

第VI章 木造住宅の外皮木部の水分履歴に応じた腐朽危険度予測手法

腐朽危険度予測 T G 委員

- 主 査 土居修一（前筑波大学）
齋藤宏昭（前東京大学、現足利工業大学）
- 幹 事 宮村雅史（国土技術政策総合研究所、事務局併任）
- 書 記 大西祥史（NPO 法人湿式仕上げ技術センター）
- 委 員 石川廣三（東海大学）
西多 致（前東海大学）
近江戸征介（一般社団法人 全国中小建築工事業団体連合会）
中島光彦（一般社団法人 全国中小建築工事業団体連合会）
神戸睦史（NPO 法人 湿式仕上げ技術センター）
稲垣和宏（NPO 法人 湿式仕上げ技術センター）
大場喜和（NPO 法人 湿式仕上げ技術センター）
金澤光明（NPO 法人 住宅外装テクニカルセンター）
西田和生（国土技術政策総合研究所）

本文 目次

() 内：執筆者

1. 木材の水分と腐朽（土居）	1
1.1 木材の生物劣化	1
1.2 腐朽の必須条件	3
1.3 水分制御の重要性	4
1.3.1 木材腐朽菌胞子の発芽と湿度	4
1.3.2 木材上での菌の生長と湿度、含水率	5
2. 木材の素材耐朽性の評価（土居）	6
2.1 素材耐朽性と要因	6
2.2 抗菌性物質の材内分布	7
2.3 素材耐朽性の評価方法	8
3. 木材保存剤の効果と外皮構成部材への影響評価（土居）	9
3.1 木材保存剤の種類	9
3.2 木材保存剤の効果	11
3.3 木材保存剤の金属部材への影響	12
3.3.1 木材保存剤の鉄腐食性試験について	12
3.3.2 水切りの腐食事例	13
3.3.3 鋼板と保存処理木材との接触による腐食	15
3.4 木材保存剤の透湿防水シート類への影響	16
4. 水湿環境における木材および木質製品の含水と乾燥（土居、石川）	16
4.1 木材中の水分の状態	16
4.2 木材の吸水異方性および部分的に吸収された水分の乾燥	18
4.2.1 検討目的	18
4.2.2 木材の吸水異方性	18
4.3 木材木口から部分的に吸収された水分の乾燥	20
4.4 浸入雨水による軸組部材仕口部の湿潤性状の検討	23
4.4.1 検討目的	23

4.4.2	検討モデル	23
4.4.3	雨水浸透機構の検討	23
4.4.4	吸水量の計算例	25
4.4.5	まとめ	27
5.	水分履歴に応じた腐朽危険度予測手法（齋藤）	27
5.1	予測モデルの概要	28
5.2	防水層からの雨水浸入に対するモデル	28
5.3	多孔質材及び空間の熱物質移動モデル	29
5.4	木材腐朽進行モデル	30
6.	外皮の腐朽進行予測例（齋藤）	31
6.1	外皮下地材の腐朽進行予測例	31
6.1.1	劣化事例に対する腐朽度の調査	32
6.1.2	解析概要	33
6.1.3	浸水量と野地板含水率	33
6.1.4	腐朽速度と質量減少率の関係	34
6.2	雨がかり木部の腐朽進行予測例	34
6.2.1	解析概要	35
6.2.3	計算結果	37

1. 木材の水分と腐朽

1.1 木材の生物劣化

木材は、主として樹木の幹から製造され、仮道管など各種の細胞によって構成されている有機材料である。細胞壁の構成成分のうち、主成分はセルロース（グルコースの鎖状高分子）、ヘミセルロース（グルコース、マンノース、キシロース、アラビノースなどで構成される分枝がある鎖状高分子）及びリグニン（フェニルプロパンが基本骨格の網状高分子）である。コンクリートや鉄など、他の建築材料と同様にさまざまな要因によって劣化するが、他材料と際立って異なるのは、重要な劣化が生物劣化であるということである。

生物劣化には、腐朽、蟻害、カビ害等、細菌から昆虫まで多数種の生物が関与する様々な劣化形態がある（表 1.1.1）。

表 1.1.1 建築木部の生物劣化の種類と関与する主な生物

生物劣化の種類	劣化の原因生物
表面汚染	接合菌類、子囊菌類、(不完全菌類)
変色	子囊菌類、(不完全菌類)
腐朽	担子菌類 子囊菌類
虫害	乾材害虫類
蟻害	シロアリ類

表面汚染は、接合菌類や子囊菌類など（いわゆるカビ）によって生ずる木材表面の汚染で、木材自体に含まれる少量のアミノ酸、低分子糖類やデンプン、あるいは木材表面に付着した様々な塵や汚れの物質を養分として生育した胞子や菌糸自体の色、あるいは代謝産物などによって引き起こされる。クモノスカビ、クロコウジカビ、ペニシリウム、アスペルギルスなどが関与する。木材の強度的性質には影響を与えない。

変色も菌糸自体の色のほか、菌の生成した物質などによって引き起こされる。主にクワイカビなどの子囊菌によるもので、材表面だけでなく辺材全体が内部まで変色する。この場合も、養分として使われるのは材内部の低分子糖類、デンプンなどであり、強度的影響はない。

腐朽は、微生物の酵素などによって木材細胞壁の主成分が分解され、その結果木材の細胞壁構造が崩壊する現象である。そのため木材の強度的性質に多大な影響を及ぼす点で最も重視すべき生物劣化である。腐朽を起こす微生物は主として担子菌の一群である。担子菌は図 1.1.1 に示す生活環を持ち、菌糸の状態では木材を分解代謝して自らの養分として取り込む。その結果として木材が腐朽することになる。



図 1.1.1 木材腐朽菌の生活環（土居）

木材腐朽菌には、腐朽させた木材を褐色に変化させる褐色腐朽菌と白色に変化させる白色腐朽菌があり、それぞれによって腐朽した材を褐色腐朽材、白色腐朽材と呼ぶ（図1.1.2、1.1.3、土居原図）。褐色腐朽では、セルロースとヘミセルロースが分解され、リグニンはほとんど分解されないで残される。腐朽末期には、褐色に変化するだけでなく、木材の繊維方向に直交するひび割れが多数生じ、指ですりつぶすと容易に粉状に砕ける。一方、白色腐朽ではリグニンも分解され、腐朽材は白色を呈するが、褐色腐朽のような崩壊形態ではなく、繊維状に剥離するような形態になる。建築物でこれまでに主に認められたのは、褐色腐朽菌であるが、その原因は明らかではない。



図 1.1.2 褐色腐朽材



図 1.1.3 白色腐朽材

なお、欧州やアメリカなどでもこの傾向が強く、例えば北ドイツ地方で6年間に調査された610件の腐朽被害調査で、被害数10件以上の菌種比を調べた結果では褐色腐朽菌：白色腐朽菌＝14：3で、件数比でも褐色腐朽：白色腐朽＝492：118と褐色腐朽菌の比率が極めて高いことが示されている¹⁾。

なお、水中、土中など酸素の供給が制限される特殊な環境では、子囊菌類や不完全菌類（以上、いわゆるカビ類）あるいは細菌類が木材腐朽を生じさせることもあるが、これらは通常の使用下にある住宅木部ではほとんど生じない。

木材の虫害は、主として甲虫類による食害を意味する。生材（原木や製材した直後の含水率の高い材）を加害するカミキリムシ類、キクイムシ類、ナガキクイムシ類などと、乾燥材を加害するヒラタキクイムシ類、シバンムシ類などの乾材害虫に大別される。生材害虫による被害は、原木の時に産卵された製材が建築に使われた後に孵化することによって生ずるが、乾いた樹皮のない木材には産卵ができないので、建築後に木部から成虫が飛翔することはあるが、被害の拡大はない。これに対し、乾材害虫は、乾燥した木材に産卵が可能なので、一旦建築部材が被害を受けると、駆除が完全でなければその周辺で再発を繰り返す。

シロアリによる被害は地下シロアリによる被害とカンザイシロアリによる被害に大別される。前者は主としてヤマトシロアリとイエシロアリによる被害である。ヤマトシロアリは、水を運ぶ能力に乏しいため、これによる被害はしばしば腐朽するような条件のところで生ずるが、イエシロアリは水を運ぶ能力があるため、住宅上屋まで及ぶことがある。一般に、シロアリ防除対策はこれら2種の被害防止を目的としており、外来種であるアメリカカンザイシロアリや南西諸島のダイコクシロアリなどのカンザイシロアリは、防除対策の対象とはされておらず、被害発生の都度駆除することで対応している。

前述したように、カビ類による劣化の一つに変色があるが、この変色などと混同される変色に鉄汚染がある。鉄汚染は、下見板張りの外壁釘周りや建築中の床下地に付着した砂鉄などによる灰黒色の着色としてあらわれるが、しばしばカビによる汚染と混同される。これは鉄イオンと木材中のタンニンなどが反応して起こる現象であり、生物劣化ではないので被害防止やその除去方法など対策は異なる。腐朽のような強度低下は起こさない。

1.2 腐朽の必須条件

木造住宅で木材の腐朽を生ずる主役は担子菌類である。担子菌類は、好氣的条件で生育する微生物であり、必須条件は、空気（酸素）、水分、温度、養分である。

空気：他の生物同様に担子菌が生育するために必要不可欠ではあるが、この量が極端に少なくてもあるいは一時的に断たれても、死滅することはない。

水分：生命活動には水が必須である。木材中に液体の水が存在しなければ木材中で生育・腐朽を起こすことはできない。木材細胞壁実質が水で飽和すると、余剰の水は細胞の空隙に液体で存在するようになる。含水率にして30%（細胞壁が水で満たされた繊維飽和状

態) から 150%程度が適しており、空隙が全て水で飽和すると木材中の空気がほとんどなくなるので、腐朽は停止する。一旦木材中に侵入した菌は、全乾状態の木材中でも相当長期間生き残ることは可能であるが、生育することはできない。

温度：生育に適する温度は、菌種によって異なるが、おおよそ 20～30℃程度である。いくつかの建築物腐朽菌の適温範囲を表 1.2.1 に示す。50℃以上では、多くの菌が生育を停止あるいは死滅する。

表 1.2.1 建築物腐朽菌の生育温度

菌の区分	生育適温	菌種
好低温菌	20℃程度	イドタケ、ナミダタケ
好中温菌	25℃程度	イチョウタケ、チョークアナタケ、ワタグサレタケ
好高温菌	30℃程度	キカイガラタケ、オオウズラタケ

養分：木材そのものが養分である。他に、炭水化物を含む建築材料、例えば畳や段ボールなどの紙製品も養分として利用できる。褐色腐朽菌は、木材中の炭水化物（セルロース、ヘミセルロース）を分解代謝できるが、リグニンはほとんど分解できない。白色腐朽菌は、全ての成分を分解可能であるが、リグニン分解力には菌種によって差がみられる。

1.3 水分制御の重要性

木造住宅では、腐朽の必須条件のうち、温度、空気を制御することは困難なので水分と養分を制御することになる。養分は木材そのものであるから、木材を保存薬剤で処理して養分として利用できなくする、あるいは高耐朽性樹種を選択する。ただし、住宅の全木材を薬剤処理することや高耐朽性樹種にすることは現実的ではないので、基本的な戦略として水分を制御することが腐朽を防ぐために重要なこととなる。特に、外皮による雨水浸入の防止、適切な断熱と換気による壁内結露の防止などが具体的な制御法となるので、ここでは、相対湿度および木材含水率と菌糸生育及び環境湿度と孢子発芽との関係について、既往の文献をもとに考察する。

1.3.1 木材腐朽菌孢子の発芽と湿度

まず、木材腐朽菌の孢子を用いて、寒天培地上で行われた例を示す²⁾。

水本は、野外に放置してあったスギあるいはアカマツ丸太で発生した褐色腐朽菌コゲイロカイガラタケなどの子実体から採取した孢子を寒天培地上に播種し、27℃、60～95%の湿度下で48時間後の孢子発芽率を調べた。菌種によって発芽率の差はあるが、おおよそ80%以上で発芽し、相対湿度が上昇するにしたがって発芽率が大きくなることが明らかとなった(表 1.3.1)。因みに、27℃、80%の条件では木材の含水率がおおよそ16%で自由水が無い状態なので、少なくとも菌糸生長可能な含水率が27%であるとする後述の結果とは相当離れた値である。この実験は、孢子を表面の結露水を除去した寒天培地に播種して調べた結果であり、実際には培地中から水分の供給がある点を考慮しなければならないが、木材上での発芽を考える際に参考にす

ることができる。

表 1.3.1 カイガラタケ属 4 種の孢子発芽率 (%) に及ぼす相対湿度の影響

相対湿度(%)	コゲイロカイガラタケ	ヒロハノキカイガラタケ	キチリメンタケ	キカイガラタケ
95	67	70	64	73
92	59	66	58	64
81	32	45	41	46
77	0	12	15	20
68	0	0	0	0
60	0	0	0	0

木材の薄切片を作り、ここに木材腐朽菌 *Lenzites saepiaria* の孢子を散布してから所定の環境中で発芽させて発芽率を測定した場合、相対湿度 98.0%以上で 5 日間培養すれば発芽率が 100%になることが示されている³⁾。また、同じようにマツとモミジバフウの薄切片で、3 種類の木材腐朽菌孢子の発芽率を比べた結果では、樹種によって差はあるが、いずれも相対湿度 100%で 30℃、24 時間培養で発芽し、48 時間では木材細胞の壁厚や柔細胞に菌糸が侵入することが示されている⁴⁾。

いずれも、薄切片が平衡含水率になってから孢子を散布して行っている実験なので、この場合の木材含水率は、ほぼ繊維飽和点に近い。したがって、木材腐朽菌孢子の発芽に要求される木材の水分条件は、菌糸が木材中で生育する条件とほぼ同じで、繊維飽和点以上と考えてよい。ただし、菌糸が侵入した木材で行う実験では木材の腐朽に伴う水分の産生があるので、その分だけ多少低い含水率でも生育が可能になると思われる。

1.3.2 木材上での菌の生長と湿度、含水率

木材上での菌糸生長に及ぼす相対湿度の影響に関して行った実験⁵⁾でも、孢子の発芽と湿度との関係における結果と矛盾しない結果が示されている(表 1.3.2)。

健全なエゾマツ心材(試験片 B)を所定相対湿度下で十分調湿した後、あらかじめナミダタケ菌糸を材内部に侵入させ表面の菌糸を除去した材小片(試験片 A)とともに相対湿度を調整した同一チャンバー内に無菌的に挿入し、試験片 A と B を棒状のエゾマツ心材で架橋して 20℃で 90 日間培養、それぞれの材表面での菌糸生長と材片の質量減少率を測定した結果が表 2.3.2 である。この表では、それぞれの相対湿度下での試験片 A(上段)と試験片 B(下段)の質量減少率を示し、同時にそれぞれの試験片表面の菌糸生長程度を定性的(－:成長せず、+:成長、++:旺盛に成長)に示した。97.2%(試験片含水率にして約 26%)では、いずれの菌株でも菌糸が試験片表面で生育可能で、試験片 A で成長した菌糸が架橋されたエゾマツ心材を經由して試験片 B に到達し、ここでも成長して腐朽を生ぜしめたことが明らかである。この時の木材含水率は約 26%と考えられる。また、93.5%

(試験片含水率にして約 22%) では試験片 A での菌糸生長は可能であるが、質量減少率は小さく、試験片 B への生長も全く認められない。75.5%では試験片 A,B ともに菌糸は全く生長しておらず、試験片 A を水分の十分に含まれた寒天培地に置いても菌糸生長がなく死滅したと推定された。

