結露水の凍結融解回数マップの提案

高分子系建築材料の耐久性に関する研究 (その4)

FREEZING AND THAWING CYCLE AS MATERIALS
DETERIORATION FACTOR

Durabilities of polymeric building materials (Part 4)

富板 崇*, 樫野紀元**

Takashi TOMIITA and Norimoto KASHINO

There are many degradation agents for polymeric building materials. The effect of cyclic freezing and thawing is very severe for exterior finishing materials particularly.

Dewing phenomena occurs on the surface of materials when relative humidity is higher than 80 %, according to the criterion of ISO/TC 156/WG 4. Dew drops freeze and melt when temperature fluctuates across the freezing point. According to the ambient temperature, the number of freezing and thawing cycles is estimated at 154 points in Japan.

Materials used outdoors are heated by solar radiation in daytime and cooled down by extra-terrestrial radiation at clear night. It is reasonable to count freezing and thawing cycle based on the temperature of black panel, which is similar to the real building materials. Then, authors quantified the number of freezing and thawing cycle provided by the daily maximum and minimum temperatures of opened/insulated black panel calculated from climatic factors at different 66 parts in Japan.

The frequency of freezing and thawing cycles based on the black panel temperature is 4-5 times, or 7-8 times in Hokkaido, as much as the number of freezing and thawing cycles related to the ambient temperature. Obtained results are plotted on maps.

Keywords : freezing and thawing, durability, ambient temperature, relative humidity, black panel temperature

1. 序

高分子系建築材料の耐久性の地域差を説明するため、筆者らは化学的な劣化因子である紫外線・熱・水分、物理的な劣化因子である材料温度の日較差などを推定してマップ化した^{1)~5)}。これらの化学的劣化因子は南に位置する九州・沖縄地域で大きな値となり、材料温度の日較差は内陸部で大きくなった。一方、北海道・東北などの寒冷地域では、別の物理的劣化因子である凍結融解作用によって建築材料が凍害を受ける。本報では、その被害程度や範囲を明らかにするため、指標になると考えられる凍結融解回数を求め、マップ上に整理する。

建築材料の表面温度が低下すると、空気中の水蒸気が凝縮して結露を生じ、氷点以下であれば結露水が凍結する。表面温度が上昇すれば融解する。建築材料はこの繰り返し作用で凍害を受け、物理的に劣化する。この作用は広く認識されており、例えば「建築物の耐久設計の考

え方⁶⁾」における外装仕上材の耐用年数の推定に使われる「地域環境係数」は、気温が低い地域の劣化外力係数の値が大きくなっている。また、平井^{7)~14)}はコンクリートや外装材料の凍害に関して、主に東北地方の凍結融解回数を求めている。長谷川¹⁵⁾はコンクリート内部の水分の凍結融解に着目し、全国の気象要素から推定された凍害の被害程度をマップ化している。

本報では、建築仕上材料の物理的な劣化要因である、結露水の凍結融解に着目し、その作用の強さを繰り返し回数で定量化する。外装材料の凍結に必要な水分は、降雨や降雪ばかりではなく、大気中の水分が凝縮して結露することによっても供給される。そこで、まず各地の気象観測データに ISO/TC 156/WG 4 の結露条件¹⁶⁾を適用し、相対湿度 80 % を満たし、かつ外気温が 0°C 以下になるときに結露水が凍結するものとしてその回数を積算して、「外気温に基づく結露水の凍結融解回数」に整理

* (財)先端建設技術センター・工博
** 建設省建築研究所 室長・工博

Advanced Construction Technology Center, Dr. Eng.
Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

