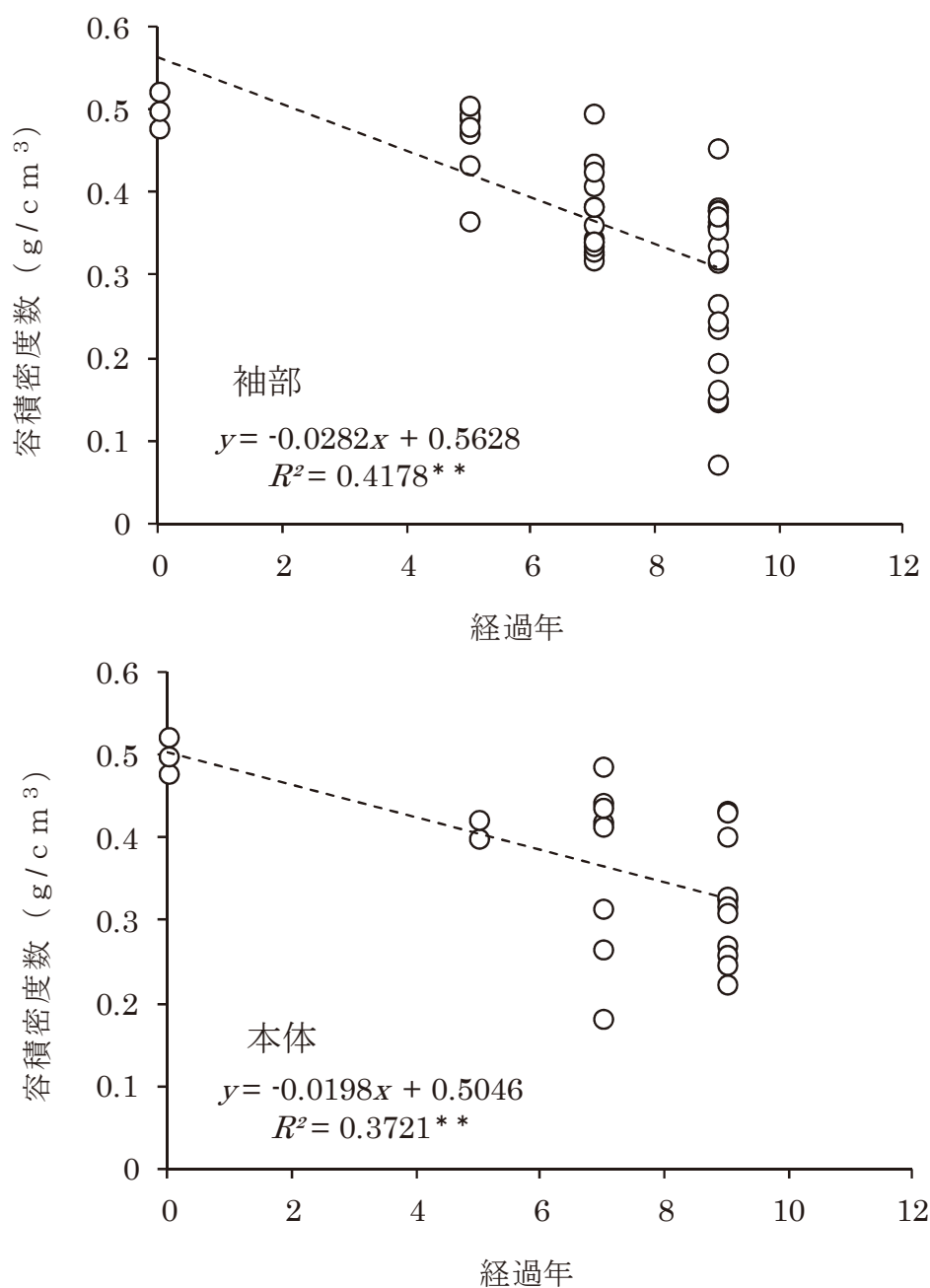


図 - 8. 12 容積密度数の経年変化

図 - 8. 13 には、容積密度数から計算した標準偏差 σ と経過年の関係を示す。 ρ の調査結果より、 σ は各経過年別に(6)式を用いることで計算した。ここで σ は標準偏差であり、 ρ は容積密度数、 μ は容積密度数の平均値、 N はデータの個数である。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\rho - \mu)^2}{N}} \quad \dots(6)$$

また、 σ と経過年の間には、以下の(7)式が得られた。ここで x は経過年、 y は σ である。

$$y = -0.0077x + 0.181 \quad R = 0.98^* \quad P = 0.024 \quad (P < 0.05) \quad \dots(7)$$

σ と経過年は危険率 5 % で有意となり、両者の間で関係性が得られたことから、年数を経過し腐朽が進行するにつれてばらつきが大きくなると考えられる。そのため、木堰堤の腐朽は長期経過した施設ほど、気候条件や構造条件の影響を大きく受けることになり、腐朽の進行程度には徐々に差が付いていく。木堰堤の限界年数は σ と経過年の関係から示されるように、設置環境や施設の構造条件の影響を受けることになるため、施工地によって上下することが想定される。

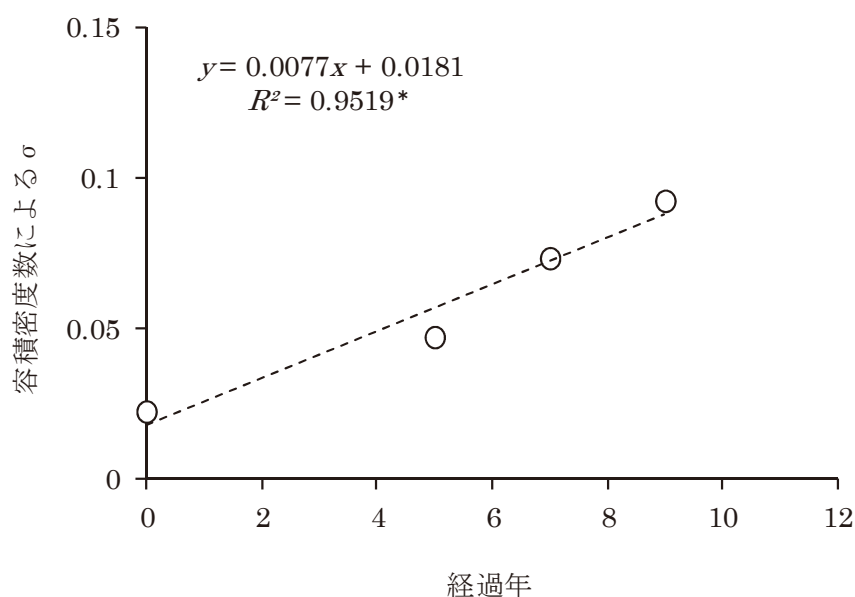


図 - 8. 13 容積密度数による σ と経過年の関係

8. 4 長期経過した木堰堤における構造計算

1) 構造物全体の安定性

施工後と 9 年経過した木堰堤の安定計算を行い、構造物全体としての安定性を検討する。安定計算は林野庁の森林土木木製構造物施工マニュアル (2012) に従って、本体の越流部

断面で行うこととし、標準的な構造図は、図 - 8. 14 に上記マニュアルから引用して示す。
設計荷重は、林野庁の森林土木木製構造物施工マニュアルの静水圧と土圧を見込むこととし、重分布図を図 - 8. 15 に示す。施設規模は設計図から参照しており、越流水深は 100 年確率降雨からマニング式を用いて計算した。木材単位体積重量の施工直後は、湿潤状態のカラマツ健全材の平均値を使用し、9 年経過の数値は 3 基それぞれの本体における ρ （湿潤状態）の最小値を使用した。