菌糸生長に伴って産生する二酸化炭素や水分の影響については、ここでは考慮されていないが、実際の腐朽の進行を考える上では有益な知見である。

表 1.3.2 20℃下でのナミダタケ 3 菌株の菌糸生長とエゾマツ材の腐朽に及ぼす相対湿度の影響

相対湿度 (%)	試験片	菌株番号					
		HFP7802		HFP7806		HFP7901	
		菌糸生長	質量減少率	菌糸生長	質量減少率	菌糸生長	質量減少率
75.5	A	-	0	-	0	-	0
	B	-	0	-	0	-	0
93.5	A	+	2.5	+	3.4	+	4.9
	B	-	0	-	0	-	0
97.2	A	++	32.5	++	22.0	++	19.1
	B	++	4.9	++	5.6	++	8.8

鈴木ら⁶⁾は、木材に水を与えて恒温室内で長期間保管した時の腐朽の発生を調べる実験を行った。ベイマツおよびベイツガ辺材の小試験体に水を含浸させて、含水率の異なる状態とした後プラスチックケースなどに入れ、30℃、95%RHの恒温室内に設置し、所定期間毎に取り出して、材表面に生育したカビあるいは腐朽菌と思われる菌糸の有無について調査し、同時に試験体の縦圧縮強度を測定して腐朽の有無を調査した。その結果、腐朽の発生は含水率 30%以上が 18 週以上維持された試験体であることを示した。

この試験では、試験材調製と含水率調整の過程で腐朽菌などが付着していた可能性はあるが、試験体をプラスチックケースなどに挿入した後は、外気からの孢子の入る余地がなかったと考えられる。腐朽菌の孢子は外気中を漂っていて、これが試験体に付着後、その水分を利用して発芽すると考えられるから、この場合の孢子付着量は限定的であったと思われるので、これが腐朽の遅れとなって表れた原因であるかもしれない。今後、外気中の孢子の付着を想定した実験系で検討される必要がある。

2. 木材の素材耐朽性の評価

2.1 素材耐朽性と要因

木材が腐朽する時、温度、水分および空気の条件が満たされても、養分である木材が腐朽菌による分解作用を受けにくい場合がある。この理由は、主として木材中の微量成分（抽出成分）のうち、抗菌性成分に依存していることが多い。抗菌性成分として明らかにされている成分を表 2.1.1⁷⁾ に示す。これらの物質は心材中に存在しており辺材にはほとんど存在しないため、いずれの樹種でも辺材の耐朽性は小さい。なお、耐朽性と耐蟻性は、しばしば連動していると思われるが、必ずしも同じ樹種で耐朽性と耐蟻性が同じ強度で発揮されるとは限ら

ず、例えばヒノキ、やクリの心材の耐朽性は大であるが、耐蟻性はそれぞれ中及び小に分類される（表 2.1.2、2.1.3）⁸⁾。

表 2.1.1 木材中の抗菌性成分の例

類別	化合物	含有材
フェノール類	<i>p</i> -メトキシチモール	ヒバ類
キノン類	チモキノン テクトキノン	ヒノキ科など チーク材
スチルベン類	ピノシルビン	マツ属
テルペン類	α -カジノール T-ムロロール α -ツヤプリシン β -ツヤプリシン γ -ツヤプリシン	ヒノキ ヒノキ 台湾ヒノキ、ベイスギ、ヒバ 台湾ヒノキ、ベイスギ、ヒバ ベイスギ
フラボン類	タキシホリン	ベイマツ、カラマツ

表 2.1.2 主な樹種の耐朽性比較

耐朽性	樹種
大	ヒノキ、ヒバ、クリ、ケヤキ、ベイヒ、ベイスギ
中	スギ、カラマツ、トガサワラ、ナラ、ベイマツ
小	アカマツ、エゾマツ、モミ、ベイツガ、スプルス

表 2.1.3 主な樹種の耐蟻性比較

耐朽性	樹種
大	ヒバ、クルイン、コウヤマキ、ボンゴシ
中	ヒノキ、スギ、カラマツ、ベイヒ、ケヤキ
小	アカマツ、エゾマツ、クリ、ベイスギ、ベイツガ

2.2 抗菌性物質の材内分布

前項で述べたように、抗菌性物質は主に心材に蓄積されている。ただし、心材内の分布は不均一であり、一般に辺材に近い心材部で多く、樹芯に近づくにつれて少なくなる。また、同一材でも、元口側と末口側（製材で、樹木の根元に近い一端を元口、梢に近い一端を末口という）など上下位置によっても異なる。例えば、笹谷⁹⁾は、カラマツ材中のタキシホリンの半径方向の分布を調査し、辺材に近い心材部で含有量が最大で、髄に向かって減少していき、髄付

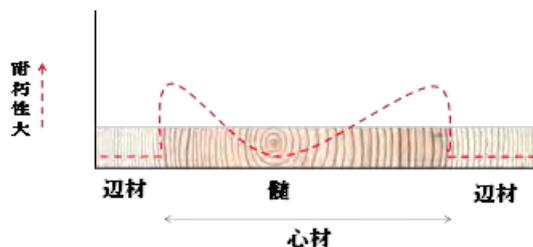


図 2.2.1 木材の半径方向における耐朽性の分布に関する模式図(土居)

近では辺材と大差ないこと、また、樹高方向の分布では、胸高付近から上に行くにしたがって少なくなることを示している。

以上のようなことから、心材の耐朽性は、樹芯近くなると辺材と同様に小さくなる（図 2.1.1）。同一樹種でも、樹齢その他の影響で原木毎に抗菌性物質の蓄積量が異なることが知られている。したがって、素材耐朽性は、同一樹種でも個体差があり、同一個体内でも部位によって異なると考えるべきである。

2.3 素材耐朽性の評価方法

素材耐朽性は、室内試験と野外試験で評価される。室内における試験法としては、JISZ2101の規定があり、スギ辺材の腐朽速度を対照とする比較耐朽性という概念で、次式により整理され、耐朽比で表される。

$$R_v = \frac{100 - \Delta m_{sc}}{100 - \Delta m_{Td}}$$

ここに、 R_v ：耐朽比

Δm_{sc} ：試験対象とした木材試験体の腐朽による質量減少率（%）

Δm_{Td} ：対照材（スギあるいはブナ辺材）の腐朽による質量減少率（%）

である。

なお、 Δm_{sc} 、 Δm_{Td} ともに、補正された値である（腐朽操作は、培地上で純粋培養した腐朽菌の菌叢上に木材片を置いて腐朽させる方法なので、菌叢の生えていない培地上に木材片を置いて培地成分や培地水分の影響を補正する）。なお、この試験法で求められるのは、針葉樹材の場合はオオウズラタケに対する、広葉樹材の場合はカワラタケに対する耐朽性である。

野外試験の方法として最も多く行われるのは杭試験である。評価対象とする樹種の辺材あるいは心材で所定寸法（例えば $30 \times 30 \times 600\text{mm}$ ）の杭を調整し、これを地中に長さ方向で半分ほど埋設、その頭頂部、地際部、下端部の劣化状況を所定期間毎に観察し、以下の基準にしたがって判定する。

- 0：健全
- 1：部分的に軽度の腐朽又は蟻害
- 2：全面的に軽度の腐朽又は蟻害
- 3：2の状態の上に部分的に激しい腐朽
- 4：全面的に激しい腐朽又は蟻害
- 5：腐朽又は蟻害によって形が崩れる

通常 5～10 本の繰り返しで試験を行い、判定結果の平均値を求め、その値が 2.5 になった時点

をその樹種の耐用年数とする。この試験法では、土壌微生物をはじめとする野外の様々な微生物が同時に又は遷移的に木材を攻撃するだけでなく、紫外線、雨水など多くの化学的・物理的劣化も生ずるので、必ずしも住宅木部の劣化を直接予測するデータが得られるわけではないが、極めて厳しい使用条件下の耐朽性を推定する上では有用である。

以上は、わが国で通常行われている素材耐朽性の評価方法であるが、海外では、これらと同様な評価法の他に、野外試験法が数多く考案され、使われている。屋外の非接地木材に雨水が滞留しやすい箇所を想定した方法、開口部の窓枠などに浸水した場合の耐朽性評価法などである。詳しくは、関連資料2を参照されたい。

3. 木材保存剤の効果と外皮構成部材への影響評価

3.1 木材保存剤の種類

ここで扱う木材保存剤は、防腐および防蟻性能を併せ持つ製剤で、表面処理用と加圧処理用に大別される。

表面処理用の木材保存剤には、油性、油溶性、水希釈系（乳化性剤、可溶化剤など）の製剤がある。油性保存剤は、油状の成分そのものが効力を発揮する製剤であり、クレオソート油が該当する。油溶性保存剤は、有機溶剤に有効成分を溶解した製剤である。水希釈系の保存剤には、乳化性製剤（水に不溶の有効成分を界面活性剤などと混合して水に乳化できるようにした製剤）、あるいは同様の方法で製剤化し乳化させずに可溶化した製剤などが該当する。油性保存剤以外は、表3.1.1、表3.1.2に示す防腐及び防蟻成分を適宜組み合わせる製剤化されている。最近では、有機溶剤を減らす方向にあり、水希釈系の製剤が多くなりつつある。水希釈系保存剤で住宅木部を処理する場合、繊維板やOSBなどのように構成要素の小さい木質材料は吸水によって狂いや膨潤などの欠点を引き起こす恐れもあるので、これらの保存剤で処理するにはあらかじめ試用して、欠点の発生が生じる場合には油溶性保存剤を使用するなどの対応が必要になる。

表 3.1.1 表面処理用木材保存剤中の主な防腐成分

系	一般名あるいは化学名（略称）
トリアゾール系	シプロコナゾール プロピコナゾール テブコナゾール ヘキサコナゾール
有機ヨウ素系	3-ヨード-2-プロピニルブチルカーバメート（IPBC） 4-クロロフェニル-3-ヨードプロパギルホルマール（CPIPF） 3-ブロモ-2,3-ジヨード-2-プロペニルエチルカルボネート（EBIP）
カルボン酸金属塩系	ナフテン酸銅、ナフテン酸亜鉛、バーサティック酸亜鉛
タール系	クレオソート油

表 3.1.2 表面処理用木材保存剤中の主な防蟻成分

系	一般名あるいは化学名
カーバメート系	フェノブカルブ
ピレスロイド系	ペルメトリン ビフェントリン シフェノトリン
非エステルピレスロイド系	エトフェンプロックス シラフルオフェン
ネオニコチノイド系	イミダクロプリド ジノテフラン クロチアニジン チアメトキサム
フェニルピラゾール系	フィプロニル
フェニルピロール系	クロルフェナピル
オキサシアジン系	インドキサカルブ
天然物	ピレトリン

加圧処理用の木材保存剤は、水溶性、乳化性、油溶性、油性に区分される。その区分と系及び有効成分を表 3.1.3 に示す。これらの成分は JISK1570 に規定されており、製材の日本農林規格（JAS）に定められた K2 から K5 の防腐・防蟻処理材を製造する際には、これらのうちいずれかを用いることとされている。評価方法基準で劣化対策等級 3 に該当する住宅、あるいは金融支援機構フラット 35 を適用する住宅を建築する場合などに用いる土台は、K3 相当以上（北海道及び青森県にあつては K2 相当以上）の処理が要求される。これらの保存剤を用いて JAS に定められた所定の浸潤長及び吸収量に適合した土台が用いられる。

表 3.1.3 加圧処理用木材保存剤の防腐・防蟻成分

区 分	系別とその防腐・防蟻成分
水溶性木材保存剤	第四級アンモニウム化合物系 ジデシルジメチルアンモニウムクロリド N,N-ジデシル-N-メチルポリオキシエチルアンモニウムプロピオネート
	銅・第四級アンモニウム化合物系 銅化合物＋ ：N-アルキルベンジルジメチルアンモニウムクロリド ：ジデシルジメチルアンモニウムクロリド
	銅・アゾール化合物 銅化合物＋ ：ホウ素化合物＋テブコナゾール ：シプロコナゾール ：シプロコナゾール＋助剤（リグノスルホン酸塩）
	ホウ素・第四級アンモニウム化合物系 ホウ素化合物＋ジデシルジメチルアンモニウムクロリド
	第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系 N,N-ジデシル-N-メチルポリオキシエチルアンモニウムプロピオネート
	アゾール・第四級アンモニウム・非エステルピレスロイド化合物系 N,N-ジデシル-N-メチルポリオキシエチルアンモニウムプロピオネート シプロコナゾール
	脂脂肪酸金属塩系 ナフテン酸銅 ナフテン酸亜鉛 バーサチック酸亜鉛
油溶性木材保存剤	ナフテン酸金属塩系 ナフテン酸銅 ナフテン酸亜鉛
	アゾール・ネオニコチノイド化合物系 シプロコナゾール
油性木材保存剤	クレオソート油

プレカットされた製材は、水溶性あるいは乳化性保存剤で処理すると、膨潤や収縮などによって寸法が狂うなどの不具合が生ずることがある。こうしたことを防ぐため、インサイジングを行った後、木材への浸潤能力の高い溶剤で製剤化された油溶性木材保存剤を吹き付けて養生し、加圧注入と同程度の保存剤の浸潤と吸収量を得ることができる深浸潤処理という方法も採用される。また、集成材、合板などの再構成木質材料の加圧注入は、構成要素であるラミナや単板の段階で行う場合と製品となった後に行う場合があるが、いずれの場合も接着力や木材保存性能に悪影響が出ない組み合わせが選択される。これらは、製材の JAS ではなく、(公財) 住宅木材技術センターの AQ 認証制度の規定に従って認証され、JAS の製品と同等の性能があるものとして扱われる。

3.2 木材保存剤の効果

木材保存剤の効果は、実際に木材に担持された状態で評価される。JISK1571-2010 では、ス

ギ辺材の試験片に供試する薬剤を注入あるいは塗布してから、耐候操作（薬剤の雨水などによる溶脱や熱による変質・分解などを想定した虐待試験）後に腐朽菌及びイエシロアリに所定期間暴露して、腐朽やシロアリ食害による質量減少率が3%以下であれば木材保存剤としての保存性能を満たすと判断する。加圧注入用の薬剤については、2年間にわたる保存処理材の床下を模した（非接地・被覆）野外暴露試験でシロアリに対する効果や杭試験で防腐効力を試験することになっている。

上記の腐朽菌に対する試験では、オオウズラタケとカワラタケという2種類の腐朽菌に対する効果だけを確認すればよいことになっている。実際には多種類の腐朽菌が攻撃してくるので、他種の腐朽菌に対する性能もこれらの菌の試験結果で推定できるのかは明確ではない。酒井¹⁰⁾は、自然界で木材を腐朽させていたイドタケ、キカイガラタケ、ワタグサレタケ、コゲイロカイガラタケ、チョークアナタケなど数種の木材腐朽菌を使って木材保存剤4種

（BAAC, AZN, CUAZ, AAC）で同様の試験を実施し、いずれの保存剤もいずれの菌株に対してもオオウズラタケやカワラタケで行った結果と同様の効果を示すことを明らかにした。

これらの試験は、木材に保存剤を担持した場合の、防腐・防蟻性能を明らかにする目的で行っているため、保存剤の殺菌力や殺蟻力の有無を要求していない。したがって、腐朽した木部に存在する菌を殺して腐朽の拡大を阻止したり、シロアリの殲滅して蟻害の拡大を防止するための性能は、試験法も含めて検討されねばならない。既存の木材保存剤の防腐・防蟻成分に、これらの性能を併せ持つものがあることは、これらの成分を含有した寒天培地上での腐朽菌生育試験や蟻害現場での薬剤処理などで経験的に確認されている。

