

墳丘部表層部と石室の下部の冷却管による墳丘部の冷却

1. 検討目的

墳丘および石室の冷却温度の目標値としては、石室内面温度を 10℃程度としている。二次元の熱差分計算を実施することで、版築・地盤および石室表面の温度変化を検討した。

2. 諸条件

解析に使用する熱定数は、熱的に厳しい条件である外気温度の高い7月から冷却するものとして、二次元の熱差分計算で用いる定数を以下のように設定する。

1) 石室および版築・地盤に関する定数

		間隙率	飽和度	熱伝導率	初期温度
		n(%)	Sr(%)	k(kcal/mh℃)	(℃)
石室		20	100	2.167	17
版築・地盤	深度0~1m	40	70	1.475	25
	深度1~2m				20
	深度2m以深				17

2) 地上部外気温度

2002年の外気温度の月別平均温度を参考にして、冷却開始からの日数毎に下表のように変化させた。

仮定期期	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
冷却開始からの日数 (日)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
外気温度 (℃)	28	26	23	17	9	6	5	5	10	15	19	22

* 表面熱伝達係数は $\alpha=13\text{kcal/m}^2\text{h}$ と仮定

3) 冷却管の種類と冷却温度の設定

冷却管としては二重管方式（直径 $\phi 60.5\text{mm}$ ）の場合を計算した。また、地上部埋込冷却管のサイズは、二重管方式と同様の直径 $\phi 60.5\text{mm}$ とした。

