

鋼床版表面部の結露凍結防止策の一検討

Study on one preventable method of freezing of condensation on the surface of steel plate deck bridges

古賀 淳*, 山尾 敏孝**, 山田 文彦***, 元田 馨****

Atsushi KOGA, Toshitaka YAMAO, Fumihiko YAMADA, Kaoru MOTODA

*熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程 (〒 860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

**熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒 860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

***熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒 860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

****日本環境整備(株) (〒 861-0424 熊本県山鹿市菊鹿町松尾 1271)

It is a dangerous problem for drivers that freezing of condensation take place on the surface of steel plate deck bridges in early morning winter. In this paper, the effect of biotechnology bacteria heating on the surface of steel plate deck bridges is investigated experimentally and analytically. As experimental models were used a steel plate welded a box section rib filled with soil including some bacteria. These models were exposed in outside below zero in winter and the temperature on the surface of the plate deck models were measured. Numerical analyses were carried out using the finite difference method. The effects of a volume of soil including bacteria and a kind of bacteria in the soil on the heating temperature of the surface of steel plate were examined. The validity of this heating method using some bacteria is shown by experimental results.

Key Words: biotechnology bacteria heating, freeze of condensation, steel plate deck, finite difference method

キーワード: バイオ菌の発熱, 結露凍結, 鋼床版, 差分法

1. 序 論

冬季における鋼床版橋の路面はコンクリート床版橋に比べて結露が発生しやすいのみならず、これらの結露が凍結する事態が起りやすい。凍結が起りやすいと言われている(写真1)^{1),2)}。大きな原因としては、鋼床版橋はRC床版橋と比較しても、熱容量が小さいことが挙げられる。結露凍結の対策として路面凍結防止剤を散布する方法が用いられているが、成分の塩化カリウムのため鋼材腐食の促進や周辺環境への影響が問題となる。また、既往の研究により太陽熱や凝固融解熱を利用した潜熱蓄熱剤を利用する研究が進んでおり効果も確認されているが、構造上アスファルトを取り除く必要があるため、効果が切れたときの蓄熱剤の交換に多大な手間やコストがかかり、維持管理に問題があると言える(図1)^{1),2)}。鋼床版上下面の断熱塗料の塗布は、外気からの

熱を遮断してしまうため、逆に凍結を促進してしまうことも分かっている³⁾。

本研究では、内部に封入する蓄熱剤の代わりにバイオ菌の発熱効果により、鋼床版の凍結を防止することを目的とする。使用するバイオ菌は、一般には生ごみの分解や肥料や飼料に利用されている。実橋梁には箱型リブにバイオ菌を入れた箱を挿入するか、あるいは着脱可能になるよう取り付け。このバイオ菌は環境負荷が小さく、空気攪拌による発酵で発熱するもので、橋梁との組み合わせは前例がなく、実橋梁に適応するための基礎的な研究として行うものである。既存の橋への対応としても、下から取り付けるだけというシンプルな構造であり実用的なものである。そこで、箱型リブ付きの鋼床版桁を製作し、内部にバイオ菌を挿入して冬季の温度変化



写真1 鋼床版橋とRC床版橋の結露凍結の違い

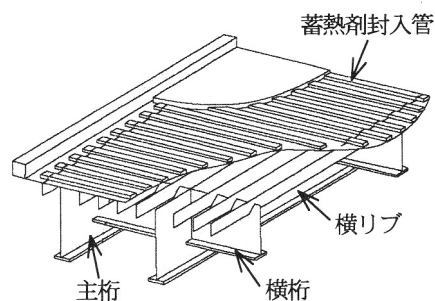


図1 鋼床版橋の構造

が著しい条件の下におく暴露試験を試みた。実験では使用するバイオ菌を含む土の量や低温時に発熱を十分するかどうかの比較検討を行った。なお、バイオ菌を含む容器の死荷重増や、容器の腐食問題等についてはまだ十分検討しておらず、今回はバイオ菌の発熱効果に視点を置き、実橋梁への適応可能性について検討したものである。

