九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

建築外表面からの水分蒸発を考慮した期間熱負荷簡易計算法 : 第1報　蒸発を考慮した拡張デグリーデー法の導出について

尾崎, 明仁
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

浦野, 良美
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

渡辺, 俊行
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

龍, 有二
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

他

https://doi.org/10.15017/17735

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 10 (3), pp.315-320, 1988-12-31. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

九州大学総合理工学研究科報告
第10巻 第3号 315-320頁 昭和63年12月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU KENKYUKA HOKOKU)
Vol. 10, No. 3 pp. 315-320 December 1988

建築外表面からの水分蒸発を考慮した期間熱負荷簡易計算法

(第1報　蒸発を考慮した拡張デグリーデー法の導出について)

尾崎明仁**・浦野良美*・渡辺俊行*
龍　有二*・村田義郎***・平佐幸男****

(昭和63年8月31日　受理)

Simplified Method for Term Heat Load Calculation Including the Effect of Water Evaporation at Outdoor Wall Surfaces

—Introduction of the New Extended Degree Day Method—

Akihito OZAKI, Yoshimi URANO, Toshiyuki WATANABE
Yuji RYU, Yoshio MURATA and Yukio HIRASA

The extended degree day method is a simple and prevailing calculation procedure of term heat load for buildings. Nevertheless, it has some unresolved problems; the estimation of latent heat caused by rainfall at wall surfaces is one of them. The new extended degree day method is developed from the extended degree day method to estimate the effect of water evaporation at outdoor wall surfaces including glass windows. In this paper, the basic equations to transform the extended degree day method are shown introducing heat balance equations and concepts of equivalent temperature and overall heat transfer coefficient at wetted wall surfaces.

1. はじめに

建物に対する期間熱負荷簡易計算法は，運転費の概算のために旧くから用いられているが，近年ではさらに，空調システムの計画，エネルギー消費量の予測，エネルギーの使用の合理化に関する判断基準，可能な省エネルギー手法の予測と評価などに利用されている．その計算方法は，①デグリーデー法を拡張して日射や夜間放射，内部発熱を考慮した方法，②動的熱負荷計算による精算結果を利用して概略推定を行う方法，③気象データの解析結果から予測する方法，④簡易計算用の図表を使用する方法，⑤動的熱負荷計算法を簡易化した方法などに分類される．例えば，①には松尾の拡張デグリーデー法[1)2)]，②には横山・石野らの実験計画法による熱負荷簡易計算法[3)]，③には尾島らの気象データの多変量解析による年間空調負荷計算法[4)]，④には井上・李らの建物の形状分類による年間冷暖房負荷の簡易計算法[5)]，⑤には木村らの簡易化した年間動的空調負荷計算法[6)] などが含まれる．なかでも拡張デグリーデー法は，建物外被のエネルギー性能評価の一つの手法として，また省エネルギー法（エネルギーの使用の合理化に関する法律）の中に示されている年間熱負荷係数（PAL）の推定法として幅広く利用されている．しかしその反面，設計室温の変動や居住者の行動スケジュールが不確定な住宅への適用が困難なこと，地域補正係数の理論的根拠に乏しいこと，降雨や積雪により建築外壁が濡れた場合の蒸発による潜熱移動が考慮されていないなど，検討の余地も残されている．

そこで本論文では，外壁外表面における蒸発潜熱が期間熱負荷へ及ぼす影響を考察するため，従来の拡張デグリーデー法に蒸発の影響を考慮した計算方法について検討する．まず，外壁および窓ガラスがそれぞれ単一の構成である壁体モデルを想定し，濡れた外壁外表面の熱収支式から定義される，蒸発を考慮した総合

*熱エネルギーシステム工学専攻
**熱エネルギーシステム工学専攻博士課程
***熱エネルギーシステム工学専攻修士課程
(現在　大成建設㈱)
****熱エネルギーシステム工学専攻修士課程

熱伝達率および総合相当外気温度を用いて，室内空気の熱収支式を導出し，次に，壁面のみからの蒸発を考慮した場合や，壁面および窓ガラス面からの蒸発を考慮した場合の拡張デグリーデー法を提案する．

