3. ガス透過性防水シートの適用に関する検討



3.1 供用中のガス透過性に関する現地比較実験

3.1.1 はじめに

除染廃棄物仮置場の上部シートは現在、遮水シートまたは、ガス透過性防水シートが使用されてい る。ガス透過性防水シートの材料性能としてのガス透過性能に関しては、多くの室内実験や現場実験 がなされ、その結果が報告^{1)、2)}されている。しかし、日射による温度変化や風速等、供用中の気象変 化による影響について検証した報告は少ない。そこで、実際の仮置場に実験ヤードを設け、上部シー ト内の温度と酸素濃度を測定して、それらの影響について検討した。その結果、ガス透過性防水シー トは気象変化による大きな影響を受けることなく、仮置場上部シートとして十分な性能を維持しうる ことが確認できた。

3.1.2 実験概要

福島県内の実際の仮置場にて図 3.1-1 に示すように設置地盤に下部シート(LLDPE 製遮水シート 1.5 mm)を敷設後、除染廃棄物(1段目、2段目には汚染土壌、最上部に腐敗性廃棄物)を入れたフレ コンを3段積みにした実験山2か所(実験山①および②)を設置した。その後、表3.1-1に示す温度



図 3.1-1 フレコンと測定装置の位置

項目	上部シート	測定装置NO.	設置位置
		T1	最上段中央フレコン上部(上部シート直下)
	ガフ添温性性センシート	T2	最上段端部フレコン上部(上部シート直下)
		Т3	最上段フレコン内部(腐敗性除染廃棄物 深さ30cm位置)
泪座計		Τ4	2段目フレコン上部(1m深さ)
加度司	遮水シート	Т5	最上段中央フレコン上部(上部シート直下)
		Т6	最上段端部フレコン上部(上部シート直下)
		Т7	最上段フレコン内部(腐敗性除染廃棄物 深さ30cm位置)
		Т8	2段目フレコン上部(1m深さ)
	ガマ添温性性セント	G1	最上段中央フレコン上部(上部シート直下)
酸素濃度計	リス透過住防水シート	G2	2段目フレコン上部(1m深さ)
		G3	最上段中央フレコン上部(上部シート直下)
	遮水ソート	G4	2段目フレコン上部(1m深さ)

表 3.1-1 測定装置と設置位置

計、酸素濃度計に示す温度計、酸素濃度計を設置し、上部シートとして①ガス透過性防水シート(CP600、 2 成分長繊維不織布 300g/m²×2 層間にポリエチレン製微多孔膜を挟んだ複合構造)、②遮水シート (LLDPE 製 1.5 mm、中央頂部にガス抜き管 φ 150 設置)を設置した。また、それぞれの上部シートの周 囲は浸水や空気の出入りがないよう、下部遮水シートと熱融着して閉じた。なお、実験場所が実際の 仮置場であり、搬入状況に応じて実験山を築いたため、①の実験山では腐敗性廃棄物入りフレコンは 8袋、②の実験山で6袋となっている。設置状況を**写真 3.1-1**に示す。



写真 3.1-1 フレコン段積み状況 (左) と上部シート設置(右)

なお、実験場所は福島県伊達市霊山町であり、測定期間は 2013 年 8 月 28 日~2013 年 10 月 15 日で ある。

また、本実験では、日中の日射による温度変化、腐敗性廃棄物の腐敗熱による影響を把握するため に温度計(日置電機株式会社製 温度センサーLR9604)を設置した。さらに、酸素濃度を測定するこ とで腐敗や発酵に伴うガス発生の有無を間接的に把握するために、酸素濃度計(日本環境計測株式会 社製 土壌酸素センサーMIJ-03)を設置した。それぞれの外観を**写真 3.1-2**に示す。



写真 3.1-2 温度計(左)と酸素濃度計(右)

<u>3.1.3 実験結果</u>

写真 3.1-3、写真 3.1-4 にそれぞれ設置 1 ヵ月後および、1.5 ヶ月後の状況を示す。また、温度変化 および酸素濃度の測定結果について、以下に述べる。



写真 3.1-3 設置 1 ヶ月後(9月27日)



写真 3.1-4 設置 1.5ヶ月後(10月 15日)

1) 温度測定結果(上部シート直下)

図3.1-2 は各々の上部シート直下(最上段中央フレコン上部 T1・T5)の温度測定結果である。なお、 参考として当該実験場所(山間部)から約18km 東に位置する福島地方気象台の最高・最低気温デー タ³⁾を付記したが、当該実験場所は山間部であり実際の最高気温、最低気温は福島地方気象台の気温 データより若干低いと考えられる。図3.1-2より、上部シート(ガス透過性防水シート、遮水シート) 直下では日中の温度が気温に比べてかなり高くなり、この測定期間中、最大 67℃程度まで上昇し、夜 間の温度は気温近くまで低下する。各上部シートの比較では、日中で遮水シートが 2~3℃高くなるが、 夜間は 4℃程度低くなる。これは両者の材質(色調や熱伝導率)の違い、腐敗性廃棄物のボリューム の違い等が影響しているものと考えらえる。



図 3.1-2 温度測定結果(上部シート直下)

2) 温度測定結果(内部)

図 3.1-3 は腐敗性廃棄物を入れた最上段フレコン内部(T3・T7)、2 段目フレコン上部(上端から lm 深さ、T4・T8)の温度測定結果である。また、図 3.1-2 と同様に福島地方気象台の最高・最低気 温を付記した。T3、T7 は期間後半の一部を除き、最高気温より高い傾向にあり、腐敗熱の影響が考え られるが、各上部シートの実験山の内部温度(T3・T4・T7・T8)は概ね 20~40 ℃の範囲となってお り、期間中の気温低下とともに内部温度も低下する傾向にあることから、腐敗による過剰な蓄熱は発 生していない。また、T3 は T7 より、T4 は T8 より 2~4℃程度高い傾向にあるが、これは上部シート 直下の温度測定結果と同じく、上部シートの材質(色調や熱伝導率)の違い、腐敗性廃棄物のボリュ ームの違い等が影響しているものと考えられる。



図 3.1-3 温度測定結果(内部)

