



センシング技術とAI推論による 現場温度管理の自動化

(株)NIPPO 総合技術部 生産機械室 梶原 覚
 // 竹内 伸
 // 相田 尚
 (株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 門田 誠也

1 はじめに

近年、ICTと、IoT機器、AIなどを組み合わせて、様々な分野において省人省力化を図る取り組みが行われている。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も、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。

しかし、実際の舗装現場での敷きならし温度や転圧温度などの現場での温度管理作業は、時間的、空間的な制約が多い中で行われる場合が多く、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、敷きならし温度と転圧温度の現場温度管理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 現場温度管理の方法

敷きならし温度と転圧温度の現場温度管理は、敷きならされたアスファルト混合物に温度測定用センサを挿入して人力で測定する必要があり、写真-1に示すように専属の温度管理員が施工箇所の端部にしゃがんだ状態で測定する方法が一般的である。なお、施工中の転圧機械と近接した場合には重機の死角に入ることとなり、安全確保の観点からも改善が必要である。ここで、敷きならし温度と転圧温度の取得方法を整理して以下に列挙する。

① 温度管理員は、重機と人とを分離するために温度



写真-1 転圧温度の管理状況

管理を行う作業範囲を明示し、転圧機械のオペレータに温度測定を行うことを伝える。

- ② 温度管理員は、敷きならし温度または転圧温度を測定し、取得した温度データを野帳などへ記録する。
- ③ 温度管理員は、転圧温度の取得が完了次第、転圧機械のオペレータに転圧する範囲を指示する。
- ④ 温度管理員は、事務所にて取得した温度データを整理し、温度管理帳票を作成する。

これら①～④の作業を自動化できれば生産性向上が図れると考え、検討することとした。

3 現場温度管理の自動化

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ものである。

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アスファルト混合物の内部温度を予測することで、現場温度管理が自動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



内部温度（敷きならし直後～100℃低下まで）

図-1 現場実証データの収集状況

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図-1に示す。

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 人為操作による相関性の解析

現場実証データの、それぞれのデータ間における相関性を人為操作により解析した。なお、相関性を求める際、アスファルト混合物の温度低下は、測定開始時と測定終了時の温度差を測定時間で除した値を、温度の低下速度と定義して解析した。

最初に、内部温度の低下速度と、7項目の施工環境パラメータとの関係を解析した。この結果、内部温度の低下速度との相関係数は、基盤面温度が0.934、気温が0.728、舗装厚さが0.699と強い相関が確認された。

次に、表面温度から内部温度が予測できないかと考え、これら2つの相関性を確認することとした。しかし、これらの温度低下速度の相関係数は0.050と小さく、相関性は確認できなかった。また、7項目の施工環境パラメータとの関係においても、相関性を確認できる項目はなかった。これより、転圧機械に設置した放射温度計やサーモグラフィによる表面温度では、転圧時の内部温度を管理することは困難と判断した。

3-4 機械学習による分析

3-3の従来手法による解析においては、基盤面温度や気温に一定の条件を与えるなどの操作を行う必要があった。これに対しAIに機械学習させる際は、このような操作を加えることなく、内部温度の低下速度と7項目の施工環境パラメータをそのまま使用し、相関性を解析した。この結果、図-2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-2 機械学習に基づく相関性ヒートマップ

3-5 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。

3-6 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】

$$\text{予測内部温度} = (T_0 - (a+b/2)) \times \text{EXP}(c \times d) + (a+b/2)$$

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。

3-7 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)	予測値とのずれ量 (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(R2score)は高い値(1.000が最高値)を示しているが、予測値とのずれ量(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 予測による現場温度管理システムの開発

2.に示した現場温度管理の方法を改善すべく、予測による現場温度管理システム(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 人力作業を排除する。
- ③ 転圧機械のオペレータに転圧範囲を自動で指示する。
- ④ 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、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

開発システムでの各種温度の取得内容を、以下に列挙する。また、一連の取得イメージを図-3に示す。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敷きならした段階で、アスファルト混合物の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動作

