

# 運搬中のアスファルト混合物の温度特性の考察

田村 彰啓

日工株式会社 開発部3課

**要旨:**アスファルト混合物(以下、合材)の生産量の減少に伴い、生産性を改善するために全国に点在しているアスファルトプラント(以下、AP)の統廃合が進むことが予想される。そのため、一定品質の合材を所定時間内に輸送することが困難となるエリアが拡大して行くおそれがある。合材の品質は温度に大きく依存することから、温度管理技術が配送圏拡大に向けての重要な要素技術となり得る。そこで、合材を保温することができるコンテナで輸送や貯蔵ができるシステムを開発することで、出荷量の平準化、輸送手段の多様化の実現につながるものと考えられる。

本報告では、同システムを検討するための基礎データを得るために、ダンプトラック(以下、ダンプ)で輸送した場合の合材の温度特性を評価している。

## 1. はじめに

国際社会は、2050年の温室効果ガス排出量実質ゼロに向けて走り出した。同様にして、道路業界においても温室効果ガス排出量実質ゼロに向けた取り組みに注力しており、APの運営方法の見直しや合材生産性の改善なども求められる。とりわけ、合材工場を起点として、施工性を低下させない品質の合材をダンプ輸送するには時間的な制限があるため、APはこのことを補う形で全国に分散するようにして建設されてきた。ところが、**図-1**に示す2000年から2020年までのアスファルト合材統計年報によると、公共投資の抑制の影響を受けて合材製造数量が年々減少しているのが分かる。2000年から7,000万tあった合材製造数量が、2020年には4,100万tへと4割以上減少しており、その製造数量に比例するようにしてAPの数も1,500基から1,100基へと減少を辿っている。さらに、道路業界では、工場の働き手の高齢化と若年層の減少やドライバー不足などにより合材工場の運営に問題を来し、取り巻く環境は日々厳しくなっている。今後、こういった問題に直面することで、経営の合理化のためAPの統廃合が進んでいくものと予測される。このことにより、合材を供給できない遠隔エリアが拡大して行くことが懸念され、合材の輸送距離を延ばすための技術開発が鋭意進められている<sup>(1)</sup>。

一般的に合材を長時間輸送するための技術として、合材温度が低下しても一定の品質を担保する技術と、合材温度を下がり難くする技術とに大別することができる。前者は、合材の流動性を司るバインダーであるアスファルトの温度特性を改善して中温化合材とする技術であり、アスファルトに少量

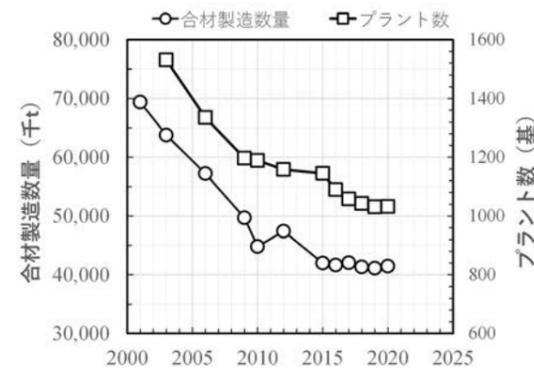


図-1 合材製造数量とプラント数の推移  
(出典:アスファルト合材統計年報より編集)

の水を添加して発泡させ流動性を増大させるフォームドアスファルトや特殊薬剤をアスファルトに添加して流動性を改善させる技術などが実用化されつつある。後者は、ダンプで用いられる保温シートなどが代表的であるが、さらに、ダンプに加熱ヒーターを組み込む技術や、別仕立ての加熱保温容器などを用いて輸送中の合材温度の低下を防ぐ技術などが考えられる。我々APメーカーは、合材の品質が温度に大きく依存することに着目し、合材の温度管理技術が配送圏拡大に向けての重要な要素技術となり得ると位置づけ、合材を保温・貯蔵できるコンテナを開発することが解決の手段の一つであると考えている。

上記のように、合材の長時間輸送に向けた取り組みを検討するうえで、合材輸送に係る既往の文献を調査したところ、1980年台から現在に至るまでに多くの研究報告が挙げられている<sup>(2-10)</sup>。そのなかでも、輸送中の合材温度低下に係

る報告は、合材表面の温度低下に着眼点において温度計測が行われ、舗装現場での締固め温度と締固め度との関係から、合材温度の低下による締固め不足を指摘している<sup>(11)</sup>。将来、舗装現場へ長距離輸送により合材が供給される場合には、合材温度の管理技術がますます重要になってくることが予想される。そこで、輸送時間が長くなることで、合材の表面温度の低下は避けられないが、実際の施工現場においては、アスファルトフィニッシャーのスクリュードにより合材が攪拌され均熱化がはかられている。このことに着目し、合材の表面温度ではなく、より実際の合材の平均温度を指標とする輸送中の合材温度の管理手法を確立させることを目論んでいる。

本稿では、実際に均熱化された合材温度を推定する手法を確立させるために、ダンプ輸送中の合材にフォーカスし、積載した合材の各断面における温度分布とその挙動を明らかにして、合材を保温・貯蔵することが可能なコンテナを開発する上で必要となる基礎データを得たので報告する。

## 2. テスト概要

テストは、合材の温度低下が著しい冬期に、ダンプに8トンの合材を積載して走行する場合(以下、「走行」)と交通環境やフィニッシャーへの積み替え時の待機などを想定した走行しない場合(以下、「未走行」)の2通りで実施した。**表-1**にテスト条件を示す。前者の「走行」では、温度低下の挙動変化を大きく捉えるために、最も厳しい条件であると考えられる**図-2**に示す自動車専用道を含む直線距離で20 kmの一般国道を2周する走行ルートを設定すると共に、合材に保温シートを掛けず走行した。その際に走行速度、距離と時間を記録した。温度測定は、シース熱電対(K型)を用いて、合材(再生密粒13)内部、荷台の鋼板表面の温度と外気温をリアルタイムに測定しデータロガーで記録した。**写真-1**にテスト風景を示す。

