

# バイオ菌発熱体を用いた鋼床版の熱伝達メカニズムの解明

## Clarification on the Heat Transfer Mechanism of Steel Girder Plate with Heat Generation by Natural Bacteria

山尾敏孝\*<sup>1</sup>, 片山拓朗\*<sup>2</sup>, 古賀淳\*<sup>1</sup>, 田上剛\*<sup>3</sup>

Toshitaka Yamao, Takuro Katayama, Atsushi Koga, Tsuyoshi Tanoue

\*<sup>1</sup> 熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8555, 熊本市黒髪2-39-1)

\*<sup>2</sup> 崇城大学 工学部エコデザイン学科 (〒860-0082, 熊本市池田4-22-1)

\*<sup>1</sup> 熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8555, 熊本市黒髪2-39-1)

\*<sup>3</sup> 熊本大学 工学部社会環境工学科 (〒860-8555, 熊本市黒髪2-39-1)

Since the freeze condensation occurred on the surface of bridges during in early morning in winter can cause the serious accidents for drivers. In this paper, the effect of heat generation by natural bacteria was investigated emphasized on the surface of steel plate experimentally and analytically. Steel plates with welded a box section and trapezoidal section girders filled with soil mixed with some bacteria were used as the experimental models. Then, these models were tested in the situation exposed outside below the freezing point in winter. The temperatures on the surface on the deck plate were measured in various conditions. Numerical analyses were carried out by the heat conduction program using the difference method. The validity of this preventable method by using soil mixed with some bacteria was indicated by experimental results.

Key words: Steel plate girder, Natural bacteria, Heat generation, Heat transfer mechanism

### 1. はじめに

熱容量の小さい鋼床版橋は冬季の早朝に結露凍結が発生し、運転者や歩行者にとって大変危険であるという問題がある。従来の対策として凍結防止剤の散布や蓄熱材の埋設といった方法が採られてきた。しかし、凍結防止における効果は現れたものの、凍結防止剤を用いる方法は毎回の作業が大変であり結露が発生する日の予測が難しいこと、蓄熱材を用いる方法は交換の際に路面の舗装をはがす必要があることといった問題がある<sup>1)</sup>。近年、橋梁には耐久性及び維持管理の容易さが求められており、社会資本の有効活用の重要性は増している。

筆者らは、自然界から採取したバイオ菌を用い、活動時に発熱する効果を利用した路面の凍結防止への取り組みを試みてきた<sup>2),3),4),5)</sup>。実験に使用したバイオ菌に関しては寿命が1年程と短い、冬季の数ヶ月間は十分活動を保ち、かつ凍結予測の不要であり環境負荷の低減という面から、鋼桁橋路面部の凍結対策としての提案を行うものである。本研究のような自然界から得たバイオ菌を用い、低温状態での活動効果を利用した結露凍結防止の研究は類を見ないものである。

具体的にはバイオ菌を混入した腐葉土入りの容器を模型や橋梁下部に取り付け、床版及び路面を0℃以上に維持することでバイオ菌の発熱による橋梁の温度維持の妥当性を検討した。その結果、冬季の野外に曝された鋼床版橋梁模型における路面凍結防止の一手法としての効果が得られ、更に改良をすることで実用の可能性があるとの結論を得た。しかし、バイオ菌の発熱量特性や橋梁の温度を維持する最低熱量等について十分明らか

にされていなかった。

そこで、本研究では、鋼床版を模した鋼板模型を用い、バイオ菌を混ぜた腐葉土の比熱測定やバイオ菌を混ぜた腐葉土入り容器を取り付けた鋼板の熱伝達メカニズムの解明を目的とした。具体的には腐葉土入り容器を鋼床版に付けた模型を製作し、鋼板上と容器断面内の温度を詳細に測定し、温度変化の状況を調べた。並行して、差分法を用いた熱伝導解析により温度シミュレーションを行った。

### 2. バイオ菌と比熱測定

#### 2.1 菌の種類

実験で使用したバイオ菌は、分解菌に属する好気性微生物で、-20~110℃で生息が可能であり、低温域で活動ができる特徴を持つ放線菌(KM-8)である<sup>6)</sup>。実際には、この放線菌をベースに数種類の菌を腐葉土に混ぜて使用した。腐葉土はバイオ菌にとっての住みかたと餌の役割をし、この腐葉土中の有機物を分解する過程で熱を発する。菌の選定については8種類の菌から検討して判断した。

