

9. 温度予測型転圧管理システムの開発による生産性向上への検討

アスファルト舗装における現場温度管理の省人省力化

(株)NIPPO 総合技術部 機械開発グループ ○梶原 寛
(株)NIPPO 総合技術部 相田 尚
(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 門田 誠也

1. はじめに

国土交通省では、2016 年度から主導する「i-Construction」を、2024（令和 6）年 4 月には「i-Construction 2.0」に深化させると公表し、2040 年度までに建設現場の省人化を少なくとも 3 割、すなわち生産性を 1.5 倍向上することを目指し、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現を目指して、建設現場のオートメーション化（自動化）に取り組む方針が示されている。

道路舗装分野においては、3 次元データや ICT の活用による生産性の向上に取り組んでいる。しかし、アスファルト舗装の品質管理においては、省人省力化に資する技術の高度化や効率化による自動化が、なかなか進んでいないといった現状がある。

特に、アスファルト舗装の品質管理のうち、アスファルト混合物の締固め度の確保は重要な管理項目であり、温度依存性が高いアスファルト混合物の出荷、到着、敷きならし、転圧における施工温度を適切に管理する必要がある。このため、国土交通省や NEXCO などのあらゆる舗装工事で温度管理が規定されている。

現場での温度管理作業は、専任の管理者が都度舗装内部に温度センサを挿入して測定し、紙ベースで記録している。また交通規制を伴う現場では、狭い空間内で重機と近接しながら、規制時間に追われての温度管理となっている。このため、現場からは効率的かつ安全な管理方法が求められていた。

本論文では、現場温度管理作業を自動化することで省人化・省力化を図りつつ、安全な現場管理への変革に取り組んだ内容について述べる。

2. アスファルト舗装における現場温度管理の種類と自動化検討

2.1 アスファルト舗装の現場温度管理

アスファルト舗装の現場温度管理項目は、アスファルト混合物が現場に到着した時に測定する「到着温度」、アスファルトフィニッシャにて敷きならした直後に測定する「敷きならし温度」、転圧

直前に測定する「転圧温度」の 3 項目である。そのうち転圧温度は鉄輪ローラで転圧する初転圧温度と、タイヤローラで転圧する二次転圧があるため、一般的には合計 4 箇所での温度管理となる。

2.2 現場到着温度管理の方法と自動化

現場到着温度管理は、アスファルト混合物を積載したダンプトラックが現場に到着した時点において、温度管理員が荷台に上って、アスファルト混合物の温度測定をする。荷台への昇降作業があるため、労力を要すると同時に転落・墜落のリスクがある。

自動化の手段一例としては、通信機能を装備した温度計を使用する方法がある。アスファルトプラントで混合物をダンプトラックに積載した時点で、温度測定用センサをアスファルト混合物に挿入する。運搬中～現場到着時における温度が自動測定され、その測定データが自動的にクラウドに記録されると同時に、インターネットを通じてスマートフォン等で確認することが可能である（図－1 参照）。



図－1 現場到着温度管理方法の自動化イメージ

2.3 敷きならし温度管理の方法と自動化

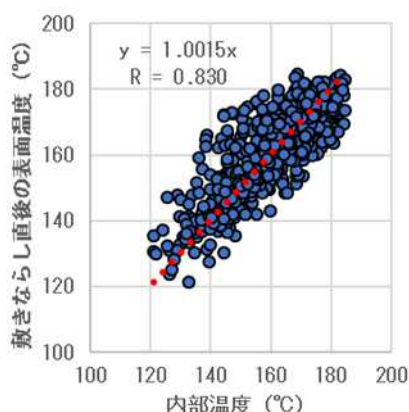
敷きならし温度管理方法は、アスファルトフィニッシャにてアスファルト混合物を敷きならした直後に、温度測定用センサを挿入して測定している。施工の進行とともに温度の測定位置も移動するため、温度センサの抜き差し行為、測定位置の移動が必要となる。

接触式温度センサでの自動化を検討したが、連続して測定する場合、温度センサで敷きならし面を引きずり、傷をつけることになる。このことから、非接触式温度センサでの対応を検討した。

非接触式温度センサでの測定による敷きならし表面温度と、敷きならし内部温度の相関を確認するため、外気温の影響を受けやすい冬季の舗装現場において、敷きならし直後の表面温度と同一位置の内部温度（敷きならし温度）のデータを 750 個取得した。取得状況を写真－1 に、検証した結果を図－2 に示す。