3.3 木材保存剤の金属部材への影響

3.3.1 木材保存剤の鉄腐食性試験について

木材保存剤は、保存性能を一義的に考慮して作られているが、処理された木材が建築・土木等に使われるとき、釘などの金属を腐食させる恐れがある。そのため、JISK1571-2010では、以下のような試験法が採用され、金属腐食性の基準を定めている。

試験しようとする木材保存剤で加圧注入処理したスギ辺材に脱脂したN釘（鉄丸釘）を打ち込み、100%RH下で所定期間暴露後、引き抜いた鉄釘の錆発生に伴う質量減少を測定、無処理のスギ辺材で行った同様の釘のそれと比較して、その減少率が無処理材の2倍（無処理での質量減少率2%以下）までであれば、保存剤として許容される。表面処理用保存剤の場合は、表面処理した試験片の間に鉄釘を挟み込み、同様に試験する方法を採用している。

この基準で試験に使われる鉄丸釘は、JISA5508に規定するN38の鉄丸釘で直径は約2mmであり、主に釘・ビス・接合部材等で使われている厚物の鉄製品の耐腐食性を想定したものと考えられる。このような厚物の鉄では、表面処理されためっき層の厚みに対して芯材の厚みが大きいいため、質量減少を基準とした試験で評価することは妥当であると考えられる。

しかしながら、いずれの試験でも、鉄釘と処理木材だけを使って試験をしているので、実際の

保存処理材と金属部材の関係とは異なっている。例えば、外壁に設置する水切りなどは亜鉛アルミ合金メッキ鋼板などであり、これを釘で土台などに留めつけるということになる。この状態では、鉄、アルミニウム、亜鉛そして木材保存剤中の銅が関与するので、腐食速度が異なってくるのが予想される。

3.3.2 水切りの腐食事例

住宅木部のうち、土台や外皮に近い軸組などには木材保存剤で処理された木材が使われる。このような部材が使われている近傍で金属製品として土台水切りが使われるが、これらが保存処理材と接触することがあり、これが原因となって金属腐食が発生することがある。ここでは、これらの腐食事例を示す。写真3.3.1は、木造住宅の通気胴縁に接触した水切りが錆びた事例である。当初は原因が特定できず、錆を除去後、再塗装を施したが、再び錆を生じたので内部を詳細に調査した。その結果、通気胴縁が銅イオンを含む木材保存剤で処理されており、この胴縁と水切りが接触した状態で、サイディング継ぎ目部分のシール施工が不完全のため雨水が浸入し、電食が起きたと推定された。

写真3.3.2の例も写真3.3.1と同じ箇所で水切りが錆びていたが、劣化原因は結露であると推定された事例である。写真3.3.3のようにサイディングをはがして通気層を観察した結果、上端がバックアップ材で阻害されていた。



写真3.3.1 漏水による土台水切りの腐食例



写真3.3.2 結露による土台水切りの腐食例 写真3.3.3 通気層上端の状態

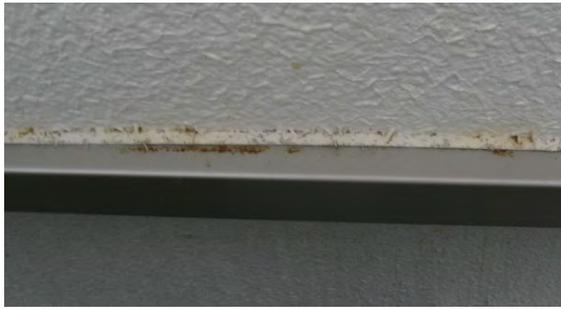


写真 3.3.4 モルタル外壁土台水切りの腐食
モルタルと水切りの間のシーリング
付近で発生した赤錆

写真 3.3.5 モルタル下部を剥離した状態

通常、この部位は金属製の片ハットジョイナーで施工することになっているが、一部メーカーでは、剛性のあるバックアップ材を使うことを認めている場合があり、本例ではバックアップ材が胴縁間の通気層に詰め込まれるような形で施工され、これが通気阻害を起こして結露を発生、錆を生じたと推定された。胴縁は写真 3.3.1 の場合と同様に銅系木材保存剤で処理されていた。

写真 3.3.4 は、新築後約 2 年で土台水切りが腐食した事例である。土台水切りとモルタルの間のシーリング付近で赤錆が見られる。新築後約 1 年で赤錆が発生したので、モルタルを少し削った後モルタルと水切りの取り合いをシーリング材で塞ぎ、土台水切りを再塗装した。その 1 年後に再び赤錆が発生した。そこで、調査のためモルタルを除去した（写真 3.3.5）。通常、モルタルは経年により収縮するので、水切りとモルタルの取り合い部から壁中の水分が一定量抜ける事が期待できるが、この事例ではその隙間を閉じてしまったため、壁中の水分が滞留して腐食を促進した可能性がある。モルタルによるアルカリ劣化の他、鉄釘のもらい錆が推定された。下地板を分析した結果、硫黄および塩素の含有量が高かったため、この影響も考えられる。硫黄や塩素は、製材の流通過程で使われた防カビ剤などに起因していた可能性がある*。

写真 3.3.6 は、水切りの腐食部分の拡大写真である。釘孔が 2 つ開いているが、左はステンレス釘、右が鉄釘による釘孔である。鉄釘は、鉄釘自身が錆びるため、ガルバリウム鋼板の芯材の鋼板がめっき層を貫通した鉄釘から直接もらい錆をして腐食したと考えられる証左である。



写真 3.3.6 腐食した水切りの釘孔周辺の状況
左の孔：ステンレス釘孔
右の孔：鉄釘孔

防腐・防蟻を目的に使われる木材保存剤以外に、木材の流通過程で使われる薬品に木材防カビ剤がある。これは、原木（丸太）から製材される板材や角材が乾燥するまで、木材含水率が高い間に材表面がカビ汚染の被害を受けないようにするための薬剤である。表面が乾燥すればカビが生えることを防ぐことができるため、木材保存剤のように長期の効力は期待されていない。しかしながら、ヨウ素やイオウなどを分子内に含む有効成分を含むため、建築時に残存していれば、これらの影響も受けることが予想される。

3.3.3 鋼板と保存処理木材との接触による腐食¹¹⁾

金属の腐食が、保存処理材との接触で促進されることを確認するために行った実験結果について述べる。

鋼板試料（0.35×70×150mm）として JISG3322 に規定されている塗装溶融 55%アルミニウム-亜鉛合金めっき鋼板（以下 GL カラー鋼板）及び JISG3320 に規定されている SUS304 の塗装ステンレス鋼板（以下ステンレス鋼板）を用いた。これらを鉄あるいはステンレス釘 1 本で裏面あるいは表面が摂食するように保存剤処理されたスギ材あるいは無処理のスギ材（15×50×200mm）にうちつけて試験体とした。供試した木材保存剤は、JISK1570 に定められた BAAC（ホウ素・アルキルアンモニウム）系と CUAZ（銅・アゾール）系である。GL カラー鋼板では曲げ加工が腐食に及ぼす影響を見るため、ハゼ内寸 0.5mm で 90 度及び 180 度曲げ加工を行った試験体も作成した。GL カラー鋼板と木材との絶縁の効果を確認するための試験体では、防水両面テープ（粘着剤：ブチルゴム系粘着剤、基材：綿布）を鋼板と木材の間に挟んで釘打ちした。促進劣化試験として JISH8502-99, JASOM609-91 による複合サイクル試験（5%塩水噴霧-35°C2 時間乾燥-60°C4 時間湿潤-50°C2 時間乾燥を 1 サイクルとする）を行って、各鋼板の腐食程度を目視観察した。その例を写真 3.3.7 に示す。

促進試験180サイクル後、GLカラー鋼板で接触面裏面・絶縁がない場合は、釘の種類に関わりなくCUAZ系処理材との組み合わせで大半が著しい腐食を生じた。一方、他の組み合わせでは、180サイクル後でもほとんど腐食が生じないことが明らかとなった。



無処理材

BAAC 系処理材

CUAZ 系処理材

写真 3.3.7 促進劣化試験 60 サイクル後の無処理及び保存剤処理材と接触させた GL カラー鋼板における腐食の例

(社)日本鉄鋼連盟薄板計量形構造技術小委員会が、ACQ(銅アルキルアンモニウム)系、AAC(アルキルアンモニウム)系、CUAZ系、NCU(ナフテン酸銅)系、及びAZP(シプロコナゾールプロペタンフォス)系で処理したベイツガ材と溶融亜鉛めっき鋼板、溶融亜鉛5%アルミニウムめっき鋼板及び溶融55%アルミニウム亜鉛めっき鋼板を接触させて上記同様の促進劣化試験を行い、いずれの鋼板も銅を含む木材保存剤によって腐食されることを明らかにしている¹²⁾。上記の結果は、この報告とよく一致する。

3.4 木材保存剤の透湿防水シート類への影響

木材保存剤で処理した通気胴縁などが、透湿防水シートの防水性を低下させる場合があることが報告されている。日本透湿防水シート協会のHP¹³⁾では、防蟻・防腐剤による透湿防水シートへの影響について「従来は、防蟻・防腐剤が十分に揮発した構造材を使用する限り、透湿防水シートへの影響はほとんど無いものと考えられておりましたが、昨今、構造材のみならず通気胴縁に対しても防蟻・防腐処理されるケースが増加しており、雨水に晒され溶け出した防蟻・防腐剤が透湿防水シートの防水性を低下させるリスクが高まってきております。防蟻・防腐処理されている胴縁を使用する場合、施工中雨水で濡らさぬよう、胴縁施工後は外装材を速やかに施工するなど、十分にご注意頂きたく、お願い申し上げます。」と注意喚起を行っている。このことは、加圧注入処理木材を製造している企業の団体、防腐工業組合によっても認識されている。

この現象は、処理木材に含まれている陽イオン界面活性剤でもあるアルキルアンモニウム化合物自体が界面活性作用を持つことに起因しているものと考えられる。現場処理用の油性木材保存剤の場合でも有機溶媒によって、乳化型のそれらでは含まれる界面活性剤によって防水性への影響が出るのが懸念される。

通気胴縁については、住宅金融支援機構の木造住宅工事仕様書で、乾燥材か保存処理材を使うことが定められている。建築基準法施行令などの基準から考えると、構造上重要な部材ではない胴縁に保存処理を施す必要はないが、通気層は浸入した雨水や発生した結露水を流下させて壁外に排出するために設けられた。したがって、通気層内部が濡れることが想定されるため、このような規定になったと考えられる。胴縁が腐朽して菌糸が生長した場合、間柱に釘で固定された箇所などでは、菌糸が釘孔周辺から侵入し、内部の軸組を腐朽させる恐れがあるので、こうした措置をとることは合理的である。胴縁の保存剤処理が避けられないとすれば、界面活性剤や有機溶媒など成分面での影響の少ない木材保存剤の製剤化や適切な施工法が望まれる。

4. 水湿環境における木材および木質製品の含水と乾燥

4.1 木材中の水分の状態

木材は、生きていた樹木の細胞壁によって構成されているので、製材直後には伐倒される前

に樹木中に存在していた水がそのまま残されている。この時の含水率を生材含水率という。一般に辺材の含水率は心材のそれより高いが、広葉樹の一部についてはこの逆が観察されている（表 4.1.1）¹²⁾。また、スギやトドマツでは多湿心材が存在することが知られているが、その理由は明らかではない。

表 4.1.1 日本産主要樹種の生材含水率 (%)

樹種	辺材	心材	樹種	辺材	心材
スギ	130	53	ブナ	89	96
アカマツ	143	36	アカガシ	58	102
ヒノキ	203	43	ミズナラ	86	86
トドマツ	175	59	ケヤキ	87	78
エゾマツ	197	51	ヤチダモ	51	83

木材中に存在する水のうち、細胞内腔や細胞間隙などの空隙に含まれていて流動しうる液体状態の水は自由水と定義される。また、細胞壁中のセルロース非晶領域やヘミセルロースの水酸基に水素結合している水は結合水と呼ばれる。



- 全乾状態：細胞壁・細胞内腔及び空隙に水分を全く含まない状態
- 気乾状態：細胞壁に結合水が存在するが飽和していない状態
- 繊維飽和状態：細胞壁に結合水が飽和した状態
- 腐朽可能状態：細胞壁が結合水で飽和しており、細胞内腔・空隙に自由水が存在するが飽和していない状態
- 飽水状態：細胞壁及び細胞内腔・空隙が全て水で飽和した状態

図 4.1.1 木材中に存在する水の状態

図 4.1.1 に、木材中の水分の状態を模式的に示す。仮に完全に乾燥した全乾状態の木材を建築に用いると、木材中の水分はその環境中の相対湿度に依存して、大気中の水分が徐々に細胞壁に吸着され、相対湿度に見合った含水率状態へとどまる。これが気乾状態であり、この時に大気の相対湿度と含水率が平衡状態で保持されると平衡含水率になったという。平衡含水率は温度によって異なるが、常温で相対湿度が 100% になった時の平衡含水率は、およそ 30% であって、この時には細胞壁内に結合水が飽和し、繊維飽和状態となる。この状態を過ぎてさらに水

分が供給される、つまり吸水が起こると細胞内腔や間隙に自由水が存在する状態となる。こうした状態になった時に木材腐朽菌はこの自由水を利用して生育をはじめ、木材を分解・代謝する。

なお、木材の含水率 U は乾量基準で下式のように表す。

$$U = (W_1 - W_0) / W_0 \times 100 (\%)$$

ここに、

W_0 : 全乾状態の木材の質量

W_1 : 測定時の水を含む木材の質量

である。

4.2 木材の吸水異方性および部分的に吸収された水分の乾燥

4.2.1 検討目的

浸入雨水等に起因する軸組部材の腐朽が仕口部分や金物等の貫通個所に集中することはよく知られている。このことは浸入雨水で濡れた仕口や貫通物近傍の木部が他の部分より長期間湿潤しやすいためと考えられる。これらの部分には木口面が存在し、木口面の吸水性状と木口から内部に吸収された水分の乾燥性状が長期湿潤化の要因と考えられるが、その詳細は十分明らかにされていない。ここでは、木材の吸水異方性および内部水分の乾燥に関する既往の知見に基づいて、浸入雨水による軸組木材の局部的湿潤機構について考察する

4.2.2 木材の吸水異方性

木材組織の配向性に基づく吸水方向による吸水速度の差については古くから研究の対象とされ、1926年（大正15年）発行の林学会雑誌に田中¹⁵⁾の論説「木材の断面方向と吸水率の関係」が掲載されている。24種の樹種について60日間の吸水率の計測結果から、全ての樹種で木口面の吸水率が柁目面、板目面に比べて最大であり、各面からの吸水速度比は樹種によって異なると報告している。

蕪木ら¹⁶⁾は、針葉樹13種、広葉樹9種について、24時間吸水後の吸水面積あたり吸水量の計測結果から、柁目面、板目面吸水量に対する木口面吸水量の比が3.5~17.7（平均値心材7.0、辺材9.0）板目面吸水量に対する柁目面吸水量の比が0.67~1.47（平均値心材1.00、辺材1.07）であったと報告している。各面の24時間吸水量（g/cm²）の最大値は、木口面でアカマツ辺材0.948、板目面でアカマツ辺材の0.142、柁目面でイヌマキの0.087である。

齋藤¹⁷⁾は防腐処理の基礎研究としてヒノキ、スギ、マツ、カシの4樹種について、木口面を除く4面から10日間吸水させ、吸水前の含水状態が気乾、絶乾、湿潤の場合について比較した。気乾状態の試料の10日後の吸水率{(吸水量/吸水後質量)×100(%)}はヒノキ51.5、スギ43.3、マツ38.8、カシ32.3であり、また、含水状態による差より水温による差が大きいと報告している。また、インク水による着色で確認した吸水範囲はカシで0.1mm、スギで最大15mm、最小0.5mmであった。