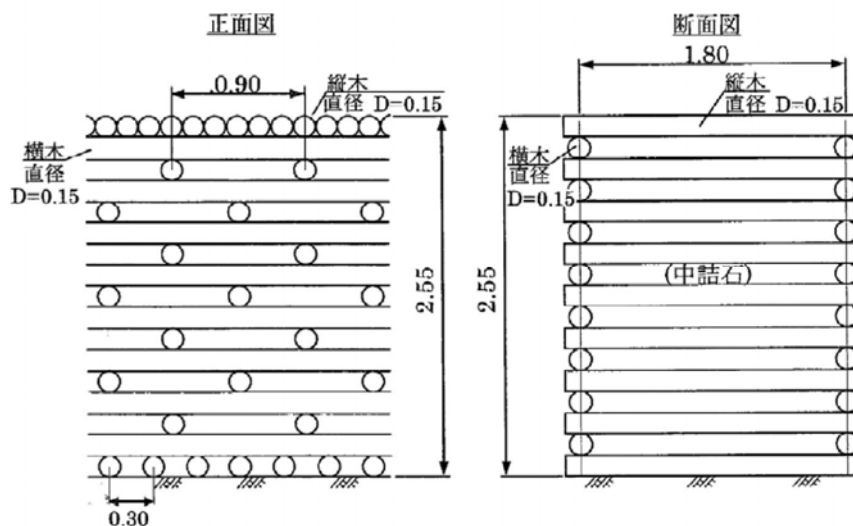


図 - 8. 14 木堰堤の標準構造

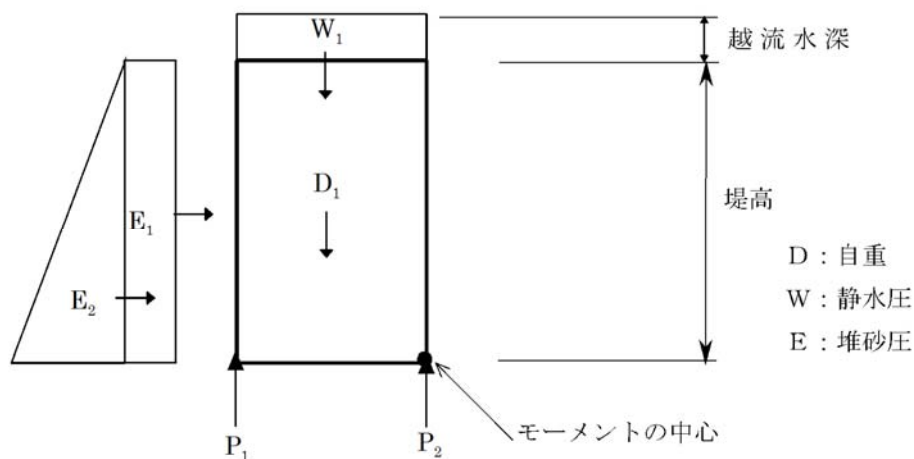


図 - 8. 15 木堰堤の荷重重分布

計算諸元は以下に示し、ボルト孔の影響は本計算で考慮しない。

①断面計算

堤高 H : 2.10m (内山 3), 1.96m (田原), 2.00m (浪合)

天端幅 B : 1.5m (内山 3), 2.0m (田原), 1.5m (浪合)

上下流法 : 直

越流水深 h' : 0.23m (内山 3), 0.28m (田原), 0.18m (田原)

②荷重条件

外力による型の分類 : 5 型相当 (静水圧・土圧)

土圧 : ランキン式

越流水の単位体積重量 γ' : 11.8 kN/m³

堆砂の単位体積重量 γ_s : 17.7 kN/m³

中詰材の単位体積重量 γ_s' : 14 kN/m³ (内山 3), 18 kN/m³ (田原), 13 kN/m³ (浪合)

木材単位体積重量 γ_w (施工直後 ; 湿潤状態) : 6.8 kN/m³ (健全材の調査結果平均)

木材単位体積重量 γ_w (9 年経過 ; 湿潤状態) : 5.6 kN/m³ (内山 3), 7.0 kN/m³ (田原),
4.8 kN/m³ (浪合)

堤体単位体積重量 γ_d : 14.8 kN/m³ (内山 3), 15.2 kN/m³ (田原), 14.8 kN/m³ (浪合)

中詰材の内部摩擦角 : $\phi_s = 40^\circ$ (割石)

土圧係数 : $c = 0.333$

ここで、堤体単位体積重量 γ_d は以下の式で計算する。 R は木材堆積比率となる。

$$\gamma_d = \gamma_w \cdot R + \gamma_s' \cdot (1 - R) \quad \dots (8)$$

③地盤条件

基礎地盤 : 密実な砂質地盤

基礎地盤の摩擦係数 : $f = 0.6$ (礫質土)

基礎地盤の許容支持力 : $Q = 200 \text{ kN/m}^2$ (建築基準法施行令 93 条)

木堰堤の構造物全体の安定条件としては、以下の 4 条件を満足すればよい。

①転倒に対する安定

転倒に対する安全率 F_t は、鋼製砂防構造物設計便覧 (2009) より 1.2 とする。ここで、 M_v は抵抗モーメント、 M_H は転倒モーメントである。

$$F_t = M_v / M_H > 1.2 \quad \dots (9)$$

さらに、合力の作用位置 d と偏心距離 e の関係より、ミドルサード内に入るかをチェックする。ここで、 ΣV は鉛直分力である。

$$d = (M_v - M_H) / \Sigma V \quad \dots (10)$$

$$e = B / 2 - d < B / 6 \quad \dots (11)$$

②滑動に対する安定

滑動に対する安全率 F_s は、河川砂防技術基準の設計編Ⅱ（2012）より 1.2 とする。ここで、 f は摩擦係数、 ΣH は水平分力である。

$$F_s = f \cdot \Sigma H / \Sigma V > 1.2 \dots (12)$$

③内部応力に対する安定

内部応力は堰堤上流端 σ_1 と下流端 σ_2 に作用する応力を計算し、地盤の許容支持力以内に収まるかを検討する。

$$\sigma_{1,2} = \Sigma V / B (1 \pm 6e / B) \quad \dots (13)$$

④中詰材のせん断変形に対する安定

中詰材のせん断変形に対する安全率 F_d は、鋼製砂防構造物設計便覧（2009）より 1.2 とする。ここで M_r は北島式による中詰材のせん断変形抵抗モーメントであり、 M_d は変形モーメントである。

$$F_d = M_r / M_d > 1.2 \dots (14)$$

$$M_r = 1 / 6 \cdot \gamma_s' \cdot (B / H)^2 \cdot \{3 - (B / H) \cdot \cos \phi_s\} \cdot \sin \phi_s \cdot H^3 \quad \dots (15)$$

表 - 8. 4 には、木堰堤の安定計算結果を示す。施工直後と 9 年経過では全ての安定条件を満足しており、3 基の合力作用位置は全てミドルサード内に収まっている。9 年経過ではいずれの安定条件でもやや安全率に近付いている傾向はあるが、湿潤状態の木材単位体積重量の減少幅が 2 割～3 割程度と小さく、さらに木材の体積比率が 2 割程度と低いために大きな変動は見られない。なお、田原では本体の部材が多量の水分を含んでいるため、健全材の調査値よりも大きくなっている。地盤支持力に対する安定性では上流側と下流側のどちらも内部応力が減少しており、これは木材の単位体積重量の減少によって、基礎地盤へ伝わる力が減少したためと考えられる。安定計算には湿潤状態による木材中の水の体積が加わることや、木堰堤の堤高が元々 2 m 程度に低く抑えられていることから、9 年経過した場合でも構造物としての安定性は十分に保持されていることがわかる。

表 - 8. 4 木堰堤の安定計算結果

計算項目	施工直後			9年経過		
	内山 3	浪合	田原	内山 3	田原	浪合
堤高 (m)	2.10	2.00	1.96	2.10	1.96	2.00
天端幅 (m)	1.50	1.50	2.00	1.50	2.00	1.50
越流水深 (m)	0.23	0.18	0.28	0.23	0.28	0.18
木材単位体積重量 (kN/m^3)	6.8	6.8	6.8	5.6	7.0	4.8
木材の体積比 R	0.26	0.26	0.22	0.26	0.22	0.26
堤体の単位体積重量 (kN/m^3)	14.78	14.78	15.22	14.48	15.26	14.28
転倒に対する安定性	偏心距離(e)=X·b/2 =0.219m B/6=0.250m ミドルサード内 ...OK M _V =3.874>M _H =1.128 ...OK	偏心距離(e)=X·b/2 =0.195m B/6=0.250m ミドルサード内 ...OK M _V =3.635>M _H =0.944 ...OK	偏心距離(e)=X·b/2 =0.143m B/6=0.333m ミドルサード内 ...OK M _V =6.759>M _H =0.967 ...OK	偏心距離(e)=X·b/2 =0.223m B/6=0.250m ミドルサード内 ...OK M _V =3.801>M _H =1.128 ...OK	偏心距離(e)=X·b/2 =0.143m B/6=0.333m ミドルサード内 ...OK M _V =6.776>M _H =0.967 ...OK	偏心距離(e)=X·b/2 =0.201m B/6=0.250m ミドルサード内 ...OK M _V =3.521>M _H =0.944 ...OK
滑動に対する安定性	f×ΣV/ΣH=1.985 2.045>1.2 ...OK	f×ΣV/ΣH=2.165 2.165>1.2 ...OK	f×ΣV/ΣH=2.96 2.96>1.2 ...OK	f×ΣV/ΣH=1.897 2.007>1.2 ...OK	f×ΣV/ΣH=2.968 2.968>1.2 ...OK	f×ΣV/ΣH=2.098 2.098>1.2 ...OK
地盤支持力に対する 安定性 (kN/m^3)	(₀₁) 64.58<200 ...OK (₀₂) 4.27<200 ...OK	(₀₁) 57.52<200 ...OK (₀₂) 7.11<200 ...OK	(₀₁) 48.29<200 ...OK (₀₂) 19.3<200 ...OK	(₀₁) 63.91<200 ...OK (₀₂) 3.65<200 ...OK	(₀₁) 48.41<200 ...OK (₀₂) 19.35<200 ...OK	(₀₁) 56.47<200 ...OK (₀₂) 6.13<200 ...OK
中詰石のせん断抵抗に 対する安定性	M _r /M _d =1.65>1.2 ...OK	M _r /M _d =1.87>1.2 ...OK	M _r /M _d =2.99>1.2 ...OK	M _r /M _d =1.62>1.2 ...OK	M _r /M _d =2.99>1.2 ...OK	M _r /M _d =1.80>1.2 ...OK

