

最終処分場における地中温度分布を 考慮した埋立ガス測定点の決定方法 —クローズドシステム処分場での検討事例—

垣内 大輝¹・佐藤 昌宏²・藤山 淳史³・石井 一英⁴

¹ 非会員 北海道大学修士課程 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: daikaki-1995317@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: satomasahiro@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学特任助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: fujiyama@eng.hokudai.ac.jp

⁴ 正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

最終処分場内の埋立ガス放出量は空間的に不均一であるため、空間不均一さを考慮し、省力なモニタリング方法が必要となる。そこで本研究では、廃棄物が分解される際に地中温度が上昇することに着目し、廃棄物層の地中温度分布を考慮した埋立ガス測定点決定手法の有効性を検討した。クローズドシステム処分場を密閉した状態で CO₂ 濃度の時間変化を測定した結果、全体ガス放出量(測定値)は、0.564 mol/min と算出された。一方、地中温度分布を考慮して測定点を設定し、静置チャンバー法および空間補間(IDW)により推定した全体ガス放出量は、高温領域を 6 m よりも 2 m の格子状に測定点を設定した場合に測定値に近くなった。

Key Words : *Monitoring of landfill gas, Closed system final disposal facility, Emission of landfill gas, Underground temperature*

1. 研究の背景と目的

最終処分場では、廃棄物から発生する汚染物質が人間の生活環境に影響を与えないように、浸出処理や廃棄物の貯蔵構造維持のような維持・管理がなされる。このような維持・管理は、廃棄物が安定化(最終処分場を維持・管理せずとも廃棄物が環境に影響を与えない状態)するまで行われる。埋立地の安定化は、埋立ガス放出量や浸出水の汚染濃度が基準を満たすか、定期的なモニタリングによって判断される。処分場内における廃棄物の組成や量は、空間的に時間的に不均一であるため、廃棄物分解の進

行は空間的に異なり、結果として埋立ガス放出量は空間的に不均一になると考えられる。そのため、埋立ガス放出量の空間的な不均一さを考慮した埋立ガスモニタリングが必要である。

埋立地の空間的な不均一さを考慮し、埋立ガスモニタリングをする上で、以下の 2 点が重要である。1 点目は埋立ガス放出量の大きい領域、すなわち、安定化の遅れている領域を特定することである。2 点目は処分場全体埋立ガス放出量を把握し、処分場全体で平均的に安定化が進んでいるのか判断するこ

表-1 R一般廃棄物最終処分場概要

埋立面積	900 m ² (縦 45 m×横 20 m)
建屋容積	6,184 m ³
埋立廃棄物	焼却残渣, 不燃残渣物
埋立期間	平成 14 年 2 月～埋立中

とである。処分場全体のガス放出量は、微気象学的手法やトレーサーを用いた手法を適用した例¹⁾²⁾があるものの、これら単独では、ガス放出量が多い領域を特定することができない。一方、Mohammed F. M. Abushammala ら³⁾は特定の地点でチャンバー法を用いて地表面のガス放出量を測定し、空間補間法により全体のガス放出量を推計している。この手法においては、局所的にガス放出量が多い領域を特定することも可能であるが、地球統計学的手法により空間推計を行うには少なくとも 100 地点での測定が必要であると言われている⁴⁾。しかし、埋立ガスモニタリングにおいては、時間的・物理的制約上、埋立ガスモニタリング地点（以下、測定点）は少ないほど良い。Ishigaki ら⁵⁾は、測定点が少数であっても、地表面ガスフラックスと地中温度の相関を明らかにし、地球統計学的手法で把握した地中温度分布から全体のガス放出量を明らかにする手法を提案した。地中温度分布を活用することは有効であるものの、合理的な測定点の決定手法は明らかにされていない。

本研究では、最終処分場の地中温度分布を考慮した測定点の決定手法の有効性を明らかにし、より少ない測定点で、埋立ガス放出量の大きい領域および処分場全体埋立ガス放出量を把握する方法を提案する。

