

ヘドロの利活用 II. ヘドロの乾燥特性

矢橋晨吾*・金 原台*・玉津智広*・Hoque M.Mozammel*・阿部勢子*・高橋 悟**
(*緑地環境工学研究室, **東京農業大学農業水利学研究室)

Study on the Utilization and Application of Hedoro Soil II. Drying Properties of Hedoro Soil

Shingo Yabashi*, Wontae Kim*, Tomohiro Tamatsu*, Hoque M.Mozammel*,
Seiko Abe*, and Satoru Takahashi**
(*Laboratory of Green Space Environmental Technology
**Laboratory of Irrigation and Drainage, Tokyo University of Agriculture)

ABSTRACT

This study was conducted to obtain fundamental data which, in turn, be used for the improvement of hedoro soil (muddy sediment), widely existed in lowlands of Japan. Previously, in the first report, the physical properties of four kinds of hedoro soil were reported. Here in this paper, we present the physical properties of three kinds of hedoro soil. They are Haneda hedoro soil (H) existing under seawater, Matsue hedoro soil (M) existing under brackish water and Kasumigaura hedoro soil (K) existing under pure water. We also investigated changes of the properties during drying process in Haneda hedoro soil. The results obtained were summarized as follows;

1. It was observed that the liquid limits (LL) and plastic limits (PL) of Kasumigaura were the highest among the three different hedoro soils. The LL and PL were influenced by ignition loss to a considerable degree.
2. In the Haneda hedoro soils hydraulic conductivity decreased gradually against the increase of dry density with the exception that in stage 3 (pF3. 6) a reverse trend was observed. That was probably because of appearing cracks.
3. The compaction curve hysteresis of hedoro soil was appeared as similar to the volcanic ash soil that is rich in clay.
4. The drying process caused an irreversible effect on the measurement regarding consistency, water retentivity, hydraulic conductivity and compaction of hedoro soil.

緒 言

ヘドロは、自然状態で生成される土壌とは大きく異なり、堆積場所や流入物質等によってその性状が左右され、人為的な影響が著しく大きい。すなわち、ヘドロは流水の運搬作用により海、湖沼や河川の底に堆積し、一般に超軟弱地盤を構成している微細粒子からなる泥状堆積物である。なお、ヘドロの定義並びに概要については前報

[4]にて詳細に述べた。また、前報[4]ではヘドロを堆積場所により海水ヘドロ、汽水ヘドロ並びに淡水ヘドロとして取り上げ基本的性質について比較したが、淡水ヘドロの採取場所に若干問題があった。したがって、本報ではまず塩分の影響の少ないとされている霞ヶ浦から採取したヘドロを淡水ヘドロとして加え、既報のデータとともに基本的物理量について比較検討した。続いて、東京湾羽田沖のヘドロについてはコンシステンシー特性、pF—水分特性、透水特性並びに締固め特性等を対象とし

て乾燥過程の違いによる変化状況を検討した。

材料と実験方法

対象とした試料は、海水ヘドロとして東京湾羽田沖 (H)、汽水ヘドロとして松江城堀割内 (M)、淡水ヘドロは霞ヶ浦 (K) から採取したヘドロである。ヘドロはいずれも軟泥状であるため、現地における試料の採取は、雑物の混入していない個所を選び、長柄のひしやくを使ってプラスチックコンテナに掬い取り、密封して研究室に持ち帰った。

(1) 試料の特徴

霞ヶ浦ヘドロ (K) はかなり粘質状を呈し、黒色で弱い腐敗臭を発生していた。

なお、他のヘドロについての特徴は前報[4]にて述べた。

(2) 実験方法

供試土の基本的物理量は今回追加した霞ヶ浦ヘドロ (K) を対象に前報[4]と同様の試験方法により①土粒子密度、②粒度特性、③コンシステンシー特性、④膨潤度、⑤沈降体積、⑥水分特性、⑦強熱減量の7項目を取り上げ、③から⑦までの5項目は生土と風乾土についても検討した。ヘドロの生土と風乾土との間に顕著な性状変化の発現することについてはこれまでにいくつかの物理性によって把握したが、本報の主題はこの現象をさらに詳細に検討することである。すなわち、生土から風乾