石川¹⁸⁾はベイマツ材（無節、全乾密度：460kg/m³、試験時含水率5.3%）の二方桁材（105×105×100mm）の木口面、桁目面、板目面を吸水面とし、吸水面を除く他の面にシーリング材を塗布した状態で312時間までの一面吸水試験を行った。図4.2.1に示すように、吸水面積あたりの吸水量がおおむね吸水時間の平方根に比例しており、これから次式におけるaを吸水速度係数として値を求めた。

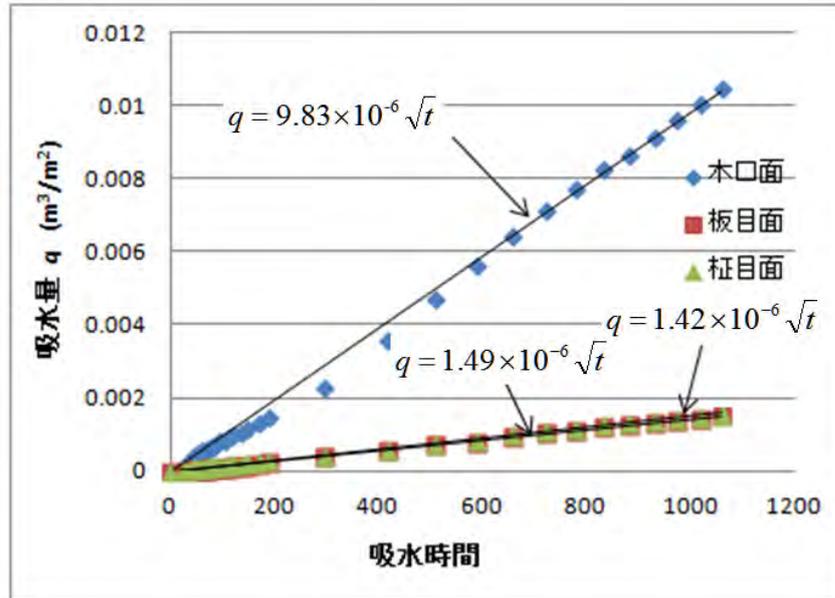


図 4.2.1 ベイマツ材の吸水速度試験結果（石川）

$$q = a\sqrt{t}$$

ここで q : 吸水面積あたり吸水量 (m³/m²)

t : 吸水時間 (s)

a : 吸水速度係数 (m³/m²・s^{1/2})

吸水面毎に2体について得られたaの平均値は、木口面 9.83×10^{-6} 、板目面 1.42×10^{-6} 、桁目面 1.49×10^{-6} であった。

板目面、桁目面に対する木口面の吸水速度係数比は6.7～6.8で、蕪木らの実験の板目面、桁目面に対する木口面の吸水量比の範囲に含まれている。

Candanedoら¹⁹⁾はJack Pine材の40×40×50mm角材の吸水面と反対面を除く4面をシールした試料を用い、800時間まで一面吸水試験を行って、結果について石川と同様の整理を行った。吸水面積あたりの吸水量と吸水時間の平方根の間には高い相関が認められ、直線回帰式における係数A (Water Absorption Coefficient, 単位: kg/m²・s^{1/2})の値として以下を示している。

木口面 (10 体) : 0.10～0.016、平均 0.012

追桁面 (1 体) 0.0047

桁目面 (1 体) 0.0019

板目面 (2 体) 0.0027～0.0029、平均 0.028

単位を ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) に直すと、木口面平均値は 12×10^{-6} 、柁目面は 1.9×10^{-6} 、板目面平均値は 2.8×10^{-6} であり、石川のベイマツ材の値より全体に幾分大きい。また、板目面、柁目面に対する木口面の吸水速度係数比は 4.3 および 6.8 であり、同様に蕪木らの実験の板目面、柁目面に対する木口面の吸水量比の範囲に含まれている。

4.3 木材木口から部分的に吸収された水分の乾燥

木材中の水分の乾燥機構については、生材の乾燥処理、あるいは調湿機能の評価等に関連して多くの研究が行われているが^{20), 21)}、軸組部材の仕口近傍で想定されるような局部的に吸収された水分の乾燥過程を扱った研究例は稀である。

石川¹⁸⁾ は、ベイマツ材（無節、全乾密度： $460\text{kg}/\text{m}^3$ 、試験時含水率 7.6%）の二方柁材ブロック（ $105 \times 105 \times 100\text{mm}$ 、一部は長さ 200, 300mm）の一方の木口面から、質量が 50g 増加するまで継続的に吸水させた。吸水に要した時間は約 70 時間である。次に特定の 1 面、2 面、4 面のみを乾燥面として、残りの面（吸水面を含む）にシーリング材を塗布し、これらを 20°C 、75%R.H.の恒温恒湿槽内に最大 384 時間放置して、経過時毎に質量とブロック内各位置の含水率を測定した。ブロック内部の含水率は、吸水を行わせた後に吸水面から 17, 39, 61, 83mm の高さにブロックの中央まで達する測定孔（直径 4.5mm）を 4 列ずつ穿孔し、直流抵抗型含水率計の針を挿入して 3 個所で測定している。

図 4.3.1 は、吸水面とした木口面 1 面を乾燥面とした場合と、柁目面、板目面それぞれ 1 面を乾燥面とした場合の経時的質量減少を示しており、部分的に吸収された水分の乾燥は同一面から乾燥する条件に比べて、柁目、板目面から乾燥する条件では著しく遅く、また、乾燥速度に関して木口面の上下の向き、柁目面と板目面の差は少ないことが分かる。

また、図 4.3.2 によれば、木口面以外の面からの乾燥速度は乾燥可能な面の数に応じて若干大きく、垂直部材と水平部材の乾燥速度の差は小さいことが分かる。

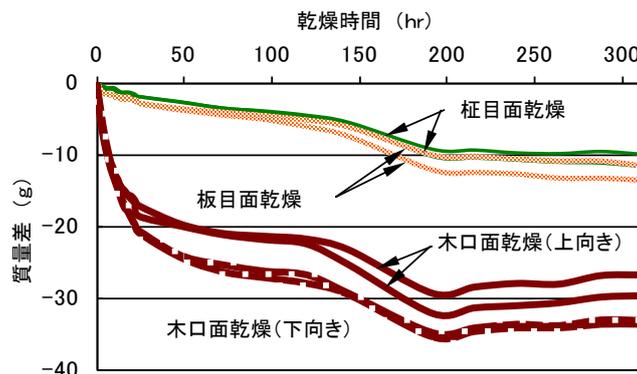


図 4.3.1 木口面から部分的に吸収された水分の乾燥面による乾燥速度の差¹⁸⁾

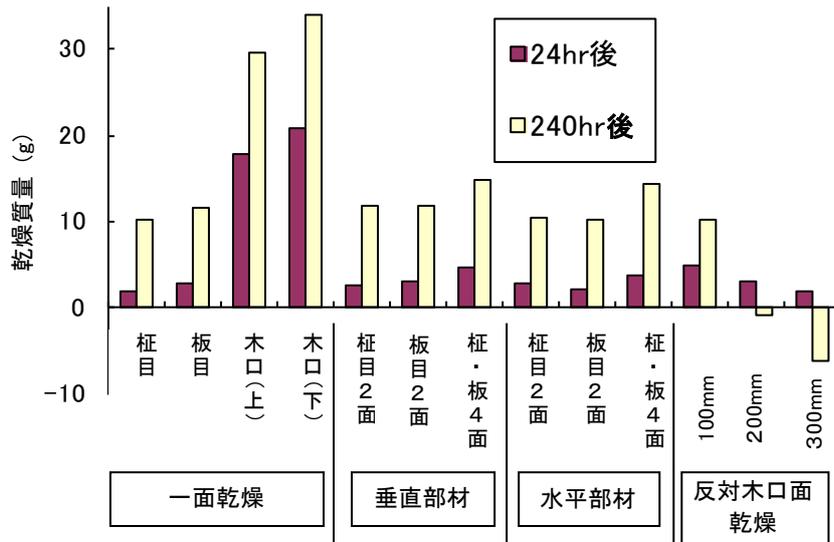


図 4.3.2 木口面から部分的に吸収された水分の乾燥条件による乾燥質量の差¹⁸⁾

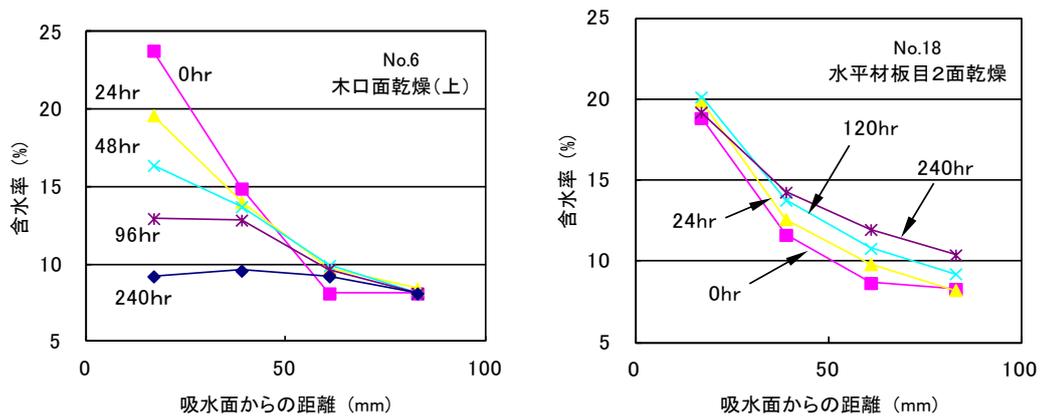


図 4.3.3 木口面から部分的に吸収された水分の乾燥過程におけるブロック内部の含水率分布¹⁸⁾

また、図 4.3.3 に示す、乾燥過程におけるブロック内部の含水率分布を見ると、吸水した木口面が乾燥面となる場合は、乾燥開始時に見られる水分勾配が時間の経過と共に緩やかになり、240 時間後にはほぼ一樣なのに対し、板目面のみが乾燥面となる場合には内部の水分勾配の減少は極めて緩やかであり、240 時間後にも 66mm の距離間で約 10% の含水率差が残っている。

以上の結果から、木口面から部分的に吸収された水分が、木口面以外の面から乾燥する過程での内部水分分布状況について考察する。

この実験で使用したベイマツ材の最大含水率は全乾密度の値から 178% と推定される。仮に吸収水分 50g が最大含水率において吸水面の木口側に一様に分布したと仮定すると、浸透領域の体積は 61.6cm³、厚さは試験体断面積から 0.55cm と計算される。実際には木材組織の不均一のため、浸透深さは局部的に異なり、また、吸収水分の一部は気相で内部に移動するため、上の仮定は明らかに正しくないが、吸収水分量と図 4.3.3 の含水率値から推定される内部の結合水

量の差から、乾燥開始時点においても吸収水量の過半にあたる自由水が木口面の近傍に存在していることが明らかであり、存在する範囲の深さはおおむね 10mm 以内と見なすことができる。

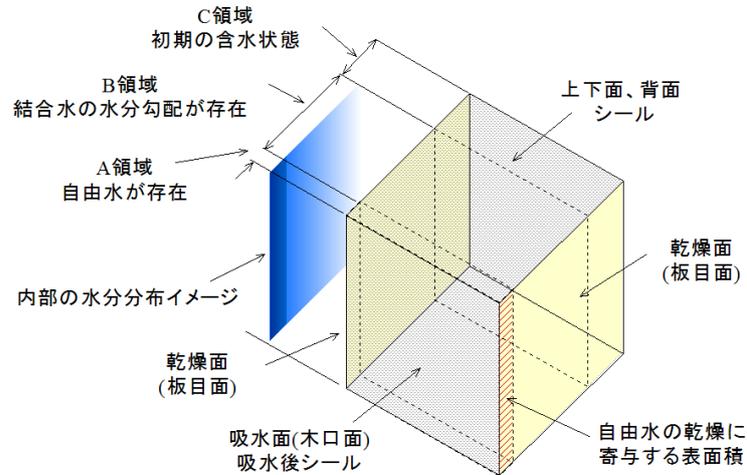


図 4.3.4 板目 2 面乾燥条件の試験体内部含水状態の模式図

図 4.3.4 は、板目 2 面乾燥条件の試験体内部の乾燥開始時点における含水状態を模式的に示したものである。木材中の自由水は表面の乾燥により表面に向かって移動する²²⁾。この移動に寄与する表面積は、この試験体の場合、図の A 領域の 20cm² 程度であり、木口面乾燥試験体の場合の 110cm² に比べて大幅に小さい。このことが図 4.3.3 に示される乾燥速度差の主要因と考えられる。

また、B,C 領域の含む結合水量の増加分は、各部の体積および含水率値と初期含水率分の差から計算できる。吸水量から結合水量の増加分と乾燥による試験体の質量減少を差し引くと A 領域に残存する量が求まり、含水率を計算できる。表 4.3.1、表 4.3.2 は各乾燥時間における計算結果を示す。計算結果が示すように、10mm 程度の深さまで吸水した木口面が密封され、板目面からのみ乾燥する場合、20℃、75%R.H の条件では 240 時間後においても木口面近傍の含水率は繊維飽和点を超えて高い値を維持しており、腐朽が発生し得る条件となっている。乾燥条件が異なる場合について、今後更に検討が必要である。

表 4.3.1 B,C 領域の結合水増加量の計算

計算領域		I	II	III	IV	合計
吸水面からの距離(mm)		8-28	22-50	50-72	72-100	
体積(cm ³)		154.35	242.55	242.55	308.70	
全乾質量(g)		71.00	111.57	111.57	142.00	
含水率(%)	0hr後	18.83	11.63	8.67	8.30	
	24hr後	19.90	12.60	9.83	8.23	
	120hr後	20.13	13.77	10.80	9.23	
	240hr後	19.20	14.27	11.97	10.40	
含水率増加分(%)	0hr後	11.1	3.9	1.0	0.6	
	24hr後	12.2	4.9	2.1	0.5	
	120hr後	12.4	6.1	3.1	1.5	
	240hr後	11.5	6.6	4.3	2.7	
結合水増加量(g)	0hr後	7.90	4.39	1.08	0.85	14.22
	24hr後	8.66	5.47	2.38	0.76	17.27
	120hr後	8.83	6.77	3.46	2.18	21.23
	240hr後	8.17	7.33	4.76	3.83	24.09

表 4.3.2 A領域の含水率の計算

乾燥時間(hr)	B,C領域の結合水増加量(g)	乾燥水分量(g)	A領域に残存する吸収水分量(g)	A領域の含水率計算				
				体積(cm ³)	全乾質量(g)	初期含水率(%)	残存吸収水量による含水率増加(%)	合計含水率(%)
0	14.22	0	35.78	88.2	40.57	7.7	88.2	95.9
24	17.27	2.2	30.53				75.3	83.0
120	21.23	8.8	19.97				49.2	56.9
240	24.09	10	15.91				39.2	46.9

4.4 浸入雨水による軸組部材仕口部の湿潤性状の検討

4.4.1 検討目的

4.2 項では、木材の木口面と側面（板目、柾目面）では吸水速度が著しく異なり、また、吸水直後の木口面からの乾燥が妨げられる条件では、木口付近に長時間にわたり、高含水領域が残ることについて述べた。

このような木材の吸水、乾燥性状と木造住宅軸組仕口部の劣化リスクの関連を明確にするため、軸組部材の仕口付近に壁内の浸入雨水が流下する状況を想定し、部材側面と仕口間隙における流下雨水の浸透速度について理論的に検討を行う。