#### 2.2 バイオ菌入り腐葉土の比熱測定

バイオ菌入りの腐葉土の発熱量を求めるためには比熱を明らかにする必要がある。比熱測定実験を行った。図2-1に示すような、ガラス製の水槽180mm×180mm×180mm、厚さ10mm)と銅製の箱(80mm×150mm×100mm、厚さ2mm)を使用した。熱量の移動は温度変化と質量及び比熱で計算できることから求めた。写真2-1のように水

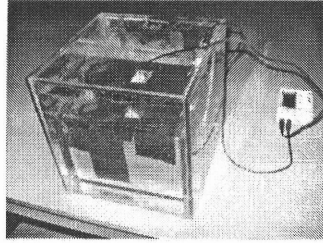
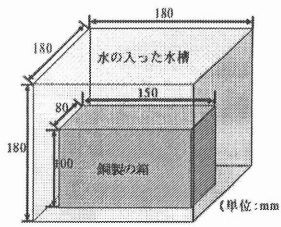


図 2-1 比熱測定 の 模型 写真 2-1 比熱測定実験の様子

の 入 っ た 水 槽 に 発 熱 し て い る バイオ菌入りの腐葉土の入った銅製の箱を入れ、それぞれの温度変化を温度センサーで測定した。水と腐葉土と銅の温度変化データを熱力学の方程式<sup>7)</sup>に代入して腐葉土の比熱を求めた。得られたバイオ菌入り腐葉土の比熱は0.425 (kcal/g・℃)であった。文献<sup>2)</sup>より土の比熱が0.20~0.25、木の比熱が0.40及び水の比熱が1.0であることから、実験で使用した腐葉土の成分に細かい木くずやかなりの水分が含まれていることから、得られた数値はほぼ妥当な値であることがわかった。

### 3. 模型による温度測定実験の概要

#### 3.1 概要

バイオ菌が鋼床版に及ぼす熱効果を確認する基礎実験として、以下の実験を行った。

- ① 鋼板模型における温度測定実験
- ② 土とバイオ菌の温度比較実験

これらの実験は各模型において容器断面内、気温や鋼板上での各点で温度を測定した。測定期間は約1週間、5分ごとに記録した。

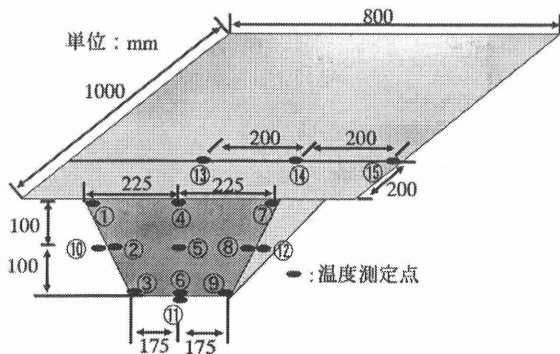


図 3-1 鋼板模型

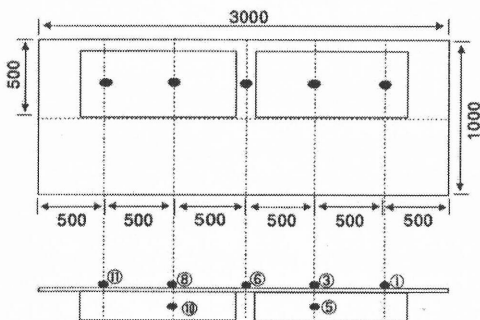


図 3-2 温度センサー設置位置

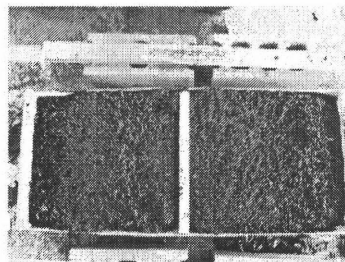


写真 3-1 バイオ菌入り腐葉土 (左) と通常の腐葉土 (右)