3) 日射量の温度への影響

図 3.1-4 に 2013 年 9 月 13 ~18 日の期間における日射 量と温度の関係を示す。ただ し、日射量は福島地方気象台 のデータである。これらより、 上部シート直下(T1・T5)の 温度は日射量と高い相関性を 示す。腐敗性廃棄物を入れた 最上段フレコン内部(T3・T7) は日射量に直接影響しないが、 高い日射量ピークの半日程度 後に若干温度上昇する傾向に あり、これは腐敗熱でなく日 射による腐敗性廃棄物自体の 温度上昇の影響と考えられる。



4) 酸素濃度測定結果

図 3.1-5 は各々の上部シート直下(最上段中央フレコン上部、G1・G3)、2 段目フレコン上部(上端から 1m 深さ、G2・G4)の酸素濃度測定結果である。空気中の酸素濃度は21%程度であり、ガス透過性防水シートは期間を通して 18.5~20.8%の範囲で安定している。遮水シートは 12~20.5%と経時的な変化が大きい。これは腐敗性廃棄物が腐敗や発酵によりガスが発生しており、ガス透過性防水シートは全面からガスが透過するのに対し、遮水シートはガス抜き管のみから排出されているためと考えられる。

図3.1-6に2013年9月13~18日の期間(9月16日正午前後に台風16号が福島県に最接近)における風速と酸素濃度の関係を示した。ただし、風速は福島地方気象台のデータである。各上部シートの周囲端部は下部遮水シートと熱融着にて接合しており、この部分からの風の吹きこみはない。ガス透過性防水シートにおいては、酸素濃度と風速との相関はなく、ほぼ一定に推移するが、遮水シートの場合、風速が大きいほど酸素濃度も高くなる傾向が顕著に表れている。風速が大きくなるほど、中央頂部に取り付けたガス抜き管から空気の流入量が増え、酸素濃度が上昇したためと推察される。



図 3.1-6 風速と酸素濃度の関係

3.1.4 まとめ

実際の除染廃棄物仮置場にてガス透過性防水シートと遮水シート(中央頂部に φ150 ガス抜き管設 置)の2種類の上部シートを設置し、上部シート内部の温度と酸素濃度を測定した結果、以下の結果 が得られた。

- ・ 測定期間中、各上部シートともシート直下の温度は、日中で最大約67℃まで上昇するが夜間は 気温近くまで低下する。日中の温度上昇は気温より日射量の影響を大きく受けていると考えら れる。
- 2 段目フレコン上部、腐敗性廃棄物を入れたフレコン内部の温度はガス透過性防水シートのほうが遮水シートより 2~4℃高くなる傾向を示したが、これは上部シートの材質(色調や熱伝導率)の違い、腐敗性廃棄物のボリューム(ガス透過性防水シートの実験山の方が多い)の違いが影響していると考えられる。
- ・ 測定期間中、上部シートとしてガス透過性防水シートを用いた場合の酸素濃度は 18.5~20.8% で安定して推移し、遮水シートの場合では 12~20.5%の範囲で上下した。これは腐敗性廃棄物 が腐敗や発酵によりガスが発生しており、ガス透過性防水シートは全面からガスが透過するの に対し、遮水シートはガス抜き管のみから排出されているためと考えられる。ただし、遮水シ ートの場合でも、酸素濃度は低下したままでなく、ガス抜き管からの一定のガス放出効果が認 められる。ガス透過性防水シートでは全面からガスが透過するために、酸素濃度が安定すると 考えられ、ガス抜き管を設置せずとも十分なガス透過性能を発現することが確認できた。
 - 上部シートが遮水シートの場合、風速が大きいほど酸素濃度が高くなる傾向にある。これは風 速が大きいほど中央頂部に取り付けたガス抜き管からの空気の出入り量が大きくなるためと考 えられる。

本実験の実施に際しては福島県伊達市役所様、大沼林産工業株式会社様には多大なご協力をいただきました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 西村正樹,赤井智幸,和田昭太,楠部義夫,嘉門雅史:廃棄物最終処分場キャッピング用複合シートの機能評価と施工耐久性評価,ジオシンセティックス論文集,第21巻,pp.285-290,2006.
- 2) 公益社団法人日本材料学会:「地盤改良」に関わる技術評価証明報告書-ガス透過性防水シートを 用いたキャッピング工法-, pp.43-45, 2012.
- 3) 気象庁:福島地方気象台ホームページ, < http://www.jma-net.go.jp/fukushima/>.

3.2 ガス透過性防水シートに人が載った場合に作用する張力の検討

3.2.1 概要

除染廃棄物仮置場において、上部シートとして用いるガス透過性防水シート(以下、シート)上に人 が載った場合にシートおよびシート接合箇所に作用する張力を想定した。

3.2.2 検討モデル

図 3.2-1 に示すようにフレキシブルコンテナが配置された場合 について、検討を行った。フレキシブルコンテナの直径を 1.1m と したとき、フレキシブルコンテナ間の空隙の最大スパンは 1.1m と なる。この最大スパンの中央に体重 100kg(足のサイズ 30cm とし て、載荷幅 B=0.3m とする)の人が一人載った場合を想定した。

図 3.2-2 に示すように、人が載ったことによりシートが変形し、 水平面に対し θ の角度で変形した場合、シート及びシート接合箇 所に作用する張力 T は式-1 で求めることができる。



図 3.2-1 フレキシブルコンテナ の配置平面



$$T = \frac{V/B}{\sin \theta}$$
式-1

$$V = \frac{W}{2}$$
を代入すると、

$$T = \frac{W}{2 \cdot B \cdot \sin \theta}$$
式-2

3.2.3 検討結果

任意のθに対し、式-2より算出した張力 T およびたわみ S を表 3.2-1 に示す。θ=10~45°の範囲にお いて、シートおよびシート接合箇所には最大 9.41kN/m の張力が発生することになる。

θ(°)	T(kN/m)	S(m)
10	9.41	0.10
15	6.31	0.15
20	4.78	0.20
25	3.87	0.26
30	3.27	0.32
35	2.85	0.39
40	2.54	0.46
45	2.31	0.55

表 3.2-1 θと張力 T、たわみ S の関係

上記の結果を踏まえ、体重 100kg の人が一人載った場合に発生する張力に対し、安全率を 2.0 とした 場合、シート及びシート接合箇所においては 18.8kN/m 以上の強度があることが望ましいと考えられる。 また、実現場においては、安全面やシートの耐久性の観点から、足場板等により、歩行場所を制限す ることが望ましく、その場合シートに対する影響も大幅に低減できる。