[主な記号]

A	：面積	，m^2
a	：日射吸収率	
C	：湿り空気の比熱	，kcal/kg'℃
CD	：伝導による熱流	，$kcal/m^2h$
CV	：対流による熱流	，$kcal/m^2h$
D_{ECD}	：拡張冷房デグリーデー	，℃・day
D_{EHD}	：拡張暖房デグリーデー	，℃・day
E	：夜間放射量	，$kcal/m^2h$
f	：蒸発比	
G	：内部発熱	，kcal/h
J	：入射短波放射量	，$kcal/m^2h$
K	：熱貫流率	，$kcal/m^2h℃$
L	：水の蒸発潜熱	，kcal/kg
NR	：放射による熱流	，$kcal/m^2h$
Q	：室の熱負荷	，kcal/h
T_o	：外気絶対温度	，K
T_s	：外表面絶対温度	，K
WE	：水分蒸発による熱流	，$kcal/m^2h$
X_o	：外気絶対湿度	，kg/kg'
X_s	：外表面絶対湿度	，kg/kg'
α_c	：対流熱伝達率	，$kcal/m^2h℃$
α_e	：蒸発熱伝達率	，$kcal/m^2h℃$
α_r	：放射熱伝達率	，$kcal/m^2h℃$
α_t	：総合熱伝達率	，$kcal/m^2h℃$
ε	：長波放射率	
η	：日射侵入率	
θ_e	：相当外気温度	，℃
θ_o	：外気温度	，℃
θ_r	：室内空気温度	，℃
θ_{ref}	：参照温度	，℃
θ_s	：外表面温度	，℃
ρ	：侵入貫流比	

[添　　字]

1：窓ガラス，2：外壁

s：飽和，'：蒸発，i：部位，j：期間

2. 従来の拡張デグリーデー法

従来の拡張デグリーデー法について，既往の文献1），2）に従い簡単に説明を行う．

気乾状態における外壁外表面の熱収支は次式で与えられる．

$$CD=CV+NR \tag{1}$$

ここで，対流 CV，放射 NR の各熱流成分は，

$$CV=\alpha_c(\theta_o-\theta_s) \tag{2}$$

$$NR=aJ+\alpha_r(\theta_o-\theta_s)-\varepsilon E \tag{3}$$

で表される．総合熱伝達率 α_t と相当外気温度 θ_e を用いれば，式（1）は次のように表現できる．

$$\begin{aligned} CD&=\alpha_c(\theta_o-\theta_s)+aJ+\alpha_r(\theta_o-\theta_s)-\varepsilon E \\ &=\alpha_t(\theta_o-\theta_s)+aJ-\varepsilon E \\ &=\alpha_t(\theta_e-\theta_s) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\alpha_t=\alpha_c+\alpha_r \tag{5}$$

$$\theta_e=\theta_o+\frac{a}{\alpha_t}J-\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E \tag{6}$$

また，室内空気の熱収支式は，各建築外被部位 i における長波放射率 ε_i を共通なものと仮定すれば，熱貫流率 K_i，日射侵入率 η_i（不透明部位 i の日射侵入率は，$\eta_i=aK_i/\alpha_t$ で定義する），面積 A_i，室内空気温度 θ_r，内部発熱 G と式（6）より次式となる．

$$\begin{aligned} Q&=\sum_i K_iA_i(\theta_r-\theta_e)-G \\ &=\sum_i K_iA_i\left(\theta_r-\theta_o-\frac{a}{\alpha_t}J+\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E\right)-G \\ &=\sum_i \left\{K_iA_i\left(\theta_r-\theta_o+\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E\right)-\eta_iA_iJ\right\}-G \\ &=\overline{\boldsymbol{KA}}\left\{\left(\theta_r-\frac{G}{\overline{\boldsymbol{KA}}}\right)-\left(\theta_o+\frac{\overline{\boldsymbol{\eta A}}}{\overline{\boldsymbol{KA}}}J-\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E\right)\right\} \end{aligned} \tag{7}$$