4.4.2 検討モデル

図 4.4.1 のように、柱と胴差し等の横架材の仕口の上方から浸入雨水が膜状に定常流下する状況を想定する。この時、柱面を流下する雨水の一部は表面から吸収される。吸収されずに流下して仕口上端に達した雨水の一部は仕口間隙内に浸入し、内面から横架材の木口面から吸収される。簡易化のため、仕口は単純な突き付け形状とし、仕口内での吸水は横架材方向のみに生じるものとする。

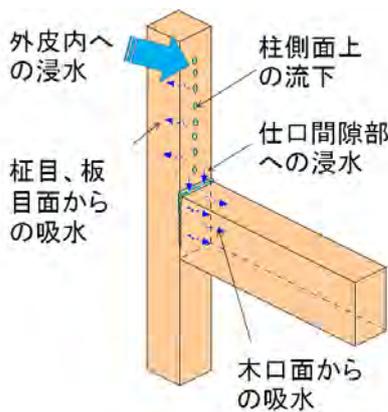


図 4.4.1 想定部位

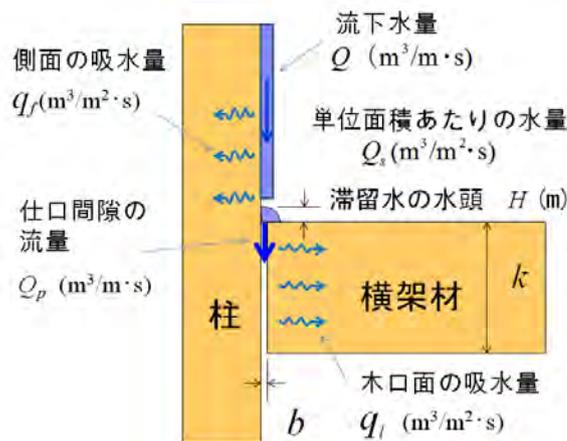


図 4.4.2 検討モデル

4.4.3 雨水浸透機構の検討

1) 流下面における浸透

図 4.4.2 において、柱側面を流下する水の単位面積あたり水量 Q_s (m³/m²·s) は、流層厚と面

積の積なので、流層厚の公式より

$$Q_s = \left(\frac{3Q\mu}{\rho g} \right)^{1/3} \dots (1)$$

ここで Q : 流量 ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$)、

μ : 水の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

ρ : 水の密度 (kg/m^3)

柱表面から内部に吸水が継続的に進行し、吸水量が q_f (m^3/m^2) に達した時の吸水速度は、

$$\frac{dq_f}{dt} = \frac{a_f^2}{2q_f} \dots (2)$$

ここで、 a_f : 柱側面の吸水速度係数 ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$)

流下開始直後、吸水速度が Q_s を上回る間は、 Q_s の全量が吸収され、

$$q_f = Q_s \cdot t \dots (3)$$

ここで、 t : 経過時間 (s)

$$\therefore \frac{dq_f}{dt} = \frac{a_f^2}{2Q_s \cdot t} \dots (4)$$

$\frac{dq_f}{dt}$ が Q_s と等しくなり、流下が始まる時間 t_e は、

$$t_e = \frac{a_f^2}{2Q_s^2} \dots (5)$$

この時点の吸水量は、

$$q_f = Q_s \cdot t_e = \frac{a_f^2}{2Q_s} \dots (6)$$

その後の q_f と t の関係は、(2) 式の積分と (5), (6) から、

$$q_f = a_f \sqrt{t - \frac{a_f^2}{4Q_s^2}} \dots (7)$$

q_f と t の関係を図示すると図 4.3.3 のようになる。

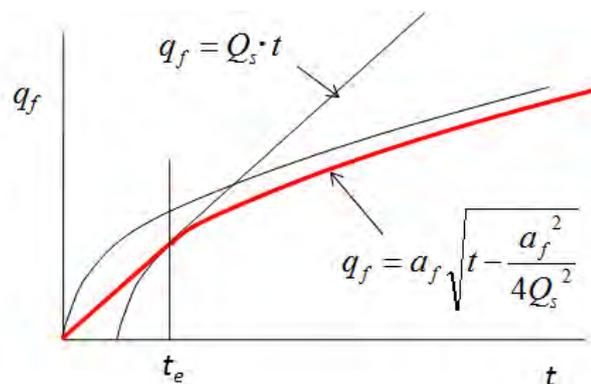


図 4.4.3 吸水量と時間の関係

2) 仕口内面における浸透

柱側面と横架材端（木口）の間隙内の水の流れを層流と見なすと、流量式は、

$$Q_p = \frac{b^3 \cdot \rho \cdot H \cdot g}{12\mu k} \quad \dots (8)$$

ここで、 Q_p : 流量 ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$)

b : 間隙幅 (m)

H : 滞留水の水頭 (m)

μ : 水の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

k : 横架材の高さ (m)

間隙内に浸入する水量 Q_c は、 Q_p と Q_s の小なる方で決まる。木口面の吸水速度は、(2) 式と同様に、

$$\frac{dq_l}{dt} = \frac{a_l^2}{2q_l} \quad \dots (9)$$

ここで、 a_l : 柱側面の吸水速度係数 ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$)

浸入開始直後、吸水速度が Q_c を上回る間は、 Q_c の全量が吸収される。柱側面側の吸水を無視すると、

$$q_l = \frac{Q_c}{k} \cdot t \quad \dots (10)$$

$$\therefore \frac{dq_l}{dt} = \frac{k \cdot a_l^2}{2Q_c \cdot t} \quad \dots (11)$$

$\frac{dq_l}{dt}$ が Q_c と等しくなり、流出が始まる時間 t_e は、

$$t_e = \frac{k^2 \cdot a_l^2}{2Q_c^2} \quad \dots (12)$$

この時点の吸水量は、

$$q_l = Q_c \cdot t_e = \frac{k \cdot a_l^2}{2Q_c} \quad \dots (13)$$

その後の q_l と t の関係は、(9) 式の積分と (12), (13) から、

$$q_l = a_l \sqrt{t - \frac{a_l^2 \cdot k^2}{4Q_c^2}} \quad \dots (14)$$

q_l の経時変化の傾向は図3と同様である。

4.4.4 吸水量の計算例

表 4.4.1 に示す仮定値で計算した結果を表 4.4.2 および図 4.4.4 に示す。なお、木材の木口面および側面の吸水速度係数は、4.2.2 項でも触れたベイマツ材についての実験値¹⁸⁾を用いた。

表 4.4.1 仮定値

変数		仮定値	備考
流下水量 Q ($\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$)		1.67, 8.33, 167.	0.01, 0.05, 0.1 ml/cm \cdot 分
間隙幅 b ($\times 10^{-4} \text{ m}$)		1, 2, 3	0.1, 0.2, 0.3mm
横架材高さ k (m)		0.2	
水頭 H (m)		0.005	
吸水速度係数 ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$)	柱側面 a_f	1.5	ペイマツ材測定値 ¹⁾
	木口面 a_l	10	

表 4.4.2 柱側面および仕口内面の吸水量算定結果

部位	流量 (ml/cm \cdot 分)	Q_s ($\times 10^{-5}$ $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Q_c ($\times 10^{-8}$ $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	吸水量 q ($\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2$)						
				経過時間 (hr)						
				0.167	1	10	20	40	80	
柱側面	0.01	1.7	—	3.7	9.0	28.5	56.9	80.5	113.8	
	0.05	3.0		3.7	9.0	28.5	56.9	80.5	113.8	
	0.1	3.7		3.7	9.0	28.5	56.9	80.5	113.8	
仕口内面	間隙幅 0.1mm	—	0.01	1.7	5.0	30.0	180.0	374.7	533.3	756.6
			0.05	2.0	6.1	36.8	183.3	376.3	534.4	757.4
			0.1	2.0	6.1	36.8	183.3	376.3	534.4	757.4
	間隙幅 0.2mm		0.01	1.7	5.0	30.0	180.0	374.7	533.3	756.6
			0.05	8.3	21.4	58.8	189.4	379.3	536.5	758.9
			0.1	16.3	23.7	59.7	189.6	379.4	536.6	758.9
	間隙幅 0.3mm		0.01	1.7	5.0	30.0	180.0	374.7	533.3	756.6
			0.05	8.3	21.4	58.8	189.4	379.3	536.5	758.9
			0.1	16.7	23.7	59.7	189.6	379.4	536.6	758.9

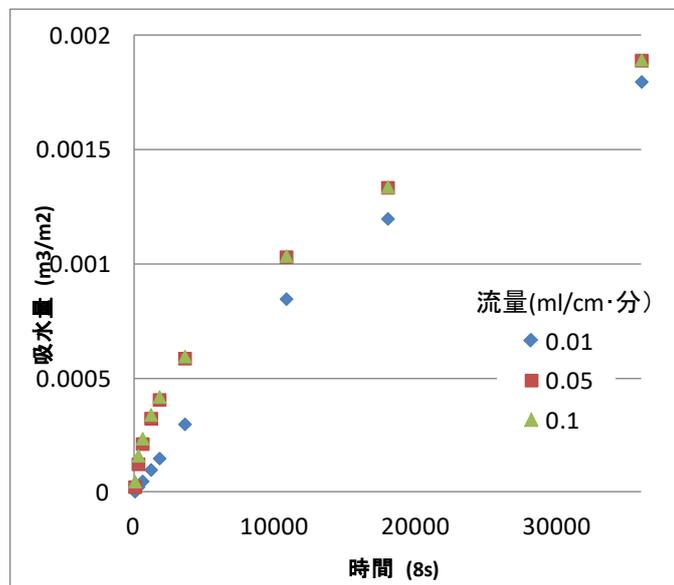


図 4.4.4 柱側面および仕口内面の吸水量算定結果 (間隙幅 : 0.2mm)

表 4.4.2 によれば、表面吸水量は、微少な流下水量に対しても吸水速度がはるかに低いため、流量によらず一様の値である。

仕口内面吸水量は図 4.4.4 に示すように、浸入初期には Q_c の差により、流量ごとに幾分異なるが、吸水速度が支配的となる 10 時間経過後はほとんど差が無く、表 4.4.2 で明らかなように、最も小さい流量、間隙幅でも柱表面吸水量のおよそ 7 倍に達する。

雨水浸入停止後の状況を想定すると、柱表面では吸水面が乾燥面となり、吸水量も少ないため、早期に乾燥が期待できるが、仕口間隙内では吸水量が多く、かつ横架材木口面からの乾燥が期待できない。このような条件では、4.2.3 項に述べたように、自由水が材端部に局部的に長時間残存することになり、部位特有の劣化リスクを形成すると考えられる。

なお、4.2.3 項の石川の実験結果では、断面 $105 \times 105 \text{mm}$ のベイマツ材の木口から 50g 吸水させた状態で木口面をシールし、板目面、または柃目面 2 面を乾燥面として、 20°C 、 $75\% \text{R.H.}$ の気中に放置した時、240hr 後の乾燥量は約 10g にとどまっている。この実験での木口吸水量は約 $450 \text{m}^3/\text{m}^2$ に相当し、表 4.4.2 の算定結果では 50hr 後の吸水量にあたる。この実験結果は、仕口部間隙に継続的に雨水が浸入して木口面から一定量が浸透した場合、浸透に要した時間に比して、その水分が乾燥するのに要する時間は著しく長いことを示している。従って、仕口付近の軸組が繰り返し浸入雨水で濡れる条件では、仕口木部の木口付近への水分の蓄積が生ずる可能性が高いと言える。

4.4.5 まとめ

仕口上方の軸組部材面を一定量の浸入雨水が流下する状況を想定した検討により、流下面に比して仕口内面木部の湿潤が顕著となり、部位特有の劣化リスクが形成される傾向を確認できた。

5. 水分履歴に応じた腐朽危険度予測手法

建築における躯体の劣化予測手法は、マルコフ連鎖のような確率過程を想定したモデルと、暴露実験などから劣化外力との関係を重回帰分析などにより推定する手法が一般的に用いられている。木部の腐朽予測については、木材腐朽を拡散現象と見なしたモデル提案²³⁾が 1960 年代になされており、近年は、雰囲気温湿度を制御した室内腐朽試験に基づく実験式から質量減少率を求める Viitanen のモデル²⁴⁾や、熱水分同時移動解析と連成させた Nofal によるモデル²⁵⁾が提案されている。木材の腐朽は担子菌に分類される木材腐朽菌によって、木材が化学的に分解され耐力が低下する現象であり、その進行には外皮内部における熱水分の挙動を予測することが重要な要素技術となる。建物内の熱水分挙動に関しては、建築環境工学の分野で多くの研究が行われており、材料単体 (Material) だけでなく部位 (Assembly) や建物全体 (Whole building) を対象とした予測モデルも確立されている。これらの解析では 1 時間毎の気象データを用い、系全体の温湿度の時間進行を計算するが、CPU の計算速度の向上に伴い、換気回路網計算等の空気移動を含めた年単位の予測も可能となっている。また近年、欧州では流体計算により建築物に衝突する雨滴の解析に基づき、壁面雨量分布等の予測が行われており、雨水を含めた水分挙動に関する研究が進展している²⁶⁾。

本節では、上述した背景を勘案し既往論文で提案した、木材腐朽と熱物質移動に加え、雨水浸入を考慮した外皮の腐朽危険度予測手法²⁷⁾について述べる。

5.1 予測モデルの概要

建物外皮は日射、降雨など気象による外界要因と、暖冷房、水分発生など居住に伴う室内側の要因を境界条件として曝されており、経年変化等に伴う材料・部位の性能低下により内部に水分が浸入する。外皮に浸入した水分は、内外の熱移動に伴う温度履歴により液水や水蒸気に状態を変化させ移動若しくは蓄積し、木部では木材腐朽菌による腐朽に至る。腐朽危険度予測モデルは図 5.1 に示すように、これら外界気象、室内環境を与条件とした熱物質移動、雨水浸入等のサブモデルの計算に基づき、木材腐朽の時間進行予測を行い、Assembly である外皮システムの耐久性評価を試みるものである。

計算フローは図 5.2 の手順となる。初めに気象データから外気温湿度、風速風向、日射、夜間放射降雨量などの外部環境と、生活スタイルを想定した室内温湿度など与条件を読み込む。次に降雨量と風速風向、材料物性、施工精度などを考慮し、1次防水層及び2次防水層からの浸水量を算出する。得られた浸水量を用いて、熱・水分収支や空気移動量を算出した後、木材腐朽菌による木部の腐朽進行、腐朽に伴う水分生成量を計算する。熱と水分、空気移動に関しては、それぞれの影響を無視できないため、Time Step 毎に収束計算を行い、判定条件を満たした後に次ステップへ時間進行する。計算期間を1年や複数年とすれば、長期的な水分性状や腐朽進行を予測できる。

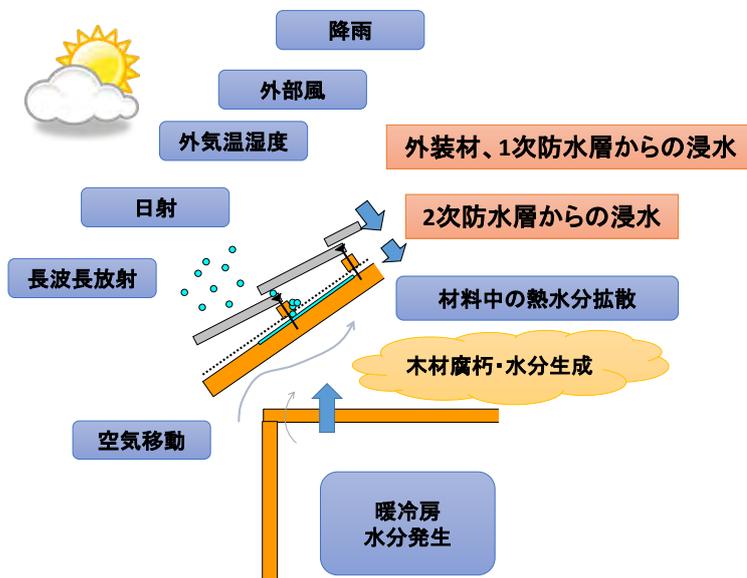


図 5.1 腐朽危険度予測モデルの概要

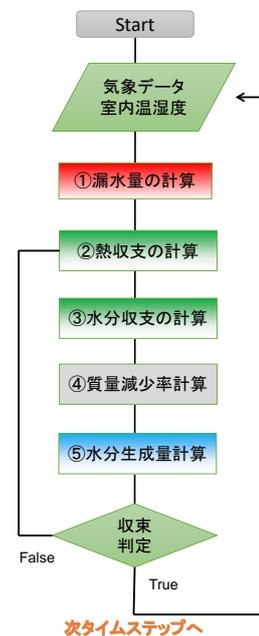


図 5.2 計算フロー図

5.2 防水層からの雨水浸入に対するモデル

外装材や屋根葺材といった1次防水層と防水紙等の2次防水層は、材料単体の止水性は高く、性能も担保されているケースが多い。しかし、実際の躯体では材料単部の取合や固定箇所等、長