土までの脱水・乾燥過程を2段階または3段階に区分し、各々の供試土について、コンシステンシー特性、pF—水分特性並びに透水特性について検討した。pF—水分特性の測定はpF2.2以下は水頭型の吸引法、pF2.2以上4.2までは遠心法によった。透水特性はJIS A1218に準じた変水位透水試験により飽和透水係数を求めた。なお、pF—水分特性及び透水特性の供試土は各々異なっているので、試験開始時のpF値は同一とはならない。さらに締固め特性については、JIS A1210のうち呼び名Aを準用し、生土から出発した乾燥過程において、風乾状態に達した後、逆方向の湿潤過程に移り、その密度変化を追跡した。

結果と考察

(1) 基本的性質：前報[4]では海水ヘドロとして川崎沖及び羽田沖の2ヶ所を取り上げ、汽水ヘドロとして網走湖、淡水ヘドロは松江城堀を対象としたが、松江城堀ヘドロに微量な塩分が検出されたため、若干の問題が残った。したがって、本報では羽田沖(海水)、松江城堀(汽水)並びに霞ヶ浦(淡水)を対象としてTable 1にまとめこれらと比較することにした。

1) 土粒子密度 (ρ_s)

3試料の比較においては、羽田沖 (H) が最大値を示した。霞ヶ浦 (K) と松江城堀 (M) はほぼ同値であるが、Kの方が若干大きい。

2) 粒度特性

Fig. 1は3試料の粒径加積曲線である。砂、シルト及び粘土各粒子分の構成割合を詳細に把握するため、3曲

Table 1 Physical Properties of Hedoro Soil

Soil Sample	Haneda (H)		Matsue Castle's Moat (M)		Kasumigaura (K)	
	fresh	dried	fresh	dried	fresh	dried
soil particle density: ρ_s (g/cm ³)	2.67		2.51		2.55	
sand: S (%)	2		13		1	
silt: Si (%)	20		58		22	
clay: C (%)	78		29		77	
soil texture	HC		SiC		HC	
liquid limit: LL (%)	90.3	77.6	159	98.1	253.5	114.4
plastic limit: PL (%)	40.3	33.3	57.3	52.4	77.2	61.3
plastic index: I_p	50.0	44.3	102	45.7	176.3	53.1
flow index: I_f	14.7	11.5	17.7	17.9	101.5	18.3
degree of swelling: S_d	1.89	1.46	1.66	1.37	1.58	1.28
degree of sedimentation volume: S_v (ml/g)	5.33	2.10	9.23	2.36	11.91	4.13
ignition loss: Lig (%)	9.77		15.61		17.09	