ここで，$\overline{\boldsymbol{KA}}=\sum_i K_iA_i$，$\overline{\boldsymbol{\eta A}}=\sum_i \eta_iA_i$ であり，Q は期間内における室の熱負荷を意味する．

外界気象条件をすべて日平均値とし，上式の｜　｜内をある期間で正値のみ積算したものを拡張暖房デグリーデーという．参照温度 θ_{ref}，侵入貫流比 ρ を用いて拡張暖房デグリーデー D_{EHD} を表すと，

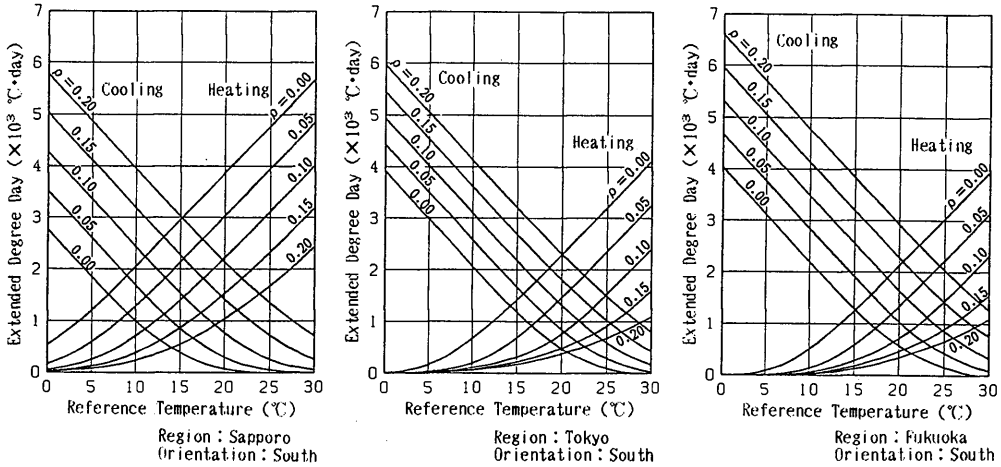

Fig. 1　Values of the extended degree day for cooling and heating according to reference temperature at southern walls in Sapporo, Tokyo, and Fukuoka.　The parameter, ρ, is the ratio of transmitted solar radiation to wall heat transmission.

$$D_{EHD}=\sum_j\{(\theta_r-\frac{G}{\overline{KA}})-(\theta_{o,j}+\frac{\overline{\eta A}}{\overline{KA}}J_j-\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E_j)\}$$
$$=\sum_j\{\theta_{ref}-(\theta_{o,j}+\rho J_j-\frac{\varepsilon}{\alpha_t}E_j)\}\qquad(8)$$

となり，拡張デグリーデーは，地域・方位・参照温度・侵入貫流比の4つをパラメーターとする関数で与えられる．**Fig. 1** に，5～10月を冷房期間，11～4月を暖房期間とした場合の，札幌，東京，福岡における南面の拡張デグリーデーを例示する[7]．

3.　蒸発を考慮した拡張デグリーデー法

濡れた外壁外表面の熱収支は次式で与えられる[8]．

$$CD=CV+NR-WE\qquad(9)$$

ここで，蒸発成分 WE は，

$$WE=fL(\alpha_c/C)(X_{s,s}-X_o)\qquad(10)$$

である．式 (10) に含まれる f は，Lewis の関係[9]から求められる完全濡れ面の理論蒸発量と実際の蒸発量との比であり，外表面が気乾状態の場合 $f=0$，飽水状態の場合 $f=1$ となる．また，L および C は，蒸発潜熱と湿り空気の比熱である．

$$L=597.3-0.559\theta_s\qquad(11)$$

$$C=0.24+0.441(X_o+X_{s,s})/2\qquad(12)$$

いま，式 (10) の絶対湿度差 $(X_{s,s}-X_o)$ を，仮想の飽和外気を仲介として，$\{(X_{s,s}-X_{o,s})+(X_{o,s}-X_o)\}$ と置き換え，さらに飽和絶対湿度を絶対温度に関する2次式 $(X_s=c_0+c_1T+c_2T^2)$ で近似すれば[注1]，

$$WE=fL(\alpha_c/C)\{(X_{s,s}-X_{o,s})+(X_{o,s}-X_o)\}$$
$$=fL(\alpha_c/C)\{c_1+c_2(T_s+T_o)\}(T_s-T_o)$$
$$+fL(\alpha_c/C)(X_{o,s}-X_o)\qquad(13)$$

