

HASP の非定常熱負荷計算

(4) 理論・熱応答編

<目次>

1. 非定常熱負荷計算の基礎	1
(1) 用語	1
(2) 定常と非定常と周期定常	1
(3) 熱貫流率と貫流応答	2
(4) 畳み込み演算	2
(5) 項別公比	3
(6) 熱取得から時間遅れを伴って連続空調負荷へ	3
(7) 吸熱応答	4
(8) 蓄熱応答係数	4
2. 熱負荷計算／連続空調負荷から除去熱量へ	5
2-1 励振～熱取得～連続空調負荷～除去熱量	5
2-2 熱平衡式と除去熱量・室温湿度変動	5
(1) 除去熱量に関わる変数	5, 6
(2) Δ 波の熱平衡式	5, 6
(3) $\angle$ 波の熱平衡式 (運転開始時・外気導入開始時・運転停止時の計算)	7
(4) 室温湿度の変動量	8
(5) 蓄熱熱流・蓄熱負荷の計算	8
3. シミュレーションモードによる除去熱量と室温湿度の計算	9
(1) 運転停止中の計算 (Δ 波)	9
(2) 運転開始時の計算 ($\angle$ 波)	9
(3) 継続運転中の計算 (Δ 波)	10, 11
(4) 外気導入開始時の計算 ($\angle$ 波)	10, 11
(5) 運転停止時の計算 ($\angle$ 波)	12
(6) 室温変動の計算	12
(7) 蓄熱熱流と蓄熱負荷の計算	12
4. ピークモードの除去熱量の計算	13
(01) ピークモードの反復計算の仕組み	13
(02) 未知数の除去熱量のまでの予熱中の計算	14
(1) 予熱開始時・直前の計算 (Δ 波)	15
(2) 予熱開始時・直後の計算 ($\angle$ 波)	15
(3) 室温変動量	15, 16
(4) 蓄熱熱流の計算	15, 16
(5) 継続予熱中の計算 (Δ 波)	17, 18
(6) 予熱途中の外気導入の計算 ($\angle$ 波)	17, 18
(7) 予熱終了時／未知数の除去熱量を求める <A 方式> <N 方式> <予熱開始前に戻る>	19
(8) シミュレーションモードに戻って／予熱州・予熱完了時・予熱終了後の計算	20
5. 応答係数を求める理論	21
(1) 非定常熱伝導の微分方程式をラプラス変換して伝達関数を求める	21
<微分方程式>, <ラプラス変換>, <多層壁への展開>, <ステップ応答と伝達関数>	21-23
【補足 1】基礎方程式から伝達行列を導く	24
【補足 2】貫流応答 ψ_T の相反則	26
(2) 逆変換してステップ応答を求める	27
【補足 3】 A_i, α_i を決定するための正規方程式の導き方	28
(3) ステップ応答から Δ 波応答を求める	29, 30
<項別公比法による Δ 波の熱応答の解>	29, 30
<熱応答の総和が熱貫流率と一致するかの検証> <貫流応答と吸熱応答>	31
(4) 直角 $\angle$ 波応答を求める	31, 32
<項別公比法の解> <熱貫流率と一致するかの検証>	31, 32
< $\angle$ 波応答の修正> < $\angle$ 波応答の修正解> <修正解が熱貫流率と一致するかの確認>	33, 34
6. 冷房負荷重み係数 と 蓄熱応答係数	35
(1) 室内放射伝熱の基礎式	35
(2) 重み係数の標準形	36
<蓄熱応答の解> <重み係数の標準形>	36
<貫流熱伝達と内表面での熱授受の関係> <3つの解法の式>	37
(3) 冷房負荷重み係数と蓄熱応答係数	38
<冷房重み係数の伝達関数>	38
<直熱応答係数の伝達関数> <各部位の伝達関数の組み込み>	38
<ラプラス逆変換して冷房重み係数と蓄熱応答係数を求める>	39
(5) 窓と隙間風による蓄熱応答係数の補正	39

(つづく)

(目次つづき)

7. 任意の時間間隔にするためのプログラムの変更	40
7-1 任意の時間間隔の△波と∠波応答を求めるためのプログラム変更	40
(1) 熱応答の理論(復習)	40
(2) sub. CPARAM に計算時間間隔を追加	41
(3) call CPARAM 文の修正	42
(4) 任意の時間区分の項別公比の検証 (20180604 版の結果による)	42
7-2 照明の重み係数の修正	44
(1) 元々の HASP の照明の重み係数の項別公比	44
(2) 任意の時間区分に対応するための照明の sub_CAL_WF_for_LIGHT を追加	45
(3) 照明の重み係数の検証 (20180604 版の結果による)	46

本解説書は、次の(0)～(5)編の全6編からなります。(細部を見直し Ver. 2025-1110 としてあります)

(0) 導入編	Ver. 2025-1110
(1) 実行編	Ver. 2025-1110
(2) 入力編	Ver. 2025-1110
(3) 理論・基本編	Ver. 2025-1110
(4) 理論・熱応答編	Ver. 2025-1110
(5) 補足編	Ver. 2025-1110

本解説書は、次のプログラムに基づいて執筆しています。(細部を見直し Ver. 2025-1015 としてあります)

ACLD_HEX60_InputSheet. xslm	Ver. 2025-1015
HASP_input60. exe	Ver. 2025-1015
ACLD_HEX60. exe	Ver. 2025-1015
HASP_zone60. exe	Ver. 2025-1015
4つの Graph. xslm	Ver. 2025-1015
NewHASP_3_InputSheet. xslm	Ver. 2025-1015
NewHASP_3. exe	Ver. 2025-1015

<参考資料>

イ) SHASE 雑誌講座動的熱負荷計算法. pdf	⇒ (DATA¥Reference¥)
ロ) 空調設備の動的熱負荷計算入門. pdf	⇒ (DATA¥Reference¥)
ハ) HASP-ACLD-8501 解説. pdf	⇒ (HASP¥HASP-ACLD-8501¥Doc¥)
ニ) HASP-ACLD-8501 プログラミングメモ. pdf	⇒ (HASP¥HASP-ACLD-8501¥Develop¥Note¥)
ホ) NewHASP アルゴリズム. pdf	⇒ (HASP¥NewHASP-ACLD¥Develop¥Note¥)
ヘ) NewHASPACLD 操作マニュアル. pdf	⇒ (HASP¥NewHASP-ACLD¥Doc¥)

<本解説書の執筆者>

猪岡達夫 (元日建設計、元中部大学教授)

<修正>

- ・ 20250716 p. 19 式(4-11)A (誤) $Hx = (t_R - t_{Rq}) / (1 - f_{Rx})$ (正) $Hx = (t_R - t_{Rq}) / f_{Rx}$
式(4-11)N (誤) $Hx = (t_{R\triangle} - t_{Rq\triangle}) / (1 - f_{Rx\triangle})$ (正) $Hx = (t_{R\triangle} - t_{Rq\triangle}) / f_{Rx\triangle}$

1. 非定常熱負荷計算の基礎

(1) 用語

- ・外乱 気温、日射量などの時間変化して熱負荷を生じさせる要因を外乱と言います。
- ・励振 (Excitation) 気温、湿度、SAT、日射、内部発熱など熱の発生する元を励振と言います。
- ・熱取得 (HG : Heat Gain) 励振から時間遅れを伴って室内に侵入した状態の熱流を熱取得 (HG) と言います。内部発熱についても、例えば、照明を on にしても直ちに熱になるのではなく、時間遅れを伴って熱取得となります。なお、熱取得はまだ熱負荷ではありません。
- ・連続空調負荷 (CL : Cooling Load) 例えば、外壁から室に侵入した熱取得のうち対流成分は空気に伝達されて熱負荷になります。一方、輻射成分は他の壁面に輻射され吸収され、その壁体の温度を上昇させ、時間遅れを伴って室内に流入します。この時、対流成分は熱負荷となり、輻射成分は他の壁面に輻射され、更に時間遅れを伴って室内に流入します。これを繰り返します。
HASP では対流によって室内に伝達された熱流を熱負荷と言います。また、室内が基準温湿度一定として計算しますので、連続空調負荷と呼びます。
- ・除去熱量 (HE : Heat Extraction) 連続空調負荷は空調の条件によらない建物固有の負荷と言えます。一方、空調の on/off スケジュール (間欠空調) や空調の能力 (装置容量) の制限や、季節毎の設定温湿度などの制約の下で、空調装置が実際に処理する熱負荷が除去熱量です。
- ・室温湿度変動と蓄熱負荷 空調停止時や空調の能力不足で熱負荷を処理しきれない状態を“過負荷”と言います。過負荷になると室温湿度は所定の条件を維持できなくなり変動します。室温湿度の変動自身が励振となって熱流が生じ、建物の壁や床などに蓄熱されます。その熱の一部は室外に出て行きますが、大部分は時間遅れを伴って室内へ再放熱されます。この時間遅れを伴って室内に再放熱される熱を蓄熱負荷と言います。

(2) 定常と非定常と周期定常

- ・定常熱負荷計算 定常とは安定な状態、あるいは変化しない状態を言います。手計算のピーク熱負荷計算では、このような定常で、外気温湿度や日射が同じ条件でずっと続くような状態で計算します。
 ※ このような条件で熱負荷を計算すると、実際にはあり得ない過大な熱負荷になってしまいます。手計算法では過大にならないように気象データに超過確率を考慮するなどの工夫をしています。
 ※ 手計算でも外壁の熱負荷では時間遅れを見込んだ ETD (実効温度差) を用います。なお、この ETD は、コンピュータで時間遅れを計算した熱負荷から逆算して外気温湿度差に換算したものです。
- ・非定常熱負荷計算 温度や湿度や日射量、在室人数も照明の点灯も機器類の使い方などは時間と共に変化します。このような状態を非定常と言います。非定常熱負荷計算を手計算ですることは無理ですので、コンピュータを使って計算します。
 ※ ALCD_HEX60 や NewHASP/ACL D は非定常熱負荷を計算するためのプログラムです。
- ・周期定常熱負荷計算 空調設計用の熱負荷計算です。気温や日射量や熱負荷が 1 日周期 (あるいは 1 週間周期など) で変化するのが周期定常です。周期定常といっても、時々刻々の励振は変化しますから、計算の中身は非定常熱負荷計算です。周期定常熱負荷計算では、解が安定するまで、反復計算をして、周期定常の解とします。
 ※ この周期定常に用いられるピーク気象データは、実際の気象データから、気温・湿度・日射の同時性などを考慮して抽出したものです。なお、冷房用と暖房用があり、また、超過確率で数種類の気象データが用意されています。

(3) 熱貫流率と貫流応答

- ・熱貫流率とは、壁体の熱の通しやすさのことです。単位は $[W/(m^2\text{℃})]$ 、つまり、面積当たり・温度差 1℃ 当たり・時間当たりの、壁体を通り抜ける熱量が熱貫流率です。

- ・定常では、熱貫流率の値は1つの値で、式(1-1)は熱貫流率を使った定常の熱負荷計算の式です。

$$q = K \cdot \Delta t \quad (1-1)$$

1)

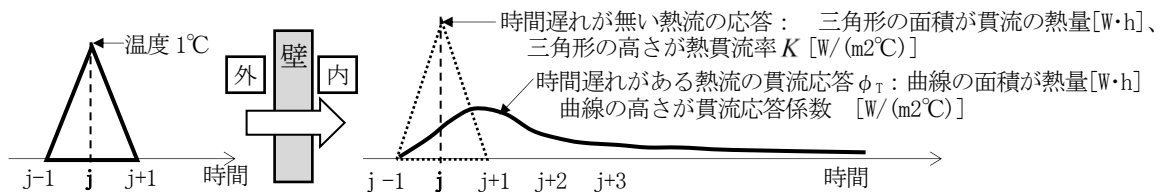
ここに、 q は熱負荷 $[W/m^2]$ 、 K は熱貫流率 $[W/(m^2\text{℃})]$ 、 Δt は内外温度差 $[℃]$ です。

- ・実際は、内外に温度差が生じて直ぐには熱は伝わらず、時間をかけてゆっくりと熱が伝わってきます。非定常熱負荷計算では式(1-2)のように計算します。 $\phi_{T(0)}, \phi_{T(1)}, \phi_{T(2)}, \phi_{T(3)} \dots$ を貫流応答係数と言います。

$$\begin{aligned} q_j &= \phi_{T(0)} \cdot \Delta t_j \\ q_{j+1} &= \phi_{T(1)} \cdot \Delta t_j \\ q_{j+2} &= \phi_{T(2)} \cdot \Delta t_j \\ q_{j+3} &= \phi_{T(3)} \cdot \Delta t_j \\ &\vdots \end{aligned} \quad \dots (1-2)$$

ここに、 j は現在の時刻、 Δt_j は j 時刻における内外の温度差、 $\phi_{T(k)}$ は貫流応答係数 $[W/(m^2\text{℃})]$ 、で $k=0, 1, 2, 3 \dots$ の時系列で値を持ちます。 q が $j \dots$ の時間遅れを伴う貫流の熱取得 $[W/m^2]$ です。

- ・下図の左側は高さが 1℃ 、底辺が 2h の△波の励振です。面積は 1℃h になります。右側は、時間遅れがないと点線の△波の熱取得になります。この破線の△波の面積がちょうど熱貫流率 K になります。
- ・時間遅れがある場合の熱取得は曲線になります。熱取得は初め 0 ですが、だんだん大きくなってやがて 0 に戻ります。この応答の曲線の面積もちょうど熱貫流率 K $[W/(m^2\text{℃})]$ に一致します。

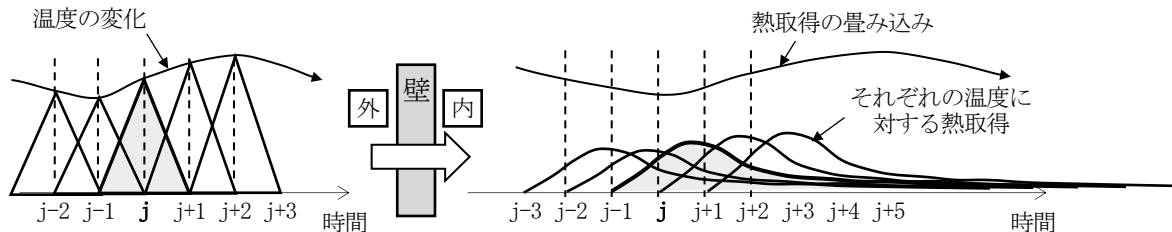


- ・熱貫流率 K と貫流応答係数 ϕ_T の関係は式(1-3)になります。貫流応答係数の和が熱貫流率と一致します。つまり、貫流応答係数とは時系列で値をもつ熱貫流率と言えます。

$$K = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_{T(k)} \quad \dots (1-3)$$

(4) 畳込み演算

- ・内外の温度差に△波を採用すると時間変化を滑らかに近似できます。温度×貫流応答係数で熱取得ですが、これを時刻毎に集計すれば、変化する温度による貫流の熱取得を求めることができます。



- ・これを△波を使って式で表すと次のようになります。このような計算を“畳込み演算”といいます。

$$HG(j) = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_{T(k)} \Delta t_{(j-k)} \quad \dots (1-4)$$

ここに、 $HG(j)$ ：時刻 j の貫流の熱取得（ここからは記号に HG を使うことにします。

$\phi_{T(k)}$ ： $k=0 \sim \infty$ の時系列を持つ貫流応答係数、 $\Delta t_{(j-k)}$ ：過去から現時刻 j までの温度差

(5) 項別公比

- ・式(1-4)の畳込み演算は無限級数になっています。しかし、いかにコンピュータといえども無限回数の計算はできません。実際の非定常熱負荷計算では、ある項以降は等比数列とみなして計算します。
- ・更に、HASP では、より合理的な式(1-5)に示す項別公比法を使います。

$$\begin{aligned} HG_j &= \Delta t_j P_0 + S_1 + S_2 \\ S_1^* &= \Delta t_j P_1 + S_1 R_1 \\ S_2^* &= \Delta t_j P_1 + S_2 R_2 \end{aligned} \quad (1-5)$$

ここに、 HG_j ：時刻 j の熱取得、 Δt_j ：時刻 j の内外温度差（励振）、 P_0, P_1, P_2 ：項別の係数、 R_1, R_2 ：項別公比、 S_1, S_2 ：過去～現在までの時間遅れを伴う熱流、 S_1^*, S_2^* ：時刻 j に更新された時間遅れの熱取得で次の時刻に S_1, S_2 となります。

※ HASP では応答係数を 2 項で近似しています。2 項はそれぞれが等比数列になります。これを利用すると、式(1-5)のように畳込み演算が簡単になります。2 項を合成すると△波応答になりますが、△波応答では式(1-2)で途中から等比数列にしても畳込み演算の計算量が増えます。

- ・式(1-5)の第 2 式と第 3 式は、 P_1, P_2 を初項とし R_1, R_2 を公比とする等比数列であることを利用しています。掛算 5 回、足算 4 回だけで、式(1-4)の無限回数の計算と同等です。（項別公比については→5 章(3) (4)）

※ 項別公比 P_0, P_1, P_2, R_1, R_2 から△波の貫流応答 ϕ_T を求めると次のようになります。

$$\begin{aligned} \phi_{T(0)} &= P_0 \\ \phi_{T(1)} &= P_1 + P_2 \\ \phi_{T(2)} &= P_1 \cdot R_1 + P_2 \cdot R_2 \\ \phi_{T(3)} &= P_1 \cdot R_1^2 + P_2 \cdot R_2^2 \\ \phi_{T(4)} &= P_1 \cdot R_1^3 + P_2 \cdot R_2^3 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1-6)$$

(6) 熱取得から時間遅れを伴って連続空調負荷へ

- ・式(1-2)、式(1-4)、式(1-5)は熱取得です。まだ、熱負荷ではありません。
- ・右下図は、熱取得から時間遅れを伴って熱負荷になるまでの模式図です。
室内に侵入した熱取得のうち対流成分は直ちに熱負荷になりますが、輻射成分は室内の他の壁面に熱放射され、その部位の温度が上昇し、（一部は外部に逃げて行きますが）大部分は時間遅れを伴って室内に再放熱されます。再放熱のうち対流成分は熱負荷となり、輻射成分は室内の他の壁面に熱放射され、その部位の温度が上昇し、（一部は外部に逃げて行きますが）大部分は時間遅れを伴って室内に再放熱されます。・・・これを繰り返します。

- ・計算式にすると次式(1-7)になります。

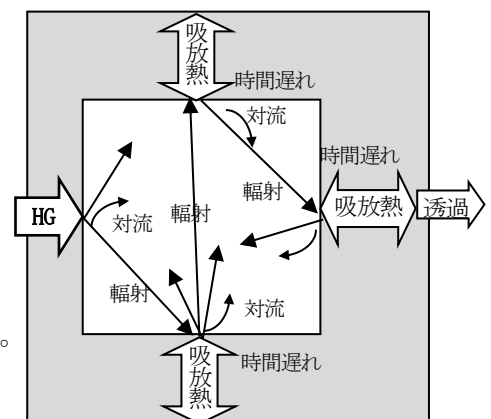
$$\begin{aligned} CL_{(j)} &= HG_{C(j)} + HG_{R(j)} P_0 + S_1 \\ S_1^* &= HG_{R(j)} P_1 + S_1 R_1 \end{aligned} \quad (1-7)$$

ここに、 P_0, P_1 ：冷房負荷重み係数（1 項近似の無次元数）、
 R_1 ：公比

- ・式(1-7)で、 $CL_{(j)}$ が現時刻 j の熱負荷（連続空調負荷）です。
 $HG_{C(j)}$ は時刻 j の熱取得の対流成分で即時に熱負荷になります。
第 2 項の $HG_{R(j)}$ は時刻 j の熱取得の輻射成分で、これに冷房負荷重み係数 P_0 を掛けた成分が即時に熱負荷になります。

第 3 項の S_1 は過去の熱取得の時間遅れで、時刻 j に熱負荷になる成分です。

式(1-7)の 2 行目の右辺の $HG_{R(j)}$ は第 1 式の $q_{R(j)}$ と同じですが、 P_1 を掛けると時間遅れの成分になります。第 2 項の S_1 は第 1 式の S_1 と同じですが、公比 R_1 を掛けると更なる時間遅れとなり、かつ、過去の全ての時間遅れ成分が畳み込まれたことになります。



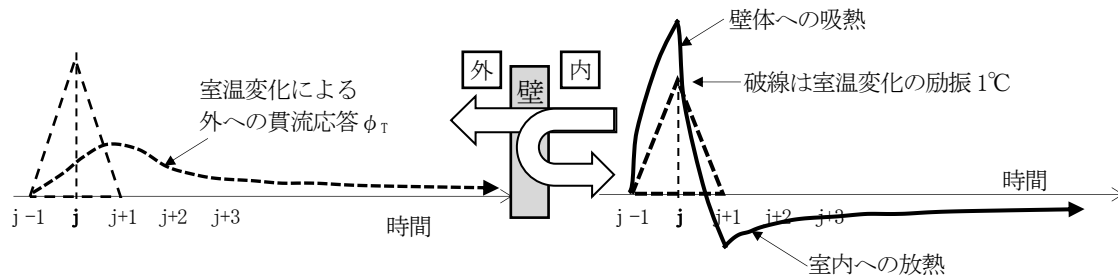
※ 冷房負荷重み係数は吸熱応答の再放熱部分なので、HASP では P_0, P_1, R_1 の 1 項近似で簡略になっています。

(7) 吸熱応答

- これまでの貫流応答は、室内が一定条件で外界が変動した場合の熱流でした。逆に、外界が一定条件で、室内の温湿度が変化する場合の熱流は下図のようになります。
- 室温が変動すると壁体に熱が吸熱（ $\Leftarrow$ ）され、壁体は温度が上昇します。壁体の温度が上昇すると、一部は外に逃げていきますが、大部分は時間遅れを伴って室内へ逆流して放熱（ $\Rightarrow$ ）されます。
- 下図右の曲線が吸熱応答です。時刻 $j-1$ の 0 から始まり、時刻 j で吸熱が最大になります。以後の吸熱は小さくなり、+から-に逆転して放熱に転じます。放熱は時刻 $j+1$ で最大になり以後徐々に 0 に戻ります。この吸熱と放熱を合わせて吸熱応答と言います。
- 吸熱応答を ϕ_A とすると、その+ (吸熱) と- (放熱) を相殺した総和は熱貫流率 K に等しくなります。

$$K = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_{A(k)} = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_{T(k)} \quad \cdots (1-7)$$

※室内励振による外への貫流応答 ϕ_T は、外部の励振による室内への貫流応答 ϕ_T と大きさも形も全く同じになります。なお、内→外への貫流応答は非定常熱負荷計算では計算しません。



- 外界の励振による貫流応答と、室内の励振による吸熱応答とを重ね合わせることで、外界と室内が同時に変化した状態が再現されます。
- 前(6)の冷房負荷重み係数は、室全体の部材の吸熱応答を組み込んで算定したものです。次ぎの(8)の蓄熱応答係数は室全体の部材の吸熱応答+室の熱容量を組み込んで算定したものです。(⇒6章)

(8) 蓄熱応答係数

- 間欠空調では空調停止時間は室温湿度が変動します。あるいは空調運転中でも空調能力が不足する時は室温湿度が変動します。これにより吸熱応答が生じ、壁体に熱が蓄積され、時間遅れを伴って室内へ再放熱されるのが蓄熱熱流（蓄熱負荷）です。この蓄熱負荷を含めて空調で処理する熱が除去熱量です。
- 蓄熱熱流（蓄熱負荷）の計算は先の吸熱応答に他なりません。なお、床・壁・天井・梁・柱などの室全体の吸熱応答の他に、〈FURN〉で入力した室の熱容量（室の空気や家具や什器や書類などの熱容量で結構大きい）の吸熱応答を加えたものが蓄熱応答係数です。(⇒6章)

<△波の吸熱応答>

- 空調の運転開始時や外気導入時や空調停止時では運転が不連続に変化します。この不連続を計算するために蓄熱応答係数には、通常の△波の他に∠波（実際は右向きの直角三角波）を使います。蓄熱応答係数は次の4種になります。

△波の蓄熱応答係数：(顕熱) $WF_{S0}, WF_{S1}, WF_{S2}, CR_{S1}, CR_{S2}$ 、(潜熱) $WF_{L0}, WF_{L1}, WF_{L2}, CR_{L1}, CR_{L2}$

∠波の蓄熱応答係数：(顕熱) $WF_{S0\Delta}, WF_{S1\Delta}, WF_{S2\Delta}, CR_{S1\Delta}, CR_{S2\Delta}$ 、(潜熱) $WF_{L0\Delta}, WF_{L1\Delta}, WF_{L2\Delta}, CR_{L1\Delta}, CR_{L2\Delta}$

(本書では△波には添え字なし、∠波には添え字 ∠ を使って区別することになります)

※本書では記号に WF を使いますが、これは蓄熱応答係数を室温変動の重み係数と言っていた頃の名残です)

※HASP/ACSS/8502 では 0～8 項の蓄熱応答係数と公比を使っています。ACLD_HEX60 で項別公比に改めました。

2. 熱負荷計算／連続空調負荷から除去熱量へ

2-1 励振～熱取得～連続空調負荷～除去熱量

- ・HASP 系のプログラムは、計算過程を大きく 4 つに分けることができます。0) 前処理計算、1) 熱取得の計算、2) 連続空調負荷計算、3) 間欠空調での除去熱量や室温湿度変動や蓄熱負荷の計算です。

0) 前処理： 入力データを読み込み、応答係数や冷房負荷重み係数や蓄熱応答係数を求めます。また、1 日毎に気象データを読み込み、時刻毎に太陽位置を計算するのが前処理です。