表一1 凍結融解回数の算出方法の比較

項 目	平井 ^{8), 9)} による 凍害危険度	長谷川 ¹⁰⁾ による 凍害危険度マップ	外気温に基づく 結露水の凍結融解 マップ	ブラックパネル温度 に基づく結露水の 凍結融解マップ
凍結融解温湿度 条件	-1℃以下で凍結、 0℃以上で融解。	-1.0℃以下で凍結、 -0.9℃以上で融解。	0.0℃以下、 80%以上で凍結。 融解回数は凍結回数 に等しい。	-0.1℃以下、 80%以上で凍結。 0.1℃以上で融解。
凍結融解可能日数 の算出方法	日最高・最低外気温 度の月平均値による。	毎日の最高・最低外 気温による。	1時間毎の推定外気 温度による。	裏面開放/断熱ブラ ックパネル温度の日 最高・最低値による。
解析対象期間、 地点数	1951～1980年、 東北地方6地点 ¹²⁾	1965～1970年、 全国140地点	1961～1985年、 全国154地点	1976～1985年、 全国66地点
氷点下の凍結温度 による影響	凍結温度によらない 一律の物理的劣化を 受ける。	凍結温度範囲別に整 理して、重み付けす る。	材料を特定していな いため、考慮しない。	材料を特定していな いため、考慮しない。
日射による材料温 度上昇	概念のみで実際に解 析を行っていない。 凍結融解回数との対 応が不明 ¹³⁾ 。	北海道は日積算日射 量から温度上昇を計 算し融解率を導入。 本州以南は日照時間・ 日最高・最低外気温 度別の融解率を導入。	考慮しない。	ブラックパネル温度 の日最高値の推定 の際、日最高外気温・日 射量・風速を導入。
放射冷却による 材料温度低下	考慮しない。	考慮しない。	考慮しない。	ブラックパネル温度 の日最低値を推定 の際、日最低外気温・晴 天指数・風速を導入。
材料の湿潤状態	積雪を凍結発生の条 件とする。	融雪積算量と降雨量 から湿潤度を求め、 凍害軽減係数として 導入。	相対湿度80%以上を 結露(凍結)の条件 とする。	相対湿度80%以上を 結露(凍結)の条件 とする。

する。また、材料温度は日射・放射冷却・大気への熱伝達などの影響を受ける。屋外における材料の温度は、ブラックパネル温度が指標となるので、これらの気象要素を導入して推定された日最高・最低値を導入し、凍結の回数を求め、「ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数」としてまとめる。これらを地図上に示して「凍結融解回数マップ」として提案する。参考までに、表一1にこれまでの報告と本報の凍結融解回数の算出方法の比較を示す。

無機系の仕上材には、多孔質で水分が浸透しやすいものもある。当然凍結融解の影響は大きく、耐久性の地域差は、今回作成する「凍結融解を伴う結露マップ」によってかなり説明できるだろう。一方、不透水性のものであれば水分の影響が少ない。外装仕上材の素材は、有機高分子系のもの、無機系のもの、あるいはその複合系とまちまちで、透水性能も異なっており、耐凍害性にも幅がある。多くの種類がある外装仕上材に、一律の地域環境係数を適用することは不合理で、材料の種類ごとに一連の劣化因子マップと、本報で示す「凍結融解回数マップ」に重み付けをして重ねることで、現実の耐久性との対応がある地域環境係数を設定できるはずである。

2. 結露水の凍結融解マップの作成

結露を生ずる気象条件は、ISO/TC 156/WG 4 では、

- ① 相対湿度が80%以上
- ② 外気温が0℃以上

としている。そこでまず第1段階では、1961～1985年に全国154箇所を観測された、3時間ごとの気温と6時間ごとの相対湿度の測定結果から得られた毎時外気温と

相対湿度の推定値³⁾に基づき、結露条件を満たして外気温が0℃以下になった場合に凍結を生じるものとし、その回数を積算する。融解回数は当然凍結回数に等しい。全国の年積算凍結融解回数を、図一1の「外気温に基づく結露水の凍結融解回数マップ」に整理し、寒冷地にある代表的な都市の月積算凍結融解回数の季節変動を図一2に示す。

一般に、屋外に使用される材料では太陽ふく射により表面温度は気温よりも高くなり、放射冷却により材料の表面温度は気温より低くなる。また、風があれば材料と大気との熱伝達が大きくなる。寒冷地では、暖房用エネルギーを節約するため、建物を断熱することが普及しているが、仕上材の裏面が断熱されていればその温度上昇や低下はより過酷なものとなる。したがって、外装材の凍害を論ずる際は、外気温に基づくよりも、実際の材料温度の指標となるブラックパネル温度に基づくほうが現実的である。