3.3 風荷重に対する FEM 解析による張力検討結果

3.3.1 はじめに

除染廃棄物仮置場において、風荷重に対する応力解析結果から、上部シート(ガス透過性防水シート) の最大発生膜張力と押さえブロック必要重量を算出した。以下にその結果を示す。

3.3.2 解析条件

1) 外力

外力は以下の風速による風圧力とした。なお、風力係数は排熱パイプ等からの風の吹きこみによる正、 負圧の影響を考慮し、±0.2の値を加味した。

風速 V=10、30、50m/s、風向は+X、+Y 方向

2) 解析ケース

仮置場のガス透過性防水シートの形状は図3.3-1および図3.3-2に示す2モデルとした。



3.3.3 解析結果

FEM 解析の一例を図 3.3-3 に示す。



図 3.3-3 解析結果の一例 (v=30m/s、風向X)

1) 最大発生膜張力

表 3. 3-1、表 3. 3-2 に各モデルの解析結果を示す。各種条件での最大膜張力をまとめて示す。なお、 表中の赤字は最大値である。また、図 3. 3-4 に各モデルの風速と最大発生膜張力の関係を示す。

		国内	国土反新	最大発生膜張力(kN/m)		
case NO.	風速(m/s)	風円	風问風刀深致	たて(Y)	よこ(X)	
case1		+X		0.65	0.55	
case2		+Y		0.72	0.47	
case3	10	+X	内圧+0.2	0.51	0.44	
case4	10	+Y	内圧+0.2	0.55	0.37	
case5		+X	内圧-0.2	0.79	0.65	
case6		+Y	内圧-0.2	0.87	0.57	
case7		+X		3.35	2.75	
case8		+Y		3.74	2.75	
case9	20	+X	内圧+0.2	2.67	2.26	
case10	30	+Y	内圧+0.2	2.95	1.92	
case11		+X	内圧-0.2	4.08	3.21	
case12		+Y	内圧-0.2	4.48	2.86	
case13		+X		7.23	5.85	
case14	50	+Y		8.14	5.04	
case15		+X	内圧+0.2	5.68	4.76	
case16	50	+Y	内圧+0.2	6.33	4.02	
case17		+X	内圧-0.2	8.94	6.90	
case18	ſ	+Y	内圧-0.2	9.91	6.10	

表 3.3-1 最大発生膜張力(モデル A)

		国内	国土区粉	最大発生膜引	長力(kN/m)
case NO.	風迷(m∕s)	風问	風刀孫致	たて(Y)	よこ(X)
case1		+X		0.64	0.50
case2		+Y		0.67	0.48
case3	10	+X	内圧+0.2	0.50	0.40
case4	10	+Y	内圧+0.2	0.50	0.41
case5		+X	内圧-0.2	0.77	0.60
case6		+Y	内圧-0.2	0.83	0.56
case7		+Χ		3.21	2.49
case8		+Y		3.43	2.26
case9	20	+Χ	内圧+0.2	2.57	2.00
case10	30	+Y	内圧+0.2	2.65	1.80
case11		+X	内圧-0.2	3.84	2.94
case12		+Y	内圧-0.2	4.16	2.68
case13		+X		6.84	5.25
case14		+Y		7.40	4.71
case15	50	+X	内圧+0.2	5.40	4.19
case16		+Y	内圧+0.2	5.62	3.73
case17		+X	内圧-0.2	8.29	6.26
case18		+Y	内圧-0.2	9.12	5.66

表 3.3-2 最大発生膜張力(モデルB)



図 3.3-4 風速と最大発生膜張力の関係

2) 押さえブロック必要重量

ガス透過性防水シート端部(四方の各辺、L1・L2・L3・L4)の反力を整理し、各風速毎に押さえ ブロックの最大必要重量をまとめた。図3.3-5に風速と押さえブロックの最大必要重量の関係を示す。



図 3.3-5 風速と押さえブロックの最大必要重量

3.3.4 まとめ

本解析結果から、ガス透過性防水シートの必要強度(接合部強度も含む)と押さえブロック重量について考察する。

1) ガス透過性防水シートの必要強度(接合部強度も含む)

どの程度の風速に対して耐久性を持たせるか議論があるところであるが、人が居住する構造物ではないことから、30m/s程度が妥当と考える。風速 30m/s時の最大発生膜張力はモデルAのたて(Y)方向がもっとも大きく、4.5kN/mとなる。

[提案]

- 実際の仮置場では紫外線劣化等があることから、安全率 4¹⁾を考慮するものとすると、ガス透過 性防水シートの必要強度(接合部強度も含む)Tは18.0kN/mとなる。なお、ガス透過性防水 シートとして CP600 を用いる場合、CP600 同士の接合強度は18.5kN/m(規格値)、CP600 と遮水シート(LLDPE1.5 mm)の接合強度は20kN/m(実測値)である。
- ・ 供用後の維持管理時、ガス透過性防水シートをサンプリングして引張試験実施後に継続使用可 否判断をする場合、その安全率2を考慮するものとすると、9.0kN/mとなる。

2) 押さえブロック重量

本検討では下部シートに遮水シートを想定し、その上にガス透過性防水シートを敷設する構造として いる。よって、下部シートとガス透過性防水シートの摩擦係数は 0.35 と低めの値を入力した(直接地 盤に敷設する場合、摩擦係数は 0.5~0.6 となり、押さえブロック重量は本検討結果より小さくなる)。

押さえブロック重量は風速 30m/s の場合、5kN/m 程度となる。多数の実現場ではこれより小さな ものが使用されているのが現実である。

[提案]

・ 押さえブロック重量は、実用上風速 10~15m/s 程度を想定した大きさとし、万一押さえブロックが滑動、転倒してもガス透過性防水シートが飛散しないような対応(ロープやベルト等による養生)を採る方が現実的と考えられる。

参考文献

¹⁾ 国土交通省国土技術総合研究所・独立行政法人建築研究所監修: 膜構造の建築物・膜材料等の技術 基準及び同解説, pp.51-52, 2003.