期的には浸水リスクが懸念される弱点部が存在する。これらの箇所については、送風散水試験や止水性試験によって得られた浸水量より、浸水率や流量係数を算出し予測に用いる。

浸水率は屋根や壁面雨量に対する浸水量の割合で、屋根葺材隙間については(1)式のような風速との関係式が提案されている。また、気象データの風速を用いる場合、一般には1時間毎の平均風速となるため、文献²⁷⁾では(2)、(3)式のように瞬間最大風速の出現頻度をレイリー分布で変換し解析に用いている。

$$f(v) = 0.0029v^2 - 0.0284v + 0.0346 \quad [8.5 < v < 16\text{m/s}] \quad (1)$$

$$P(v) = \frac{\pi v}{2 \bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$F(v) = \left[\sum P(v) \cdot f(v) \right] / \sum P(v) \quad (3)$$

2次防水層については、1次防水層から浸入した水分が蓄積された際に、風圧や水頭圧によって裏面への浸水が生じる。そこで水頭圧を駆動力とした止水性試験等により得られた流量係数を用い、(4)式によって浸水量を求める。また、2次防水層表面での水分収支を考慮する場合は、(5)式のような収支式によって、水膜厚さや水分量を計算する。

$$J_w = \rho_w c_w \sqrt{2gh} \quad (4)$$

$$\frac{dW_t}{dt} = \frac{F(v) \cdot R_h}{3600} + \alpha'(X_a - X_s) - J_w \quad (5)$$

1次・2次防水層の浸水率や止水性については、施工方法を含めた外装・防水システムを対象とした実験により決定される。ゆえに、解析を行う場合、これらのパラメータを取得する必要があり、最終的な腐朽危険度の予測結果に大きく影響することになる。

5.3 多孔質材及び空間の熱物質移動モデル

多孔質材に対しては、(6)、(7)式に示される熱水分同時移動方程式が適用される。これらは材料内部の熱と水分の拡散方程式で、熱及び水分伝導率や、比熱、平衡含水率等の物性値が必要となる。(7)式右辺第3項の J_w は(4)式で求めた浸水量であり、構造用合板のように、2次防水層内側に位置する材料表面の計算ポイントのみ J_w が加えられる。また、 W_L は後述する木部の腐朽によって生じる水分生成項である。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \nabla T + r\lambda_{\mu g} \nabla \mu \} \quad (6)$$

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda'_{\mu} \nabla \mu + \lambda'_T \nabla T) + J_w + W_L \quad (7)$$

通気層、小屋裏空間等の空間の温湿度については、(8)、(9)式に示される熱湿気の収支式を適用する。これらは空間内を一様拡散と仮定した1質点モデルであり、空間分布は考慮されていない。空間分布を正確に予測する場合、流体計算が必要になるが耐久性といった時間スケールが長い予測では、逐次連成させる計算は現行のCPUの計算速度でも容易ではなく、何らかの簡易化

が必要となる。

$$\rho_a c V \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum \alpha A (T_j - T_i) + \sum \rho_a c Q_{ij} (T_j - T_i) \quad (8)$$

$$\rho_a V \frac{\partial X_i}{\partial t} = \sum \alpha' A (X_j - X_i) + \sum \rho_a Q_{ij} (X_j - X_i) \quad (9)$$

5.4 木材腐朽進行モデル²⁸⁾

木部の腐朽進行については、上述したモデルによって定まる材料内部の熱水分性状をパラメータとした予測モデルを採用している。一般に、木材腐朽は菌糸の分泌酵素によりセルロース等が分解され、質量の減少に伴い二酸化炭素と水を生成する（図 5.3）。これは、加水分解と引き続く好氣的完全分解の2段階の生化学反応である。そこで、質量減少が一連の反応の結果生ずるとして反応速度定数を定め、生成物は水分のみを考慮してモデル化を行っている。この扱いは、木材分解について巨視的に扱う決定論的非構造モデルに該当し、その進行が樹種や温湿度等、各種条件によって異なるため、反応速度定数を室内腐朽実験によって求める必要がある。解析対象は以下の如く仮定している。

- (1) 腐朽後も木材の物性値は変化せず一様に保たれる。
- (2) 木材分解による生成水は、質量減少率と一意の関係を持つ。
- (3) 材料中の CO_2 及び O_2 濃度の影響は考慮しない。
- (4) 菌種及び樹種の影響は、実験で得た各係数により表現される。

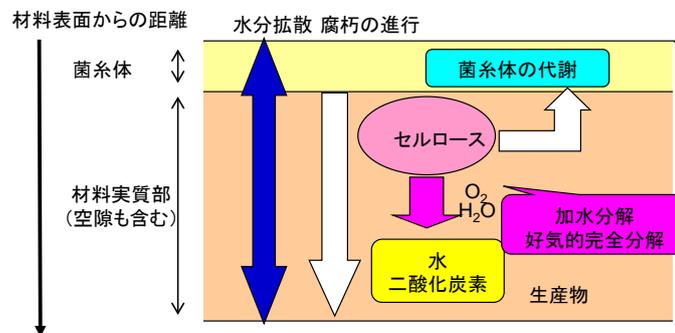


図 5.3 腐朽モデルに関する概念図

なお、物理現象と異なり菌類の生育サイクルは、胞子の沈着から発芽までの誘導期、菌糸が生育し個体数が増える増殖期、基材の栄養分の枯渇若しくは菌体自体の活性低下による停止期・死滅期の3つのステージに分類される。これらの生育段階と質量減少率は図 5.4 の関係となるが、本稿で解説するモデルは主に増殖期を対象としている。

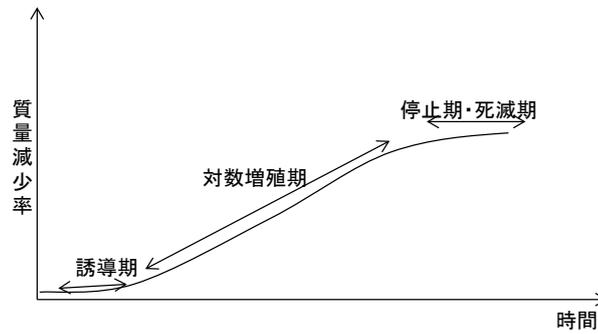


図 5.4 腐朽進行と時間の関係

木材腐朽菌による質量減少は、温度依存性を持つ反応速度定数 k_m (1/s) により定まるとして、(10) 式で定義する。また、初期状態として健全な木材の腐朽は、材表面近傍の水分と窒素などの養分を利用し菌糸束が形成された後に内部へ進行すること、自由水が不可欠であることを考慮し判別条件を (11)、(12) 式で設定する。

$$\frac{dL}{dt} = k_m(\theta) \quad (10)$$

$$\text{材料表面 } (x=0) : \varphi_i > \varphi_c \quad (11)$$

$$\text{材料内部 } (x>0) : L_{i-1} \text{ or } L_{i+1} > 0, \varphi_i > \varphi_c \quad (12)$$

ここで、 φ_i は計算対象セルの相対湿度、 φ_c は腐朽進行に必要な相対湿度の閾値、 L_{i-1} 及び L_{i+1} は $i-1$ と $i+1$ 層における質量減少率である。

本モデルでは、木材分解による生成水は質量減少率と一意の関係とみなすため、質量減少率に対する水分生成率 h (一) を (13) 式で定義する。

$$h = \frac{d\phi}{dL} \quad (13)$$

ここで、 ϕ は体積含水率 (m^3/m^3) である。(13) 式から分かるように、 h は閉鎖系での質量減少が生じた際の含水率変化であるが、菌糸体の代謝の詳細が不明なため、理論的に求めることは難しい。ゆえに、水分生成率 h についても、実験によって求める必要がある。また、水の密度を ρ_w (kg/m^3) とすれば、質量減少率と木材分解による水分生成量 W_L ($\text{kg}/[\text{m}^3 \cdot \text{s}]$) は (14) 式で表せる。

$$W_L = h\rho_w \frac{dL}{dt} \quad (14)$$

6. 外皮の腐朽進行予測例

6.1 外皮下地材の腐朽進行予測例²⁷⁾

本節では実態調査を行った実際の住宅屋根下地材に対して予測モデルを適用し、測定された腐朽度と予測結果を比較し考察を行う。

6.1.1 劣化事例に対する腐朽度の調査

1) 物件概要

調査物件は東京都に建つ築7年の3階建て木造戸建住宅で、外壁通気層及び軒の出は無い(写真6.1.1左)。周辺は住宅密集地であるため、劣化が生じた2階北側の下屋部分では冬期の日照は終日得られない。雨水浸入は上階の東側笠木付近から生じたことが散水試験によって確認されており、前述した瓦隙間からの浸水とは異なる現象であった。浸入水は3階東側外壁の2次防水層の内側を通り北側下屋野地板に到達していた。写真3中央は、防水紙を剥がした状況である。2次防水層はアスファルトルーフィング、野地板はJAS1類2級の針葉樹合板(12mm)であり、野地板下面にはアルミクラフト紙が密着して施工され、浸入水が乾燥できない仕様となっていた(写真6.1.1右)

2) 腐朽度の測定

写真6.1.1(中央)の野地板(1820×910mm)を撤去し、100×100mmに切断した試料の乾燥重量を測定し、健全部の平均重量との比較により質量減少率を推定した。写真6.1.2に質量減少率の分布を示す。写真上側が水上側で下部が軒先方向の水下側に該当する。網掛け部分は質量減少率20%以上となっており、水分が滞留し腐朽が進行した箇所と思われる。なお、破線で囲んだ範囲は野地板を固定する垂木部分に該当し、撤去時に野地板の一部が剥がれたため参考値である(2重取消線部分)。垂木周辺を除けば、質量減少率の最大値は40~50%程度であった。



写真6.1.1 調査物件外観と劣化部位(左:西側外観、中央:劣化部位、右:アルミクラフト紙)



写真6.1.2 野地板の質量減少率(単位:%)

6.1.2 解析概要

予測モデルの概要を図 6.1.1 に示す。雨水浸入は笠木から 2 次防水層の釘孔貫通部を經由し野地板に到達すると仮定した。対象物件の浸水箇所が住宅密集地の笠置付近であったため、浸水率は風速によらず一定とした。解析は (7) ~ (12) 式を用いるが、水分収支式は (10) 式に水分生成量 W_L を加えた (13) 式を用いた。野地板の腐朽については、図 6.1.2 に示す木材腐朽菌による木材分解と水分生成を非構造モデルで表現した (14) ~ (17) 式を適用した。空間分割は厚さ方向の 1 次元で、浸入水は各材料の境界層に均等に拡散すると見なした。なお、漏水箇所である笠木付近の浸水率は、文献⁶⁾を参考に $F=0.1, 0.5, 1, 2\%$ の 4 水準を設定した。腐朽速度に該当する反応速度定数 $k_m(\theta)$ (1/s) は、(14) 式で示す室内腐朽試験によって得られた値とその 0.1 倍の 2 水準とした。計算期間は 1 月 1 日からの 1 年間とし、東京の拡張アメダス気象データを読み込み時間進行させた。笠木からの浸入水に対する 2 次防水層の流量係数は、アスファルトルーフィングの値を参考に 3.5×10^{-9} とした。

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_\mu \nabla \mu + \lambda'_T \nabla T) + W_L + J_w \quad (13)$$

$$\frac{dL}{dt} = k_m(\theta) \quad (14)$$

$$W_L = h \rho_w \frac{dL}{dt} \quad (15)$$

$$h = \frac{d\phi}{dL} \quad (16)$$

$$k_m(\theta) = (2.77 - 3.23\theta + 0.865\theta^2 - 0.0189\theta^3) \times 10^{-10} \quad (17)$$

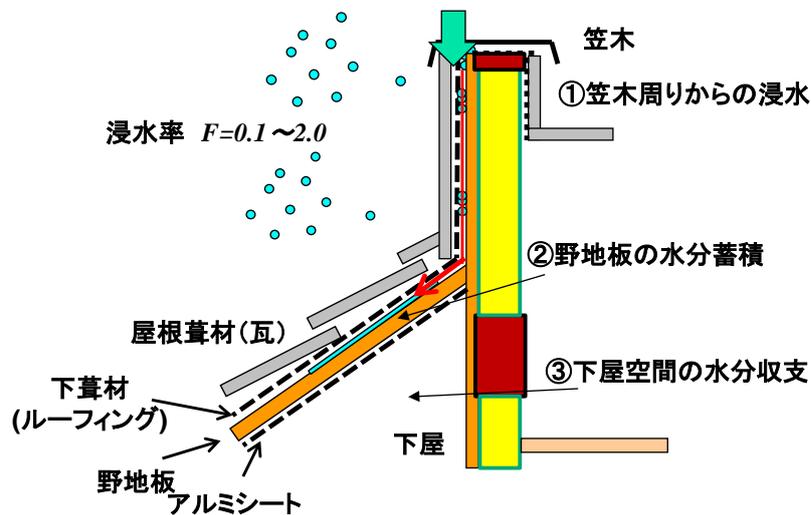


図 6.1.1 予測モデルの概要

6.1.3 浸水量と野地板含水率

1 月 1 日から 1 年間の野地板含水率及び浸水量の積算値を図 6.1.2、図 6.1.3 に示す。凡例の数値は浸水率で、図 11 には降雨による 1 日あたりの浸水量 (浸水率 1% のみ) を併記した。浸水

率が0.1%、0.5%では含水率が低下しており、野地板は乾燥傾向であるが、浸水率が1%を越えると含水率が繊維飽和点を越え増加傾向となる。浸水率1%以上では計算上腐朽進行が継続しており、その際の浸水量の積算値は1年間で2kg/m²以上であった（図6.1.3）。

6.1.4 腐朽速度と質量減少率の関係

野地板の質量減少率の計算結果を図6.1.4、図6.1.5に示す。図6.1.5では腐朽速度である反応速度定数が図6.1.4の0.1倍であるため、y軸のスケールが異なる。浸水率が0.1%、0.5%については、図6.1.4、図6.1.5ともに腐朽進行がほとんど見られない。反応速度定数が0.1倍の場合（図6.1.5）、浸水率2%のケースでも年間の質量減少率の変化は3%であった。この変化量を調査物件に適用すると、竣工直後から腐朽が開始したと仮定しても7年間で20%程度となり、写真6.1.2の最大値である40~50%には到達できない。一方、反応速度定数が1倍で、含水率が継続して繊維飽和点を越える条件では1年間で20~30%程度の変化となり（図6.1.4）、2~3年で実態と合う計算となる。これは、雑菌混入が生じる実物件でも、実験室で供試菌を接種して得られた（17）式の約0.2倍以上の腐朽速度が生じたことを示唆している。