表-1 テスト条件

	「未走行」	「走行」
実施日	21/1/20	21/1/22
天候	晴	曇・時々雨
場所	兵庫県内	
合材	再生密粒アスファルト混合物(13)	
合材量	8 t	
出荷時間	10:40	10:15
測定時間	11:20~15:48	11:05~15:20
平均気温(°C)	6.9	10.3
出荷温度(°C)	175	177
走行平均速度(km/h)	0	45.6
ダンプトラック	10t(保温シート無)	



図-2 走行ルート



写真-1 テスト風景

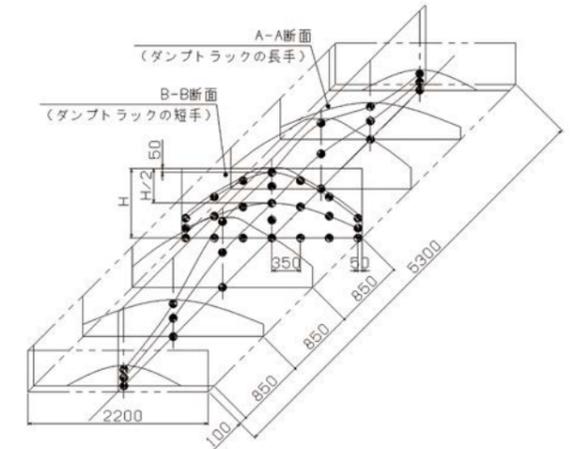


図-3 代表的な合材温度測定点

ダンプ荷台底の鋼板表面の温度測定は、ダンプアップによる合材排出時の熱電対の破損を考慮して、**写真-2**のように熱伝導が良い鋼板製カバーを取り付けた。ダンプに積載した合材の内部温度の測定は、**図-3**で示すように同ダンプ荷台上の合材を長手方向のA-A断面1ヶ所と、短手方向のB-B断面を850mmピッチで7ヶ所に分けて、各断面形状を記録し、**図**の黒丸が示す所定の位置に**写真-3**に示す熱電対を挿入した。具体的には、合材と外気空気層の境界から合材内部へ50mmの位置、ダンプ荷台側面アオリとの境界から同じく合材内部へ50mmの位置、ダンプ荷台前後のアオリ境界からは100mmの位置に各々の熱電対をセットし測定を行った。加えて、車体へ伝わる振動や走行風の影響により熱電対がズレないように治具を取り付けて固定した。また、温度測定準備に1 h程度を要するため、「走行」と「未走行」の温度測定を開始するまでの外乱要因を排除するために、合材の積載が完了してから1 h後に測定を開始(積載時間の起点(0 min)と)した。



写真-2 荷台底のカバー



写真-3 熱電対

3. 温度特性評価

ワーカビリティやコンシステンシーなどの舗装施工時に要求される合材の品質が温度に大きく依存することはすでに述べているが、その合材の温度特性に関しては、**図-3**に示すA-A断面およびB-B断面の温度分布を測定し、それから導かれる合材の平均温度により評価している。

3.1 温度分布の評価方法

ダンプに積載した合材内部の温度分布に関する具体的な評価手順を、「走行」の実施例を用いて説明する。まず、任意の時間での**図-4**に示す合材のA-A断面と**図-5**に示す合材のB-B断面における各測定点の「温度」と基準となる境界層からの「距離」との関係を表す近似曲線(関数)を導き出している。そして、この近似曲線は、**図-4**と**図-5**示す通り、合材の各断面において、「①表層部の近似曲線」、「②内部の近似曲線」、「③荷台底の近似曲線」、「④中央部の深さ方向の近似曲線」の4種類を各々求めている。さらに、これら4種類の近似曲線をベースにして、**図-6**に示す算出フ

ローに基づいて、不足する温度の測定データを補間して合材の平均温度を求めている。なお、**図-4**、**図-5**に示す外気と合材との境界層となる黒色に着色されている部分は、今回の温度評価から除外している。この理由として、「走行」と「未走行」の両者ともに、ダンプに積載した合材表面には空気による境膜が形成され、これが一種の断熱材として合材表面温度に影響を及ぼすので、合材の表面温度を外気温度とみなすことが極めて難しく、**図**に示す黒色に着色されている部分を除外する以外、適当な評価方法を見出すことができなかったためである。つぎに、合材とダンプ荷台のアオリとの接触部は、合材のダンプへの積載状況(荷姿)により、温度が大きく変化することが予想された。このことから、アオリとの接触による温度変化の影響が少ないと考えられる境界部から50mmより内側の合材内部を測定している。以上のことより、温度分布を求めたあとに算出する合材平均温度は、温度低下が顕著となる黒色の部分が含まれないため、実際の平均温度は更にさがることが予想される。

