

報告 面状発熱体を埋設したコンクリートスラブの温度上昇に関する研究

枝広英俊*1・木戸伸子*2・大根弘行*3

要旨：面状発熱体（以下、面発と称する）を融雪システムとして適用することに着目し、面発の上昇温度や電力などの基本性状と、面発をコンクリートに埋設した場合の上昇温度等について実験を行った。その結果、面発及びコンクリート表面において、融雪可能と思われる上昇温度が得られた。また、面発は幅の狭小なほど上昇温度は高温となり、長さに比例して使用電力は増大すること、面発の下部に熱伝導率の小さい材料を用いることで、より効率的な上昇温度が得られることなどが明かとなった。これらのことから、面発をコンクリートスラブに埋設した場合でも融雪は十分可能であると推測される。

キーワード：面状発熱体、コンクリート、上昇温度、融雪、電力

1. はじめに

多雪・豪雪地帯では、積雪や凍結を原因とする様々な被害が発生している。建築物では、勾配屋根における落雪事故や雪下ろし時の落下事故をはじめ、玄関回りなどでの転倒事故が発生しており、設計上の様々な制約を受けている。また、土木分野においても道路や軌道及び空港滑走路などでは、安全確保のために多大な労力を費やしているのが現状である。この様な雪害対策の一つとして、温水パイプや電熱線を用いた融雪システムが導入されている。しかし、前者ではボイラーの設置や燃料費に多大なコストを要し、かつ、水洩れ時の修繕が困難であったり、後者では設備費や維持費が高価で、一部の断線により全体が作動しないなど、多くの課題が残されている。

そこで、本実験研究では、面発を融雪システムとして適用することに着目した [1]。シリーズ I では、寸法の異なる面発を用いて面発の上昇温度及び電力などの基本性状を捉え、シリーズ II では、寒冷地で使用することを考慮して、試験体周辺の外気温度を約-20～約15℃まで変化させ、面発をコンクリート中に埋設した場合の上昇温度について検討を行った。

2. 使用材料

2. 1 面状発熱体

実験に用いた面発は、カーボン及び導電性塗料をコーティングした綿糸の織布の両端に、軟銅線を使用した電極を織込んだものに、絶縁の為の塩化ビニルシート（厚さ：0.8mm、絶縁抵抗：20℃で100MΩ）をラミネートしたものを基材としている。さらに、温度分布の均一化を目的としたアルミ箔と、防水層の一部を構成する

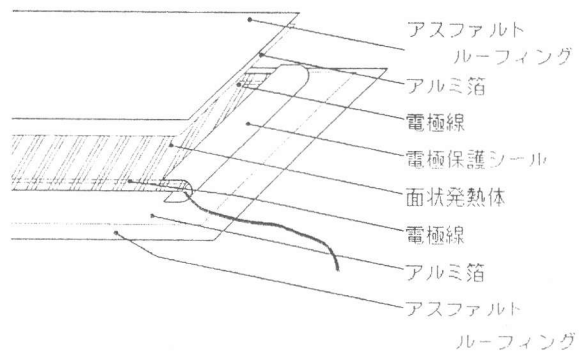


図-1 面状発熱体の構成

ことを考慮したアスファルトルーフィングで表層をカバーしたものである（図-1 参照）。

*1 芝浦工業大学助教授 工学部建築学科（正会員）

*2 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻

*3 大成ホームエンジニアリング（株）

2. 2 コンクリート

シリーズⅡに用いたコンクリートは3種類で、普通コンクリート、緊急工事などで使用される速硬性混和材を用いたコンクリート（以下、速硬性コンクリートと称する）、軽量で、かつ、断熱を目的とした軽量コンクリート2

種である。使用材料を表-1に、各々のコンクリートの調合計画と圧縮強度試験結果及び熱伝導率の測定結果などを表-2に示す。

表-1 使用材料

材料名	種類	成分及び物性
セメント	普通ポルトランドセメント	比重：3.16 比表面積：3,260cm ² /g (N社製品)
混和材	速硬性混和材	比重：2.88 比表面積：5,500cm ² /g (M社製品)
細骨材	大井川産川砂 人工軽量細骨材	表乾比重：2.60 粗粒率：2.55 表乾比重：1.91 粗粒率：2.71
粗骨材	鬼怒川産川砂利 人工軽量粗骨材	表乾比重：2.56 粗粒率：7.30 最大寸法：25mm 表乾比重：1.68 粗粒率：6.28 最大寸法：15mm
混和剤	凝結調整剤 A E減水剤 A E助剤	主成分：有機酸、炭酸アルカリ 主成分：オキシカルボン酸塩 —