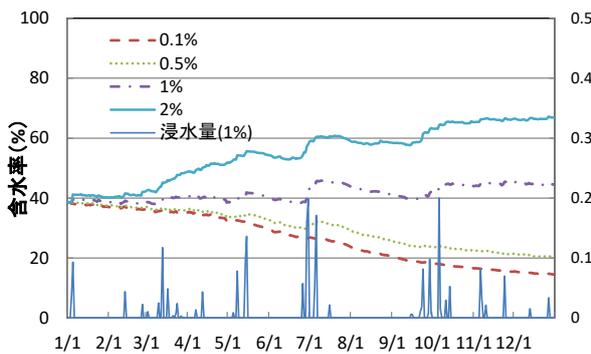


図 6.1.2 野地板含水率及び浸水量

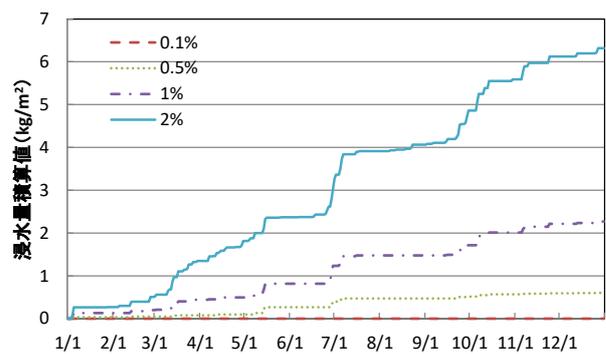


図 6.1.3 浸水量積算値

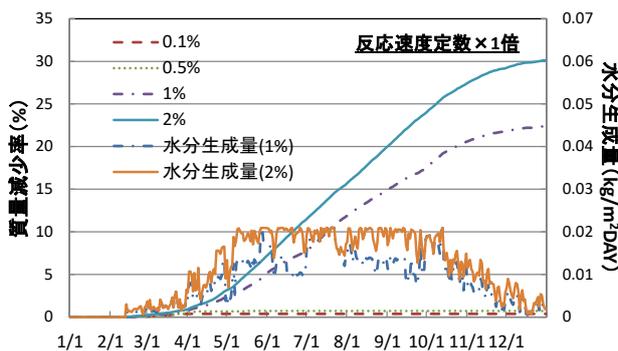


図 6.1.4 野地板質量減少率（腐朽速度 1 倍）

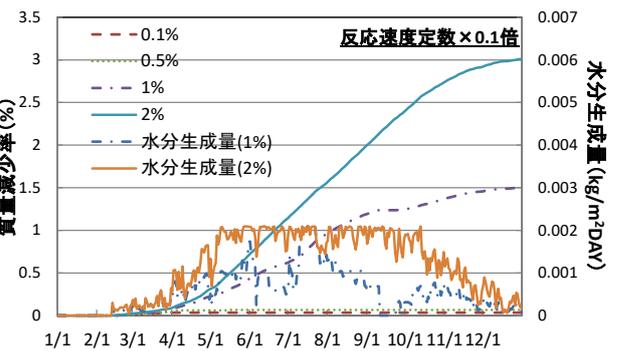


図 6.1.5 野地板質量減少率（腐朽速度 0.1 倍）

6.2 雨がかり木部の腐朽進行予測例

伝統的な木造建築では、土台高さや軒の出を確保することにより、躯体への雨がかりを減らす工夫が凝らされているが、軒先や真壁の土台部分など、濡れ頻度が高い箇所もある。そこで、これらの部位の腐朽リスクについて、雨がかり部の納まりや仕上げによる乾燥度合い(湿気伝達率)

を変化させた際の感度解析を行い、腐朽進行への影響を考察する。

6.2.1 解析概要

検討対象は木口部を想定した、図 6.2.1 に示す材料長さ 10cm の木材である。熱水分流は 1 次元拡散を仮定し、屋外側は雨がかりを想定するが反対側は断熱・断湿条件とした。屋外側については、日射や夜間放射、降雨量を考慮し、浸水率によって雨がかりを設定した。本解析では、湿気伝達率によって境界面の表面仕上げを変化させることにより（表 6.2.1 参照）、軒先のように降雨後の乾燥が比較的早い部位と、柱脚部のように湿潤後の乾燥が遅れる部位を想定した。case1 は、軒先を想定し屋外側の湿気伝達率を外表面並みとした。case2、case3 は、土台柱脚部や梁・胴差接合部などへの雨水浸入を想定し、伝達率を case1 の 0.1、0.01 倍とした。なお、本計算では 1 次元モデルを用いるため、表面以外からの熱・水分の流入及び液水に関する重力の影響は無視している。計算は銚子の気象データを用い、1 月 1 日から 1 年間行った。

表 6.2.1 計算ケース

case	外気側湿気伝達率 (kg/m ² sPa)	浸水率 f (%)	備考
case1	3.48×10^{-8}	30	軒先等の乾燥が容易な 部位を想定
case2	3.48×10^{-9}	30	柱脚部底面等の乾燥が 困難な部位を想定
case3	3.48×10^{-10}	30	

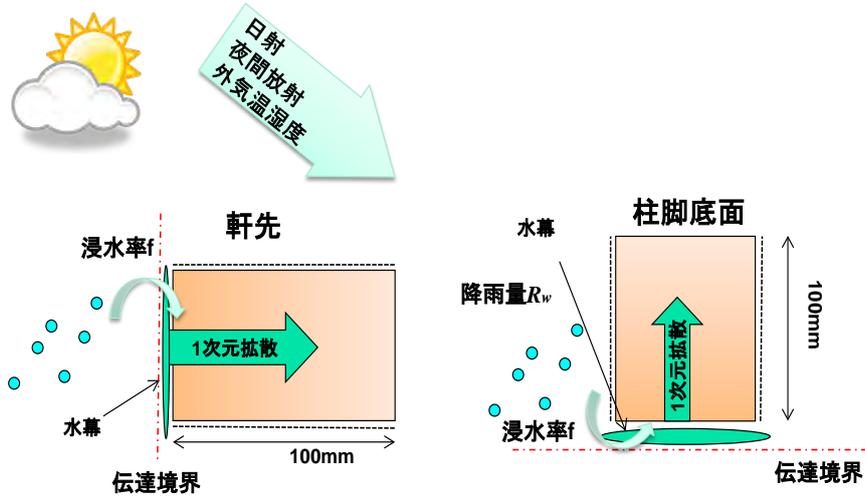


図 6.2.1 解析モデルイメージ

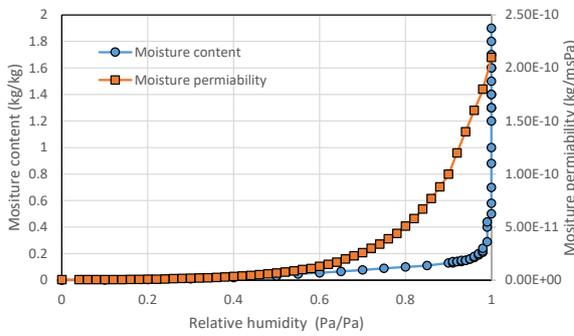


図 6.2.2 平衡含水率及び湿気伝導率

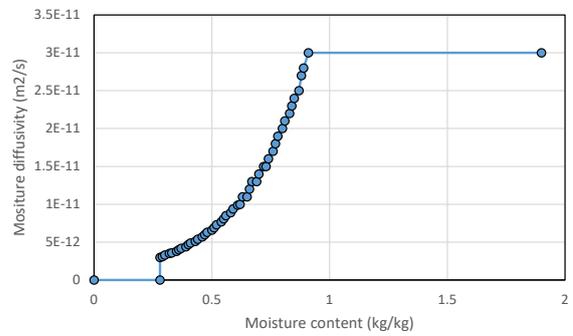


図 6.2.3 水分拡散係数

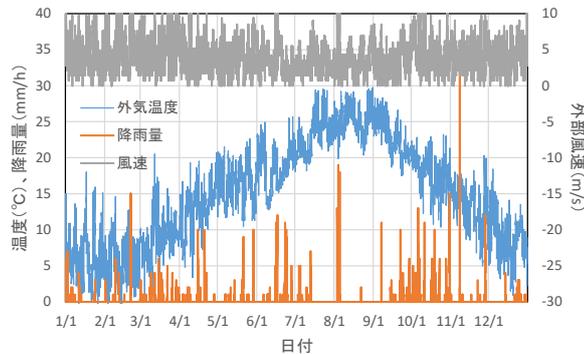


図 6.2.4 外気条件 (温度、降雨量、外部風速)

6.2.3 計算結果

浸水量（雨がかり）と材平均含水率を図 6.2.5、含水率の1年間の推移を図 6.2.6、質量減少率の1年間の推移を図 6.2.7、質量減少率の断面分布を図 6.2.8 に示す。

case1 では軒先等、降雨後は外部風によって乾燥が促進される状況を想定した結果で、材全体（計算領域：100mm）の平均含水率は10%程度であった（図 6.2.5）。湿潤乾燥が繰り返されるのは表面数ミリの領域であり（図 6.2.6）、腐朽進行が生じるのも表面から10mm未満であることがわかる。

乾燥が困難な設定の case3 では、材全体の平均含水率が1年間で50%を超えている。繊維飽和点を含水率30%とした場合、表面から50mmまでの範囲で越えており、温度が高い南側で内部の含水率上昇が顕著であった（図 6.2.6）。腐朽進行も南側が高く、北側が表面から50mmに対し、南側は90mmまで質量減少率の増加が見られた（図 6.2.7）。南面の腐朽進行が顕著な理由については、温度勾配による材内部への水分移動に加え、日射の影響により腐朽菌の至適温度に対する頻度の高いことが影響したと考えられる。

乾燥性能が case1、case3 の中間である case2 については、材全体の平均含水率の微増が見られるものの、繊維飽和点を越える領域は表面から10mm程度であった（図 6.2.6）。しかし、これらの領域では腐朽が進行しており、北側では年間15%程度の質量減少率の増加が見られる（図 6.2.7）。

材全体（計算領域：100mm）の平均含水率を比較すると、case1 が10%、case2 では20%程度であった。乾燥性能が低い case3 では上昇傾向がみられ1年間で50%を超えている（図 6.2.5）。

図 6.2.8 は質量減少率の断面分布の推移である。本計算結果によれば、case1 の条件ならば表面近傍のみの劣化に留まるが、case2 では20～40mm、case3 では材の大半となる50～100mmまで腐朽が進行する結果となっている。これらの腐朽進行深さは1年間の結果であるため、複数年同様な状況が継続した場合は、異なる状況が予想される。本解析では湿潤から腐朽菌定着までの時間遅れや雑菌の影響を無視しているため腐朽の進行は早く、計算結果はより厳しい値と位置づけられる。しかし、実際の軒先や雨水浸入が生じた柱脚部・窓枠といった部位の状況を勘案すると、定性的には極端な乖離は無いと予想され、実物件に対する解体調査や、屋外暴露による長期試験等によって本予測手法の検証を行うことが望まれる。