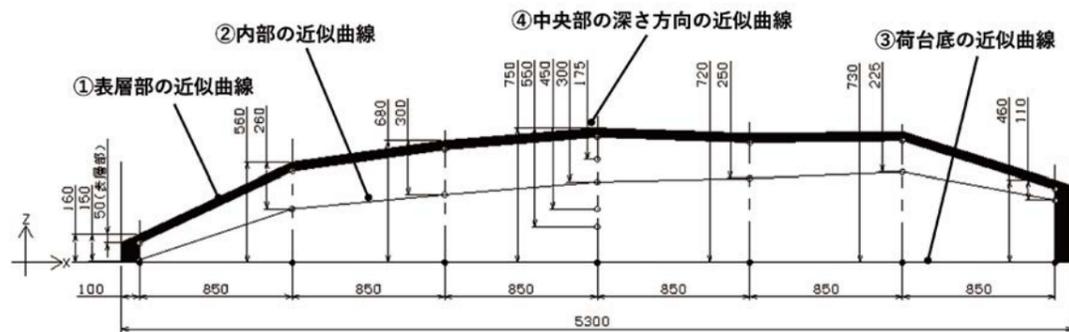


図-4 「走行」A-A断面

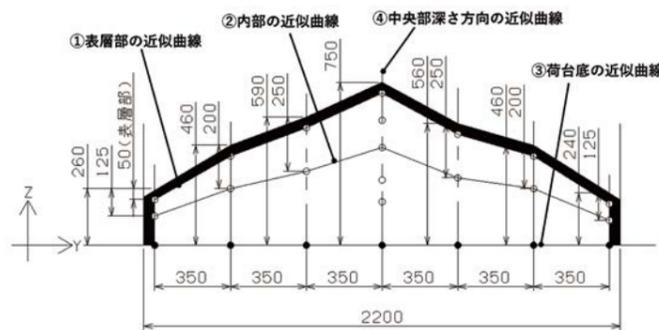


図-5 「走行」B-B断面



A-A断面	T=F(X)	T=F(X)	T=F(X)	T=F(Z)	T=F(Z)
B-B断面	T=F(Y)	T=F(Y)	T=F(Y)	T=F(Z)	T=F(Z)

図-6 算出フロー

3.2 シミュレーションの基本式

ダンプに積載した合材内部の温度分布をシミュレーションするにあたり、実際に計測した温度データが少ないほど、さらには、シミュレーションのアルゴリズム(基本式)が不適切な場合には温度分布の精度が低下してくる。そのため、シミュレーションに適用させる基本式について検討した。その結果、合材の温度低下は高温側の合材の熱量が低温側へ熱伝導することによって進行し、その速度は温度差に比例すると言う摂理から、フーリエの法則に基づく熱伝導方程式を(式-1)を導入し、合材内部の温度挙動をシミュレーションすることとした。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \times \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots (1) \quad (\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho})$$

T:温度(°C)、Z:合材表面からの深さ(m)、α:温度拡散率(m²/s)、λ:熱伝導率(W/(m・K))、C:比熱(J/(kg・K))、ρ:密度(kg/m³)

ここで、式-1は2階の偏微分方程式で表されており、この式を任意で与えたΔZだけ離れた点において格子点をおき、離散化させ、有限差分法の陰解法を用いた差分方程式を解くと式-2に示す1次元非定常熱伝導方程式が導出される。

$$T_i^{k+1} = 1 / (1 + 2C_z) \times \{ C_z \times (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k) \} + T_i^k \dots (2)$$

$$(C_z = \alpha \times \Delta t / \Delta Z^2)$$

Δt:時間ステップ(s)、ΔZ:空間ステップ(m)  
i:合材表面からの深さの点、k:時間

これを用いて、合材内部の温度シミュレーションを実施するが、実際の合材は、立体的なものであり、3次元で評価することが望まれるが、今回は考え方を簡素化するため1次元非定常熱伝導方程式により考える。

表-2 仮定した合材のパラメータ

初期合材温度	To	°C	173
時間ステップ	Δt	s	0.5
空間ステップ	Δz	m	0.025
熱伝導率	λ	W/(m・K)	2.34
密度	ρ	kg/m³	1800
比熱	C	J/(kg/K)	1280
温度拡散率	α	m²/s	1.02 × 10 <sup>-6</sup>

本シミュレーションで使用したパラメータを表-2に示す<sup>(12)</sup>。シミュレーションで検証した区間は、**図-7**で示すA-A断面とB-B断面の中央となる部分を取り上げ、図のように赤枠で

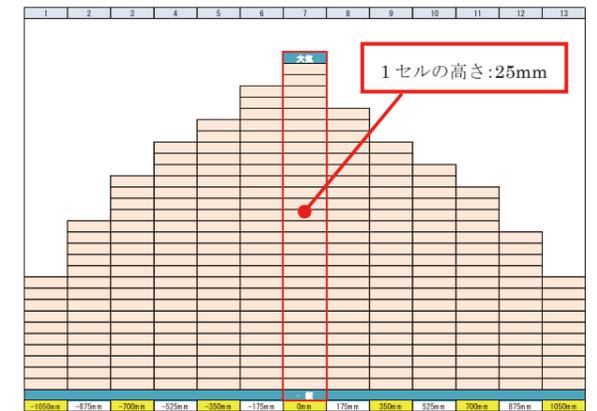


図-7 シミュレーションに用いた区間

囲う合材表面からの深さ方向の区間とした。本シミュレーションの境界における温度条件を、表層側は外気温度とし、荷台底側は鋼板の温度とした。この境界条件として使用した温度は、合材の積載開始直後から計測終了までの実測値とした。実測値と式(2)によるシミュレーションの結果を**図-8**に示す。図より、実線は実測値、破線はシミュレーション結果を表しており、凡例の数値は表面からの深さを示している。グラフを見て取ると、実測値とシミュレーションは大きく異なる温度挙動になることがわかり、温度挙動はシミュレーションの方が速く温度低下する傾向にあった。この原因としては、シミュレーションで仮定した合材パラメータがテストで用いた合材と異なること、シミュレーションを1次元モデルで実施していることや境界部の厳密な条件設定ができなかったことなどが考えられる。実際に、熱の伝わりやすさを表す熱伝導率の値をλ:2.34 W/(m・K)からλ:0.9 W/(m・K)に再定義させることで、温度の伝わりやすさを表す温度拡散率αが小さくなり、**図-9**のように実測値とシミュレーションの温度差は縮まり、各点概ね近い温度挙動となることがわかった。しかしながら、表面から550mmの点の温度挙動に着目するとシミュレーションの結果と10°C程度の差異が見られた。この原因としては、今回、荷台底の温度測定は鋼板製カバーで熱電対を保護しているため、カバーへ熱伝導した熱により温められた空気層の温度が外乱要因として働き、計測した温度は実際よりも高い値を示していたものと考えられる。よって、合材内部の温度低下は温度差に大きく依存するところから、今回のような10°C程度の差異になったものと考えられた。このように、合材の物性値は違うものの、合材内部の熱移動は概ねフーリエの法則で表されることがわかった。

