

道路盛土構造による冷気流停滞予測シミュレーション

THE NUMERICAL SIMULATION OF PREDICTING COLD AIR DRAINAGE STAGNATED BY THE ROAD EMBANKMENT

田代広行*・黒崎靖介**・杉山 実***・高橋 秀*
 Hiroyuki TASHIRO, Yasusuke KUROSAKI, Minoru SUGIYAMA and Shu TAKAHASHI

The thermal fluid numerical simulation was applied to predict the drop of temperature due to cold air stagnated by the road embankment. The express motor way is planned to cross the valley in the mountainous region with embankment. However, the embankment can inhibit air drainage and increase the risk of cold injury such as spring frost on paddy and other crops because the dense cold air moving down on the slope is sustained there. Therefore, the box culverts were designed to install on the embankment to ease the drop of temperature by venting the cold air.

Key Words : road embankment, cold air drainage, cold air lake, radiative cooling, numerical simulation, frost damage, culvert

1. はじめに

建設予定の自動車道は、標高 300m 級の山の裾野をとおり、一部で谷を横断する計画となっている。その谷を横断する道路構造は盛土で計画されているため、山を流下する冷気流が盛土周辺に停滞し、盛土周辺で気温が低下することが考えられる。今まで以上に気温の低下が起これば、盛土周辺に広がっている田畑で耕作されている農作物に影響を及ぼすことが懸念される。もし、農作物への影響が予測されれば、温度低下を緩和する対策を講じる必要がある。

そこで、盛土計画地の土地利用状況と耕作されている農作物について調査を実施すると共に、対象地区の盛土周辺への冷気流停滞による温度低下量を数値シミュレーションにより予測し、農作物への影響を評価した。

2. 冷気流の発生と道路盛土構造による冷気流停滞

(1) 一般的な冷気流の発生と冷気湖の形成¹⁾

晴天夜間に放射冷却によって地表面が冷却されると、これに接する空気が冷やされて重くなり、冷気が地表に集積し、地表面付近の気温が上層の気温より低い逆転型の温度分布を示す。地表面に傾斜があると、冷気は斜面上の接地層を傾斜に沿って、重力に従い流下する。この冷気の流れを一般に冷気流と呼んでいる。冷気流は規模が小さい場合、小さい冷気塊として間欠的に斜面を流下する。冷気流は地形の窪み、

すなわち、谷間や盆地底などに流れ込み溜まる。これを通常、冷気湖と呼ぶ。図-1 に菅平盆地の冷気流の発生と冷気湖の形成例について示す。冷気湖は冷気の流出口がない四方囲まれたところに発生しやすく、その最大範囲は標高差から推定される。冷気流には次のような特徴がある。

1) 間欠性

山地斜面では、夜間に地表面の障害物・植生などによる摩擦にうちかって冷気塊が重力に従って流れ出すまで、冷気塊が成長するのに時間がかかるため、冷気塊の動きである冷気流の発生は夜間に 3~4 回である。これは冷気を集める流域の面積や天候にもよるが、日没後から 24 時までには 1~2 回、24 時から日の出までに 2~3 回のことが多い。最後の冷気の流出が夜明け前の最低気温をもたらす。

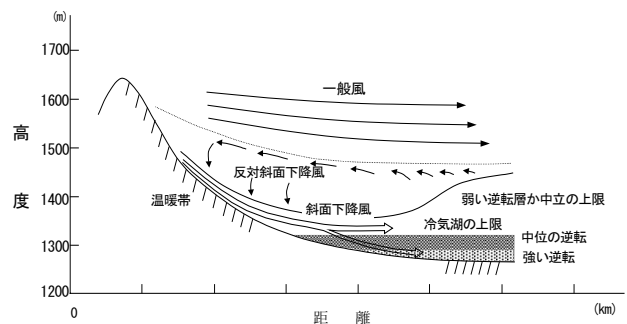


図-1 菅平盆地の冷気流と冷気湖のモデル

* 中央研究所 総合技術開発部
 ** 首都圏事業部 環境部
 *** 首都圏事業部 国土保全部

2) 冷気流と気温

冷気流は冷気塊の動きであることから、冷気流がくれば、流れてくる以前より接地層の気温は下がる。また、冷気流が流れなくなったとき、すなわち、冷気塊が流れ去った後には上空または周辺から暖気が入りこんでくるので気温は上昇する。