1) 熱取得の計算： 外壁の貫流熱、窓の貫流や日射熱、隙間風などの室内に侵入する熱や、内部発熱などの熱ですが、HASP ではこの段階の熱を熱取得と言います。

2) 連続空調負荷計算： HASP では室内に対流で伝わった成分を熱負荷と言います。輻射成分は室内で相互輻射され、時間遅れを伴って対流で伝わった成分が熱負荷です。対流成分は更に室内で相互輻射され時間遅れを伴って・・・延々と繰り返します。
熱取得に、冷房負荷重み係数を畳み込んで、熱負荷を求めます。この段階までは、室内温湿度は基準温湿度で一定とするので、この熱負荷を連続空調負荷と言います。

3) 除去熱量の計算： 空調の運転スケジュールや外気の導入スケジュールや装置容量を与条件として、室温湿度変動や除去熱量を求めます。更に、室温湿度変動により発生する蓄熱負荷を求めます。
蓄熱負荷は、室内温湿度を励振として、蓄熱応答係数で畳み込み計算して求めますが、この畳み込み演算を特に、逆畳み込みと言います。

※1) と 2) は本書の (4) をご覧下さい。

- ・かつて、ACLD/ACSS では、HASP/ACLD/8501 で、熱取得から連続空調負荷までを 1 年間計算し、その後に、連続空調負荷の結果を受けて、HASP/ACSS/8502 で、空調システムと連動して 1 年間の除去熱量や空調システムでのエネルギー消費量を求める計算をしていました。
- ・NewHASP/ACLD や、ACLD_HEX60 は、1 日毎に、前半の熱取得と連続空調負荷の計算をして、この 1 日分の連続空調負荷を受けて、後半の除去熱量の計算をしています。

※NewHASP/ACLD や ACLD_HEX60 では、1 日分の熱取得から連続空調負荷までを計算して、これを受けて 1 日分の除去熱量の計算をして、これを 1 年分繰り返します。

1 時間毎 (あるいは時間区分した場合は 1 時分毎) に、連続空調負荷と間欠空調を繰り返すように計算することも可能ですが、こうするためにはプログラム構造を大きく変える必要があります。

2-2 熱平衡式と除去熱量・室温湿度変動

- ・ここでは、後章の 3 章と 4 章で共通に使われる、(1) 除去熱量の熱平衡式、(2) 室温湿度の変動、(3) 蓄熱熱流・蓄熱負荷の説明を先におきます。

(1) 除去熱量に関わる変数

- ・熱負荷計算の前半が連続空調負荷 CL の計算で、後半はこれを受けて除去熱量と室温湿度変動を計算します。以下に熱平衡式を説明しますが、その前に、本章で使う変数を示しておきます。
なお、 $\angle$ の添字が付いているのは $\angle$ 波の変数です。 $\triangle$ 波の変数には添え字を省いています。

CL_S, CL_L	連続空調負荷は、熱負荷計算の前半で求められている既知の値
ST_S, ST_L	過去の室温湿度変動による蓄熱熱流の 1 項目が蓄熱負荷
t_0, x_0	外気温度 [°C] と外気絶対湿度 [g/kg]
t_B, x_B	<BUIL> で入力した基準温湿度で、連続空調負荷を計算するときの仮の室温湿度
t_R, x_R	実現される室温と室温 ($\triangle$ 波) <未知数>
$t_{R\angle}, x_{R\angle}$	実現される室温と室温 ($\angle$ 波) <未知数>

HE_S, HE_L	除去熱量の顕熱および潜熱（△波）＜未知数＞
$HE_{S\Delta}, HE_{L\Delta}$	除去熱量の顕熱および潜熱（∠波）＜未知数＞
$cp\gamma, R\gamma$	空気の容積当たりの比熱と水蒸気の容積当たりの蒸発潜熱
$G_{OA}, G_{OA\Delta}$	外気量（△波と∠波）
WF_S, WF_L	顕熱および潜熱の蓄熱応答係数の第0項目（△波）
$WF_{S\Delta}, WF_{L\Delta}$	顕熱および潜熱の蓄熱応答係数の第0項目（∠波）

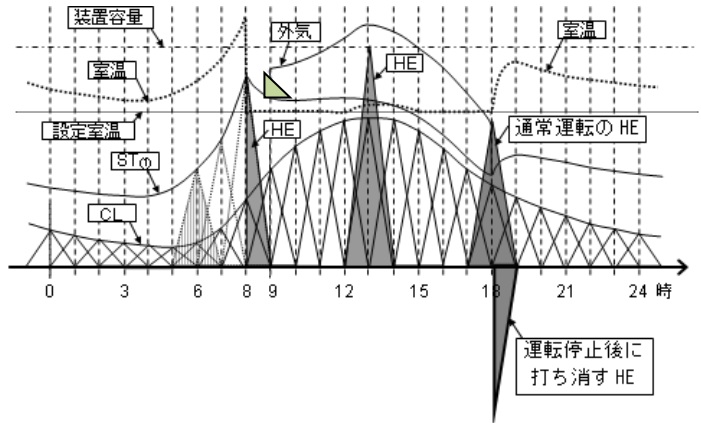
なお、 $WF_S = WF_{S0} + \Delta WF_S$ 、 $WF_L = WF_{L0} + \Delta WF_L$
 $WF_{S\Delta} = WF_{S0\Delta} + \Delta WF_S$ 、 $WF_{L\Delta} = WF_{L0\Delta} + \Delta WF_L$
 $WF_{S0}, WF_{S0\Delta}$ 、 $WF_{L0}, WF_{L0\Delta}$ 蓄熱応答係数の第0目です。（項別公比の $P_0, P_{0\Delta}$ ）
 $\Delta WF_S, \Delta WF_L$ ：隙間風とブラインドの開閉による蓄熱応答係数0項目の補正項です。

※ $\Delta WF_S, \Delta WF_L$ は本来 $WF_{S0}, WF_{S0\Delta}$ や $WF_{L0}, WF_{L0\Delta}$ に含まれるべきものですが、これらは室の使い方で値が変化することと時間遅れが無視できるとして、後付けで補正します。

(2) △波の熱平衡式

- 右図の0～6時および19～24時は継続停止中で、9～17時は継続運転中です。これらの時間では△波で計算しますが、これが計算の基本になります。

- 8時は運転開始時、9時は外気導入開始時、18時は運転停止時です。このような時刻では、同じ時刻に2度計算します。直前を△波で計算して、直後を∠波で計算します。



- 式(2-1)に△波の熱平衡式を示します。

上段が顕熱の熱平衡式（添え字が $_S$ ）、下段が潜熱の熱平衡式（添え字が $_L$ ）です。

時刻 j は式が煩雑になるので省いています。

$$\begin{aligned} CL_S + ST_S + WF_S(t_B - t_R) + cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R) &= HE_S \\ CL_L + ST_L + WF_L(x_B - x_R) + R\gamma G_{OA}(x_O - x_R) &= HE_L \end{aligned} \quad (2-1)$$

- 式(2-1)の△波の熱平衡式には、熱負荷計算に関係する全ての要素が登場します。
- 左辺の第1項が連続空調負荷 CL_S, CL_L 、第2項が過去の室温湿度変動による蓄熱負荷 ST_S, ST_L 、第3項が室温湿度変動による吸熱応答、第4項が外気負荷です。これらと右辺の除去熱量 HE_S, HE_L が釣り合うという式です。
- 第3項は、基準温湿度 t_B, x_B と室温湿度 t_R, x_R との差に蓄熱応答係数の第0項目の WF_S, WF_L を乗じたもので、室内側の励振による吸熱応答そのものです。
基準温湿度 (t_B, x_B) と室温湿度 (t_R, x_R) との差を取っていますが、室温湿度変動とは連続空調負荷 (CL_S, CL_L) を計算した基準温湿度 (t_B, x_B) からの変動、という意味です。
- 運転停止中は、除去熱量が $HE_S = 0, HE_L = 0$ です。外気量も $G_{OA} = 0$ で、室温湿度 t_R, x_R を求めます。
- 運転中は、室温湿度に設定温湿度(季節毎に変わる)を与えて、除去熱量 HE_S, HE_L を求めます。
なお、装置容量が不足していると室温湿度 t_R, x_R が変動します。

(3) 波の熱平衡式（運転開始時・外気導入開始時・運転停止時の直後の計算）

- ・上図の8時は運転開始時（運転状態が off→on）、9時は外気導入開始時（外気量が off→on）、18時は運転停止時（on→off）、外気量（on→off）、これらの時間では不連続に変化します。
- ・不連続な時刻では直前（変化前）の状態を△波で計算して、直後（変化後）の状態を波で計算します。同じ時刻に2度計算するわけですが、直後（変化後）は直前（変化前）からの変動分の補正です。
- ・直後の波の熱平衡式を式(2-2)に示します。式(2-2)では、直前から変化した要素で式を立てます。

$$\begin{cases} WF_{S\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) - Q_{OA,S} = HE_{S\Delta} - HE_S \\ WF_{L\Delta}(x_R - x_{R\Delta}) + R\gamma G_{OA\Delta}(x_O - x_{R\Delta}) - Q_{OA,L} = HE_{L\Delta} - HE_L \end{cases} \quad (2-2)$$

- ・ $t_R, x_R, Q_{OA,S}, Q_{OA,L}, HE_S, HE_L$ は直前の結果で、既知の値です。
- ・ $Q_{OA,S}, Q_{OA,L}$ は直前の△波の外気負荷で $Q_{OA,S} = cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R)$, $Q_{OA,L} = R\gamma G_{OA}(x_O - x_R)$ です。
- ・ 式(2-2)には、 CL_S, CL_L や ST_S, ST_L がありませんが、これらは直前の△波で計算済で、直前の室温湿度 t_R, x_R に反映されています。

＜室温＞ 左辺第1項は室温湿度変動による吸熱応答です。蓄熱応答係数に△波の $WF_{S\Delta}, WF_{L\Delta}$ を使います。直後の室温湿度差は $t_{R\Delta}, x_{R\Delta}$ と直前の既知の室温湿度 t_R, x_R との差を取っています。このことから△波は、直前の△波の t_R, x_R を基準にして t_R, x_R からの変化を表していることが分かります。

＜外気負荷＞ 状況に応じて代入する値を変えます。

- ・ 式(2-2)の第2項は直後の△波の外気負荷、第3項は直前の△波の外気負荷です。
- ・ 運転開始時は、直前が $G_{OA} = 0 \rightarrow$ 直後が $G_{OA\Delta} = \langle \text{OPCO} \rangle$ です。（外気導入前なら直後も $G_{OA\Delta} = 0$ です）
- ・ 外気導入開始時は、直前が $G_{OA} = 0 \rightarrow$ 直後が $G_{OA\Delta} = \langle \text{OPCO} \rangle$ での外気導入量
- ・ 運転停止時の直後は $G_{OA\Delta} = 0$ です。直前の外気負荷は既知で、これを $-Q_{OA,S}, -Q_{OA,L}$ で打ち消します。

＜除去熱量＞ 状況に応じて代入する値を変えます。

- ・ 運転開始時ならば、直前は $HE_S = 0, HE_L = 0$ です。
- ・ 運転継続中での外気導入開始時ならば、直前と直後で除去熱量が変化するはずですが。これを式(2-2)では、 $-HE_S, -HE_L$ として打ち消すことで△波の左半分を残します。直後に新たに△波の $HE_{S\Delta}, HE_{L\Delta}$ を投入します。
- ・ 運転停止時ならば、直後の△波は $HE_{S\Delta} = 0, HE_{L\Delta} = 0$ です。直前の△波の除去熱量は既知の値でこれを $-HE_S, -HE_L$ として打ち消します。

※ $-Q_{OA,S}, -Q_{OA,L}$ や $-HE_S, -HE_L$ で打ち消すことで、 $\Delta - \Delta$ （実際は右向き） $\Rightarrow \Delta$ （左向き）が残ります。

※ACL_D_HEX60 では、直後の計算式は式(2-2)のように、直前の△波から変化した要素で式を立てています。

よって、△波の室温変動は、直前の△波の室温湿度 t_R, x_R からの変動量になります。

ほかに、△波でも△波と同じ基準室温湿度 t_B, x_B をベースにした計算式にすることもできます。

なお、直前の△波の右半分を打ち消すのですが、数値は全て既知の値になっているので、結局は式(2-2)と同じことになります。

(4) 室温湿度の変動量

- ・熱平衡式(2-1)～式(2-2)によって△波と∠波の室温湿度を得てから、下式(2-3)で変動量を求めます。この変動量を次の(5)の蓄熱熱流の計算に使用します。

△波では、連続空調負荷の基準室温湿度 (t_B, x_B) と実現された室温湿度 (t_R, x_R) の差が変動量です。

∠波では、直前の△波の室温湿度 (t_R, x_R) からの∠波の室温湿度 ($t_{R\Delta}, x_{R\Delta}$) の差が変動量です。

$$\left. \begin{array}{l} \text{△波の室温湿度の変動量} \quad \Delta t_R = t_B - t_R \\ \quad \quad \quad \Delta x_R = x_B - x_R \\ \text{∠波の室温湿度の変動量} \quad \Delta t_{R\Delta} = t_R - t_{R\Delta} \\ \quad \quad \quad \Delta x_{R\Delta} = x_R - x_{R\Delta} \end{array} \right\} \quad (2-3)$$

- ・運転や停止が継続し外気量も変化しない時刻では△波のみを計算し、∠波は計算しません。このような場合の∠波の室温湿度は $t_{R\Delta} = t_R, x_{R\Delta} = x_R$ であり、∠波の室温湿度の変動量は $\Delta t_{R\Delta} = 0, \Delta x_{R\Delta} = 0$ です。

(5) 蓄熱熱流・蓄熱負荷の計算

- ・各時刻の△波と∠波の室温湿度変動の $\Delta t_R, \Delta t_{R\Delta}, \Delta x_R, \Delta x_{R\Delta}$ が決まると蓄熱熱流の計算に移ります。
- ・蓄熱熱流は吸熱応答と同じです。下式(2-4s)および式(2-4L)のように過去の室温湿度変動による蓄熱熱流に新たな蓄熱熱流を重ね合わせます。
- ・式(2-4S)、式(2-4L)の重ね合わせも畳み込み演算ですが、励振が室内で逆向きの熱の流れなので、“逆畳み込み演算”といいます。
- ・△波と∠波は別々に求め、また項別公比なので項別毎に求め、最後に式(2-5)で合算します。

$$\begin{array}{ll} <\text{△波の顕熱の蓄熱熱流}> & <\text{∠波の顕熱の蓄熱熱流}> \\ ST_{S1}^* = ST_{S1} \times CR_{S1} + \Delta t_R \times WF_{S1} & ST_{S1\Delta}^* = ST_{S1\Delta} \times CR_{S1\Delta} + \Delta t_{R\Delta} \times WF_{S1\Delta} \end{array} \quad (2-4S)$$

$$ST_{S2}^* = ST_{S2} \times CR_{S2} + \Delta t_R \times WF_{S2} \quad ST_{S2\Delta}^* = ST_{S2\Delta} \times CR_{S2\Delta} + \Delta t_{R\Delta} \times WF_{S2\Delta}$$

$$\begin{array}{ll} <\text{△波の潜熱の蓄熱熱流}> & <\text{∠波の潜熱の蓄熱熱流}> \\ ST_{L1}^* = ST_{L1} \times CR_{L1} + \Delta x_R \times WF_{L1} & ST_{L1\Delta}^* = ST_{L1\Delta} \times CR_{L1\Delta} + \Delta x_{R\Delta} \times WF_{L1\Delta} \\ ST_{L2}^* = ST_{L2} \times CR_{L2} + \Delta x_R \times WF_{L2} & ST_{L2\Delta}^* = ST_{L2\Delta} \times CR_{L2\Delta} + \Delta x_{R\Delta} \times WF_{L2\Delta} \end{array} \quad (2-4L)$$

ここに、 $\Delta t_R, \Delta t_{R\Delta}$ 室温の変動量です。(△波と∠波)
 $WF_{S1}, WF_{S2}, WF_{S1\Delta}, WF_{S2\Delta}$ 顕熱の項別の蓄熱応答係数です。(△波と∠波)
 $CR_{S1}, CR_{S2}, CR_{S1\Delta}, CR_{S2\Delta}$ 顕熱の項別公比です。

※ 項別公比は△波と∠波は同じで $CR_{S1} = CR_{S1\Delta}, CR_{S2} = CR_{S2\Delta}$ です。

$ST_{S1}, ST_{S2}, ST_{S1\Delta}, ST_{S2\Delta}$ 過去の室温変動による項別の蓄熱熱流 (△波と∠波)

$ST_{S1}^*, ST_{S2}^*, ST_{S1\Delta}^*, ST_{S2\Delta}^*$ 新たな蓄熱熱流が畳み込まれた項別の蓄熱熱流です。

$\Delta x_R, \Delta x_{R\Delta}$ 室温湿度の変動量です。(△波と∠波)

$WF_{L1}, WF_{L2}, WF_{L1\Delta}, WF_{L2\Delta}$ 潜熱の項別の蓄熱応答係数です。(△波と∠波)

$CR_{L1}, CR_{L2}, CR_{L1\Delta}, CR_{L2\Delta}$ 潜熱の項別公比です。

項別公比は△波と∠波は同じで $CR_{L1} = CR_{L1\Delta}, CR_{L2} = CR_{L2\Delta}$ です。

$ST_{L1}, ST_{L2}, ST_{L1\Delta}, ST_{L2\Delta}$ 過去の室温湿度変動による項別の蓄熱熱流 (△波と∠波)

$ST_{L1}^*, ST_{L2}^*, ST_{L1\Delta}^*, ST_{L2\Delta}^*$ 新たな蓄熱熱流が畳み込まれた項別の蓄熱熱流です。

- ・逆畳み込み演算した△波と∠波の顕熱の蓄熱熱流 $ST_{S1}^*, ST_{S2}^*, ST_{S1\Delta}^*, ST_{S2\Delta}^*$ を合計して ST_S^* を求めます。

潜熱も同様に、△波と∠波の潜熱の蓄熱熱流 $ST_{L1}^*, ST_{L2}^*, ST_{L1\Delta}^*, ST_{L2\Delta}^*$ を合計して ST_L^* を求めます。

$$\begin{array}{l} ST_S^* = ST_{S1}^* + ST_{S2}^* + ST_{S1\Delta}^* + ST_{S2\Delta}^* \\ ST_L^* = ST_{L1}^* + ST_{L2}^* + ST_{L1\Delta}^* + ST_{L2\Delta}^* \end{array} \quad (2-5)$$

この ST_S^* と ST_L^* が、これが次の時刻の△波の蓄熱負荷 ST_S と ST_L になります。

3. シミュレーションモードによる除去熱量と室温湿度の計算

- 本章では、実際の計算手順に沿って除去熱量と室温変動・蓄熱負荷の計算方法を解説します。
なお、計算方法は、顕熱も潜熱も同じなので、これ以降は顕熱で説明します。
- 運転状態の初期値は、原則として“停止”です。よって、「(1)の運転停止中」から始まります。
※ACLD_HEX60 では、〈OSCH〉で運転開始時刻を“0:00”とした場合、あるいは、夜間が運転となる間欠運転を設定した場合は、「(3)運転継続中」から始まります。

(1) 運転停止中の計算 (△波)

- 継続停止中の熱平衡式は△波の式(3-1)を使います。(前章の式(2-1)の顕熱の式と同じです)

$$CL + ST + WF(t_B - t_R) + cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R) = HE \quad (2-1) \text{再}$$

- 式(3-1)で外気量 $G_{OA} = 0$ 、除去熱量 $HE = 0$ と置き、室温 t_R (空調しない場合の自然室温)を解きます。

$$\text{室温} \quad t_R = \frac{CL + ST + WF \times t_B}{WF}$$

- 停止状態が継続する場合、直前と直後で状態に変化は無いので、△波の計算は必要なく

$$HE_{\Delta} = 0, \quad t_{R\Delta} = t_R \text{ です。}$$

※この後は、継続的に運転停止が続く場合は ⇒(6)室温変動 ⇒(7)蓄熱熱流の計算 に進みます。
この直後に、運転開始する場合は ⇒(2)に進みます。

(2) 運転開始時の計算 (△波)

- 基本式は、前章の△波の顕熱の式(2-2)です。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) - Q_{OA} = HE_{\Delta} - HE \quad (2-2) \text{再}$$

運転開始直前の△波の室温 t_R は既知、外気負荷は $Q_{OA} = 0$ 、除去熱量は $HE = 0$ です。

運転開始時と同時の外気導入ならば $G_{OA\Delta} > 0$ (外気導入)ですが、導入前なら $G_{OA\Delta} = 0$ です。

これらを代入すると、運転開始直後の熱平衡式は式(3-1)になります。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) = HE_{\Delta} \quad (3-1)$$

- ①運転開始ですが、いきなり HE_{Δ} を解くことはしません。冷暖房の要／不要の判定のため、式(3-1)で除去熱量を $HE_{\Delta} = 0$ と置いて仮の室温 $t_{R\Delta}$ を求めます。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}}$$

②冷暖房の要／不要の判定

〈OPCO〉で入力した設定室温の上限値を $t_{set,U}$ 、下限値を $t_{set,L}$ とします。

仮の室温が $t_{set,L} \leq t_{R\Delta} \leq t_{set,U}$ の場合、室温 $t_{R\Delta}$ と除去熱量 $HE_{\Delta} = 0$ が確定します。

$t_{R\Delta} < t_{set,L}$ の場合、加熱が必要です。 $t_{R\Delta} = t_{set,L}$ と置いて、除去熱量の計算③に進みます。

$t_{set,U} < t_{R\Delta}$ の場合、冷却が必要です。 $t_{R\Delta} = t_{set,U}$ と置いて、除去熱量の計算③に進みます。

- ③除去熱量：冷却または加熱が必要と判断された場合、熱平衡式(3-1)を除去熱量 HE について解きます。

$$HE_{\Delta} = WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta})$$

④過負荷の判定

<SOPC>で入力した装置容量の冷房能力を HE_C と暖房能力を HE_H とします。

(熱負荷計算では暖房は一定です。 HE_H の入力値は+ですが、プログラム内では-に変わります)

除去熱量が $HE_H \leq HE_{\Delta} \leq HE_C$ の場合、“軽負荷”で除去熱量 HE_{Δ} と室温 $t_{R\Delta}$ が確定します。

$HE_{\Delta} < HE_H$ の場合、加熱の“過負荷”です。 $HE_{\Delta} = HE_H$ と置いて、除去熱量が確定します。

$HE_C < HE_{\Delta}$ の場合、冷却の“過負荷”です。 $HE_{\Delta} = HE_C$ と置いて、除去熱量が確定します。

⑤過負荷の場合、④の HE_{Δ} を与条件として、式(3-1)で再計算して室温 $t_{R\Delta}$ を確定します。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O - HE_{\Delta}}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}}$$

※この後 ⇒(6)室温変動 ⇒(7)蓄熱熱流の計算に進みます。

(3) 継続運転中の計算 (△波)

・基本式は△波の式(2-1)がそのまま使えます。

$$CL + ST + WF(t_B - t_R) + cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R) = HE \quad (2-1) \text{再}$$

なお、外気は継続導入中なら $G_{OA} = \text{<OPCO>}$ の入力値です。外気導入時刻以前ならば $G_{OA} = 0$ です。

①運転中ですが、冷暖房の要／不要の判定のために、式(2-1)で、除去熱量を $HE=0$ として

仮の室温 t_R を求めます。

$$t_R = \frac{CL + ST + WF \times t_B + cp\gamma G_{OA} \times t_O}{WF + cp\gamma G_{OA}}$$

②冷暖房の要/不要の判定

<OPCO>で入力した設定室温の上限値を $t_{set,U}$ 、下限値を $t_{set,L}$ とします。

仮の室温が $t_{set,L} \leq t_R \leq t_{set,H}$ の場合、室温 t_R と除去熱量 $HE=0$ が確定します。

$t_R < t_{set,L}$ の場合、加熱が必要です。 $t_R = t_{set,L}$ と置いて、除去熱量の計算③に進みます。

$t_{set,U} < t_R$ の場合、冷却が必要です。 $t_R = t_{set,U}$ と置いて、除去熱量の計算③に進みます。

③除去熱量：冷却または加熱が必要と判断された場合、熱平衡式(2-1)を除去熱量 HE について解きます。

$$HE = CL + ST + WF(t_B - t_R) + cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R)$$

④過負荷の判定：<SOPC>で入力した装置容量で冷房能力を HE_C と暖房能力を HE_H とします。

(熱負荷計算では暖房は一定です。 HE_H の入力値は+ですが、プログラム内では-に変わります)

除去熱量が $HE_H \leq HE \leq HE_C$ の場合、“軽負荷”で除去熱量 HE と室温 t_R が確定します。

$HE < HE_H$ の場合、加熱の“過負荷”です。 $HE = HE_H$ と置き除去熱量が確定します。

$HE_C < HE$ の場合、冷却の“過負荷”です。 $HE = HE_C$ と置き除去熱量が確定します。

⑤過負荷の場合は、④の HE を与条件として、式(2-1)を再計算して室温 t_R を確定します。

$$t_R = \frac{CL + ST + WF \times t_B + cp\gamma G_{OA} \times t_O - HE}{WF + cp\gamma G_{OA}}$$

※この後は、時刻が外気導入開始の場合

⇒(4) 外気導入開始の計算 (△波)に進みます。

時刻が運転停止の場合

⇒(5) 運転停止時の計算 (△波)に進みます。

この外の場合は、運転継続なので

⇒(6)室温変動 ⇒(7)蓄熱熱流の計算に進みます。

なお、△波の計算はしませんが、 $t_{R\Delta} = t_R$ としておきます。

(4) 外気導入開始時の計算 (△波)