また、並行して FDM (差分法) による温度分布解析を行い、熱源による熱移動のメカニズムを調べた。

2. バイオ菌について

バイオ菌には主に分解菌(KM-1)と消臭菌(KM-2)があるが、今回使用したバイオ菌は、分解菌(KM-1)に属する好気性微生物である放線菌 (KM-8) を用いた。この放線菌をベースに、数種類の菌を混合して腐葉土に混ぜたもので、 $-20\sim 110^{\circ}\text{C}$ で息が可能であり、特に低温域での活動ができることが特徴である。菌の種類は図2に示す8通りで、この中から使用する菌について検討した⁴⁾。図2のグラフは判例が示すように、それぞれ菱形が活動可能最低温度、正方形が活動活性温度、三角形が活動可能限界温度を示す。その結果、活動活性温度域が広く、かなり低温でも活動可能な放線菌(KM-8)が適当であると判断できたことが、放線菌を選定した大きな理由である。寿命は約1年であり、発熱効果の影響を必要としない夏季に交換することを想定している。

3. 鋼床版模型実験の概要

3.1 鋼板付き箱型模型による実験

基礎的な実験として図3に示すような鋼板 400mm×500mm×12mm に断面 100mm×100mm、厚さ6mmの正方断面の箱型を取り付けた模型を製作した(写真2)。本実験では、鋼板付き箱型模型及び台形模型の表面温度を結露が凍結する 0°C 以上に保つことを目標とするものである。模型の形状は、鋼管をリブに、鋼版を鋼床版にそれぞれ見立て、寸

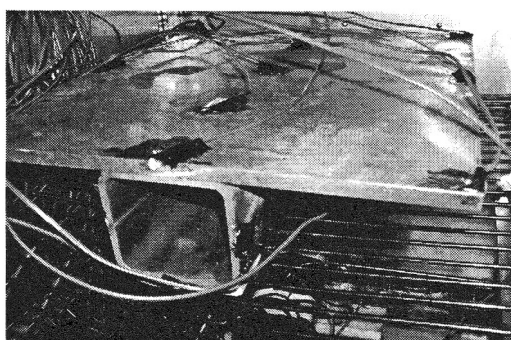
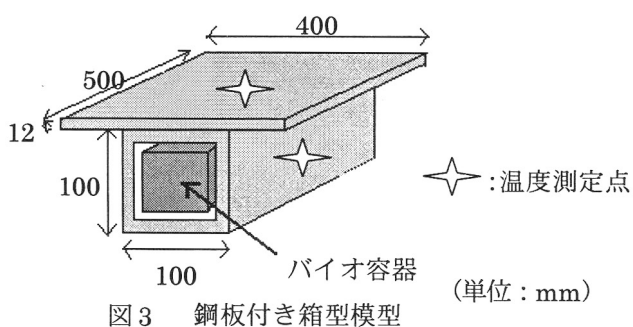


写真2 鋼板付き箱型模型

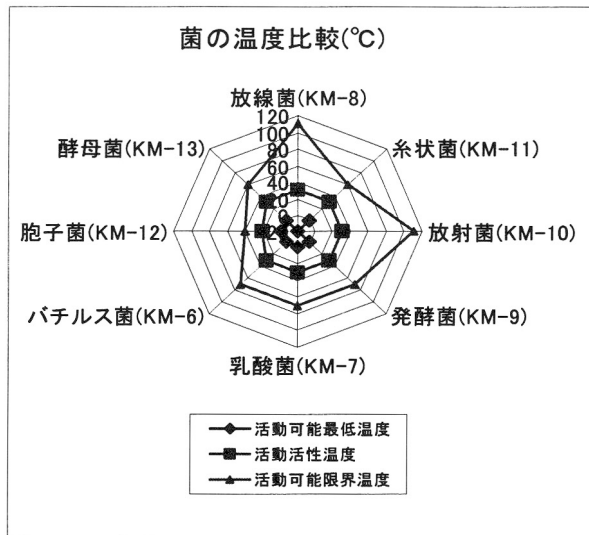


図2 バイオ菌の種類と活動温度⁴⁾

法については冷蔵庫内に入れることができる最大サイズにより決定した。測定は、(1)熊本大学実験室内で、冷蔵庫によって室温を調整しながら測定したもの(写真3)、(2)熊本市内よりも温度差が激しい熊本県山鹿市菊鹿町の野外で暴露した状態で行った。