3) 冷気流の流れ

冷気流は地形のわずかなりとも低いところを重力に従って流下する。しかし、谷が曲流した部分で川の水と同じように流れの当る斜面では谷壁斜面を少し昇ることもある。また、支谷が主谷へ合流したところでは反対側斜面に少し昇る場合もある。冷気は高度の低い部分に溜まるが、多少高い地形(峠など)を越して谷を流下することもある。

(2) 道路盛土構造による冷気流停滞

日没後の山麓部、斜面部で放射冷却により冷やされた冷気流が重力によって斜面を流下し、地表面上に道路の盛土構造があると冷気湖が形成される(図-2)。道路盛土の周辺に形成される冷気湖は、両側が山に囲まれた谷間で形成され易い。谷間には斜面からの冷気が集まり、冷気層は厚くなる2)。

冷気湖について行われた実測例のほとんどは盆地地形である。盆地地形では、盆地底から尾根筋までの高さは 100~1,200m であるのに対し、道路の盛土高は通常 30m 以下である。盆地であれば、盆地を囲むあらゆる方向の斜面から冷気が流入するのに対し、道路盛土の場合は法面が自然斜面に比べ小さく無視できるので、一方の斜面からの流入となる。盆地では、流れてきた冷気が溜まり、冷気湖の深さ(逆転層の厚さ)が増していくが、道路盛土では盛土高まで冷気が溜まると、それ以降は冷気湖の上を通過し、盛土を超えて流下する。

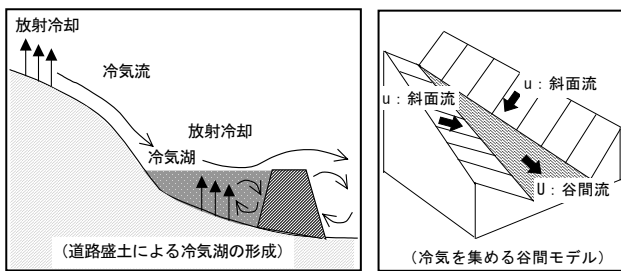


図-2 道路盛土による冷気流停滞と谷間を流れる冷気塊

3. 対象地区の地形と気象条件

対象地域周辺の地形は図-3 に示すように、東が内陸部、西が海域になっており、内陸部には標高 300m 級の山がそびえ立っている。対象地区はその山の裾野に位置しており、冷気流が発生し易い地域といえる。

対象地区周辺における気象の特徴について、近隣の一般環境大気測定局(以降、測定局という)の風向・風速(観測高

さ:7m)、気温(観測高さ:5m)データをまとめると表-1 のようになる。

凍霜害が起こる可能性のある時期(地表面の気温が氷点下になる時期)は、10月下旬から5月上旬までと考えられる。夜間、冷気流が発生する時間帯の風の流れは谷筋地形に沿って、標高の低い海の方へ流出しているものと考えられる。また、風速は静穏に近い弱い風となっている。

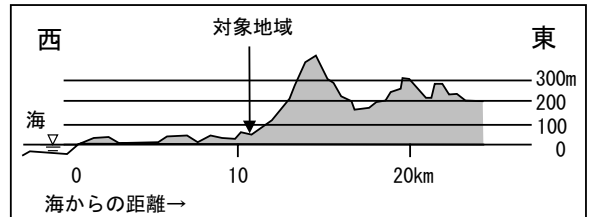


図-3 対象地域の地形断面図

表-1 対象地域の気象条件

気象要素	特徴
気温	<ul style="list-style-type: none"> 最低気温の出現時刻は、春季は朝 5 時から 7 時頃、夏季は朝 5 時頃、秋季は朝 5 時~6 時頃、冬季は朝 7 時頃となっている。
風向 風速	<ul style="list-style-type: none"> 夜間、風速が 1m/s 以下(以下弱風とする。)の場合の風向は、谷筋地形に沿って内陸から海へ吹く風が卓越している。 旬毎の最低気温出現時における風速値の 90% 以上が 2.0m/s 以下となっている。静穏に近い風速 0.5~1.0m/s の出現頻度が、最も高くなっている。