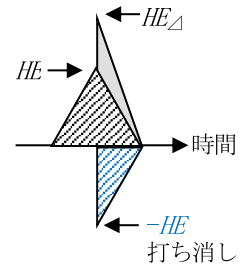
- 基本式は、前章の式(2-2)です。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) - Q_{OA,S} = HE_{\Delta} - HE \quad (2-2) \text{再}$$

- 外気導入直前の△波の室温 t_R は既知です。除去熱量 HE も既知です。

直前の導入前の外気負荷は $Q_{OA,S} = 0$ です。

右辺の除去熱量は、直前の△波の HE の右半分を打ち消して、直後の△波 HE_{Δ} に変わることを示しています。(打ち消さないで右半分が二重になります)



これらを代入すると、運転開始直後の熱平衡式(3-2)になります。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) = HE_{\Delta} - HE \quad (3-2)$$

- ① 先ず、冷暖房の要/不要の判定のため、

式(3-2)で、除去熱量を $HE_{\Delta} = 0$ として仮の室温 $t_{R\Delta}$ を求めます。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O + HE}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}}$$

- ② 冷暖房の要/不要の判定

<OPCO>で入力した設定室温の上限値を $t_{set,U}$ 、下限値を $t_{set,L}$ とします。

室温が $t_{set,L} \leq t_{R\Delta} \leq t_{set,U}$ の場合、冷暖房は必要なく、室温 $t_{R\Delta}$ と除去熱量 $HE_{\Delta} = 0$ が確定です。

$t_{R\Delta} < t_{set,L}$ の場合、加熱が必要です。 $t_{R\Delta} = t_{set,L}$ と置いて、除去熱量の計算 3)に進みます。

$t_{set,U} < t_{R\Delta}$ の場合、冷却が必要です。 $t_{R\Delta} = t_{set,U}$ と置いて、除去熱量の計算 3)に進みます。

- ③ 除去熱量： 冷却または加熱が必要と判断された場合、式(3-2)を除去熱量 HE について解きます。

$$HE_{\Delta} = WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) + HE$$

- ④ 過負荷の判定

<SOPC>で入力した装置容量の冷房能力を HE_C と暖房能力を HE_H とします。

(熱負荷計算では暖房は一値です。 HE_H の入力値は+ですが、プログラム内では-に変わります)

除去熱量が $HE_H \leq HE_{\Delta} \leq HE_C$ の場合、“軽負荷”で除去熱量 HE_{Δ} と室温 $t_{R\Delta}$ が確定します。

$HE_{\Delta} < HE_H$ の場合、加熱の“過負荷”です。 $HE_{\Delta} = HE_H$ と置き、除去熱量が確定します。

$HE_C < HE_{\Delta}$ の場合、冷却の“過負荷”です。 $HE_{\Delta} = HE_C$ と置き、除去熱量が確定します。

- ⑤ 過負荷の場合は、④の HE を与条件として、式(3-2)を再計算して室温 $t_{R\Delta}$ を確定します。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O - HE_{\Delta} + HE}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}}$$

- この後 ⇒(6) 室温変動 ⇒(7) 蓄熱熱流の計算 に進みます。

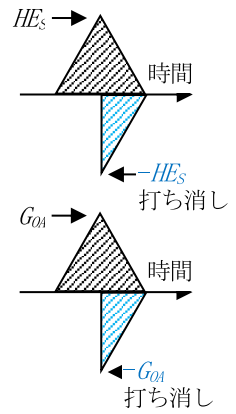
(5) 運転停止時の計算 (△波)

- 基本式は前章の△波の顕熱の式(2-2)です。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + c\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) - Q_{OA,S} = HE_{\Delta} - HE \quad (2-2) \text{再}$$

- 運転停止直前の△波の室温 t_R は既知です。
- 外気は、直前の△波は $Q_{OA,S} = c\gamma G_{OA,S}(t_O - t_R)$ ですが、停止後の△波では無くなるので、左辺第3項で $-Q_{OA,S}$ と打ち消します。
- 除去熱量は、停止直後は $HE_{\Delta} = 0$ です。同時に直前の△波の右半分を $-HE$ として打ち消します。
- これらを代入すると、運転開始直後の熱平衡式は式(3-3)になります。

$$WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) - Q_{OA,S} = -HE \quad (3-3)$$



- ①式(3-3)で室温 $t_{R\Delta}$ を求めます。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R - c\gamma G_{OA}(t_O - t_R) + HE}{WF_{\Delta}}$$

- この後 ⇒(6) 室温変動 ⇒(7) 蓄熱熱流の計算 に進みます。

(6) 室温変動の計算

- 各時刻で直前と直後の室温 $t_R, t_{R\Delta}$ が確定しました。これより室温変動量を求めます。
- なお、△波は基準温度 t_B からの変動量で、△波は直前の△波の室温 t_R からの変動量です。

$$\Delta t_R = t_B - t_R \quad \text{で、}$$

$$\Delta t_{R\Delta} = t_R - t_{R\Delta} \quad \text{です。}$$

※ 室温が季節毎の設定温度になっていても、その室温が基準温度と同じでない限り、室温変動になります。

(7) 蓄熱熱流と蓄熱負荷の計算

- 蓄熱熱流は、室温変動を励振とする吸熱応答と同じです。

下記のように過去の室温変動による蓄熱熱流に新たな蓄熱熱流を重ね合わせる“逆畳込み演算”をします。

また、△波と△波の両方を、また、項別公比なので項別に求めます。

<△波の顕熱の蓄熱熱流>

$$ST_1^* = ST_1 \times CR_1 + \Delta t_R \times WF_1$$

$$ST_2^* = ST_2 \times CR_2 + \Delta t_R \times WF_2$$

<△波の顕熱の蓄熱熱流>

$$ST_{1\Delta}^* = ST_{1\Delta} \times CR_{1\Delta} + \Delta t_{R\Delta} \times WF_{1\Delta}$$

$$ST_{2\Delta}^* = ST_{2\Delta} \times CR_{2\Delta} + \Delta t_{R\Delta} \times WF_{2\Delta}$$

(2-4S) 再

※ 蓄熱熱流は、△波は ST_1^*, ST_2^* 、△波は $ST_{1\Delta}^*, ST_{2\Delta}^*$ のように項別に求めます。

- 逆畳込み演算した△波と△波の顕熱の蓄熱熱流 $ST_1^*, ST_2^*, ST_{1\Delta}^*, ST_{2\Delta}^*$ を合計して ST^* を求めます。

$$ST^* = ST_1^* + ST_2^* + ST_{1\Delta}^* + ST_{2\Delta}^* \quad (2-5) \text{再}$$

この ST^* が、次の時刻の△波の蓄熱負荷 ST になります。

※蓄熱負荷を求めたら、時刻を1つ進めて

運転停止中なら ⇒(1)の△波に戻ります。(運転開始時も停止の△波の(1)から入ります)

運転継続中なら ⇒(3)の△波に戻ります。(運転停止時、外気導入開始時も△波の(3)から入ります)

4. ピークモードの除去熱量の計算

(この章の前に3章を読んでください)

(01) ピークモードの反復計算の仕組み

<シミュレーションモードとピークモードの計算の違い>

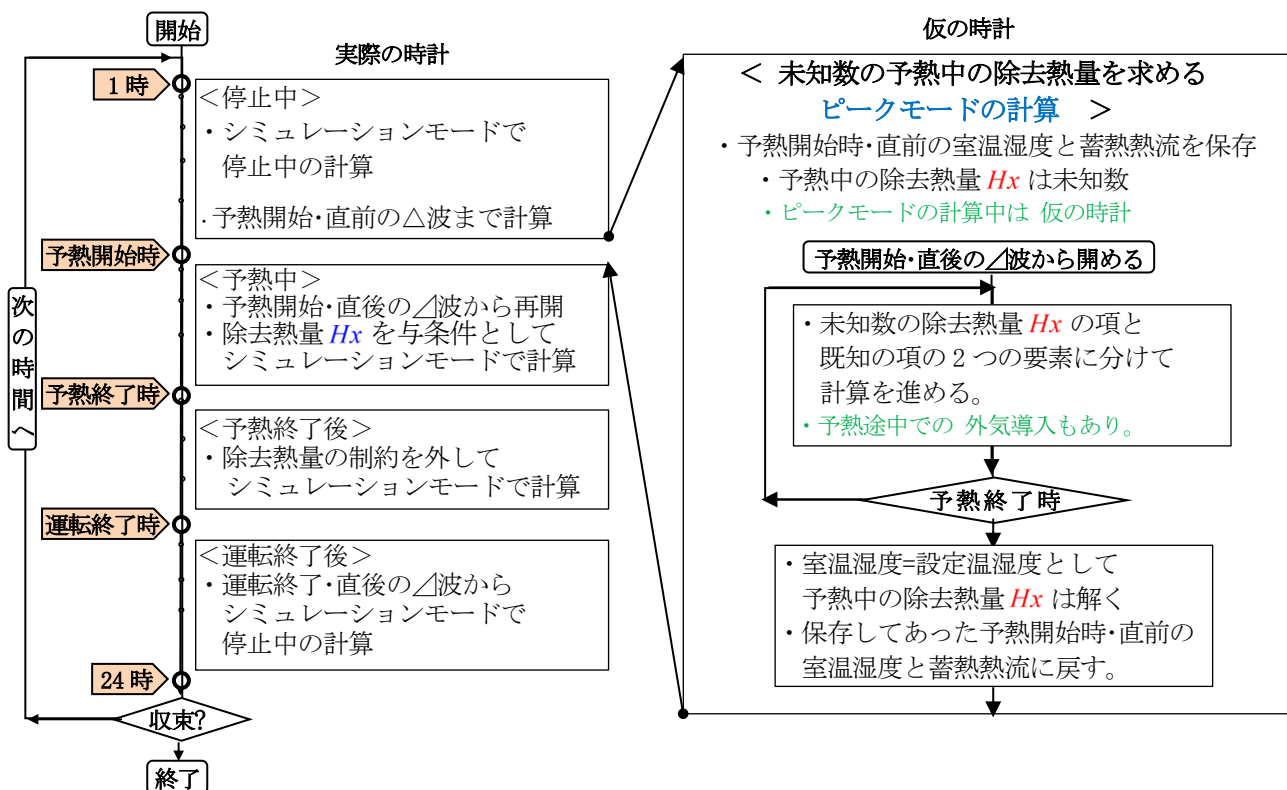
<シミュレーションモード>

- ・年間の冷暖房負荷を求める。
- ・気象データは主に平均年気象データを用いる。
- ・非定常熱負荷計算
- ・装置容量(冷却・加熱・除湿・加湿)を与条件とし、この能力の範囲で、熱負荷(除去熱量)を求める。

<ピークモード>

- ・空調設計のための最大熱負荷を求める。
- ・厳しい条件のピーク気象データを用いる。
- ・(1日を周期とする)周期定常(計算は非定常)
- ・予熱時間数を与条件として装置容量を求める。
この装置容量は予熱中の除去熱量で一定値、予熱終了時に室温湿度=設定室温湿度となるように予熱中の除去熱量を決める。

<ピーク計算のフロー>

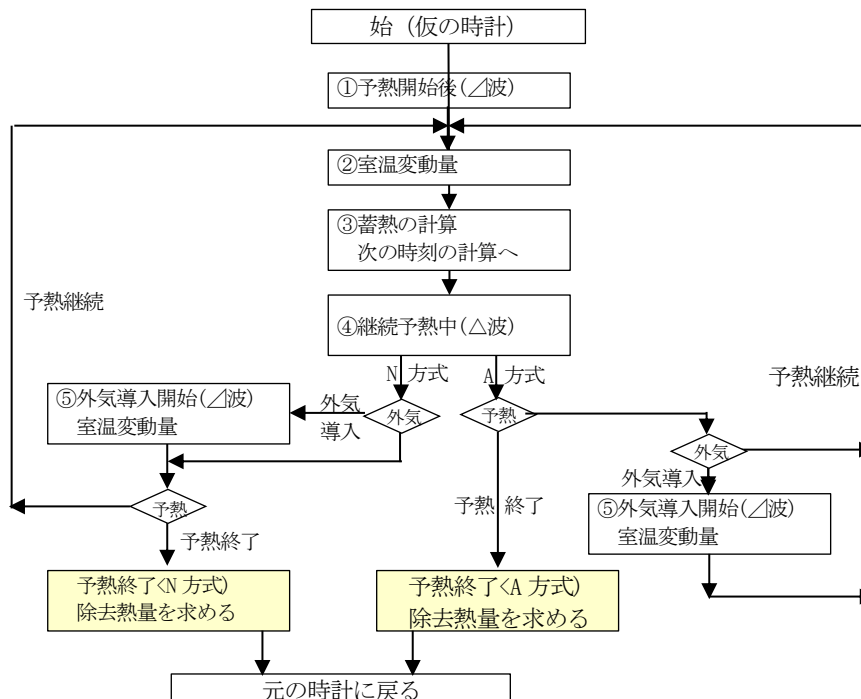


<ピークモードの解き方>

- 予熱開始時/直前の△波までは通常のシミュレーションモードの停止中の計算
- 直前の蓄熱熱流と室温を保存し、ピークモードの計算に分岐 (時間が仮の時計に替わる)
- 予熱中の除去熱量 H_x は一定値だが未知数
未知数のまま、仮の時計で、予熱終了時まで計算を進める
- 予熱終了時に 室温湿度=設定室温湿度 として、未知数の除去熱量 H_x の値を解く
- 保存してあった直前の室温や蓄熱の値を戻す。
- 元のシミュレーションモードに戻り、予熱開始時・直後の△波から再開
- 予熱時間帯では、求めた除去熱量 H_x を定数の与条件としてシミュレーションモードで計算
予熱終了時に室温が設定室温湿度に一致すると、ピークモードの計算が正しいことが確認できる
- 予熱終了後は、装置容量の制限を外して、シミュレーションモードで室温・蓄熱を計算
- 運転終了後は、通常のシミュレーションモードの停止中の計算
- 24時まで計算を進める。反復計算の途中なら ⇒a)に戻り、時分1から計算
反復回数の上限に達していれば計算が完了

(02) 未知数の除去熱量のまでの予熱中の計算

・右下図は、本節の、①②③④⑤の計算番号に合わせた計算フローです。



(1) 予熱開始時・直前の計算 (△波)

・予熱開始・直前までは、通常のシミュレーションモードの停止中と同じです。

外気量 $G_{OA}=0$ 、除去熱量 $HE=0$ として、空調停止時の室温 t_R の解が得られています。

$$\text{室温} \quad t_R = \frac{CL + ST + WF \times t_B}{WF} \quad (\text{記号は3章と同じ}) \quad (4-1)$$

・ここまでは、継続停止注の計算です。ここから先がピークモードの計算です。

・ここで、“仮の時計”に切り替わります。元の時計は一旦止めて、仮の時計で、予熱終了まで先行して計算を進めます。予熱完了後に、元の時計に戻ります。

・戻ったときのために、予熱開始時・直前の室温や蓄熱熱流の値を保存しておきます。

・予熱中の除去熱量 Hx は一定値ですが、未知数です。未知数のまま計算を進めます。

・予熱中の計算では、既知の項（添え字に q）と、未知の項（添え字に x）に分けて計算します。除去熱量は未知数ですが係数は既知の値です。

予熱開始時・直前の△波の既知の成分は $t_{Rq} = t_R$ で、未知の成分の係数は $f_{Rx} = 0$ です。

◇ それでは予熱の計算 ⇒ (2) 予熱開始時・直後の△波 に進みます。

(2) 予熱開始時・直後の計算 (∠波)

- ・予熱開始時・直後(∠波)は運転開始時・直後であり。前第3章の運転開始直後の式(3-1)と同じ式です。
(∠波の熱平衡式は直前(△波)から変化した要素です)

- ・熱平衡式 (∠波) $WF_{\Delta}(t_R - t_{R\Delta}) + cp\gamma G_{OA\Delta}(t_O - t_{R\Delta}) = Hx$ (3-1)再

- ・直前の△波の室温 t_R は既知の値です。
- ・外気量 $G_{OA\Delta}$ は、運転開始と同時に外気導入ならば $G_{OA\Delta} > 0$ 、外気導入前なら $G_{OA\Delta} = 0$ です。
- ・ Hx が未知数の除去熱量です。なお、予熱中の除去熱量は一定値なので△波と∠波を区別しないで同じ記号 Hx を使うことにします。

- ・式(3-1)を∠波の室温 $t_{R\Delta}$ について解きます。なお、既知の成分と未知の成分に分けておきます。

$$t_{R\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}} + \frac{-1}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}} \times Hx \quad (4-2)$$

室温 $t_{R\Delta}$ を既知の成分 t_{Rq} と未知の成分 (係数 $f_{Rx\Delta}$ は既知の値) に分けます。

$$\text{室温は } t_{R\Delta} = t_{Rq\Delta} + f_{Rx\Delta} \times Hx \quad (4-2r)$$

$$t_{Rq\Delta} = \frac{WF_{\Delta} \times t_R + cp\gamma G_{OA\Delta} \times t_O}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}} \quad (4-2q)$$

$$f_{Rx\Delta} = \frac{-1}{WF_{\Delta} + cp\gamma G_{OA\Delta}} \quad \dots \text{係数は既知の値です。} \quad (4-2x)$$

この後 ⇒ (3) 室温変動量 ⇒ (4) 蓄熱熱流の計算 に進みます。

(3) 室温変動量

- ・この計算は、①予熱開始時、③継続予熱中、④予熱途中の外気導入開始がある場合、に共通です。
- ・ここまでで、△波の室温 $t_R = t_{Rq} + f_{Rx} \times Hx$ 、∠波の室温 $t_{R\Delta} = t_{Rq\Delta} + f_{Rx\Delta} \times Hx$ が得られています。
- ・室温の変動量は、△波は基準温度 t_B からの変動量、∠波は直前の△波の室温 t_R からの変動量です。室温の変動量を、△波と∠波と、既知の成分と未知の成分の組み合わせで分類します。

$$\left. \begin{array}{ll} \Delta \text{波の既知の成分の室温変動量} & \Delta t_{Rq} = t_B - t_{Rq} \\ \angle \text{波の既知の成分の室温変動量} & \Delta t_{Rq\Delta} = t_{Rq} - t_{Rq\Delta} \\ \Delta \text{波の未知の成分の室温変動量} & \Delta f_{Rx} = -f_{Rx} \\ \angle \text{波の未知の成分の室温変動量} & \Delta f_{Rx\Delta} = f_{Rx} - f_{Rx\Delta} \end{array} \right\} \quad (4-3)$$

※ 未知の成分の室温変動量は、既知の成分の室温変動量の補正值になります。

- ・この後 ⇒ (4) 蓄熱熱流の計算 に進みます。

(4) 蓄熱熱流の計算

・この計算は、①予熱開始時、③継続予熱中、④予熱途中で外気導入開始がある場合、に共通です。

・ $ST_{q1}, ST_{q2}, ST_{q1\Delta}, ST_{q2\Delta}$ は、過去の室温変動による蓄熱熱流です。

$f_{STx1}, f_{STx2}, f_{STx1\Delta}, f_{STx2\Delta}$ は、未知数の除去熱量 Hx による蓄熱熱流の係数で、係数は既知の値です。
 Δ の添え字が無いのが Δ 波の蓄熱熱量で、 Δ の添え字があるのが Δ 波の蓄熱熱流です。
 添え字の 1 と 2 は、項別公比の 1 項と 2 項です。

・予熱開始時の初期値

既知の値 $ST_{q1}, ST_{q2}, ST_{q1\Delta}, ST_{q2\Delta}$ は、予熱開始時直前の保存した既知の値と同じ値です。

未知の項の係数は最初は $f_{STx1} = f_{STx2} = f_{STx1\Delta} = f_{STx2\Delta} = 0$ です。

・蓄熱熱流の逆畳み込み演算

既知の項は、既知の室温変動量と過去の蓄熱量とで、蓄熱熱流の逆畳み込み演算をします。

未知の項は、係数は既知の値なので、係数で逆畳み込み演算をします。

既知と未知、 Δ 波と Δ 波の組み合わせで 4 通り、項別公比の 2 項があり、8 つの式になります。

※ 実際は潜熱があるので全部で 16 の式です。

<既知の成分： Δ 波>

$$ST_{q1}^* = ST_{q1} \times CR_1 + \Delta t_{Rq} \times WF_1$$

$$ST_{q2}^* = ST_{q2} \times CR_2 + \Delta t_{Rq} \times WF_2$$

<既知の成分 Δ 波>

$$ST_{q1\Delta}^* = ST_{q1\Delta} \times CR_{1\Delta} + \Delta t_{Rq\Delta} \times WF_{1\Delta}$$

$$ST_{q2\Delta}^* = ST_{q2\Delta} \times CR_{2\Delta} + \Delta t_{Rq\Delta} \times WF_{2\Delta}$$

(4-4-1)

<未知の成分の係数： Δ 波>

$$f_{STx1}^* = f_{STx1} \times CR_1 + \Delta f_{Rx} \times WF_1$$

$$f_{STx2}^* = f_{STx2} \times CR_2 + \Delta f_{Rx} \times WF_2$$

<未知の成分の係数： Δ 波>

$$f_{STx1\Delta}^* = f_{STx1\Delta} \times CR_{1\Delta} + \Delta f_{Rx\Delta} \times WF_{1\Delta}$$

$$f_{STx2\Delta}^* = f_{STx2\Delta} \times CR_{2\Delta} + \Delta f_{Rx\Delta} \times WF_{2\Delta}$$

(4-4-2)

※ WF_1, WF_2, CR_1, CR_2 が Δ 波の項別項と公比、

$WF_{1\Delta}, WF_{2\Delta}, CR_{1\Delta}, CR_{2\Delta}$ が Δ 波の項別項と公比

・次の時刻の蓄熱負荷

既知の成分と未知の成分別に、 Δ 波と Δ 波のそれぞれの項別の 2 項を合計します。

$$\text{既知の成分の蓄熱負荷} \quad ST_q^* = ST_{q1}^* + ST_{q2}^* + ST_{q1\Delta}^* + ST_{q2\Delta}^* \quad (4-5-1)$$

$$\text{未知の成分の蓄熱負荷の係数} \quad f_{STx}^* = f_{STx1}^* + f_{STx2}^* + f_{STx1\Delta}^* + f_{STx2\Delta}^* \quad (4-5-2)$$

ST_q^*, f_{STx}^* が、次の時刻の Δ 波の蓄熱負荷 ST_q, f_{STx} になります。

$$ST = ST_q + f_{STx} \times Hx \quad (4-6)$$

・次の時刻が 継続予熱中でも予熱終了時でも ⇒(5) 継続予熱中 (Δ 波) に進みます。

(5) 継続予熱中の計算 (△波)

- 未知の蓄熱熱流と除去熱量を含めた熱平衡式 (△波) は次式となります。

$$CL + ST_q + f_{STx} \times Hx + WF(t_B - t_R) + cp\gamma G_{OA}(t_O - t_R) = Hx \quad (4-7)$$

式(4-7)で CL が連続空調負荷

$ST_q + f_{STx} \times Hx$ が蓄熱負荷で、 ST_q が既知の成分、 $f_{STx} \times Hx$ が未知の成分です。

外気は、継続的に導入されていれば $G_{OA} > 0$ 、外気導入前ならば $G_{OA} = 0$ です。

- 式(4-7)を室温 t_R について解きます。なお、既知の成分、未知の成分に分けて示します。

$$t_R = \frac{CL + ST_q + WF \times t_B + cp\gamma G_{OA} \times t_O}{WF + cp\gamma G_{OA}} + \frac{f_{STx} - 1}{WF + cp\gamma G_{OA}} \times Hx \quad (4-8)$$

室温 t_R を既知の成分 t_{Rq} と未知の成分 (係数 f_{Rx} は既知の値) に分けます。

$$t_R = t_{Rq} + f_{Rx} \times Hx \quad (4-8r)$$

$$t_{Rq} = \frac{CL + ST_q + WF \times t_B + cp\gamma G_{OA} \times t_O}{WF + cp\gamma G_{OA}} \quad (4-8q)$$

$$f_{Rx} = \frac{f_{STx} - 1}{WF + cp\gamma G_{OA}} \quad \dots \text{係数は既知の値です。} \quad (4-8x)$$

- この後の計算は、予熱方式で変わります。

<A方式：(直前)の△波で予熱終了の場合>

まず、予熱終了時ならば ⇒(7) 予熱完了 に進みます。

次が外気導入開始時刻ならば ⇒(6) 予熱途中の外気導入 (△波) に進みます。

※予熱完了(直前)と外気導入開始(直後)が同じ時刻の場合

予熱完了(直前)が先なので ⇒ (3)節の予熱完了 に進みます。

外気導入は予熱完了後になります。

継続して予熱中ならば ⇒(3) 室温変動量 ⇒(4) 蓄熱熱流 に進みます。

なお、△波の計算はしませんが、△波の値は必要です。

△波と△波の値は変化ないので $t_{Rq\Delta} = t_{Rq}$ 、 $f_{Rx\Delta} = f_{Rx}$ となります。

<N方式：(直後)の△波で予熱終了の場合>

まず、外気導入開始時刻ならば ⇒(6) 予熱途中の外気導入 (△波) に進みます。

※予熱完了(直前)と外気導入開始(直後)が同じ時刻の場合

(△波)の⑤の計算が終わってから、(3)節の予熱完了 (△波) に進みます。

予熱完了時ならば ⇒(7) 予熱完了 に進みます。

継続して予熱中ならば ⇒(3) 室温変動量 ⇒(4) 蓄熱熱流 に進みます。

なお、継続予熱中は、△波の計算はしませんが△波の値は必要です。

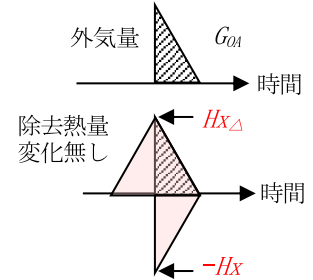
△波と△波の値は変化ないので $t_{Rq\Delta} = t_{Rq}$ 、 $f_{Rx\Delta} = f_{Rx}$ となります。