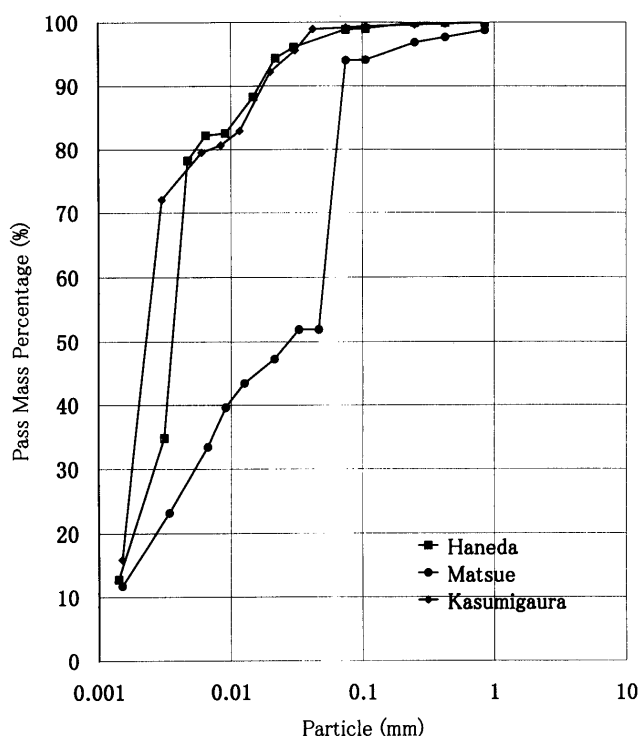


Fig. 1 Grain-size Accumulation Curve of Hedoro Soil

線を各々の粒子範囲に区分し、その結果をTable 1に併記した。Kについては砂分はわずかに1%に過ぎず、3/4以上は粘土分が占め、残りはシルト分であることから一般にこうした粒度組成からなる土はかなり粘質な性状を呈するものと判断される。これは海水ヘドロであるHと極めて類似していることがわかった。またMとはやや異なっている。

3) コンシステンシー特性

Kの液性限界(LL)は異常に大きく、生土についてはHの3倍、Mの2倍に近い値となっている。風乾土については、やはりKが最大値を示すものの、3試料間の値には生土ほどの大差は生じていない。一方、塑性限界(PL)については、生土及び風乾土ともに順位はK>M>Hとなっているが、これら3試料間に大きな差は見られない。上記のLL及びPLの結果を受けて、塑性指数(I_p)についても同様の大きさの順位が認められる。また、Kの生土の流動指数(I_f)は101.5と異常に大きいですが、風乾することによって18.3と著しく小さくなった。さらに生土の3試料間には大差があるものの、風乾土については、H:14.3、M:24.5、K:18.3となっており、3試料は生土に大差があることと比較してかなり接近している。

4) 膨潤度(S_d)

膨潤度についてH、M、Kの3試料は生土から風乾土

Table 2 Consistency of Haneda Hedoro Soil in Drying Process

Soil Sample	fresh	drying process stage 1	drying process stage 2	air dried
water content $w(\%)$	124.0	94.7	58.3	10.2
pF	0.8	2.5	4.0	5.5
liquid limit $LL(\%)$	106.5	92.7	83.3	64.7
plastic limit $PL(\%)$	41.7	38.0	39.3	41.4
plastic index I_p	64.8	54.7	44.0	23.3

への移行に伴って減少しているが、いずれもその値は1.0~2.0の範囲にあり、膨潤性の大きい土とはいえない。

5) 沈降体積

沈降体積は生土から風乾することによってかなり減少している。

6) 強熱減量

有機物含有量の目安としての強熱減量はK>M>Hの順となっており、霞ヶ浦ヘドロが最大値17.09%を示している。

(2) ヘドロの乾燥特性

超軟弱なヘドロ地盤を各種の土地基盤として利用するには何らかの処理をして密度を増大させ、支持力及びせん断強さを増強しなければならない。一般に土は生土状態から脱水・乾燥することによって収縮し、硬化することは衆知のことであろう。こうした処理を自然条件下で実施する場合、極限は風乾状態といえよう。しかし土、特にシルト・粘土分の多い粘質土はある段階の乾燥状態から大小の亀裂が発生し、必ずしも支持力やせん断強さの増強につながるとは限らない。こうした点を踏まえて、ヘドロの乾燥の途中の各段階における物理性並びに力学性を明らかにする必要がある。なお、乾燥特性を追究するためには大量の試料が必要となるため、対象は取りあえず試料量の多い羽田沖ヘドロとした。

1) コンシステンシー

Table 2は4段階の含水比における液性・塑性限界並びに塑性指数を示したものである。液性限界(LL)については、生土から風乾土に至る過程で各試験開始前の含水比(w)が124.0、94.7、58.3、10.2%へと減少しているが、LL試験開始時には当然加水と練返しを行った。乾燥の進行に伴って明らかにLL値は減少している。一方、PLについては一定の変化傾向を示さなく、また、生土と風乾土との間の差がごくわずかであった。塑性指数(I_p)についてはLLの影響を受けているためか、LLと同様の減少傾向を示している。