室内実験では、 10°C に調節した冷蔵庫に箱型模型を入れてしばらく経ってから温度を -5°C まで下げて2時間放置し、再び室温を 10°C に戻して2時間放置した。バイオ菌は写真4に示すようなプラスチック容器に詰めて、その容器を箱型模型に挿入するカートリッジ式を採用した。また、温度測定位置については、模型の温度変化のメカニズムを把握でき、且つ、バイオ菌の有無による測定値を正しく反映するのに適切であると思われる箇所を選定した。同時に(1)では室温を、(2)では外気温も測定した(写真5)。なお、(1)の室内実験においては熱電対を、(2)の野外実験においてはデータロガーをそれぞれ用いて測定した。

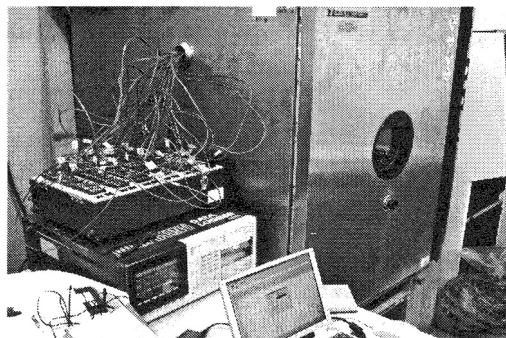


写真3 冷蔵庫(画面奥)と測定装置(画面手前)

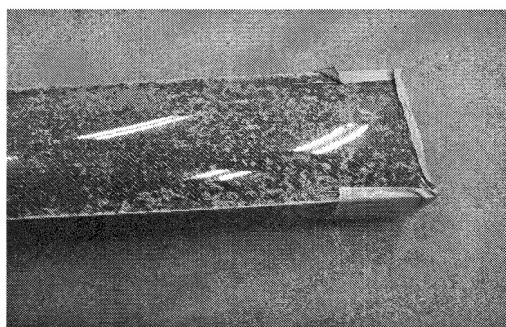


写真4 プラスチック容器

3.2 鋼板付き台形模型を用いた野外実験

次に、実験 3.1 で使用した鋼板付き箱型リブに対して、バイオ菌を含む土の量を多くするため、鋼板部分の寸法を 2 倍、リブ断面を 1.5 倍にした図 4 に示すような台形模型を製作した。実験 3.1(2) と同じ条件で温度を測定する実験を試みており、写真 6 は実施状況である。これは 3.1 の結果よりバイオ菌の量が伝熱効果に及ぼす影響を調べるために行ったものである。

3.3 鋼床版 2 主桁模型を用いた野外実験

最後に写真 7 に示すような鋼床版 2 主桁模型を用いて、熊本県山鹿市菊鹿町にて野外実験を行った。図 5 は模型の鋼板とバイオ容器部分の断面を示している。使用したバイオ容器は、3.2 で用いた台形模型のほかに、試験的に $\phi=120$ mm のビニルパイプを使用した。写真 8 はバイオ菌入りの土を詰めた台形模型であるが、この模型にビニルパイプを図 5 及び写真 7 に示すような取り付けレールに差し込んで固定した。

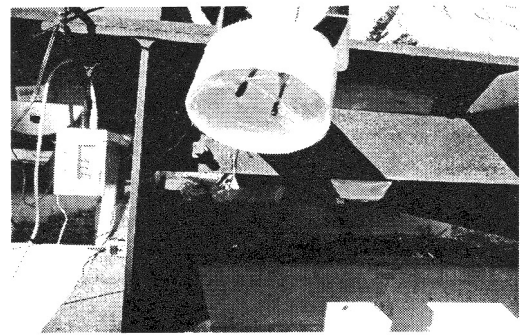


写真 5 データロガー (外気温測定)

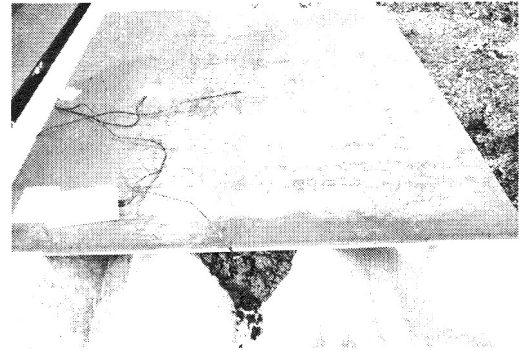


写真 6 鋼板付き台形模型

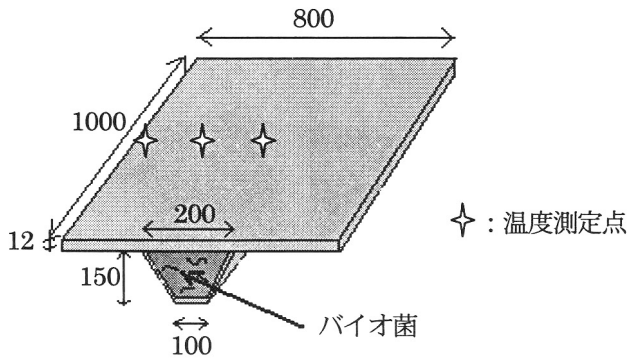


図 4 鋼板付き台形模型 (単位: mm)

