

III-305 地下空間における結露計測と数値解析による結露発生量の推定

東京ガス株式会社

○酢谷佳尚

埼玉大学 工学部

渡辺邦夫 大沢聡

動力炉核燃料開発事業団

柳沢孝一

はじめに

浅層地盤中の地下空間を低レベル廃棄物処分もしくは貯蔵空間として利用する場合、内部の物質や容器の腐食を極力避け、長期間健全性を保つため、空間内への地下水の流入を制御しなければならない。このような観点から、不飽和帯中に地下空間を設けることや排水システムを完備しておくことが必要となる。しかし、このような場合でも、水分から物質を完全に防ぐことは非常に困難である。なぜなら、一般に、空間内が高い湿度状態になり、壁面温度が一様でないため、結露が空間中の壁面に発生するからである。

そこで本報告では、まず、実際に結露が生じている地下空間においてその発生メカニズムを基礎的に調べた。そして、これらの結果を踏まえて、数値解析により結露量を推定することを試みた。

1. 実測による結露現象の解明

今回の計測は埼玉大学地盤水理実験施設地下室内(寸法26m×19m×2.2m)で1990年11月に行った。測定時、地下室内の天井面には結露による多量の水滴が発生しており、地下室内の空気はほぼ飽和状態に達していた。計測を実施するにあたって、一旦、壁面上の水滴を除去した後、新たに発生する結露量の測定を行った。計測は筆者らが報告している蒸発量測定装置<sup>1)</sup>を用いた。

図1は測定した地下室天井面近傍の絶対湿度分布である。図より壁面から1.1cm程度の領域では、絶対湿度の変化が直線的であり、この層内では水蒸気が主に分子拡散によって、鉛直方向に輸送されていると考えられる。1.1cm以上の領域では、室内空気の持つ絶対湿度に漸近していることが分かる。また、計測点における相対湿度はほぼ100%であった。それ故、図の絶対湿度分布は、温度分布によって形成されたものといえる。つまり、室内温度に比べ壁面温度が低い時に、結露が発生し、壁面付近に1cm程度の急変領域(空気境界層)が形成される。

図1より、結露発生の際、空気境界層内では壁面に向かう水蒸気の流れが生じていることが確認された。そこで、分子拡散によって運ばれた水蒸気がすべて壁面上で結露として凝結しているか確認するため、表面に生じた水滴の量と本装置により得られた値を比較し、精度の検証を行った。水滴は結露集水テープによりしみ込ませ、その重量変化により測定した。図2はその結果で、Dobsは重量変化、Dsは本装置によるものである。これを見ると、値が多少ばらついているものの、ほぼ一致しており、3割程度の誤差を見込めば、ある程度定量的に結露量を把握することができる。

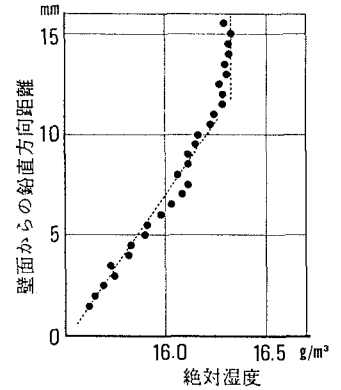


図1 結露発生時の壁面近傍における絶対湿度の鉛直分布

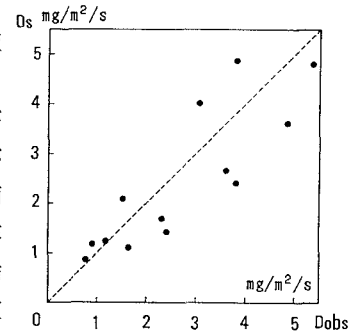


図2 実結露量との比較

2. 数値解析による結露量の推定

上で述べたように、結露発生時の壁面上の状況は、

- 1) 空気中の相対湿度は100%である。
- 2) 壁面近傍の空気境界層内(1cm程度)で温、湿度勾配がある。
- 3) 空気境界層外の空間内の温、湿度は一定。

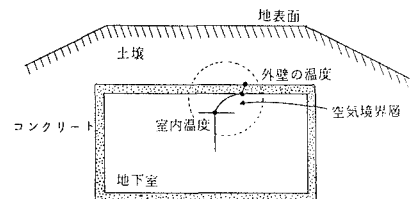


図3 解析による結露量推定の概念図

これらの性質を基礎として、浅層地盤中の地下空間内の結露発生量を数値解析により推定することを試みた。図3はその概略図を示したもので、まず、飽和・不飽和浸透流解析による地下水流れを考慮した熱伝導解析により地下室周辺の温度分布を求め、その温度分布から熱量のバランスにより平均的な地下室内の温度を算出する。次に、外壁の温度と室内平均温度との間に空気境界層の定義を用い、地下室内部壁面の温度を求める。求まった室内温度と内部壁面温度の飽和水蒸気量の差に分子拡散係数をかけ、境界層の厚さ（本計算では1cm）で除してやることにより結露量の推定が可能となる。