3.4 除染廃棄物仮置場上部シート張力の現場測定とその数値解析結果

3.4.1 はじめに

ガス透過性防水シートの材料性能は多くの室内実験や現場実験等で評価確認されている¹⁾。また,除 染工事共通仕様書²⁾では廃棄物最終処分場の事例等を参考にしてガス透過性防水シートの仕様等が示さ れている。しかし、ガス透過性防水シートに作用する主な外力である風圧力による影響を検討した事例 は少ない。風圧力によるガス透過性防水シートに発生する張力が把握できれば、仮置場での設計風速に 応じて適切なガス透過性防水シートの選定が可能になり、かつ、維持管理上、継続使用可否判断基準の 目安とすることができる。本検討では実際の仮置場にて風向風速および、ガス透過性防水シートに作用 する張力を間接的に測定³⁾し、その測定値を数値解析により再現し比較した。ここではその結果を報告 する。

3.4.2 ガス透過性防水シートに作用する風向風速と張力の測定

1) 測定場所・期間

測定場所、測定期間について以下に示す。
 測定場所;福島県双葉郡楢葉町下小塙 仮置場
 測定期間;2014.6.26~2015.3.20(約9ヶ月)
 上部シート;ガス透過性防水シート(エルベスキャッピングシート CP600)

使用されているガス透過性防水シートの標準物性を表3.4-1に示す。

型式	項目		物性値	試験方法	
	質量(g/m ²)		600以上		
	引張強さ(N/5cm)	たて	925以上	JIS L 1908	
CP600	(本体·接合部) よこ		925以上		
	貫入抵抗(N)		600以上	ASTM D 4833	
	耐水度(mmH2O)		2000以上	JIS L 1092	
	透湿度(g/m ² ·24hr)		2500以上	JIS L 1099 A-1法	

表3.4-1 ガス透過性防水シートの標準物性

測定は福島県浜通りに位置する上記仮置場で行った。当仮置場では1ブロック毎に除染廃棄物を入れた大型土のうが2段積みされておりガス透過性防水シートでカバーされている。測定対象ブロックは幅 21m×長さ38m×高さ2m程度の長方形で、長辺方向が真北から西へ20°傾いている(図3.4-1)。また、ガス 透過性防水シートの固定目的で上面四隅に各1個、周囲地盤面端部上に約5mピッチで大型土のうが設置 されている。写真3.4-1は仮置場の全景と測定対象ブロック(赤線範囲)である。





図 3.4-1 測定対象ブロックの形状と測定装置の位置

写真 3.4-1 仮置場全景 (赤線範囲が測定対象ブロック)

2) 測定項目と方法

測定項目は風向風速、ケーブル張力である(表3.4-2)。電源は測定対象ブロック近傍に設置した太陽 光発電装置から供給した(写真3.4-2)。

表 3.4-2 測定項目と装置

測定項目	測定装置	記号
風向·風速	風車型風向風速計 (KONA,KDC−54)	W_{drot} , W_{spd}
ケーブル張力	ロードセル(10kN)	T1, T2, T3, T4



写真 3.4-2 太陽光発電装置

風向風速計は測定対象ブロック北西角の地盤面から約7mの位置に設置した。また、ガス透過性防水シートの構造上、作用する張力を直接測定することは難しいため、ガス透過性防水シートにワイヤーケーブルを取り付け、そのワイヤーケーブルに作用する張力(以下、ケーブル張力)を測定した。図3.4-2 はケーブル張力測定方法の概略図(図3.4-1のケーブル張力計T2部分に相当)であり、1t土のうとH型鋼 をアンカーとして反力をとる構造とした。

なお、ワイヤーケーブルのたるみがなくなる程度に初期張力をかけた状態をロードセルの初期値(0) とした。



図 3.4-2 ケーブル張力測定方法の概略

写真3.4-3、写真3.4-4、に各測定装置を示す。



写真3.4-3 ケーブル張力測定装置



写真 3.4-4 風向風速計

3) 測定結果

目視観察によると平均風速が10m/s程度まで上昇するとガス透過性防水シートが写真3.4-5のように 膨らんでケーブル張力が発生することがわかった。とりわけ、太平洋上を北上して急激に発達した低気 圧が通過した2014年11月3日には顕著なケーブル張力が発生した。図3.4-3に11月3日am6:00の天気図⁴ を示す。



写真 3.4-5 風によるガス透過性防水シートの変形 (北東角より)



図 3.4-3 天気図 (2014.11.03 6:00am)⁴⁾

図3.4-4に測定時間0~450minの10分間平均風向を、図3.4-5に10分間平均風速を、図3.4-6にT3のケー ブル張力を示す(いずれも横軸原点は11月3日am2:44)。強風は一定風向(西北西,約280°)で10分間 平均風速は約9.4m/s(最大瞬間風速は約23m/s)であった。



図 3.4-6 ケーブル張力(T3,20Hz)

表 3.4-3 に最大ケーブル張力が発生した時刻(246min)でのケーブル張力とガスト影響係数を示す。なお、ガスト影響係数は同時刻における 10 分間平均ケーブル張力に対する 0.05 秒毎(20Hz) で計測したケーブル張力との比とした。

ヶ _────────────────────────────────────	ケーブル	張力(kN)	ガスト影響係数
クーフル	(a)測定値(20Hz)	(b) 10分間平均	G _f (a∕b)
T1	2.18	0.37	5.94
Т2	6.93	2.77	2.50
Т3	8.36	2.87	2.92
T4	0.71	0.52	1.35

表 3.4-3 ケーブル張力とガスト影響係数

3.4.3 ケーブル張力の数値解析値と実測値の関係

ガス透過性防水シートは風圧力を受けると変形し、その変形したガス透過性防水シートは逆に風圧力 に影響を与える。このような現象を考慮して、流体解析(CFD解析)と構造解析(SA解析)の繰り返しによ り、計算前後で変形量が収束する状態となった5回目の計算値を解析結果とした⁵。

なお、流体解析はレイノルズ平均ナビエ・ストークス式に基づく計算手法(RANS)を用いて定常解析と し、有限体積法で平均風圧係数を求めた。乱流モデルにはRNGk-εモデルを用いた。構造解析は幾何学的 非線形を考慮した太陽工業㈱製有限要素法ソフトMAGESTICを用いた。ガス透過性防水シートの引張剛 性やせん断剛性は一軸引張試験結果とポアソン比から算定した。

表3.4-4に解析に用いたガス透過性防水シートとケーブルの諸元を示す。図3.4-7は解析時のグリッド 形状と境界条件である。外力は前述の測定で得られた風向280°(西北西)、10分間平均風速9.4m/sとした。