表-2 調合計画及び各種試験結果

コンクリート種類	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量 (kg/m ³)				A E減水剤 使用量 (cc/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)		熱伝導率 (W/mK)
							セメント	速硬性 混和材	細骨材 ¹⁾	粗骨材 ¹⁾		7日	28日	
普通コンクリート	12.0	4.2	40	25	31.2	172	428	—	526	1142	4280	38.5	47.9	1.79
速硬性コンクリート	6.5	5.0	40 ³⁾	25	46.6	133	233	100	849	976	3325	40.7	49.5	1.64
軽量コンクリート2種	10.0	5.8	40	25	41.3	172	428	—	510	641	4290	34.0	40.8	0.78

1) 表乾重量を示す。

2) ASTM C 518に準拠して、厚さ約50mmの気乾状態で測定し、 $\lambda = E I / \Delta T \cdot K$ により求めた。

3) 水結合材比を示す。

3. 実験方法

3.1 試験体の形状・寸法

シリーズⅠに使用した面発は、幅または長さの違いによる各測定点の上昇温度や使用電力などの特性を把握するため、幅×長さが400×400mmと、幅が900mmの一定で長さを400、900、1350、1800mmの4種類に変化させた、合計5種類とした。

また、シリーズⅡに用いた試験体の形状及び寸法を図-2に、さらに、用途と熱効率などを考慮して選定したコンクリートの種類と組合せを表-3に示す。試験体は、厚さ15mmの合板を用いて製作した型枠に厚さ100mmのコンクリート(以下、下部コンクリートと称する)を打込んだ後、幅×長さが400×400mmの面発を設置して、厚さ75mmのコンクリート(以下、上部コンクリートと称する)を打込んだ。なお、コンクリートスラブの表面及び周辺は厚さ100mmの発泡スチロールで断熱し、コンクリートと発泡スチロールの境界面は、厚さ0.5mmの塩化ビニルシートで仕切った。

3.2 上昇温度の測定方法

熱電対には、JIS C 1602による0.75級帯線を使用し、自記またはデジタル温度計により、通電直後から5～30分毎に、経過時間180～360分まで所定の箇所について測定を行った。シリーズⅠの実験では、面発を厚さ10mmの硬質ウレタンボードの上に水平に設置して、面発自体の上昇温度の測定を行った。測定箇所は、面発表面の中央部を含む合計15箇所とした。一方、シリーズⅡの

表-3 上下部コンクリートの組合せ

試験 略号	体 号	コンクリート種類		
		普通 コンクリート	速硬性 コンクリート	軽量 コンクリート
N-N	上	○	-	-
	下	○	-	-
N-L	上	○	-	-
	下	-	-	○
Q-L	上	-	○	-
	下	-	-	○

実験では、図-2に示すようにコンクリート表面、コンクリート中及び面発表面の合計18箇所の測定を行った。一例として、シリーズIIにおける上部コンクリート及び面発表面の測定箇所の略号と条件を表-4に示す。なお、実際に融雪を行う場合、気温が氷点下となったりコンクリートが湿潤状態となることが想定されるため、シリーズIIでは、雰囲気温度が約15、約-5、約-20℃の場合と、コンクリートが気乾及び湿潤状態の場合について測定を行った。ここで、湿潤状態とは上部コンクリート表面に深さ1cm程度の水を張り、1週間程度の含水をさせた状態とした。