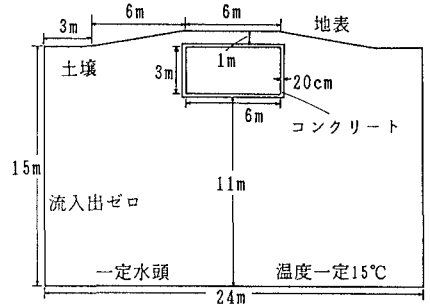
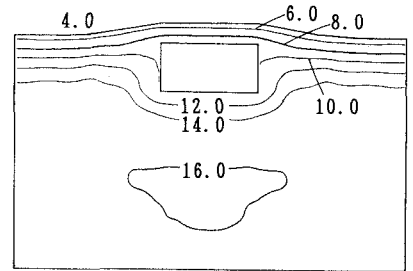


図4 解析領域

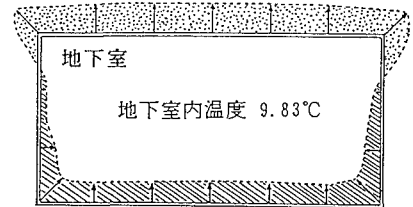
図4は計算を行った解析領域を示したもので、地表面には6～9月まで0.125mm/h、他の時期には0.0625mm/hの降雨浸透量を与えた。地表面温度は4°C(2/1)から28°C(8/10)まで変化させて与えた。境界条件として地下室内の内側壁面には、流入出ゼロの条件を与え、他の面は図に示す通りとした。表1に今回設定した係数を示す。解析は適当な初期条件を設定し、非定常で行い、何年も繰り返して年間の変化に初期条件の影響が無くなるまで行った。

	透水係数 cm/s	間隙率 %	容積比熱 kcal/m <sup>3</sup> ・°C	熱伝導率 kcal/m・h・°C
土壌	1.0×10 <sup>-4</sup> (飽和時)	0.43	378	1.1 (飽和時)
コンクリート	1.0×10 <sup>-6</sup> (飽和時)	0.04	454 (湿潤状態)	1.5 (湿潤状態)

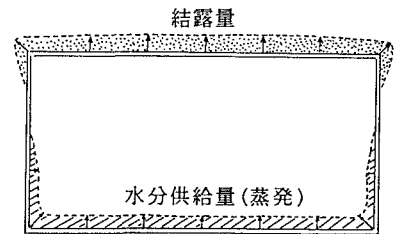
図5に今回の解析結果の中で2/10の結果について示す。(a)は地下室周辺の温度分布で、地表面温度が最低となる2月では地下室上部及び下部付近の温度がそれぞれ約8°C、12°Cとなり上部の温度が低くなっている。(b)はこのときの空間内壁面温度と室内平均温度との差の分布を示したものである。斜線で示した領域が室内温度に対して壁面温度が高い領域、ハッチで示した領域が低い部分である。これを見ると、底面では室温に比べて0.3°C高く、逆に天井面では0.35°C程度低くなっている。(c)はこの温度差を基に計算した地下室(飽和状態)の水分移動量の分布である。これを見ると2/10においては天井面で0.5mg/m<sup>2</sup>/sの結露が、底面で0.5mg/m<sup>2</sup>/sの水分供給量(蒸発)が生じていることになる。



(a)地下室周辺の温度分布(°C)



(b)室内壁面温度と室内平均温度との差



(c)地下室内部水分移動量の分布 → 2 mg/m<sup>2</sup>/s

図5 解析結果 2月10日の分布

### 3. 結論

地下空間内の結露について実測及び数値解析により検討した結果、結露発生の際の水蒸気の輸送メカニズムは主に壁面直上の空気境界層内に形成された温度勾配によることが明らかとなった。また、数値解析により、壁面温度と室内温度との温度差を求めることにより結露発生量の推定が可能となった。

- 参考文献 1) 酢谷佳尚、渡辺邦夫、柳沢孝一(1990)：地下空洞内の蒸発・結露現象測定を試み、第45回土木学会年次講演会、Ⅲ、pp610～611。  
2) 山田 雅士(1980)：建築現場実務大系 結露対策、井上書院。