写真 3-2 鋼板模型と容器

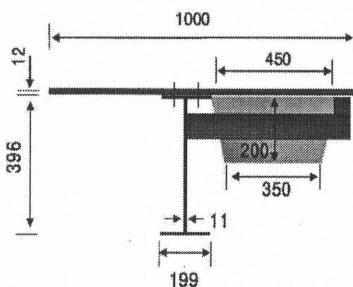


図 3-3 鋼製床板と台形容器

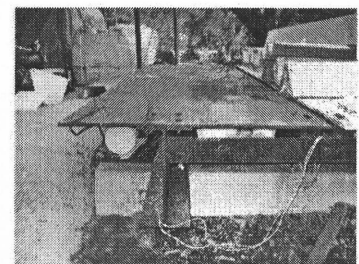


写真 3-3 鋼床版模型の全景

#### 3.2 鋼板模型

容器の断面内におけるバイオ菌入り腐葉土の温度分布や鋼板の温度分布を把握することを目的として、一定期間温度を測定した。実験では、図3-1に示すような断面が上辺450mm、下辺350mm、高さ200mm、厚さ2mmの台形型のアルミニウム製の容器の上に1000mm×800mm×12mmの鋼板を台形模型の上に載せた。なお、台形アルミ容器を用いたのは、軽量で沢山の腐葉土を入れることができ、発熱温度保持も考慮して使用した。温度の測定には温度センサーを用い、測定点は①~⑮で図に示すように容器の端から200mmの位置の断面内とした。断面内に多くの測定点を設けたのは、断面内の温度分布状況を知るためである。実験は温度が朝方に氷点下になる熊本県山鹿市菊鹿町で行った。写真3-1は使用したバイオ菌入りの腐葉土(左)であり、写真3-2は実験に使用した台形模型容器と鋼板である。また、使用した台形断面容器の側面や下面からの熱移動を防ぐために断熱塗料<sup>8)</sup>を塗って同様な実験を行ない、塗らない場合の温度分布も測定した。

#### 3.3 I型鋼を有する鋼床版模型

バイオ菌の入った腐葉土とバイオ菌の入っていない腐葉土をそれぞれアルミの容器に一杯に軽く詰め、図3-2や図3-3に示すように長さ3m、幅1mのI型鋼を有する製床板模型に取り付け、それぞれの温度変化および鋼板への影響を比較した。実験は熊本県山鹿市菊鹿町で行った。写真3-3はI型鋼製床板桁に台形容器を取り付けた様子を示したものである。容器は温度分布測定の際の台形断面の容器の外側に熱交換塗料を塗布したものを利用した。温度センサーは図3-2に示す位置に設置した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 鋼板模型を用いた断面内の温度分布

図4-1はここで検討した温度測定位置である。図4-2～4-4は2007年12/11-12/18で測定した結果の一部である。図4-2は断面の中央部横方向での温度変化である。1日の温度変化は、左右両側はほぼ同じ変動であり、中央部の変動が両外側に比べて小さく、両外側は気温の影響を受けていることがわかる。昼間は気温が高くて容器内部の温度は上がらず、夜間になると、両外側は中央部に比べて低くなるが、気温に比べれば温度が安定しており、発熱効果があることがわかる。

図4-3は縦断面方向の温度変化を示したものである。容器内上面は外気温と同様の温度変化を示すが、容器内下面は中央部に比較しても温度変化が小さいことがわかる。また、上面部が鋼板の温度変化の影響を受けていることや下面部はバイオ菌で発生した熱が下方に伝わっていることが判明した。なお、中央部の熱が放射状に熱移動があるのか、別の実験を実施して確認する必要があると思われる。

図4-4は、鋼板表面上と断面中央部の温度変化を示した。鋼板表面上の気温は、昼間では直射日光の影響を直接受

けているためピーク時は気温より10℃以上の差がある。しかし、それ以外では気温とほぼ同じ変化を示しており、夜間では気温より1～2℃程度高く維持できていることがわかる。内部温度がバイオ菌の発熱により7℃前後の温度を維持していることで0℃以下にならなかったと考えられる。今後、必要な発熱量と温度の関係や今回データがうまく取れなかった鋼板表面上の温度の広がり分布等について、詳細な検討が必要かと思われる。