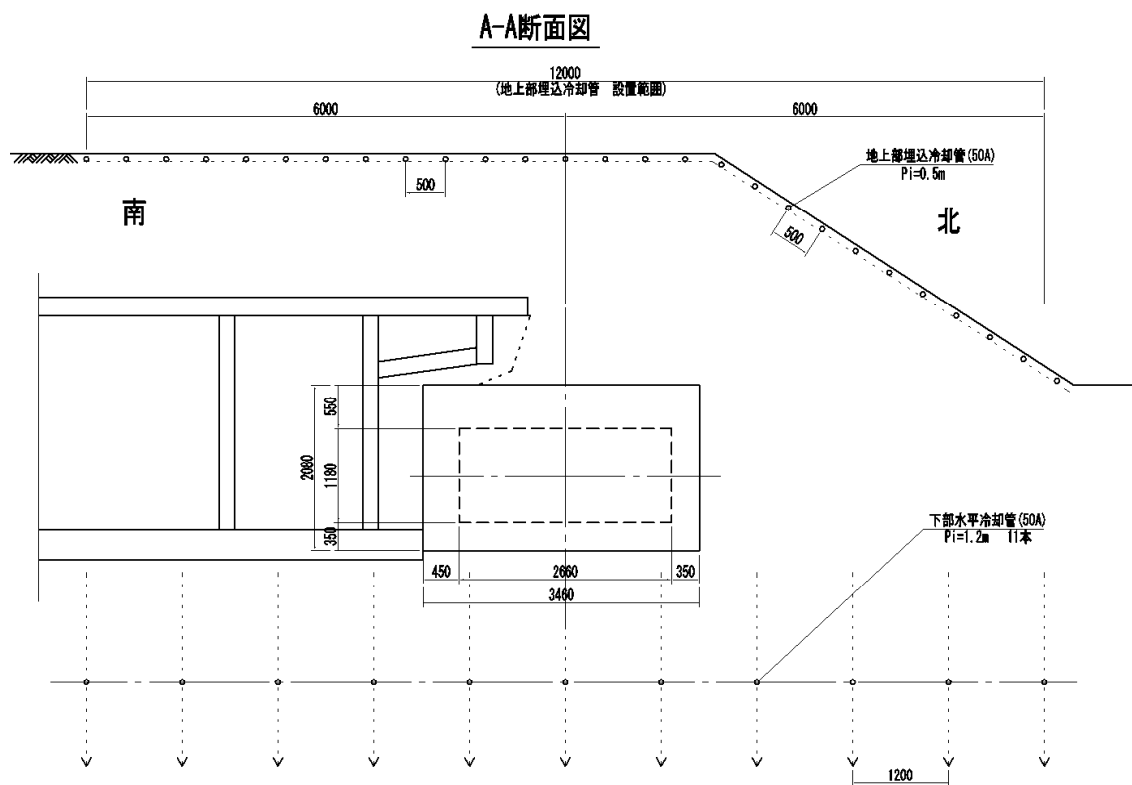
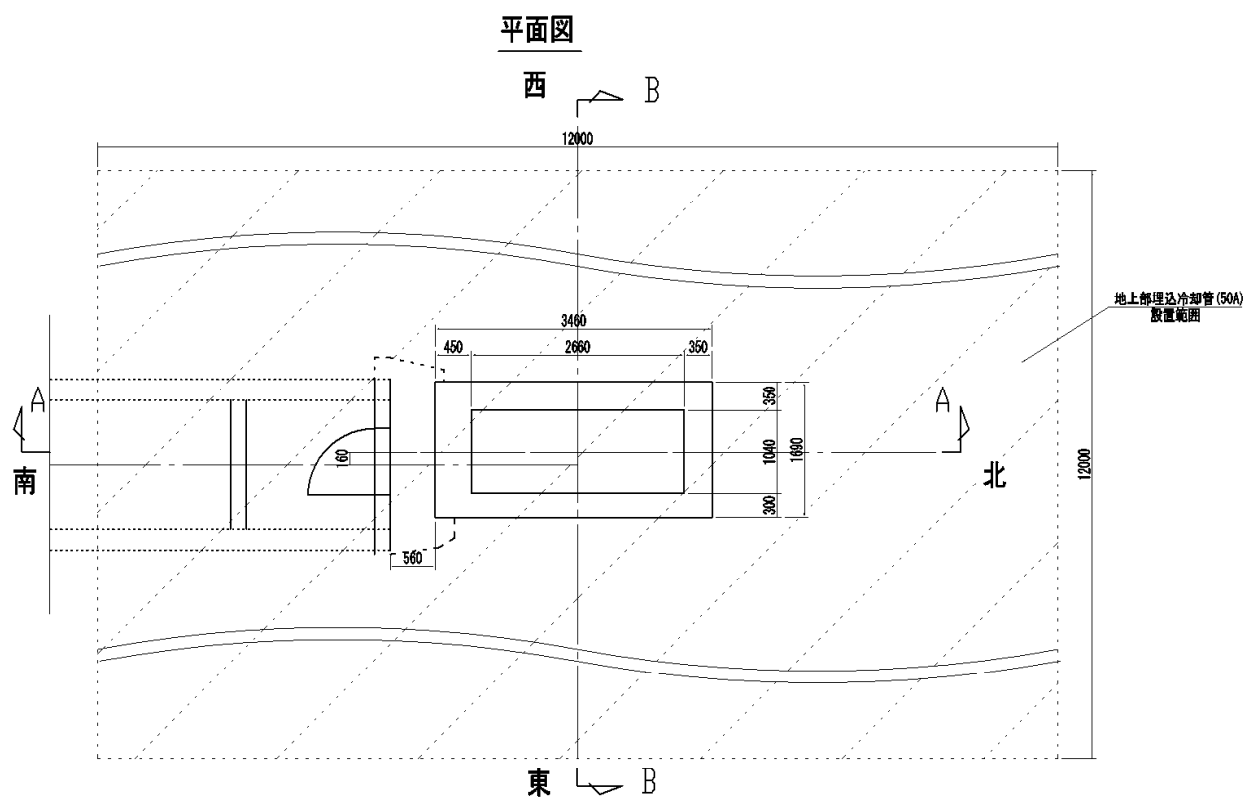
冷却水温度（平均値； θ_b ）は、2.0℃以上とし、その際に解析で用いる冷温度（冷却管表面温度； θ_r ）は、二重管方式と地上部埋込冷却管では $\theta_r = \theta_b$ (℃) に設定する。

本検討の冷却管サイズと冷却温度は、下表の値を採用する。なお、冷却中に石室表面に生じる温度差が 2℃以下になるように、地上部埋込冷却管と下部水平冷却管とで異なる冷却水温度とした。