写真－1 敷きならし直後の表面温度と内部温度測定状況



図－2 敷きならし直後の表面温度と内部温度の関係

ここで、敷きならし直後の内部温度と表面温度の相関式の傾きは 1.0015 とほぼ 1:1 の関係にあり、相関係数は 0.830 と非常に高い相関を示すことが確認できた。このことから、敷きならし直後であれば非接触である放射式の温度センサを用いて、敷きならし温度取得の自動化が可能と判断した。

2.4 転圧温度管理の方法と自動化

転圧温度管理方法は、敷きならされたアスファルト混合物を転圧機械が転圧する直前に、温度測定用センサを挿入して測定している（写真－2 参照）。転圧機械の進行方向直前で測定するため、転圧機械との接触リスクがある。



写真－2 転圧温度の管理状況

転圧温度管理方法の自動化を、敷きならし温度管理と同様の方法で検討したが、転圧時は敷きならしから一定時間が経過し、特に冬場においては表面温度と内部温度に差異が発生してしまうため、非接触式温度センサを用いての表面温度での管理方法は困難と判断した。また前述の2つの温度管理と比較して測定、記録するだけでなく、転圧機械オペレータへの転圧範囲指示行為が発生する。

ここで、転圧温度管理の自動化を進めるには、以下の検討が必要と考えた。

- ① アスファルト混合物の内部温度を予測する。
- ② 予測には施工時の環境状況を反映し、時間経過に伴う温度低下を算出する。
- ③ 「②」の情報を転圧機械オペレータと共有する。

3. 転圧温度管理の自動化検討

3.1 有効な転圧時間と内部温度予測

1998 年に National Asphalt Pavement Association が報告した文献¹⁾に、「アスファルト混合物の有効な転圧時間は、敷きならし厚さ、気温および下層の表面温度、混合物の敷きならし温度、風速、太陽光線等によって増減する」との記載がある。

この有効な転圧時間は、アスファルト混合物の敷きならしから転圧終了温度が 80℃に低下するまでの時間と定義されており、様々な施工条件における有効な転圧時間が示されている。なお、この有効な転圧時間は、実測データから求められた物である。このため、これを応用することにより、アスファルト混合物の敷きならしから一定時間経過後の内部温度が予測でき、敷きならし後の温度推移が見える化できるのではないかと考えた。

3.2 現場実証データの収集

「3.1」で検討したアスファルト混合物の内部温度予測を検証するために、国土交通省、NEXCO などの舗装現場にて、アスファルト混合物舗設時の各種データ（以下、現場実証データ）を 2,300 個取得した。現場実証データの収集状況を写真－3 に

示す。



写真-3 現場実証データの収集状況

ここで、現場実証データは、敷きならしたアスファルト混合物の内部温度および表面温度に加え、7項目の施工環境パラメータとして、①舗装厚さ、②空隙率(混合物の種類)、③下層の表面温度(以下、基盤面温度と称す)、④気温、⑤風速、⑥湿度、⑦気圧を設定した。これらのデータは、敷きならし直後から1分ごとに内部温度が100℃に低下するまで取得した。

3.3 機械学習による分析

「3.2」で取得した現場実証データをAIに機械学習させ、相関性を解析した。この結果、図-3に示す相関性のヒートマップが出力され、温度変化に与える影響が大きい順に、以下の項目が確認された。

- ・舗装厚さが薄いほど温度変化が大きい
- ・気温が低いほど温度変化が大きい
- ・基盤面温度が低いほど温度変化が大きい



図-3 機械学習に基づく相関性ヒートマップ

3.4 内部温度予測式に適用する施工環境パラメータ

機械学習の結果よりパラメータを舗装厚さ、気温、基盤面温度に絞り、これらを基にした温度予測を行うこととした。ただし、舗装厚さは設計にて定められており、同一層を施工している限り施工中に変化することはない。このため、設計舗装厚さごとに温度予測式を構築することとし、そのパラメータとして気温と基盤面温度の2項目を用いることとした。

3.5 温度低下予測と2つの予測モデル式

前述の内容を踏まえて、AIに機械学習させて求めた係数を用いた指数方程式モデルと、機械学習による分析アルゴリズムを用いたLightGBMモデルの、2つの温度予測式を構築した。

今回構築した指数方程式モデルによる内部温度予測式を以下に示す。この式に、アスファルト混合物の敷きならし温度「 T_0 」を初期値として、基盤面温度「 a 」と気温「 b 」、舗装厚さと空隙率で分類した係数「 c 」、経過時間「 d 」を与えることで、時間経過ごとの内部温度が算出できる。