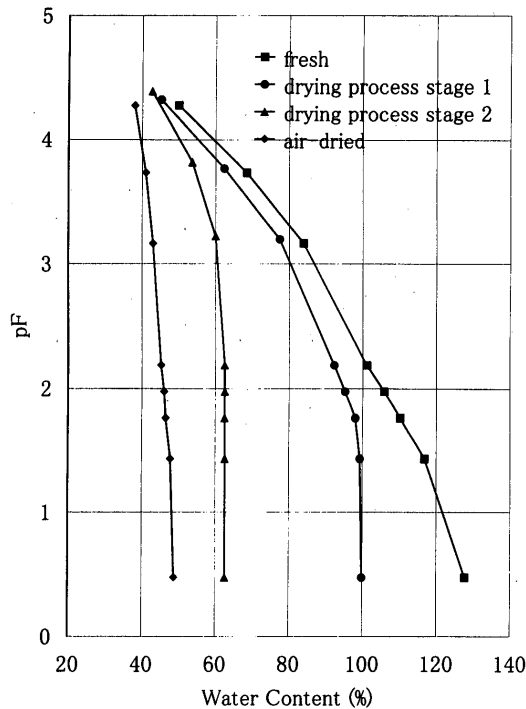


Fig. 2 Water Characteristic Curves of Fresh, Drying Process stage 1, 2 and Air-dried of Haneda Hedoro Soil

2) pF—水分特性

Fig. 2 はヘドロの乾燥に伴うpF—水分特性の変化状況を示す曲線である。コンシステンシーの変化について述べた各段階の初期含水比に相当するpF値はTable 2に併記したとおり、生土：0.8，脱水1：2.5，脱水2：4.0，風乾土：5.5となっている。pF試験に当っては供試体はいずれも水浸により飽和状態とした。図から明らかなように供試体の乾燥の進行に伴って低pF領域から高pF領域に至る水分特性曲線は立上がりが激しくなっている。換言すれば、この範囲（pF：0.5～4.2）の水分量が大きく減少している。すなわち、ヘドロは脱水・乾燥に伴って体積が収縮すると、再び水浸させても元の状態には戻らなくなり、間隙径の分布状態が大幅に変化していくものと考えられる。

3) 透水特性

Table 3 はヘドロの各水分段階並びにpF値に対する飽和透水係数の値を示したものである。本試験の場合、供試土を風乾状態まで乾燥させると大亀裂が発生し、測定不可となるため、脱水3の含水比61.2%，pF3.9に相当する段階まで乾燥させた。乾燥の進行に伴って乾燥密度（ ρ_d ）は増大し、透水係数（ k ）はかなり低下するが、最終段階の脱水3に至っては逆に k は大きくなり、しかも生土の値を超えた状態となっている。

4) 締固め特性

Table 3 Hydraulic Conductivity of Haneda Hedoro Soil in Drying Process

Soil Sample	fresh	drying process stage 1	drying process stage 2	drying process stage 3
dry density ρ_d (g/cm ³)	0.60	0.72	0.98	1.00
water content w (%)	134.3	103.4	64.8	61.2
pF	0.5	2.0	3.8	3.9
hydraulic conductivity k (cm/s)	1.12E-06	6.24E-07	6.45E-08	7.77E-06