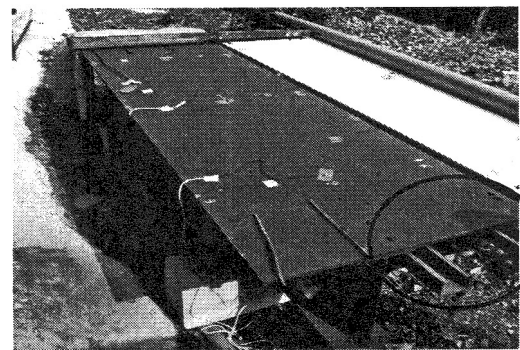


写真 7 鋼床版 2 主桁模型

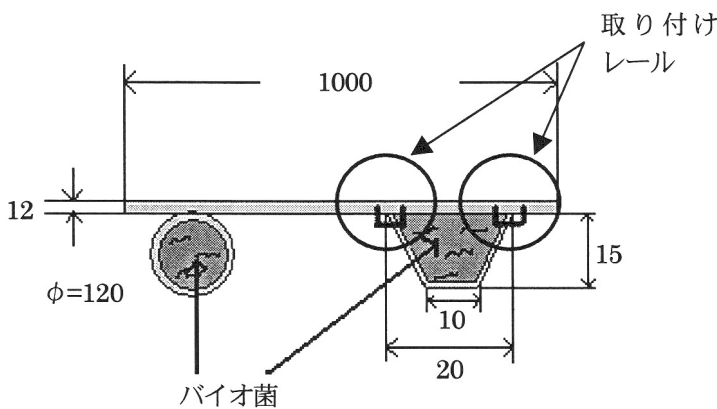


図 5 鋼床版 2 主桁模型 (単位: mm)

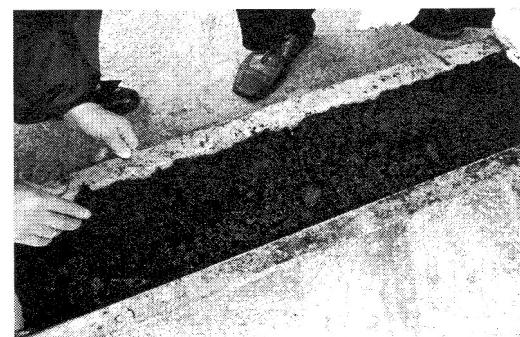


写真 8 バイオ菌を入れた台形容器

4. 実験結果と考察

4.1 鋼板付き箱型模型の実験結果と考察

(1) 室内実験

図6は3.1(1)で説明した、熊本大学実験室内での温度測定の結果である。模型内にバイオ菌を入れている方が入れてない方に比べてわずかに温度が高いが、氷点下に達しており熱が十分に伝わっていなかったようである。また、バイオ菌自体も時間とともに徐々に温度が低下しており、菌の活動が不十分であった。これは、好気性菌なので触れる空気が少なかったことや、バイオ菌が発酵して放熱するための絶対量が不足したのが要因と考えられる。

(2) 野外実験

図7は、熊本市内よりも気温の変動が激しい菊鹿町において、箱型模型を日なたに置いて測定したときの結果である。日中バイオ菌の温度はほぼ外気温と同じ変動を示している。なお、図7～9には2月3日(2/3)の午前0時から2月8日(2/8)の0:00までの測定結果を示している。2/4および2/5の夜から朝方にかけてバイオ菌の温度も氷点下域に達しているものの-2℃以上を保っている。しかし、鋼板上面は外気温と同じくかなり低温になり、保温効果は得られなかった。上記に述べた時間帯以外にもバイオ菌の温度と外気温が変わらず発酵活動は十分行われていなかったと見られる。