図4-5は、断熱塗料を容器の外側に塗った場合の鋼板表面上と断面中央部の温度変化を示したものである。鋼板表面上の気温は、昼間での直射日光の影響は塗料を塗らない場合と同様な変動を示すが、夜間では気温より2～3℃程度高くなっている。また、ここには示していないが、下面の温度が中央部より高い温度を維持していることが判明し、塗料の効果が見られた。ピークの温度も抑えられていることから、塗料は容器内部を塗ることも含め、塗料効果について、今後更に検討する必要がある。

### 4.2 鋼床版模型を用いた温度分布

バイオ菌入り腐葉土とバイオ菌なしの腐葉土を用いて、バイオ菌の発熱効果が鋼製床板に与える影響およ

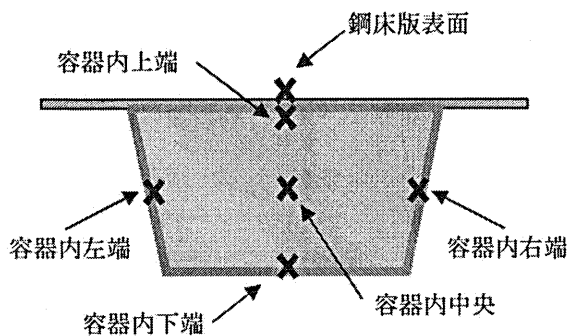


図4-1 模型断面内の温度測定点

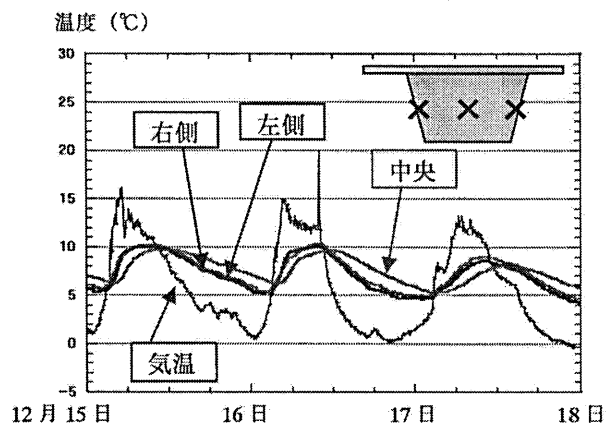


図4-2 断面内横方向の温度分布

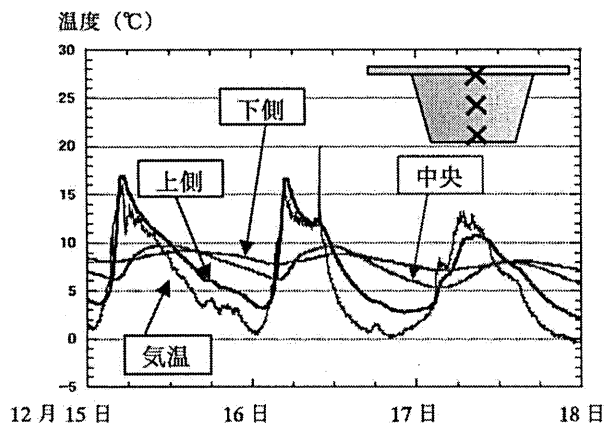


図4-3 断面内縦方向の温度分布

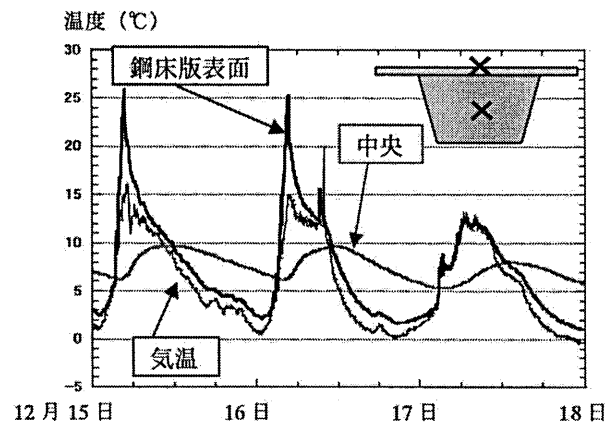


図4-4 断面内中央と鋼床版表面の温度分布

び腐葉土内の温度変化で比較した。観測期間は 2008 年 1/15~1/25 であり、図 4-6 は検討対象の温度測定位置であり、図 4-7 と図 4-8 に 1/21~25 の測定結果を示した。