	冷却管サイズ 直径 (mm)	冷却水温度 θ_b (℃) (=冷却温度 θ_r (℃))					
		地上部埋込冷却管		下部水平冷却管			
		全冷却期間	0~30日目	30~100日目	100~300日目	300~420日目	420~600日目
Case5-2(1)	60.5	2	—	10	5	5	5
Case5-2(2)	60.5	2	—	10	5	10	5

※ 表中の—は、冷却管が無いまたは運転していないことを示す。

4) 施工計画図



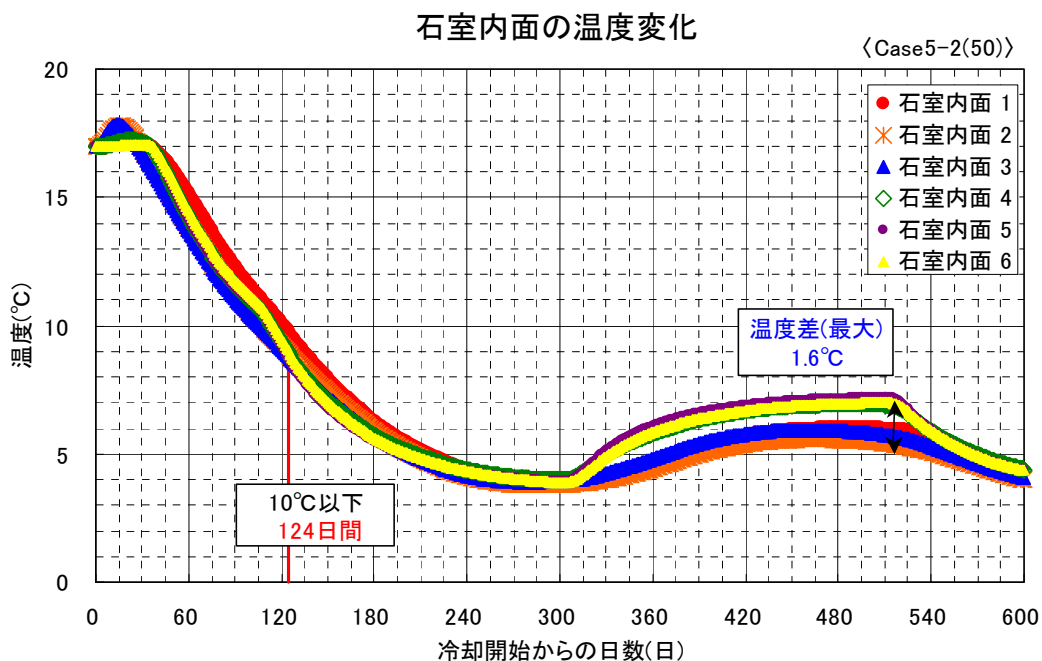
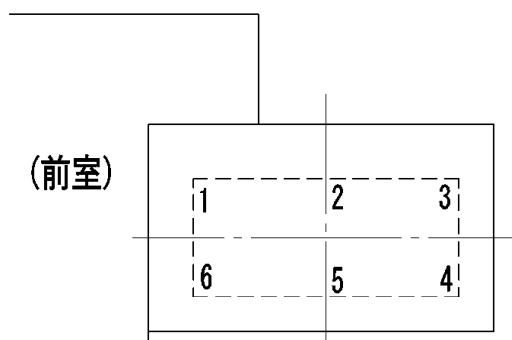
3. 石室内面の温度変化計算結果

1) 必要冷却日数

石室内面の温度変化の計算結果 (Case5-2(2)) は下図のようになり、石室内面全域が 13℃以下になるのに要する日数は 75 日、10℃以下になるのは 124 日となった。ここで、本解析手法は二次元のものであり、また地盤や熱に関する定数に推定値を用いて得られた結果である。

ここで冷却管の埋設誤差などを考慮していないため、実際に必要な冷却日数は少し増加する可能性がある。

なお、冷却日数を短縮するためには、地上部埋込冷却管の設置ピッチを、本計画 (Case5) の 50cm ピッチよりも狭くすることや、地表部防熱材の厚みをさらに大きくすることが有効であると考えられる。