4.2 鋼板付き台形模型の実験結果と考察

気象条件以外の比較として、模型サイズを大きくし、使用するバイオ菌の量を増やして効果を測る実験を試みた。図8は台形模型を使用した実験の結果である。夜はバイオ菌の活動はあまり見られないが、朝方から活動を始め、30℃を超える日もあった。また、2/4の夜から2/5の朝方の変化をみると、日なたに置いた箱型模型と比較して1～2℃高く、発酵時の温度保持力も大きいことが分かった。これにより、バイオ菌の量が保温効果に関係していることが分かった。

4.3 鋼床版2主桁模型の実験結果と考察

図9は鋼床版2主桁に取り付けた台形模型を使った実験結果である。図より、バイオ菌の方は発酵時には外気温よりも10℃以上高い温度を保持していることが分かった。また、鋼板についても1日だけ低温化したが、2/5以降は常に外気温よりも高い温度の維持が確認された。

以上の結果より、バイオ菌の発熱効果を生み出すのに有効な条件として、①十分な空気に触れさせる、②空気は対流が起きている方がよい、③発酵活動を行うのにある程度のバイオ菌を含む土の量を必要とするということが分かった。

実橋梁への対応としては、空気がバイオ菌を含む容器内部に一様に行き渡るように、エアーを送り込む装置が必要と思われる、現在検討中である。また、③のバイオ菌を含む土の必要量については、死荷重増とも関係するが、鋼床版の自重に比べると小さいと考えている。更に実橋梁に設置する場合についての取り付け容器や方法及び発熱時間の維持も含めて、今後の検討課題である。

5. 二次元FDM 解析手法による検討

5.1 解析手法

次に、FDM 解析による温度解析手法を用いて、温度変化のメカニズムを調べた。式(1)はフーリエの熱伝導微分方程式で、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時間的・空間的変化の関係を調べるものである。具体的には伝熱係数が鉄板、空気、熱源によって変わるので、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。また、行列解法はSOR法を用い反復的に収束計算で求めていく。伝熱係数表1に示す係数を用いた⁵⁾。

(基礎式)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

ここに、
 T : 温度(°C)
 t : 時間(s)
 λ : 伝熱係数(W/m・K)
 Q : 発熱量(J)

(離散化)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^{n+1} &= \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} \\ \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\}^{n+1} &= \frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{\lambda_{i+1j} + \lambda_{ij}}{2} \right) \cdot \frac{T_{i+1j}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{\Delta x} - \left(\frac{\lambda_{ij} + \lambda_{i-1j}}{2} \right) \cdot \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i-1j}^{n+1}}{\Delta x} \right] \\ &= \frac{1}{2\Delta x^2} \left[(\lambda_{i+1j} + \lambda_{ij}) \cdot T_{i+1j}^{n+1} - (\lambda_{i+1j} + 2\lambda_{ij} + \lambda_{i-1j}) T_{ij}^{n+1} + (\lambda_{ij} + \lambda_{i-1j}) \cdot T_{i-1j}^{n+1} \right] \\ &= \alpha_1 \cdot T_{i+1j}^{n+1} - \alpha_2 \cdot T_{ij}^{n+1} + \alpha_3 \cdot T_{i-1j}^{n+1} \end{aligned} \quad (2)$$

これらの結果を(1)式に代入して T_{ij}^{n+1} についてまとめると

$$\begin{aligned} T_{ij}^{n+1} &= \frac{1}{(1 + \alpha_2 \Delta t + \beta_2 \Delta t)} \left[T_{ij}^n + \Delta t (\alpha_1 \cdot T_{i+1j}^{n+1} + \alpha_3 \cdot T_{i-1j}^{n+1} + \beta_1 \cdot T_{ij+1}^{n+1} + \beta_3 \cdot T_{ij-1}^{n+1} + Q_{ij}^{n+1}) \right] \\ &\equiv B \end{aligned} \quad (3)$$

右辺も(n+1)時刻の未知量で構成され、行列の解法が必要となるので、反復法(SOR法)によって T_{ij}^{n+1} を収束計算で求める。

$$\begin{aligned} T_{ij}^{n+1} &= (1 - ALP)B + ALP \cdot T_{ij}^{n+1} \\ ALP &: \text{緩和係数 (通常 0.85)} \end{aligned} \quad (4)$$

収束判定

$$\left| \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{T_{ij}^{n+1} + T_{ij}^n} \right| < \varepsilon \approx 1 \times 10^{-4} \text{ 程度} \quad (5)$$