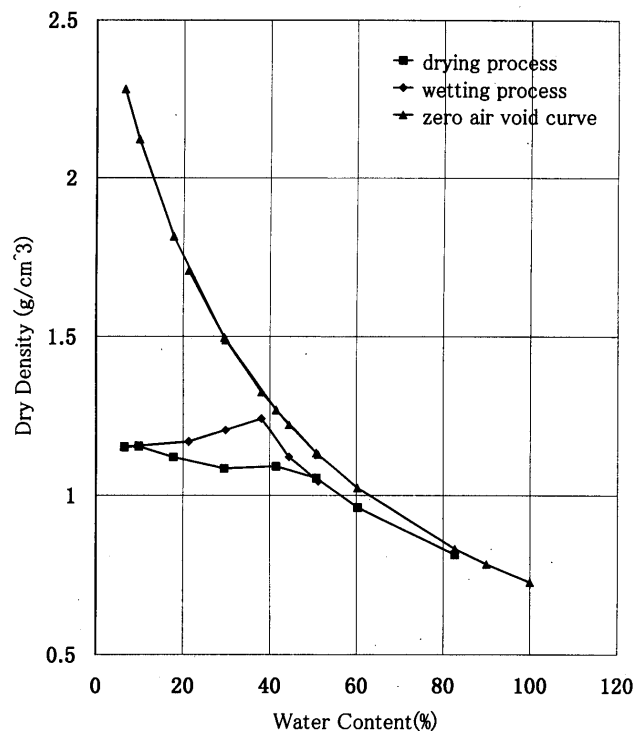


Fig. 3 Compaction Curve in Drying and Wetting Process

Fig. 3 は生土から出発し、乾燥過程を経て風乾状態に達し、この点から逆方向の湿潤過程に移っていった突固めによる締固め曲線である。含水比50%付近からの乾燥領域において、乾燥過程と湿潤過程の締固め曲線は明らかにループ（ヒステリシス）を描いている。

(3) 論 議

1) 物理性

ヘドロは堆積場所によってその性状が多少なりとも変わることは構成している流入物質に大きく左右されるためであろう。しかし、土の基本的性質（粒度組成とともに通常的环境条件下では変化しないとされている）である土粒子密度（ ρ_s ）は、3試料のうち最大値は羽田沖（H）で2.67 (g/cm³)、他は松江城堀割内（M）2.51 (g/cm³)と霞ヶ浦（K）2.55 (g/cm³)と、いずれも平均的な値と

されている石英砂の $2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ に近いまたはこれより小さい。これは一般にヘドロ地盤が流れの末端に形成され、浮遊状態の後、長期間かけて堆積すること、さらに ρ_s の値に関与するといわれている[1]有機物含有量が影響しているものと考えられる（ここでは強熱減量

(Lig)を代用しているが、3試料の ρ_s の大小関係とLigのそれとは必ずしも一致していない。すなわちMとKの ρ_s とLigがわずかながら逆になっている。この原因は明らかでないが、ヘドロに含まれている他の物質が関係していることが推測される)。ヘドロの最も特徴的な物理性の一つであるコンシステンシーについてはLL・PLともに生土のKが異常に大きいことが注目される。コンシステンシーに最も大きく関係する粒度組成はKとHとの間に大差がないものの、KのLL値はHの3倍近い値を示している。これには淡水と海水の違いの他に強熱減量（有機物含有量）がある程度関与しているものといえよう[1]。一方膨潤度についてはいずれも2.0以下で典型的な膨潤土とはいえず、コンシステンシーとは直接に関係していない。また、沈降体積はKが最大値を示し、生土・風乾土ともに粒度組成が類似のHの2倍以上となっており、これにはLigや堆積場所が何らかの形で関係しているといえよう。

