

熱水分同時移動について

2019年2月23日 第8回Modelicaライブラリ勉強会 kinonotofu



熱水分同時移動とは

多孔質材料（ガラスや金属以外）での湿気移動計算では熱水分同時移動計算を行う。

水分の相変化により温度が変化し、温度差により表面張力が変化して液水の駆動力が発生するなど相互に影響を及ぼしているためである。相対湿度が95%以下で液相の移動が無視できる領域をHygroscopic域と呼ぶが、その場合でも湿気移動計算が熱伝導計算から独立するわけではない。また、重力による水分の移動への影響が小さい（無視できる）場合のみを扱うことが多い。

内容

- 概要
- 計算目標
- 熱水分同時移動計算式
- 物性値の近似式
- 絶対湿度の微分
- 熱水分同時移動モデルの実装
- 計算結果の確認

まだ完成していないので
途中までです。

概要

■湿気移動計算ができるライブラリが見つからなかったので作る

ドイツのフラウンホーファー建築物理研究所でWUFIというソフトを開発しているが、無償版は湿気の計算ができない。日本でも尾崎明仁先生の研究室がTherbというソフトを作っていたが、現在公開はされていなさそう。他にH&Mという有償ソフトなどもある。

■熱水分同時移動計算の経験はないので試行錯誤する

湿気移動の計算式はいくつかの計算モデルがあるようだが、とりあえず下記の参考文献の式（含水率を水分の駆動力とする）を実装してみて感覚をつかむ。本来は水の化学ポテンシャルを駆動力としたほうが熱力学的に厳密になるらしい。

■Buildingsライブラリを使えるところは使う。

熱伝導計算モデル(Buildings.HeatTransfer.Conduction)を参考にする。

■参考文献

- [1] 建築環境学2 木村建一編 丸善 1993年 「12章 熱水分同時移動」（絶版）
- [2] エース建築環境工学II 鉾井修一・池田哲朗・新田勝通著 朝倉書店 2002年 「III編 湿気」
- [3] 結露障害防止に関する基礎的研究 池田哲朗 1979年 博士論文
<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/74884>

概要

使用時はパスに日本語が含まれないように注意。Buildingsライブラリを読み込んでから、MoistureTransport直下のpackage.moを読み込む。