		たて	360.6
ガス透過性防水シート	515 医阿汀主(18/011)	よこ	285.7
	ポマントル	たて	0.30
	ホアノノ止	よこ	0.24
	せん断剛性(N/cm)	124.3	
	単位面積重量(N/m2	5.88	
	ヤング係数(N/mm2	137000	
ケーブル	断面積(mm2)	39.4	
	単位長さ重量(N/m)	3.2	

表 3.4-4 ガス透過性防水シートとケーブルの諸元



図 3.4-7 解析の境界条件

図3.4-8にガス透過性防水シートの変形図、図3.4-9にケーブル張力の解析結果の一例を示す(ともに 5回目SA解析結果)。解析は10分間平均風速を外力としているため、解析値と測定値の比較に際しては測 定値(20Hz)をガスト影響係数Grで除した値との比, α₁(補正前)で評価した。



図 3.4-9 ケーブル張力

表3. 4-5に比較結果を示す。風上、風下側である短軸方向のT2、T3はそれぞれ、α=0.9、0.8と比較的 一致するが、長軸方向のT1、T4ではα=2.9、7.4と差が大きい結果となった。

<u>ل</u> ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ	補正前	補正後		補正前	補正後
ケーノル	a ₁ .解析值(kN)	a₂.解析值(kN)	、N) ^{b.} 測定値(20Hz)/G _f [※] α ₁ (a		$lpha_2(a_2/b)$
T1	2.18	1.32	0.75	2.9	1.8
Τ2	4.68	3.68	4.95	0.9	0.7
Т3	4.85	3.98	5.97	0.8	0.7
Τ4	2.01	0.94	0.27	7.4	3.4

表 3.4-5 解析値と測定値の比較

※G_fは解析対象測定値のうちの最小値

この差の要因としては以下が考えられる。

- ・ 北西隅角部に設置した風向風速計設置足場による風圧力への影響
- ・ ガス透過性防水シート四隅に設置されていた大型土のうの風圧力への影響
- 内圧の変動による影響(ガス透過性防水シート側面に設置された放熱管から風の吹き込み等に起因)
- ・ 経時的なケーブルの緩み
- ・ 周辺地形の影響(写真3.4-1に示すとおり、近傍に他ブロック群が存在)

写真3.4-5でもわかるように実際のガス透過性防水シートはブロックの風上北西側で変形が抑えられた状態にあることが確認されている。一方、解析では図3.4-7に示したように全体的に膨らんだ結果となる。この変形の違いが T1、T4 ケーブルで測定値と解析値の差が大きくなった一因と考えられる。そこで、図3.4-10に示すように北西、南東側のガス透過性防水シートの一部節点に鉛直下向きの荷重を与え、補正解析を行った結果、表3.4-5に示すとおりT2、T3ではα2=0.7となり差は若干増えるが、T1、T4ではそれぞれα2=1.8、3.4となりその差は縮小する結果となった。



3.4.4 まとめ

実際の仮置場のガス透過性防水シートに計測装置を取り付け、風向・風速とシートに取り付けたケー ブルを介して間接的な張力(ケーブル張力)を測定した。数値解析の結果は長軸方向(概ね風向に直角 方向)で解析値が測定値より大きくなる傾向を示したが、短軸方向(概ね風向。風圧力が大きく張力も 大きい)では、ほぼ測定値と一致した。なお、長軸方向解析値が測定値より大きくなる要因としては、 周辺環境やケーブルの緩み等が考えられる。

本検討結果から、本数値解析(流体解析・構造解析)方法を用いれば、仮置場の上部シートに作用す る張力を概ね再現できると考えられ、仮置場での設計風速に応じたガス透過性防水シートの必要強度の 見積もりや、供用後の維持管理上、継続使用可否判断基準の目安とすることができると考える。

参考文献

- 1) 例えば、公益社団法人日本材料学会:「地盤改良」に関わる技術審査証明報告書-ガス透過性防水シ ートを用いたキャッピング工法-,2012.
- 2) 環境省:除染等工事共通仕様書,第9版(改訂版),p70,2016.
- 3) 石田正利・小嶋淳・西村正樹・赤井智幸・山本正人・遠藤和人・嘉門雅史:除染廃棄物仮置場上部 シートの風による張力測定,土木学会第70回年次学術講演会論文集,pp.63~64,2015.
- 4) 気象庁:福島地方気象台ホームページ, < http://www.jma-net.go.jp/fukushima/>.
- 5) 武田文義・吉野達矢・石田正利: 仮置場上部シートに作用した風力推定の試み,日本建築学会大会(九 州)学術講演会梗概集,構造 I,2016

3.5 除染廃棄物の不同沈下によるシートの不陸対策実験

<u>3.5.1 はじめに</u>

除染廃棄物仮置場において、保管物が腐敗性廃棄物の場合、 内容物の腐敗に伴い不同沈下が発生する場合が多い。上部シ ート(遮水シート、ガス透過性防水シート等)を設置後、こ の不同沈下が発生した箇所に雨水等が滞留し(写真 3.5-1)、 衛生害虫や異臭が発生し、周辺環境に影響を与えることが懸 念されている。また、現場接合部に雨水等が滞留することに より、局所的に応力が生じ、漏水につながる可能性も考えら れる。ここでは上部シートの不陸対策について実験を行った 内容を報告する。



写真3.5-1 腐敗後の不同沈下の様子

3.5.2 実験概要

福島県楢葉町の除染廃棄物仮置場にて、上部シートの不陸対策(図 3.5-1)を行い、対策ありと対策 なしの沈下状況を比較した。以下に不陸対策の施工手順を示す。

【手順】

- 天端に設置されている遮蔽土のうの上面にジオ ネットを敷設する(写真 3.5-2)。
- ② ジオネットの周囲に単管パイプを設置し、ロー プにて張力を付与して遮蔽土のうへ仮止めする (写真 3.5-3)。
- ③ 上部シートを敷設し、外周囲に押さえ土のうを 設置する。設置後、上部シートの周囲からロー プを貫通させ表面に出し、押さえ土のうへ接続 して、再度ロープに張力を付与する(写真 3.5-4)。
- ※ 施工後、時間が経過して張力が弱まった際は、 再度ロープにて張力を付与する。