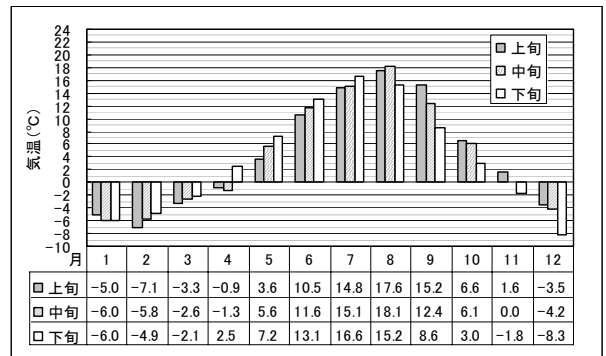


図-4 期間最低気温(1987年~1998年)

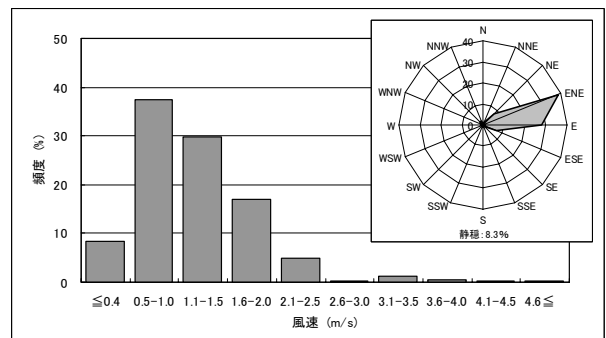


図-5 日最低気温出現時の風向と風速

4. 農作物に対する冷気流停滞の影響

道路盛土による冷気流停滞がもたらす温度低下を数値シミュレーションで予測し、農作物への影響を評価するために、予測の対象期間、対象農作物および農作物への影響形態を調査検討した。また、冷気流停滞による温度低下の緩和対策の必要性を判断する指標を検討した。

(1) 対象期間

道路盛土に伴う冷気流の停滞によって、最低気温や平均気温の低下が予想される。最低気温が低下すれば、春と秋の霜の発生時期において、霜害により作物収量は著しく減少する。一方、平均気温の低下は作物の生長速度の低下を招き、最終的に収量の減少に繋がると考えられる。しかし、冷気流停滞は夜間および早朝の一時的なものであるため、その気温低下は農作物の成長期間における平均気温の低下に大きく寄与するとは考えにくい。そこで、予測対象期間を対象地区の農作物の栽培状況も考慮し、春先の晩霜による被害が発生する期間とした。一般に降霜は気温が 3.0°C 以下(気温の一般的な観測高さ)で起きる可能性がある³⁾。対象地区に最も近い測定局における過去11年にわたる最低気温の記録は、1993年5月上旬で 3.6°C (図-4参照)であり、この時期まで晩霜が降りる可能性があるため、予測対象時期は4月~5月上旬とした。

(2) 対象農作物

対象地区の農地(合計7.5ha)のうち、80%以上が水田、その他は休耕田、畑となっている。したがって、道路建設に伴う冷気流停滞の影響を受ける農作物は主に稲である。しかし、今後水田が畑あるいは果樹園に転換されることも考慮し、この地方で一般に栽培されている野菜、果樹の中から、春に霜害を被る可能性のある農作物も選定した。その結果、4月~5月上旬の期間において冷気流停滞による異常低温の影響を受ける農作物を稲、果樹(ナシ、イチジク)とした。

(3) 稲、果樹の霜害発生限界気温とその発生時期

この地方の田植えは4月下旬から5月上旬に行われ、田植え直後の苗は低温に弱いので、降霜があれば苗に大きな被害が生じると考えられる(図-6)。そこで、この時期の稲の霜害が発生する限界気温は降霜発生可能な気温である 3.0°C とした。

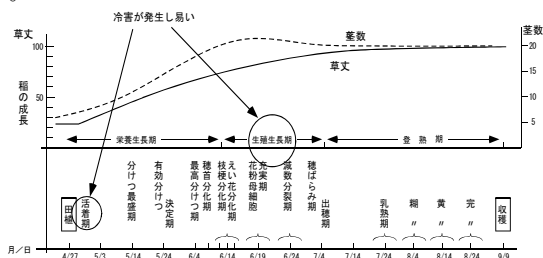


図-6 稲の成長と冷害が発生しやすい時期

4月は果樹の開花期に相当し(図-7, 図-8)、ナシの霜害が発生する限界気温を -1.8°C (^{6),7)}とした。一方、イチジクの発芽はナシの開花期より遅く4月下旬で、発芽後、葉が出始めた時期(4月下旬~5月上旬)が低温に弱いと考えられる。したがって、イチジクの霜害が発生する限界気温を稲と同様に 3.0°C とした。