2) 石室内面の冷却中に生じる温度差

下部水平冷却管の温度調整における最適化を行っていないので上記結果では温度差が大きいですが、今後に計算を追加することで温度差を小さくすることは可能である。

4. 冷却管理設計画

4-1 作業概要

本計画では、石室下部に水平冷却管を埋設、並びに墳丘表面に埋込冷却管を埋設して石室全体の温度を下げるもので、本作業は機械ボーリング及び手掘りで石室周辺地盤に埋込冷却管を埋設するものである。

作業内容としては、

1) 測量

石室下部水平冷却管・測温管埋設位置出し	1 2箇所
噴丘地盤測温管挿入箇所位置出し	3箇所
地上部埋込冷却管位置出し	2 7箇所

2) 石室下部水平冷却管・測温管設置

(1) 作業仮設

墳丘西側に鋼製単管パイプで作業足場を仮設する。

足場規模：幅 2.0m×15.0m×高さ 0.5m

(2) φ60.5mm 機械ボーリング

下部水平冷却管 14.0m 11本

下部水平測温管 10.0m 1本

(3) その他作業……………孔曲がり測定

3) 噴丘地盤測温管設置作業

φ33mmスウェーデンサウンディグ削孔（上方斜め掘り）

4) 地上部冷却管設置作業

冷却管を設置した後、土で隙間を埋め、土嚢で覆った後、防熱材を設置する。

4. 2 作業実施方法

石室下部地盤および墳丘表面に埋設される冷却管の配置図を基に現地測量を行って機械ボーリングおよび手掘りによる冷却管の埋設位置を決定する。埋設箇所の位置確定後の作業内容は、冷却管や測温管の配置や埋設方法によって（１）機械ボーリングによる削孔、（２）スウェーデン式サウンディングによる削孔、（３）地上部冷却管設置の３通りの工法に区分できる。いずれの作業も重要文化財に指定されている墳丘およびその内部での作業となるため、本作業は墳丘内の石室はもとより周辺施設に損傷を与えないよう十分注意を払う必要がある。

事前に行う測量作業は、下表に示す予め指定された冷却管および測温管の配置位置を決定するものです。

施工箇所測量位置出し

埋設手段	口径	長さ	埋設物	施工数 (箇所)
	φ(mm)	L(m)		
機械ボーリング	60.5	14	下部水平冷却管	11
	60.5	10	下部水平測温管	1
スウェーデン式サウンディング	33	3.5	墳丘地盤測温管	3
手	50	12	地上部設置冷却管	27

（１）機械ボーリングによる削孔（石室下部水平冷却管・測温管設置作業）

石室下部水平冷却管の埋設作業は、墳丘西側の裾部から下方約 10° の角度で機械ボーリングによる削孔を行って冷却管を埋設するもので、石室の下盤に対し 1.5m の離隔を埋設条件とする。よって、予め石室の位置を正確に把握し既存の測量データや各種調査資料をもとに機械の設置（足場）位置や掘削の角度を正確に求め施工する必要がある。機械ボーリングの主な作業内容は以下の通りである。

- 1) 足場材は、一般の土木建築資材に使用されている φ 48.6mm の鋼製単管パイプおよび 35mm × 250mm × 3000mm の鋼製足場板を使用する。
- 2) 墳丘の西裾部に幅 2.0m、高さ 0.5m 程度の足場を、長さ約 15.0m の規模で連続した作業足場を設ける。機械ボーリングはこの足場上で行い、次施工箇所への機械移動はこの作業足場上を順次移動する。
- 3) 掘削作業に泥水は使用せずコンプレッサーを用いたエアボーリングとする。
- 4) ボーリングマシンの原動力は振動の発生しやすいディーゼルエンジンは使用せず電気モーター（3.7kw200V）を使用する。
- 5) 削孔は φ 55mm のコアチューブで先掘した後再度 φ 60.5mm のコアチューブで掘削する。
- 6) ボーリングビットは、メタルクラウンまたはウィングクラウンを使用する。
- 7) 予定深度掘削後は孔曲がり測定を行う。