3.3 電力の測定方法

「JIS C 1102 指示電気計器」に準じ、通電直後から15~30分毎に経過時間180分まで測定を行った。

4. 実験結果及び考察

4.1 シリーズI：面発の寸法と上昇温度及び電力の関係

(1) 経過時間に伴う上昇温度の変化

面発中央部の主な結果を図-3に示す。全ての面発において、通電直後から30分間は急激な温度上昇を示し、その後、経過時

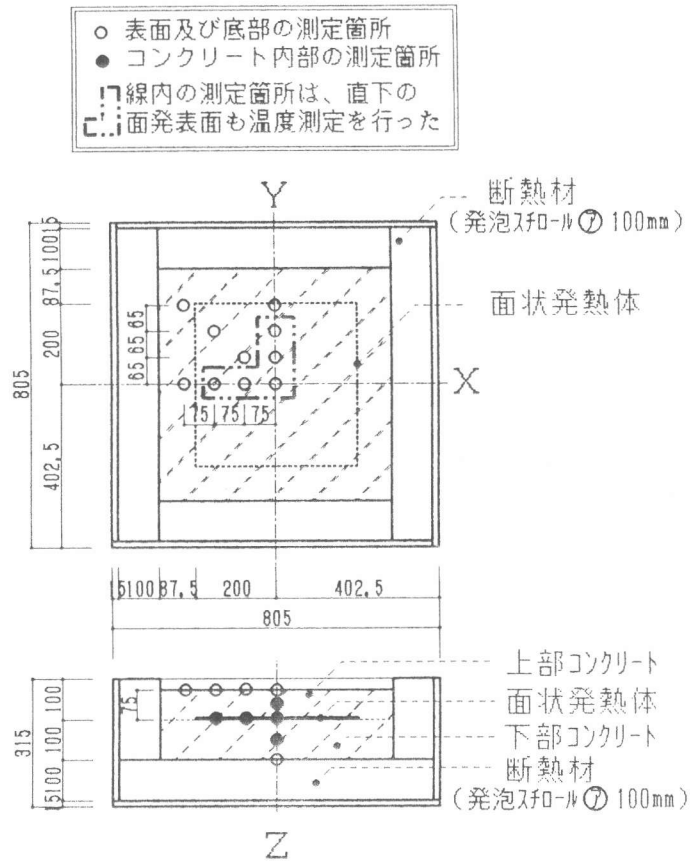


図-2 試験体の形状及び寸法

表-4 温度測定箇所の略号及び条件の一例

測定 箇所	測定 条件	測定箇所の有無		中央部からの距離 (mm)	
		上部コンクリート表面	面発表面	X軸方向	Y軸方向
中央部		有	有	0	0
中間部X 中間部Y		有	有	75	0
		有	有	0	65
端部X 端部Y		有	有	150	0
		有	有	0	130
最端部X 最端部Y		有	無	225	0
		有	無	0	195

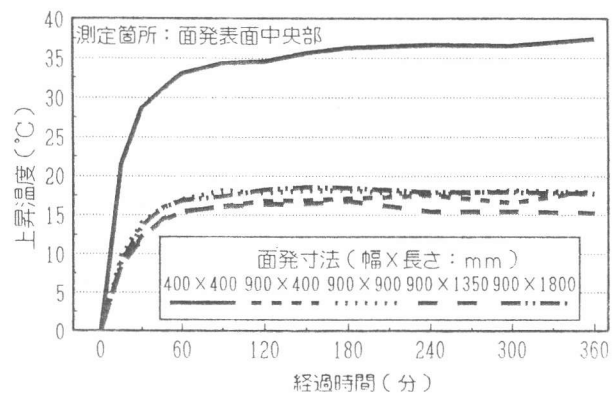


図-3 経過時間に伴う各寸法の面発の上昇温度

間120分までは、緩やかな温度上昇を続けた。それ以降は、気温の変化で多少の上下はあるものの、400×400mmでは $36 \pm 1^\circ\text{C}$ 、幅が900mmでは全ての長さにおいて $17 \pm 1.5^\circ\text{C}$ で遷移した。つまり、上昇温度は幅が狭いほど高温を示し、また、幅が一定であれば長さが異なっても同程度の値を示す傾向にあった。従って、初期の温度上昇、または、より高温度を期待する場合は幅を狭小とすることが有効と考えられる。

(2) 経過時間に伴う電力の変化

経過時間3時間までの主な結果を図-4に示す。電力は、全ての面発において温度が上昇するのに伴って僅かに減少し、経過時間30分では、通电直後と比較して10~14%程度低下した。これは、カーボンまたは導電性塗料部分の抵抗値が、温度の上昇とともに増大したことが原因と考えられる。なお、30分経過以降の電力は、温度が平衡状態になると共にほぼ一定となった。