図 4-7 はバイオ菌入り腐葉土内の中央部とバイオ菌なしの腐葉土内中央部の温度変化を示したものである。図からわかるように、外気温が低温(-4~12℃)で変動しているにもかかわらず、バイオ菌在りの場合は 15℃前後で安定した発熱をしているのに対し、バイオ菌なしの場合 10℃前後であった。この 2つの腐葉土の温度差はバイオ菌の発熱効果によるものではないかと考えられる。

図 4-8 は鋼板表面部の温度変化を比較して示したものである。バイオ菌入りの腐葉土の場合鋼板上(図 3-2 の⑧)の温度は、バイオ菌なしの腐葉土の鋼板上(図 3-2 の③)に比べて平均で 5℃程度高い温度を維持していることがわかる。また、外気温が氷点下に低下した場合でも、バイオ菌なしの腐葉土の方は 1~2℃であるのに対し、バイオ菌入りの腐葉土の方は 7~8℃を維持しており、バイオ菌の発熱効果が見られた。なお、図 3-2 の①と⑩の中央から 50cm 離れた位置での温度差を観測期間内の平均温度で比較してみると、バイオ菌入りの腐葉土の方⑩は 10.9℃で、バイオ菌なしの腐葉土の方①は 6.4℃と 4℃以上の差となった。こ

のようにバイオ菌入りの腐葉土の効果が見られるが、更に外気温が 0℃以下に低下した場合のデータが不十分であるので、今後、実験を実施して確認する必要があると思われる。

## 5. 熱伝導解析

### 5.1 解析概要

本研究では、温度変化のメカニズムを差分法による熱伝導解析手法を用いて調べた。2次元の定常状態における断面内の任意における温度の空間的変化の関係を調べるもので、式(1)に示すフーリエの微分方程式を解くことで解が得られる<sup>9)</sup>。熱伝導率や熱伝達係数が物質により異なるので、その空間分布を考慮できるような定式化をし、陰解法で離散化してある。離散化手法については差分法を使用した。

$$\frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} + k \frac{d^2T}{dy^2} + f(x, y) \quad (1)$$

ここに、T: 温度、t: 時間、f(x,y): 発熱量、k: 熱伝導率

本研究で行った解析は、2次元断面モデルを使用し内部に熱源を置いて時間項を考慮して熱伝導を計算し、鋼床版と容器の断面の温度を求めることにした。また、境界条件としてノイマン条件<sup>10)</sup>を採用し、外部の温度