2. 研究手法

(1) 対象処分場

R 一般廃棄物最終処分場は、準好気性埋立クローズドシステム処分場である。処分場の概要を表-1 に示す。

処分場の外に浸出水処理施設があり、そこで浸出水を処理している。また、処分場内部の地形は図-1 のように入口から奥に向かって坂になっており、埋立地表面に焼却残渣や不燃残渣物がむき出しになっている。基本的に入口側の方に新しい廃棄物が埋め立てられている。

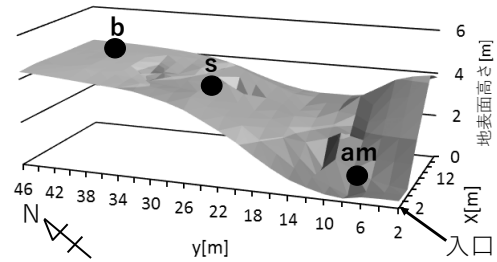


図-1 処分場地形図および建屋内ガス濃度測定地点

ガス抜き管は東側の埋立層の壁面に 2 本、西側に 1 本設置してある。ガス抜き管の末端は、建屋外に出ているが、西側のガス抜き管に関しては、処分場内部でガス抜き管に亀裂がある。また、処分場内部にモニタリング管が 1 本、排気口・吸気口は東側と西側にそれぞれ 2 つずつ、窓は合計 19 個、搬入用のシャッターは 3 つ設置されている。

(2) 処分場全体の埋立ガス放出量の測定

クローズドシステム処分場の建屋空間をチャンバー容器と見立てて、地表面全体からの埋立ガス放出量を測定するために、建屋内の埋立ガス濃度を経時的に測定した。測定手順を以下に示す。

- ① 処分場内の CO₂ 濃度を下げるためにシャッターを開けて処分場を換気した。
- ② 吸気口・シャッターを内側から、ガス抜き管を外側から目張りした。なお、排気口および窓については作業効率上目張りを行わなかった。
- ③ 可搬型ガス測定器 (CGT-7000, SHIMADZU) を用いて、空間的にバランスが取れる 3 点 (b, s, am, 図-1 参照) で地表面からの高さ 1 m および 5.2 m (建屋高さ) の CO₂ 濃度を測定した (約 30 分間隔)。

埋立ガス濃度は、地表面からの埋立ガス放出量だけでなく、建屋内へのガス流入および流出により変化する。建屋内の埋立ガス濃度の経時変化は処分場の物質収支式から式 (1) で表される。

$$V \frac{dC}{dt} = C_{in} Q_{in} - C Q_{out} + G + r \quad (1)$$

ここで、 V は建屋容積 (m³)、 C は建屋内埋立ガス濃度 (mol / m³)、 C_{in} は大気中の埋立ガス成分濃度 (mol / m³)、 Q_{in} は建屋内への流入ガス流量 (m³ / min)、 Q_{out} は建屋外への流出ガス流量 (m³ / min)、 Q_g は地表面から放出するガス流量 (m³ / min)、 G は地表面全体からの埋立ガス放出量 (mol / min)、 r は

ガス抜き管等からのガス放出量 (mol / min) である。

また、 Q_g は、廃棄物層内の圧力がほぼ大気圧と見なせ、かつ、廃棄物層内を移動するガス成分が調査対象の埋立ガス成分のみと仮定すると、(2) 式で表される。(ただし、 $1 \text{ mol / min} = 22.4 \text{ L / min}$ と換算した。)

$$Q_g = \frac{G \times 22.4}{1000} \times \frac{T_g}{273} \quad (2)$$

ここで、 T_g は埋立ガス濃度測定中のクローズドシステム処分場建屋内平均温度とした。ただし、放出されるガス温度とクローズドシステム処分場建屋内平均温度が大きく異ならないとした。

処分場から流出するガス流量 Q_{out} は、流入するガス流量 Q_{in} と廃棄物層から放出する埋立ガス流量 Q_g を加えたものになるので、式 (2) を用いて式 (3) で表される。

$$Q_{out} = Q_{in} + \frac{G \times 22.4}{1000} \times \frac{T_g}{273} \quad (3)$$