材料温度に影響する気象要素を考慮して、材料温度の指標であるブラックパネル温度の日最高・最低値を推定するために、著者は次の式を提案した⁴⁾。

- ・裏面解放ブラックパネル温度

日最高温度： T_{p1max} , °C

$$T_{p1max} = 1.143 T_{max} - 2.244 W_{12} + 0.928 S_D + 5.214$$

日最低温度： T_{p1min} , °C

$$T_{p1min} = 1.049 T_{min} + 0.022 W_N - 2.389 C_1 - 3.056$$

- ・裏面断熱ブラックパネル温度

日最高温度： T_{p2max} , °C

$$T_{p2max} = 1.128 T_{max} - 2.465 W_{12} + 1.383 S_D$$

図-1 外気温に基づく結露水の年積算凍結融解回数

図-2 寒冷地における外気温に基づく結露水の月積算凍結融解回数

$$T_{p2min} = 1.104 T_{min} + 0.201 W_N - 3.875 C_1 - 4.128$$

日最低温度： T_{p2min} , °C

ここで、 T_{max} ：日最高外気温度，°C
 T_{min} ：日最低外気温度，°C
 W_{12} ：12時の風速，m/s

図-3 裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の年積算凍結融解回数

図-4 寒冷地における裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の月積算凍結融解回数

W_N ：夜間の平均風速，m/s，

$(W_3 + W_6/2 + W_{13}/2 + W_{21} + W_{24})/4$ で定
義，添字は時刻

S_d ：日積算日射量，MJ/m²

C_1 ：晴天指数，—，

その日の日積算日射量を，大気外日射量

で除したもの

これらの式に 1976～1985 年、全国 66 箇所での気象観測結果を代入して、裏面解放、および断熱ブラックパネル温度の日最高・最低温度を推定した。これによればその日較差は気温よりも大きく、実際の建築材料に近いものとなる。

ブラックパネル温度が日最低温度となる場合の、外気温が日最低となる時の相対湿度が 80 % 以上で表面に結露を生じ、ブラックパネル温度が氷点下となれば凍結する。そしてブラックパネル温度の日最高温度が 0°C を超えれば融解する。ここにブラックパネル温度： -0.1°C 以下で凍結し、 0.1°C 以上で融解するものとして、毎時外気温と相対湿度のデータ³⁾と、裏面解放、および断熱ブラックパネル温度の日最高・最低温度のデータ⁴⁾からこれらの条件を満たす日数、すなわち凍結融解回数を積算した。裏面解放ブラックパネル温度に基づく全国の年間積算値のマップ、および寒冷地にある都市における月積算値を図—3, 4 に、裏面断熱ブラックパネル温度に基づくものを図—5, 6 に示す。

3. 考 察

3.1 結露水の凍結融解回数の地域特性

図—1, 3, 5 に示す年積算凍結融解回数のマップを全

体的に見ると、寒冷地の北海道・東北地域、そして冬期に湿度が高い北陸から山陰にかけて凍結融解回数が多い。一方、温暖地や冬期に乾燥している、房総・関東平野・伊豆・東海・紀伊・四国・南九州で少なく、奄美・沖縄では凍結しない。

外気温に基づく凍結融解回数は、山形・福島・津山で 40 回、高山・上野(三重県)・舞鶴で 30 回を超えるなど、北海道以外の盆地で多く、日較差が大きいことと関連があると考えられる。月積算凍結融解回数は、旭川・札幌・青森・盛岡・山形では厳冬期に外気温が氷点下のままであるために少なく、晩秋から初冬、早春に多くなる。気温が特に低い札幌・旭川では、年積算凍結融解回数も少ない。

ブラックパネル温度に基づく凍結融解回数は、裏面が解放されているものより、断熱されたものが日較差が広がり、凍結融解回数も多くなる。日最高外気温が氷点以下の真冬日でも日射により融解するため、外気温に基づくものと比べると回数が非常に多くなり、北海道ではその傾向が著しい。例えば旭川では外気温に基づく凍結融解回数が 19.3 回であったが、裏面解放ブラックパネル温度に基づくものが 156.1 回、裏面断熱ブラックパネル温度に基づくものが 171.3 回となる。寒中コンクリート施工指針・同解説¹⁷⁾の資料表には、旭川の日最高・最低

図—5 裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の年積算凍結融解回数

解析対象期間：1976～1985年

図—6 寒冷地における裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の月積算凍結融解回数

図—7 裏面開放、および断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

外気温に基づく凍結融解回数が示されている。これに対し、本報の外気温に基づく結露水の凍結融解回数は、相対湿度 80 % 以上の条件があるため少ない回数になっている。北海道について、東北、北陸、山陰地域が多く、盆地や冬期に湿度が高い地域で多い傾向は、外気温に基づくものと同じである。月積算凍結融解回数は、晩秋から厳冬期へ寒くなると多くなり、暖かくなると少なくなる。