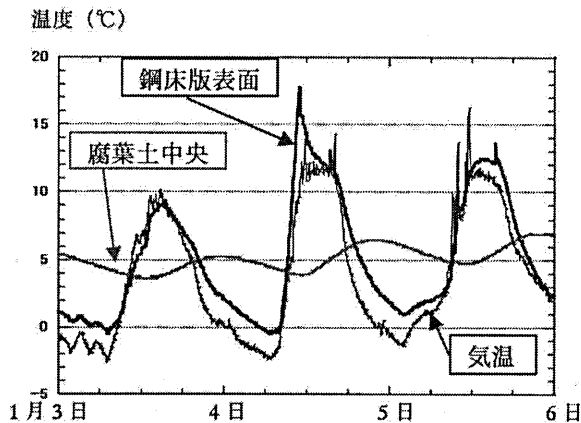


図 4-5 断面内中央と鋼床版表面の温度分布

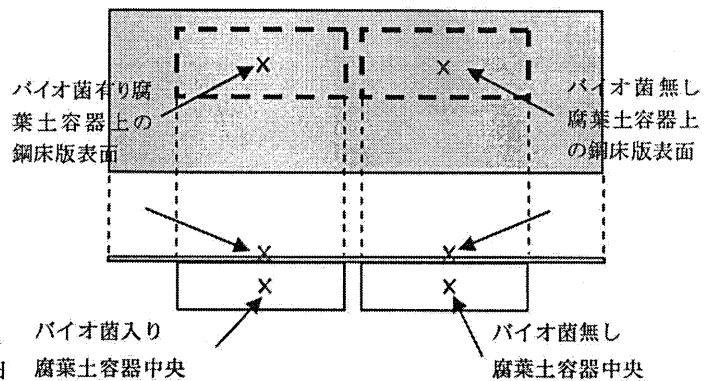


図 4-6 I型鋼を有する鋼床版模型の温度測定点

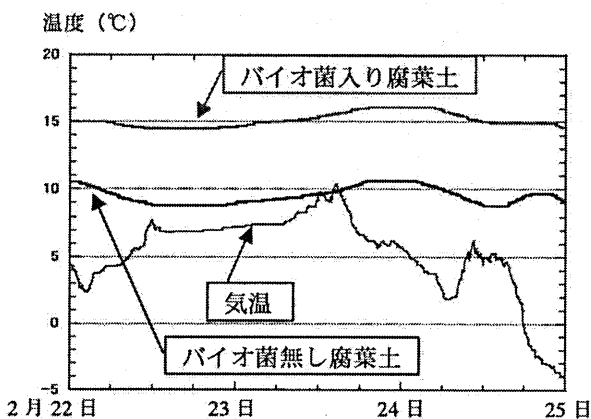


図 4-7 バイオ菌の有無による腐葉土の温度分布

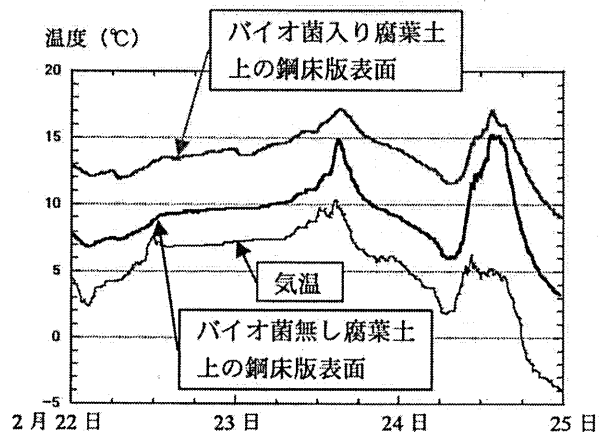


図 4-8 バイオ菌の有無による腐葉土上の鋼床版表面の温度分布

と熱伝達係数で設定して行った。

## 5.2 解析モデル

図 5-1 は、鋼床版の断面のモデル化を示したもので、実験模型（写真 5-1）で使用した鋼板模型を見立てて設定している。図中の上側の灰色の部分に鋼床版、下側の茶色の部分を熱源とした。メッシュ分割として、図 5-1 のモデルでは 2cm 四方の 20×10 マスで分割した。なお、メッシュ分割の数については、種々の分割モデルを作成して検討を行なった。解析モデルの寸法、緒元及び熱伝導率<sup>7)</sup>、熱伝達係数<sup>8)</sup>は表 5-1 に示す。なお、熱伝達係数は自然対流（無風状態）と強制対流（風が吹いている状態）で値が異なるが、今回は自然対流時の熱伝達係数を使用した。なお、発熱量は式（2）を使用して、実験で求めたバイオ菌を含む腐葉土の比熱と腐葉土の質量およびバイオ菌の活動温度差を代入した。

$$f = m \times C \times (T - T')$$
 (2)

ここに、 $f$ : 熱量 (kcal) ,  $m$ : 質量 (g)  
 $C$ : 比熱 (kcal/g・°C),  $T$ : 初期温度,  $T'$ : 変化後の温度

表 5-1 モデルの寸法および各係数

横幅 Lx	0.4m
縦幅 Ly	0.2m
分割数 x	20
分割数 y	10

熱 源	
熱伝導率	0.57kcal/h・m・°C
熱伝達係数	13.0kcal/h・m <sup>2</sup> ・°C
発熱量	226.3kcal
鋼板	
熱伝導率	15.7kcal/h・m・°C
熱伝達係数	21.0kcal/h・m <sup>2</sup> ・°C
アスファルト	
熱伝導率	0.64kcal/h・m・°C
熱伝達係数	6.88kcal/h・m <sup>2</sup> ・°C