式 (1)、(3) を解いて得られる埋立ガス濃度式のパラメータ (Q_{in} , G) を最小二乗法により推定した。解析には、Excel のソルバーを用いた。

(3) 地中温度分布の測定方法

以下の手順で処分場の地中温度測定を行い、その分布図を作成した。

- ① メジャーを用いて、処分場全体を 5 m、さらに一部の領域を 2.5 m の格子に区切った。
- ② 格子の中心点で、ペン型温度計を用いて地表面深さ 25 cm の地中温度を測定した。また、地形的に平面、かつ、空間的にバランスが取れる 3 地点においても同じように地中温度を設定した。
- ③ 空間補間法 (クリギング) を用いて地中温度分布図を作成した。空間補間には、計算ソフト (surfer10 (32-bit), Golden Software) を用いた。

(4) 静置チャンバー法による全体ガス放出量の推計

a) 測定点の設定

図-2 は、処分場の地中温度分布 (調査日 : 2016 年 11 月 2 日) である。廃棄物が埋め立てられていない場所・おどり場 (図-2、右側の白抜き部) では地中温度を測定しなかった。そのため、廃棄物が埋め立てられていない場所との境界の地中温度は、地中温度測定時の平均建屋温度である 14.4°C とした。

図-2 の座標 $(x, y) = (8, 13)$ および $(10, 26)$

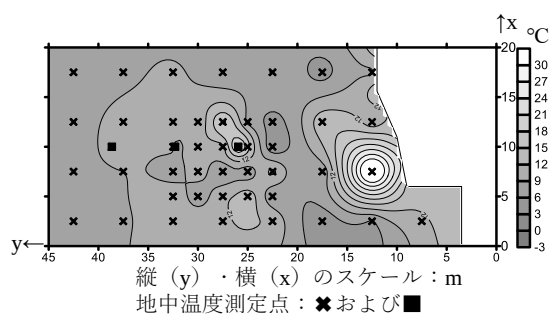


図-2 地中温度分布 (11 月 2 日)

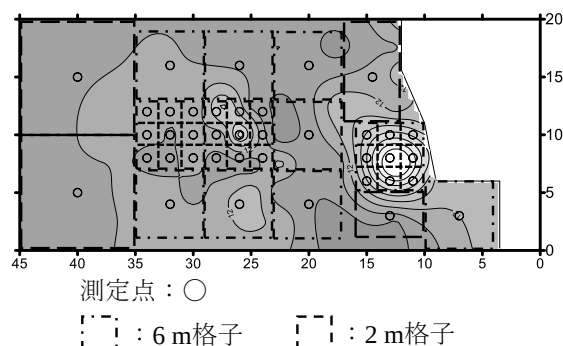


図-3 測定点の設定

周辺の地中温度が比較的高かったため、これらの座標周辺を高温領域とした。座標 (34, 10) の付近を低温領域とした。高温領域の周辺では可能な限り 6 m の格子状に区切った。さらに、その一部を 2 m の格子状に区切った。格子状できない領域については全体を網羅するように測定点を設定した。図-3 に示す 39 地点を測定点とした。

b) 埋立ガス放出量測定方法・埋立ガス放出量分布図作成方法

設定した測定点においてチャンバー法を用いて埋立ガス放出量を測定し、分布図を作成した。具体的には、以下の手順で行った。

- ① 各測定点の地表面に、チャンバー (容積 V : 0.040 m^3 , 面積 A : 0.212 m^2) を設置し、測定時間 $t = 2, 7, 11, 15$ 分時の埋立ガスをサンプリングした。なお、チャンバーが密閉されるように、周囲に土嚢を置いた。

- ② サンプルングしたガス中の CO₂ 濃度および CH₄ 濃度をガスクロマトグラフ (GC-8A, SHIMADZU) で分析し、式 (4) により各測定点の CO₂ ガス放出量および CH₄ ガス放出量 F (L / m² / min) を算出した。ここで、 a は埋立ガス濃度の変化速度 (ppm / min) である。なお、物質に換算するときは、チャンバー内温度を用いて気体の状態方程式を用いて換算した。

$$F = \frac{1}{1000} \times \frac{aV}{A} \quad (4)$$

- ③ 空間補間法 (IDW) を用いて、処分場埋立ガス放出量分布図を作成した。空間補間には、計算ソフト (surfer10 (32-bit), Golden Software) を用いた。このとき、測定点の決定手法を検討するため、埋立ガス放出量分布図の作成および空間推計値の推計に用いるデータを以下の通りとした。
- I. 6 m 格子状に区切った測定点のデータ
 - II. 2 m 格子状に区切った測定点のデータ (すべての測定点のデータ)
 - III. 低温領域のみで 2 m 格子状を除いた測定点のデータ
- ④ 同上の計算ソフトを用いて空間推計値を推計し、処分場全体埋立ガス放出量と比較した。