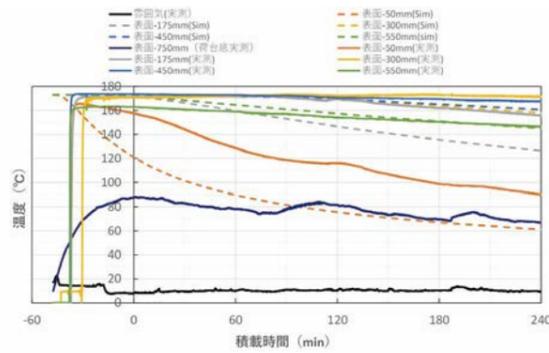


図-8 実測値とシミュレーションの温度挙動

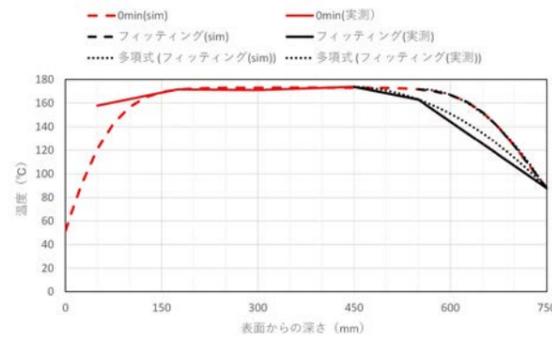


図-10 温度と深さの関係 (0 min)

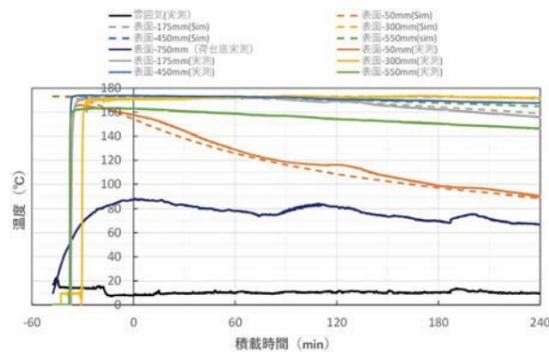


図-9 実測値とシミュレーション (λ=0.9)の温度挙動

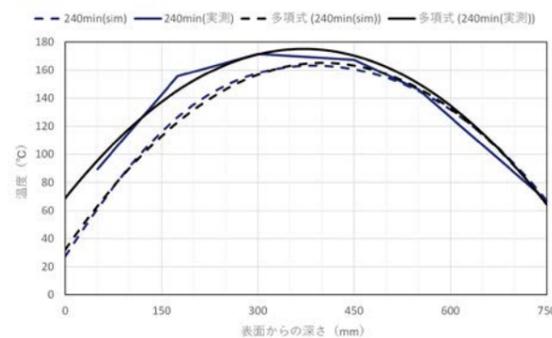


図-11 温度と深さの関係 (240 min)

3.3 シミュレーションへの適用式

ここまでで、合材内部の温度挙動を把握するために、1次元非定常方程式を用いて熱の伝わり方をシミュレーションしてきた。その結果、外乱の要因などがあるものの、概ね各点においてシミュレーション結果が成り立つことがわかった。つづけて、温度分布の作成に必要な、不足する点の補間方法について思案した。はじめに、図-8のデータを抜粋し、図-10、図-11に任意の時間の温度と深さ方向の関係を表すグラフを作成した。図の実線は実測値を表しており、破線は式-2により求めたシミュレーションの値を示している。両者の図が示すように、温度低下は低温側と高温側の温度差が大きいほど顕著に進行し、温度勾配は急激になる。一方で、温度差が小さければ温度勾配は緩慢となる。とりわけ、シミュレーションの1次元熱伝導方程式は、温度が格子点の間隔の2乗に比例することと、温度の伝わりやすさを表す温度拡散率 $a(m^2/s)$ が長さの次元の2乗に比例することから、図-10と図-11のシミュレーションの曲線部に関しては2次関数でフィッティングできるかを確認した。その結果、温度低下が始まる曲線部からフィッティングさせると、概ね2次関数で表現できることがわかった。このことから、実測値の点においても、今回は2次関数を用いて表すこととした。

3.4 温度分布の作成

温度分布は、「3.1温度分布の評価方法」と「3.3シミュレーションへの適用式」で上述した方法により、実測していない不足の点において補間した温度を用いながら作成した。具体的には、図-12を用いて説明すると、①②③において実測した温度データを距離Yの関数で表し、不足する点の温度を補間した。②の合材内部の温度点は、合材表面と荷台底の中心になるように熱電対を挿入しているため、この点が深さ方向の温度分布作成において、もっとも保温される点と予測される。そのため、この点を極大値にとり2次関数として深さ方向の温度分布を推測した。そして、温度分布は、積載した合材の断面を25×175mmでメッシュ切りし、そのセルを点として扱い、断面全体を推測した。以上の流れにより、断面の温度分布のシミュレーションを行い、「走行」と「未走行」の合材温度特性の相対比較を行った。ただし、本手法は、各位置において深さ方向の中心となるように熱電対を挿入し、この点がかもとも保温されている温度と定義しているため、挿入した位置がズレた場合などに推測する温度の信頼性が劣るのが課題となる。