## 5.3 解析結果と考察

図 5-2 は山鹿市で行われた鋼床版模型表面の 12 月 17 日の測定値（実験値）と解析結果の比較を示したものである。解析時には 5 分間隔で測定した 1 日分の気

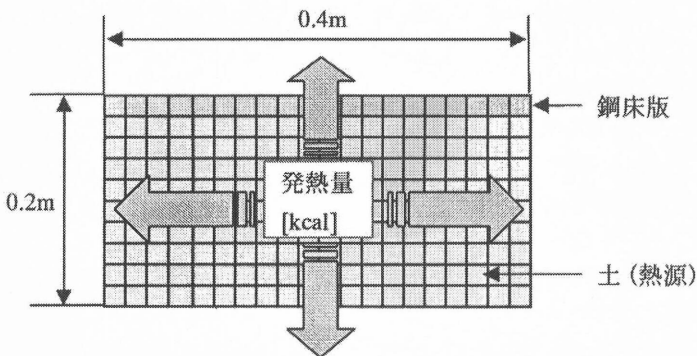


図 5-1 鋼床版断面モデル

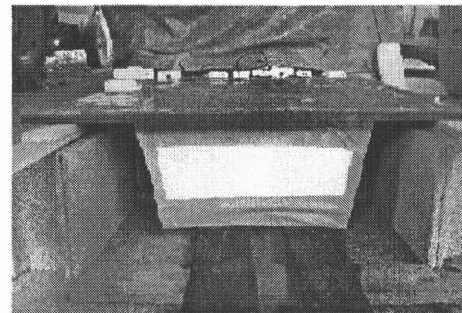


写真 5-1 鋼床版断面モデル

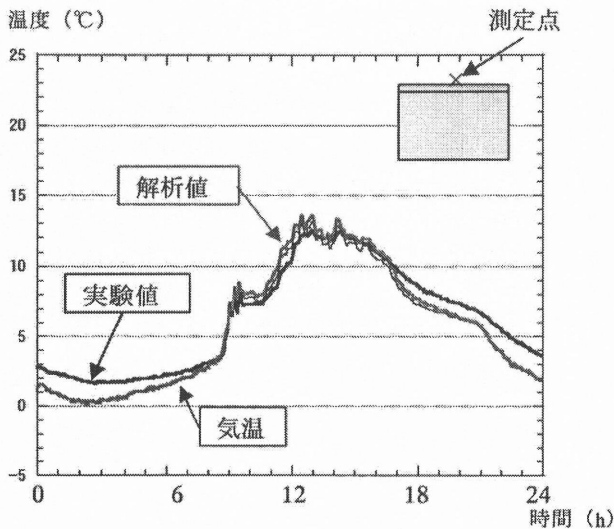


図 5-2 12月17日における鋼床版表面の温度比較

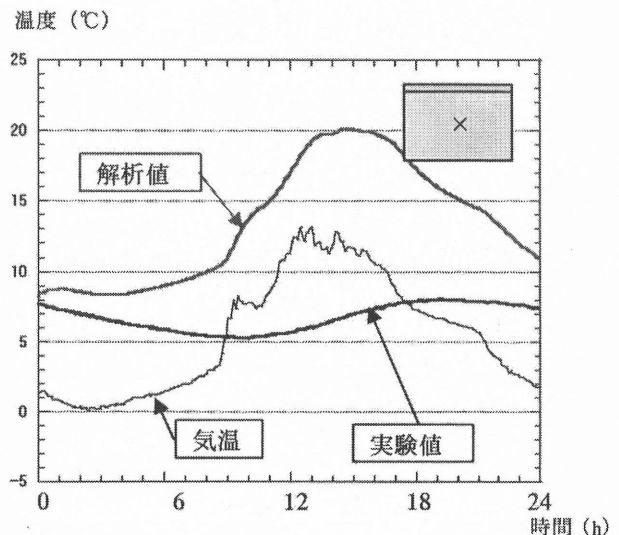


図 5-3 12月17日における腐葉土の内部温度の比較

温を入力し、日射量に関してはI型鋼桁を設置している場所の環境条件より、午後2時に最大値をとるように入力した。鋼床版の温度は昼間の日射量、モデルの境界部で気温の熱量を、モデル上面のみに日射があるとして日射熱量を与える境界条件として設定した。日射熱量は6時から18時までの12時間与え、12時に最大となるようにした。