(2) スウェーデン式サウンディング試験機を用いた削孔（墳丘地盤測温管設置作業）

墳丘地盤測温管の挿入作業は、石室上部の墳丘地盤に上方約 10° の角度でスウェーデン式サウンディング用ロッドおよびスクリーポイントを用い地盤削孔するもので、石室入口付近から上部地盤に向けの施工となる。

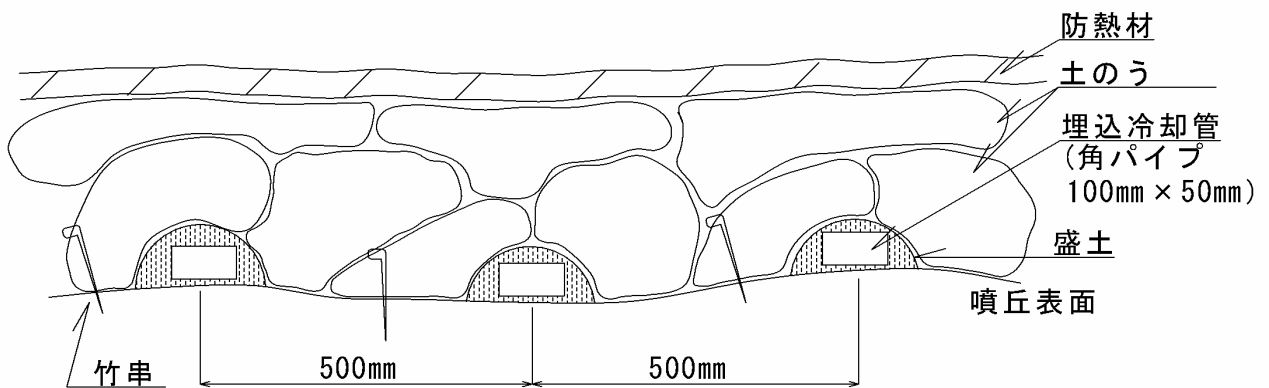
スウェーデン式サウンディング機材を用いての主な作業は以下の通りである。

- 1) 指定された石室入口付近から上部地盤に向けての削孔となる。
- 2) 作業は、スウェーデン式サウンディング試験機の $\phi 19\text{mm}$ ロッドおよびスクリーポイント（ $\phi 33\text{mm}$ ）を用い、ハンドルを回転しながらの貫入作業となる。