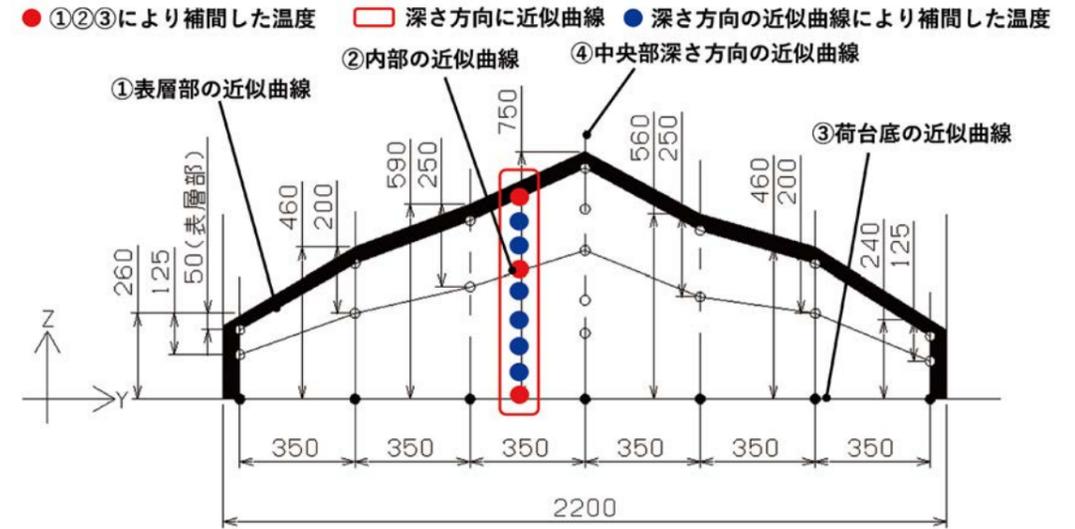


図-12 温度分布作成イメージ

3.5 平均温度の評価手法

合材平均温度は、式(3)により求めた。具体的には、前項で上述したメッシュに温度を当てはめて各断面における平均温度を算出した。さらに、2断面の平均温度の算術平均を求めて合材平均温度とした。なお、合材平均温度は断面内にある温度分布のプロットが多いほど、細かな特性を評価できるが、今回は算出時間の兼ね合いのため、できる限りの細かなメッシュ切りを施した。

$$T_{ave} = \frac{(\sum_{i=1}^N T_i + \sum_{j=1}^P T_j)}{2} \dots (3)$$

$T_{ave}$  : 合材平均温度 (°C)

$T_i$  : A-A断面の*i*番目のメッシュ温度、  
 $N$  : A-A断面のメッシュ数、

$T_j$  : B-B断面の*j*番目のメッシュ温度、  
 $P$  : B-B断面のメッシュ数

4. 試験結果と考察

図-13は、ダンプに合材を積載してからの経過時間と上述の手順で求めた合材平均温度との関係を示している。また、走行は、積載時間0 minより移動を始め、「未走行」は退避所での待機を継続した。図より、積載時間0 minの合材平均温度に着目すると、「走行」、「未走行」ともにダンプに積載してからの合材平均温度が約180°Cから155°Cに急激に低下していることがわかる。これは、10°Cの外気温度と等しい鋼板製のダンプ荷台に合材から熱が移動したことによる温度低下であると考えられる。さらに、本テストでは、合材積載完了から出発(0 min)までの測定準備に1 h程度を用しており、このことも合材平均温度低下の要因の一つであると考えられる。