(4) 冷気停滞緩和対策の評価指標

5月上旬の最低気温は最近11年間で 3.6°C である。仮にこの時、盛土により冷気が停滞し 0.6°C の低下があったとすれば、気温 3.0°C となり霜が降りて、田植えが完了したばかりの稲をはじめとする作物に大きな被害を与えた可能性がある。そこで、冷気対策を施し、気温の低下量を 0.5°C 以下に抑えることができれば、この被害は発生しないと考えられる。一方、冷気停滞対策の対象農作物をナシとした場合、開花期である4月上・中旬の気温と果樹の霜害発生限界温度の関係が問題となる。測定局における4月の最低気温は最近10年で -1.3°C である。一方、ナシの開花期の霜害発生限界温度 -1.8°C とすると、仮にこの時、盛土により冷気が停滞し 0.5°C の低下があったとすれば、気温は -1.8°C となり霜害が発生する。この場合、冷気対策を施し、気温の低下量を 0.5°C 未満に抑えることができれば、この被害は発生しないと考えられる。

これらから、冷気流停滞による温度低下の緩和対策を講じる必要がある温度低下量を 0.5°C 以上とした。

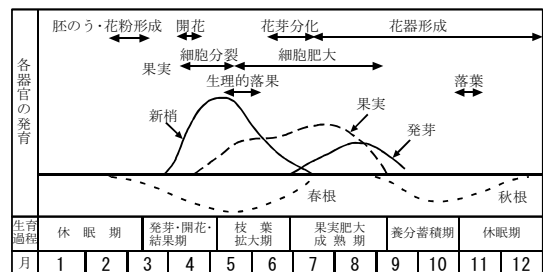


図-7 ナシの生育過程⁵⁾

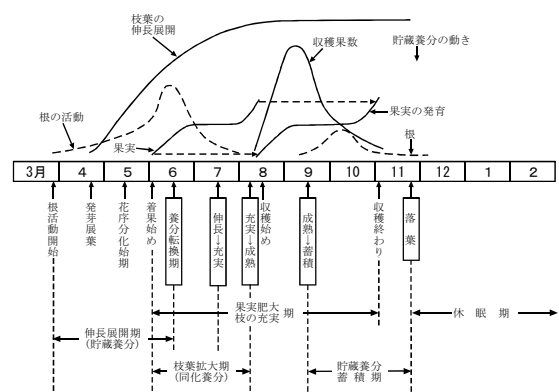


図-8 イチジクの生育過程^{8),9)}

5. 冷気流停滞予測シミュレーション

冷気流の3次元数値シミュレーションにおける支配方程式として、非圧縮性(密度 ρ 一定)の連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を用い、乱流モデルには一般的によく使用される「 $k-\epsilon$ 2 方程式モデル」を用いた。また、温度差による浮力はブジネスク近似している。これらの方程式を有限体積法で離散化したプログラムで解析した。

表-1 冷気流停滞シミュレーションの基礎方程式

連続の式	(1)
平均流の輸送方程式	(2)
エネルギー方程式	(3)
乱流エネルギー k の方程式	(4)
乱流消失率 ϵ の方程式	(5)

ただし、
 x_i :座標 u_i :流体速度 t :時間
 ρ :流体密度 p :流体圧力 μ :粘性係数
 μ_t :渦粘性係数 β :体膨張率
 P_r :プラントル数 P_{rt} :乱流プラントル数 (=0.9)
 k :乱流エネルギー ϵ :乱流消失率

(1) 境界条件

1) 流入面条件(風速条件)

対象地域の静穏時における風速分布が得られていないため、既往事例を参考に100m高さで0.5m/sとし、鉛直方向の分布は1/10乗則に従うものとした。

$$U(z) = U_a \left(\frac{z}{Z_a} \right)^{1/10} \quad (6)$$

ただし、

- $U(z)$:任意高さにおける風速
- Z_a :基準高さ ($Z_a=100m$)
- U_a :基準高さにおける風速 ($U_a=0.5m/s$)
- z :地表面からの鉛直高さ

(温度条件)

既往事例を参考に0~10m高さの温度 T は地表で-3℃、高さ10mで0℃となるように次式により与えた。10mから上空の解析領域境界までは一様に0℃とした。

$$T(z) = 0.3 \Delta z - 3 \quad (7)$$

ただし、

- $T(z)$:高さ z での温度
- z :地表面からの鉛直高さ (0~10m)