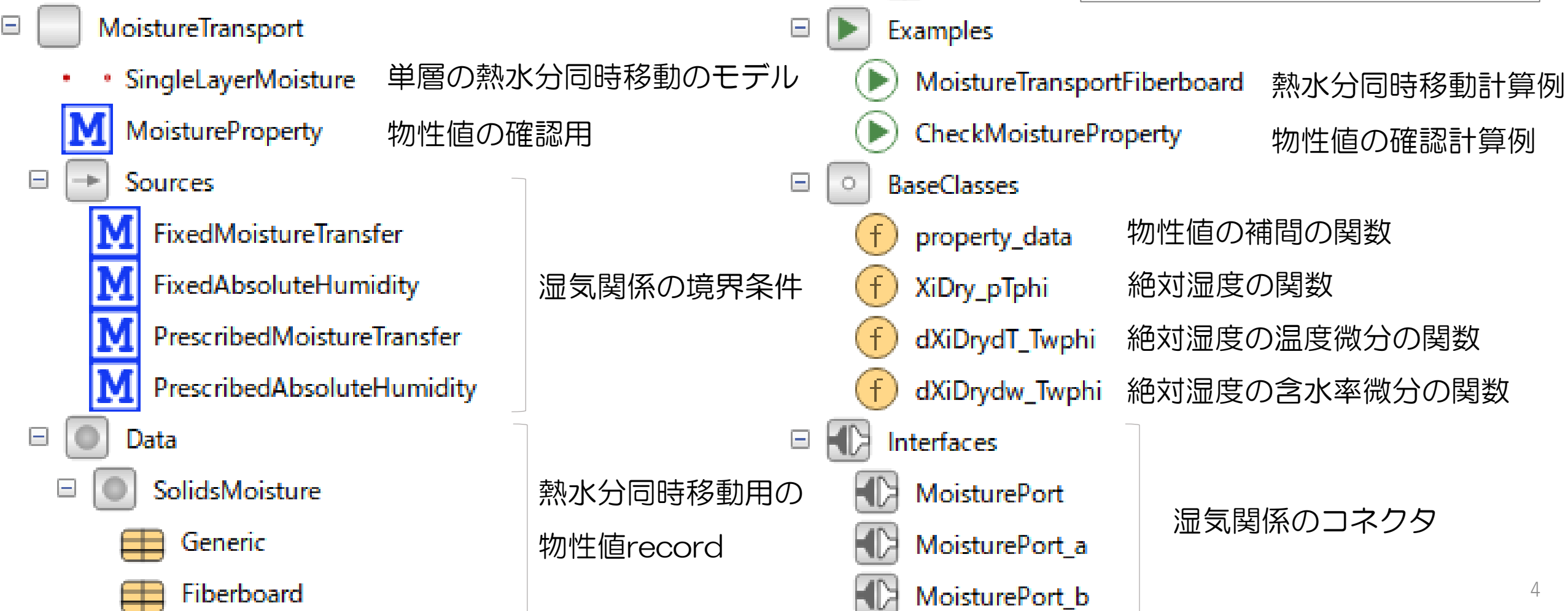
テスト環境

Windows10 64bit

OpenModelica 1.13.1

Modelica標準ライブラリ 3.2.2

Buildings 5.1.0



計算目標

参考文献[1] のテストケースを用いて計算の確認を行う。

題材の詳細は参考文献[3]にある軟質繊維版の熱水分同時移動の実験。

板は8つの層に分割、時間幅は5/1000hで350h程度計算。

乾球温度20.5°C、絶対湿度11.54g/kg(DA)

軟質繊維板
厚み8mm

初期条件

温度T：定常

含水率w：10重量%

乾球温度9.6°C、断湿

比熱c	1840J/kg·K
材料密度 ρ	240kg/m ³
空気密度 ρ_a	1.205kg/m ³
水密度 ρ_w	1000.0kg/m ³
空隙率a	0.65m ³ /m ³
熱伝達率 α	34.9W/m ² · K
湿気伝達率 α'	0.045kg/m ² · h · g/kg(DA)

熱水分同時移動計算式

今回は以下の方程式を解くことになる。λが熱伝導率、Sが孔の表面積、Lが水の蒸発潜熱、Xが絶対湿度、 X_i が気液平衡時の絶対湿度、 k_v が湿気伝導率、 D_{wl} や D_{Tl} は液水の拡散係数。

熱伝導方程式

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L\alpha'_i S(X - X_i)$$

水蒸気の輸送方程式

$$\alpha\rho_a\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_v \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \alpha'_i S(X_i - X)$$

液水の輸送方程式

$$\rho_w\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{wl} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tl} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \alpha'_i S(X_i - X)$$

熱水分同時移動計算式

$X=X_i$ として瞬時平衡を仮定し、 X は温度と含水率の関数になることなどを利用すると以下のようなになる。詳細は参考文献[1]や[2]を参照。四角で囲んだ部分は含水率や温度の関数になる。

実際に解く式（独立変数は温度 T と含水率 w の2つ）

$$\left(c\rho + La\rho_a \frac{\partial X}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + La\rho_a \frac{\partial X}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + L \left(D_{wv} \frac{\partial w}{\partial x} + D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\}$$
$$(\rho_w + a\rho_a) \frac{\partial X}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial t} + a\rho_a \frac{\partial X}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

境界条件

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - L \left(D_{wv} \frac{\partial w}{\partial x} + D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha(T_r - T_s) - L \left(D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$
$$-D_w \frac{\partial w}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha'(X_r - X_s)$$