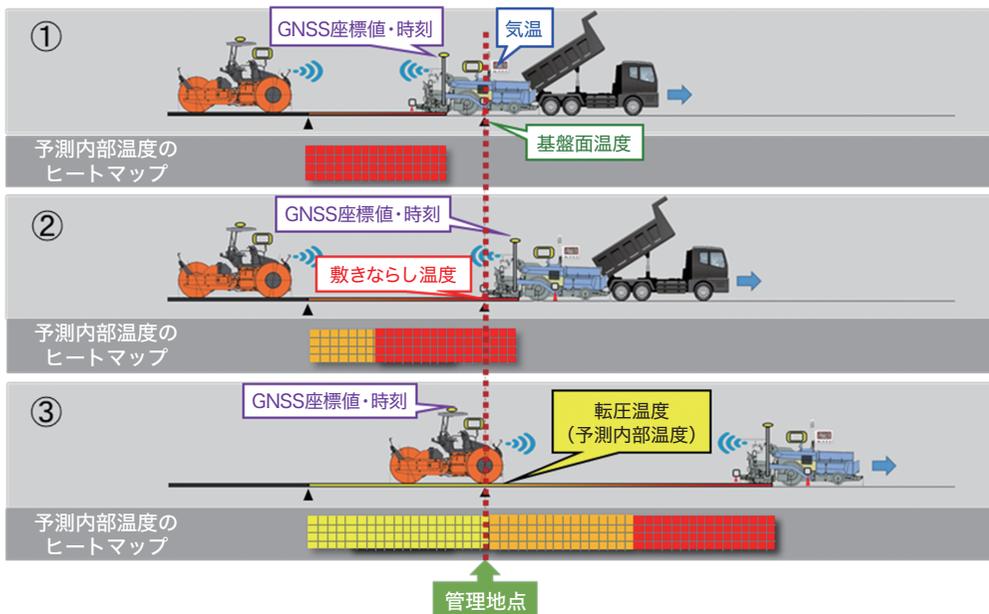


図-3 開発システムの動作イメージ

を以下に列挙し、機器の設置状況を図-4に示す。



図-4 アスファルトフィニッシャーへの機器の設置状況

- ① 気温センサを運転席付近に設置し、気温を測定する。
- ② 基盤面温度測定用センサをホッパ後方に設置し、基盤面の温度を測定する。
- ③ GNSSアンテナを車体上部に設置し、アスファルトフィニッシャーが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をスクリッド後部に設置し、アスファルト混合物の敷きならし温度を取得する。
- ⑤ GNSS受信機兼モニターをアスファルトフィニッシャーの車体側面に設置する。
画面上には図-5に示すように、GNSSアンテナで

測定したアスファルトフィニッシャーの自己位置、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-5 アスファルトフィニッシャーに設置したモニタの画面

なお、ヒートマップは50cmメッシュの集合体で表現される。また画面上には、無線により共有された転圧機械の位置も簡易表示される。

- ⑥ 無線機を車体上部に設置し、取得した各種情報を転圧機械と共有する。また同時に各種情報は、インターネットを通じてクラウドに送信される。

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動作を以下に列挙し、図-6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 無線機を車体上部に設置し、アスファルトフィニッシャーで取得した各種情報を受信する。



図-6 転圧機械への機器の設置状況

- ② GNSSアンテナを車体上部に設置し、転圧機械が転圧した位置(座標)を測定する。
- ③ GNSS受信機兼モニタを運転席前方に設置する。

画面上には図-7に示すようにGNSSアンテナで測定した転圧機械の自己位置と、アスファルトフィニッシャから受信したアスファルトフィニッシャの位置、そして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。