(6) 予熱途中の外気導入の計算 (△波)

- △波では、直前の△波から変化する要素だけで式を作ります。熱平衡式は次式になります。

$$WF_{\triangle}(t_{Rq} + f_{Rx} \times Hx - t_{R\triangle}) + cp\gamma G_{OA\triangle}(t_O - t_{R\triangle}) = Hx_{\triangle} - Hx = 0 \quad (4-9)$$

- 左辺第1項の $t_{Rq} + f_{Rx} \times Hx$ は、直前の△波の室温 t_R のことです。
 t_{Rq} が既知の成分、 $f_{Rx} \times Hx$ が未知の成分です。
- 外気量 $G_{OA\triangle}$ は入力データの値です。(直前の△波では $G_{OA} = 0$ です)
- 予熱中の除去熱量は一定で△波と△波では変化しないので、
 $Hx_{\triangle} = Hx$ であり、右辺は $Hx_{\triangle} - Hx = 0$ となります。



- 式(4-9)を室温 $t_{R\triangle}$ について解きます。

なお、既知の成分と、未知の成分けて示します。

$$t_{R\triangle} = \frac{WF_{\triangle} \times t_{Rq} + cp\gamma G_{OA\triangle} \times t_O}{WF_{\triangle} + cp\gamma G_{OA\triangle}} + \frac{WF_{\triangle} \times f_{Rx}}{WF_{\triangle} + cp\gamma G_{OA\triangle}} \times Hx \quad (4-10)$$

室温 t_R を既知の成分 t_{Rq} と未知の成分 (係数 f_{Rx} は既知の) に分けます。

$$t_{R\triangle} = t_{Rq\triangle} + f_{Rx\triangle} \times Hx \quad (4-10r)$$

$$t_{Rq\triangle} = \frac{WF_{\triangle} \times t_{Rq} + cp\gamma G_{OA\triangle} \times t_O}{WF_{\triangle} + cp\gamma G_{OA\triangle}} \quad (4-10q)$$

$$f_{Rx\triangle} = \frac{WF_{\triangle} \times f_{Rx}}{WF_{\triangle} + cp\gamma G_{OA\triangle}} \quad \dots \text{係数は既知の値です。} \quad (4-10x)$$

- この後の計算の流れが予熱方式で変わります。

<A方式：(直前)の△波で予熱終了)の場合>

継続して予熱中なので ⇒(3)室温変動量 ⇒(4)蓄熱熱流 に進みます。

<N方式：(直後)の△波で予熱終了の場合>

予熱終了時ならば ⇒(7)予熱完了 に進みます。

継続して予熱中ならば ⇒(3)室温変動量 ⇒(4)蓄熱熱流 に進みます。

(7) 予熱終了時 / 未知数の除去熱量を求める

・予熱終了時の除去熱量の解き方に N 方式と A 方式の 2 つの方式があります。

- ・N 方式：予熱終了時・直後に解きます。(NewHASP/ACLD の方式)
- ・A 方式：予熱終了時・直前に解きます。(ACLD_HEX60 の方式)

※NewHASP/ACLD では N 方式のみですが、ACLD_HEX60 では H 方式と A 方式が選べます。

<A 方式の場合>

・A 方式は予熱終了時・直前の△波で予熱終了です。

直前の(5)継続予熱中の計算(△波)で、次の解が得られています。

$$t_R = t_{Rq} + f_{Rx} \times Hx \quad (4-8r) \text{再}$$

これを解けば良いのですが、次の ①と②の手順を踏みます。

①冷暖房の要/不要の判定 (OPC0)で入力した設定室温の上限値を $t_{set,U}$ 、下限値を $t_{set,L}$ とします)

・式(4-8)r で、仮に冷暖房が不要として $Hx=0$ としたときの室温 t_R は $t_R = t_{Rq}$ です。

$t_{set,L} \leq t_{Rq} \leq t_{set,U}$ の場合 $\Rightarrow$ 室温 $t_R = t_{Rq}$ と除去熱量 $Hx=0$ が確定します。

$t_{Rq} < t_{set,L}$ の場合、加熱が必要です。 $\Rightarrow t_R = t_{set,L}$ と置いて、次の②に進みます。

$t_{set,U} < t_{Rq}$ の場合、冷却が必要です。 $\Rightarrow t_R = t_{set,U}$ と置いて、次の②に進みます。

②予熱時間帯の除去熱量の解

・冷却または加熱が必要と判断された場合、熱平衡式(4-8)r を除去熱量 Hx について解きます。

$$\text{予熱中の除去熱量} \quad Hx = (t_R - t_{Rq}) / f_{Rx} \quad \text{rev. 20250716} \quad (4-11)A$$

なお、室温 t_R は①で与えた設定室温 $t_{set,L}$ または $t_{set,U}$ です。

・これで、予熱時間帯の除去熱量 Hx が得られました。

<N 方式の場合>

・N 方式は予熱終了時・直後の△波で予熱終了です。

※外気導入直後でない場合は、直前の△波と直前△波とは同じ結果です。よって A 方式と同じです。

※以下では、外気導入直後の場合を説明します。

・直後に外気導入があった場合、(6)予熱途中の外気導入(△波)で、次の解が得られています。

$$t_{R\Delta} = t_{Rq\Delta} + f_{Rx\Delta} \times Hx \quad (4-10r) \text{再}$$

①冷暖房の要/不要の判定 (OPC0)で入力した設定室温の上限値を $t_{set,U}$ 、下限値を $t_{set,L}$ とします)

・式(4-10r) で、仮に冷暖房が不要として $Hx=0$ としたときの室温 $t_{R\Delta}$ は $t_{R\Delta} = t_{Rq\Delta}$ です。

$t_{set,L} \leq t_{Rq\Delta} \leq t_{set,U}$ の場合 $\Rightarrow$ 室温 $t_{R\Delta} = t_{Rq\Delta}$ と除去熱量 $Hx=0$ が確定します。

$t_{Rq\Delta} < t_{set,L}$ の場合、加熱が必要です。 $\Rightarrow t_{R\Delta} = t_{set,L}$ と置いて、次の②に進みます。

$t_{set,U} < t_{Rq\Delta}$ の場合、冷却が必要です。 $\Rightarrow t_{R\Delta} = t_{set,U}$ と置いて、次の②に進みます。

②予熱時間帯の除去熱量の解

・冷却または加熱が必要と判断された場合、熱平衡式(4-10r)を除去熱量 Hx について解きます。

$$\text{予熱中の除去熱量} \quad Hx = (t_{R\Delta} - t_{Rq\Delta}) / f_{Rx\Delta} \quad \text{rev. 20250716} \quad (4-11)N$$

なお、室温 $t_{R\Delta}$ は①で与えた設定室温 $t_{set,L}$ または $t_{set,U}$ です。

・これで、予熱時間帯の除去熱量 Hx が得られました。

<予熱開始前に戻る>

・保存してあった予熱開始前の室温湿度や蓄熱熱流に戻します。

時計を戻し、元のシミュレーションモードの予熱開始時・直後の△波から再スタートします。

(8) シミュレーションモードに戻って／予熱中・予熱完了時・予熱後の計算

・予熱を完了してシミュレーションモードに戻って、時計も元に戻し、保存してあった蓄熱熱流に戻し予熱開始時・直後（∠波）から再スタートです。

・計算方法は3章と同じシミュレーションモードですが、条件の設定が若干異なります。

予熱中は、除去熱量 H_x を一定値の与条件として室温を求めます。

予熱完了後は、装置容量の制約を外します。

(i) 予熱開始時・直後（∠波）からの予熱中の計算

・装置容量を(7)節で得られた除去熱量 H_x （予熱中は一定値）として計算すること以外は、通常のシミュレーションモードの計算と同じです。

(ii) 予熱完了時

・予熱終了時までが予熱中と同じ、除去熱量 H_x で計算します。

・A方式は、予熱終了時刻・直前（△波）、N方式は直後（∠波）の違いはありますが、A方式でもN方式でも、予熱終了時点の室温が設定温度になっていか否かで、ピーク計算が正しいことを確認できます。

なお、設定温湿度に上下限がある場合は、室温湿度は上限・下限の範囲になります。

(iii) 予熱終了後

・ピーク計算では、予熱終了後は装置容量の制限が無くなります。

従って、予熱終了後も室温湿度は設定温湿度が維持されます。

なお、設定温湿度に上下限がある場合は、室温湿度は上下限の範囲で維持されます。

(iv) 運転終了時と終了後

・運転終了時と終了後は、除去熱量が0（ゼロ）となり、通常のシミュレーションモードの運転停止と同じです。

(v) 反復計算の判定

・24時まで計算を進めて

・反復回数上限に達していなければ、最初(⑩)の1時分に帰って計算を続行します。

・反復回数上限に達していれば、全ての計算が完了です。

参考)

右図はピーク計算の反復回数と収束率の関係です。

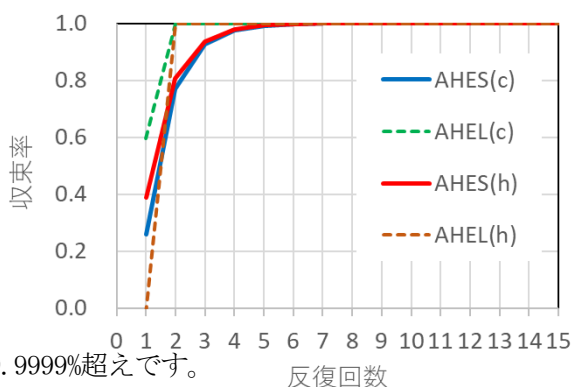
完全収束に対する収束率です。

- ・建物は、実行編の例題の SPAC_MFW です。
- ・冷房(c)と暖房(h)の空調負荷(AHE)のピーク計算です。
- ・潜熱(L)は1次遅れなので2回目で収束しています。
- ・顕熱(S)は時間遅れの要素が多くあるので、収束までの反復回数が多くなります。
- ・顕熱の場合

冷暖房とも5回で99%を超え、7回で99.9%超、

10回で99.99%超、11回で99.999%超、14回目で99.9999%超えです。

・HASPは15回がdefaultですが、実用的にも精度的にも十分と言えます。



<補足>

※ 予熱開始、即予熱終了の場合：これは予熱時間数が0時間の場合です。このケースは装置容量の制限が外されたシミュレーションモードの計算と同じなので、予熱開始と同時に、予熱終了となり、装置容量の制限が外されたシミュレーションモードの計算に入ります。

5. 応答係数を求める理論 (ここはやや難解ですので読み飛ばして構いません)

※この章では、微分方程式・偏微分・二階微分・行列・ラプラス変換・逆変換・級数・積分などの用語が出てきます。数学が苦手な人には難解に感じるかも知れませんが、これらは解くための手段に過ぎません。考え方や概念を理解すればよいので、難しく考える必要はありません。
分からないところで立ち止まらないで、先々に進んでもいっこうに構いません。

- ・多層壁の熱応答を求めることは、非定常熱負荷計算の最も核心的な部分です。詳細は、下記および巻末に記した文献①～④を参照していただくとして、ここでは要約して説明します。

【参考文献】

- ①) SHASE 雑誌講座動的熱負荷計算法. pdf (¥DATA¥Reference¥)
- ②) 空調設備の動的熱負荷計算入門. pdf (¥DATA¥Reference¥)
- ③) HASP-ACLD-8501 解説. pdf (¥HASP¥HASP-ACLD-8501¥Doc¥)
- ④) HASP-ACLD-8501 プログラミングメモ. pdf (¥HASP¥HASP-ACLD-8501¥Develop¥Note¥)

- ・多層壁の熱応答を解析的に求めることはできません。なお、いくつかの近似解法がありますが、ここではラプラス変換を用います。

- ・HASP では次のステップで応答係数を求めます。

Step1: 微分方程式をラプラス変換して多層壁の伝達関数を求めます。 (subroutine GVECTR)

Step2: 伝達関数を逆変換して、単位応答を求めます。 (subroutine CPARAM)

Step3: 単位応答を積分して二等辺三角波応答と直角三角波応答を求めます。 (subroutine CPARAM)

※ 任意の計算時間間隔に対応するためのプログラム変更は、Step3 の最後の部分だけです。

(1) 非定常熱伝導の微分方程式をラプラス変換して伝達関数を求める

<微分方程式>

- ・右図の壁体の1次元の熱伝導を微分方程式で書くと

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (5-1) \quad \text{です。}$$

θ が温度、 x は壁内部での場所、 t が時間、 a は熱拡散係数です。

【補足】 温度 θ は場所 x と時間 t の関数 $\theta(x,t)$ です。左辺は時間 t と共に温度 θ が変化することを表しています。右辺は場所 x での温度 θ の変化を表しています。

偏微分 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ は時間 ∂t と温度 $\partial \theta$ の変化の割合 (勾配)、偏微分 $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ は場所 ∂x と

温度 $\partial \theta$ の変化の割合 (勾配) です。 a は比例定数の温度拡散係数です。

※ 時間 t と場所 x を独立に微分することを偏微分といい、 t で微分するときは x は定数として扱い、 x で微分するときは t を定数として扱います。

偏微分では d の代わりに ∂ を使います。

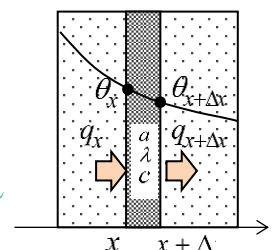
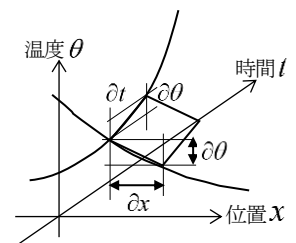
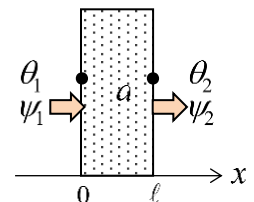
※ t と x のどちらも変数として微分するときの微分を全微分といいます、

右図は、部材内部の微少な場所 $x \rightarrow x + \Delta x$ を通過する熱流 q を表したものです。この微少な部分の温度差 $\theta_x \rightarrow \theta_{x+\Delta x}$ により、熱流 $q_x \rightarrow q_{x+\Delta x}$ が生じ、一部は壁体蓄熱され、場所と時間での温度変化が生じます。

詳細な式の誘導は省きますが、この微少な幅 Δx での変化は、更に x で微分すればよく、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{となります。}$$

※変化の割合 (勾配) が微分ですが、上式は変化の割合の変化で、これを二階微分といいます。



<ラプラス変換>

- ・前頁のような単層壁なら、式(5-1)の微分方程式は解析的に解くことができます。
しかし、下図のような多層壁では解析的に解くことができません。そこでラプラス変換を利用します。

※元の実時間 t 領域では解けない微分方程式を、周波数 s 領域に変換して解くのがラプラス変換です。
フーリエ変換を発展させたもので、フランスの数学者ピエール・シモン・ラプラスの名に因んでいます。

- ・時間領域の温度 $\theta(x,t)$ をラプラス変換した s 領域の関数を $L\{\theta(x,t)\}=\Theta(x,s)$ とすると、

$$\text{先の微分方程式は} \quad s_j \Theta = a \frac{d^2 \Theta}{dx^2} \quad \cdots (5-2) \quad \text{の線形常微分方程式になります。}$$

元の関数とラプラス変換した関数とは 1 対 1 の関係にあります。ラプラス変換すると、時間微分 $1/dt$ が s になります。なお、 s はラプラスパラメータの周波数です。

※ ラプラス変換すると、微分は s の掛け算、積分は s の割り算になります。

※ HASP では $s_0 \sim s_9$ に、0.0, 0.00025, 0.001, 0.004, 0.016, 0.064, 0.128, 0.256, 1.024, 4.096, 16.384 の 4 倍値を使っています。

本来の表記は $\sum_j^n s_j$ ですが、 s_j あるいは s と簡略に表記しています。

<< sub. GVECTR >>

- ・ここからは実際のプログラムでどのように計算するかを見ていきます。
- ・熱負荷計算で知りたいのは壁体表面を流入・流出する熱流なので、壁体表面の温度と熱流に着目します。

時間領域で温度 θ は場所 x と時間 t の関数 $\theta(x,t)$ です。壁体の厚さを l とすると、壁体の表面 1 と表面 2 の温度は $\theta(0,t)=\theta_1(t)$ 、 $\theta(l,t)=\theta_2(t)$ と表せます。

- ・一方、 s 領域では、壁体表面の温度は $\Theta(0,s)=\Theta_1(s)$ 、 $\Theta(l,s)=\Theta_2(s)$ と表せます。

温度 Θ_1, Θ_2 と表面での熱流 ψ_1, ψ_2 について式(5-2)を解くと…… (中略→詳細は本(1)節末の【補足】) ……
式(5-3)が導かれます。

$$\begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{sRC} & \frac{R}{\sqrt{sRC}} \sinh \sqrt{sRC} \\ \frac{\sqrt{sRC}}{R} \sinh \sqrt{sRC} & \cosh \sqrt{sRC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

- ・右辺最初の $\begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$ が熱の伝達行列です。また、この行列の形を 4 端子基本行列と言います。

式(5-2)の温度伝達率 a ですが、式(5-3)では R, C に変わっています。

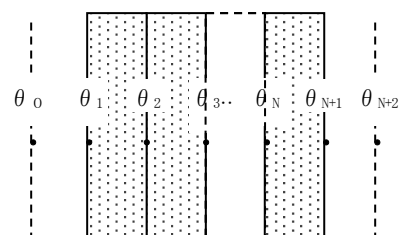
$a = \lambda / c$ で、 λ は材料の熱伝導率、 c は容積比熱です。部材の厚さを l とすると、熱抵抗は $R = l / \lambda$ 、熱容量は $C = cl$ となります。 $a = l^2 / RC$ で、厚さを加味した熱伝導の式になります。(→(1)節末の【補足】)

※式(5-3)は $\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix}$ 、や $\begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$ などのようにも表せますが、左辺を $\begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix}$ 、右辺を $\begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$ としたのは、式(5-5)以下で多層壁を扱うためです。

- ・熱容量が無視できる空気層は、式(5-3)で $C=0$ とすると、

$$\text{空気層の伝達行列は} \quad \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (5-4) \quad \text{となります。}$$

部材内の空気層の他に、内表面と外表面の熱伝達にも適用します。



<多層壁へ展開>

- 式(5-3)、式(5-4)を前頁の右下図のN層の部材で構成される多層壁に展開します。また、0層目に内表面熱伝達の空気層と、N+1層目に外表面熱伝達の空気層を加えます。

なお、簡略のために各層の伝達行列を $[F_i]$ とします。境界条件は、室内温度が Θ_0 、外気温度が Θ_{N+2} 、室内側の熱流が ψ_0 、室外側の熱流が ψ_{N+2} です。

- 式(5-3)を室内側の0層目から、から順番にN+1層目まで適用すると、

$$\begin{bmatrix} \Theta_0 \\ \psi_0 \end{bmatrix} = [F_0] \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix}, \text{ 第1層目は } \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix} = [F_1] \begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix}, \text{ 第2層目は } \begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = [F_2] \begin{bmatrix} \Theta_3 \\ \psi_3 \end{bmatrix}, \dots$$

となります。

部材内部の温度と熱流を消去すると、次の式(5-5)が得られます。

$$\begin{bmatrix} \Theta_0 \\ \psi_0 \end{bmatrix} = [F_0][F_1][F_2] \cdots [F_n][F_{n+1}] \begin{bmatrix} \Theta_{N+2} \\ \psi_{N+2} \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

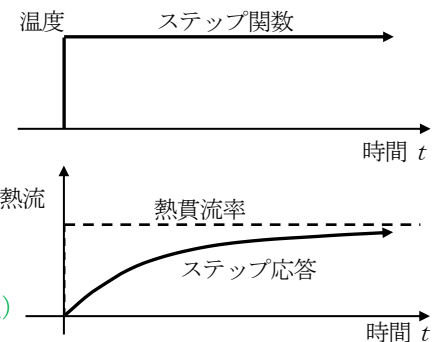
更に、各層の伝達行列の $[F_0][F_1][F_2] \cdots [F_n][F_{n+1}]$ の積を求めると最終的に式(5-6)が得られます。

$$\begin{bmatrix} \Theta_0 \\ \psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_{N+2} \\ \psi_{N+2} \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

- 右辺の伝達行列の A, B, C, D は部材の入力値で決まるので、既知の値の定数になります。

<ステップ応答と伝達関数>

- ステップ応答とは、右上図の時刻0から単位1の温度を与えた時の熱流の応答を言います。(右下図は貫流のステップ応答)



- 式(5-6)で、室内温度に“1”のステップ関数の励振を与え、外気温度は“0”として、熱流のステップ応答 ψ_0, ψ_{N+2} を求めます。

- 時間領域でステップ関数の室温 $f(t)=1$ をラプラス変換すると $L\{1\}=\Theta_0=1/s$ となります。

外気温度“0”のラプラス変換は、 $L\{0\}=\Theta_{N+2}=0$ です。(→下段の補足)

- 式(5-6)は式(5-7)になります。

$$\begin{bmatrix} 1/s \\ \psi_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

- 式(5-7)を解くと (→文献① pdf. 7-8, ② pdf. 162-164)、

$$\text{吸熱と貫流の単位応答} \quad \psi_A = \frac{D}{sB} \quad \text{と} \quad \psi_T = \frac{1}{sB} \quad (5-8) \quad \text{を得ます。}$$

また、出力 ψ_A, ψ_T と入力 $1/s$ の関係を $\frac{\psi_A}{1/s}, \frac{\psi_T}{1/s}$ とすると、

$$\frac{\psi_A}{1/s} = \frac{D}{B} = G_A(s) \quad \text{と} \quad \frac{\psi_T}{1/s} = \frac{1}{B} = G_T(s) \quad (5-9) \quad \text{となります。}$$

この G_A を吸熱の伝達関数、 G_T を貫流の伝達関数といいます。(→次頁の【補足】)

※外壁の熱取得で使う貫流応答は、外気が1℃の励振で室内への貫流応答ですが、これは式(5-8)の、室内が1℃の励振で外気への貫流応答と同じになります。

※ <ラプラス変換の演算>: 時間 t の関数 $f(t)$ のラプラス変換の一般式は $L\{f(t)\} = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt$ です。

$$\begin{aligned} f(t)=1 &\rightarrow \int_0^\infty 1e^{-st} dt = \frac{1}{s} & f(t)=t &\rightarrow \int_0^\infty te^{-st} dt = \frac{1}{s^2} \\ f(t)=e^{-\alpha t} &\rightarrow \int_0^\infty e^{-\alpha t} e^{-st} dt = \frac{1}{s+\alpha} & f'(t)=\frac{df(t)}{dt} &\rightarrow \int_0^\infty f'(t)e^{-st} dt = sF(s)-f(0) \end{aligned}$$

【補足1】基礎方程式から伝達行列を導く

この間のプロセスは、巻末に示した文献でも説明が省略されています。長くかつ煩雑なので、本書でも初めは省略するつもりでしたが、理解を深めるために必要なプロセスなので、この【補足】で説明することにしました。やや難題ですが、式の展開を1つ1つ丁寧に追うと理解できるはずですが、また、式を展開していくと自然に解に至ると言うよりは、巧みに解まで誘導していると考えると納得しやすいと思います。また、何故、次の式になるか分からない場合は、逆算すると理解できることがあります。

それでは始めます。なお、下記の式⑧までは二階偏微分方程式を解く時の常套手段です。

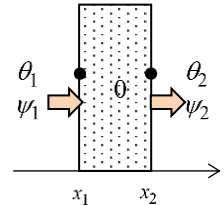
※原典は松尾陽著の手書きの講義ノート「熱負荷・室温変動の理解と算法」ですが、一部補足と簡略化をしています。

<熱伝導の二階微分方程式>

- ・実時間領域の基礎方程式である式(5-1)の二階偏微分方程式から始めます。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \cdots \text{式(5-1)}$$

- ・境界条件 $\theta_1 = \theta(0, t) = 1$ 内側表面温度が1℃のステップ関数 $\cdots \text{①}$
 $\theta_2 = \theta(\ell, t) = 0$ 外側表面温度0℃一定 $\cdots \text{②}$
- ・初期条件 $\theta(x, 0) = 0$ 壁体内部は初め0℃ $\cdots \text{③}$



- i) 変数分離：温度を $\theta(x, t) = X(x) \cdot T(t)$ のように、場所 x のみの関数 $X(x)$ と時間 t のみの関数 $T(t)$ の積になると仮定します。これを式(5-1)に代入すると、 $X(x) \cdot T'(t) = aX''(x) \cdot T(t)$ となります。

$$\text{変形して} \quad \frac{T'(t)}{aT(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -r^2 \quad (r \text{ はある定数})$$

$$\text{これより} \quad T'(t) = -r^2 a T(t) \quad \cdots \text{④}$$

$$X''(x) = -r^2 X(x) \quad \cdots \text{⑤}$$

$$\text{ii) 式④の一般解} \quad T(t) = B \cdot e^{-r^2 a t} \quad \cdots \text{⑥}$$

$$\text{iii) 式⑤の一般解} \quad X(x) = \begin{cases} b_1 x + b_2 & (r = 0) \\ B_1 \cos(rx) + B_2 \sin(rx) & (r \neq 0) \end{cases} \quad \cdots \text{⑦}$$

$$\text{iv) 式⑥と式⑦をまとめると} \quad \theta(x, t) = \begin{cases} b_1 x + b_2 & (r = 0 : \text{定常解} \cdots t \text{ の微分が} 0) \\ (B_1 \cos(rx) + B_2 \sin(rx)) \cdot e^{-r^2 a t} & (r \neq 0 : \text{過渡応答}) \end{cases}$$