【指数方程式モデルによる内部温度予測式】

予測内部温度＝

$$(T_0 - (a+b/2)) \times \text{EXP}(c \times d) + (a+b/2)$$

T_0 : 敷きならし温度, a : 基盤面温度 (℃),
 b : 気温 (℃), c : 係数, d : 経過時間 (分)

なお、LightGBMモデル式は分析アルゴリズムであるため、ここでの表現は省略する。

3.6 2つの予測モデル式の予測精度

それぞれのモデル式に現場実証データを入力し、敷きならしから5分後の内部温度を予測させた。その結果、それぞれの式における予測精度は表-1に示すようになった。

表-1 予測モデルと5分後の予測精度

モデル名	真値への当てはまり率 (r2score)	真値に対するずれ量 (RMSE)
指数方程式モデル	0.984	2.383
LightGBMモデル	0.998	0.625

ここで、どちらの式も真値への当てはまり率(R2 score)は高い値(1.000が最高値)を示しているが、真値に対するずれ量(RMSE)はLightGBMモデルの方が小さい値を示しており、高精度に予測でき

ることを確認した。

4. 予測による転圧温度管理システムの開発

「2.4」に示した転圧温度管理方法の自動化と、温度管理員の事務所での仕事である、帳票作成の省力化を実施すべく、予測による転圧温度管理システム（以下、開発システム）の開発要件を以下とした。

- ① 敷きならし温度と転圧温度を自動で取得・記録する。
- ② 転圧機械のオペレータに転圧範囲を自動で指示する。
- ③ 温度管理帳票を自動で作成する。

機器構成を検討した結果、取得した温度や転圧回数が、位置情報とともにヒートマップ化して表示される機能を持つ、既存の締固め管理システムをベースとして開発することとした。

4.1 開発システムでの各種温度の取得内容と動作イメージ

開発システムでの各種温度の取得内容と、動作イメージ（図－4 参照）を以下に挙げる。実際は施工進行方向 50cm ごとに連続して取得されるが、ここでは管理地点における定点での説明とする。

- ① 管理地点にアスファルトフィニッシャが到達した段階で、気温と基盤面温度を取得する。
- ② 管理地点にアスファルトフィニッシャがアス

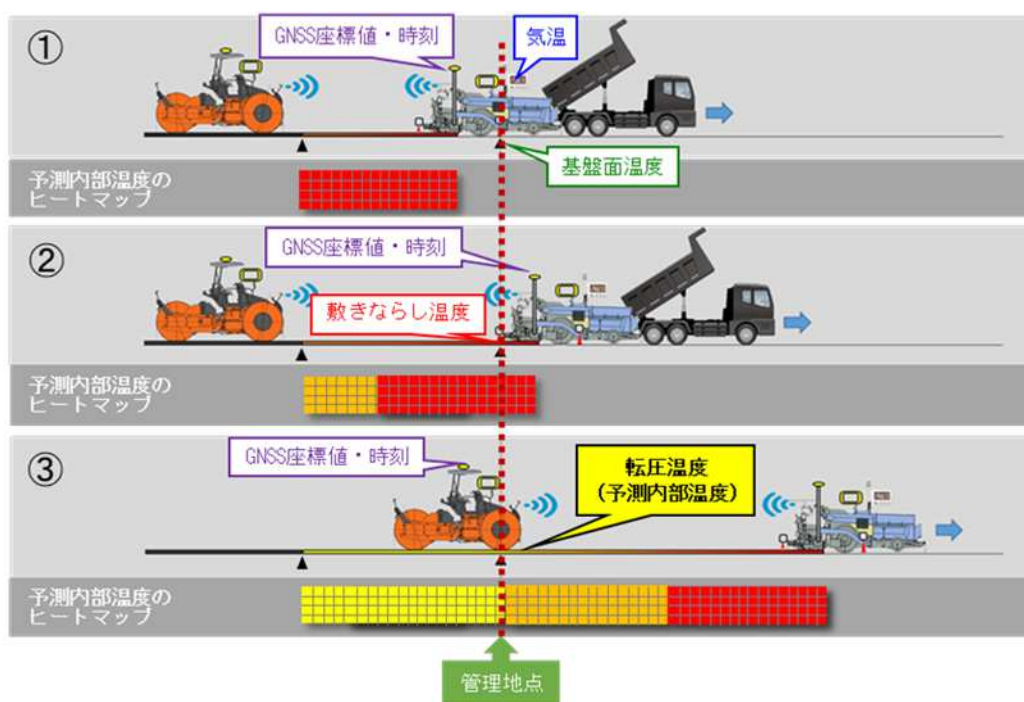
ファルト混合物を敷きならした段階で、敷きならし温度を取得する。取得後、敷きならし面の内部温度は、内部温度予測式により時間経過とともに低下し、それに伴ってヒートマップの色も変化する。