写真3.5-2 ジオネットの敷設

写真3.5-3 ロープの仮止め

写真3.5-4 ロープの固定

3.5.3 実験結果および考察

写真3.5-5、写真3.5-6に、不陸対策ありと不陸対策なしの沈下状況を示す。

施工完了して7日後(2014年8月4日)の調整で、不陸対策を行ったほうが、沈下および雨水滞留の 低減が見受けられ、本対策の効果が確認できた。なお本方法は、ロープやジオネットの経時的なゆるみ が発生することから、定期的に雨水排除、ロープの増し締め等の維持管理が必要と考える。



写真3.5-5 不陸対策あり



写真 3.5-6 不陸対策なし

3.6 除染廃棄物仮置場供用中の上部シートの経年物性変化の確認

3.6.1 はじめに

除染廃棄物仮置場の上部シートに対し、その継続使用の判断基準とするためのデータ取得を目的とし、 福島県内の除染廃棄物仮置場において、約24ヶ月間、実際に上部シートとして使用されたガス透過性 防水シート(エルベスキャッピングシート CP600)の湛水部および気中部から試料を採取し、主要物性 の経年変化を評価した。なお、経年変化の評価にあたっては、供用後の維持管理や、上部シートの継続 使用の可否判断のために提案・策定した維持管理基準値(案)と比較した。また、室内での促進暴露試験 ならびに(地独)大阪府立産業技術総合研究所(産技研)内での屋外暴露実験の結果とあわせ報告する。

3.6.2 試料の採取

試料の採取場所、採取日について以下に記す。

採取場所;福島県田村市内
供用開始日;平成25年5月
第1回目採取;平成26年7月30日(約14ヶ月経過)
第2回目採取;平成27年5月14日(約24ヶ月経過)

図 3.6-1、図 3.6-2 に試料採取箇所図を示す。



図 3.6-1 試料採取箇所図



試料は2.0m(たて)×1.5m(よこ)の寸法で現場接合部が中心になるようにして、気中部および湛水部において各1箇所採取した。写真3.6-1~写真3.6-4に試料採取状況を示す。



写真 3.6-1 サンプル採取前(気中部)



写真 3.6-2 サンプル採取後(気中部)



写真 3.6-3 サンプル採取前(湛水部)



写真 3.6-4 サンプル採取後(湛水部)

3.6.3 試験項目と試験方法

表3.6-1に試験項目および試験方法を示す。

NO.	試験項目	試験部位	試験方法
1	ゴ電路を	母材部	JIS L 1908 準拠
2	り張強さ	接合部	JIS K 6850 準拠
3	貫入抵抗	母材部	ASTM D 4833 準拠
4	耐水度	母材部	JIS L 1092 準拠
5	透湿度	母材部	JISL1099 A-1法 準拠
6	透水試験	接合部	JIS A 1218 準拠

表 3.6-1 試験項目および試験方法

図3.6-3に各試験片の採取イメージを示す。



図 3.6-3 試験片採取イメージ

3.6.4 仮置場上部シートの維持管理基準値の提案

除染等工事共通仕様書¹⁾より、除染廃棄物仮置場における上部シート(通気性防水シート)の必要物性(初期値)は**表 3.6-2**のとおりに記されている。

NO.	試験項目	単位	要求値	
1	引張強さ	NI/5 arm	025	
(母材部)	IN/ SCIII	923		
2	貫入抵抗	Ν	500	
3	耐水度	mmH ₂ O	1,000	
4	透湿度	g/m ² /24h	2,500	

表 3.6-2 上部シート(通気性防水シート)の必要物性(初期値)

上部シートに限らずほとんどの人工材料は、外部環境(応力、紫外線、温度変化、気象等)の影響に より長期的に劣化する。仮置場上部シートは、3年以上の使用が予定されており、供用後の維持管理時 において、引続きの使用可否を判断することが必要である。そこで本項では、これまでの研究成果から 上部シートの維持管理基準値を提案し、表3.6-3に示した。なお、仕様書に明記のない接合部について も自主基準として定めた。例えば、この維持管理基準値を参考にして、供用中の仮置場上部シートの評 価(引続きの使用可否)が可能となると考える。

NO.	試験項目	単位	要求値	出展
1	引張強さ	N/5am	450	FEM 解析による張力検討結果のまとめ ²⁰ より、安全率を2と
1	(母材部)	IN/JCIII	400	して設定
2	引張強さ	N/5em	450	按今如においてま 母母如同学の引進強さな確保
2	(接合部)	N/9CIII	450	なロ部にわいても、みれ部門寺の力派強さを確床
S	貫え抵抗	N	500	除染等工事共通仕様書における上部シートの必要物性(初期
5	貝八抵抗	IN		値)と同値 ¹⁾
Л	武士 库	mmH.O	1 000	除染等工事共通仕様書における上部シートの必要物性(初期
4	耐小皮		1,000	値)と同値 ¹⁾
5	透湿度	g/m²/24h	360	推定ガス発生量 ³⁾ より設定
	透水計驗			
6		mmH_2O	500	自主基準:接合部においても防水性を確保
	(近日日)			

表 3.6-3 上部シート(通気性防水シート)の維持管理基準値(案)

3.6.5 試験結果

以下に各試験結果を示す。各試験結果のグラフには、促進暴露試験データ、産技研での屋外暴露実 験データ、そして、前述の維持管理基準値(案)を併記した。

なお、促進暴露試験のデータに関しては、試験時間 300h を屋外暴露1年(12ヶ月)相当として換 算している。

引張強さ(母材部)

図3.6-4 および表3.6-4 に母材部の引張試験結果を示す。24 ヶ月経過後においても維持管理基準値 (案)を満足する結果が得られている。産技研での屋外暴露実験データとほぼ一致する結果が得られた。 また、促進暴露試験結果とも概ね同じ傾向がみられ結果となっている。



図 3.6-4 引張試験(母材部)結果

母材引張強さ(たて) N/5cm									
暴露時間 (日)	現場 湛水部		現場 気中部		促進暴露		産技研 屋外暴露実験		維持管理基準値
	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(楽)
0	2352.4	100%	2352.4	100%	2245.7	100%	2085.0	100%	450
3							2015.0	97%	
4		0%		0%	1443.0	64%		0%	450
6							1990.0	95%	
12		0%		0%	1310.5	58%	1655.0	79%	450
14	2017.0	86%	1772.0	75%		0%		0%	450
18							1570.0	75%	
20		0%		0%	1182.1	53%		0%	450
24	1700.0	72%	1700.0	72%		0%	1610.0	77%	450
36							1630.0	78%	
40		0%		0%	1235.6	55%		0%	450