一般解を求めます。(可能な解を全て加え合わせたものです)

$$\therefore \quad \theta(x, t) = b_1 x + b_2 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ (B_{1k} \cos(r_k x) + B_{2k} \sin(r_k x)) \cdot e^{-r_k^2 a t} \} \quad \cdots \text{⑧}$$

$$\text{v) 境界条件:} \quad \theta(0, t) = b_2 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ B_{1k} \cdot e^{-r_k^2 a t} \} = 1 \quad \cdots \text{内側表面温度が1℃のステップ応答(一定)です。}$$

これより、 $b_2 = 1$ 、 $B_{1k} = 0$ を得ます。

$$\theta(\ell, t) = b_1 \ell + 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ B_{2k} \sin(r_k \ell) \cdot e^{-r_k^2 a t} \} = 0 \quad \cdots \text{外側表面温度が0℃(一定)です。}$$

$$\text{これより、} b_1 = -1/\ell, \sin(r_k \ell) = 0 \text{ を得ます。} \quad \therefore r_k \ell = k\pi \quad \therefore r_k = k\pi/\ell$$

$$\therefore \quad \theta(x, t) = -\frac{1}{\ell} x + 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ B_k \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 a t} \right\} \quad (B_k \text{ は任意の定数}) \quad \cdots \text{⑨}$$

$$\text{vi) 初期条件:} \quad \theta(x, 0) = -\frac{1}{\ell} x + 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ B_k \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) \right\} = 0$$

$$\therefore \quad \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ B_k \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) \right\} = \frac{1}{\ell} x - 1 \quad \cdots \text{⑩}$$

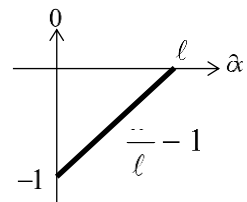
式⑩は、右図の図形をフーリエ解析する問題と同じです。

両辺に $\sinh\left(\frac{k'\pi}{\ell} x\right)$ を掛けて $0 \sim \ell$ まで積分します。

$$\text{左辺} = \int_0^{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \left\{ \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) \cdot \sin\left(\frac{k'\pi}{\ell} x\right) dx \right\} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \left\{ \frac{\sin(k-k')\pi}{(k-k')\pi/\ell} - \frac{\sin(k+k')\pi}{(k+k')\pi/\ell} \right\} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \begin{matrix} 0 & (k \neq k') \\ \frac{\ell}{2} B_k & (k = k') \end{matrix} \right\} = \frac{\ell}{2} B_k \quad (k \neq k' \text{ は棄却})$$

$$\text{右辺} = \int_0^{\ell} \left(\frac{x}{\ell} - 1 \right) \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) dx = \left[-\left(\frac{x}{\ell} - 1 \right) \cdot \frac{\ell}{k'\pi} \cos\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) + \frac{1}{\ell} \cdot \left(\frac{\ell}{k'\pi} \right)^2 \sin\left(\frac{k\pi}{\ell} x\right) \right]_0^{\ell} = -\frac{\ell}{k\pi}$$

$$\therefore \quad B_k = -\frac{2}{k\pi}$$



vii) 温度 $\theta(x, t)$ の解
$$\theta(x, t) = -\frac{1}{\ell}x + 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{\ell}x\right) \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at} \right\} \quad \dots \textcircled{11}$$

viii) 熱流を $\phi(x, t)$ とすると
$$\phi(x, t) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{\ell} + \frac{2\lambda}{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \cos\left(\frac{k\pi}{\ell}x\right) \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at} \right\} \quad \dots \textcircled{12}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{内表面での吸熱応答} \quad \phi_1(t) = \phi(0, t) = \frac{\lambda}{\ell} + \frac{2\lambda}{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \cos\left(\frac{k\pi}{\ell} \times 0\right) \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at} \right\} = \frac{\lambda}{\ell} + \frac{2\lambda}{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at} \\ \text{外表面での貫流応答} \quad \phi_2(t) = \phi(\ell, t) = \frac{\lambda}{\ell} + \frac{2\lambda}{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \cos\left(\frac{k\pi}{\ell} \times \ell\right) \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at} \right\} = -\frac{\lambda}{\ell} + \frac{2\lambda}{\ell} \sum_{k=1}^{\infty} \{(-1)^k \cdot e^{-\left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 at}\} \end{array} \right\} \dots \textcircled{13}$$

<ラプラス変換> ここでは L をラプラス変換記号とします。

i) 記号 壁内の温度 $L\{\theta(x, t)\} = \Theta(x, s)$
内表面温度 $L\{\phi_1(t)\} = \Theta_1(s)$ 、外表面温度 $L\{\phi_2(t)\} = \Theta_2(s)$

ii) 像空間への移行

基礎方程式
$$L\left\{a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right\} = a \frac{d^2 \Theta}{dx^2}, \quad L\left\{\frac{\partial \theta}{\partial t}\right\} = s\Theta \quad \text{※} \quad L\{f'\} = sF(s) - f(0) \quad \text{ただし、初期条件より } f(0) = 0$$

$\therefore s\Theta = a \frac{d^2 \Theta}{dx^2}$ 像空間では x のみの常微分方程式になります。 $\dots \textcircled{14} = \text{式 5-2}$

iii) 一般解 $\Theta = e^{\mu x}$ として式⑭に代入すると、 $s = a\mu^2 \quad \therefore \mu = \pm\sqrt{s/a}$
※ 式⑭ $\Rightarrow \Theta = e^{\mu x}$ の形は、式⑤の $X'' = -r^2 X \Rightarrow X(x) = B_1 \cos(rx) + B_2 \sin(rx)$ 同じ形

$\therefore \Theta(x, s) = P_1 e^{\sqrt{s/a} \cdot x} + P_2 e^{-\sqrt{s/a} \cdot x}$ または
$$\Theta(x, s) = P_1 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot x) + P_2 \sinh(\sqrt{s/a} \cdot x) \quad \dots \textcircled{15}$$

※ 公式 $\cosh A = (e^A + e^{-A})/2, \sinh A = (e^A - e^{-A})/2$

iv) 境界条件 $x = 0$ で $\Theta_1 = \Theta(0, s) = P_1 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot 0) + P_2 \sinh(\sqrt{s/a} \cdot 0) = P_1 \quad \therefore P_1 = \Theta_1$
 $x = \ell$ で $\Theta_2 = \Theta(\ell, s) = \Theta_1 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) + P_2 \sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) \quad \therefore P_2 = \frac{\Theta_1 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) - \Theta_2}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)}$

像空間における温度の一般解
$$\Theta(x, s) = \frac{\Theta_1 \sinh\{\sqrt{s/a}(\ell - x)\} + \Theta_2 \sinh(\sqrt{s/a} \cdot x)}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} \quad \dots \textcircled{16}$$

v) ステップ応答 式⑭で $\Theta_1 = 1/s$ (実空間における 1°C のステップ関数)、 $\Theta_2 = 0$ (実空間での 0°C 一定)

と置くと、
$$\Theta(x, s) = \frac{\sinh\{\sqrt{s/a} \cdot (\ell - x)\}}{s \sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} \quad \dots \textcircled{17}$$

式⑭が、実空間の式⑪のステップ応答に対応する像空間でのステップ応答です。

<均質壁での表面温度と熱流の関係> 知りたいのは、表面の温度と表面の熱流の関係です。

i) 実空間での熱流 $\phi(x, t)$ を、像空間では $L\{\phi(x, t)\} = \Phi(x, s)$ とします。

$$\Phi = -\lambda \frac{d\Theta}{dx} = -\lambda \sqrt{s/a} \cdot \frac{-\Theta_1 \cosh\{\sqrt{s/a}(\ell - x)\} + \Theta_2 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot x)}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} \quad \dots \textcircled{18}$$

ii) 表面熱流: 内表面熱流を Φ_1 、外表面熱流を Φ_2 とします。

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_1 = \Phi(0, s) = -\lambda \sqrt{s/a} \cdot \frac{-\Theta_1 \cosh\{\sqrt{s/a}(\ell - 0)\} + \Theta_2 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot 0)}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} = \lambda \sqrt{s/a} \cdot \frac{\Theta_1 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) - \Theta_2}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} \\ \Phi_2 = \Phi(\ell, s) = -\lambda \sqrt{s/a} \cdot \frac{-\Theta_1 \cosh\{\sqrt{s/a}(\ell - \ell)\} + \Theta_2 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} = \lambda \sqrt{s/a} \cdot \frac{\Theta_1 - \Theta_2 \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)}{\sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell)} \end{array} \right\} \dots \textcircled{19}$$

iii) 行列表示: 式⑭を変形すると
$$\left. \begin{array}{l} \Theta_1 = \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) \cdot \Theta_2 + \frac{1}{\lambda \sqrt{s/a}} \sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) \cdot \Phi_2 \\ \Phi_1 = \lambda \sqrt{s/a} \cdot \sinh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) \cdot \Theta_2 + \cosh(\sqrt{s/a} \cdot \ell) \cdot \Phi_2 \end{array} \right\} \dots \textcircled{20}$$

また、熱伝導率を λ 、容積比熱を c とすると $a = \lambda/c$ 、また、部材の厚さを ℓ とすると、熱抵抗が $R = \ell/\lambda$ 、

熱容量が $C = c\ell$ で $RC = \ell^2 c/\lambda = \ell^2/a \quad \therefore \sqrt{s/a} \cdot \ell = \sqrt{sRC}$ また $\lambda \sqrt{s/a} = \sqrt{sRC}/R$

これより式(5-3)を得ます。
$$\begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{sRC} & \frac{R}{\sqrt{sRC}} \sinh \sqrt{sRC} \\ \frac{\sqrt{sRC}}{R} \sinh \sqrt{sRC} & \cosh \sqrt{sRC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} \quad (5-3) \text{再}$$

【補足2】貫流応答 ψ_T の相反則

先の式(5-7) $\begin{bmatrix} 1/s \\ \psi_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix}$ で $1/s$ は室温のステップ関数、 ψ_A は内→内（室温励振による吸熱応答）、 ψ_T は内→外（室温励振による外部への貫流応答）を表します。

なお、HASP で使うの貫流応答は外→内の ψ_{T*} （外気温を励振とする室内への貫流応答）ですが、相反則により $\psi_T = \psi_{T*}$ であることをこの【補足】で確認します。

まず、最も単純な右図の単層壁で考えます。

$$\text{式(5-7)を元の形で表すと} \quad \begin{bmatrix} 1/s \\ \psi_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 \\ S_1^* & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix} \quad \dots \textcircled{1} \text{です。}$$

$$\text{なお、} C_1 = \cosh \sqrt{sRC}, S_1 = \frac{R}{\sqrt{sRC}} \sinh \sqrt{sRC}, S_1^* = \frac{\sqrt{sRC}}{R} \sinh \sqrt{sRC} \quad \text{です。}$$

また $AD - BC = C_1 C_1 - S_1 S_1^* = 1$ （双曲線関数の公式 $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ になります。これは後で使います）

$$\text{式}\textcircled{1}\text{を解くと、} \psi_A = \frac{D}{sB} = \frac{C_1}{s \times S_1} \quad \dots \textcircled{2}, \quad \psi_T = \frac{1}{sB} = \frac{1}{s \times S_1} \quad \dots \textcircled{3} \text{を得ます。}$$

$$\text{外部励振の場合は、} \quad \begin{bmatrix} 0 \\ -\psi_{T*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 \\ S_1^* & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/s \\ -\psi_{A*} \end{bmatrix} \quad \dots \textcircled{4} \text{です。}$$

※右辺の $1/s$ が外気温のステップ関数です。なお、熱流には向きがあり、式(5-7)、式(1)は室内→外部の熱流の向きを+としているので、外→内の屋外→室内の熱流を表す式③では、熱流には $-\psi_{T*}, -\psi_{A*}$ のように-の符号を付けます。

$$\text{式}\textcircled{4}\text{を} \psi_{A*} \text{について解くと、} \quad \psi_{A*} = \frac{C_1}{s \times S_1} \quad \dots \textcircled{5} \text{を得ます。}$$

$$\text{更に} \psi_{T*} \text{について解くと、} \quad \psi_{T*} = -\frac{S_1^*}{s} + C_1 \psi_{A*} = -\frac{S_1^*}{s} + \frac{C_1 C_1}{s \times S_1} = \frac{-S_1^* S_1 + C_1 C_1}{s \times S_1} = \frac{1}{s \times S_1} \quad \dots \textcircled{6} \text{を得ます。}$$

式③と式⑥より $\psi_T = \psi_{T*}$ と相反則が確認できます。

次に多層壁の場合ですが、式が複雑になるので右図の二層の場合で考えます。まず室温励振の場合、式①は式⑦になります。

$$\begin{bmatrix} 1/s \\ \psi_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 \\ S_1^* & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & S_2 \\ S_2^* & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 + S_1 S_2^* & C_1 S_2 + S_1 C_2 \\ S_1^* C_2 + C_1 S_2^* & S_1^* S_2 + C_1 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_T \end{bmatrix} \quad \dots \textcircled{7}$$

$$\text{これを解くと貫流応答} \quad \psi_T = \frac{1}{s \times (C_1 S_2 + S_1 C_2)} \quad \dots \textcircled{8}, \quad \text{吸熱応答} \quad \psi_A = \frac{1}{s} \times \frac{C_1 C_2 + S_1^* S_2}{C_1 S_2 + S_1 C_2} \quad \dots \textcircled{9} \text{を得ます。}$$

外部励振の場合、式④は式⑩になります。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -\psi_{T*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 + S_1 S_2^* & C_1 S_2 + S_1 C_2 \\ S_1^* C_2 + C_1 S_2^* & S_1^* S_2 + C_1 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/s \\ -\psi_{A*} \end{bmatrix} \quad \dots \textcircled{10}$$

$$\text{式}\textcircled{10}\text{を吸熱応答} \psi_{A*} \text{について解くと、} \quad \psi_{A*} = \frac{1}{s} \times \frac{C_1 C_2 + S_1 S_2^*}{C_1 S_2 + S_1 C_2} \quad \dots \textcircled{11} \text{を得ます。}$$

$$\text{更に貫流応答} \psi_{T*} \text{について解くと} \quad \begin{bmatrix} 0 \\ -\psi_{T*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 + S_1 S_2^* & C_1 S_2 + S_1 C_2 \\ S_1^* C_2 + C_1 S_2^* & S_1^* S_2 + C_1 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/s \\ -\psi_{A*} \end{bmatrix}$$

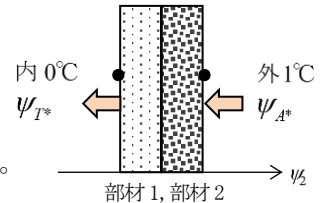
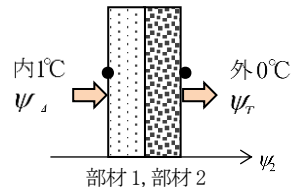
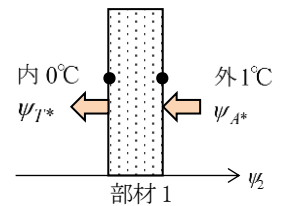
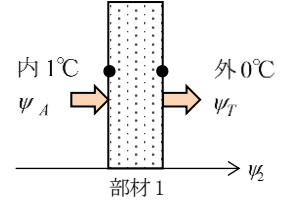
$$\psi_{T*} = -\frac{S_1^* C_2 + C_1 S_2^*}{s} + (S_1^* S_2 + C_1 C_2) \psi_{A*} = \frac{1}{s} \times \frac{-(S_1^* C_2 + C_1 S_2^*)(C_1 S_2 + S_1 C_2) + (S_1^* S_2 + C_1 C_2)(C_1 C_2 + S_1 S_2^*)}{C_1 S_2 + S_1 C_2} \quad \dots \textcircled{12}$$

式⑫の右辺分母を整理すると、

$$\begin{aligned} \text{右辺の分母} &= C_1 C_1 C_2 C_2 + C_1 S_1 C_2 S_2^* + C_1 S_1^* C_2 S_2 + S_1 S_1^* S_2 S_2^* - C_1 C_1 S_2 S_2^* - C_1 S_1 C_2 S_2^* - C_1 S_1^* C_2 S_2 - S_1 S_1^* C_2 C_2 \\ &= C_1 C_1 C_2 C_2 + S_1 S_1^* S_2 S_2^* - C_1 C_1 S_2 S_2^* - S_1 S_1^* C_2 C_2 = C_1 C_1 (C_2 C_2 - S_2 S_2^*) + S_1 S_1^* (S_2 S_2^* - C_2 C_2) \\ &= C_1 C_1 \times 1 + S_1 S_1^* \times (-1) = C_1 C_1 - S_1 S_1^* = 1 \end{aligned}$$

$$\text{よって、} \psi_{T*} = \frac{1}{s \times (C_1 S_2 + S_1 C_2)} \equiv \psi_T \quad \dots \textcircled{13} \quad \text{で多層壁での相反則が確認できました。}$$

なお、吸熱応答は内→内と外→外では異なるので $\psi_A \neq \psi_{A*}$ です。



(2) 逆変換してステップ応答を求める

- ・ラプラス変換から時間領域に戻るのが逆変換です。これが難問ですが、以下に考え方の骨子を示します。
- ・時間領域での熱流のステップ応答の近似式が式(5-10)のように得られたとします。

$$h(t) \approx A_0 + \sum_{i=1}^m A_i e^{-\alpha_i t} \quad (5-10)$$

これをラプラス変換すると式(5-11)になります。

$$\psi(s) = \frac{G(s)}{s} \approx \frac{A_0}{s} + \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{s + \alpha_i} \quad (5-11)$$

式(5-10)と式(5-11)の各項が対応します。なお、定数 A_0 は熱貫流率です。 $G(s)$ は、先の式(5-9)で得られた伝達関数で既知の値、 s はラプラスパラメータ $s_0 \sim s_9$ のことです。

式(5-10)と式(5-11)で未知数は $A_i, \alpha_i (i=1, 2, \dots, m)$ です。式(5-11)を次の式(5-12)ように変形します。

$$H(s) = \frac{G(s) - A_0}{s} \approx \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{s + \alpha_i} \quad (5-12)$$

- ・式(5-12)の左辺側は既知で、この精解値を $H(s) = \frac{G(s) - A_0}{s}$ として、右辺との残差 $\delta_j = \sum_i \frac{A_i}{s_j + \alpha_i} - H_j$ が最小になる $A_i, \alpha_i (i=1, 2, \dots, m)$ を見つければ良いことになります。

途中の過程は複雑なので飛ばします。 →次ページの【補足】
高次の項は極めて微小な値なので無視できるとして $i=1, 2$ の2項とします。

- ・最終的に、項 $i=1, 2$ について、式(5-13)の正規方程式を得ます。

$$\left. \begin{aligned} \sum_i \left\{ A_i \sum_j \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)(s_j + \alpha_k^*)} + B_i \sum_j \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)^2 (s_j + \alpha_k^*)} \right\} &= \sum_j \frac{H_j}{s_j + \alpha_k^*} \\ \sum_i \left\{ A_i \sum_j \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)(s_j + \alpha_k^*)^2} + B_i \sum_j \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)^2 (s_j + \alpha_k^*)^2} \right\} &= \sum_j \frac{H_j}{(s_j + \alpha_k^*)^2} \end{aligned} \right\} (k=1, 2) \quad (5-13)$$

- ・式(5-13)は、 A_1, A_2, B_1, B_2 を未知数とする4元連立方程式です。また、式(5-13)の各項はラプラスパラメータ $s_j (j=1, 2, \dots, 9)$ の和になっています。ここで、 $\alpha_i^* = \alpha_i - \Delta_i$ 、 $\Delta_i = -B_i / A_i$ と置きます。

<sub. CPARAM> の近似解 α_i^* の見つけ方

- ・問題は α_i の近似値 α_i^* をどうやって求めるかです。式(5-13)は A_1, A_2, B_1, B_2 を未知数とする4元連立方程式なので、 α_i^* を仮定すれば解くことができます。 A_1, A_2, B_1, B_2 が得られれば、 $\alpha_i^* = \alpha_i - \Delta_i = \alpha_i - B_i / A_i$ を修正して反復計算すればよいのですが、 α_i^* の出発点を解の近傍に設定できるとは限りません。
- ・そこで、sub. CPARAMでは以下のようにして近似解を見つけます。
- ・先ず $i=1$ として1項で始めます。出発点として $\alpha_1^* = s_9$ を与えて式(5-13)を解いて A_1, B_1 を得ます。
- ・ここで、 $w_1 = \frac{-\Delta_1}{\alpha_1^* - \Delta_1} = \frac{B_1 / A_1}{\alpha_1^* + B_1 / A_1}$ として $\alpha_1^* \rightarrow \alpha_1^* e^{-w_1}$ に修正します。この $\alpha_1^* e^{-w_1}$ を新たな α_1^* にして反復計算をします。 $|w_1| \leq 0.0001$ (α_1^* の誤差が0.01%)で収束したものと見做します。
- ・1項目の α_1^* が求まったら、次に2項目も $\alpha_2^* = s_9$ を与えて連立方程式(5-13)を解いて A_1, A_2, B_1, B_2 を得ます。
- ・ここで、 $w_i = \frac{B_i / A_i}{\alpha_i^* + B_i / A_i}$ として $\alpha_i^* \rightarrow \alpha_i^* e^{-w_i}$ と修正します。この $\alpha_i^* e^{-w_i}$ を新たな α_i^* にして反復計算をします。なお、 $|w_2| \leq 0.0001$ (α_2^* の誤差が0.01%)で収束したものと見做します。
- ・以上の逆変換によって A_1, A_2 と α_1^*, α_2^* の近似解を得ます。

なお、 $|w_2|$ の誤差が $|w_1|$ の誤差よりも大きくなる場合は、 $i=1$ の1項の近似解に戻します。

※具体的な計算手順は→ソースプログラム HASP/ACLD/8501 および ACLD_HEX60 の sub. CPARAM を参照下さい。

【補足 3】 A_i, α_i を決定するための正規方程式の導き方

この【補足】は、文献¹⁾の pdf. pp117-125) を基に、若干の補足と簡略化をしています。

・残差から始めます。ここでは、 $A_1, \alpha_1, A_2, \alpha_2$ の $i=1, 2$ の 2 項近似とします。

また、 s はラプラスパラメータで HASP では $s_0 \sim s_9$ の値を持ちます。

$$i) \text{ 残差 } \delta_j \quad \delta_j = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{A_i}{s_j + \alpha_i} \right\} - H_j = \frac{A_1}{s_j + \alpha_1} + \frac{A_2}{s_j + \alpha_2} - H_j \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\cdot \text{ 残差の 2 乗和 } \quad S = \sum_{j=0}^9 (\delta_j)^2 = \sum_{j=0}^9 \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{A_i}{s_j + \alpha_i} - H_j \right\}^2 = \sum_{j=0}^9 \left\{ \frac{A_1}{s_j + \alpha_1} + \frac{A_2}{s_j + \alpha_2} - H_j \right\}^2 \rightarrow \text{最小化} \quad \dots \textcircled{2}$$

・残差の 2 乗和 S が最小になる $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ を見つければ良いのです。

最小 2 乗法の常套手段で、残差の 2 乗和 S を A_i, α_i で偏微分し、微分係数が 0 となる条件を見つめます。

$$\text{よって、} \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial A_i} &= \sum_{j=0}^9 \left\{ \frac{2A_i}{(s_j + \alpha_i)^2} + \frac{2A_k}{(s_j + \alpha_i)(s_j + \alpha_k)} - \frac{2H_j}{(s_j + \alpha_i)} \right\} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \alpha_i} &= \sum_{j=0}^9 \left\{ \frac{2A_i^2}{(s_j + \alpha_i)^3} + \frac{2A_i A_k}{(s_j + \alpha_i)^2 (s_j + \alpha_k)} - \frac{2A_i H_j}{(s_j + \alpha_i)^2} \right\} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2 \quad k=3-i) \quad \dots \textcircled{3}$$

・以上より、次式④の正規方程式を得ます。(式③と式④は表記が異なりますが、内容は同じです)

$$\text{正規方程式は} \quad \left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^2 A_i \left\{ \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i)(s_j + \alpha_k)} \right\} &= \sum_{j=0}^9 \frac{H_j}{s_j + \alpha_k} \\ \sum_{i=1}^2 A_i \left\{ \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i)(s_j + \alpha_k)^2} \right\} &= \sum_{j=0}^9 \frac{H_j}{(s_j + \alpha_k)^2} \end{aligned} \right\} \quad (k=1, 2) \quad \dots \textcircled{4}$$

なお、式④は非線形連立方程式であるため、簡単には解けません。

ii) HASP での導き方

・HASP では、 α_i の近傍値 α_i^* を $\alpha_i = \alpha_i^* + \Delta_i$ とし、逐次近似的に求める方程式に作り直します。

※式(5-13)を得るための数学的処理 : t を任意の数、 n は $n > 1$ の整数とします。

$$1 - t + t^2 - t^3 + \dots + (-1)^{n-1} t^{n-1} \{ (1+t) \} = 1 + (-1)^{n-1} t^n \quad \dots \textcircled{5}$$

$$t \neq 1 \quad \text{として、式⑤の両辺を } 1+t \text{ で割ると右辺は } \frac{1 + (-1)^{n-1} t^n}{1+t} = \frac{1}{1+t} + \frac{(-1)^{n-1} t^n}{1+t} \quad \text{となります。}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{1+t} = 1 - t + t^2 - t^3 + \dots + (-1)^{n-1} t^{n-1} + \frac{(-1)^{n-1} t^n}{1+t} \quad \dots \textcircled{6}$$