- ③ 管理地点に転圧機械が到達（転圧）した段階における、予測内部温度を転圧温度として記録する。

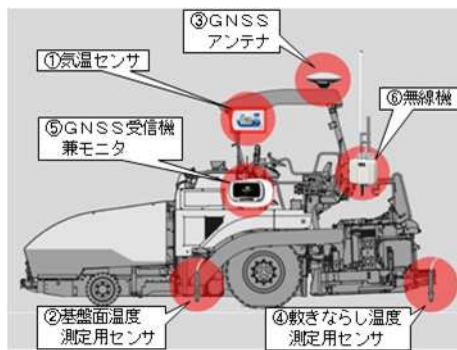
4.2 アスファルトフィニッシャにおける機器の構成

アスファルトフィニッシャにおける機器構成と機能を以下に列挙し、機器の設置状況を図－5 に示す。

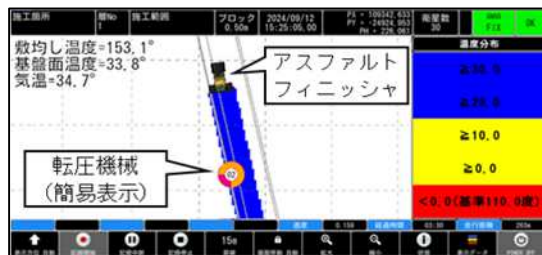
- ① 気温センサ：気温を測定する。
- ② 基盤面温度測定用センサ：基盤面の温度を測定する。
- ③ GNSS アンテナ：アスファルト混合物を敷きならした位置（座標）を測定する。
- ④ 敷きならし温度測定用センサ：アスファルト混合物の敷きならし温度を測定する。
- ⑤ GNSS 受信機兼モニタ：アスファルトフィニッシャの自己位置、アスファルト混合物の敷きならし範囲が、取得した敷きならし温度でヒートマップ表示される（図－6 参照）。なお、ヒートマップは 50cm メッシュの集合体で表現される。
- ⑥ 無線機：取得した各種情報を転圧機械に送信する。同時に各種情報は、インターネットを通じてクラウドに送信される。



図－4 開発システムの動作イメージ



図－5 アスファルトフィニッシャへの機器設置状況

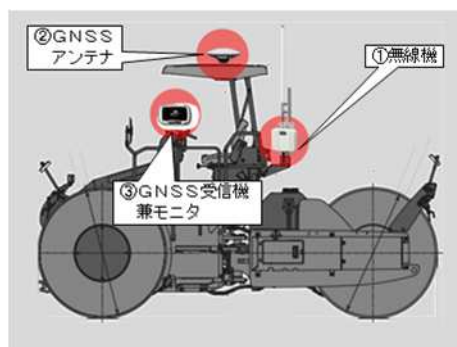


図－6 アスファルトフィニッシャのモニタ画面

4.3 転圧機械における機器の構成

転圧機械における機器構成と機能を以下に列挙し、図－7に機器設置状況を示す。なお、機器に搭載する温度予測式は、現時点においてLightGBMモデルでは計算処理に時間を要するため採用するのは難しいと判断し、指数方程式モデルを採用することとした。

- ① 無線機：アスファルトフィニッシャで取得した各種情報を受信する。
- ② GNSS アンテナ：転圧機械が転圧した位置（座標）を測定する。
- ③ GNSS 受信機兼モニタ：転圧機械の自己位置と、アスファルト混合物の敷きならし範囲が、予測内部温度でヒートマップ表示される（図－8参照）。転圧機械が敷きならした範囲に侵入し、初転圧を完了するとメッシュの色が固定され、この段階におけるアスファルト混合物の予測内部温度を、転圧温度として記録する。記録された情報はインターネットを通じてクラウドに送信される。



図－7 転圧機械への機器設置状況

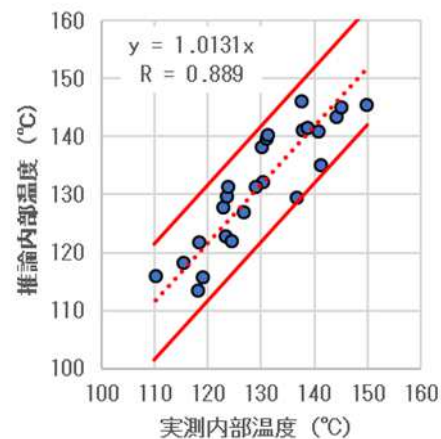


図－8 転圧機械のモニタ画面

5. 実現場における開発技術の検証

5.1 予測内部温度と実測内部温度の比較

新設舗装工事の基層工で、予測内部温度と実測内部温度の比較検証を実施した。従来方法により取得した内部温度（実測内部温度）と、同一位置で開発技術により取得した予測内部温度を25個（ダンプトラック25台分）取得して比較した結果を図－9に示す。