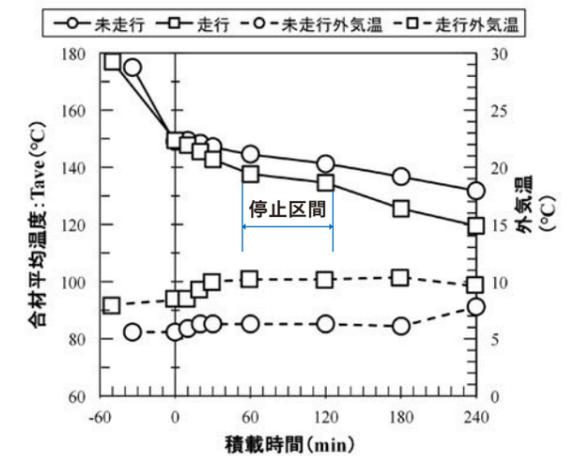


図-13 合材平均温度と積載時間の関係

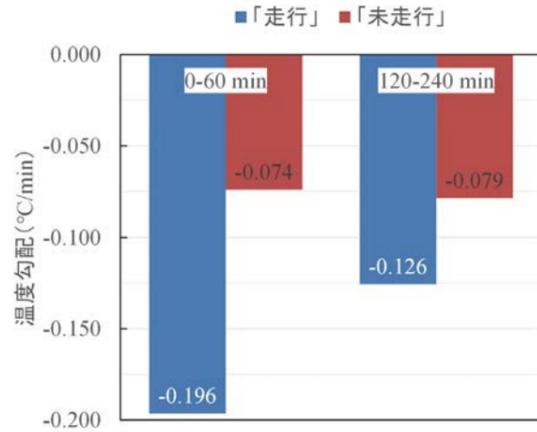


図-14 「走行」「未走行」の温度勾配

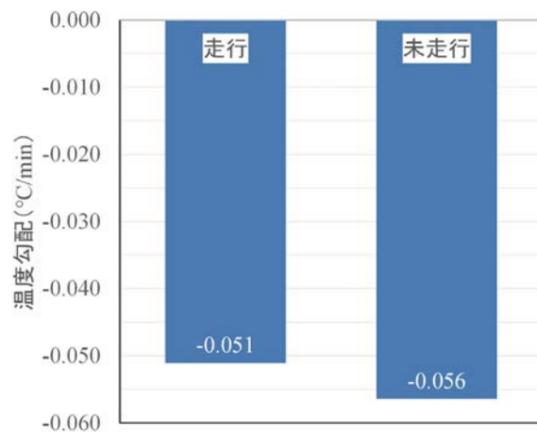


図-15 停止区間の温度勾配

図-14は、積載時間0-60 minと120-240 minにおける「走行」と「未走行」の温度勾配(温度の時間に対する変化率)を示している。図より、走行風の影響により、積載時間0-60 minの区間で「走行」の温度低下が「未走行」の約2.6倍速く進むことがわかる。同様にして、積載時間120-240 minの区間では約1.6倍速くなっている。このことは、合材の積載時間が経過することで、合材温度が低下して外気との温度差が小さくなったことにより、フーリエの法則が示す通り温度勾配が緩慢になっているものと考えられる。図-15は、図-13に示す停止区間(積載時間60-120 minの区間)の温度勾配を「走行」と「未走行」とで比較している。テスト当日の外気温は、図-13から明らかな通り「走行」の方が高く、しかも、積載時間0-60 minの区間で「走行」の合材温度が「未走行」よりも早く低下していることにより、停止区間における外気との温度差が「未走行」よりも小さくなっている。このことから、図-15に示す「走行」の温度勾配の値が「未走行」よりも小さくなったものと考えられる。また、「走行」テストにおいて、停止区間の温度勾配を走行時の温度勾配に補

正し、かつ、合材積載完了時から出発した場合の温度挙動の予測を図-16の緑色の曲線で示している。走行時間と合材平均温度との関数を作成し、切片を類推すると、積載完了時の温度は162℃となった。このことから、出発までの合材温度の急激な低下は、ダンプ荷台に合材から熱移動した要因が大半を占めているものと考えられる。

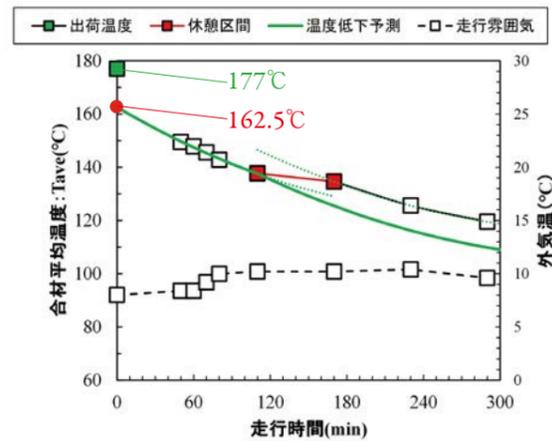


図-16 補正した「走行」の温度低下予測

つぎに、表-3は「3. 温度特性評価」で定義した手法を用いて算出した合材平均温度を示している。表中のTaとTbは図-4で記述したA-A断面の平均温度とB-B断面の平均温度とした。図-17、図-18、図-19、図-20は、合材A-A断面とB-B断面における温度分布を3色のカラースケールで示している。具体的には、図-17の右図の右肩に示す温度インデックスの通り、赤色の180℃から白色の150℃までの温度帯を現場の受け入れ目安の合材温度として表している。これらの図により、合材表面からの放散熱よりも、荷台部からの放散熱の影響が大きいことがわかる。

つづいて、表-3の0 minにおいて「走行」と「未走行」の合材平均温度に着目すると、算出した両者の温度は同等度であるが、図-17と図-18で温度分布に違いが見られた。図-18のA-A断面の走行前方側とB-B断面の両端は、どちらも荷台の鋼板と合材が接触するため、冷え方の違いが見て取れる。この要因としては、「走行」テスト当日の朝の天候が雨天になったため、屋根のある退避所で、配車したダンプの荷台をヘアードライヤーで乾燥させた。合材積載を除く出発までの所定の作業はすべて屋根のある退避所で行っている。時間の都合上、写真-4に示すような状況で荷台が濡れていたが、止むを得ず水分が残存していた状態で合材を積載している。ただ、合材の出荷温度と当日の外気温との差は「未走行」の条件より温度低下に対しては緩慢とな

表-3 算出した合材平均温度 (°C)

	「走行」			「未走行」		
	Tave	Ta	Tb	Tave	Ta	Tb
0 min	149.5	151.3	147.6	149.0	150.7	147.5
240 min	119.5	117.7	121.3	131.8	131.6	132.0

る要因である。しかしながら、走行の有無に影響が無い積載時間0 minにおいて図-17と図-18の温度分布の違いが生じているのは、「走行」の荷台が濡れていたことが最大の要因であり、水の気化潜熱により合材から熱が奪われたものと考えられる。さらに、写真-4と図-17の荷台底部に着目すると、荷台前半部の濡れ方が著しいことと温度分布が低くなっていることの裏付けとなっている。このことから、表-3に示す「走行」と「未走行」の0 minにおける合材の平均温度の値に大きな差が生じなかったことが、「3. 温度特性評価」で定義した手法の今後の課題として残る結果となっている。