ここで $s_j + \alpha_i = s_j + \alpha_i^* + \Delta_i$ と置き換え、また、 $\frac{\Delta_i}{s_j + \alpha_i^*} = t$ とします。すると、 $\frac{A_i}{s_j + \alpha_i}$ は、

$$\frac{A_i}{s_j + \alpha_i} = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^* + \Delta_i} = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^* (1 + \frac{\Delta_i}{s_j + \alpha_i^*})} = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^* (1+t)} = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} \times \frac{1}{1+t} = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} \times \{ 1 - t + t^2 - t^3 + \dots \}$$

誤差は $\Delta_i \neq 0$ であることより t の高次項 t^2 以降は無視できます。よって、下式⑦を得ます。

$$\frac{A_i}{s_j + \alpha_i} \doteq \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} (1-t) = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} - \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} t = \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} - \frac{\Delta_i A_i}{(s_j + \alpha_i^*)^2} \quad \dots \textcircled{7}$$

$$\cdot \text{ ここで } B_i = -\Delta_i A_i \text{ と書き換えると、式①は } \delta_j = \sum_i \frac{A_i}{s_j + \alpha_i} - H_j \doteq \sum_i \left\{ \frac{A_i}{s_j + \alpha_i^*} - \frac{B_i}{(s_j + \alpha_i^*)^2} \right\} - H_j \quad \dots \textcircled{1}'$$

式①' によって A_1, A_2, B_1, B_2 を決定する正規方程式を作ると、式(5-13)が得られます。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)(s_j + \alpha_k^*)} + B_i \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)^2 (s_j + \alpha_k^*)} \right\} &= \sum_{j=0}^9 \frac{H_j}{s_j + \alpha_k^*} \\ \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)(s_j + \alpha_k^*)^2} + B_i \sum_{j=0}^9 \frac{1}{(s_j + \alpha_i^*)^2 (s_j + \alpha_k^*)^2} \right\} &= \sum_{j=0}^9 \frac{H_j}{(s_j + \alpha_k^*)^2} \end{aligned} \right\} \quad (k=1, 2) \quad \dots (5-13) \text{再}$$

(3) ステップ応答から△波応答を求める

・前(2)で $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ を得たので、式(5-10)の時間領域の熱流のステップ応答が求められました。

改めて示すと、 $h(t) = A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t}$ ($i = 1, 2$ の2項とします) (5-10)'

式(5-10)'の熱流の単位は $[\text{W}/^\circ\text{Cm}^2]$ です。

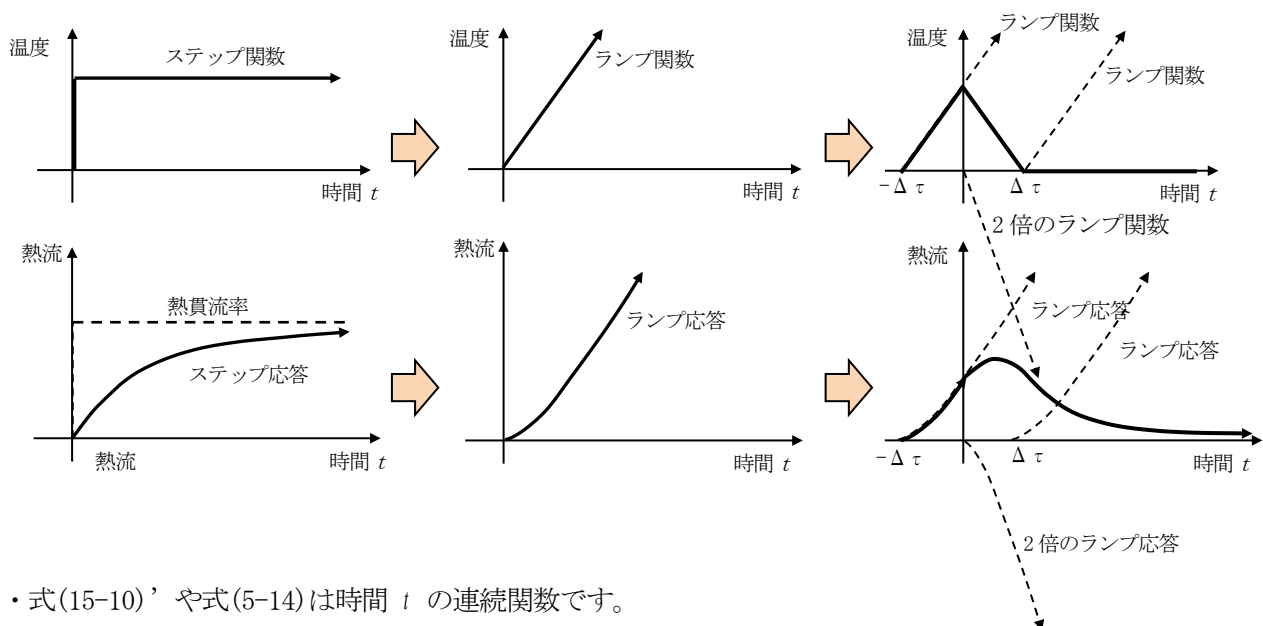
・式(5-10)'のステップ応答を積分すると式(5-14)のランプ応答になります。

$$F(t) = \int h(t) = A_0 t + \frac{A_1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1 t}) + \frac{A_2}{\alpha_2} (1 - e^{-\alpha_2 t}) \quad (5-14)$$

式(5-14)は熱流の積算値である熱量で、単位は $[\text{J}/^\circ\text{Cm}^2]$ です。

・下図に示すように、ランプ関数の位相をずらしながら重ね合わせると、励振の温度の△波が得られます。

熱応答も同様に、ランプ応答を重ね合わせることで、△波励振に対する△波の熱応答が得られます。



・式(5-10)'や式(5-14)は時間 t の連続関数です。

コンピュータで計算する場合は、時間間隔 $\Delta\tau$ 毎に離散化して使います。

また、式(5-14)は熱量で単位が $[\text{J}/^\circ\text{Cm}^2]$ なので、これを計算時間間隔 $\Delta\tau$ で割って熱流に戻した式(5-15)を使います。単位が $[\text{W}/^\circ\text{Cm}^2]$ になります。

$$\frac{F(t)}{\Delta\tau} = \frac{A_0}{\Delta\tau} t + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 t}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 t}) \quad (5-15)$$

・この後の△波および△波を求める時は、式(5-10)'と式(5-15)を使います。

・式(5-15)のランプ応答を、位相をずらしながら組み合わせて、△波応答を求めます。なお、計算時間間隔は任意の $\Delta\tau$ (単位は [h]) とします。

0) $-\Delta\tau \leq t \leq 0$: 式(5-15)のランプ応答ですが、位相を $\Delta\tau$ だけ早めます。

連続関数は、
$$\frac{F(t+\Delta\tau)}{\Delta\tau} = \frac{A_0}{\Delta\tau} (t+\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 (t+\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 (t+\Delta\tau)})$$

ここで $t = 0$ を代入して、離散系の△波の応答値 ϕ_0 を得ます。

$$\phi_0 = \frac{A_0}{\Delta\tau} \Delta\tau + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}) = A_0 + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau})$$

1) $0 < t \leq \Delta\tau$: 先の0)の連続関数に、式(5-15)の上下逆さまで勾配が2倍のランプ応答を加えます。

連続関数は、

$$\frac{F(t+\Delta\tau) - 2F(t)}{\Delta\tau} = \frac{A_0}{\Delta\tau}(t+\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(t+\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(t+\Delta\tau)})$$

$$- \frac{2A_0}{\Delta\tau}(t) - \frac{2A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(t)}) - \frac{2A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(t)})$$

ここで、 $t = \Delta\tau$ を代入して、離散系の△波の応答値を ϕ_1 得ます。

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{A_0}{\Delta\tau}(2\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(2\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(2\Delta\tau)}) - \frac{2A_0}{\Delta\tau}(\Delta\tau) - \frac{2A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(\Delta\tau)}) - \frac{2A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(\Delta\tau)}) \\ &= -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-2e^{-\alpha_1\Delta\tau} + e^{-2\alpha_1\Delta\tau}) - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-2e^{-\alpha_2\Delta\tau} + e^{-2\alpha_2\Delta\tau}) \\ &= -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2 - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2\end{aligned}$$

2) $\Delta\tau \leq t \leq 2\Delta\tau$: 先の2)の連続関数に、式(5-15)で位相が $\Delta\tau$ 遅れたランプ応答を加えます。

連続関数は

$$\begin{aligned}\frac{F(t+\Delta\tau) - 2F(t) + F(t-\Delta\tau)}{\Delta\tau} &= \frac{A_0}{\Delta\tau}(t+\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(t+\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(t+\Delta\tau)}) \\ &\quad - \frac{2A_0}{\Delta\tau}(t) - \frac{2A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(t)}) - \frac{2A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(t)}) + \frac{A_0}{\Delta\tau}(t-\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(t-\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(t-\Delta\tau)})\end{aligned}$$

ここで、 $t = 2\Delta\tau$ を代入して、離散系の△波の熱応答 ϕ_2 以下を得ます。

$$\begin{aligned}\phi_2 &= \frac{A_0}{\Delta\tau}(3\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(3\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(3\Delta\tau)}) - \frac{2A_0}{\Delta\tau}(2\Delta\tau) - \frac{2A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(2\Delta\tau)}) - \frac{2A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(2\Delta\tau)}) \\ &\quad + \frac{A_0}{\Delta\tau}(\Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1(\Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2(\Delta\tau)}) \\ &= 3A_0 - 4A_0 + A_0 - \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(e^{-3\alpha_1\Delta\tau} - 2e^{-2\alpha_1\Delta\tau} + e^{-\alpha_1\Delta\tau}) - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(e^{-3\alpha_2\Delta\tau} - 2e^{-2\alpha_2\Delta\tau} + e^{-\alpha_2\Delta\tau}) \\ &= -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_1\Delta\tau} - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_2\Delta\tau}\end{aligned}$$

3) $2\Delta\tau \leq t$

・先の2)の連続関数に $t = 3\Delta\tau$ を代入して、離散系の△波の熱応答 ϕ_3 以下を得ます。

$$\phi_3 = -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_1(2\Delta\tau)} - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_2(2\Delta\tau)}$$

・同様に、連続関数に $t = 4\Delta\tau$ を代入して、離散系の△波の熱応答 ϕ_4 以下を得ます。

$$\phi_4 = -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_1(3\Delta\tau)} - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2 e^{-\alpha_2(3\Delta\tau)}$$

以下、 $\phi_5, \phi_6, \phi_7, \phi_8, \phi_9, \phi_{10}, \dots$ も同様です。

<項別公比法による△波の熱応答の解>

・上記の0)～3)より、 ϕ_2 以下は、 ϕ_1 の右辺の各項を初項として、公比が $e^{-\alpha_1\Delta\tau}, e^{-\alpha_2\Delta\tau}$ の等比数列であることが分かります。

・HASPでは、初項を P_0 、 ϕ_1 の各項を P_1 と P_2 とし、項別公比を R_1 と R_2 とする項別公比法を用います。

※項別公比法を用いると畳み込み演算の計算量が少なくなります。(⇒本編1章(3)(4)(5)節)

・△波応答 初項 $P_0 = A_0 + \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}) + \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})$ (5-16-0)

項別項 $P_1 = -\frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2$ 、 $P_2 = -\frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau}(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2$ (5-16-1)

項別公比 $R_1 = e^{-\alpha_1\Delta\tau}$ 、 $R_2 = e^{-\alpha_2\Delta\tau}$ (5-16-2)

＜熱応答の総和が熱貫流率と一致するかの検証＞

- ・熱量の保存則が成立しないと、熱負荷に誤差が生じたり、発散する原因になりかねません。
 - ・式(5-16)の△波応答の総和が熱貫流率 A_0 に等しくなるかを検証します。
- なお、 A_0, A_1, A_2 の項別に和を取ると分かりやすくなります。

- ・ A_0 項の和：式(5-16-0)の右辺第1項 $S_0 = A_0$ (熱貫流率)
- ・ A_1 項の和：式(5-16-0)の右辺第2項と、式(5-16-1)の P_0 と、 P_1, R_1 による等比級数との和です。

$$S_1 = \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta \tau}) - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta \tau})^2 / (1 - e^{-\alpha_1 \Delta \tau}) = \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta \tau}) - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta \tau}) = 0$$

- ・ A_2 項の和：同様に

$$S_2 = \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta \tau}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta \tau})^2 / (1 - e^{-\alpha_2 \Delta \tau}) = \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta \tau}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta \tau}) = 0$$

- ・以上より、式(5-16)の総和は、

$$S_0 + S_1 + S_2 = A_0 + 0 + 0 = A_0 \quad (\text{熱貫流率})$$

項別公比法の熱応答の総和が熱貫流率 A_0 に等しくなりました。

熱量の過不足が生じず、熱量の保存が成立することが証明されました。

＜貫流応答と吸熱応答＞

- ・上記では、貫流応答の場合を説明しました。
- 貫流応答は外壁や内壁の貫流熱を求める時に使います。
- 一方、吸熱応答は、冷房負荷重み係数や蓄熱応答係数で使います。
- ・貫流応答では、(3)節の式(5-12)で貫流の伝達関数 $G_T(s)$ を使って得た近似解 $A_0, A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ を用いて、式(5-16)の各項を求めました。
 - ・吸熱応答では、(3)節の式(5-12)で吸熱の伝達関数 $G_A(s)$ を使って得た近似解 $A_0, A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ を用います。
 - ・貫流と吸熱では、 A_0 は熱貫流率と同じで、 $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ 値が異なりますが、△波の熱応答の求め方は全く同じで、また、得られる熱応答も式(5-16)と同じ形になります。
- 求め方も、式(5-16)の式の形も同じなので、吸熱応答の説明は省略します。

(4) 直角△波応答を求める

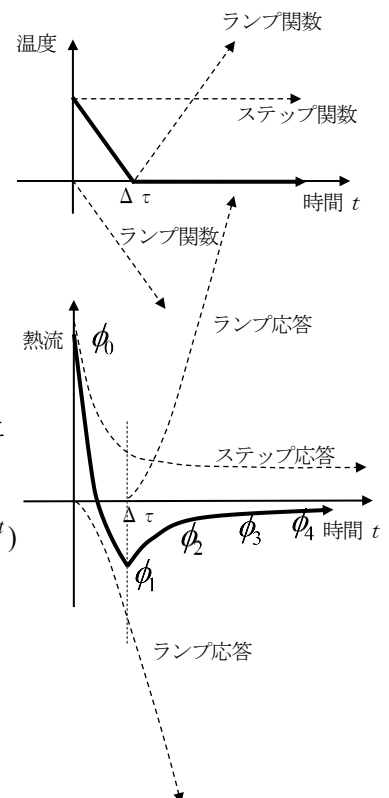
- ・直角△波の吸熱応答を求め方を示します。直角△波の吸熱応答は、2章の間欠空調の不連続運転となる空調開始時や外気導入開始時や空調停止時の計算に用いられます。
- ・右図のように、ステップ応答とランプ応答を組み合わせると直角△波応答を求めます。(実際は右向きですがフォントの都合で△を使います)

- 0) $0 \leq t \leq \Delta \tau$: 式(5-10)'のステップ応答と式(5-15)のランプ応答を組み合わせます。ランプ応答は $\Delta \tau$ で割って単位時間あたりの熱流に換算したものです。連続関数は

$$h(t) - \frac{F(t)}{\Delta \tau} = A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} - \frac{A_0}{\Delta \tau} t - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_1 t}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta \tau} (1 - e^{-\alpha_2 t})$$

上式に、 $t = 0$ を代入して、離散系の直角△波の熱応答 ϕ_0 を得ます。

$$\phi_0 = A_0 + A_1 + A_2 + 0 + 0 + 0 = A_0 + A_1 + A_2$$



1) 先の 0) の連続関数の式に $t = \Delta\tau$ を代入して離散系の直角△波の熱応答 ϕ_1 を得ます。 A_0 の項が消えます。

$$\begin{aligned}\phi_1 &= A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 \Delta\tau} + A_2 e^{-\alpha_2 \Delta\tau} - \frac{A_0}{\Delta\tau} \Delta\tau - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}) \\ &= A_1 \left(e^{-\alpha_1 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}}{\alpha_1 \Delta\tau} \right) + A_2 \left(e^{-\alpha_2 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}}{\alpha_2 \Delta\tau} \right)\end{aligned}$$

2) $\Delta\tau < t \leq 2\Delta\tau$: 0) と 1) の連続関数に $\Delta\tau$ だけ位相が遅れた式(5-15)のランプ応答を組み合わせます。

$$\begin{aligned}\text{連続関数} \quad h(t) - \frac{F(t)}{\Delta\tau} + \frac{F(t - \Delta\tau)}{\Delta\tau} &= A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} - \frac{A_0}{\Delta\tau} t - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 t}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 t}) \\ &\quad + \frac{A_0}{\Delta\tau} (t - \Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 (t - \Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 (t - \Delta\tau)})\end{aligned}$$

ここで $t = 2\Delta\tau$ を代入して、離散系の直角△波の熱応答 ϕ_2 を得ます。 A_0 の項が消えます。

$$\begin{aligned}\phi_2 &= A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 (2\Delta\tau)} + A_2 e^{-\alpha_2 (2\Delta\tau)} - \frac{A_0}{\Delta\tau} (2\Delta\tau) - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 (2\Delta\tau)}) - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 (2\Delta\tau)}) \\ &\quad + \frac{A_0}{\Delta\tau} (2\Delta\tau - \Delta\tau) + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 (2\Delta\tau - \Delta\tau)}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 (2\Delta\tau - \Delta\tau)}) \\ &= A_1 e^{-\alpha_1 (2\Delta\tau)} - \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) e^{-\alpha_1 \Delta\tau} + A_2 e^{-\alpha_2 (2\Delta\tau)} - \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}) e^{-\alpha_2 \Delta\tau} \\ &= A_1 \left(e^{-\alpha_1 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}}{\alpha_1 \Delta\tau} \right) e^{-\alpha_1 \Delta\tau} + A_2 \left(e^{-\alpha_2 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}}{\alpha_2 \Delta\tau} \right) e^{-\alpha_2 \Delta\tau}\end{aligned}$$

3) $2\Delta\tau < t \leq 3\Delta\tau$

2) の連続関数に $t = 3\Delta\tau$ を代入して離散系の直角△波の熱応答 ϕ_3 を得ます。 A_0 の項が消えます。

$$\phi_3 = A_1 \left(e^{-\alpha_1 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}}{\alpha_1 \Delta\tau} \right) e^{-2\alpha_1 \Delta\tau} + A_2 \left(e^{-\alpha_2 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}}{\alpha_2 \Delta\tau} \right) e^{-2\alpha_2 \Delta\tau}$$

以下、 $\phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7, \dots$ も同様です。

<項別公比法による直角△波応答の解> ※下の式(5-17)はあとで式(5-20)に修正されます

・上記の 0)～3) より、△波応答と同様に直角△波応答でも、 ϕ_2 以下は、 ϕ_1 の右辺の各項を初項として、公比が $e^{-\alpha_1 \Delta\tau}, e^{-\alpha_2 \Delta\tau}$ の等比数列であることが分かります。

・HASP では、初項を P_0 、 ϕ_1 の各項を P_1 と P_2 とし、項別公比を R_1 と R_2 とする項別公比法を用います。

・直角△波応答 初項 $P_0 = A_0 + A_1 + A_2$ (5-17-0)

項別項 $P_1 = A_1 \left(e^{-\alpha_1 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}}{\alpha_1 \Delta\tau} \right)$ 、 $P_2 = A_2 \left(e^{-\alpha_2 \Delta\tau} - \frac{1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}}{\alpha_2 \Delta\tau} \right)$ (5-17-1)

項別公比 $R_1 = e^{-\alpha_1 \Delta\tau}$ 、 $R_2 = e^{-\alpha_2 \Delta\tau}$ (5-17-2)

<△波応答が熱貫流率と一致するかの検証>

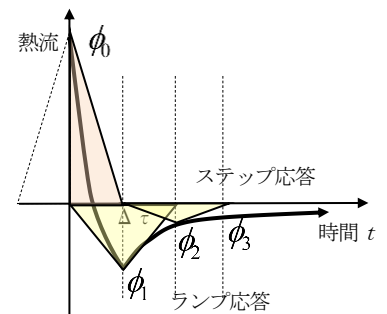
・直角△波は、励振が△波の半分です。

よって、熱応答の総和は熱貫流率 A_0 の 1/2 にならなければなりません。

・直角△波の場合、式(5-17-0)の P_0 は△波の頂点の値ですが、△波は右半分だけなので、積算するときは 1/2 だけ算入します。

第 2 項以下は、 P_1, P_2 を初項とし、項別公比の等比数列です。

なお、この P_1, P_2 の熱応答は△波なので、そのまま積算します。



・ A_0, A_1, A_2 の項別に和をとります。

・ A_0 の項の和は $S_{0\Delta} = A_0 / 2$ (熱貫流率の 1/2 です) (5-18-0)

・ A_1 の項の和は、 P_0 の半分の $A_1 / 2$ と、 P_1, R_1 による等比級数との和です。

$$\text{積算値は } S_{1\Delta} = \frac{A_1}{2} + A_1(e^{-\alpha_1\Delta\tau} - \frac{1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{\alpha_1\Delta\tau}) / (1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}) = \frac{A_1}{2} + \frac{A_1 e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}} - \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau} \neq 0 \quad (5-18-1)$$

・ A_2 の項の和も同様に、

$$\text{積算値は } S_{2\Delta} = \frac{A_2}{2} + A_2(e^{-\alpha_2\Delta\tau} - \frac{1-e^{-\alpha_2\Delta\tau}}{\alpha_2\Delta\tau}) / (1-e^{-\alpha_2\Delta\tau}) = \frac{A_2}{2} + \frac{A_2 e^{-\alpha_2\Delta\tau}}{1-e^{-\alpha_2\Delta\tau}} - \frac{A_2}{\alpha_2\Delta\tau} \neq 0 \quad (5-18-2)$$

※式(5-18-1)と式(5-18-2)で、右辺の第1項と第2項はステップ応答、第3項がランプ応答です。

・ A_0 の項の和が $S_{0\Delta} = A_0 / 2$ ですから、 A_1, A_2 の積算値は0になるべきですが、 $S_{1\Delta} \neq 0$ 、 $S_{2\Delta} \neq 0$ です。

離散系の Δ 波の熱応答の総和が $A_0 / 2$ に一致しません。

<直角 Δ 波応答の修正>

・ 直角 Δ 波熱応答の総和が $A_0 / 2$ (熱貫流率の 1/2) にならないと熱量保存が崩れることになります。

そこで修正をします。(以下の修正方法は、HASP の解説書などに記述がないので、筆者の推測です)

・ A_0 の積和は $A_0 / 2$ なので、残りの A_1, A_2 の各々の積算値 $S_{1\Delta}, S_{2\Delta}$ がゼロになるように修正します。

また、ステップ応答由来の $A_1 \rightarrow A_1^*$ 、 $A_2 \rightarrow A_2^*$ と修正することにします。

$$\text{・ } S_{1\Delta} \text{ で示すと、} \quad S_{1\Delta} = -\frac{A_1^*}{2} + \frac{A_1^* e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}} - \frac{A_1}{\alpha_1\Delta\tau} \quad (5-19-0) \quad \text{とします。}$$

$$\text{式(5-19-0)を } A_1^* \text{ について解きます。} \quad A_1^* = \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 \quad (5-19-1) \quad \text{を得ます。}$$

$$\text{・ 同様に } A_2^* \text{ について解くと} \quad A_2^* = \frac{2(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})}{\alpha_2\Delta\tau(1+e^{-\alpha_2\Delta\tau})} A_2 \quad (5-19-2) \quad \text{を得ます。}$$

・ ステップ応答そのものを修正するのではなく、直角 Δ 波応答の $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ における、ステップ応答由来の $A_1 \rightarrow A_1^*$ 、 $A_2 \rightarrow A_2^*$ と修正します。

$$0) P_0 \text{ では、} P_0 = A_0 + A_1^* + A_2^* = A_0 + \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 + \frac{2(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})}{\alpha_2\Delta\tau(1+e^{-\alpha_2\Delta\tau})} A_2$$

$$1) P_1 \text{ では、} P_1 = A_1^* e^{-\alpha_1\Delta\tau} - \frac{1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{\alpha_1\Delta\tau} A_1 \quad \text{の右辺第1項がステップ応答由来で、これを修正します。}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 \times e^{-\alpha_1\Delta\tau} - \frac{1-e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{\alpha_1\Delta\tau} A_1 = \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})e^{-\alpha_1\Delta\tau} - (1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 \\ \therefore &= -\frac{1-2e^{-\alpha_1\Delta\tau}+e^{-\alpha_1(2\Delta\tau)}}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 = -\frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} A_1 \end{aligned}$$

$$2) P_2 \text{ も同様に、} P_2 = A_2^* e^{-\alpha_2\Delta\tau} - \frac{1-e^{-\alpha_2\Delta\tau}}{\alpha_2\Delta\tau} A_2 \quad \text{の右辺第1項がステップ応答由来で、これを修正します。}$$

$$\therefore P_2 = -\frac{(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2}{\alpha_2\Delta\tau(1+e^{-\alpha_2\Delta\tau})} A_2 \quad \text{を得ます。}$$