(3) 幅または長さを変えた場合の上昇温度及び電力の変化

面発の寸法と、通电から3時間経過後の電力及び面発中央部の上昇温度の関係を図-5に示す。幅が異なる400×400mmと900×400mmを比較すると、電力は各々55W及び61Wとなり僅差であったが、上昇温度は幅400mmの方が明らかに高温を示した。また、幅が900mmの一定で長さが異なる場合の上昇温度はほぼ一定の値となり(平均 17.9°C)、電力は長さが増大するのに比例して増加し、本実験における幅900mmの面発では式(1)の関係となった。

$$P = 0.17L - 13.5 \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、P：電力(W) L：面発長さ(mm)

ただし、単位面積当りの電力は、幅が400mmの場合に約 $380\text{W}/\text{m}^2$ となり、幅900mmの場合には長さが異なっても約 $170\text{W}/\text{m}^2$ と一定の値となった。つまり、面発を融雪システムとして用いる場合、上昇温度に限った範囲では幅の狭小なほど有利であるが、設置場所の最低気温を把握した上で、面発の幅を決定する事が望ましい。なお、面発の上昇温度から推察すると、幅が400mmでは約 -25°C 、幅が900mmでは約 -10°C 以上の環境下での融雪が可能であるという目安を得た。

4. 2 シリーズII：面発をコンクリートに埋設した場合の上昇温度

(1) 経過時間に伴う上昇温度の変化

経過時間6時間までの主な結果を図-6に示す。全ての面発表面において、通电直後から15分間は急激な温度上昇を示し、その後は計測終了時まで緩やかな温度上昇を続けた。一方、上部コンクリート表面は、通电から経過時間30分までは温度上昇がほとんど認められず、その後、面発の温度上昇と上部コンクリートの伝熱に伴って緩やかな温度上昇を示した。

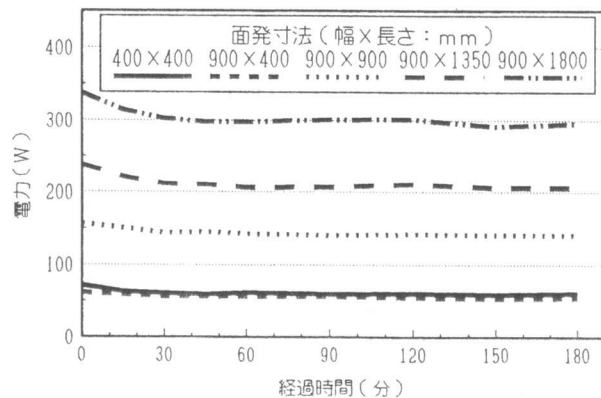


図-4 経過時間に伴う各寸法の面発の電力

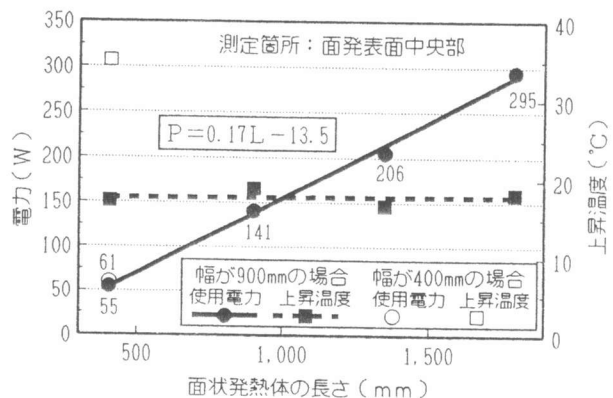


図-5 面発の寸法と電力及び上昇温度の関係

(2) コンクリートの違いによる

上昇温度の差異 (Z軸方向)

各試験体中央部のZ軸方向 (図-2 参照) における経過時間別上昇温度の主な結果を図-7 に示す。上昇温度は、全ての試験体においていずれの経過時間をみても、面発表面 > 上部コンクリート中 > 上部コンクリート表面 > 下部コンクリート中 > 下部コンクリート底面の関係にあった。例えば、経過時間360分における 上部コンクリート表面の上昇温度はN-Nで12.6℃、N-Lで14.1℃、Q-Lで17.2℃であった。また、面発表面と下部コンクリート底面との上昇温度差はN-Nが4.9℃であり、N-Lが9.8℃であった。つまり、上部コンクリートに速硬性コンクリートを用いても、上昇温度は普通コンクリートと同等か、若干上回り、緊急を要する工事での利用が可能と思われる。また、下部コンクリートに熱伝導率の小さい軽量コンクリート2種を用いることで、上部コンクリート表面で若干高い上昇温度が得られ、上部コンクリートへより効果的に伝熱できると考えられる。