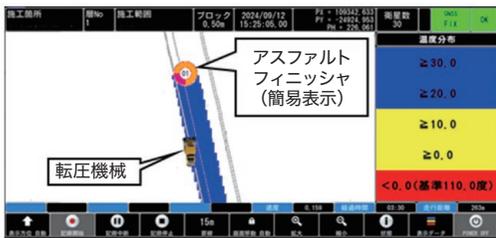


図-7 転圧機械に設置したモニタの画面

転圧機械が敷きならし範囲に侵入し、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。

なお、図-8に示すように、予測内部温度が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、転圧機械オペレータに転圧指示を行う。

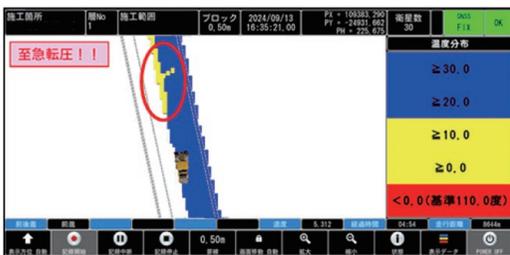


図-8 転圧機械に設置したモニタ上の警告表示

5 実現場における開発技術の検証

5-1 敷きならし時の内部温度の自動取得方法の検討

敷きならし温度の取得を接触式の温度センサで実施した結果、アスファルト混合物がセンサに付着、堆積し、温度を正確に取得できなくなることを確認した。

このため、非接触で対応するべく、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)を750個取得した。取得状況を図-9に、検証した結果を図-10に示す。



図-9 敷きならし直後の表面温度と内部温度測定状況

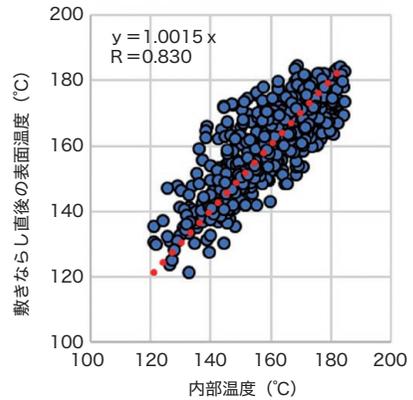


図-10 敷きならし直後の表面温度と内部温度の関係

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。このため、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、敷きならし温度を取得することが可能と判断した。

5-2 予測内部温度と実測内部温度の比較

開発した技術を検証するため、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-11に示す。

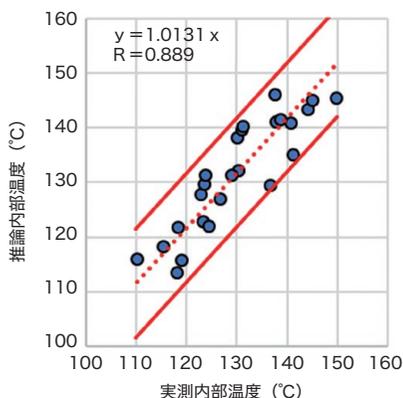


図-11 予測内部温度と実測内部温度の関係

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。

5-3 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-12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わずか5分であった。



図-12 帳票へのヒートマップ出力結果

6 開発技術の効果

従来方法では、敷きならし温度と転圧温度の管理および転圧指示を行う温度管理要員を専属で1～2名配置していた。これに対し、開発システムを活用することで、これらの管理に要する要員をゼロに省人化できる。また、作業終了後に事務所で実施していた帳

票作成作業が自動化されるため、大幅に省力化できる。なお、開発システムの設置と回収および管理帳票の出力は日合計1時間以内で行えるため、事前に調査した従来管理の日合計5.5時間と比較し、8割以上の生産性向上効果が期待できる。

7 まとめ

開発システムの活用で得られる効果を、以下に整理して列挙する。

- 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できる。
- ③ 省人化と省力化により、生産性が8割以上向上できる。
- ④ 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。
- ⑤ 重機と人との分離が可能となり、安全性が向上した。

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、道路舗装分野における生産性向上はまだ道半ばであり、2040年度までに建設現場の省人化を少なくとも3割削減するためには、一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、建設現場の働き方改革や生産性向上に挑戦していきたい。

【参考文献】

- 1) National Asphalt Pavement Association: Cold Weather Compaction, 1998