図—8 平均外気温と外気温に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図—7 に示すように、裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数は、裏面解放ブラックパネル温度に基づくものと比べて多くなり、年積算凍結融解回数では 1.07 倍となった。それぞれの月積算凍結融解回数の間の相関係数は 0.990 で、年積算凍結融解回数の間では 0.999 と非常に高い相関がある。

3.2 凍結融解回数と気象因子の相関

外気温が低い地域で凍結融解回数が増える傾向を確かめるため、凍結がある場所・期間の平均外気温と外気

温に基づく結露水の凍結融解回数の関係を図-8に、裏面解放、裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数を図-9、10に示し、相関係数を表-2にも示す。外気温に基づく結露水の月積算凍結融解回数は、平均外気温が0~5°Cの範囲で多く、0°C以下となると少なくなるのは、真冬日には融解しないためと思われる。

ブラックパネル温度に基づく結露水の月積算凍結融解回数は、平均外気温が0°C以下に下がっても凍結融解回数は増える傾向が認められるが、同じ平均外気温の地点であっても凍結融解回数はかなり差があり、相関係数の絶対値もそれほど大きくない。年積算凍結融解回数に着目すると、平均外気温が同じであっても、多い地域は少ない地域の2倍にもなり、日較差やその他の気象因子の影響と考えられる。したがって、平均外気温のみに基づいて凍害の影響を論ずることは無理であろう。年平均外気温が15°C以下の地域で、凍結融解回数が急激に増加するので、7.5°C以下の地域で凍害を考慮する⁶⁾ことは、見直されるべきであろう。

また、日最低外気温と凍結融解回数の関係を考察する。日最低外気温の月平均値、年平均値と凍結融解回数の相関を図-11、12、13に、相関係数を表-2に示す。得られた相関係数は、平均外気温との相関係数に比べ若干絶対値が大きくなっている程度である。日最低外気温と凍結融解回数の相関図も、平均外気温との相関図を低温側に5°C程度ずらしたようなものになった。これらの結果は、日最低外気温から凍結融解回数を推定した場合、推定値の誤差の目安を示していると解釈できる。

次に、本報では相対湿度が80%以上という条件を設定して、凍結融解回数を求めたことに着目して、平均相対湿度と凍結融解回数の相関係数を求め、表-2に併記して示す。正の値が得られたが絶対値は小さく、相関はあまり認められない。気温が0°C以上という条件で、

年積算結露/乾燥回数を求めた際の年平均相対湿度の相関係数は0.153であった³⁾ことに比べると大きな値となっている。温度条件を0°Cに固定して、本来相対湿度にある温度依存性を排除して凍結融解回数を求めたことにより、このような結果になったと思われる。

また、凍結のための水分の供給源としての降水量に着目し、凍結融解回数との相関係数を示すが、月積算値については全く相関がない。年積算値では、絶対値の小さい負の値となった。凍結融解は、極く限られた地域を除き全国で発生するため、降水量の多く暖かい地域も対象に含まれるからである。

図-9 平均外気温と裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-10 平均外気温と裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

表-2 凍結融解回数と気象要素の相関係数

凍結がある場所・期間のみを対象とし、そのデータ数を()内に示す

気 象 要 素	外気温に基づく結露水の凍結融解回数*1		裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数**		裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数**	
	月積算	年積算	月積算	年積算	月積算	年積算
平均気温 ^{*3}	月平均	年平均				
	-0.418(778)	-0.463(135)	-0.749(421)	-0.760(59)	-0.746(459)	-0.764(59)
日最低気温 ^{*3}	月平均	年平均				
	-0.431(778)	-0.548(135)	-0.762(421)	-0.816(59)	-0.761(459)	-0.819(59)
相対湿度 ^{*3}	月平均	年平均				
	0.392(778)	0.612(135)	0.265(421)	0.504(59)	0.199(459)	0.513(59)
降水量 ^{*3}	月積算	年積算				
	0.005(778)	-0.232(135)	-0.042(421)	-0.426(59)	-0.062(459)	-0.422(59)
積雪日数 ^{*2}	月積算	年積算				
	0.331(784)	0.426(136)	0.652(429)	0.787(60)	0.619(467)	0.788(60)
寡雪率 ^{*2}	月平均	年平均				
	-0.260(627)	-0.466(133)	-0.650(273)	-0.817(57)	-0.628(275)	-0.819(57)
東北地域の寡雪率 ^{*2}	月平均	年平均				
	-0.528(98)	-0.659(17)	-0.702(57)	-0.923(10)	-0.656(57)	-0.932(10)