物性値の近似式

湿気に関わる物性値は定数として扱えないことが多く、近似式を使用する必要がある。

参考文献のグラフを見ながら使用する近似式の妥当性を確認する。

今回の実装ではBuildingsライブラリのPCMの計算を参考にしてエルミートスプライン補間で行う。

プロットデータは <https://apps.automeris.io/wpd/> を使用して取得する。

計算するのは以下の4つのパラメータで全て含水率をパラメータとしている。

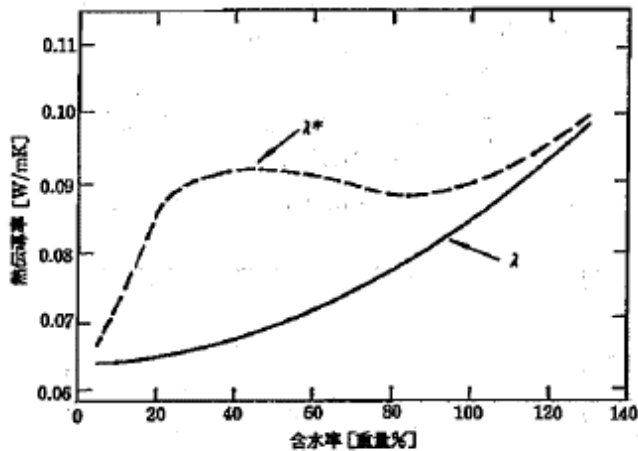


図 12.11 熱伝導率 λ^* の含水率による変化¹⁸⁾