以上より修正した直角 Δ 波応答の項別公比法の式は以下になります。

＜直角△波応答の修正解＞

$$\text{・ 直角△波応答 初項} \quad P_0 = A_0 + \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})}A_1 + \frac{2(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})}{\alpha_2\Delta\tau(1+e^{-\alpha_2\Delta\tau})}A_2 \quad (5-20-0)$$

$$\text{項別項} \quad P_1 = -\frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})}A_1, \quad P_2 = -\frac{(1-e^{-\alpha_2\Delta\tau})^2}{\alpha_2\Delta\tau(1+e^{-\alpha_2\Delta\tau})}A_2 \quad (5-20-1)$$

$$\text{項別公比} \quad R_1 = e^{-\alpha_1\Delta\tau}, \quad R_2 = e^{-\alpha_2\Delta\tau} \quad (5-20-2)$$

※ この式が HASP のプログラムに組込まれています。

＜直角△波応答の修正解が熱貫流率と一致するかの確認＞

・ 直角△波応答の総和が熱貫流率の半分に一致するように修正したのですが、念のため確認します。

$$\text{・ } A_0 \text{ の項の和は} \quad S_{0\Delta} = A_0/2$$

・ A_1 の項の和 P_0 の半分と、 P_1, R_1 による等比級数との和を求めます。

$$S_{1\Delta} = \frac{1}{2} \times \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})}A_1 - \frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})^2}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \times \frac{A_1}{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})} = \frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})}A_1 - \frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})}A_1 = 0$$

・ 同様に A_2 の項の和も $S_{2\Delta} = 0$ です。

・ よって直角△波の熱応答の総和は $S_{\Delta} = S_{0\Delta} + S_{1\Delta} + S_{2\Delta} = \frac{A_0}{2} + 0 + 0 = \frac{A_0}{2}$ で、熱貫流率の半分に一致します。

項別公比法の熱応答の総和が熱貫流率 A_0 に等しくなりました。

熱量の過不足が生じず、熱量の保存が成立することが証明されました。

※ 修正前の式(5-17)の項別公比法の結果は離散化誤差を含んでいました。

では、どのような条件なら離散誤差がなくなるのか、修正前の式(5-18-1)で検証します。

$$\text{式(5-18-1)を変形します。} \quad \frac{A_1^*}{A_1} = \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \quad \text{、右辺で } \Delta\tau \rightarrow 0 \text{ とします。}$$

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \right\} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{2}{(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \times \frac{(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau} \right\} = \frac{2}{2} \times 1 = 1$$

・ 以上より、 $\Delta\tau \rightarrow 0$ とすると $A_1^* = A_1$ となり離散誤差がなくなることがわかります。

なお、 $\Delta\tau = 0$ は連続関数に他なりません。(誤差の原因は離散化による誤差)

※ 上記の極限の式は、次のようにしても解けます。

$$\text{【公式】} \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1 \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-x}}{x} = 1$$

【公式】 関数 $f(x), g(x)$ が $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{0}{0}$ または $\frac{\infty}{\infty}$ と不定であり、 $f(x)$ と $g(x)$ が共に微分可能で、

$$f'(x) \neq 0 \text{ かつ } g'(x) \neq 0 \text{ である場合に、} \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(x)}{g'(x)} \quad \text{として解けます。}$$

これを利用すると、

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{2(1-e^{-\alpha_1\Delta\tau})}{\alpha_1\Delta\tau(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \right\} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \left\{ \frac{2\alpha_1 e^{-\alpha_1\Delta\tau}}{\alpha_1(1+e^{-\alpha_1\Delta\tau}) + \alpha_1\Delta\tau(-\alpha_1 e^{-\alpha_1\Delta\tau})} \right\} = \frac{2\alpha_1}{\alpha_1(1+1)+0} = \frac{2\alpha_1}{2\alpha_1} = 1$$

6. 冷房負荷重み係数 と 蓄熱応答係数 (ここはやや難解ですので読み飛ばしても構いません)

HASP では室内に対流によって伝えられる熱を熱負荷とします。

- 例えば、外壁から時間遅れを伴って室内に流入した熱は、まだ対流と輻射を区別していないので、熱負荷とは言いません。負荷と区別するために、熱取得(HG:Heat Gain)と呼びます。
- 熱取得のうち対流成分は即、熱負荷になりますが、輻射成分は室内の他の壁面に放射され、時間遅れを伴って室内へ再放出されます。再放出された熱の対流成分は熱負荷となりますが、輻射成分は更に他の壁面に輻射され……延々と続きます。この室内相互輻射による時間遅れを“冷房負荷重み係数”で求めます。また、室温変動による蓄熱応答係数も同様のプロセスで求めることができます。
- これらをどのように求めるのかを本章で見えていきます。(⇒資料ハ) ほか)
なお、資料ハ) pp30-35 に詳しい解説がありますが、ここでは、難解な部分には補足説明を加えます。

(1) 室内放射伝熱の基礎式

室を構成する熱的諸部位には i) と ii) があります。

- i) 表面積を有するもの : 外壁・内壁・接地壁・異形部材(柱や梁)・窓など
- ii) 表面積を有しないもの : 室内空気・換気・室内の熱容量(家具や書類など)

先ず、i) を対象に放射熱伝導の基礎式を導くことにします。(ii) はその後に補正します)

<部位 i の内表面での等価気温>

$$\text{等価気温 } \theta_{ei} \text{ は} \quad \theta_{ei} = \frac{\alpha_c \theta_R + \alpha_r \sum g_{ij} \theta_{sj} + h_i}{\alpha_t} \quad (6-1)$$

ここで、 θ_R, θ_{sj} : 室温と他の壁面の表面温度、 $\alpha_c, \alpha_r, \alpha_t = \alpha_c + \alpha_r$: 表面熱伝達率(対流, 輻射, 対流+輻射)、 g_{ij} : 面 i から見る面 j の放射吸収係数、 h_i : 面 i での発熱(一般式なので見込んでいます)

この等価気温は、面 i での対流・放射・発熱を 1 つの温度 θ_{ei} で代表させ、表面 i と全熱伝達率で熱授受することを表したものです。(外壁の等価温度 SAT と同じ考え方です)

下式の左辺が対流・放射・発熱で、右辺が等価温度の熱伝達です。

$$\alpha_c(\theta_R - \theta_{si}) + \alpha_r \sum (g_{ij} \theta_{sj} - \theta_{si}) + h_i = \alpha_t(\theta_{ei} - \theta_{si})$$

これを θ_{ei} についてまとめると先の式(6-1)が得られます。

一方、この熱授受 $\alpha_t(\theta_{ei} - \theta_{si})$ は、熱取得で得られる熱流と平衡しているはずですが。

$$G_{Ai} \theta_{ei} - G_{Ti} \theta_{oi} = \alpha_t A_i (\theta_{ei} - \theta_{si}) \quad (6-2)$$

ここで、 $G_{Ai} \theta_{ei}$ は壁体 i の内表面での室内での吸熱応答

$G_{Ai} \theta_{oi}$ は壁体 i の内表面での外部からの貫流熱応答

左辺の差引と表面 i での全熱伝達を平衡しているという式です。

G_{Ai}, G_{Ti} は吸熱の伝達関数と貫流の伝達関数です。

補足) 伝達関数とは：微分方程式をラプラス変換した非定常熱伝導が伝達関数です。この伝達関数を逆変換すると、時間軸の熱伝導の解が得られます。(⇒以上は5章で解説)

5章では、単位面積あたりの伝達関数ですが、6章では、伝達関数に全て面積が掛かっています。

よって、式(6-2)の右辺には面積を乗じる必要があります。

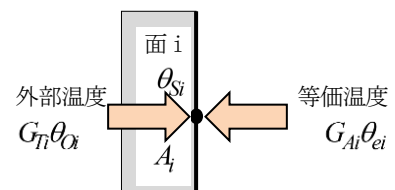
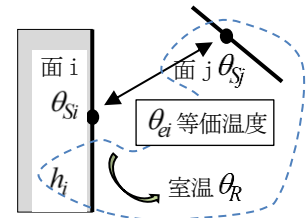
本章の解説は、元の資料ハ) に合わせています。6章では、室全体を扱うので、面積を含む伝達関数の方が分かり易いと思います。

式(6-1)と式(6-2)から等価温度を消去すると、次式(6-3)が得られます。

この式(6-3)が室内放射伝熱の基礎式になります。

$$A_i \theta_{si} - \frac{\alpha_r}{\alpha_t} (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) \sum (g_{ij} \theta_{sj}) = \frac{G_{Ti}}{\alpha_t} \theta_{oi} + (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) \frac{\alpha_c \theta_R + h_i}{\alpha_t} \quad (6-3)$$

やや煩雑ですが、式(6-2)の θ_{ei} に式(6-1)を代入すれば式(6-3)が得られます。



(2) 重み係数の標準形

<蓄熱応答の解>

導出したい目的の式が次式で、この Φ は室内空気から室内各表面に向けての熱流です。

$$\Phi = \sum \alpha_c A_i (\theta_R - \theta_{Si}) \quad (6-4)$$

ここで、式(6-1)、式(6-2)のを以下のように近似します。

$$g_{ij} = \frac{A_j}{\bar{A}} \quad \text{ただし、} \bar{A} = \sum A_j \quad (6-5)$$

これは、熱放射 g_{ij} を面積に比例して放射するものとして、面と面の関係を簡略化したものです。

式(6-5)を式(6-3)に代入します。

そして左辺が $A_i \alpha_c (\theta_R - \theta_{Si})$ の項になるように変形すると、次式(6-6)が得られます。

$$\alpha_c A_i (\theta_R - \theta_{Si}) - \frac{\alpha_r}{\alpha_t} (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) \frac{\sum \alpha_c A_j (\theta_R - \theta_{Sj})}{\bar{A}} = \frac{\alpha_c}{\alpha_t} \{ (G_{Ai} \theta_R - G_{Ti} \theta_{Oi}) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) h_i \} \quad (6-6)$$

式(6-3)から式(6-6)の誘導では $\alpha_t = \alpha_c + \alpha_r$, $\alpha_c / \alpha_t = (\alpha_t - \alpha_r) / \alpha_t = 1 - \alpha_c / \alpha_t$ を利用します。

この式(6-6)の左辺第2項の分子の $\sum \alpha_c A_i (\theta_R - \theta_{Si})$ は式(6-4)の Φ の定義に一致します。

また、式(6-6)をiに関して室全体で総和をとります。そうすると左辺第1項も Φ に一致します。

式(6-6)の総和の式を Φ を使って表すと、下式になります。

$$\Phi - \frac{\alpha_r}{\alpha_t \bar{A}} \sum (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) \Phi = \frac{\alpha_c}{\alpha_t} \sum \{ (G_{Ai} \theta_R - G_{Ti} \theta_{Oi}) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) h_i \}$$

更に Φ についてまとめると次式(6-7)が得られます。

$$\Phi = \frac{\sum \{ (G_{Ai} \theta_R - G_{Ti} \theta_{Oi}) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) h_i \}}{1 + \frac{\alpha_r}{\alpha_c \alpha_t} \cdot \frac{\sum G_{Ai}}{\bar{A}}} \quad (6-7)$$

この式(6-7)が求める蓄熱応答の解です。右辺の分母は熱応答の総和であり、これを分子で修正した式になっています。

なお、まだ冷房負荷重み係数でも蓄熱応答係数でもありません。

<重み係数の標準形>

式(6-7)の分母で $\sum G_{Ai} / \bar{A}$ は室を構成している書部位の吸熱応答の面積加重平均です。

これを改めて次のように記すことにします。

$$\bar{G}_A = \sum G_{Ai} / \bar{A} \quad (6-8)$$

この式(6-8)を用いて式(6-7)を書き改めると、次の式(6-9-1)が得られます。

また、式(6-9-1)に若干の変形を施すと、式(6-9-2)が得られます。

$$\Phi = \frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \sum \{ (G_{Ai} \theta_R - G_{Ti} \theta_{Oi}) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) h_i \} \quad (6-9-1)$$

$$\Phi = \left(\frac{\alpha_c}{\alpha_t} + \frac{\alpha_r}{\alpha_t} \cdot \frac{\alpha_c - \alpha_c \bar{G}_A / \alpha_t}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \right) \sum \{ (G_{Ai} \theta_R - G_{Ti} \theta_{Oi}) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) h_i \} \quad (6-9-2)$$

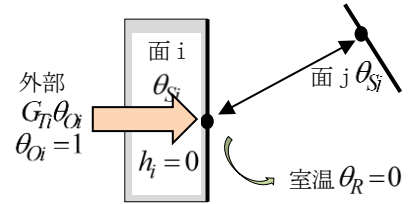
これらが重み係数の標準形です。

なお、式(6-9-1)から式(6-9-2)への展開はやや巧妙ですので難しいかと思います。

逆に、式(6-9-2)から式(6-9-1)に展開するのは分かりやすく、2つの式が同じであることを確認できると思います。

＜貫流熱伝達と内表面での熱授受の関係＞

ここで、部位 k のみに外気温度 θ_{Ok} が作用したものとし、他の条件は全て 0、即ち、 $\theta_R = 0$ 、 K を除いた部位で $\theta_{Oi} = 0$ ($i \neq k$)、 $h_k = 0$ とすると、 Φ は部位 k での貫流熱負荷の式になります。



この Φ を $\Phi_{T,k}$ で表します。また、式(6-9-1)と式(6-9-2)で、貫流の伝達係数は G_{Tk} のみを取り出し、慣例に従って符号を逆に取ると、次式(6-10-1)と式(6-10-2)が得られます。

$$\Phi_{Tk} = \frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \cdot G_{Tk} \theta_{Oi} \quad (6-10-1)$$

$$\Phi_{Tk} = \left(\frac{\alpha_c}{\alpha_t} + \frac{\alpha_r}{\alpha_t} \cdot \frac{\alpha_c - \alpha_c \bar{G}_A / \alpha_t}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \right) \cdot G_{Tk} \theta_{Ok} = \frac{\alpha_c}{\alpha_t} \cdot G_{Tk} \theta_{Ok} + \frac{\alpha_c - \alpha_c \bar{G}_A / \alpha_t}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \cdot \frac{\alpha_r}{\alpha_t} \cdot G_{Tk} \theta_{Ok} \quad (6-10-2)$$

＜3つの解法の式＞

式(6-10-1)と式(6-10-2)は、外気温度 θ_{Ok} から貫流冷房負荷 $\Phi_{T,k}$ を求める式を示しています。なお、これらの式より、室内の相互輻射を考慮した解法が3通りあることが分かります。

1つ目は、式(6-10-1)で、外気温度 θ_{Ok} を貫流伝達関数 $\frac{\alpha_c G_{Tk}}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t}$ で畳み込んで、貫流冷房負荷 $\Phi_{T,k}$ を直接得る方法。

2つ目は、式(6-10-1)で、外気温度 θ_{Ok} を伝達関数 G_{Tk} で畳み込んで貫流熱取得 $G_{Tk} \theta_{Oi}$ を得て、更に、これを $\frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t}$ で畳み込んで貫流冷房負荷 $\Phi_{T,k}$ が得る方法。

3つ目は、式(6-10-2)の対流と輻射を分離して、熱取得のうちの対流成分 $\frac{\alpha_c}{\alpha_t} \cdot G_{Tk} \theta_{Ok}$ はそのまま冷房負荷になり、輻射成分 $\frac{\alpha_r}{\alpha_t} \cdot G_{Tk} \theta_{Ok}$ は $\frac{\alpha_c - \alpha_c \bar{G}_A / \alpha_t}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t}$ で畳み込めば冷房負荷になる方法です。

(3) 冷房負荷重み係数と蓄熱応答係数の数

<冷房負荷重み係数の伝達関数>

HASP では熱取得の段階で対流と輻射を分離しているの、3つ目の方法を採用します。
よって、輻射成分に時間遅れを見込むための伝達関数に φ は下式となります。

$$\text{冷房負荷重み係数の伝達関数} \quad \varphi = \frac{\alpha_c - \alpha_c \bar{G}_A / \alpha_t}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \quad (6-11)$$

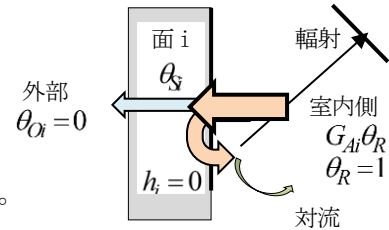
<蓄熱応答係数の伝達関数>

蓄熱応答係数は、室温が単位振動を受けたときに、
空気から室を構成する部位へ流出する熱ですから、
式(6-9-1)で室温 $\theta_R = 1$ 、外気温度は $\theta_{O_i} = 0$ 、 $h_i = 0$
とした場合に相当します。これらを式(6-9-1)に代入すると、

$$\Phi = \frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \sum \{ (G_{Ai} \times 1 - G_{Ti} \times 0) - (A_i - \frac{G_{Ai}}{\alpha_t}) \times 0 \} \quad \text{となります。}$$

これを整理すると次式 Φ を得ます。

$$\Phi = \frac{\alpha_c \sum G_{Ai}}{\alpha_c + \alpha_r \sum G_{Ai} / \alpha_t} = \frac{\alpha_c \bar{G}_A}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} \quad (6-12)$$



冷房負荷重み係数では面と面の放射のみが関係しますが、蓄熱応答係数には、(1)項で示した ii) 表面積を有しないもの（室内空気・換気・家具や書類など）の熱容量も関係します。

このうち、時間的に変化する換気を除いた熱容量の吸熱応答を G_A^* として式(6-12)に加えます。
こうして室温変動による室全体の蓄熱応答が得られます。これを Φ_S とします。

$$\text{蓄熱応答係数の伝達関数} \quad \Phi_S = \frac{\alpha_c \bar{G}_A}{\alpha_c + \alpha_r \bar{G}_A / \alpha_t} + G_A^* \quad (6-13)$$

<各部位の伝達関数への組み込み>

ところで、式(6-9)の $\sum G_{Ai}$ は室を構成している各部位の吸熱応答の伝達関数の総計です。なお、各部位の面積が掛かっています。 $\sum G_{Ai}$ をどのようにして求めるかを以下で見えていきます。

- 各部位の部材 i の伝達関数を $G_{Ai(j)}$ （吸熱）と $G_{Ti(j)}$ （貫流）、面積 A_i とします。
補足： $\sum G_{Ai}$ は吸熱応答ですが、個々の部位では吸熱と貫流の両方の伝達関数を組み込む場合があります。

- 外壁 $G_{Ai(j)} A_i$ を組み込みます。
- 内壁・接地壁・異形部材 $(G_{Ai(j)} - G_{Ti(j)}) A_i$ を組み込みます。
- 内壁で温度差係数 f を使う場合 $\{G_{Ai(j)} - (1-f) \cdot G_{Ti(j)}\} A_i$ を組み込みます。

$f=0$ の時は他の内壁・接地壁・異形部材と同じで、 $f=1$ なら外壁と同じになります。

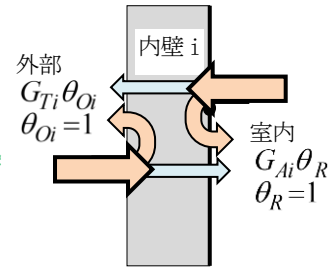
- 窓 $K_{i,blind} A_i$ を組み込みます。（ $K_{i,blind}$ はブラインドが閉の時の熱貫流率）
- 隙間風 は組み込みません。（蓄熱応答係数には補正項として組み込みます⇒(5)項）
- 室の熱容量 $G_{Ai(j)} A_i$ を組み込みます。

※内壁や接地壁・異形部材で、 $(G_{Ai(j)} - G_{Ti(j)})A_i$ と、吸熱と貫流の差引が組み込まれています。(⇒右図)

内壁などで、室温と外部の温度が同じ場合 ($f=0$ の場合です)、

$(G_{Ai(j)} - G_{Ti(j)})A_i$ の式の $-G_{Ti(j)}A_i$ は外部からの貫流になります。

室温と外部の温度が同じ場合の内壁や接地壁、梁柱では、伝達関数に外部からの熱が見込まれているので、熱取得(HG)の計算が省略できます。



＜ラプラス逆変換して 冷房負荷重み係数 と 蓄熱応答係数 を求める＞

先の式(6-11)の ϕ や、式(6-13)の Φ_s は伝達関数です。これらをラプラス逆変換して冷房負荷重み係数と蓄熱応答係数を求めます。なお、ラプラス逆変換の方法は、5章(2)節 (pp. 25-26) と同じなので、そちらを参照して下さい。

冷房負荷重み係数は、項別公比で P_0, P_1, R_1 を得ます。HASP では1項近似です。($P_2=0, R_2=0$ です)

蓄熱応答係数も項別公比で P_0, P_1, P_2, R_1, P_2 を得ます。(こちらは2項近似です)

なお、蓄熱応答係数の記号は、第2章と第3章では、昔の記号 WF を使っています。

(5) 窓と隙間風による蓄熱応答係数の補正

蓄熱応答係数の記号は、第2章と第3章では、昔の記号 WF を使っています。

＜窓ガラスの熱貫流率の補正＞

窓ガラスは厚さが小さく熱容量が小さいので、HASP では熱取得の計算で時間遅れを見込んでいません。

先の式(6-13)の伝達関数には、ブラインドが“閉”の時の熱貫流率×面積が定数として組込まれます。

窓はブラインドの開閉によって熱貫流率の値が時々刻々変化します。

これを補正するのが蓄熱応答係数の補正值です。

窓の蓄熱応答係数の補正值 ΔWF_{GL} は $\Delta WF_{GL} = (K_{GL} - K_{GL,blind}) \times A_{GL}$

ここに、 $K_{GL}, K_{GL,blind}$: その時の窓の熱貫流率とブラインド閉の時の熱貫流率、 A_{GL} : 窓面積

＜隙間風による補正＞

隙間風は、その時の風向や風速によって変化します。よって先の式(6-13)には隙間風の熱容量は含まれていません。隙間風による蓄熱応答係数の補正值は次のようになります。

隙間風による蓄熱応答係数の補正值 (顕熱) $\Delta WF_{INFL(S)}$ は $\Delta WF_{INFL(S)} = C\rho \cdot V_{INFL}$

隙間風による蓄熱応答係数の補正值 (潜熱) $\Delta WF_{INFL(L)}$ は $\Delta WF_{INFL(L)} = R\rho \cdot V_{INFL}$

ここに、 V_{INFL} : その時の隙間風量、

$C\rho$: 空気の容積比熱 (HASP では $0.288\text{kcal/m}^3\text{C}$) ,

$R\rho$: 水蒸気の気体定数 (HASP では $0.720\text{kcal/m}^3(\text{g/kg})$)

＜蓄熱応答係数への補正＞

窓ガラスと隙間風は、時刻によって変化するので、予め伝達関数に組込むことはできません。

なお、窓ガラスは熱容量が小さいので時間遅れを見込まないことと、隙間風は対流によるものなので時間遅れを見込む必要がありません。

よって、その時刻時刻で、蓄熱応答係数の0時の項に、直接補正すれば良いことになります。

蓄熱応答係数の補正值 (顕熱) $\Delta WF_{(S)} = \Delta WF_{GL} + \Delta WF_{INFL(S)}$

蓄熱応答係数の補正值 (潜熱) $\Delta WF_{(L)} = \Delta WF_{INFL(L)}$

直角△波も同様に補正します。

7. 任意の時間間隔にするためのプログラムの変更

- 前章で、ステップ応答とランプ応答や△波応答と∟波応答を求めました。
計算時間間隔が関係するのは、離散系の△波と∟波の熱応答を求める最後の段階です。
- 元々の HASP/ACLD/8501 や NewHASP/ACLD では計算時間間隔が 1 時間固定、つまり $\Delta\tau=1$ なので、プログラムには”1” が省略されていて、 $\Delta\tau$ に相当する変数がありません。
任意の計算時間間隔にするためには $\Delta\tau$ に相当する変数を組み込む必要があります。
- なお、例えば、計算時間間隔を 15 分と固定するのと、自由に選べるようにするのとで、プログラムの手間はそれほど違いません。よって、ACLD_HEX60 では、任意の計算時間間隔（といっても 60 分、30 分、20 分、15 分、12 分、10 分の 60 の約数）を選べるようにプログラム変更することになります。
- 熱応答の△波と∟波の熱応答を任意の計算時間間隔にするのが 6-1 節です。
また、照明の重み係数も、計算時間間隔が“1”となっており、これを任意の計算時間間隔に対応するように修正する必要があります。これを 6-2 節で解説します。
更に、気象データも任意の時間間隔の値を比例補間する必要がありますが、これは 6-3 節で解説します。
- 理論に関する変更は以上です。難解なのは理論ですが、(理論さえ分かれば) プログラム作りそれほど難しくはないはずです。

※理論は難解でも、アルゴリズムが分かればプログラミングはそれほど難しくありません。

プログラミングで面倒で手間と時間が掛かるのは、これ以外の部分です。例えば、入力データや結果の出力、配列などのデータ構造、時間ループの拡張、HASP 独特の XMQ 配列やポインタなどを修正しなくてはなりません。なお、本書は理論の解説なので、プログラミングについては要点のみを記します。

7-1 任意の計算時間間隔の△波と∟波応答を求めるためのプログラム変更

(1) 熱応答の理論 (復習)

- ステップ応答は
$$h(t) = A_0 + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} \quad (2 \text{ 項近似}) \quad (5-10)' \text{ 再}$$

これを積分したランプ応答は
$$F(t) = \int h(t) = A_0 t + \frac{A_1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1 t}) + \frac{A_2}{\alpha_2} (1 - e^{-\alpha_2 t}) \quad (5-14) \text{ 再}$$