2) 部材の応力計算

部材の応力計算は林野庁の森林土木木製構造物施工マニュアル（2012）に従って行うこととし、木材の許容応力度との関係性を明らかにする。図 - 8. 16 には部材に作用する土圧を示す。木堰堤の土圧は最下段にかけて大きくなるため、対象とする部材は下流側の最下部の横木とその上の横木、最下部の縦木とその上の縦木とする。横木には曲げとせん断の力が作用すると考えられ、縦木には下流側への引張力が作用すると考える。なお、上流側の横木の安定性は、内部の中詰材からの土圧と埋め戻し土から作用する土圧の方向は互いに逆であり大きさもほぼ等しいため、石川（2010）や Dang et al.（2007）によって考慮しなくてもよいことが示されている。9 年経過した木堰堤の部材直径は、密度と直径がここでは暫定的に比例関係であると仮定し、健全材の 0.2m に対して本体の健全密度比の最大値を乗じて推定した。

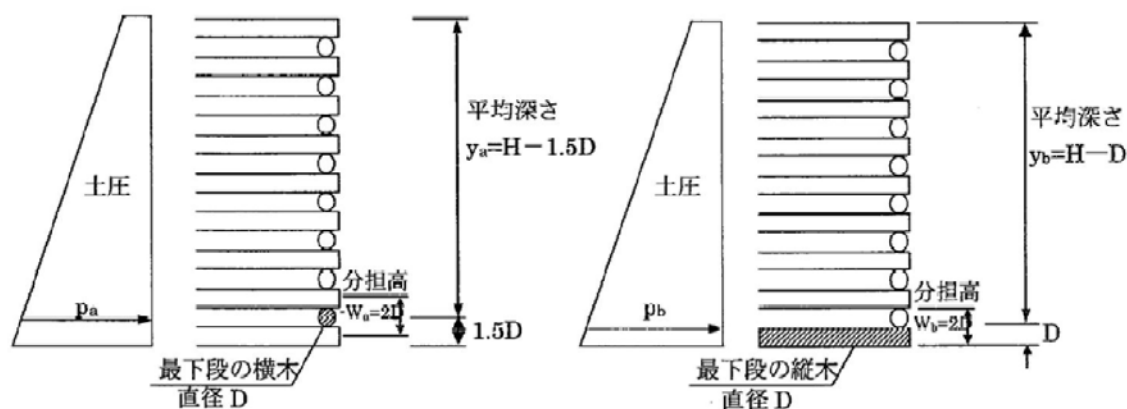


図 - 8. 16 部材に作用する土圧

計算を行うにあたって、部材の断面は円形とし、ボルト孔の影響は考慮しない。以下には、計算諸元を示す。

材質：カラマツ

許容曲げ応力度： $6.9 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ （建築基準法施行令より 常時湿潤状態）

許容せん断応力度： $0.5 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ （建築基準法施行令より 常時湿潤状態）

許容引張応力度： $4.2 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ （建築基準法施行令より 常時湿潤状態）

横木・縦木の平均径 D （健全材）：0.2m

横木・縦木の平均径 D （9 年経過）：0.09m（内山 3），0.13m（田原），0.10m（浪合）

使用した健全密度比：0.45（内山 3），0.64（田原），0.49（浪合）

横木・縦木の断面積（健全材）： $A = \pi D^2 / 4 = 3.14 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$

横木・縦木の断面積（9 年経過）： $A = \pi D^2 / 4 = 6.36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ （内山 3），

$1.29 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ （田原）， $7.54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ （浪合）

横木・縦木の断面係数（健全材）： $Z = \pi D^3 / 32 = 7.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

横木・縦木の断面係数（9年経過）： $Z = \pi D^3 / 32 = 7.16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ （内山3），

$2.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ （田原）， $9.24 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ （浪合）

横木の土圧分担高さ： $w_a = 2 \cdot D = 0.4 \text{ m}$

縦木の土圧分担高さ： $w_b = 2 \cdot D = 0.4 \text{ m}$

最下段横木の平均高さ： $y_a = H - 1.5 \cdot D = 1.8 \text{ m}$ （内山3）， 1.66 m （田原）， 1.7 m （浪合）

最下段の上の横木の平均高さ： $y_a = H - 3.5 \cdot D = 1.4 \text{ m}$ （内山3）， 1.26 m （田原），

1.30 m （浪合）

最下段縦木の平均高さ： $y_b = H - D = 1.9 \text{ m}$ （内山3）， 1.76 m （田原）， 1.8 m （浪合）

最下段の上の縦木の平均高さ： $y_b = H - 3 \cdot D = 1.5 \text{ m}$ （内山3）， 1.36 m （田原），

1.40 m （浪合）

部材の応力計算を行うにあたり，土圧を計算して横木と縦木のそれぞれの安定性を検討する。

①土圧

天端から深さ $y \text{ m}$ の土圧 (p) は，下記の式で求められる。ここで， p は深さ y の位置の土圧 (kN/m^2)， y は天端からの深さ (m)， γ_s は堆砂の単位堆積重量 (17.7 kN/m^3)， γ' は越流水の単位堆積重量 (11.8 kN/m^3)， h' は越流水深 (m)， c は土圧係数 (0.333) となる。

$$p = \gamma_s \cdot y \cdot c + \gamma' \cdot h' \cdot c \quad \dots (16)$$

②横木の応力計算

横木に作用する土圧 (P_a) は，次式で表せる。ここで， P_a は横木に作用する土圧 (kN/m^2)， w_a は横木の土圧分担高さ (m)， p_a は深さ y の位置の土圧 (kN/m^2)， y_a は天端からの平均深さ (m) となる。

$$P_a = w_a \cdot p_a = w (\gamma_s \cdot y_a \cdot c + \gamma' \cdot h' \cdot c) \quad \dots (17)$$

横木に作用する最大曲げモーメント (M_a) 及び最大せん断力 (S_a) は次式で表せる。横木は縦木により支持されているため，縦木間隔 (L_a) を支間とする単純梁に，等分布荷重 P_a が満載していると仮定する。ここで， L_a は縦木間隔 (m)， P_a は横木に作用する土圧（等分布荷重）となる。

$$M_a = P_a (L_a)^2 / 8 \quad (\text{kN} \cdot \text{m}) \quad \dots (18)$$

$$S_a = P_a \cdot L_a / 2 \quad (\text{kN}) \quad \dots (19)$$

横木に働く最大曲げ応力（ σ_a ）と最大せん断応力（ τ_a ）は、次式で表せる。ここで、 α は断面形状で求まる係数（円形断面では 4/3）、 A_a は横木の断面積（ m^2 ）、 Z_a は横木の断面係数（ m^3 ）となる。

$$\sigma_a = M_a / Z_a \quad \dots (20)$$

$$\tau_a = \alpha \cdot S_a / A_a \quad \dots (21)$$

③縦木の応力計算

本計算では、内山 3，田原，浪合の構造から最下段の縦木について密な配置がなされていないことから、縦木間隔を一律 1m とした。縦木に作用する土圧は、次式で表せる。ここで、 P_b は縦木に作用する土圧（ kN/m^2 ）、 w_b は縦木の土圧分担高さ（m）、 p_b は深さ y の位置の土圧（ kN/m^2 ）、 y_b は天端からの平均深さ（m）となる。

$$P_b = w_b \cdot p_b = w (\gamma_s \cdot y_b \cdot c + \gamma' \cdot h' \cdot c) \quad \dots (22)$$

縦木一本当たりに働く引張応力は（ σ_b ）は、次式で表せる。ここで、 L_b は縦木間隔（m）、 A_b は横木の有効断面積（ m^2 ）となる。

$$\sigma_b = P_b \cdot L_b / A_b \quad \dots (23)$$

表 - 8. 5 には、施工直後と 9 年経過における部材の応力計算結果を示す。9 年経過の木堰堤の部材直径は健全密度比から推定しており、健全材のほぼ 5 割程度となるが、カラマツ材の許容応力度内であり、9 年経過時でも安定性を保持している。施工直後と 9 年経過の応力を比較した場合、最大曲げ応力、最大せん断応力、最大引張応力はいずれもカラマツ材の許容支持力に近付いている。作用する土圧や外力は直径と関連していることから、直径の減少に伴って作用する力は減少するが、断面係数も腐朽に伴い減少することから、応力は経年変化で増加することになる。なお、縦木間隔は 3 基の設計図から密な配置とせず、一律 1m としているため、最下段の横部材と最下段の上の横木では、最下段の横木の応力が大きくなる。そのため、木堰堤の部材交換年数を考える場合には、最下段の横木が対象となるといえる。石川（2010）や Dang et al.（2007）ではスギ材で部材応力計算を行っており、最下段を支持する縦木を密に配置していることから、最下段の上の横木を対象に耐用年数が算定されている。