5.2 解析モデル

図10は鋼管の断面のモデル化を示したもので、外側の青い部分を鋼管、黄色い部分を空間、内側の赤色の部分を熱源とする。実際の計算ではλを物質の密度ρと比熱Cで割った温度伝達率a(m²/s)及び初期熱量Q(J)を代入する。大きさについては、前に述べた実験結果より一番実用的であると判断した台形模型のサイズに合わせ、形が単純な正方形にモデル化した。また、メッシュサイズは実験で使用した鋼板の厚さが12mmであることから、1メッシュ12×12mm、12×12マスで設定してある⁶⁾。

表1 伝熱係数

	λ (W/m・K)
鋼管	49
空間	0.0237
熱源	0.52

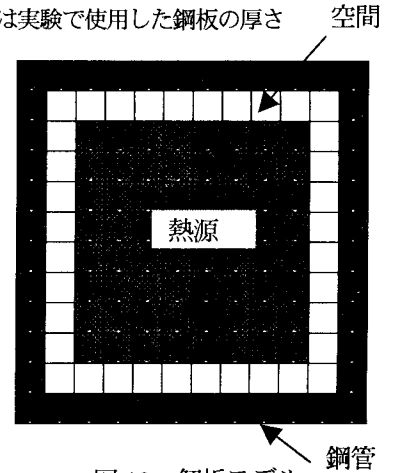


図10 解析モデル

5.3 結果と考察

図12はスタートしてから10秒間における断熱源の変化状況を示したものである。熱源の初期温度はバイオ菌が活動しているときの最低温度である10°Cを代入してある。解析時間についてはメッシュサイズが細かいほど時間ステップを細かくとらないと精度が極端に落ちるため、0.0000001秒間隔で計算し0.1秒おきに出力させている。この方法では1秒の温度変化を出力するのに1.5時間以上かかってしまうため、ここでは10秒間までの計算結果を示すことにした。

熱源は緩やかに上昇しているが、空間部分は秒後辺りから急速に上昇している。記載してないが、比較としてメッシュサイズを6mm四方にして計算したところ、さらに温度上昇が激しく計算時間もかかった。今回は一つのモデルで短時間での熱移動の様子を確認するまでに留まったが、バイオ菌の安定した発熱温度が分かれば、モデルを改良していき(図11)、将来は本解析による温度予測シミュレーションが可能となると考えられる。

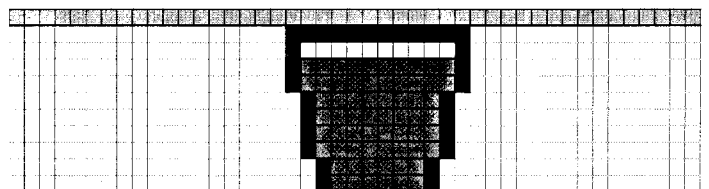
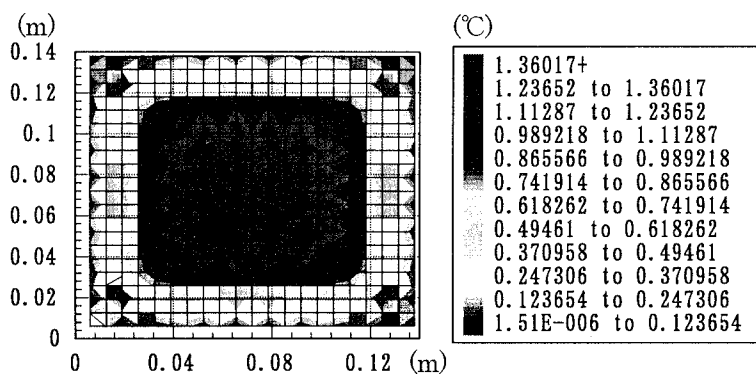
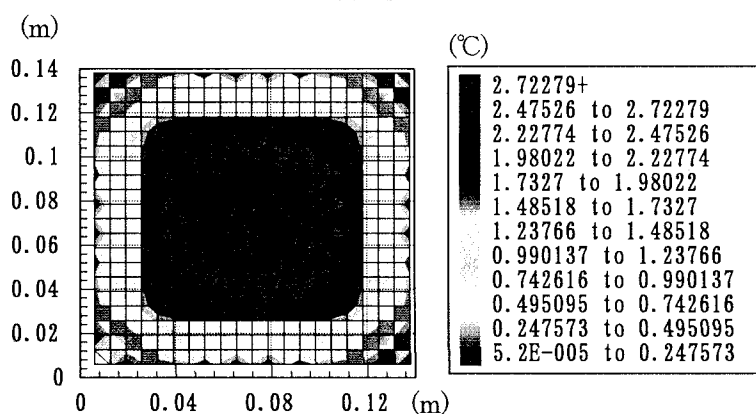