3. 調査結果

(1) 処分場全体の埋立ガス放出量

図-4 は、建屋を目張りした後の CO₂ 濃度 (空間平均) の経時変化および CO₂ 濃度の近似曲線である。処分場内の CO₂ 濃度は経時的に上昇したが、時間とともに上昇量は小さくなった。建屋の目張りは完全ではなく、隙間 (例えば、排気口) からのガスの流出入があり、時間経過に伴い処分場全体 CO₂ ガス放出量と釣り合うにつれ、CO₂ 濃度の上昇は緩やかになると考えられる。そこで、2. (2) で述べた方法で、全体の CO₂ ガス放出量を算出した。なお、処分場内部にガス抜き管 (有孔) やモニタリング管が存在し、そこから CO₂ ガスが放出されていると考えられるが、流速を測定した結果、地表面の CO₂ ガス放出量と比べて放出量は著しく小さかった。そのため、内部流出埋立ガス放出量 r mol / min を考慮しなかった。

フィッティング・計算に用いた定数は表-2 の通りである。建屋内平均温度および平均外気温はおんど

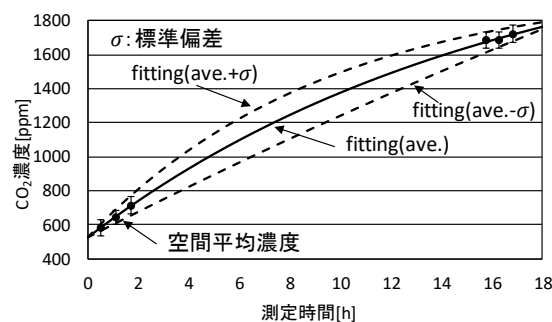


図-4 空間平均 CO₂ 濃度変化と近似曲線

表-2 フィッティング・計算に用いた定数

建屋内圧力 p	101,325 Pa (大気圧と仮定)
建屋容積 V	6,184 m ³
気体定数 R	8.314 Pa × m ³ / mol / K
建屋内平均温度 T_g	-0.15 °C = 272.85 K
平均外気温 T_{air}	-0.75 °C = 272.25 K
大気中 CO ₂ 濃度 C_{in}	390 ppm
建屋内初期 CO ₂ 濃度 C_0	525.7 ppm

とりを用いて測定した値を測定時間で平均した値である。

フィッティングの結果、処分場全体 CO₂ ガス放出量は 0.564 mol / min (幅 : 0.360 ~ 0.788 mol / min) と算出された。幅は濃度平均値 ± 標準偏差にフィッティングして算出した値である。なお、CO₂ と同様に CH₄ 濃度も測定したが、CH₄ は検出されなかった。

(2) 静置チャンバー法による埋立ガス放出量

図-5 は、各測定点で CO₂ ガス放出量を測定したときの地中温度分布図である。11 月 2 日の地中温度分布とはわずかに異なったが、高温領域はおおむね一致した。

表-3 に各測定点における CO₂ ガス放出量の統計値を示す (調査日 : 2016 年 11 月 30 日)。測定点でのガス放出量は全体的に小さく、また、測定点によるばらつきも大きかった。なお、CH₄ は検出されなかった。