表 - 8 . 5 部材の応力計算結果

計算項目	施工直後			9年経過		
	内山 3	浪合	田原	内山 3	田原	浪合
部材直径 (m)	0.20	0.20	0.20	0.09	0.13	0.10
堤高 (m)	2.10	2.00	1.96	2.10	1.96	2.00
越流水深 (m)	0.23	0.18	0.28	0.23	0.28	0.18
最下段の横木を支持する縦木間隔 (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
縦木間隔 (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
最下段の横木 横木に作用する土圧 (kN/m ²)	4.61	4.29	4.35	2.07	2.79	2.10
最下段の横木 横木に作用する最大曲げモーメント M_a (kN・m)	0.58	0.54	0.54	0.26	0.35	0.26
最下段の横木 横木に作用する最大せん断力 S_a (kN・m)	2.30	2.15	2.18	1.04	1.39	1.05
最下段の横木 最大曲げ応力に対する検討 σ_a	$\sigma_a=M_a/Z$ 733kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 683kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 693kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 3,920kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 1,692kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 2,844kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK
最下段の横木 最大せん断力に対する検討 τ_a	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 98kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 91kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 92kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 217kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 144kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 186kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK
最下段の上の横木 横木に作用する土圧 (kN/m ²)	3.66	3.35	3.41	1.65	2.18	1.64
最下段の上の横木 横木に作用する最大曲げモーメント M_a (kN・m)	0.46	0.42	0.43	0.21	0.27	0.21
最下段の上の横木 横木に作用する最大せん断力 S_a (kN・m)	1.83	1.67	1.71	0.82	1.09	0.82
最下段の上の横木 最大曲げ応力に対する検討 σ_a	$\sigma_a=M_a/Z$ 583kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 533kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 543kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 2,878kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 1,325kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK	$\sigma_a=M_a/Z$ 2,219kN/m ² <6.9×10 ³ ...OK
最下段の上の横木 最大せん断力に対する検討 τ_a	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 78kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 71kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 72kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 173kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 113kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK	$\tau_a=4S_a/3A_a$ 144kN/m ² <0.5×10 ³ ...OK
最下段の縦木 縦木に作用する土圧 (kN/m ²)	4.84	4.53	4.59	2.18	2.94	2.22
最下段の縦木 縦木 1 本当たりに作用する引張応力 σ_b (kN/m ²)	154.09	144.09	146.09	342.43	228.26	294.06
最下段の縦木 引張応力に対する検討 σ_b	$\sigma_b=154kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=146kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=146kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=342kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=228kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=294kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK
最下段の上の縦木 縦木に作用する土圧 (kN/m ²)	3.90	3.58	3.65	1.75	2.33	1.76
最下段の上の縦木 縦木 1 本当たりに作用する引張応力 σ_b (kN/m ²)	124.08	114.07	116.07	275.72	181.36	232.80
最下段の上の縦木 引張応力に対する検討 σ_b	$\sigma_b=124kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=116kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=116kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=276kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=181kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK	$\sigma_b=233kN/m^2 < 4.2 \times 10^3$...OK

図 - 8. 17～図 - 8. 19 には、 σ_a 、 τ_a 、 σ_b のそれぞれと部材直径の関係を示す。ここでは最下段の部材を対象として、堤高を 1.5m・2.0m，縦木間隔を 0.5m・1.0m とした。越流水深は内山 3，田原，浪合の上限をとって 0.3m を与えている。得られた代表式 ($H=2.0\text{m}$ ， $L=1.0\text{m}$) を次に示す。ここで、 x は σ_a 、 τ_a 、 σ_b であり、 y は部材直径である。

$$(\sigma_a) \quad y = 5.3402x^{-0.5} \quad \dots (24)$$

$$(\tau_a) \quad y = 19.012x^{-1} \quad \dots (25)$$

$$(\sigma_b) \quad y = 30.018x^{-1} \quad \dots (26)$$

木堰堤の部材応力は、部材直径、堤高、越流水深、縦木間隔を与えることで計算可能であり、腐朽による直径減少に伴う応力の増加傾向を累乗式で表現することができる。図には 9 年経過の 3 基をプロットしており、施工直後から応力が増加していくことがわかる。

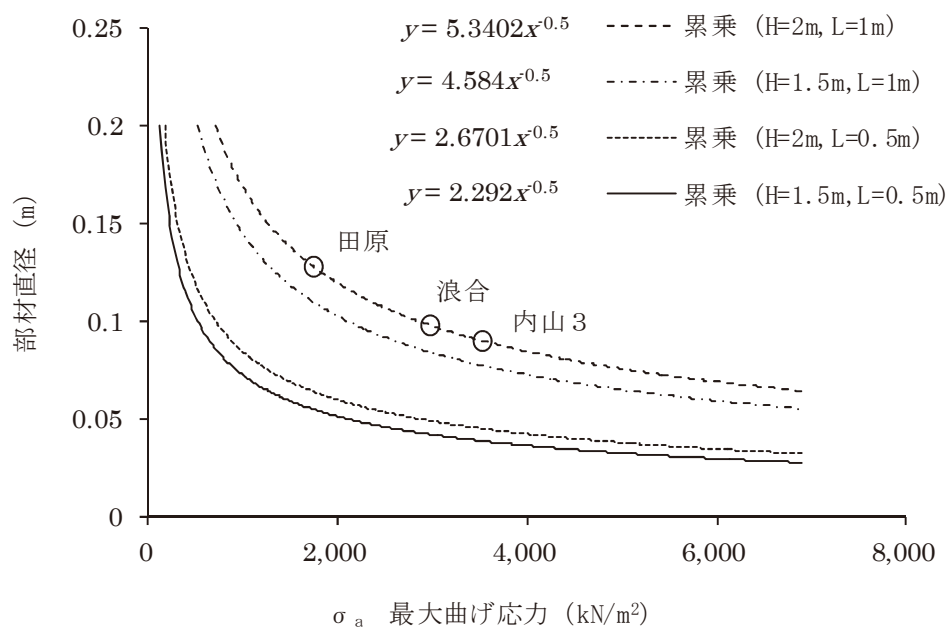


図 - 8. 17 σ_a と部材直径の関係

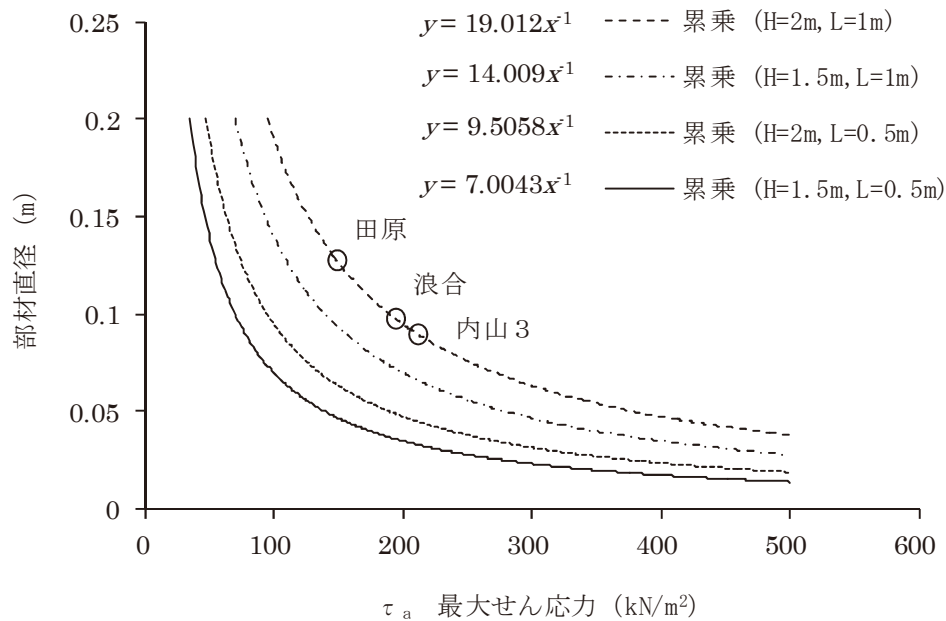


図 - 8. 18 τ_a と部材直径の関係

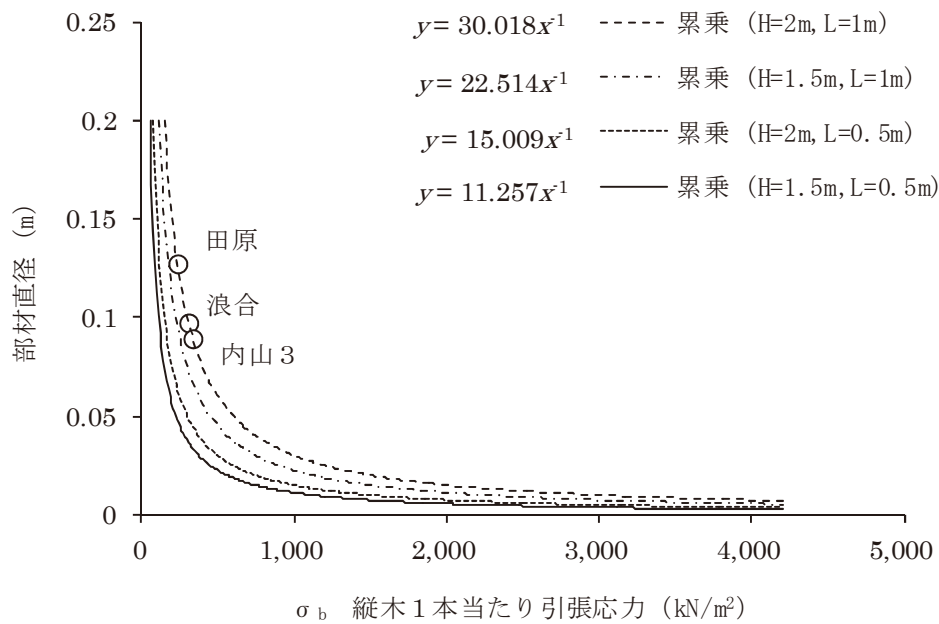


図 - 8. 19 σ_b と部材直径の関係

3) 木堰堤の部材交換年数

部材の応力計算より，木堰堤の部材交換年数を試算する。ここで，木堰堤の部材交換年数は部材に作用する最大の曲げ，せん断，引張応力が許容応力度と等しくなった時点として評価できる。この考え方はスギ材で検討した石川（2010）や Dang et al.（2007）と同様の評価方法である。評価対象の部材は，本計算で土圧が最大となった最下段の横木とな