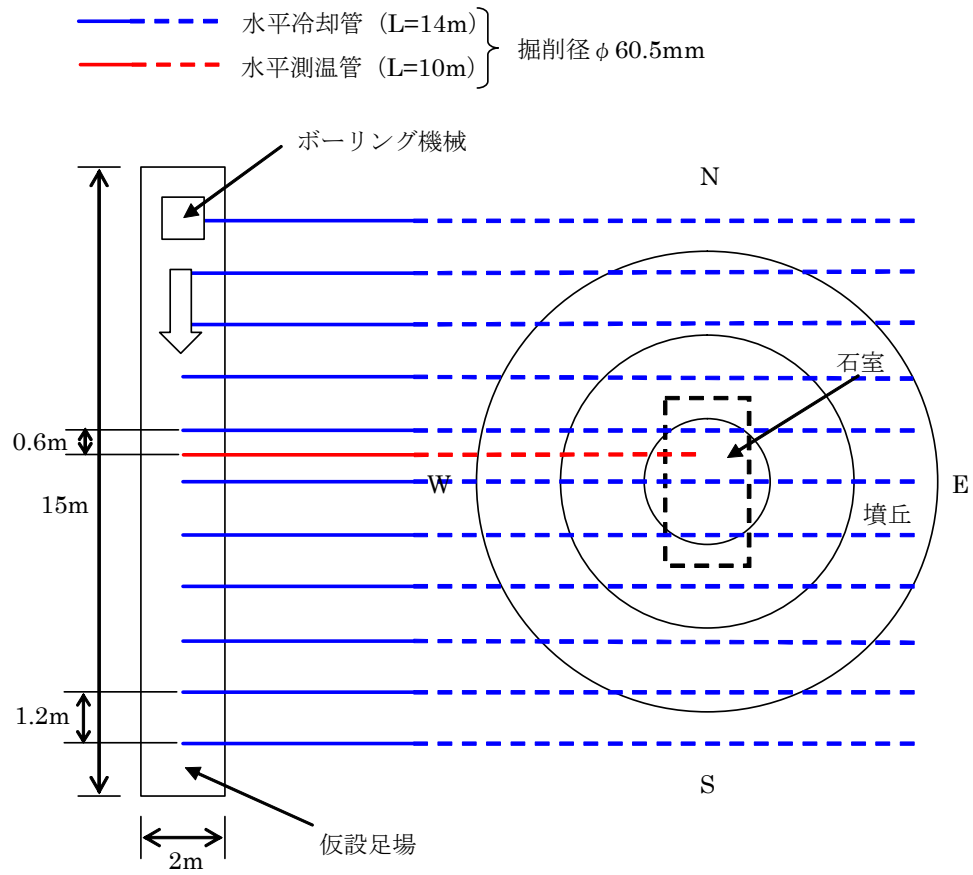
(3) 地上部冷却管設置作業

地上部冷却管の設置作業は、概ね東西方向に 0.5m び ッチで下図で示した様に、墳丘部に冷却管を設置し、冷却管の間を土で埋める、さらにその上に土嚢を積み、その上に、厚さ 20mm 程度の断熱材を置く。