①熱伝導率

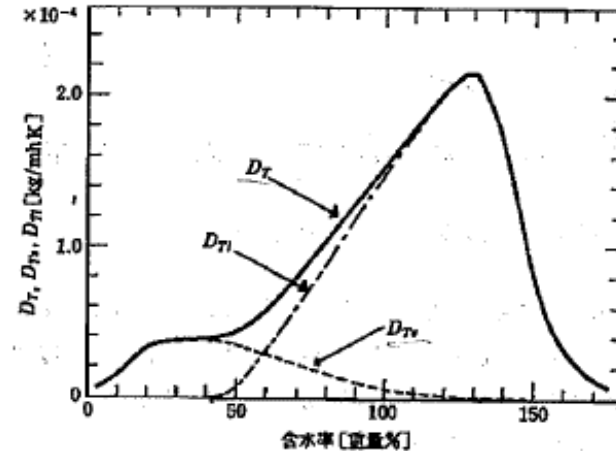


図 12.9 温度勾配による水分拡散係数 D_T, D_{Ti}, D_{Tv} ³⁾

②温度勾配による
湿気拡散係数

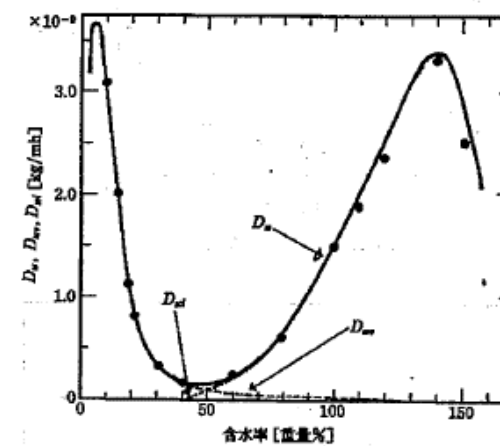


図 12.8 含水率勾配による水分拡散係数 D_w, D_{wi}, D_{wv} ³⁾

③含水率勾配による
湿気拡散係数

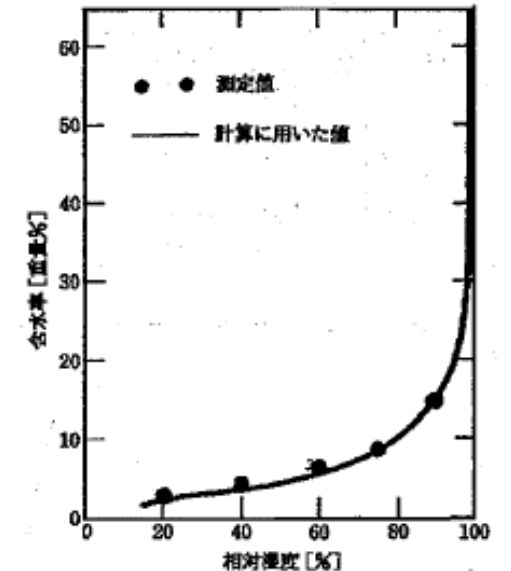
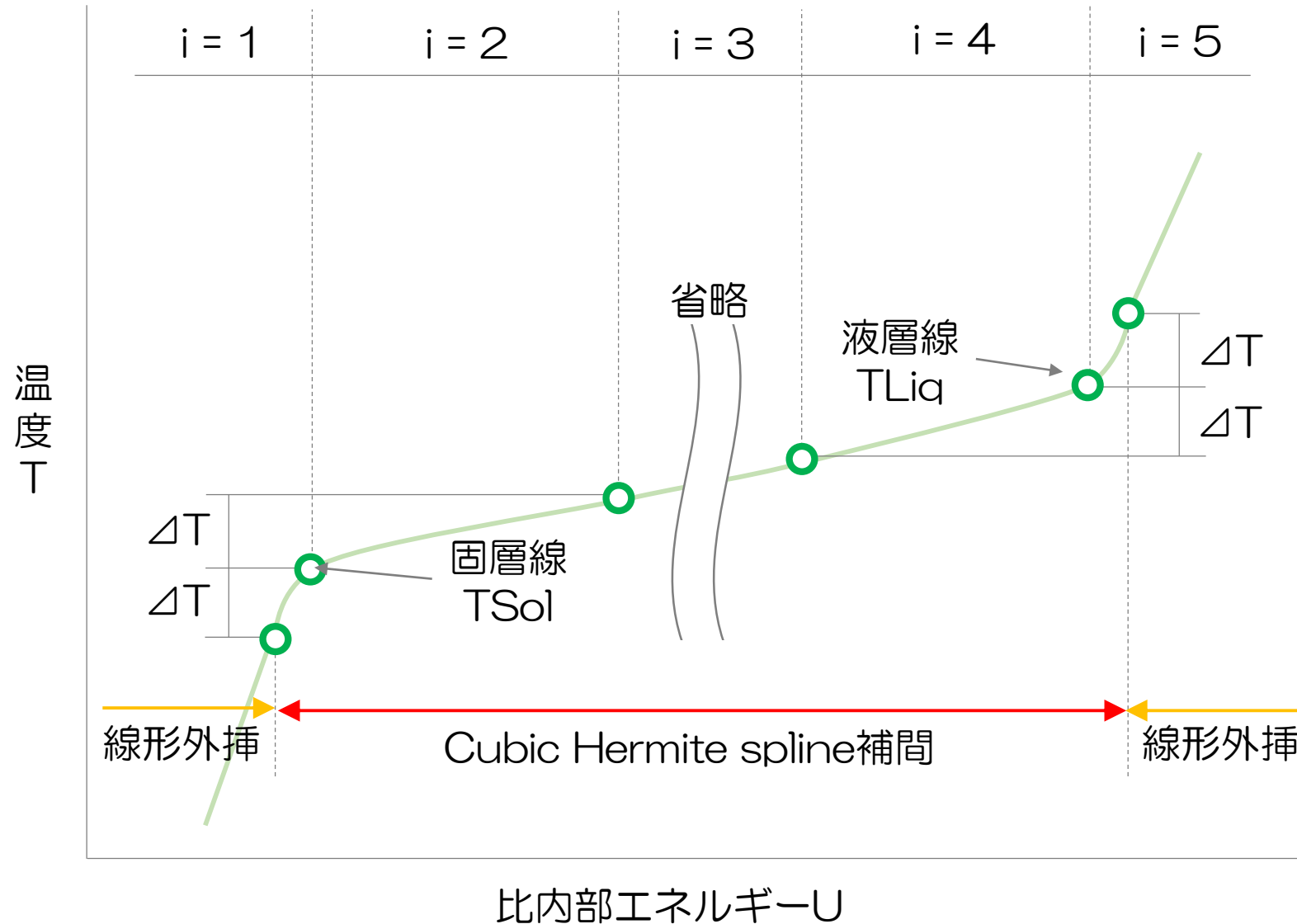