る。ここで、3つの応力の許容応力度における最小直径 D' を求めて、対象応力を決定する。カラマツ材の許容応力度（建築基準法施行令より 常時湿潤状態）を（24）式、（25）式、（26）式に代入すると、 σ_a で $D'=0.06\text{m}$ 、 τ_a で 0.04m 、 σ_b で 0.007m となる。そのため、最大曲げ応力 σ_a において、木堰堤の部材交換年数が定まることになる。

ここで、木堰堤の部材交換年数は次式で示される。 y は部材交換年数であり、 D は施工直後の部材直径、 D' は最小直径、 $\Delta \mu v$ は腐朽速度（mm/year）である。部材直径は円形と仮定し、直径で腐朽すると考えて2を乗じる。

$$y = \frac{D-D'}{2 \cdot \Delta \mu v} \quad \dots (27)$$

D は（24）式で計算できることから、次式となる。ここで、 x は木材の許容曲げ応力度（建築基準法施行令より 常時湿潤状態）である。

$$y = \frac{D-5.3402x^{-0.5}}{2 \cdot \Delta \mu v} \quad \dots (28)$$

木堰堤の腐朽速度 $\Delta \mu v$ は、7章による以下の重回帰式で示される。ここで、 $x1$ は標高であり、 $x2$ は堤高である。

$$\Delta \mu v = 0.004x1 + 1.507x2 - 3.171 \quad \dots (29)$$

さらに $x1$ を h として、 $x2$ を dh として（28）式へ（29）式を代入すると、次式を得ることができる。

$$y = \frac{D-5.3402x^{-0.5}}{2 \cdot (0.004 \cdot h + 1.507 \cdot dh - 3.171)} \quad \dots (30)$$

以上の考察から木堰堤の部材交換年数 y は（30）式で求めることができ、部材直径、木材の許容応力度、標高、堤高の因子から計算できる。部材の応力計算式と腐朽速度を求める重回帰式を組み合わせることで、設置条件や構造条件を考慮した部材交換年数を求めることができる。木堰堤の越流水深や縦木間隔によっては、（30）式の分子を変えることが必要ではあるが、この式は樹種の違いや施設規模、設置条件といった各種条件から部材交換年数が求められることを示している。

ここで、内山3、田原、浪合の3基の部材交換年数を求めると、20年、29.7年、16.1年となる。 $\Delta \mu v$ は（29）式から計算した。本体の ρ から求めた平均的な部材消失までの限界

年数は約 26 年であり、この年数は設置条件によって上下することが考えられる。そのため、(30) 式からの部材交換年数は概ね限界年数内に収まっており、算出式の妥当性が証明される。袖部の部材交換年数は、限界年数の算出結果から本体と 5 年程度の差があるため、本体の計算結果から 5 年を差し引くことで試算できる。木堰堤の袖部は、堤体の安定計算に直接関連してこないが、本体とボルトで連結されていることから、腐朽によって本体へ影響を及ぼすことも考えられるため、本体と合わせて部材交換年数を算出する。

8. 5 まとめ

本章では施工後 9 年経過までの木堰堤における腐朽の実態を明らかにして、構造計算を行うことで部材交換年数を求めた。結果として ρ と含水率や経過年との間には統計的な関係性が認められ、 ρ の計算値により木堰堤の部材消失までの限界年数を試算することができた。また、部材の応力計算式と 7 章による腐朽速度 $\Delta \mu v$ の重回帰式を組み合わせることで、木堰堤の部材交換年数を計算することができ、この年数は概ね ρ からの限界年数内に収まることがわかった。以下には本章のまとめを示す。

- (1) 腐朽した木堰堤の ρ は健全材の数値からいずれも減少しており、9 年経過の木堰堤では、 0.2 g/cm^3 未満が局所的に出現し、健全時から大きく減少している。
- (2) 含水率の分布には全体的に、袖部の上部で高く、下部ほど低くなる傾向がある。また、繊維飽和点 28% 未満で ρ が大きい部材が見受けられることから、含水率が低下するにつれて腐朽の進行が遅くなる可能性がある。
- (3) ρ と経過年との間には袖部と本体ともに直線関係が認められることから、 ρ は年数を経過するほど減少する。また、年数を経過して腐朽が進行するほどばらつきが大きくなる。
- (4) 部材密度が消失する年数を計算したところ、袖部で約 20.0 年、本体で約 25.5 年となる。袖部と本体には 5 年程度の差が生じており、部位による年数の違いが表れている。
- (5) 構造物全体の安定性では、9 年経過しても安定条件を満足している。木材単位体積重量は施工直後から 2 割～3 割程度の減少幅であり、木材の体積比率も 2 割程度と低いため、構造物全体の安定性への影響は小さい。
- (6) 部材応力計算の結果、部材は許容応力度内であり、9 年経過時でも安定性を保持している。木堰堤の部材応力は、部材直径、堤高、越流水深、縦木間隔を与えることで計算でき、応力の増加傾向を累乗式で表現することができる。
- (7) 部材の応力計算の累乗式と $\Delta \mu v$ の腐朽速度式を組み合わせることで、木堰堤の部材交換年数を計算できる。この式は樹種の違いや施設規模、設置条件といった各種条件から部材交換年数が求められ、 ρ から求めた限界年数内にも概ね収まる。袖部の部材交換年数は、本体の計算結果から 5 年を差し引くことで試算できる。

第9章 結言

9. 1 木堰堤の維持管理指針の策定に向けた提言

本研究成果に基づき、将来的な木堰堤の維持管理指針の策定に向けた提言を以下に示す。提言内容としては、木堰堤の部材交換年数、将来的な維持管理や施設構造、腐朽しにくい条件の3つにまとめる。

＜木堰堤の部材交換年数：5章，7章，8章の考察に基づく＞

- (1) 本体の下流面部材では、常時流水に浸かっている場合には腐朽が遅いことから、維持管理のための交換は考慮しなくてもよい。上流側の堆砂面でも同様に、酸素供給がなく腐朽しないことから、交換は考慮しなくてもよい。常時流水が無い場合には、本体の腐朽の進行は速くなる。
- (2) 常時流水のある木堰堤では、袖部の腐朽が通常より速くなる。
- (3) 袖部では最上段と最下段（水通し直上）で腐朽の進行が速いため、部材交換を検討する場合には、現地での腐朽進行程度を目安になると考えられる。
- (4) スギ材ではカラマツ材以上に腐朽の進行が速くなる可能性がある。
- (5) 部材交換年数は、8章の(30)式により計算できる。この計算式は部材直径、木材の許容応力度、標高、堤高の因子を与えることで計算可能である。また、(30)式は木堰堤の設計条件が異なる場合、越流水深と縦木間隔の分子となる累乗式を変えることで対応できる。本研究でカラマツ材木堰堤を対象に試算したところ、本体で20～30年となった。袖部の交換年数は、本体の限界年数より5年ほど速いと考えられるため、本体の計算結果から5年を差し引いた年数を目安とする。

$$y = \frac{D - 5.3402x^{-0.5}}{2 \cdot (0.004 \cdot h + 1.507 \cdot dh - 3.171)} \quad \dots \text{部材交換年数の算出式}$$

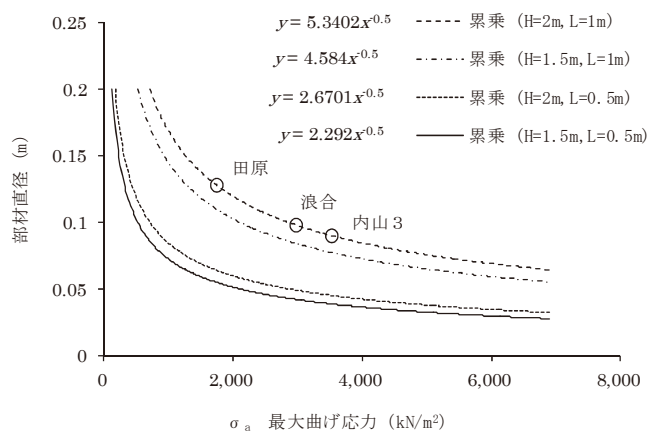


図 - 9. 1 σ_a と部材直径の関係（図 - 8. 17の再掲）

<将来的な維持管理や施設構造：4章，5章の考察に基づく>

- (1) 仮に部材交換年数を20年とすると，本研究の4章で示した全国の木堰堤施工基数の経過年分布より，現在までに防腐剤無の木堰堤13基が該当する。これらの木堰堤は長期経過により，部材密度が腐朽によって大きく低下していると推察される。また，現在から10年後には，防腐剤無の木堰堤で施工ピーク年が20年経過に入り込むため，この年数前後での施工が全国的に多いことから，部材交換やメンテナンス等の維持管理が増大する可能性が高い。10年後を想定した場合には，防腐剤無の木堰堤で国有林内16基，民有林内352基程度まで増加すると試算できる。本研究で整理した基数の経過年分布に基づき，全国的に長期経過した防腐剤無の施設から試験的に，部材交換を実施していくことが望ましい。
- (2) 維持管理基数は，平成14年度～平成18年度までに施工された木堰堤が特に多いため，これらの施設が20年以上経過する前に，全国的な維持管理指針を定めていく必要がある。
- (3) 施設構造として，袖部の腐朽が速いことからユニットとして一体的に部材交換できる仕組みとすることが望ましい。
- (4) 本体構造は堆砂の上流面で腐朽しないことから，上下流面を分割した仕組みとすることが考えられる。上流面は確実に堆砂させて酸素供給を遮断し，下流面のみを交換できる構造とする案が考えられる。部材交換の際には，中詰材が流出しないよう充填方法や縦木の長さを工夫することが必要となる。
- (5) ピロディン貫入量からの μ は腐朽指標として妥当性が確認されたことから，将来的な維持管理のため，継続調査の μ から腐朽速度を求めておくと，部材交換年数を計算できる。また，補助的に成長錐による ρ も求めておくと限界年数を計算できる。