*1 解析対象期間：1961~1985年、*2 解析対象期間：1976~1985年、*3 1980年気候表による

図-11 平均日最低外気温と外気温に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-12 平均日最低外気温と裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-13 平均日最低外気温と裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-14 積雪日数と外気温に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-15 積雪日数と裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-16 積雪日数と裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-17 寡雪率と外気温に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-18 寡雪率と裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図-19 寡雪率と裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

他の報告では、積雪があることを条件として凍結融解回数が算定されている^{7), 15)}。そこで1976～1985年の気象観測結果から得られた、積算積雪日数と凍結融解回数の相関係数を表-2に、年積算値の相関を図-14, 15,

16に示す。また、10 cm以下の積雪のある日数の全積雪日数の割合として定義される寡雪率¹³⁾と凍結融解回数の相関係数を表-2に併記し、年平均寡雪率と年積算凍結融解回数の相関を図-17, 18, 19に示す。積雪日数が

図—20 外気温に基づく結露水の凍結融解回数と裏面開放ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

図—21 外気温に基づく結露水の凍結融解回数と裏面断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数の相関

増え、寡雪率が減ると凍結融解回数は増加する傾向があるが、外気温に基づく結露水の凍結融解回数と、積雪日数・寡雪率との相関係数の絶対値は0.5以下であり強い相関はない。ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数では、絶対値が0.8程度の相関係数となり、ある程度の相関は認められる。

気候区ごとに区分すると、凍結融解回数と寡雪率の間

に強い相関が認められるという報告¹³⁾がある。東北地域について解析を試みたところ、表—2に示すように外気温に基づく年積算凍結融解回数では0.659となり、裏面解放ブラックパネル温度に基づく凍結融解回数では0.923、裏面断熱ブラックパネル温度に基づく0.932という相関係数が得られた。本報では凍結融解回数の求め方が異なっているが、日射を考慮しない外気温に基づく凍結融解回数で相関があまりなく、日射を考慮したブラックパネル温度に基づく凍結融解回数で相関がある。

相関係数が外気温に基づく凍結融解回数の場合が小さく、ブラックパネル温度に基づくものが大きくなることは、平均外気温との相関を検討したときと同じである。外気温が低いと融雪がなく積雪日数が多く寡雪率が小さくなると考えられる。真冬日には外気温に基づく場合、結露は融解しないため、図—8に示されたように外気温が低いと外気温に基づく凍結融解回数が減ることが相関係数が小さくなる原因であろう。

3.3 外気温に基づく凍結融解回数とブラックパネル温度に基づく凍結融解回数の相関

外気温に基づく凍結融解回数と、ブラックパネル温度に基づく凍結融解回数は、ともに寒冷地で多いという傾向があるものの、北海道ではブラックパネル温度に基づく凍結融解回数が著しく増加している。その相関を図—20, 21に示す。日射を考慮することで、凍結融解回数は4~5倍、北海道では7~8倍と多くなる。

本報では水平面でのブラックパネル温度に基づいて凍結融解回数を求めたが、実際に応用する場合、

- 1) 南面では日射の影響が厳しく、本報で推定した凍結融解回数より増えると思われる。
- 2) 北面であれば日射の影響は少なく、外気温に基づく結露水の凍結融解回数に近いものになるだろう。
- 3) 換気口や煙突回りは熱と水蒸気が供給され、著しい凍害が短期間に発生している事例がある。

などの点について注意が必要である。なお、日射を考慮しない場合とする場合の凍結融解回数は、方位による凍害の差を説明する目安になるだろう。

4. 結 論

相対湿度80%以上で空気中の水分が建築材料表面で結露するものと仮定して、有機高分子系および無機系の建築外装材の凍害の指標となる凍結融解回数を求めた。まず外気温に基づく結露水の凍結融解回数を求め、次に日射や放射冷却などの影響を考慮した裏面解放および断熱ブラックパネル温度に基づく結露水の凍結融解回数を求め、マップ上に整理した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 沖縄・奄美などの限られた地域を除いて、凍結融解は全国で発生する。北海道、東北、北陸から山陰にか