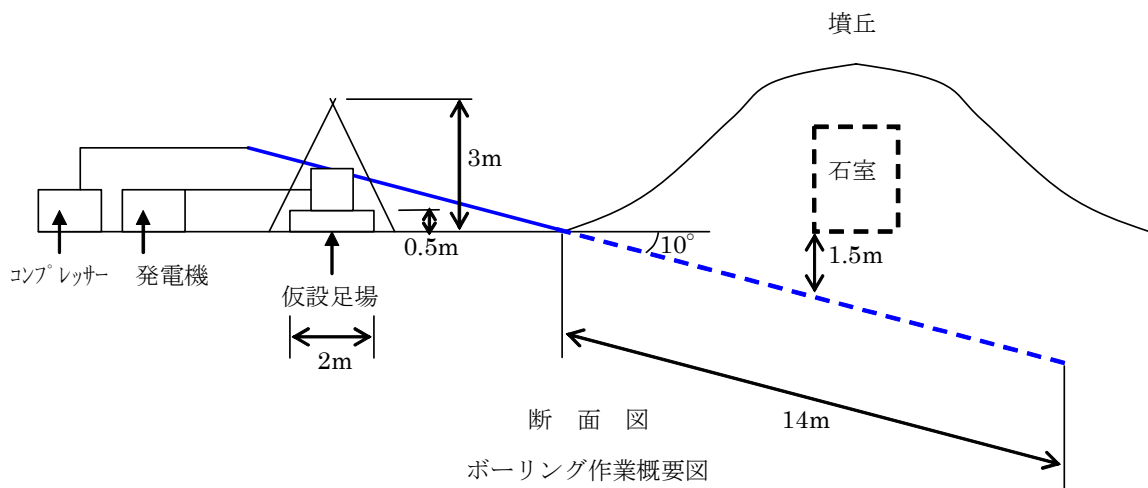
◎墳丘上部の冷却管設置作業概略図



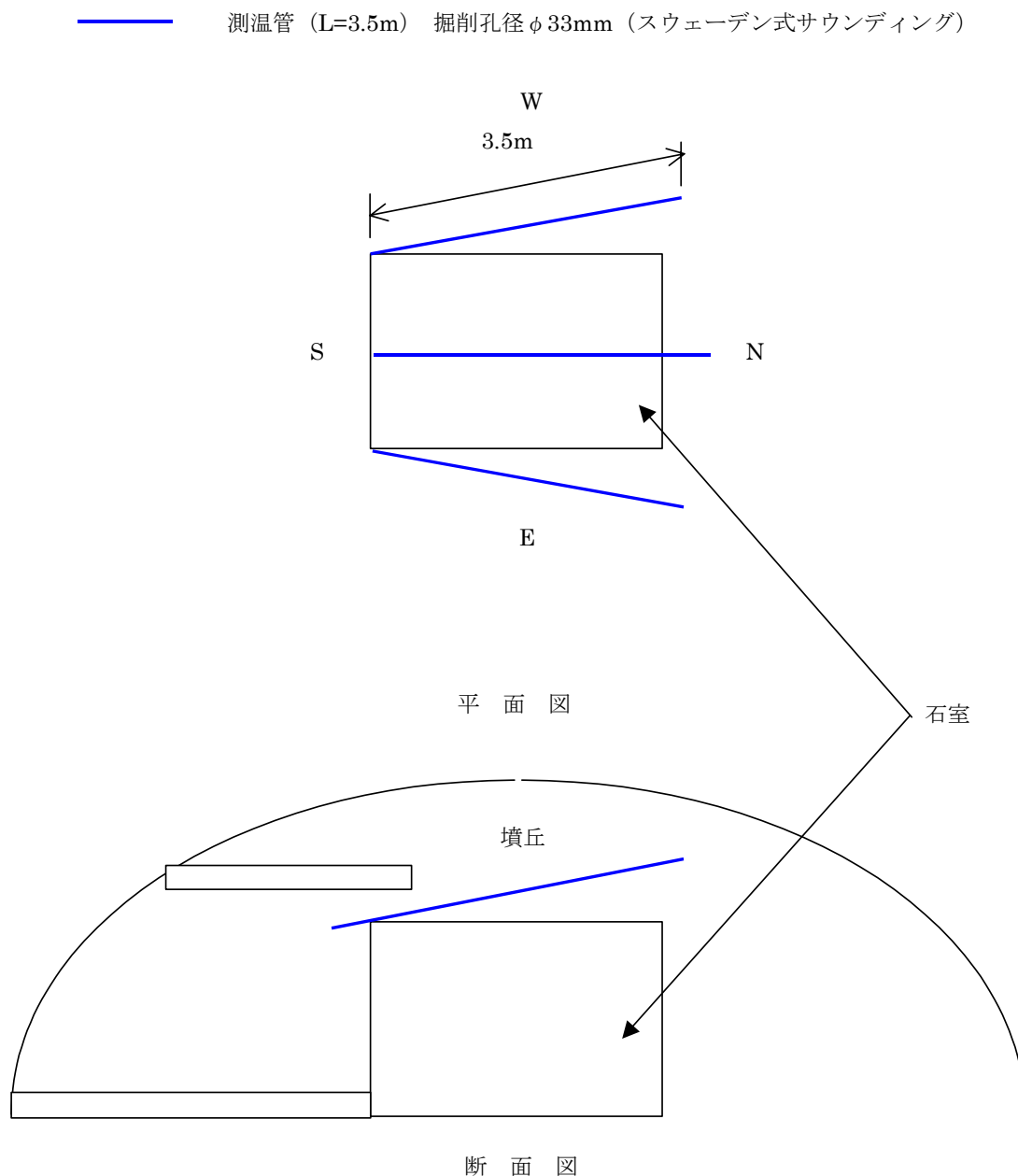
◎ 石室下部水平冷却管・測温管挿入孔設置作業概略図



平面図



◎ 墳丘地盤測温管挿入孔設置作業概略図



まとめ

この方法では、10℃以下まで石室部分を均一に冷却することが可能である。ただし、墳丘表層部の温度は、外気変動の影響を受けて変化するため、年間5℃程度の温度変化が予想される。この場合も、南北方向の温度を均一にするために、前室部分に冷却管を設置するなどの工事が必要になると考えられる。また、現在は、墳丘側部には、版築部分の上に土嚢が置かれている状況なので、土嚢を取り除いた後に、冷却管を設置し、土で埋め戻し、その上に断熱材を設置し、さらに土嚢を設置する等の工程が考えられる。また、石室内の壁画での結露を防止するため、取合部にコールドポイントを設けたり、前室の湿度制御を行うなどの対策を講ずる。