図からわかるように、鋼床版の温度は昼間の日照量が多くなる午前10時から日が沈む午後6時前まで解析値の方が1~2℃程度高い値を示したが、気温が上昇し始める朝8時までと気温が下降し始める夕方の16時までの時間帯においては実験値の方が1~2℃程度高い値を示した。また、気温が0℃付近になる午前2時において解析値は気温とほぼ同じ挙動を示したが、実験では2℃を保っていた。解析値の方が気温に左右されているものの実験値と比較してよい対応を示していることがわかる。

図5-3は、同じ12月17日の腐葉土容器内の中心部の温度測定値と解析結果の比較を示したものである。解析結果ではほぼ気温に依存して温度が上下し、気温と比べ8℃前後高い温度を維持しているのに対し、実験値では気温の変動とはほぼ無関係に6~8℃の値を保ちながら推移していることが分かる。解析値と実験値にはかなりの差があるのは、今回の解析では部材間の熱伝達係数や内部の変動する熱量を考慮していないことが影響していると考えられ、今後解析手法の見直しが必要であると思われる。

## 6. 結論

本研究では、バイオ菌を熱源とした鋼床版断面における熱伝達メカニズムを解析と実験の比較により把握した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) バイオ菌入りの腐葉土を下部から設置した場合の方が、バイオ菌なしの腐葉土を下部から設置した場合より最低温度が6~8℃程度高く、平均温度も5~6℃程度高く維持することが確認できた。
- 2) 外気温が氷点下になった時、バイオ菌無し鋼板が-0.8℃と0℃以下となったが、バイオ菌有り鋼板の方は7.7℃と温度を保持できた。
- 3) 容器断面の温度分布は、断面の下側の方が上側に比べて温度変化が小さく平均温度が高くなり、安定している。また、断面の両サイドの温度変化がほぼ等しくなった。
- 4) 断熱塗料を用いることにより、鋼板の表面温度をさらに1℃前後高く保持することが確認された。
- 5) 解析により求めた鋼床版の温度分布は実験値とよい対応を示したが、夜間は解析値の方が低くなるため、危険側での評価となった。

なお、今回の研究では、与える内部熱量として既往の研究データより温度差を導いたが、日によって変動する値が異なり、特定するためには多くの実験値が必要であり、精度よく解析できる手法を確立する必要がある。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、平成19年度科学研究費補助金(萌芽研究、代表:山尾敏孝)の支援を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 宮本重信, 室田正雄: 鋼床版橋の路面凍結と蓄熱剤封入による抑制, 第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.247-252, 1998.
- 2) 宮本重信: 太陽熱の潜熱蓄熱による路面凍結の抑制, 2001年機械学会年次大会ワークショップ, W13, 2001.
- 3) 古賀 淳, 山尾敏孝, 友田祐一, 元田 馨: 実鋼桁橋の凍結防止におけるバイオ菌の発熱効果の検討, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.579-584, 2007.
- 4) Atsushi KOGA, Toshitaka YAMAO, Fumihiko YAMADA and Kaoru MOTODA: A preventable method of the freeze condensation on the deck surface of steel-deck-plate bridges, 10th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs and Maintenance of Structures, Hong Kong, pp.251-258, 2006.
- 5) 伊藤徳子: 断熱塗料を利用した鋼製床版桁の温度変形制御の検討, 平成16年度熊本大学卒業論文, 2005.
- 6) 日本環境整備(株): 土壌改良~元気水の役割~, Motoda-Bio-Cycle, 2005.
- 7) 北山直方: 伝熱工学の学び方, オーム社, p.21, 1982.
- 8) アルバー工業(株): 熱交換塗料~熱交換方式~, infrared rays, 2007.
- 9) 一色尚次, 北山直方: 伝熱工学, 森北出版, p.37, 1984.
- 10) 日本機械学会編: 流れの数値シミュレーション, コンピュータアナリシスシリーズ4, コロナ社, 1989.