(3) コンクリートの違いによる

上昇温度の差異 (X軸及びY軸方向)

X軸とY軸方向 (図-2 参照) における経過時間別上昇温度の主な結果を図-8 に示す。本実験では、中央部が最も高温となる傾向にあり、この傾向は経過時間が長くなるほど顕著となった。また、面発の発熱部 (電極線内) から外れた測定点である最端部においては、コンクリート中の伝熱に依存するため、他と比較して低温となった。

従って、実際に融雪システムとして用いる場合には、面発の敷設間隔を考慮する必要もある。

(4) 気乾及び湿潤状態における上昇温度の比較

主な結果を図-9 及び図-10 に示す。N-NとN-L共に、面発表面では気乾及び湿潤状態で差異がほとんど認められなかった。ただし、当然ながら、上部コンクリート表面では、時間が経過するにつれて、気乾状態と比較して湿潤状態での上昇温度が低温となり、経過時間360分の湿潤状態での上昇温度は、約10℃が得られ、-5~-10℃以上の環境下で融雪が可能であるとの目安を得た。一方、下部コンクリートの気乾状態と湿潤状態における上昇温度の差異を比較すると、

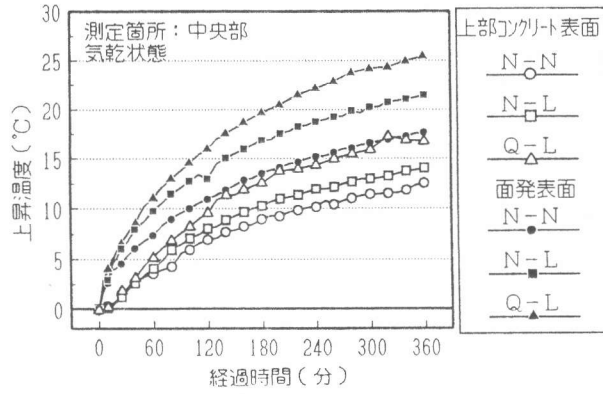


図-6 経過時間に伴う表面中央部の上昇温度

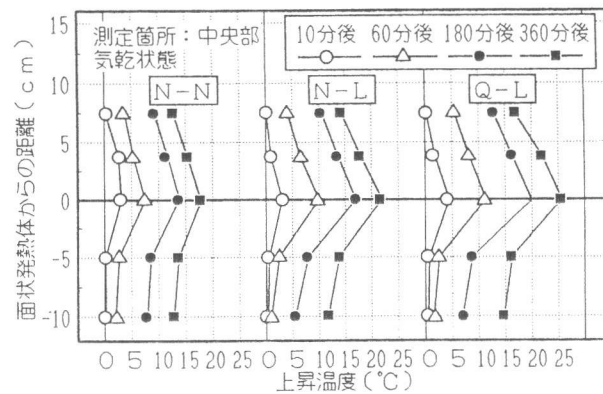


図-7 経過時間別上昇温度 (Z軸方向)

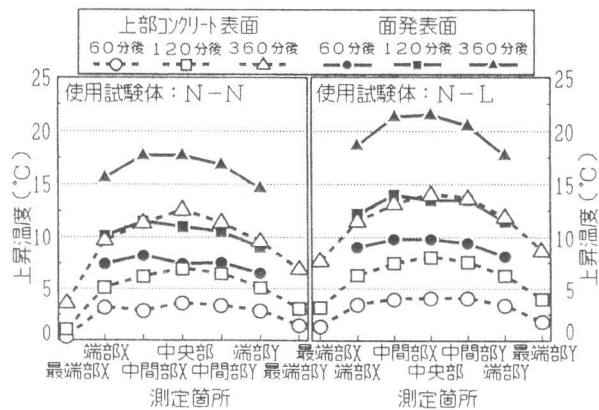


図-8 経過時間別上昇温度 (X軸及びY軸方向)

軽量コンクリート2種では、吸水により熱伝導率が大きくなった為か、経過時間180分以降の湿潤状態で、下部コンクリート底面上昇温度が若干高くなる傾向にあった。

(5) 常温及び氷点下における上昇温度

主な結果を図-11に示す。上部コンクリート及び面発表面における上昇温度は、常温と氷点下のいずれの気温下でもほぼ一致した。上部コンクリート表面の上昇温度は、経過時間360分で平均33.9℃であり、氷点下の環境下でも融雪可能なコンクリート表面温度が得られた。なお、上部コンクリート表面が氷点下を上回ったのは、気温が約-5℃では通電から25分経過後であり、気温が約-20℃では120分経過後であった。