2) 地表面条件

(地表面抵抗)

次式で表される対数則で与えた。

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

ただし、

- u_* :摩擦速度
- κ :カルマン定数
- z :地表面からの鉛直高さ
($z=1/2h$, h :地表面に接する第一要素の高さ)
- z_0 :地表面の粗度長 ($z_0=0.20m$)

(大気と地表面の熱伝達)

地表面の温度を-3.0℃とし、大気の熱交換は温度対数則による熱伝達式で与えた。

3) 側面・上空間条件

フリースリップ条件とした。

4) 流出面条件

自然流出条件とした。

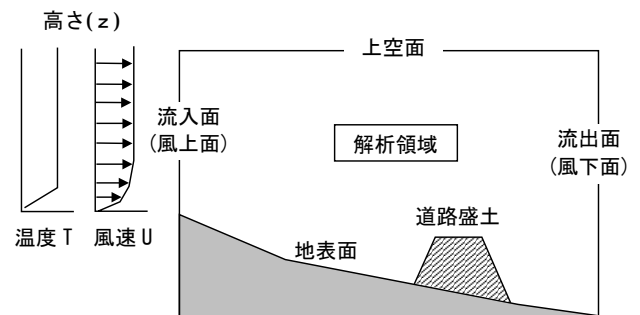


図-9 冷気流停滞シミュレーション概要

5) メッシュ分割

水平方向、鉛直方向ともに道路盛土周辺を1m間隔で細かくメッシュ分割し、道路盛土から遠ざかるに従いメッシュ間隔を粗くしている。

6) 計算方法

計算は盛土周辺の温度が低下し定常になるまで行った。

6. 道路盛土周辺の温度低下量と緩和対策の検討

(1) 停滞解析モデル

冷気流予測の対象地区の3次元解析モデルを図-10に示す。解析モデルは家屋などの建築物も考慮している。この地区の谷筋は、計画道路と平行に谷筋が走っており、最終的に各谷筋が合流している。盛土建設によって、これらの谷筋を分断することになる。解析範囲は谷筋を囲む横1,630m×縦450mとした。

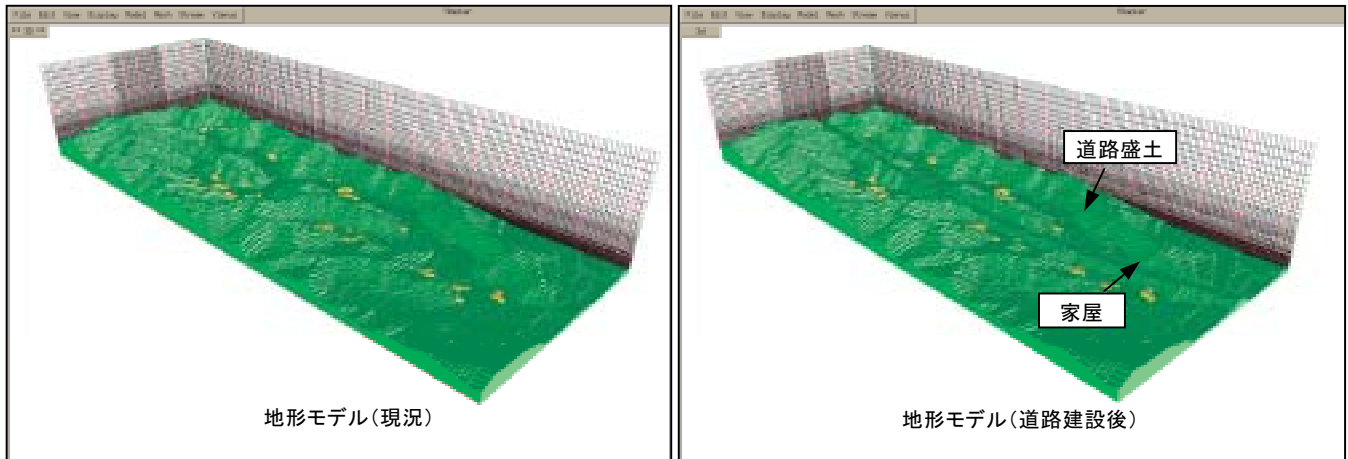


図-10 対象地区の地形と解析地形モデル

(2) 道路盛土周辺の温度低下量

図-11 に地上 1.0m の温度分布を示す。図-12 に各谷筋の中で最も温度が低下する地点(図-11 中に示す赤矢印の先端付近)の鉛直温度分布を示す。

1) 現況の温度分布

谷筋 No.1 と No.2 が合流する付近(合流部 A)、谷筋 No.1 と No.3 が合流する付近(合流部 B)で温度が低くなっている。冷気の流れは谷筋に沿って標高の低いところへ流下している。谷筋 No.1 の合流部 A 付近から合流部 B へ向う流れは、流下するにつれて速くなっている。