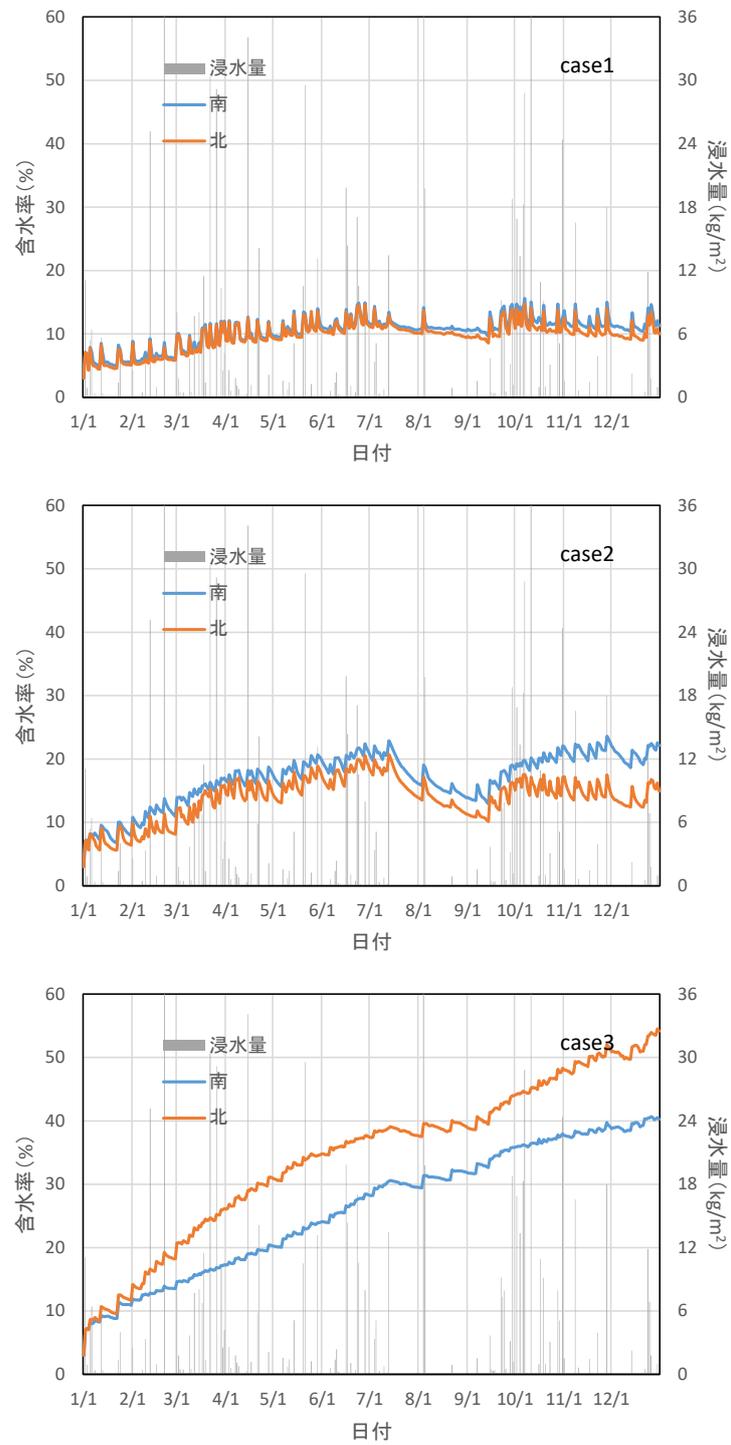


图 6.2.5 浸水量と材平均含水率

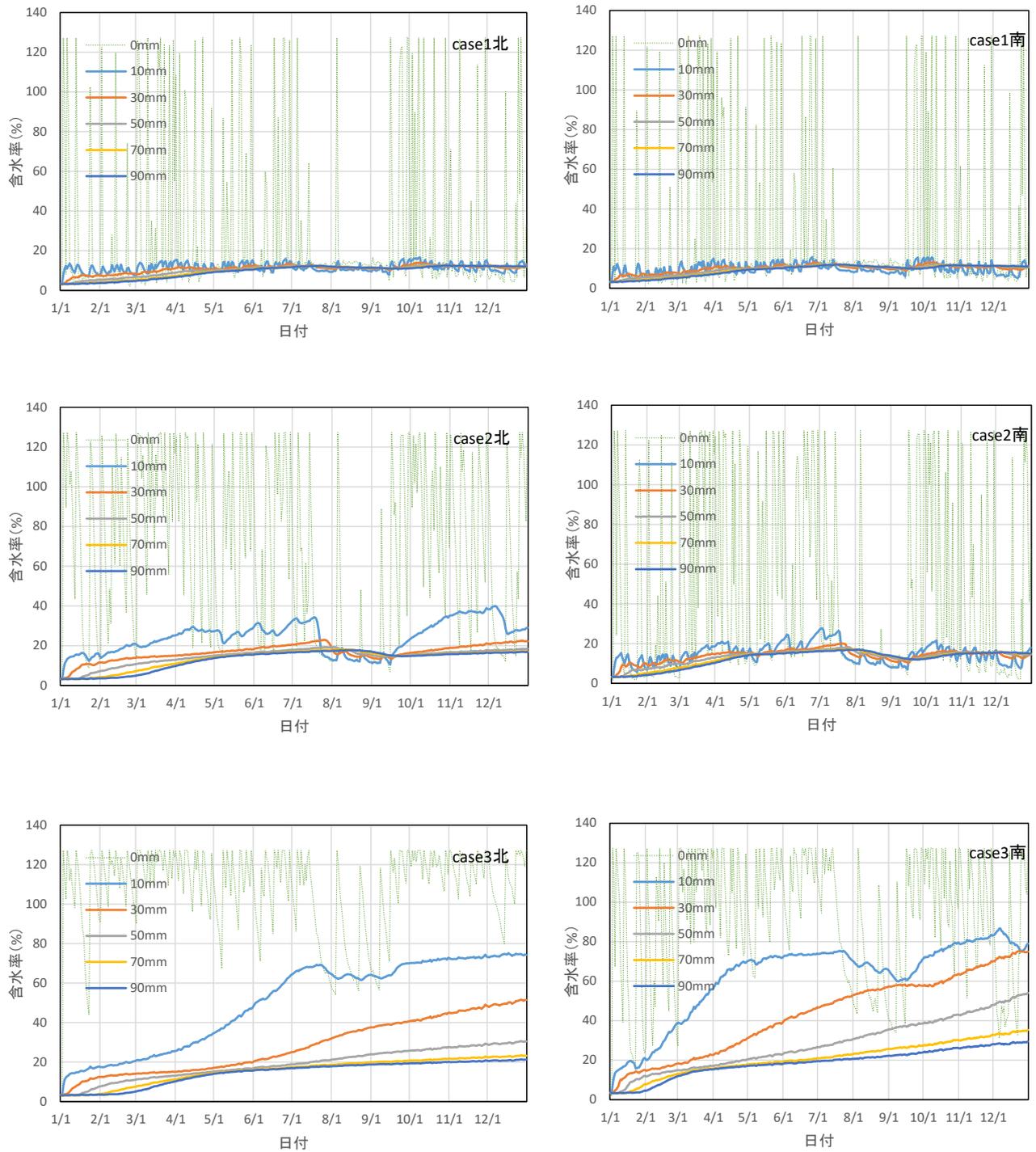


図 6.2.6 含水率の推移

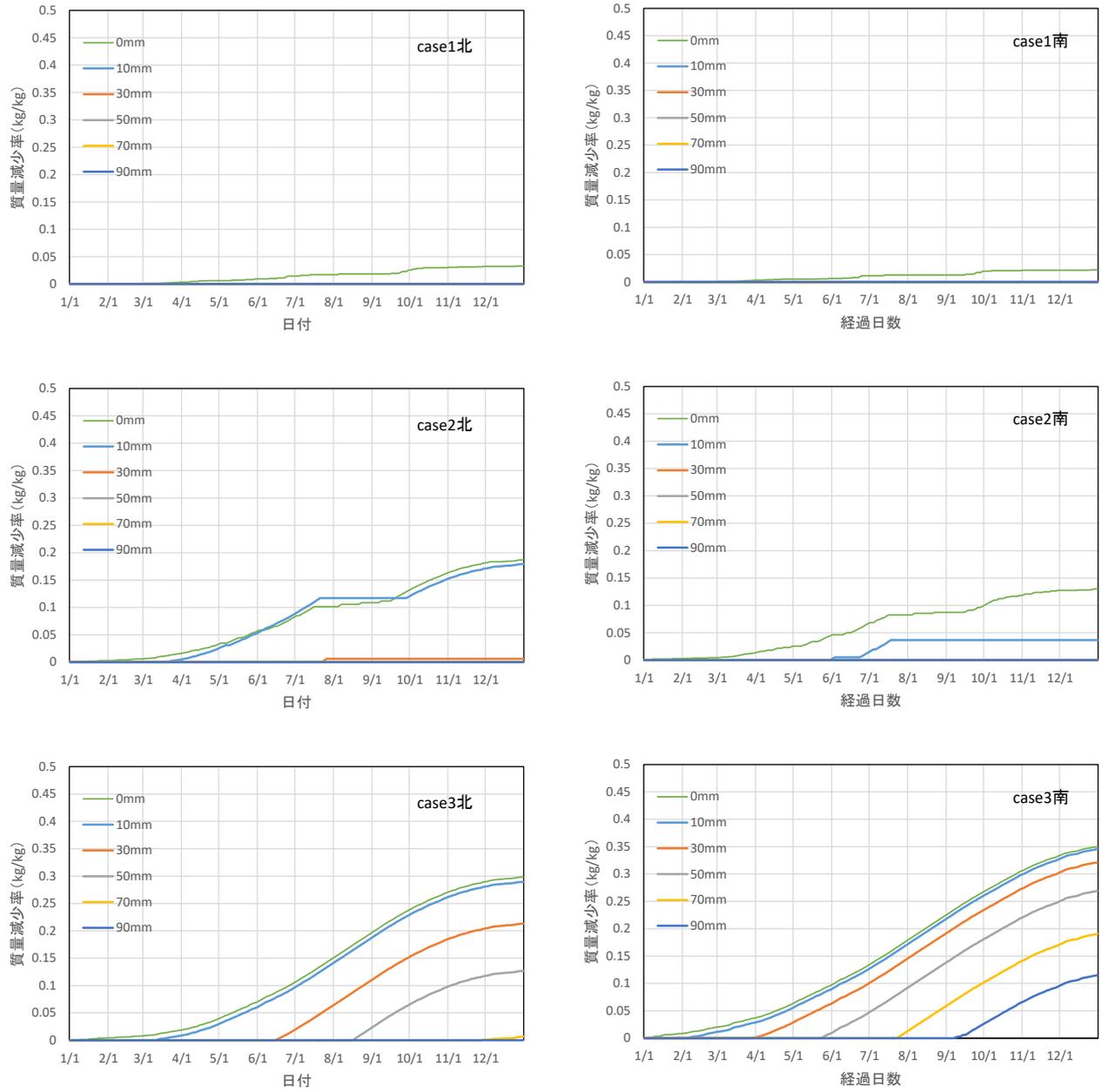


図 6.2.7 質量減少率の推移

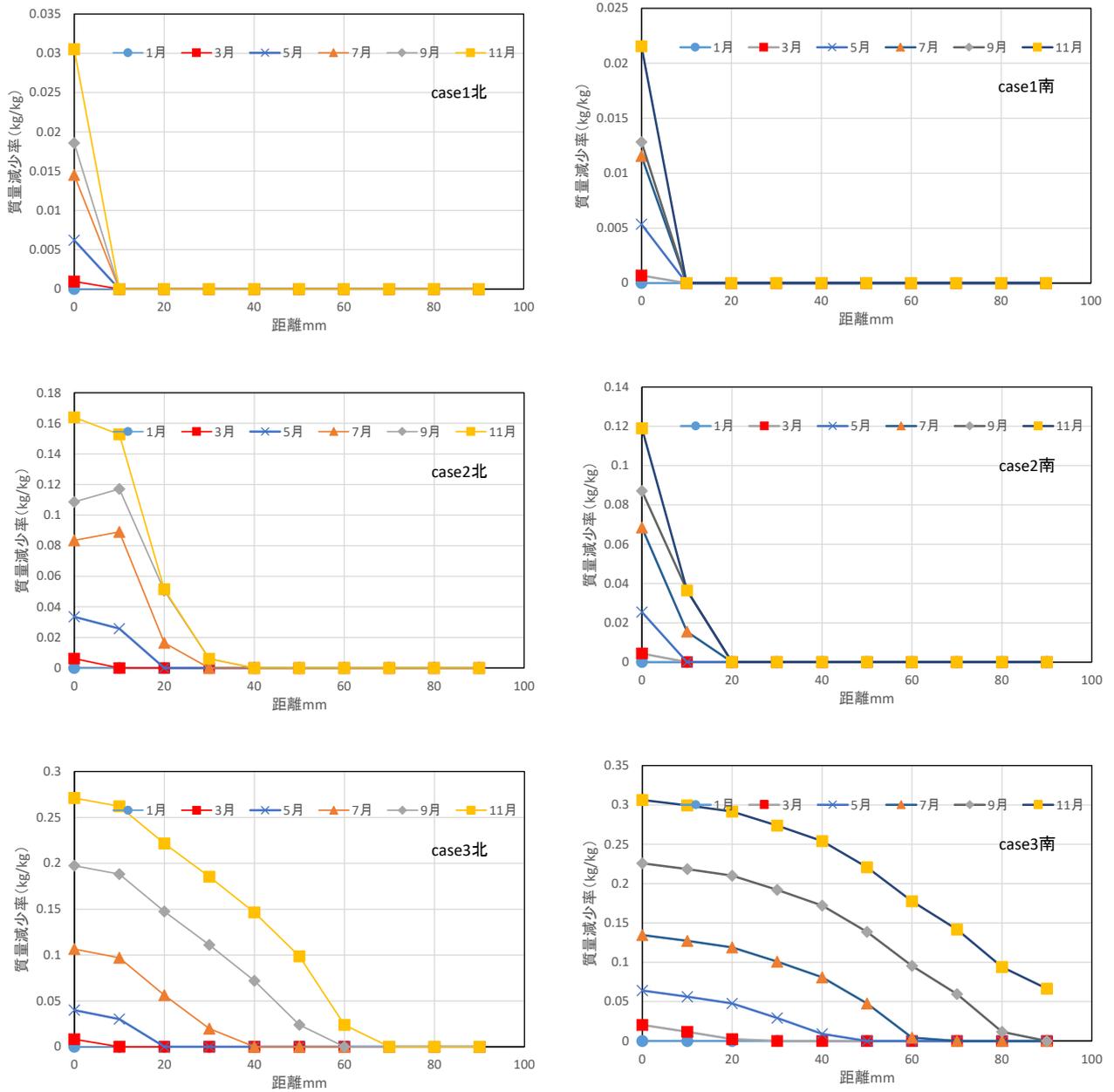


図 6.2.8 質量減少率の断面分布

記号

J_w : 浸水量 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
 μ : 水分化学ポテンシャル (J/kg)
 φ : 体積含水率 (m^3/m^3)
 T : 温度 (K)
 X : 絶対湿度 ($\text{kg}/[\text{kg}/\text{kgDA}]$)
 α' : 湿気伝達率 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{skg}/\text{kgDA}$)
 α : 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
 t : 時間 (s)
 R_h : 水平面雨量 (mm/h)
 R_w : 壁面雨量 (mm/h)

r : 潜熱 (J/kg)
 Q : 換気量 (m^3/s)
 ρ : 材料密度 (kg/m^3)
 ρ_w : 水の密度 (kg/m^3)
 ρ_a : 空気密度 (kg/m^3)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)
 λ' : 水分伝導率
 c : 比熱 (J/kgK)
 f : 浸水率 (%)

g : 重力加速度 (m/s^2)
 V : 体積 (m^3)
 添字
 μ : 水分化学ポテンシャル
 T : 温度
 g : 水蒸気

文献

- 1) O. Schmidt (2007) : Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control *Mycological progress*, 6, 261-279 (2007)
- 2) 水本晋 (1958) : コゲイロカイガラタケ及びその近似種に関する研究 (第XVI報) コゲイロカイガラタケ, ヒロハノキカイガラタケ, キチリメンタケ及びキカイガラタケの胞子の発芽に関する2,3 の実験 *日林誌* 40,7, 293-298
- 3) Sanford M. Zeller (1921) : Humidity in Relation to Moisture Imbibition by Wood and to Spore Germination on Wood *Annals of the Missouri Botanical Garden* Vol. 7, No. 1, pp. 51-74
- 4) Toole. E. (1971) : Germination of spores of wood decay fungi on wood *Phytopathology*, 61 (1) , 88-90.
- 5) 土居修一ら (1982) : ナミダタケ生育条件の検討 *木材誌* 28 (11) ,733-739
- 6) 鈴木大隆ら (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 *日本建築学会環境系論文集* 73、627号、591-597
- 7) 木材工業ハンドブック改訂4版: 森林総合研究所監修 2004丸善 P786より抜粋
- 8) 同上:P787及びP795
- 9) 笹谷宜志 (1987) 樹幹内における抽出成分の分布と堆積 (第II報) : カラマツ樹幹のフェノール成分: 北大農演報 44 (4) 1417-1434
- 10) 酒井温子ら 木材腐朽菌 12 菌株に対する木材保存剤の防腐効力 (公社) 日本木材保存協会 第30回年次大会研究発表論文集 26-27 (2014.5)
- 11) 神戸睦史、石川廣三: 下地木材と接触する金属製屋根葺き板の耐食性に関する実験、日本建築学会学術講演梗概集 A-1 分冊、p.771-772、2014.9
- 12) 塗装/亜鉛系めっき鋼板の異種金属接触さび防止方法、社団法人 日本鉄鋼連盟
www.jisf.or.jp/info/book/docs/isyukinzoku.pdf アクセス日: 2016年2月27日
- 13) 防蟻・防腐剤による透湿防水シートへの影響について
<https://www.ntba.jp/info-2/06/>
- 14) 木材工業ハンドブック改訂4版 森林総合研究所監修 2004丸善 P58
- 15) 田中勝吉: 木材の断面方向と吸水率の関係、林学会雑誌第38号、1926
- 16) 蕪木自輔他2名: 日本産主要樹種の性質、物理的性質 (第2報) 東北・中部・中国および四国地方産材の吸水量測定、林業試験場研究報告第216号
- 17) 齋藤昇: 木材の吸水について、木材繊維に直角な方向からの吸水、日本建築学会論文報告集第60号、1958
- 18) 石川廣三: 木材の吸水速度および部分的に吸収された水分の乾燥速度の異方性について、日本建築学会学術講演梗概集 A-1 分冊、p.1005-1006、2006.9
- 19) Luis Candanedo 他1名: Numerical simulation of water absorption in softwood, Building

simulation 2005, 9th, International IBPSA Conference, Montreal

- 20) 小倉武夫：木材の乾燥機構に関する研究第3報 木材水分の蒸発速度について、林業試験場研究報告第51号、ほか
- 21) 小森清志他4名：木材の吸放湿特性に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集第40号、2002、ほか
- 22) 山崎亭史：木材と水の関係、林産試だより、2012.12
- 23) 斎藤昇、上林博雄：木材腐朽進行定量化の試み、日本建築学会論文報告集第63号、pp.9-12、1959.10
- 24) Hannu A. Viitanen: Modelling the Time Factor in the Development of Brown Rot Decay in Pine and Spruce Sapwood –The Effect of Critical Humidity and Temperature Conditions、Holzforschung Vol.51, pp.96-106, 1997.
- 25) Mostafa Nofal、Kumar Kumaran : On Implementing Experimental Biological Damage-Functions Models in Durability Assessment System, Proceedings of Japan-Canada Housing R&D Experts Working Group Meeting Building Envelope, pp.111-124, 2000.
- 26) B. Blocken, J. Carmeliet: Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory, Building and Environment Vol.45, pp.691-703, 2010
- 27) 齋藤宏昭：雨水浸入を考慮した屋根の水分性状の予測と劣化事例の解析、日本建築学会第44回熱シンポジウム「役に立つ湿気研究」、pp.61-68、2014年10月
- 28) 齋藤宏昭、福田清春、澤地孝男、大島明：水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル 建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その1、日本建築学会環境系論文集、第630号、pp.971~978、2008.