写真-4「走行」合材積載前

一方、表-3より、積載時間0 minから240 minまでの合材平均温度の低下は、「未走行」の場合は約20℃、「走行」の場合は、「未走行」よりも外気温が高く合材との温度差が小さくなるにも拘わらず約30℃の温度低下となっている。このことは、前節で考察しているように、合材平均温度推定手法に課題が残るものの、荷台が雨水で濡れていたことが合材温度の低下に影響が及ばない積載合材頂上部と空気層との境界において、積載時間240 minの図-19と図-20を比較する限り「走行」が「未走行」より合材の温度低下が著しいことが明らかである。

また、「走行」と「未走行」の0 minと240 minの各断面を比較すると、特に荷台底の白色の温度帯の変化が緩慢になっていることがわかる。これは、表-2で示した合材の温度拡散率aの値に大きく依存しており、この値が小さいほど熱を伝えたいことを意味する。例えば、合材の温度拡散率aは、 $1.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であるのに対して、一般的に断熱材として使用されるロックウール(80 kg/m<sup>3</sup>)の温度拡散率aは、 $7.26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ である。この値から明らかなように、合材の温度拡散率aは、ロックウールの1.4倍程度と断熱材を変わらない値を示している。ちなみに、ダンプの荷台の素材である

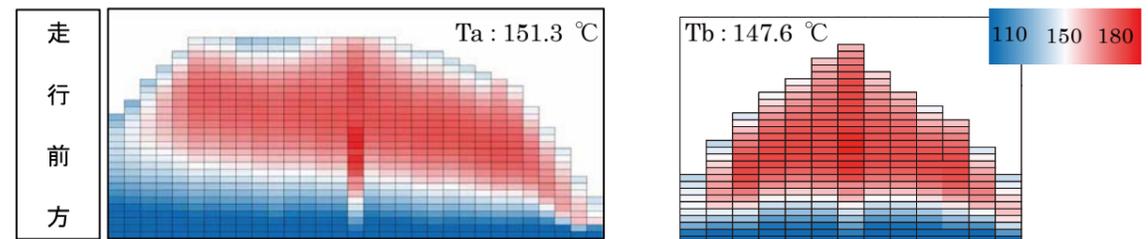


図-17 「走行」(0 min)の合材温度分布イメージ(左:A-A断面、右:B-B断面)

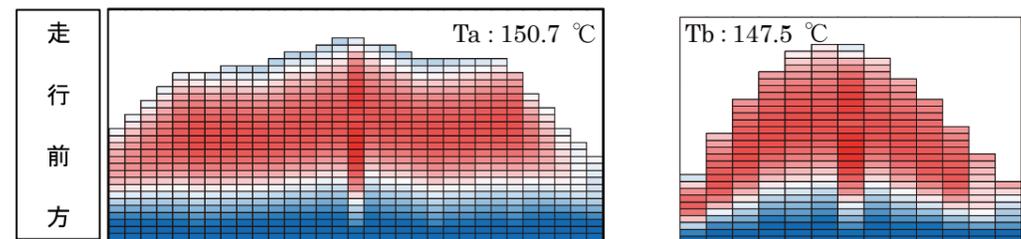


図-18 「未走行」(0 min)の合材温度分布イメージ(左:A-A断面、右:B-B断面)

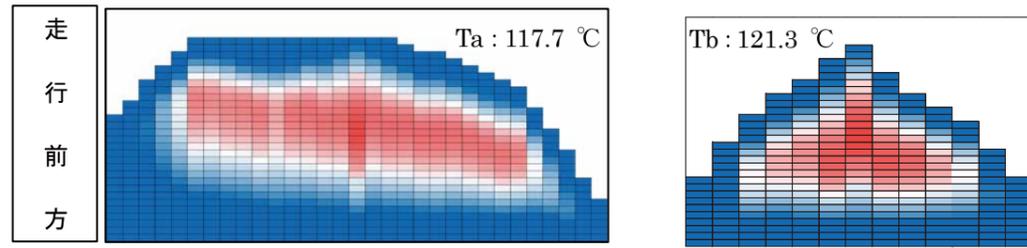


図-19 「走行」(240 min)の合材温度分布イメージ(左:A-A断面、右:B-B断面)

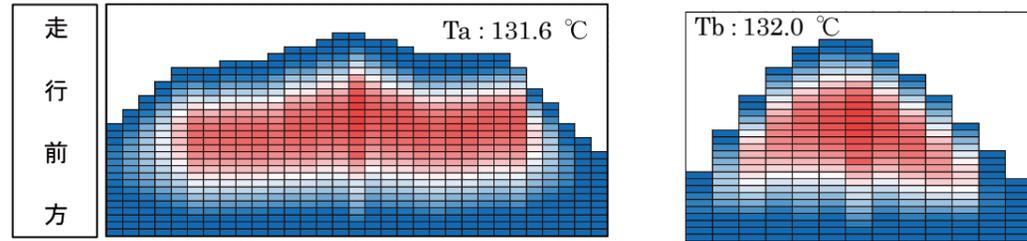


図-20 「未走行」(240 min)の合材温度分布イメージ(左:A-A断面、右:B-B断面)

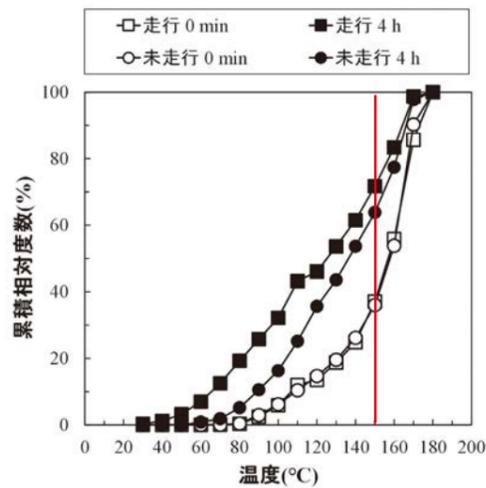


図-21 「走行」と「未走行」の断面に分布している温度の累積相対度数

鉄の温度拡散率 $\alpha$ は $1.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、ロックウールの20倍、合材の14倍となる。このことから、温度低下した周囲の合材が断熱材としての役割を果たすことにより、中心部の合材の温度低下が抑制されているものと考えられる。