けてその回数が多い。外気温に基づく結露水の凍結融解回数は、盆地で多い。ブラックパネル温度を導入することにより一般地で4~5倍、北海道では7~8倍と著しく多くなる。

2) 気温が低い地域で凍結融解回数が増える傾向があるが、その相関はあまり強くないので、気温のみに基づいて凍害地域を設定することは危険である。相対湿度や降水量との相関はあまりない。

3) 降雪日数が多く、寡雪率が小さいと凍結融解回数が増加する傾向がある。外気温に基づく凍結融解回数はその相関は弱い、日射を考慮したブラックパネル温度に基づく凍結融解回数は相関が強い。

外装仕上材料の凍害は凍結温度に依存性があると言われており、凍結融解回数のみでその耐久性を論ずることはできない。現段階では外装仕上材料を特定していないので、この温度依存性をまだ考慮していないが、凍結融解実験の結果などに基づいて本報で提案したものを補正することを考えている。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、北海道大学工学部建築工学科・鎌田英治博士・長谷川寿夫博士、および宮城工業専門高等学校建築学科・伊藤憲雄氏の御助言を賜りました。ここに、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 楡木 堯・冨板 崇：わが国の紫外域日射量マップの提案，高分子系建築材料の耐久性に関する研究（その1），日本建築学会構造系論文報告集 第381号，pp.17~25，昭和62年11月
- 2) 冨板 崇：ブラックパネル温度に基づく熱劣化予想マップ，屋外での熱劣化環境の定量化（その1），日本建築学会構造系論文報告集 第395号，pp.13~20，昭和64年1月
- 3) 冨板 崇・樫野紀元：わが国の結露マップの提案，高分子系建築材料の耐久性に関する研究（その2），日本建築学会構造系論文報告集 第395号，pp.21~27，昭和64年1月
- 4) 冨板 崇：ブラックパネル温度の日較差マップ，屋外で

の熱劣化環境の定量化（その2），日本建築学会構造系論文報告集 第401号，pp.25~32，1989年7月

- 5) 冨板 崇・樫野紀元：わが国の気温補正結露マップの提案，高分子系建築材料の耐久性に関する研究（その3），日本建築学会構造系論文報告集 第405号，pp.21~27，1989年11月
- 6) 日本建築学会：建築物の耐久設計の考え方，1988年10月
- 7) 平井和喜：凍害の地域性を示す凍害危険度の試案，日本建築学会研究報告集第54号，昭和35年東北支部
- 8) 平井和喜：東北地方主要都市における凍害危険度の算出，日本建築学会研究報告集第54号，昭和35年東北支部
- 9) 平井和喜：外装材料の凍害と自然関連要素気象との関連性（水分供給源としての屋上積雪の実状），日本建築学会論文報告集号外，pp.18，昭和40年9月
- 10) 平井和喜：鉄筋コンクリート造建物外装の耐久性と冬季気温との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）A，pp.359~360，昭和61年8月
- 11) 平井和喜：建物の凍害に関する気候要素と凍結融解サイクル数の経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）A，pp.127~128，昭和62年10月
- 12) 伊藤憲雄・平井和喜・成田 健：建築外装材料の凍害に関する気温変化の分析，一東北地方の日最高・最低気温一，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）A，pp.1~2，1989年10月
- 13) 平井和喜：建築物外装の凍害にかかわる気象環境因子の地域特性，一凍結融解サイクル数と寡雪率との関係一，日本建築学会東北支部研究報告集 第51号，pp.201~204，昭和63年6月
- 14) 平井和喜：凍結融解サイクル数算定過程における融解気温の考察，一日最高気温月平均値と日変動の関係一，日本建築学会東北支部研究報告集 第52号，pp.203~206，1989年10月
- 15) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害に対する外的要因の研究，北海道大学学位請求論文，昭和49年12月
- 16) ISO/TC 156/WG 4: Corrosion of Metals and Alloys. Classification of Atmospheres Deduction Methods of Determination
- 17) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説（第2版），1989年1月

（1989年10月27日原稿受理，1990年3月23日採用決定）