2) 道路盛土建設後の温度分布

現況に対して谷筋 No.2 内が最も温度が低下しており、次いで谷筋 No.3 となっている。谷筋 No.1 内では、合流部 A の盛土にボックスカルバートが設置されているが、谷筋 No.2 からの冷気流が盛土によってほとんどが塞ぎ止められるため、谷筋 No.1 へ流れ出す冷気量が少なくなり、谷筋 No.1 内の合流部 A から合流部 B 間の温度が現況より高くなっている。

合流部 B 付近では道路の盛土構造によって冷気が溜まりやすい地形になったため、多少温度が低下している。谷筋 No.2 内では冷気の流れが塞ぎ止められ、谷筋全体で冷気が停滞し温度が低下し、地点 No.2-1 では地上高さ 3m で温度低下量が 0.5℃となっている。谷筋 No.3 内の盛土周辺で冷気の流れが塞ぎ止められ、冷気が停滞し多少温度が低下している。

以上の結果から、谷筋 No.2 内の地点 No.2-1 では、地上高さ 3m で温度低下量が 0.5℃となっており、稲等の背丈の低い農作物の場合は、冷気流の停滞による霜害などの可能性は

低いと考えられるが、ナシ等の背丈の高い果樹に対しては、霜害などの悪影響が起こる可能性があるため、温度低下を緩和する必要があると考えられる。

(3) 温度低下緩和策の検討

谷筋 No.2 内の温度低下を緩和する対策は、地点 No.2-1 と合流部 A に設置しているボックスカルバートの位置、冷気の流れを勘案し、ボックスカルバートの断面積(当初計画:30 m²)を拡大することとした。そこで、次のような解析手順で温度低下の緩和に必要な断面積を予測した。

- ① ボックスカルバートの断面積を 40m² で解析した(第 1 案)。谷筋 No.2 内で若干温度低下が緩和されたが、地点 No.2-1 の地上高さ 3m で温度低下量は 0.5℃であった。
- ② ボックスカルバートを断面積 100m² と十分大きくとり解析した(第 3 案)。地点 No.2-1 で十分に温度低下が緩和された。
- ③ 第 1 案と第 3 案から温度低下の緩和に必要な最小限の断面積を 50m² と想定して解析した(第 2 案)。その結果、第 1 案よりも冷気停滞の解消効果があり、地点 No.2-1 の地上高さ 3m での温度低下量は 0.4℃となった。

谷筋 No.1 内では、ボックスカルバートの断面積の拡大に伴って、合流部 A のボックスカルバートの下流領域において、当初計画に比べ温度の低下が見られるが、現況より温度は高く、また、合流部 A から合流部 B の地上高さ 3m 以内の温度低下量は 0.2℃以下である。