表 3.6-4 引張試験(母材部)結果

母材引張強さ(よこ) N/5cm										
暴露時間	現場 湛水部		現場 気中部		促進暴露		産技研 屋外暴露実験		維持管理 基準値	
	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(案)	
0	1196.8	100%	1196.8	100%	983.0	100%	1235.0	100%	450	
3							1190.0	96%		
4		0%		0%	777.9	79%		0%	450	
6							1140.0	92%		
12		0%		0%	687.6	70%	970.0	79%	450	
14	866.0	72%	910.0	76%		0%		0%	450	
18							900.0	73%		
20		0%		0%	597.6	61%		0%	450	
24	706.0	59%	888.0	74%		0%	890.0	72%	450	
36							930.0	75%		
40		0%		0%	694.7	71%		0%	450	

2) 引張強さ(接合部)

図3.6-5および表3.6-5に引張試験結果を示す。24ヶ月経過後においても維持管理基準値(案)を満 足する結果が得られており、促進暴露試験結果と比較し、若干低めの値となっている。

表 3.6-5 引張試験(接合部)結果

接合部引張強さ									
	暴露時間	現場 湛	水部	現場,	贡中部	促進	維持管理 基準値		
		測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(案)	
	0	1124	100%	1124	100%	1124	100%	450	
	4		0%		0%		0%	450	
	12		0%		0%		0%	450	
	14	815	73%	790	70%		0%	450	
	20		0%		0%		0%	450	
	24	610	54%	675	60%		0%	450	
	40		0%		0%	590	52%	450	

図 3.6-5 引張試験(接合部)結果

3) 貫入抵抗

図3.6-6および表3.6-6に貫入抵抗試験結果を示す。24ヶ月経過後においても維持管理基準値(案) を満足する結果が得られており、促進暴露試験結果と比較し、若干高めの値となっている。

図 3.6-6 貫入抵抗試験結果

表 3.6-6 貫入抵抗試験結果

貫入抵抗 N									
暴露時間	現場 湛水部		現場 気中部		促進暴露		産技研 屋外暴露実験		維持管理 基準値
	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(<u></u> 案)
0	831.0	100%	831.0	100%	858.4	100%	933.0	112%	500
3							856.0		
4		0%		0%	785.3	91%		0%	500
6							819.0		
12		0%		0%	692.4	81%	806.0	97%	500
14	783.7	94%	803.6	97%		0%		0%	500
18							766.0		
20		0%		0%	683.9	80%		0%	500
24	735.0	88%	820.0	99%		0%	785.0	94%	500
36							785.0	94%	
40		0%		0%	663.3	77%		0%	500

4) 耐水度(母材部)

図3.6-7 および表3.6-7 に耐水度試験結果を示す。24ヶ月経過後においても維持管理基準値(案)を 十分に満足する結果が得られている。試験結果の2000mmH₂Oは、試験装置にてシートに作用させる ことのできる最大水圧(装置性能上の上限値)であり、その最大水圧を加えても漏水が発生しなかっ たことを意味している。

図 3.6-7 耐水度(母材部)試験結果

表 3.6-7 耐水度(母材部)試験結果

耐水度 mmH ₂ O										
暴露時間 (日)	現場 湛	水部	現場會	〕 中部	促進	維持管理基準値				
	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(楽)			
0	2000	100%	2000	100%	2000	100%	1000			
4		0%		0%	2000	100%	1000			
12		0%		0%	2000	100%	1000			
14	2000	100%	2000	100%		0%	1000			
20		0%		0%	2000	100%	1000			
24	2000	100%	2000	100%	2000	100%	1000			
40		0%		0%	2000	100%	1000			

5) 透湿度

図3.6-8 および表3.6-8 に透湿度試験結果を示す。実測データ、促進暴露データとも低下傾向がみられるが、24ヶ月経過後においても維持管理基準値(案)を満足する結果が得られている。

図 3.6-8 透湿度試験結果

表 3.6-8 透湿度試験結果

透湿度	透湿度 g/m ² ·24hr									
暴露時間	現場 湛水部		現場 気中部		促進暴露		産技研 屋外暴露実験		維持管理 基準値	
	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	測定値	強度 保持率	(楽)	
0	3744	100%	3744	100%	3156	100%	3215	100%	360	
3							1707			
4		0%		0%	2976	94%		0%	360	
6							3256			
12		0%		0%	3024	96%	3049	95%	360	
14	2784	74%	1200	32%		0%		0%	360	
18							2959			
20		0%		0%	1824	58%		0%	360	
24	1104	29%	1176	31%		0%	2880	90%	360	
36							1822	57%		
40		0%		0%	900	29%		0%	360	

なお、**写真 3.6-5**に示すとおり、微多孔膜部分は上面の不織布で覆われており直接、紫外線には暴露 されないため、透湿度の低下に紫外線が直接的に関与している可能性は極めて低いといえる。透湿度の 低下原因として、以下の点が考えられる。

写真 3.6-5 エルベス CP600 の断面構成

- ① 不織布と微多孔膜の貼り合わせに用いるホットメルト量のバラツキによる影響
- ② 不織布繊維表面のポリエチレン成分が紫外線劣化により親水化し、透湿度試験結果に影響
- ③ 降雨により空気中の微細物質が微多孔膜に付着し微孔を塞いだ
- ④ 紫外線による不織布繊維のポリエチレン劣化物が微多孔膜に付着し微孔を塞いだ
- ⑤ 微多孔膜のホットメルト成分が暴露により移動し、微孔を塞いだ
- ⑥ 日射によるシート温度の上昇に伴い、微多孔膜が熱収縮し、微孔が狭くなった

そこで、上記原因のうち、試験室で評価可能な③、④、⑤項および、⑥項について追加試験を実施し、 調査した。

(1) 微細物質による影響の検証(3、4、5項)

微多孔膜への微細物質付着の影響を調査するため、現場採取試料(暴露面および非暴露面)、未使用 試料の3点についてエタノール中で超音波洗浄を1時間実施し、抽出物の成分分析を実施した。表3.6-9 に各試料から抽出された物質を示す。