地中温度と CO₂ ガス放出量との相関性は低く、高温領域内においても CO₂ ガス放出量のばらつきは比較的大きかった。

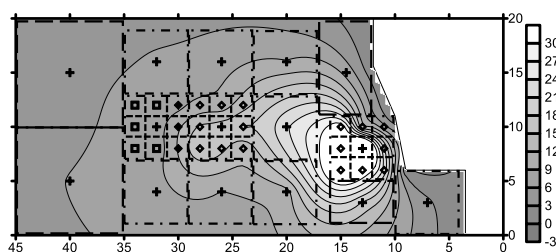


図-5 地中温度分布（11月30日）

表-3 各測定点における CO₂ ガス放出量測定結果

測定地点数	N = 39
最大値	0.0537 L / m ² / min
最小値	-7.79 × 10 ⁻⁴ L / m ² / min
中央値	6.53 × 10 ⁻³ L / m ² / min
平均値	0.0142 L / m ² / min
標準偏差	0.0159 L / m ² / min

(3) 格子大きさ（測定点数）の違いによる埋立ガス放出量分布・空間推計値

測定点を変えて作成した埋立ガス放出量分布を図-6に示す。パターンI（6 m の格子状の測定点を用いた。すなわち、測定点十のみを用いた。）の場合、高温領域内の地点 s, z, af では周辺よりも埋立ガス放出量は大きく、その周辺も埋立ガス放出量は比較的大きい領域と推定された。パターンII（2 m の格子状に区切った、すなわち、すべての測定点）の場合、パターンIと比較すると、ガス放出量が大い地点（例えば、n, p, ad）がある。逆にガス放出量が大い地点（例えば、x, y, ag, ak）もある。高温領域では、測定点が 2 m 程度離れるとガス放出量は変動し、6 m 格子状の測定点の設定では、ガス放出量分布の推計のずれが大きくなることが示唆される。一方、パターンIII（低温領域の h 周辺で、2 m 格子状の測定点を用いない。すなわち、すべての測定点から口を除いた。）の場合、パターンIIと比べて明らかな分布の違いがない。低温領域では、高温領域に比べて地点によるガス放出量のばらつきが小さいと言える。

表-4 にパターンごとの全体 CO₂ ガス放出量の空間推計値および建屋内のガス濃度変化から算出した処分場全体 CO₂ ガス放出量（以下、測定値）を示す。空間推計値と測定値を比較すると、パターンIの空間推計値は、最も小さく、パターンIIやIIIでは測定値より小さいものの測定値に近くなった。また、パターンIIとIIIを比較すると、IとIIに比べ、変

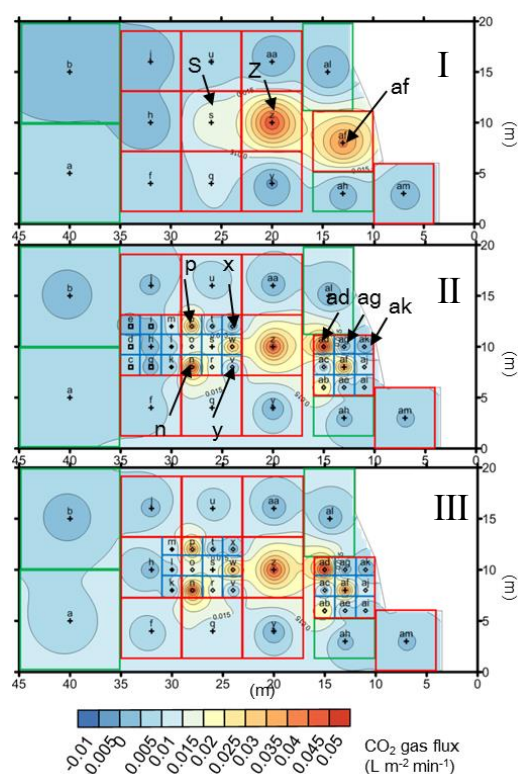


図-6 埋立ガス放出量分布

- I. 6 m 格子の測定点
- II. すべての測定点
- III. 低温領域のみ 2 m 格子の測定点を除く

化はわずかであった。6 m 格子状よりも 2 m 格子状に測定点を設定することにより、分布の把握が改善され、全体推計値が測定値に近づいたと考えられる。パターンIIが今回の調査では、最も測定点数が多く、現実を反映した結果となるはずである。パターンIIIで最も測定値に近づいているものの、精度は低下している。一方で、精度の低下を許容できれば、低温領域においては、2 m 格子状に測定点を決定する必要はなく、測定の手間を低減できると考えられる。