ここに、 t : 時間、 A_0, A_1, A_2 : 項 (A_0 は熱貫流率に等しい)、 α : 根

- 計算時間間隔が関係するのは、離散化した△波応答 (下式 5-16) と∟波応答 (下式 5-20) です。

$\Delta\tau$ が計算時間間隔 (単位は[h]) です。元々の HASP は 1 時間毎の計算 ($\Delta\tau=1$) なので、プログラムでは $\Delta\tau$ を省略していますが、これを任意の時間間隔では記述することになります。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\text{波の項別公比法の式} \\ P_0 &= A_0 + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}) \\ P_1 &= -\frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})^2, \quad P_2 = -\frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau})^2 \\ R_1 &= e^{-\alpha_1 \Delta\tau}, \quad R_2 = e^{-\alpha_2 \Delta\tau} \end{aligned} \right\} \quad (5-16) \text{ 再}$$

$$\left. \begin{aligned} \angle\text{波の項別公比法の式} \\ P_0 &= A_0 + \frac{2A_1(1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})}{\alpha_1 \Delta\tau(1 + e^{-\alpha_1 \Delta\tau})} + \frac{2A_2(1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau})}{\alpha_2 \Delta\tau(1 + e^{-\alpha_2 \Delta\tau})} \\ P_1 &= -\frac{A_1(1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})^2}{\alpha_1 \Delta\tau(1 + e^{-\alpha_1 \Delta\tau})}, \quad P_2 = -\frac{A_2(1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau})^2}{\alpha_2 \Delta\tau(1 + e^{-\alpha_2 \Delta\tau})} \\ R_1 &= e^{-\alpha_1 \Delta\tau}, \quad R_2 = e^{-\alpha_2 \Delta\tau} \end{aligned} \right\} \quad (5-20) \text{ 再}$$

(2) sub.CPARAM に計算時間間隔を追加

- プログラム ACLD_HEX60 で項別公比を求めているのは subroutine CPARAM です。

subroutine CPARAM のプログラムリストを下に示しますが、修正するのは赤字で示した 4 行だけです。

この修正だけで、任意の計算時間間隔の応答係数を求めることができます。

- なお、実際の ACLD_HEX60 のプログラムでは $\Delta\tau$ ではなく、時間区分数 “nJHM” を使っています。

サブルーチンの中で $dT = 1.0 / \text{FLOAT}(\text{JHM})$ として、 $\Delta\tau$ に相当する数値に変換しています。

※ FLOAT は整数を実数に変換する関数です。なお、分子に実数 “1.0” を使っているのも、 $1.0/nJHM$ と記述しても問題ありません。実数と整数の混合計算は、実数に変換して計算されます。

なお、 $1/nJHM$ とすると整数の割り算になります。コンピュータでは整数の割り算の余りは切り捨てられ、結果の値が 0 になるのでダメです。

```
***          4. 4. CONVOLUTION PARAMETERS *****
*
*          SUBROUTINE CPARAM (NT, G, P, nJHM )          ! 引数 nJHM は時間区分数であり、これを追加する
*
*          REAL *8          G(0:9), S(9), H(9), P(8), E(2), A(2)
*          DOUBLE PRECISION Z(4,5), ZZ(5)          ! REAL *8 と DOUBLE PRECISION は同じ倍精度です。
*
*          DATA S/      0.00025,  0.001,  0.004,  0.016,  0.064,  0.256
*          ,      1.024,  4.096, 16.384/
*          :
*          : 前半の逆変換の部分は変更が無いので飛ばします。
*          :
*          :
*-----
22 P(1)=G(0)          ! Δ波 P(1)=G(0)=A0 : G(0)は熱貫流率の値
P(2)=G(0)          ! ㄱ波 P(2)=G(0)=A0 : G(0)は熱貫流率の値

      dT = 1.0 / FLOAT ( nJHM )          ! 計算時間間隔 dT=1.0/nJHM : dTがΔτの値

DO 21 I=1,N          ! 近似の項数のループ

A(I)=Z(I,NN1)          ! A(I)=ZZ(I,NN1) : ZZ(I,NN1)がAiの値
II=3*I
      U = A(I) / ( E(I) * dT )          ! U= Ai/(αi*Δτ) : E(I)が極αi
      V = dEXP ( - E(I) * dT )          ! V= exp(-αi*Δτ) : 以下ではEXPiと表記
P(1)=P(1)+U*(1.-V)          ! Δ波 P(1) : P0 = A0+Σ Ai*(αi*Δτ)*(1-EXPi)
P(2)=P(2)+2.*U*(1.-V)/(1.+V) ! ㄱ波 P(1) : P0 = A0+Σ 2*Ai*(αi*Δτ)*(1-EXPi)/(1+EXPi)
P(II)=-U*(1.-V)**2          ! Δ波 P(3),P(6) P1, P2 = -Ai/(αi*Δτ)*(1-EXPi)2
P(II+1)=-U*(1.-V)**2/(1.+V) ! ㄱ波 P(4),P(7) P1, P2 = -Ai/(αi*Δτ)*(1-EXPi)2/(1+EXPi)
P(II+2)=V          ! Δ波とㄱ波共通 R1, R2 = EXPi

21 CONTINUE

*          RETURN
          END
```

補足 プログラムの配列 P は以下の通りです。

P(1) : Δ波の応答係数の 0 項目	式(5-16)の P_0 に相当	
P(2) : ㄱ波の応答係数の 0 項目	式(5-20)の P_0 に相当	
P(3) : Δ波の応答係数の 1 項目	式(5-16)の P_1 に相当	
P(4) : ㄱ波の応答係数の 1 項目	式(5-20)の P_1 に相当	
P(5) : 応答係数の 1 項目の項別公比	式(5-16)と式(5-20)の R_1 に相当	(Δ波とㄱ波に共通)
P(6) : Δ波の応答係数の 2 項目	式(5-16)の P_2 に相当	
P(7) : ㄱ波の応答係数の 2 項目	式(5-20)の P_2 に相当	
P(8) : 応答係数の 2 項目の項別公比	式(5-16)と式(5-20)の R_2 に相当	(Δ波とㄱ波に共通)

(3) call CPARAM 文の修正

- ・ サブルーチン CPARAM を呼び出す CALL 文も修正しなければなりません。
ACLD_HEX60 で、サブルーチン CPARAM を呼び出すところは全部で 5 箇所あります。
- ・ 引数の最後の 5 番目に、時間区分数の変数 **nJHM** を追加します。

外壁の応答係数	CALL CPARAM(2, GTR, P, nJHM)
内壁の応答係数	CALL CPARAM(2, GTR, P, nJHM)
冷房負荷重み係数	CALL CPARAM(1, G , P, nJHM)
蓄熱応答係数 (顕熱)	CALL CPARAM(2, G , P, nJHM)
蓄熱応答係数 (潜熱)	CALL CPARAM(1, GTL , P, nJHM)

※ nJHM そのものは入力データとして読み込みます。(→6-4)

(4) 任意の時間区分の項別公比の検証 (20180604 版の結果による)

- ・ 検証は、蓄熱応答係数 (室温変動の重み係数) で比較しました。
- ・ 左図 : ACLD_HEX の場合、ACLD_HEX60(dT=1)の計算時間間隔 60 分の場合、ACLD_HEX60 (dT=0.5) の計算時間間隔 30 分の結果から 60 分間隔に合成した場合、この 3 つは完全に一致します。
HASP2 (NewHASP_3 の旧版で NewHASP/ACLD と同じ) だけが外れてますが、これは<FURN>の熱容量の扱いに違いがあるためです。
- ・ 右図 : <FURN>の熱容量を 0 にすると、全ての結果が一致します。

no spacWFの検証									
data by ACSS		data by AOLD_HEX		data by AOLD_HEX15		data by AOLD_HEX15		data by AOLD_HEX15	
HASP2	HASP2	AOLD_HEX	AOLD_HEX	AOLD_HEX	AOLD_HEX15	AOLD_HEX15	AOLD_HEX15	AOLD_HEX15	AOLD_HEX15
FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0	FURN=0
dt=1	dt=1	dt=1	dt=1	dt=1	dt=1	dt=0.5	dt=0.5	dt=1	dt=1
-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	3597.953	2332.351	4838.827	2338.750	4838.830	2338.750	6116.300	2459.810	2338.751
1	-1308.938	-302.441	-2463.993	-301.313	-2463.990	-301.313	-2554.940	-242.118	-301.314
2	-154.348	-147.529	-438.665	-146.895	-438.665	-146.895	-985.224	-135.087	-146.896
3	-141.937	-114.898	-153.668	-114.411	-153.668	-114.411	-402.603	-90.335	-114.412
4	-130.529	-102.907	-107.761	-102.473	-107.761	-102.473	-185.489	-70.873	-103.150
5	-120.037	-94.796	-95.126	-94.392	-95.126	-94.392	-103.748	-61.710	-95.503
6	-110.388	-87.772	-87.516	-87.391	-87.516	-87.391	-72.178	-56.767	-88.423
7	-101.515	-81.343	-81.025	-80.984	-81.025	-80.984	-59.232	-53.580	-81.868
OR	0.920	0.927	0.927	0.927	0.927	0.927	0.959	0.962	0.926
Σ	368.841	368.841	384.692	384.690	384.698	384.693	384.678	384.707	384.707
Σの相対比率	95.8781%	95.8791%	99.9985%	99.9992%	100.0000%	100.0000%	99.9949%	100.0036%	100.0036%
spacWF 検証 (FURN=default値) spacWF 検証 (FURN=0)									
HASP2とAOLD_HEXの違い		HASP2とAOLD_HEXの違い		HASP2とAOLD_HEXの違い		HASP2とAOLD_HEXの違い		HASP2とAOLD_HEXの違い	
違い1: 項別公比の解法が異なる		FURN=0とすることで、室の熱容量の違いを解消		FURN=0とすることで、室の熱容量の違いを解消		FURN=0とすることで、室の熱容量の違いを解消		FURN=0とすることで、室の熱容量の違いを解消	
違い2: 室の熱容量の違い		(実際は、FURN=0の入力だとエラーになるので、furn=0.0001と入力してある)		(実際は、FURN=0の入力だとエラーになるので、furn=0.0001と入力してある)		(実際は、FURN=0の入力だとエラーになるので、furn=0.0001と入力してある)		(実際は、FURN=0の入力だとエラーになるので、furn=0.0001と入力してある)	
AOLD_HEXの ACSSデータとHEX内部データの違い		出力の有効数値の桁数の違いによるもので、実際は誤差ゼロ		出力の有効数値の桁数の違いによるもので、実際は誤差ゼロ		出力の有効数値の桁数の違いによるもので、実際は誤差ゼロ		出力の有効数値の桁数の違いによるもので、実際は誤差ゼロ	
AOLD_HEX(dt=1)、AOLD_HEX15(dt=0.5)の違い		Σ WFは、ほぼ完全に一致		Σ WFは、ほぼ完全に一致		Σ WFは、ほぼ完全に一致		Σ WFは、ほぼ完全に一致	
誤差 0.0051%		spacWFがすべて一致した。		spacWFがすべて一致した。		spacWFがすべて一致した。		spacWFがすべて一致した。	

7-2 照明の重み係数の修正

(1) 元々の HASP の照明の重み係数の項別公比

- ももとの HASP/ACLD/8501 や NewHASP/ACLD では、照明の重み係数は計算時間間隔が 60 分の△波の項別公比で、下記のようにデータ文で固定的に与えられています。

<データ文>

```
***      WF FOR LIGHTING FIXTURE
          DIMENSION FL(5, 3)
          DATA FL/0. 4438, 0. 0534, 0. 8972, 0. 0362, 0. 0000      ! 埋め込み (時間遅れが大きい)
          *      , 0. 7321, 0. 0254, 0. 8926, 0. 0309, 0. 0000      ! 半埋め込み (時間遅れが小さい)
          *      , 1. 0000, 0. 0000, 0. 0000, 0. 0000, 0. 0000 /    ! 直づけ (時間遅れを見込まない)
```

※ 5個で一組のデータは項別公比で、各行左から P_0, P_1, R_1, P_2, R_2 です。

- この照明の重み係数も任意の計算時間間隔に対応できるように修正する必要があります。
ここでは簡便に、文献 二)pdf. 35 にあるステップ応答から計算時間間隔 $\Delta\tau$ を見込んだ△波を作る方法を採用します。 (⇒次頁に他方法を載せています)

- 文献 二)pdf. 35 に記述されているステップ応答の式は下記の通りです。

$$\begin{aligned} \bullet \text{埋込み式} \quad \phi_{\varepsilon}(t) &= 1 - 0.5487e^{-0.1805t} - 0.4268e^{-11.76t} \\ \bullet \text{半埋込み式} \quad \phi_{\varepsilon}(t) &= 1 - 0.2437e^{-0.0552t} - 0.4367e^{-14.15t} \\ \bullet \text{直付け式} \quad \phi_{\varepsilon}(t) &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{これより、埋込み式の係数} \quad A_0 &= 1, \quad A_1 = -0.5487, \quad \alpha_1 = 0.1805, \quad A_2 = -0.4268, \quad \alpha_2 = 11.76 \\ \text{半埋込み式の係数} \quad A_0 &= 1, \quad A_1 = -0.2437, \quad \alpha_1 = 0.0552, \quad A_2 = -0.42687, \quad \alpha_2 = 14.15 \\ \text{直付け式の係数} \quad A_0 &= 1, \quad A_1 = 0, \quad \alpha_1 = 0, \quad A_2 = 0, \quad \alpha_2 = 0 \end{aligned}$$

- この係数を新たな DATA 文とします。

```
***      DATA B / 1. 0, -0. 5487, 0. 1085, -0. 4268, 11. 76      ! ステップ応答(埋め込み)
          *      , 1. 0, -0. 2437, 0. 0552, -0. 4367, 14. 15      ! ステップ応答(埋め込み) (参考値)
          *      , 1. 0, -0. 2437, 0. 1136, -0. 4367, 14. 15      ! ステップ応答(半埋め込み)
          *      , 1. 0, 0. 0, 0. 0, 0. 0, 0. 0 /                ! ステップ応答(直付け)
```

※ ステップ応答の係数 DATA 文の 2 行目の半埋込み式の α_1 の値を変更しています。

これは、半埋込み式のステップ応答から時間区分 60 分の△波応答に変換したときに、元の△波応答と一致しなかったからです。(誤植と思われます)

試行錯誤で一致するように $\alpha_1 = 0.0552 \rightarrow 0.1136$ に修正してあります。

なお、この修正は暫定値です。

- ステップ応答が決まったことで、これより下式で△波応答の項別公比法の P_0, P_1, R_1, P_2, R_2 を求めます。

時間区分数を n とすると、計算時間間隔は $\Delta\tau = 1/n$ となります。

$$\begin{aligned} P_0 &= A_0 + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) + \frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau}) \\ P_1 &= -\frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})^2 & R_1 &= e^{-\alpha_1 \Delta\tau} \\ P_2 &= -\frac{A_2}{\alpha_2 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_2 \Delta\tau})^2 & R_2 &= e^{-\alpha_2 \Delta\tau} \end{aligned} \quad (7-2-1)$$

- P_0, P_1, R_1, P_2, R_2 は計算時間間隔 $\Delta\tau$ で変わります。

ACLD_HEX60 では、任意の計算時間間隔に自動的に対応するために新たなサブプログラムを追加します。

(2) 任意の時間区分に対応するための照明の `sub_CAL_WF_for_LIGHT` を追加

- この修正のために、新たなサブルーチン `sub_CAL_WF_for_LIGHT` を作ります。
 - ここで、ステップ応答の係数をデータ文で与えます。
 - 照明の重み係数を作るときに、計算時間間隔 $\Delta\tau$ を見込みます。なお、実際は、時間区分数 `nJHM` を使います。また、照明の重み係数は△波のみです。

```

C***** ! add 20171124 HEX15
      SUBROUTINE sub_CAL_WF_for_LIGHT ( FL, nJHM )
C*****
      INCLUDE 'cmn_iDBG_work.cmn' ! add 20150125
      ***
      *** WF FOR LIGHTING FIXTURE
      *** DATA FL/0.4438,0.0534,0.8972,0.0362,0.0000,
      *** * 0.7321,0.0254,0.8926,0.0309,0.0000,
      *** * 1.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000/
      ***
      DIMENSION FL ( 5,3 )
      DIMENSION B ( 5,3 )
      DATA B / 1.0, -0.5487, 0.1085, -0.4268, 11.76
      * * , 1.0, -0.2437, 0.0552, -0.4367, 14.15 ! ステップ応答(埋め込み)
      * * , 1.0, -0.2437, 0.1136, -0.4367, 14.15 ! ステップ応答(埋め込み) (参考値)
      * * , 1.0, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0 / ! ステップ応答(半埋め込み)
      * * , 1.0, 0.0 , 0.0 , 0.0 , 0.0 / ! ステップ応答(直付け)
C-----
      IF( nJHM .GE. 2 ) THEN ! add 20180125 HEX_15
          T = 1.0 / nJHM
C
          DO K = 1, 2
              A1 = B ( 2,K ) / ( B ( 3,K ) * T )
              A2 = B ( 4,K ) / ( B ( 5,K ) * T )
              R1 = EXP ( - B ( 3,K ) * T )
              R2 = EXP ( - B ( 5,K ) * T )
              FL ( 1,K ) = B ( 1,K ) + A1*( 1.0 - R1 ) + A2*( 1.0 - R2 )
              FL ( 2,K ) = - A1*( 1.0 - R1 ) ** 2
              FL ( 3,K ) = R1
              FL ( 4,K ) = - A2*( 1.0 - R2 ) ** 2
              FL ( 5,K ) = R2
          END DO
      END IF
C-----
      IF( iDBG_WF .GE. 1 ) THEN
          WRITE( 7, '( <WF_for_LIGHTING>, nJHM=', I3 ) ) nJHM
          WRITE( 7, '( FL(1-5, ', I1, ') = ', 5F12.8 ) )
          * ( K, ( FL ( I,K ), I=1,5 ), K=1,3 )
          WRITE( 7, '( ', 3F12.8, ' )' )
      END IF
C-----
      RETURN
      END

```

補足：任意の時間間隔の照明の重み係数を求める 他の方法

- 文献 ⇒pdf. 34-36 にある照明のモデルからステップ応答を再現する方法もありますが、プログラム変更が大きくなるので省略します。
- HASP に組込まれている重み係数を補正する方法を記します。

元々の HASP の重み係数の項別公比を $[P_0], [P_1], [P_2], [R_1], [R_2]$ とします。また、 $e^{\Delta\tau} \equiv E$ とします。

式(7-2-1)の R_1 は、 $R_1 = e^{-\alpha_1 \Delta\tau} = (e^{-\alpha_1})^{\Delta\tau} = ([R_1])^E$ 、 R_2 も同様です。

P_1 は $P_1 = -\frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})^2 = -\frac{A_1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1})^2 \times \frac{(1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau})^2}{\Delta\tau (1 - e^{-\alpha_1})^2} = [P_1] \times \frac{(1 - [R_1])^E}{\Delta\tau (1 - [R_1])^2}$ 、 P_2 も同様です。

P_0 は $P_0 = A_0 + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) + \frac{A_1}{\alpha_1 \Delta\tau} (1 - e^{-\alpha_1 \Delta\tau}) = [1] + [P_1] \times \frac{(1 - [R_1])^E}{\Delta\tau (1 - [R_1])} + [P_2] \times \frac{(1 - [R_2])^E}{\Delta\tau (1 - [R_2])}$ です。

数式の修正なので簡単ですが、元の結果を補正することとべき乗を多用するので精度がやや落ちます。

(3) 照明の重み係数の検証 (20180604 版の結果による)

照明のWFの検証			20180604								
―― 検算 T=1 ――											
1-1)	<subでの B のdata文の値>		17	22	31	39	48				
	B(1-5,1)		3	7	6	7	5				
	B(1-5,2)		1.0000	-0.5487	0.1085	-0.4268	11.7600				
	B(1-5,2)暫定値		1.0000	-0.2437	0.0552	-0.4367	14.1500			※このB(3,2)ではdata文のFL(2,2)と合わない ※FL(2,2)に合うようにB(3,2)を修正した	
	B(1-5,3)		1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
1-2)	\R計算値		K	T	A1=E2/(B3*T)	A2=B4/(B5*T)	R1=exp(-B3*T)	R2=exp(-B5*T)		shoumeino	
	1	1	1	1	-5.0571428571	-0.0362925170	0.8971788948	0.0000078108			
	2	1	1	1	-4.4148550725	-0.0308621908	0.9462958699	0.0000007157			
	2暫定	1	1	1	-2.1452464789	-0.0308621908	0.8926149305	0.0000007157			
	3	1									
1-3)	FL計算値		K	T	FL1 =B1+A1*(1-R1) +A2*(1-R2)	FL2 =-A1*(1-R1)^2	FL3 R1	FL4 =-A2*(1-R2)^2	FL5 R2		Σ
	1	1	1	1	0.44372675	0.05346502	0.89717889	0.03629195	0.00000781		1.00000
	2	1	1	1	0.73204188	0.01273303	0.94629587	0.03086215	0.00000072		1.00000
	2暫定	1	1	1	0.73877039	0.02473802	0.89261493	0.03086215	0.00000072		1.00000
	3	1	1	1	1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000		1.00000
1-4)	WFに換算		J =	1	2	3	4	5	6	7	
	1	1	1	1	0.4437267488	0.0479679736	0.0430355993	0.0386106314	0.0346406436	0.0310788543	0.0278832922
	2	1	1	1	0.7320418799	0.0120492375	0.0114021228	0.0107897817	0.0102103259	0.0096619892	0.0091431005
	2暫定	1	1	1	0.7387703890	0.0220815515	0.0197103028	0.0175937106	0.0157044088	0.0140179897	0.0125126669
	3	1	1	1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000
1-5)	FLの結果				17	29	41	53	65		
	<T=1ではこの値は用いない>				10	10	10	10	10		Σ
	FL(1-5,1)	T=1			0.44380000	0.05340000	0.89719999	0.03620000	0.00000000		0.99946
	FL(1-5,2)	T=1			0.73210001	0.02540000	0.89260000	0.03090000	0.00000000		0.99950
	FL(1-5,3)	T=1			1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000		1.00000
1-6)	<ACLD_HEX data文>				18	25	32	39	46		
	<T=1ではこの値を用いる>				6	6	6	6	6		Σ
	FL(1-5,1)	T=1			0.4438	0.0534	0.8972	0.0362	0.0000		0.99946
	FL(1-5,2)	T=1			0.7321	0.0254	0.8926	0.0309	0.0000		0.99950
	FL(1-5,3)	T=1			1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		1.00000
―― 検算 T=0.5 ――											
2-1)	B(1-5,1)				1.0000	-0.5487	0.1085	-0.4268	11.7600		
	B(1-5,2)				1.0000	-0.2437	0.0552	-0.4367	14.1500		
	B(1-5,2)暫定値				1.0000	-0.2437	0.1136	-0.4367	14.1500		
	B(1-5,3)				1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
2-2)	\R計算値		K	T	A1=E2/(B3*T)	A2=B4/(B5*T)	R1=exp(-B3*T)	R2=exp(-B5*T)			
	1	1	1	1	-5.0571428571	-0.0362925170	0.8971788948	0.0000078108			
	2	1	1	1	-4.4148550725	-0.0308621908	0.9462958699	0.0000007157			
	2暫定	1	1	1	-2.1452464789	-0.0308621908	0.8926149305	0.0000007157			
	3	1									
2-3)	FL計算値		K	T	FL1 =B1+A1*(1-R1) +A2*(1-R2)	FL2 =-A1*(1-R1)^2	FL3 R1	FL4 =-A2*(1-R2)^2	FL5 R2		Σ
	1	1	1	1	0.44372675	0.05346502	0.89717889	0.03629195	0.00000781		1.00000
	2	1	1	1	0.73204188	0.01273303	0.94629587	0.03086215	0.00000072		1.00000
	2暫定	1	1	1	0.73877039	0.02473802	0.89261493	0.03086215	0.00000072		1.00000
	3	1	1	1	1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000		1.00000
2-4)	WFに換算		J =	1	2	3	4	5	6	7	
	1	1	1	1	0.4437267488	0.0479679736	0.0430355993	0.0386106314	0.0346406436	0.0310788543	0.0278832922
	2	1	1	1	0.7320418799	0.0120492375	0.0114021228	0.0107897817	0.0102103259	0.0096619892	0.0091431005
	2暫定	1	1	1	0.7387703890	0.0220815515	0.0197103028	0.0175937106	0.0157044088	0.0140179897	0.0125126669
	3	1	1	1	1.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000
2-5)	FLの計算結果				17	29	41	53	65		
	<T≠1ではこの値を用いる>				10	10	10	10	10		Σ
	FL(1-5,1)	T=0.5			0.39353594	0.02820204	0.94719529	0.07217988	0.00279478		1.00000
	FL(1-5,2)	T=0.5			0.70141983	0.01308134	0.94478303	0.06161999	0.00084599		1.00000
	FL(1-5,3)	T=0.5			1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000		1.00000

※このB(3,2)ではdata文のFL(2,2)と合わない
 ※FL(2,2)に合うようにB(3,2)を修正した

補 任意の計算時間間隔にするためのその他のプログラムの変更

- 任意の計算時間間隔にするためのプログラムの変更としては、上記で示した、応答係数を求めるサブプログラム sub. CPARAM と、照明の重み係数を求める sub. CAL_WF_for_LIGHT だけではありません。

この他に ACLD_HEX60 では下記のように多くの変更をしています。

- 任意の時間区分数の入力データの読み込み
- 時間に関するパラメータおよび変数・配列
- XMQ 配列とポインタ
- 計算式での時変数とポインタ
- 時間ループ

など多岐に及びます。

これらについては、解説書(5)補足編を参照下さい。