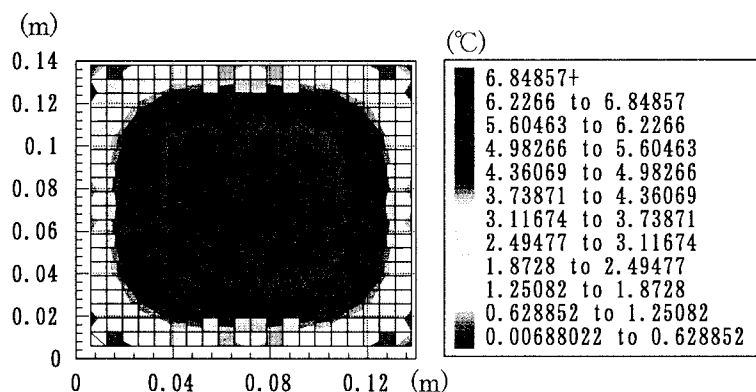
図11 解析モデル(台形)



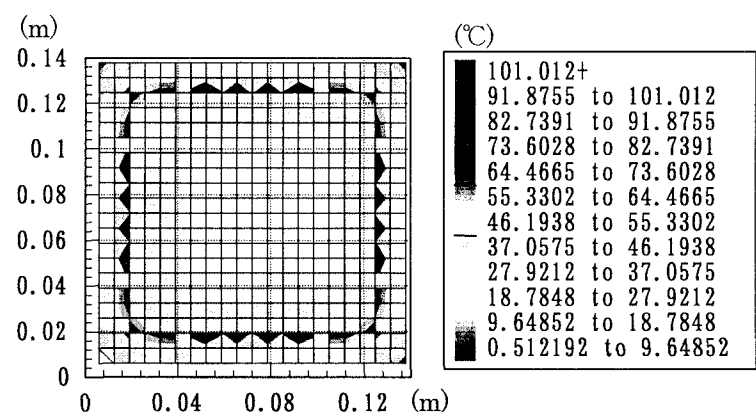
(a)1 秒後



(b)2 秒後



(c)5 秒後



(d)10 秒後

図 12 断面内の温度変化状況

7. 結論

本研究では、模型実験および FDM 解析により以下のことが得られた。

- 1) バイオ菌の種類は放線菌が適切であることが分かった。
- 2) バイオ菌の発酵活動を活性化するには、空気の循環が適度に行われている日中のもとで十分に空気を触れさせてやること、乾燥しないように適度な湿気も大事である。
- 3) 鋼板への伝熱効果を上げる方法としては、同じ体積でも鋼板に接触する表面積を大きくすることである。
- 4) 解析については一つのモデルでしか確認していないが、メッシュサイズが小さいほど熱移動が早く、温度上昇が伝熱係数に依存することが分かった。

熱容量の小さい鋼板は放射冷却により外気温より下がることがあるので、熱容量を上げるかあるいは加熱による保温が凍結防止の有効策である。この際断熱材や断熱塗料による鋼床版下面の直接断熱は、外気からの放熱を遮断するため凍結を促進する報告も過去に挙げられている。今回のバイオ菌の発熱効果を利用した実験により、バイオ菌がうまく発酵した状態ではある程度保温の成果が出ているため、いかに菌を発酵・発熱させるかが重要であることが分かった。

今後は発酵に必要な具体的な量を実験により求めていくことが課題となる。また、解析についてはモデル断面に対応した解析をする必要がある。

【謝辞】

模型実験では本学工学部の友田祐一技術員に多大なご指導ならびにご協力を受けました。ここに記して感謝致します。

【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) 福井県雪対策・建設技術研究所 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) 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 年度卒業論文,2005
- 4) 日本環境整備(株)：土壌改良～元気水の役割～、Motoda-Bio-Cycle
- 5) 北山直方：伝熱工学の学び方、オーム社、pp13～51, 1982
- 6) S.V.パタンカー：熱伝導とダクト流れの熱伝達の数値計算、森北出版、pp97～135, 1996