4. 結論・今後の課題

(1) 結論

高温領域周辺のみ測定点を細かく設定することで、比較的正確に埋立ガス放出量の大きい領域および処分場全体埋立ガス放出量を把握することができた。つまり、地中温度分布を考慮して、高温領域では測定点を細かく設定し、低温領域では測定点を少なく設定することで、より少ない測定点で埋立ガス

表-4 異なる測定点での処分場全体 CO₂ ガス放出量

パターン	処分場全体 CO ₂ ガス 放出量 mol / min
I : 6 m 格子状測定	0.298
II : 全測定点	0.352
III : 低温領域の一 部の 2 m 格子状測 定点を除く	0.379
建屋内濃度変化に よる測定値	0.564 (0.360~0.788)

放出量の大きい領域および処分場全体埋立ガス放出量を把握することができた。今回の処分場では、測定点の目安として、高温領域（温度範囲：11.5～48.0℃）とその直近部は 2 m の格子状、低温領域（温度範囲：6.8～7.9℃）は 2 m の格子状に区切る必要はなかった。

(2) 今後の課題

本研究の調査では、処分場全体埋立ガス放出量と空間推計値が近づかなかった。これは、調査時に割り出した場所以外に高温領域が存在し、そこに埋立ガス放出量の大きい領域が存在するためであると考えられる。したがって、処分場の地中温度を測定する際には、処分場全体を 5 m 格子より細かく区切って測定点を増やすことでより埋立ガスモニタリングの精度が向上すると考えられる。

本研究で対象とした処分場は、埋立深さが 5 m と浅く、メタンが検出されていないことから、内部では好気性分解が進行しているものと考えられる。嫌気性分解で生じるメタンガスのモニタリングにおいて、温度分布を考慮した測定点の決定が有効であるか、検討が必要である。

謝辞

今回の調査にあたって、最終処分場の職員ならびに関係者の皆様に多くのご協力をいただきました。心から感謝申し上げるとともに、御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) P. M. Czepiel, J. H. Shorter, B. Mosher, E. Allwine, J. B. McManus, R. C. Harriess, C. E. Kolb, B. K. Lamb : The

- influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions, *Waste Management*, **23**, pp. 593-598, 2003.
- 2) D. C. Hovede, A. C. Santon, T. P. Meyers, D. R. Matt : Methane Emissions from a Landfill Measured by Eddy Correlation Using a Fast Response Diode Laser Sensor, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **20**, pp. 141-162, 1995.
- 3) Mohammed F. M. Abushammala, Noor Ezlin Ahmad Basri, Rahmah Elfithri : Assesment of methane emission and oxidation at Air Hitam landfill site cover soil in wet tropical climate, *Environ Monit Assess*, **185**, pp. 9967-9978, 2013.
- 4) Webster R, Oliver MA : Sample adequately to estimate variograms of soil properties. , *J Soil Sci.*, **43**, pp. 177-192, 1992.
- 5) Tomonori Ishigaki, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono, Yuzo Inoue : Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature, *Environ Geol*, **48**, pp.845-853, 2005.

(2017. 8. 25 受付)

An approach to Determination of Landfill Gases Monitoring Points considering an
underground temperature distribution in a landfill site
-A case study in a Closed System Disposal Facility-

Daiki KAKIUCHI, Masahiro SATO, Atsushi FUJIYAMA, Kazuei ISHII

The stabilization of waste in landfill should be evaluated considering whole gaseous emission and spatial distribution of gas emission. Therefore it is required that a method of monitoring of landfill gas need less work and can indicate where is gas emission more than that in the order. In this study, focusing on underground temperature-rising with waste decomposition, the objective is to suggest an approach to Determination of landfill gases monitoring points according an underground temperature. Concentration of carbon dioxide gas in a closed system disposal facility gradually increased as time goes by. The whole gaseous emission rate calculated by that increment was 0.564 mol per minute under the assumption of time-stable gas flux. The whole gaseous emission estimated by spatial static method (IDW) . The estimated value was near to the calculated value in the case of determination of sampling points with underground temperature than without considering. In addition, the spatial estimation was not affected by measuring of gas flux at the center of 2 m grid over area of low ground temperature.