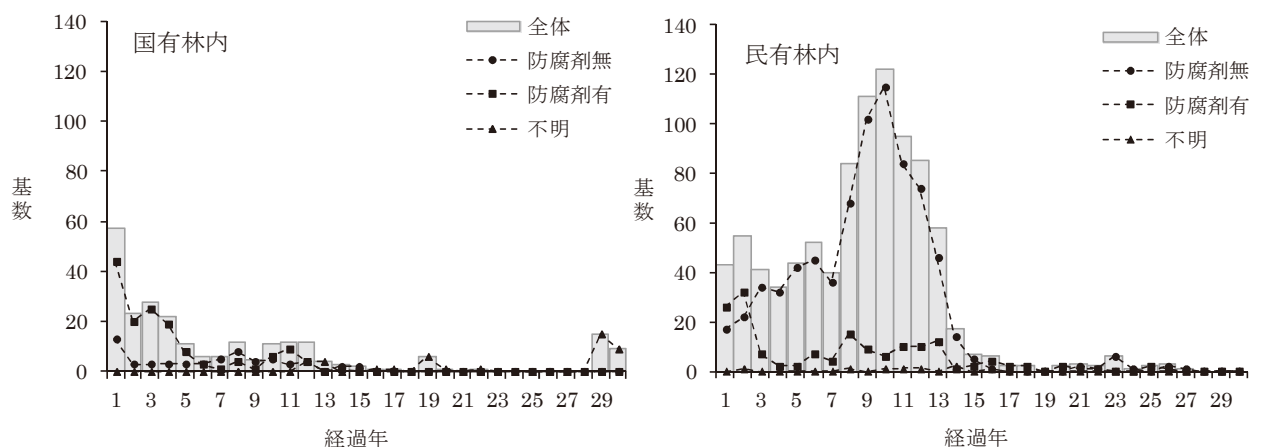


図 - 9. 2 国有林内と民有林内における経過年分布（図 - 4. 9，10 の再掲）

<腐朽しにくい条件：6章，7章，8章の考察に基づく>

- (1) Climate Index (T.C.Sheffer (1971) が定義した指数であり，以下 CI と略述) が低い地域では木堰堤の腐朽の進行が遅くなる傾向があるため，設置条件として適していると考えられる。CI の因子である月平均気温が低く，月降水日数が少ない地域ということになる。木材腐朽には温度と水の2つの因子が必要と考えられ，どちらかが抜けた場合には腐朽の進行が遅れる可能性がある。
- (2) 低標高の地域ほど，降水量が少なくなることで腐朽が遅くなる。
- (3) 堤高を抑えることで，腐朽を遅らせることができる。堤高を上げることで下流面側の河床と袖部の比高差がつくことになり，袖部の部材温度が上がりやすくなると考えられる。堤高を抑えると袖部は下流面側の河床と近付き，結果として冷涼な環境に置かれることで袖部の腐朽の進行が抑えられると考えられる。
- (4) 木堰堤の堤体には，なるべく雨が当たらないよう設置環境を工夫し，日陰をつくるなど気温の低い環境に近付けることで，腐朽の遅れへとつなげることができる。

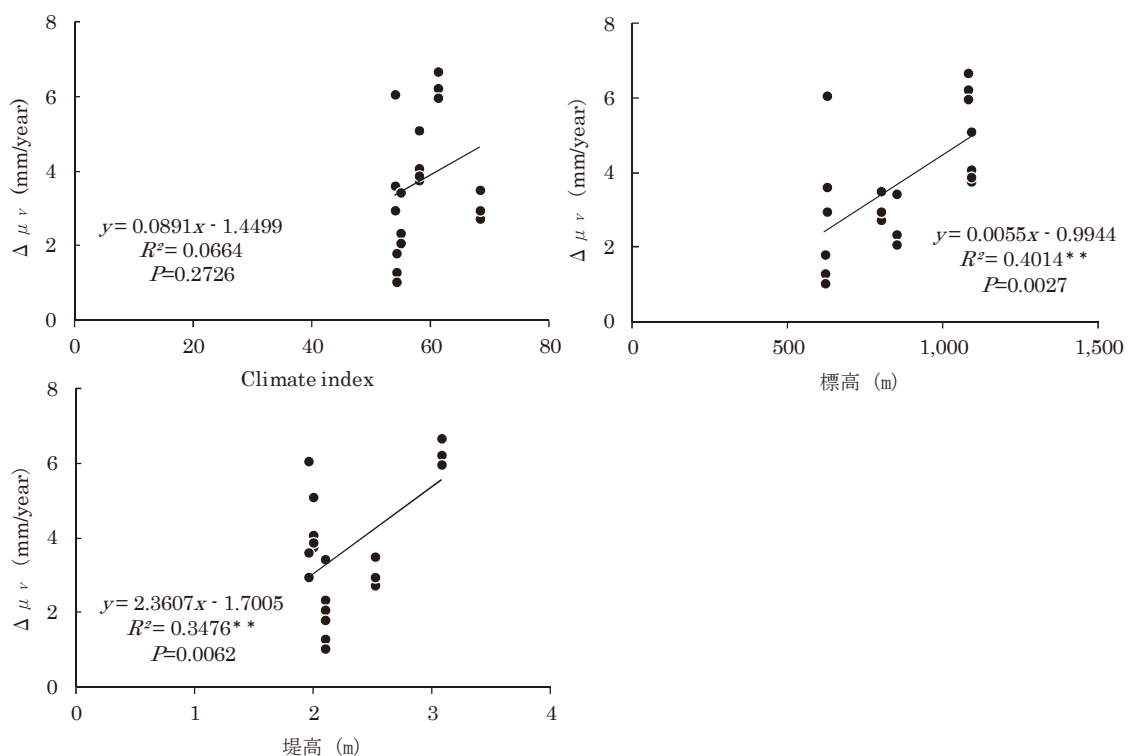


図 - 9. 3 $\Delta \mu v$ と気候条件及び構造条件との関係 (図 - 7. 12 の再掲)

9. 2 今後の研究課題

これまで木堰堤の腐朽に関する研究を進めてきて、新たに見えてきた今後の研究課題を以下にまとめる。今後は、これら課題の解明を目的として研究を一層進めていく。

- (1) 全国における木堰堤の土石流等被災実績を整理し、全壊や一部の部材流出と施設規模や設置条件との関係性を明らかにする。
- (2) 木堰堤の $\Delta \mu$ は年によって腐朽の変動が見られることから、気候変動や降雨量の変化との関係性を明らかにする。
- (3) 本研究では青森県と長野県、静岡県の3県を対象としたが、他県でも腐朽データを集積して、 $\Delta \mu$ の腐朽速度式の精度を高める。また、スギ材やヒノキ材の他樹種の腐朽調査を行って樹種別の重回帰式を作成し、部材交換年数の算出式へ組み込む。
- (4) 限界年数に近付いた施工後20年経過における木堰堤の腐朽の実態を解明する。
- (5) 防腐剤を使用した木堰堤の腐朽実態を明らかにして、部材交換年数の算出式を作成し、防腐剤無しの算出式と比較する。

摘要

本研究は木製治山堰堤（以下、木堰堤と略述）の現地による腐朽継続調査を行い、腐朽の進行過程及び気候条件や構造条件といった各種条件による腐朽への影響を解明することを目的とした。

聞き取り調査の整理対象は、日本全国の国有林内と民有林内における木堰堤とした。腐朽調査の対象地は、長野県・静岡県・青森県の18箇所における木堰堤施工地とした。経過年は主に0～9年経過のカラマツ材及びスギ材の木堰堤であり、御岳の調査地では21年経過を対象とした。

施工実績では、全国の森林管理局と農林部局の54機関に対する聞き取り調査を行った。腐朽調査はピロディン貫入量調査と成長錐調査を行った。また、施工地の気候条件や構造条件については、アメダス観測所データや一般構造図等から整理した。

4章では施工実態の聞き取り調査結果より、施工推移や経過年分布を明らかにした。平成25年度までに、全国の木堰堤基数は1,166基であり、42道府県で実績があった。木堰堤の使用樹種はスギ、ヒノキ、カラマツ、トドマツ、アスナロの5種で、スギ材とカラマツ材の2樹種で全体の8割程度を占めていた。防腐剤の使用割合では1,166基に対し305基となり、26%程度であった。施工後10年以上経過した施設は国有林内で16基あり、民有林内で352基となった。