図－9 予測内部温度と実測内部温度の関係

ここで、実測内部温度と予測内部温度の相関式の傾きは1.0131と概ね1:1の関係にあり、相関係数は0.889と非常に高い相関を示すことが確認できた。また、実測内部温度と予測内部温度との差異は-7.4～+9.0℃、平均値は+1.8℃、標準偏差は4.7℃であり、図中に赤実線で示した±10℃の分布の中にすべての値が含まれている。これより、開発したシステムによるデータの取得方法と内部温度予測式の妥当性が確認できた。

5.2 転圧範囲の自動指示

転圧機械のモニタ上に表示される予測内部温度ヒートマップで、設定した温度以下に達した赤丸で囲んだエリア（黄色のメッシュ）が発生すると、警告音の発報と同時に画面左上に「至急転圧！！」が表示され（図－10参照）、転圧機械オペレータに

転圧指示が行われることを確認した。



図-10 転圧機械に設置したモニタ上の警告表示

5.3 温度管理帳票と転圧回数管理帳票の自動作成

開発システムで取得した①敷きならし温度と②転圧温度の温度管理帳票と、③転圧回数の転圧回数管理帳票を図-11に示す。なお、これら3つのヒートマップ表示による面的な管理帳票は自動で作成されるため、出力に要するまでの時間は僅か5分であった。



図-11 帳票へのヒートマップ出力結果

6. 開発技術検証時の課題と機器の改良

実現場での開発技術の検証時に、アスファルトフィニッシャのシステムに課題が発生した。以下に課題を列举する。

- ① 敷きならし記録の幅員が数値入力による固定幅のため、施工途中での幅員変化に対応できず、記録された箇所を物理的に転圧しない(出来ない)箇所が発生する。
- ② アスファルトフィニッシャの施工速度が遅く、進行方向が認識できなくなり、実際の施工と異なる箇所に敷きならしの記録がされる。

これらに対応すべく、GNSS アンテナを2個にして常時進行方向が認識出来るようにし、さらに設置位置をスクリーンの左右端部にすることにより、施工幅員の変化に対応できるようにした。スクリーンの伸縮と同期してリアルタイムにモニタ画面にも反映し(図-12 参照)、同時に座標も記録でき

ることから、施工履歴データとしての活用も期待できる。

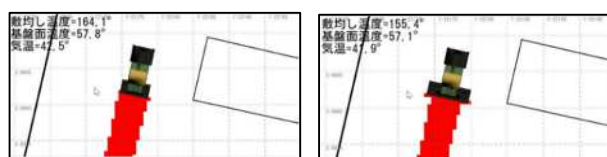


図-12 スクリーン幅の変化とモニタ画面

7. まとめ

開発システムの活用で得られる効果を、以下に整理して列举する。

- ① 敷きならし温度、転圧温度、転圧回数を自動で取得・記録でき、自動で転圧機械のオペレータに転圧指示が行えるため、これに要する管理要員を省人化(1~2人⇒ゼロ)できる。
- ② 温度管理帳票と転圧回数管理帳票が自動で作成されるため、事務所での作業時間が短縮され省力化(1時間⇒5分)できる。
- ③ 敷きならし温度と転圧温度のエビデンスを面的に取得し、これまで確認できなかった内容が可視化できる。
- ④ 重機と人との分離が可能となり、安全性が向上した。
- ⑤ 施工幅員が記録できることから、施工履歴データとしての活用も期待できる。

以上より、敷きならし温度と転圧温度の現場温度管理の自動化により省人化・省力化を図りつつ、安全な現場管理への変革に取り組んだことで、従来作業が改善できることを確認できた。

8. おわりに

AI, ICT, IoT 機器は日々進化しており、これらを組み合わせることにより新たな手法を生み出せるものと感じている。しかし、道路舗装は供用中の道路施工が主であり自動化へのハードルは高い。生産性向上を図るためには、ひとつひとつの作業を着実に自動化し、さらに社会実装へつなげていくことが肝要と考える。今後も確かなものづくりに貢献するとともに、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現を目指していきたい。

参考文献1): National Asphalt Pavement Association: Cold Weather Compaction, 1998