NO.	試料	抽出物質
1	現場採取試料(暴露面)	白状粉体(粘着質)、繊維、土粒子
2	現場採取試料(非暴露面)	糊状膜、白色板状粉体
3	未使用試料	糊状膜

表 3.6-9 各試料からの抽出物質

ガス透過性防水シートの不織布および微多孔膜を構成している素材と超音波洗浄により抽出された 物質を比較した結果、抽出された白色粉体(粘着質)および、糊状膜はホットメルト成分である可能性 が高いことが分かった。一方、白色板状粉体についてはガス透過性防水シートの構成素材には含まれな い成分のため、現場供用中に付着したものと考えられる。また、未使用品からの抽出物である糊状膜は 超音波洗浄時のエタノールの温度上昇(約60℃)によりホットメルト成分が抽出されたと考えられる。 以上より、超音波洗浄により微細物質が抽出されたことから、これら微細成分が微多孔膜の微孔を塞 ぐこと等により、透湿度が低下した可能性が考えられる。

(2) 微多孔膜の熱収縮による影響の検証(⑥項)

供用中のガス透過性防水シートは日射や腐敗性廃棄物の腐敗熱等により温度上昇する可能性がある。 そこで、微多孔膜の温度上昇に伴う熱収縮が、透湿度に影響を及ぼす可能性について調査した。ガス透 過性防水シートを 60℃恒温室に所定時間静置し、室温にて透湿度を調べた。図 3.6-9、図 3.6-10 に透 湿度とその保持率を示す。

60℃に所定日数加温した場合、透湿度保持率は 60%程度に低下するが、40 日以降は平衡に達する。 このことから、微多孔膜が熱収縮により微孔が小さくなったことも透湿度の低下に影響すると考えられ る。

上記の検証より、約14ヶ月使用したガス透過性防水シートの透湿度が低下した原因としては、以下 が考えられる。

A. 長期間の屋外使用により、暴露面のホットメルト成分が移動し、微多孔膜の微孔の一部が閉塞した

B. 土粒子やホットメルト成分等の微粒子が微多孔膜面に付着し、透湿試験に影響した

C. 微多孔膜の熱収縮により、微孔が小さくなった。

上述 C の影響は室内試験により、透湿度保持率 60%程度低下することがわかった。約24ヶ月使用後の現場採取試料の透湿度保持率は30%程度であることから、A~C の要因が複合したことが原因であると考えられる。

(3) 実用に対する影響

屋外 24 ヶ月使用後の透湿度は、約 1100g/m²・24hr である。また、促進暴露試験 1000hr 以降では 900g/m²・ 24hr 程度である。これらの値は、腐敗性廃棄物から発生すると予測されているガス発生量を多めに試算 した値(360g/m²・24hr)³⁾を大きく上回っている。

さらに、除染廃棄物仮置場のガス発生量は搬入から経時的に低下することから、透湿度が360g/m²・24hrを下回らない限りは実用上問題ないといえる。

6) 透水試験(接合部)

現場接合部(気中部、湛水部)に対し、産技研にて図 3.6-11 に示す透水試験装置により透水試験を 実施した結果、50cm 水頭で 24 時間経過しても透水は認められなかった。したがって、24 ヶ月経過後に おいても、現場接合部は所要の防水性を有するといえる。(維持管理基準値(案)を満足する結果が得ら れている。)

7) 電子顕微鏡観察(SEM 観察)

電子顕微鏡により採取した試料の表面観察を行った。観察箇所は、補強布表面(暴露面)、微多孔膜 直上の補強布、微多孔膜表面の3箇所を実施した。図3.6-12に模式図を示す。

図 3.6-12 電子顕微鏡観察箇所

表 3.6-10 に各撮影箇所の電子顕微鏡写真を示す。

観察	未使用の試料	使用後:	促進暴露	
箇所	(オリジナル)	気中部	湛水部	1000h 処理後
1		3.0KV X500 60µm 12 50 SEI	3.04V X500 60µm 12.50 SEI	3.0kV 2500 60µm 1240 SEI
2	3.04V X500 60µm 13.40 SEI	3.0kV X500 50µm 12.50 SEI	3.04 X50 50µm 13 40 SEI	NO DATA
3	54V X1,000 16µm 19 50 SEI	3.0kV X1.000 10µm 10 50 SEI	3.0KV X1,000 10jum 10.80 SEI	5kV X1.000 10µm 10 50 SEI

表 3.6-10 電子顕微鏡写真

補強布表面の繊維については、未使用品の試料(オリジナル)と比較すると、表面の剥がれなど、 繊維自体の劣化が進行している様子が確認された。なお、気中部と湛水部とでは、若干、気中部のほ うが劣化の度合いが大きく、これは、太陽光(紫外線)から受ける影響に違いがあるためと推測され る。

一方、微多孔膜直上の補強布の状態については、繊維表面の損傷等の劣化はほとんど認められなかった。また、本シートの主要機能(防水性・通気性)を担う微多孔膜表面についても、ひび割れ等の 損傷は見られず、ガス透過性と防水性は維持できていると思われる。

3.6.6 考察

除染廃棄物仮置場において、上部シートとして約24ヶ月間使用されたガス透過性防水シート(エル ベスキャッピングシート CP600)は、表3.6-3に示す維持管理基準値(案)を満足していることが分かった。

引張強さ(母材部、接合部)、貫入抵抗、耐水度の実暴露での試験結果については、促進暴露による 試験結果と概ね一致していることから、促進暴露の試験データが、今後の経年劣化を推測する目安に なると思われる。

透湿度の試験結果については、必要物性(初期値)との保持率は約30%と低下はしているものの、 維持管理基準値(案)は十分に満足する結果となっており、実用上問題ないといえる。

今後も、供用開始後の上部シートについて実暴露された試料を評価することで、上部シートの引続き の使用が可能かの判断材料とし、除染廃棄物の適正保管に役立てればと考える。

参考文献

- 1) 環境省:除染等工事共通仕様書,第8版,p65,2015.
- 2) ジオシンセティックス技術研究会:ガス透過性防水シートの除染廃棄物仮置場上部シートへの適用 に向けた取り組み, pp.61~65, 2014.
- 3) 公益社団法人日本材料学会:地盤改良に関わる技術評価証明報告書-ガス透過性防水シートを用いたキャッピング工法-,p11,2012.