図 12.10 平衡含水率³⁾

④平行含水率曲線
(相対湿度)

[参考]BuildingsライブラリのPCMの計算



PCMの計算ではエルミート補間の部分の外は線形外挿になっている。今回は同じ方法を用いるので補間の端の2点の間隔は細かいほうが良い。

物性値の近似式

熱水分同時移動計算を行う物質の物性値をまとめたrecordを作っておく。

MoistureTransport.Data.SolidsMoisture.Generic（自分で入力）

MoistureTransport.Data.SolidsMoisture.Fiberboard（今回のデータ）

Buildingsの熱伝導の物性値をベースに必要なパラメータを追加する。

a	<input type="text" value="0.65"/>	1	Porosity
kd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	W/(m.K)	Thermal conductivity at the support points
wd_kd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points
DTd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	kg/(m.h.K)	Diffusion coefficient of water due to temperature gradient at the support points
wd_DTd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points
DTvd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	kg/(m.h.K)	Diffusion coefficient of vapor due to temperature gradient at the support points
wd_DTvd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points
Dwd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	kg/(m.h)	Diffusion coefficient of water due to water content at the support points
wd_Dwd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points
Dwvd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	kg/(m.h)	Diffusion coefficient of vapor due to water content at the support points
wd_Dwvd	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points
phid	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Relative humidity at the support points
wd_phid	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5}"/>	1	Water content at the support points

物性値の近似式

物性値の補間は以下の関数で行う。

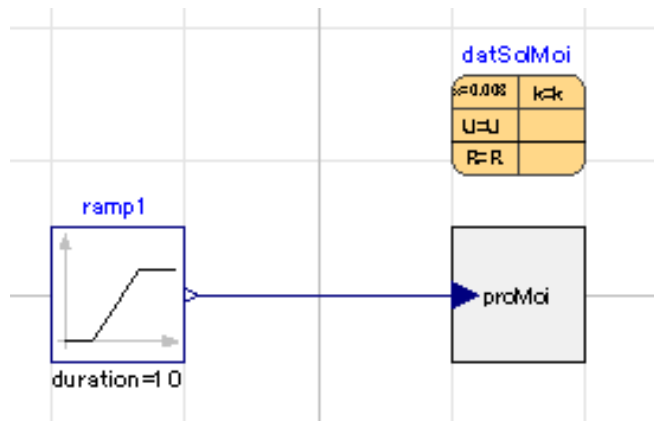
MoistureTransport.BaseClasses.property_data

保管した物性値のチェック用のモデル

MoistureTransport. MoistureProperty

MoistureTransport.Examples.CheckMoistureProperty (実行ファイル)

含水率を変化させて物性値をチェックする。ClockがOpenModelicaで使えない？のでrampで入力する。



絶対湿度の微分

計算に当たって絶対湿度の温度勾配と含水率勾配を計算する必要がある。

Buildingsライブラリでは絶対湿度の扱いがややこしく、
水蒸気質量 / (乾き空気質量 + 水蒸気質量)
となっていないか注意する必要がある。ここで扱うのは
水蒸気質量 / 乾き空気質量
の絶対湿度である。

①含水率から相対湿度を求める。(先程の近似式を使用する) $w \rightarrow \phi$

②圧力(大気圧)と温度と相対湿度から絶対湿度を求める。 $p, T, \phi \rightarrow X$
MoistureTransport.BaseClasses.XiDry_pTphi