となる．さらに，蒸発熱伝達率 α_e を用いて次のように表す．

$$WE=f\alpha_e(T_s-T_o)+fL(\alpha_c/C)(X_{o,s}-X_o)\qquad(14)$$

$$\alpha_e=L(\alpha_c/C)\{c_1+c_2(T_s+T_o)\}\qquad(15)$$

したがって，式 (9) は次式となる．

$$CD=\alpha_c(\theta_o-\theta_s)+aJ+\alpha_r(\theta_o-\theta_s)-\varepsilon E$$
$$+f\alpha_e(\theta_o-\theta_s)-fL(\alpha_c/C)(X_{o,s}-X_o)\qquad(16)$$

総合熱伝達率 α_t' と総合相当外気温度 θ_e' を用いて式 (16) を表現すれば，

$$CD=\alpha_t'(\theta_o-\theta_s)+aJ-\varepsilon E$$
$$-fL(\alpha_c/C)(X_{o,s}-X_o)$$
$$=\alpha_t'(\theta_e'-\theta_s)\qquad(17)$$

$$\alpha_t'=\alpha_c+\alpha_r+f\alpha_e\qquad(18)$$

$$\theta_e' = \theta_o + \frac{a}{\alpha_t'} J - \frac{\varepsilon}{\alpha_t'} E - \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o) \tag{19}$$

となり，室の熱負荷 Q は，式 (7) と同様に，

$$Q = \sum_i K_i A_i (\theta_r - \theta_e') - G \tag{20}$$

と表せる．蒸発を考慮した拡張デグリーデーは，式 (20) を基に3.1～3.3に示すように表現できる．

3.1 外壁面のみからの蒸発を考慮した場合

ガラス面からの蒸発は，雨水が付着したときのみ生じるため，ガラス面からの蒸発量を外壁面に比べて無視できるほど小さいと仮定すれば，ガラス面および外壁面の総合熱伝達率はそれぞれ α_t および α_t' となり，窓ガラスおよび外壁における貫流熱量 Q_1，Q_2 は次式で与えられる．

$$Q_1 = K_1 A_1 \left(\theta_r - \theta_o + \frac{\varepsilon}{\alpha_t} E\right) - \eta_1 A_1 J \tag{21}$$

$$Q_2 = K_2 A_2 \left\{\theta_r - \theta_o - \frac{a}{\alpha_t'} J + \frac{\varepsilon}{\alpha_t'} E + \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o)\right\} \tag{22}$$

求める室の熱負荷 Q は，式 (21)，(22) から，

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 - G \\ &= K_1 A_1 \left(\theta_r - \theta_o + \frac{\varepsilon}{\alpha_t} E\right) - \eta_1 A_1 J \\ &\quad + K_2 A_2 \left\{\theta_r - \theta_o - \frac{a}{\alpha_t'} J + \frac{\varepsilon}{\alpha_t'} E + \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o)\right\} - G \\ &= (K_1 A_1 + K_2 A_2) \left[\left(\theta_r - \frac{G}{K_1 A_1 + K_2 A_2}\right) - \left\{\theta_o + \frac{\eta_1 A_1 + K_2 A_2 a/\alpha_t'}{K_1 A_1 + K_2 A_2} J - \frac{K_1 A_1/\alpha_t + K_2 A_2/\alpha_t'}{K_1 A_1 + K_2 A_2} \varepsilon E - \frac{K_2 A_2}{K_1 A_1 + K_2 A_2} \cdot \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o)\right\}\right] \end{aligned} \tag{23}$$