5. まとめ

融雪を目的として、面状発熱体を埋設したコンクリートスラブに関する実験研究を行い、本実験研究の範囲内ではあるが、以下の事項が明かとなった。

- ①面発の特性は、幅が狭小な程上昇温度は高くなり、幅が一定であれば長尺なもの程電力は増大する。実用上は、最低気温や積雪量及び面発の電力などを考慮して、面発の幅・長さを決定すると経済的である。
- ②本実験における面発の上昇温度は、中央部が最も高く、平均すると、幅400mmが約36℃、幅900mmが約17℃の上昇を示す。
- ③面発の電力は、温度上昇により僅かに低下し、幅900mmでは約170W/m²とみなせる。
- ④面発の幅や、コンクリートスラブ(厚さ:75mm)の含水状態によっても異なるが、幅400mmの面発は、-5~-10℃程度の環境下での融雪が可能であると思われる。
- ⑤外気温が約-5℃及び-20℃であっても、最高温度は異なるが、約15℃の環境下とほぼ同じ傾向の温度上昇を示し、融雪可能なコンクリート表面雰囲気温度が得られた。なお、本実験研究では、田島ルーフィング(株)及び三菱マテリアル(株)の協力を得たので、ここに深謝する。

《参考文献》

[1] 枝広英俊、木戸伸子：面状発熱体の温度上昇特性とコンクリートスラブに埋設した場合の実験研究(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.757~760、1995.8

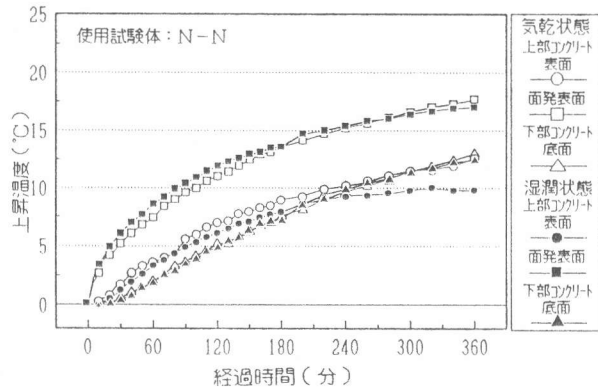


図-9 経過時間に伴う気乾及び湿潤状態の上昇温度(N-N)

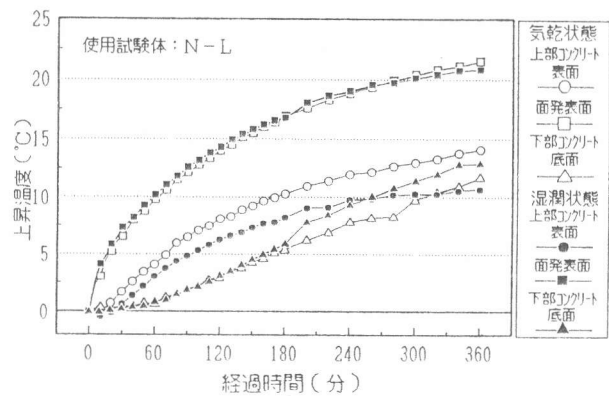


図-10 経過時間に伴う気乾及び湿潤状態の上昇温度(N-L)

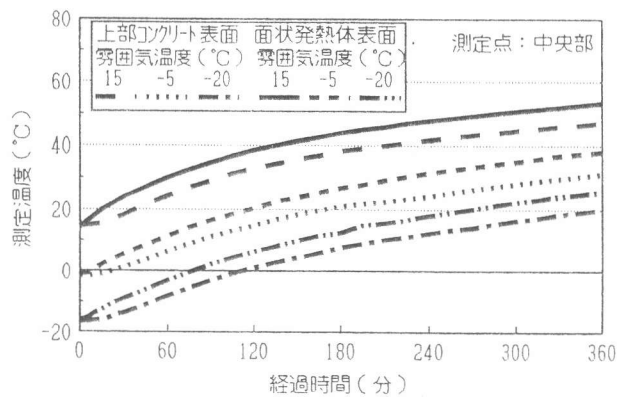


図-11 経過時間に伴う常温及び氷点下の上昇温度