③温度や含水率をわずかに変化させたときの絶対湿度の変化量を求めてそれぞれ勾配を計算する。
温度勾配

MoistureTransport.BaseClasses. dXiDrydT_Twphi

$$\frac{\partial X}{\partial T}$$

含水率勾配

MoistureTransport.BaseClasses. dXiDrydw_Twphi

$$\frac{\partial X}{\partial w}$$

現在は温度は0.01K、含水率は1%変化させている。

- 熱水分同時移動モデルの実装

実装中

計算結果の確認

このような図と比較する予定。

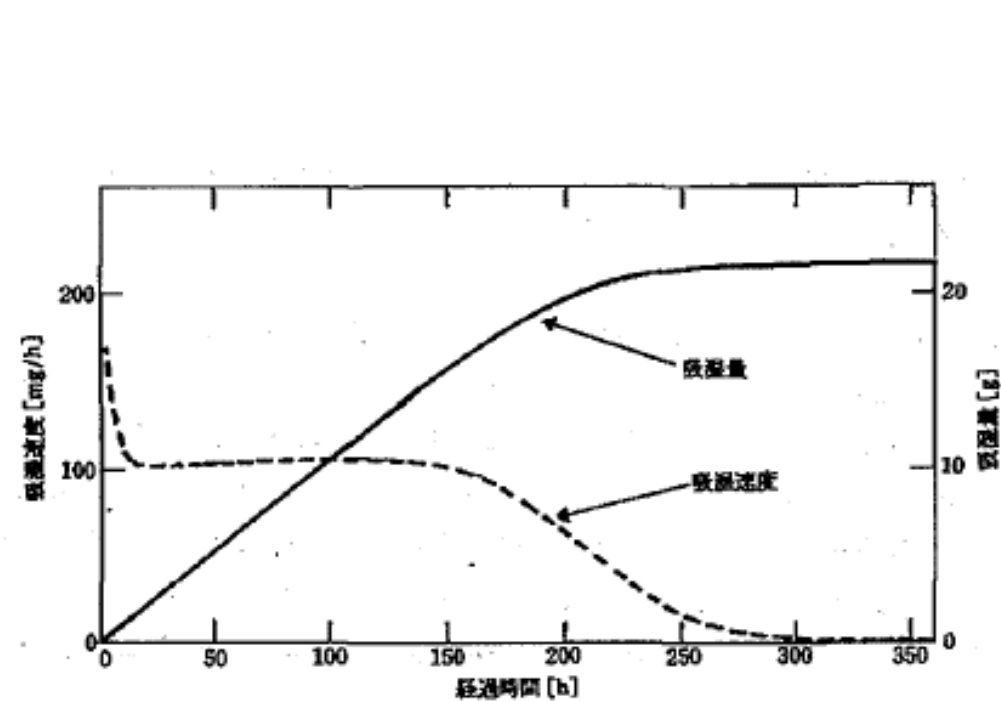


図 12.14 吸湿量と吸湿速度²⁾

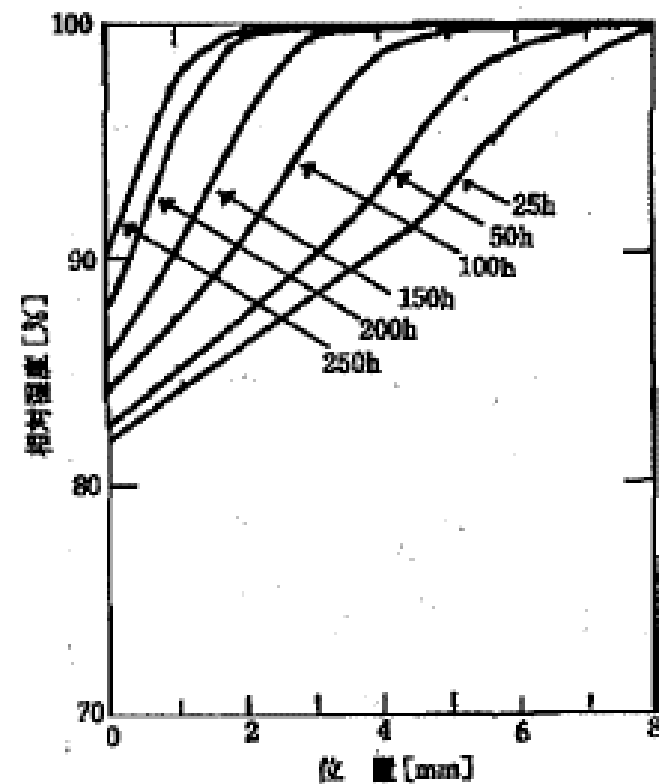


図 12.15 材料内相対湿度分布³⁾

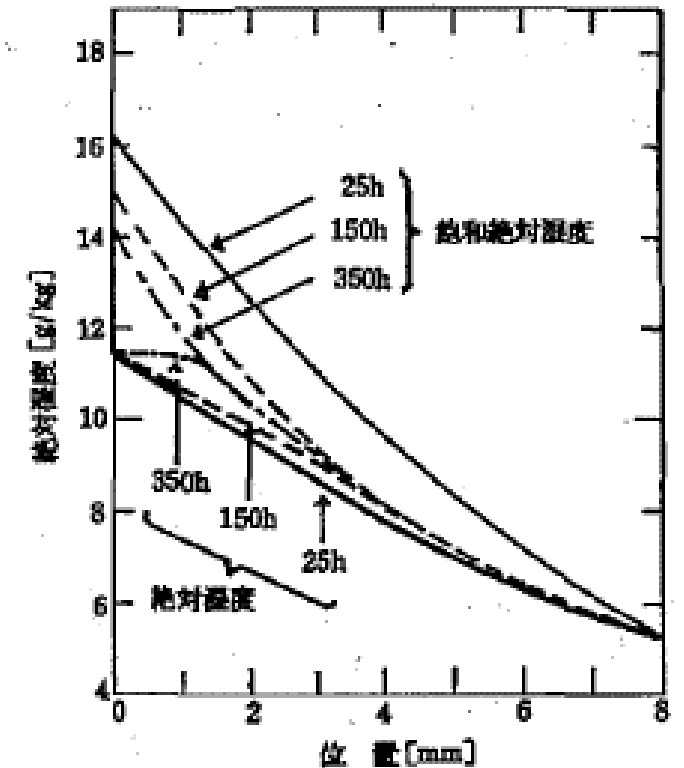


図 12.16 材料内飽和絶対湿度分布と絶対湿度分布³⁾