5章では、木堰堤の腐朽の進行過程と経年変化を解明するため、ピロディンを用いて施工後5年及び6年経過した木堰堤の継続調査を実施した。その結果、施工後6年経過した木堰堤のピロディン貫入量の相対度数は対数正規分布を示し、分布曲線は4th No. 2 上に正方向へと傾倒していた。次に、施工直後の正規分布から貫入量26mmを超過する割合を腐朽比率とし、腐朽進行を袖部・本体の部位別に比較すると、腐朽しやすい箇所は6年経過しても、腐朽が進行しやすい部位のままであった。腐朽の経年変化では、ピロディン貫入量の平均値 μ 及び標準偏差 σ と経過年数、また腐朽比率と経過年数には相関があり、それぞれ年数を経過するほど測定値の増加が認められ、腐朽が進行する様子を確認できた。

6章では、環境条件の異なる3県における腐朽調査を実施し、木堰堤の腐朽の進行程度に及ぼす気候条件と構造条件を明らかにした。重回帰分析の結果として、気候条件では気温と降水日数から算出したClimate Index (T.C.Sheffer (1971) が定義した指数であり、以下CIと略述)、気温から算出したWarmth Index、年平均気温、標高が影響を及ぼす因子と考えられた。構造条件では比流量、水通し幅、堤長、堤高がそれぞれ影響を及ぼす因子と考えられた。気候と構造条件の統合結果として、CI、標高、堤高が説明変数として抽出され、施工後5年までの μ の予測式が得られた。

7章では、貫入増加量 $\Delta \mu$ を計算することで分布推移を明らかにし、常水有無や部位、樹種別に比較した。 μ の一次式による回帰係数から腐朽速度 $\Delta \mu v$ を求め、気候条件や構造条件との重回帰分析を行った。なお、一次式中の切片 b は腐朽前の μ を示すため、 $\Delta \mu v$ は元々の木材密度には影響されない。6章ではCI・標高・堤高の3指標が腐朽と関係してい

たが、本章では $\Delta \mu$ に樹種による違いが見られたことで、カラマツ材に絞りで考察した。CI と標高は多重共線性の面から CI を指標から外し、標高と堤高の2指標で式を組むことができ、元々の木材密度の影響が除かれて有意性が高くなった。重回帰式は統計的に有意性が示されたことから、継続調査によるピロディン貫入量 μ は腐朽指標として妥当と考えられた。

8章では、施工後9年経過までの木堰堤における腐朽の実態を明らかにし、構造計算を行うことで部材交換年数を求めた。容積密度数 ρ と含水率や経過年との間には相関があり、 ρ の計算値により部材消失までの限界年数を計算した。構造物全体の安定性や部材の応力計算を行ったところ、9年経過した木堰堤は安定条件を満足していた。木堰堤の部材応力は、部材直径、堤高、越流水深、縦木間隔を与えることで計算可能であり、腐朽による直径減少に伴う応力の増加傾向を累乗式で表現することができた。部材の応力計算式と7章による腐朽速度 $\Delta \mu v$ の重回帰式を組み合わせることで、木堰堤の部材交換年数を計算した。この式は樹種の違いや施設規模、設置条件といった各種条件から部材交換年数が計算でき、 ρ から求めた限界年数内にも概ね収まった。袖部の部材交換年数は、限界年数の算出結果から本体と5年程度の差があるため、5年を差し引くことで求められる。

最後には本研究によって、普遍性のある腐朽指標を分析し、木堰堤の将来的な維持管理指針の策定に向けた提言を示した。提言内容としては、木堰堤の部材交換年数、将来的な維持管理や施設構造、腐朽しにくい条件の3つにまとめた。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、学部生の頃から現在に至るまで多くの方々の支援を賜ってきました。治山学研究室の北原曜教授と小野裕助教には、学部生の頃から科学者としての考え方や研究の進め方などのいろはを教えて頂き、そのお陰でここまで頑張ることができました。博士課程に入学した後や、学位論文の執筆においても、多岐にわたる指導助言を頂戴しました。私が研究をライフワークにできたのは、野外に出掛けてデータを取って、新たな発見をする喜びを先生方に教えて頂いたことが大きく、研究を好きな気持ちが原動力でした。末尾の謝辞だけでは、決して言い表せない感謝があります。先生方はずっと私の人生の目標です、本当にありがとうございました。

流域保全学研究室の平松晋也教授と、木材利用学研究室の武田孝志教授、森林施業・経営学研究室の植木達人教授にはお忙しいところ、学位論文や審査会では貴重なご意見とご指摘を頂きました。東京農工大学の石川芳治教授にも副査を引き受けて頂き、木堰堤研究の最先端を進む先生から有益なご意見を頂くことができました。副査の先生方のお陰で本研究は、より高度な内容へとまとめることができました。心より感謝を申し上げます。

また、学位論文をとりまとめていくにあたり、信州大学農学部学務グループの竹松豊成氏には書類手続き等で非常にお世話になりました。ここに深く感謝を申し上げます。

青森県五所川原農林高等学校の奈良岡隆樹教諭には、高校時代に坪毛沢木堰堤群の存在を教えて頂き、現地調査へのご協力や本研究を進めるにあたって多大なる助言を頂きました。私が最初に木堰堤研究を志した動機であり、この感謝は生涯忘れません。本当にありがとうございました。

私の現在の勤務先である日本工営株式会社にも、博士課程進学や学会発表等の許可を頂いたことに心から感謝を申し上げます。

ここで木堰堤の施工実績の聞き取り調査においては、森林管理局や都道府県農林部局の関係諸氏から貴重な情報を提供頂きました。以下の方々には順不同で、ここに深く感謝を申し上げます。なお、ここに記載の所属は聞き取り調査当時のものです。

北海道森林管理局 治山課 武森美紀男氏，河合芳郎氏

東北森林管理局 治山課 小川明穂氏，庄司亘氏

関東森林管理局 治山課 堀内稔弘氏，高木晃氏

中部森林管理局 治山課 牧田政敏氏

近畿中国森林管理局 治山課 竹中明氏

四国森林管理局 治山課 徳満千秋氏

九州森林管理局 治山課 赤星良治氏，富永雄二氏

大阪府庁 みどり・都市環境室 みどり推進課 森林整備グループ

石井敬任氏，寺田和弘氏

奈良県庁 農林部 森林整備課 治山・林道係
植田拓也氏，高雄亘氏

兵庫県庁 農政環境部 農林水産局 治山課
塩谷嘉宏氏

京都府庁 農林水産部 森林保全課
西貴詩氏

滋賀県庁 琵琶湖環境部 森林保全課 森林管理担当
永田智愛氏，岩本篤彦氏

和歌山県庁 農林水産部 森林・林業局森林整備課 治山班
木村公洋氏

三重県庁 農林水産部 治山林道課 治山グループ
森光徳氏

富山県庁 農林水産部 森林整備班（治山担当）
高橋聡太郎氏

石川県庁 農林水産部 森林管理課 森林保全グループ
小谷哲治氏

福井県庁 農林水産部 森づくり課
藤田義憲氏，増田明彦氏

愛知県庁 農林水産部 森林保全課
加藤将氏，西尾麻美氏

静岡県庁 交通基盤部 森林局森林保全課 治山班
山崎陽介氏，渡邊直樹氏

神奈川県庁 環境農政局 水・緑部 森林再生課 基盤整備グループ
増子和敬氏，杉本健輔氏

埼玉県庁 農林部 森づくり課 治山・森林管理道担当
金子孝聡氏，山崎 宏剛氏

茨城県庁 農林水産部 林地保全グループ
佐藤衣里氏，平岩季子氏

栃木県庁 環境森林部 森林整備課 治山担当
嶋寛子氏，前原隆一氏

群馬県庁 環境森林部 森林保全課 治山保全課
宇津木寛氏

山梨県庁 森林環境部 治山林道課 治山担当
末松政樹氏，瀧口晴夫氏

新潟県庁 農林水産部 治山課 治山係
富樫康宏氏，内山茂氏

長野県庁 林務部 森林づくり推進課
清水靖久氏，正条直太氏

北海道庁 水産林務部 林務局 治山課
小林直樹氏，高木英孝氏

青森県庁 農林水産部 林政課 治山・林道グループ
阿部尚文氏，佐々木伸治氏

岩手県庁 農林水産部 森林保全課 治山担当
大崎勝弘氏

宮城県庁 農林水産部 森林整備課 治山班
南條緑氏，成田史苗氏

秋田県庁 農林水産部 森林整備課 治山・林道班
原田利正氏

山形県庁 農林水産部 森林課 森林整備担当
横倉斉氏，越智温子氏

福島県庁 農林水産部 森林保全課
會田充茂氏，渡部一芳氏

鳥取県庁 県土整備部 治山砂防課
山本光一氏

島根県庁 農林水産部 森林整備課 治山グループ
藤原裕之氏

岡山県庁 農林水産部 治山課
佐藤雅之氏

広島県庁 農林水産局 森林保全課
山瀬啓介氏，松井雅典氏

山口県庁 農林水産部 森林整備課 治山林道班
瀬脇武浩氏

香川県庁 環境森林部 みどり整備課 森林土木グループ
濱田昇吾氏，高橋新二氏

愛媛県庁 農林水産部 森林整備課
桐島充子氏

高知県庁 林業振興・環境部 治山林道課
正岡正氏

佐賀県庁 県土づくり本部 森林整備課
勝山ゆかり氏

長崎県庁 農林部 林政課 森林整備室 治山班
保利泰史氏

熊本県庁 農林水産部 森林保全課 治山班

藤田修二氏，荒木泰行氏

大分県庁 農林水産部 森林保全課 治山班

渡邊絢哉氏，山石山氏

宮崎県庁 環境森林部 自然環境課

中村和央氏

鹿児島県庁 環境林務部 森づくり推進課

下永田通和氏

沖縄県庁 農林水産部 森林緑地課 森林保全班

黒木寿人氏

最後になりますが，学部生の頃からの治山学研究室の先輩や同輩，後輩の皆様には現地調査や研究室生活で励まし合いながら，時には酒を酌み交わし議論してきました。皆様と一緒になければ，ここまで多くのデータは得られませんでした。本当にありがとうございました。