となり，外壁面のみからの蒸発を考慮した拡張暖房デグリーデーは次式となる．

$$\begin{aligned} D_{EHD}' = \sum_j \Bigg[\Bigg(\theta_r - \frac{G}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2}\Bigg) - \Bigg\{\theta_o + \frac{\eta_{1j} A_1 + K_{2j} A_2 a/\alpha_{tj}'}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2} J_j - \frac{K_{1j} A_1/\alpha_{tj} + K_{2j} A_2/\alpha_{tj}'}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2} \varepsilon E_j - \frac{K_{2j} A_2}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2} \cdot \frac{f_j L}{\alpha_{tj}'} \cdot (\alpha_{cj}/C)(X_{o,s} - X_o)_j\Bigg\}\Bigg] \end{aligned} \tag{24}$$

3.2 ガラス面からの蒸発も考慮した場合

ガラス面においても外壁と同様に蒸発が生じると仮定すると，窓ガラスの貫流熱量 Q_1 は総合熱伝達率 α_t' を用いて次式のように表現できる．

$$Q_1 = K_1 A_1 \left\{\theta_r - \theta_o + \frac{\varepsilon}{\alpha_t'} E + \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o)\right\} - \eta_1 A_1 J \tag{25}$$

求める室の熱負荷 Q は，式 (22)，(25) から，

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 - G \\ &= (K_1 A_1 + K_2 A_2) \left[\left(\theta_r - \frac{G}{K_1 A_1 + K_2 A_2}\right) - \left\{\theta_o + \frac{\eta_1 A_1 + K_2 A_2 a/\alpha_t'}{K_1 A_1 + K_2 A_2} J - \frac{\varepsilon}{\alpha_t'} E - \frac{fL}{\alpha_t'} (\alpha_c/C)(X_{o,s} - X_o)\right\}\right] \end{aligned} \tag{26}$$

となり，ガラス面からの蒸発も考慮した拡張暖房デグリーデーは次式となる．

$$D_{EHD}' = \sum_j \Bigg[\Bigg(\theta_r - \frac{G}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2}\Bigg) - \Bigg\{\theta_o + \frac{\eta_{1j} A_1 + K_{2j} A_2 a/\alpha_{tj}'}{K_{1j} A_1 + K_{2j} A_2} J_j - \frac{\varepsilon}{\alpha_{tj}'} E - \frac{f_j L}{\alpha_{tj}'} (\alpha_{cj}/C)(X_{o,s} - X_o)_j\Bigg\}\Bigg] \tag{27}$$

式 (24)，(27) で示される蒸発を考慮した拡張デグリーデー法では，外界気象条件に準じて蒸発比 f および蒸発熱伝達率 α_e を定数として与えることにより，降水に伴う蒸発の影響を比較的正確に考慮できる．

3.3 侵入貫流比ρを用いた場合

従来の拡張デグリーデー法は，総合熱伝達率α_tに慣用値 20kcal/m^{2}h℃を使用して外壁および窓ガラスの熱貫流率を年間を通して一定値とし，さらに侵入貫流比ρを定義することにより多種類の壁体モデルの一括化を可能とした．しかし，式 (24)，(27) に示す蒸発を考慮した拡張デグリーデー法では，蒸発比fと蒸発熱伝達率α_eが外壁外表面の濡れ具合や季節，壁面方位により変化するため，総合熱伝達率α_t'および熱貫流率を一定値に確定できず，壁体モデルの一括化が困難となる．そこで，外壁外表面での蒸発を考慮する場合にも多種類の壁体モデルの一括化を可能とするように，期間別および壁面方位別に蒸発比fと蒸発熱伝達率α_eを定数化し，侵入貫流比ρを用いる簡易的な拡張デグリーデー法を検討する．

式 (26) において，外壁の日射侵入率を$\eta_2=aK_2/\alpha_t'$と定義し，$\overline{\boldsymbol{KA}}=K_1A_1+K_2A_2$として$K_1$，$K_2$に一定値を代入すると，

$$Q=\overline{\boldsymbol{KA}}\left[\left(\theta_r-\frac{G}{\overline{\boldsymbol{KA}}}\right)-\left\{\theta_o+\frac{\overline{\eta\boldsymbol{A}}}{\overline{\boldsymbol{KA}}}J-\frac{\varepsilon}{\alpha_t'}E-\frac{fL}{\alpha_t'}(\alpha_c/C)(X_{o,s}-X_o)\right\}\right] \tag{28}$$