計算結果の確認

このような図と比較する予定。

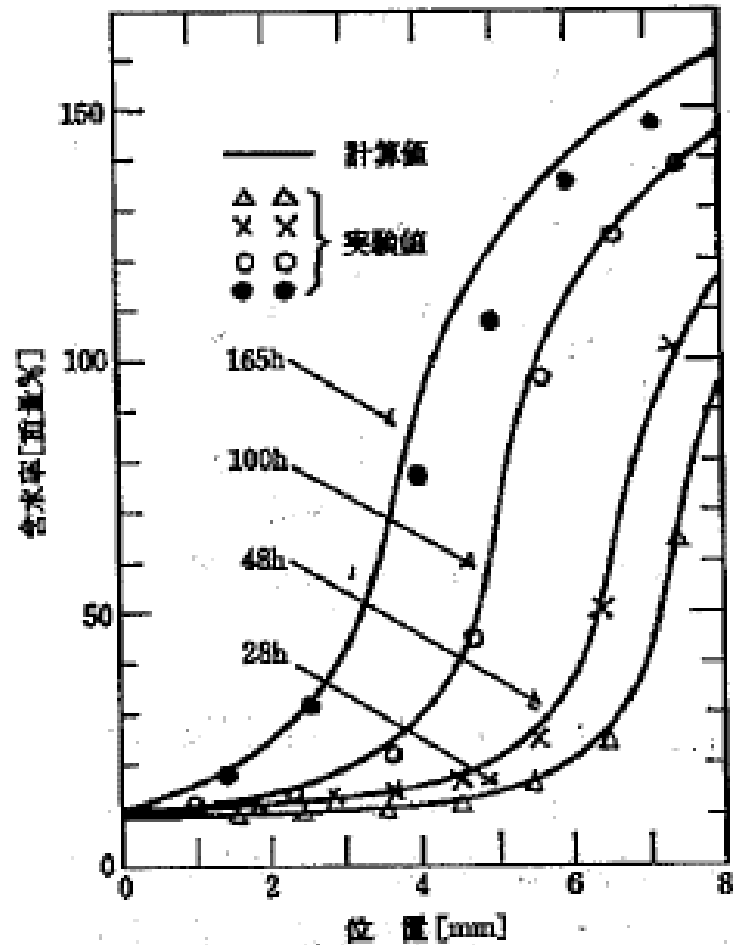


図 12.12 材料内含水率分布³⁾

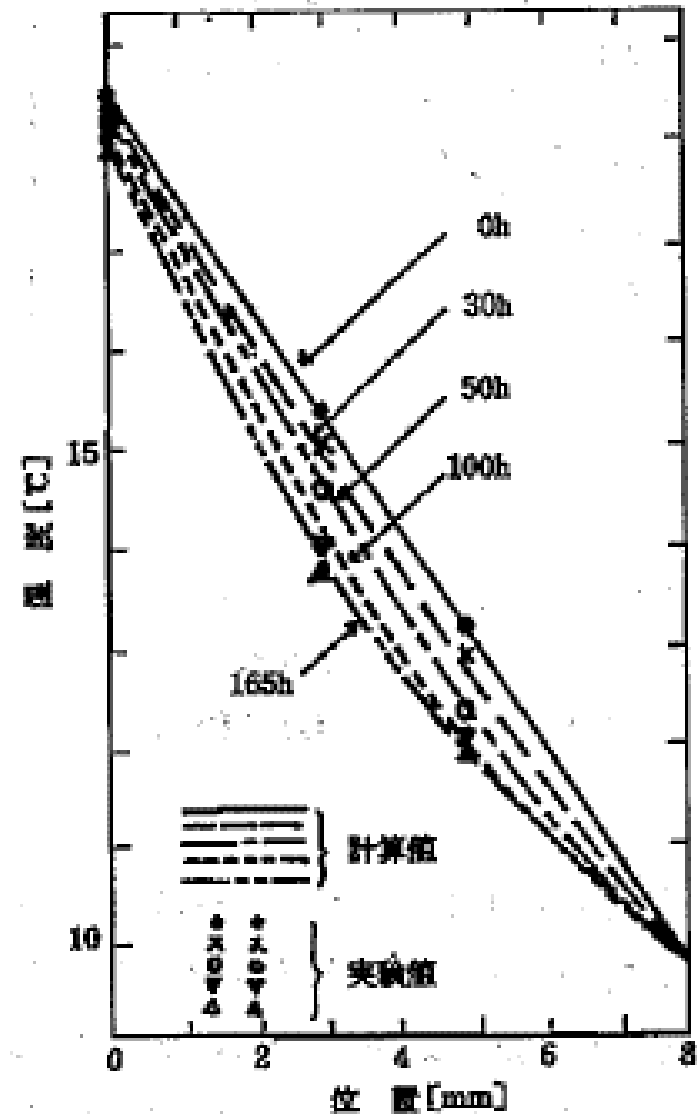


図 12.13 材料内温度分布³⁾

まとめ

とりあえず実装を続けていく。

物性値データを手に入れるのが大変なので（一応参考文献に実測方法は書いてある）、
物性値をそろえやすい別の計算モデルがあればそちらに切り替えるかもしれない。