ここまで研究を進めるにあたり，私の家族はいつも心の支えになってくれて，温かく見守ってくれました。そのおかげで研究を継続できたことに心から感謝しています。研究室学部生の頃から博士課程の現在に至るまでの7年間，木堰堤の腐朽が進むのと一緒に私も年をとりながら，少しずつ研究を続けてきました。当時施工間もなかった長野県の木堰堤は，今では10年以上経過しています。どんなときも私にデータを取らせてくれて，多くのことを学ばせて頂いた，木堰堤に感謝します。

私は学位取得後のここからが始まりと思っていますので，これまで多くの方々から学んだことを心に刻み，これからも地球環境と社会のため，科学者として尽力する所存です。

引用文献

- 秋田寛己・北原曜・小野裕（2006）ヒバ材を用いた木製治山堰堤の腐朽と摩耗．中部森林研究 55：169 - 172
- 秋田寛己・北原曜・小野裕（2007）木製治山堰堤の腐朽の進行過程と環境因子との関係．中部森林研究 56：287 - 292
- 秋田寛己・北原曜・小野裕（2012）全国における木製治山堰堤の施工実績と今後の維持管理．第 52 回治山研究発表会論文集 : 54 - 55
- 雨宮昭二（1963）浅川実験林苗畑の杭試験（1）杭の被害程度を評価する方法．林業試験場研究報告 150：143 - 156
- 雨宮昭二（1970）浅川実験林苗畑の杭試験（2）防腐処理杭の 10 年間の被害経過．林業試験場研究報告 230：105 - 142
- 雨宮昭二（1970）浅川実験林苗畑の杭試験（3）各樹種の野外試験による耐久性調査結果．林業試験場研究報告 232：109 - 135
- 青森県五所川原農林高等学校自然科学部（2002）生物の多様性を維持している治山ダム．治山 46（11）：4-7
- 朝田瑞樹，石川芳治，水原邦夫，三好岩生（2002）間伐材の腐朽に伴う強度変化と強度調査法．平成 14 年度砂防学会研究発表会概要集：238 - 239
- 千田知弘・佐々木貴信・野田龍・井上孝人・三浦靖浩（2012）木製治山ダムの FEM 解析を用いた最適設計と開発 - 第 1 報 オールウッドタイプ木製治山ダムの最適設計 - ．砂防学会誌 64：14 - 23
- Dang QD , Ishikawa Y , Nakamura H , Shiraki K (2007) Evaluating method of durability of small wooden crib dams with considering the deterioration rate. 砂防学会誌 60（2）：7 - 15
- Dang QD , Ishikawa Y , Shiraki K (2008) Influence of design high water level, warm index, and maximum snow depth on deterioration rate of wooden crib dams. 砂防学会誌 61（4）：11 - 15
- 海老原伸子（2003）カラマツ間伐材を用いた山腹工の腐朽過程．砂防学会研究発表会概要集 2003：130 - 131
- 藤原健，山下香菜，鈴木養樹，長尾博文，加藤英雄，井道裕史，岡田直紀（2006）丸太の材内密度分布評価技術の開発 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集（スギ材の革新的高速乾燥システムの開発） 8：21 - 24
- 長谷川益夫・中谷浩・飯島泰男・安田洋・嘉戸昭夫・長谷川幹夫・相浦英春・石田仁・上林徳久（1993）富山県における治山木杭の耐久性（第 1 報）一柵工におけるスギ及びカラマツ木杭の耐用年数について．木材保存 19（1）：13 - 22
- 長谷川益夫（1989）地域クライメートインデックス図とその利用．木材保存 15（4）：9 - 17

- 長谷川益夫（1996）木材保存に関わる気候指数．木材保存 22（5）：2 - 9
- 北海道（2000）土木用木材・木製品設計マニュアル．公開指針
- 石川芳治（2001）森が育て、森を育む木製ダム．砂防学会誌 86：111 - 112
- 石川芳治（1998）木製床固工の特徴と設計．砂防学会誌 50（6）：33 - 39
- 石川芳治・岩館知哉・水原邦夫（2000）小型木製枠構造堰堤の水平載荷試験と安定性の検討．砂防学会誌 52（5）：16 - 23
- 石川芳治（2001）間伐材を利用した小型木製治山ダムの導入に関する調査研究．平成 12 年度京都府立大学特別研究成果報告書 95pp
- 石川芳治・内藤洋司・落合博貴・上原勇（2003）各種試験に基づく木製施設の耐久性、腐朽度および曲げ強度評価法．砂防学会誌 56（4）：21 - 31
- 石川芳治（2010）砂防・治山分野における木材利用の課題と展望．砂防学会誌 62（6）：52 - 58
- 飯島泰男（1999）土木用木質構造物の耐用年数評価について．木材保存 25（5）：3 - 12
- 唐牛孝司（1999）既設木えん堤の現況について．砂防学会誌 51（6）：46 - 50
- 河津渉，津島俊治，城井秀幸，増田隆哉（2005）大分県におけるスギ小径木丸太の耐久性試験結果（Ⅱ）．九州森林研究 58：221 - 224
- 北原曜・田中俊成・山本幸一（1998）大正から昭和にかけて施工された木製ダムの耐久性調査．第 15 回日本木材保存協会年次大会論文集：1 - 9
- 国土交通省河川局（2012）河川砂防技術基準（案）同解説 調査編．図書 pp591
- 国土交通省河川局（2012）河川砂防技術基準（案）同解説 設計編Ⅱ．図書 pp218
- 鋼製砂防構造物委員会・（一財）砂防地すべり技術センター（2009）鋼製砂防構造物設計便覧．図書 pp254
- Martonne E（1942）Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité. Annales de Géographie tome LI:241-248
- 松岡昭四郎ほか（1984）浅川実験林苗畑の杭試験（7）日本産、および南洋産材の野外に設置した杭の腐朽経過と耐用年数．林業試験場研究報告 329：73 - 106
- 三輪照光（2000）流沢の木堰堤調査報告．砂防学会誌 52（5）：52 - 56
- 文部科学省（2003）高等学校用教科書 林産加工．図書 pp353
- 野田龍・佐々木貴信・千田知弘・井上孝人・原田利正・三浦靖浩（2012）秋田県における木製治山ダムの開発に関する取組み．砂防学会誌 65（1）：39 - 46
- 岡野健・祖父江信夫 編（2013）木材科学ハンドブック（普及版）．図書 pp460
- 林業試験所木材部・木材利用部（1982）日本産主要樹種の性質 木材の性質一覧表 林業試験場研究報告 319：85 - 126
- 林野庁（2004）森林土木木製構造物設計等指針及び森林土木木製構造物設計等指針の解説等．公開指針

- 林野庁（2012）森林土木木製構造物施工マニュアル．図書 pp467
- 島地謙・佐伯浩・原田浩・塩倉高義・石田茂雄・重松頼生・須藤彰司（2002）木材の科学1 木材の構造．図書 pp276
- 鈴木大隆・北谷幸恵・岩前篤・永井久也・小南和也・坂本雄三（2008）定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係 木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究（第1報）．日本建築学会環境系論文集 73：（627） 591 - 597
- 社団法人土木学会 木材工学特別委員会（2010）土木における木材の利用拡大に関する横断的研究．平成 21 年度土木学会「重点研究課題（研究助成金）」報告書
- 田淵敦士・村田良浩・高奥信也・明石浩和（2011）木製治山ダム部材における曲げ強度の経年変化．材料 60（4）：277 - 281
- Theodora C S（1971）A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. FPJ 21（10）：25 - 31
- 津島俊治（2002）ピロディン打込み深さに影響を与える諸要因．九州森林研究 55：192 - 195
- 津島俊治・栗崎宏・長谷川益夫（2005）大分県における土木用木製構造物の劣化原因と耐用年数．木材保存 31（5）：199 - 206
- 臼田寿生・和多田友宏・土肥基生（2014）木製治山ダムの部材として利用されたスギ材の耐久性．中部森林研究 62：95 - 96
- 屋我嗣良，河内進策，今村祐嗣（1997）木材科学講座 12 保存・耐久性．海青滋賀：224
- 山内仁人・今井信（2013）カラマツ製治山施設の劣化．木材利用研究論文報告集 12：73 - 76
- 山内仁人（2013）カラマツ切り捨て間伐木の分解速度．中部森林研究 55：35 - 36