となり，簡易的に濡れを考慮した拡張暖房デグリーデーは次式となる．

$$D_{EHD}'=\sum_j\left[\theta_{ref}-\left\{\theta_{o,j}+\rho J_j-\frac{\varepsilon}{\alpha_{tj}'}E_j-\frac{f_jL}{\alpha_{tj}'}(\alpha_{cj}/C)(X_{o,s}-X_o)_j\right\}\right] \tag{29}$$

式 (29) のパラメーターは従来の拡張デグリーデーと同様に，地域・方位・参照温度・侵入貫流比である．

4. む　す　び

従来の拡張デグリーデー法を基に，外壁外表面での蒸発を考慮した総合熱伝達率，総合相当外気温度を用いて，式 (24)，(27)，(29) で示される新たな拡張デグリーデー法を導出した．式 (24) は外壁面のみからの蒸発を考慮したものであり，式 (27) は外壁面および窓ガラス面からの蒸発を考慮したものである．これらの計算方法では，外界気象条件に準じて蒸発比fおよび蒸発熱伝達率α_eを定数として与えることにより，降水に伴う蒸発の影響を比較的正確に考慮できる．しかし，式 (24)，(27) では多種類の壁体モデルの一括化が困難なため，式 (29) では従来の拡張デグリーデー法と同様に侵入貫流比ρを用いることにより壁体モデルの一括化を可能とした．ただし，いずれの計算方法においても，予め，期間別，地域別，壁面方位別に蒸発比fと蒸発熱伝達率α_eを定数化しておく必要があり，これらの算定については次報において検討する．

注

1）森山らは，水蒸気圧差 $(f_{s,s}-f_o)$ を仮想の飽和外気を仲介として，$\{(f_{s,s}-f_{o,s})+(f_{o,s}-f_o)\}$ と置き換え，飽和水蒸気圧を温度に関する1次式 $(f_s=a\theta+b)$ で近似し，蒸発による熱流 WE を次式で表現している[10]．

$$\begin{aligned}WE&=Lw\alpha_w(f_{s,s}-f_o)\\&=aLw\alpha_w(\theta_s-\theta_o)+Lw\alpha_w(a\theta_o+b-f_o)\end{aligned}$$

a, b	：定数	
f_o	：外気水蒸気圧	, mmHg
$f_{o,s}$	：外気飽和水蒸気圧	, mmHg
$f_{s,s}$	：外表面飽和水蒸気圧	, mmHg
L	：蒸発潜熱	, kcal/kg
w	：濡れ率	
α_w	：湿気伝達率	, kg/m^{2}hmmHg
θ_o	：外気温度	, ℃
θ_s	：外表面温度	, ℃

参　考　文　献

1) 松尾　陽：期間熱負荷予測のためのデグリーデー法の拡張について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1979.
2) 松尾　陽，他：建築と気象，朝倉書店，1988.
3) 横山浩一，石野久弥，他：省エネルギー設計の為の熱負荷簡易計算法，日本建築学会論文報告集，第278号，1979.
4) 尾島俊雄，他：気象データの多変量解析による年間空調負荷計算法，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1986.
5) 井上宇市，李　春夫，他：建物の形状分類による年間冷暖房負荷の簡易計算法，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1986.
6) 木村建一，他：年間動的空調負荷計算法の簡易化の試み，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1982.
7) 伊藤直明，松尾　陽，他：日本建築学会編：建築の省エ

ネルギー計画，彰国社，1981.
8) 浦野良美，他：濡れを考慮した建築外表面熱伝達の簡易表現について，日本建築学会建築環境工学学術研究発表会資料，第3号，1987.
9) 内田秀雄：湿り空気と冷却塔，裳華房，1963.
10) 松本　衛，森山正和，他：蒸発を有する地面の表面温度について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1981.