つぎに、図-21は、合材A-A断面とB-B断面から抽出した合材温度の累積相対度数を示している。図より、一般的な舗装現場で合材の受け入れの目安温度とされている150℃を下回る合材は、合材出荷時の温度180℃を100%とした累積相対度数(%)を用いて表すと、積載時間0 minで「走行」と「未走行」の両者とも約35%、積載時間240 minでは「走行」が約70%、「未走行」が約65%分布することが予測できる。現実的には、ダンプ直載合材の部位によって図-

21に示すような合材温度の偏りがあったとしても、フィニッシャーのスクレードにより攪拌混合作用を受けて均熱化し、表-3に示す平均合材温度に近づくと考えられる。ただし、平均合材温度の推定手法に関しては再考の必要がある。

以上のことから、合材の長距離輸送を検討する上で、ダンプ荷台底部の保温対策を行うことと、合材そのものが断熱材としての役割を担う特性を利用して比表面積が最も小さくなる荷姿で積載することが重要であると考えられる。

### 5. まとめ

合材をダンプに積載して「走行」と「未走行」の場合において合材の温度特性を評価した。その結果、合材をダンプに積載した段階で荷台底部鋼板への熱移動が顕著に進行しており、このことが合材の温度低下に大きく影響していることがわかった。さらに、「走行」は、走行風の影響を受けて合材の温度低下が促されるものの、温度低下した周囲の合材が断熱効果を示すために、中心部の合材温度の低下が抑制される傾向にあることも推定できた。以上のことから、合材の長時間輸送を実現するためには、荷台底部鋼板への熱移動と外気への放散熱の抑制が課題となる。そして、今回の知見から、合材を保温できるコンテナの検討を進めるうえで、荷台への熱移動と外気への放散熱を抑制することができる最適な保温方法の導入が求められることが示唆された。最後に、本テストでは合材断面の温度特性を評価するに止まったが、実際の合材を立体的に捉えた場合には、今回算出した

合材温度よりも、さらに温度低下が進行しているものと考えられる。また、近似曲線で補間できなかった温度による合材平均温度の信頼性の低下が課題となった。今後は立体的な合材の温度がシミュレーションできるよう、サンプリングしたデータを活かし、熱流体解析への応用と輸送中の合材温度が推定できる温度管理技術の検討を進めて行く予定である。

### 6. 今後の展開

将来のAPは、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の削減を根幹とする生産性の向上や経済合理性の追求に伴う経営の合理化により合材工場の統廃合がさらに推し進められて行くものと予測される。このため、品質を低下させることなく熱い合材を供給することができない遠隔地が拡大して行くと同時に、このエリアへの合材輸送を可能とするための、合材温度低下抑制や温度管理手法の技術開発が急がれる所である。特に、現状のAPの瞬発力を落とさずに、連続的に生産された合材の貯蔵や輸送システムが今後重要になってくると考えられる。それらのシステムを構築して行く上で合材を長時間保温、輸送可能とするコンテナを検討し、従来の輸送方式との比較評価を実施していく所存である。

### 【参考文献】

- 1) 越健太郎ほか アスファルト合材の供給圏域の基礎分析、土木学会論文集 E1(舗装工学)、Vol.74、No.3、pp.63-70、2018。
- 2) 村田信之ほか アスファルト混合物運搬時の保温対策、舗装、Vol.33-10、pp.19-24、1988。
- 3) 村井宏美ほか 再生混合物の長時間運搬における作業性確保の対策、日本道路会議論文集、Vol.33、2019。
- 4) 森修二ほか 寒冷地における中温化舗装技術の検討、北海道開発土木研究所月報、No.582、2001。
- 5) 安部隆二ほか 積雪寒冷地における中温化舗装技術の適用方法に関する研究、土木学会論文集 E1(舗装工学)、Vol.71、No.3(舗装工学論文集第20巻)、pp.55-63、2015。
- 6) 吉沢茂則ほか 加熱アスファルト混合物運搬に使用する特殊保温シート、舗装、Vol.45-10、pp.27-30、2010。
- 7) 山下将弘ほか アスファルト混合物運搬における安全革命-革新的な保温シート巻き上げ装置、道路建設、Vol.783、pp.50-53、2020。

- 8) Muhammad Muhammad et al., Study on Heat Loss through Dump Truck Wall Insulation by Sengon Wood, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Science, Vol.58, No.1, pp.126-134, 2019.
- 9) Isaac L. Howard, Measurement of Asphalt Concrete Temperature During Transport with the Use of an Instrument Probe System, Journal of the Transportation Research Board, No.2408, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, pp.78-85, 2014.
- 10) V A Zorin et al., Analysis of thermophysical properties of asphalt mixtures, IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering 832, 2020
- 11) 谷口博ほか フォームド技術を用いた再生アスファルト混合物の品質向上と運搬時間の延長による安定供給圏域の広域化、道路建設、Vol.783、pp.42-45、2020。
- 12) 青木大介ほか 舗装の熱パラメータ推定に関する考察 土木学会舗装工学論文集、第10巻、pp.225-231、2005。

### 筆者紹介



TAMURA Akihiro  
田村 彰啓  
2014年入社  
日工(株)  
開発部 開発3課