よってボックスカルバートの断面積が 50 m^2 以上であれば、地上高さ 3m 以内では、温度低下量を 0.4°C 以下に抑えることが可能となる。

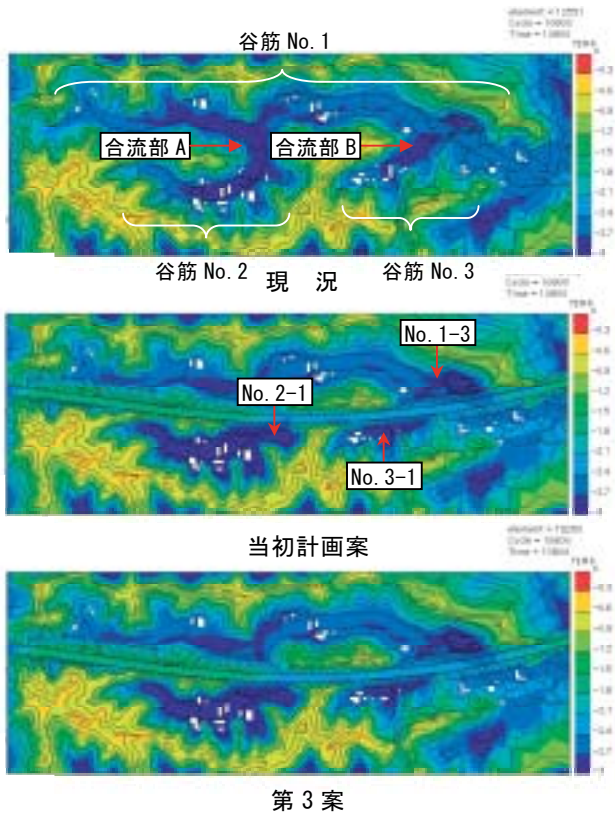


図-11 温度分布(地上高さ:1m)

7. おわりに

予測結果は本解析と同規模の道路盛土周辺における風向・風速、温度の実測例や道路盛土の建設前後における温度分布、温度低下量の数値解析事例と比較してほぼ妥当なものと考えられる。しかし、冷気流停滞予測に用いた予測条件は対象地区の実測結果から得られた風向・風速、温度データではなく、近隣の測定局データと既往事例を参考にしているため、対象地区において現況の実測調査を行い、検証をすることがより望ましいと考えられる。

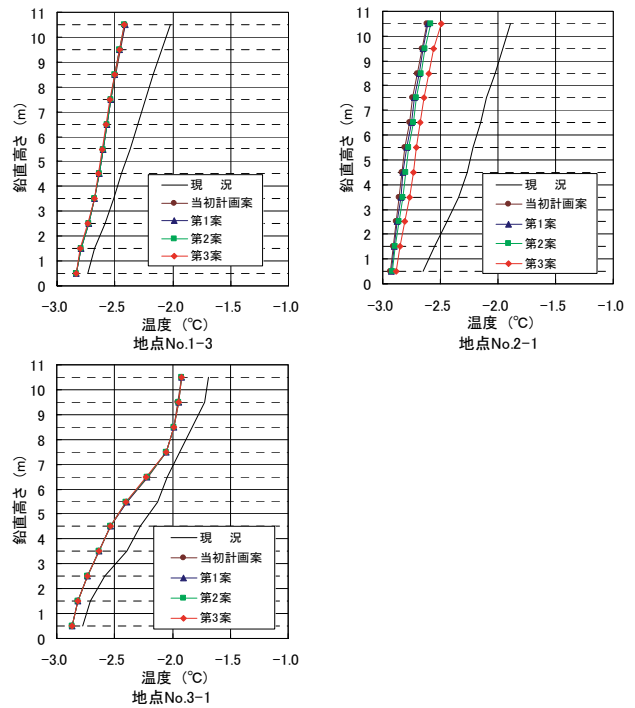


図-12 鉛直温度分布(地点 No. 1-3, No. 2-1, No. 3-1)

参考文献

- 1) 昭和 54 年度全国大会シンポジウム「霜害と夜間の気流」要旨、農業気象、Vol.35, No.2, pp103-111, 1979
- 2) 近藤純正: 地形と地表面性質が夜間の斜面風・山風・盆地大気の冷却に及ぼす効果(1)、天気、Vol.31, No.10, pp.625-632, 1984
- 3) 気象の辞典: 平凡社、pp.265, 1999
- 4) 社団法人農業水利実習ガイド編集委員会: 実験実習シリーズ No.2 農業水理学実習ガイド、pp.58-59, 1992
- 5) 社団法人農村漁村文化協会: 加除式農業技術大系 果樹編 4 ナシ 西洋ナシ 基礎編、1993
- 6) 羽生寿郎、中川行夫、山本良三、坂上 勉、矢吹万寿、堂腰 純: 農業気象学、文永堂、pp.118-158, 1978
- 7) 社団法人農村漁村文化協会: 加除式農業技術大系 果樹編 4 ナシ 西洋ナシ 基礎技術編、1997
- 8) 社団法人農村漁村文化協会: 加除式農業技術大系 果樹編 5 クレイジク クルミ キウイ 基礎技術編、1990
- 9) 社団法人農村漁村文化協会: 加除式農業技術大系 果樹編 5 クレイジク クルミ キウイ 精農家のイチジク栽培技術、千葉・岡田 5、1983