2) 乾燥特性

前報[4]ではヘドロの脱水・乾燥に伴う質的变化を究明するため、生土と風乾土の両極端の含水状態を対象として、コンシステンシーを中心に論じた結果、乾燥に伴う不可逆性の発現することが明らかとなった。こうしたヘドロの物理的特徴を踏まえて、疎水化現象[2]をより詳細に把握しようとした。まずコンシステンシーについては脱水・乾燥に伴いLLが減少に向かって進んでいることは前述のとおりである。この過程について、pF値で評価すれば生土：0.8と脱水1：2.5の間にpF：1.5~1.8の領域が存在する。これは土工管理[5]の面でLL値に相当し、植物管理の面では最小含水量または圃場含水量に相当する。また、脱水1：pF=2.5と脱水2：pF=4.0の間にpF=3.0の領域が存在するが、これは上記に従えばPL値又は最適含水量(W_{opt})並びに毛管連絡切断水分量又は正常生育阻害水分量に相当する。したがって、ヘドロ地盤の土工管理及び植物管理においてはこれら2段階間の脱水・乾燥状態が一つのポイントになろう。

水分特性については、ヘドロの乾燥に伴う質的变化は前記のコンシステンシーとともにpF—水分特性についても顕著に現れた。Fig. 2から、乾燥に伴い変化する水分特性曲線の形状から、pF：1.5~1.8からpF：3.0に相当する水分範囲が急激に減少していることは明らかである。こうした変化特性を踏まえてヘドロの適正な水分管

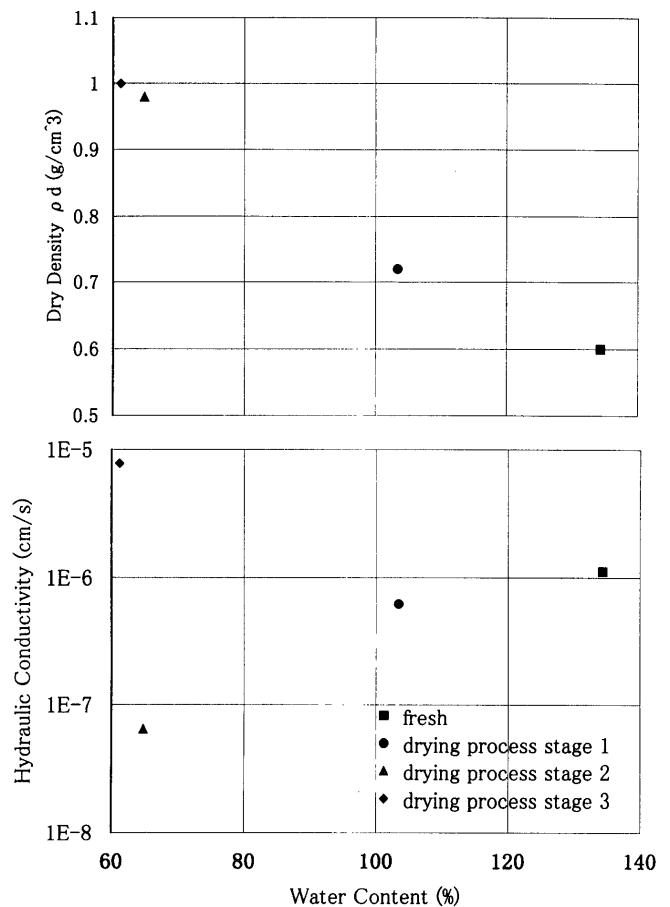


Fig. 4 Relation of Water Content with Hydraulic Conductivity and Dry Density in Fresh, Drying Process stage 1,2 and 3 of Haneda Hedoro Soil

理を行うことが重要となろう。

透水特性については、Fig. 4に乾燥に伴う各段階の乾燥密度 (ρ_d) 並びに飽和透水係数 (k) をプロットした。含水比 (w) 64.8% (pF：3.8) までは乾燥の進行とともに ρ_d は増大し、 k は減少しているがこの点を境に w のわずかの減少に伴って ρ_d の若干の増に対して k は急激に増大している。これには少なくとも透水性を左右する乾燥亀裂が発生したものと考えられる。

締固め特性については、一般に関東ロームのような火山灰質粘性土は特異な締固め曲線を描くといわれている[2]。すなわち同じ供試土について湿潤過程と乾燥過程を連続的に測定した場合、締固め曲線はループを描き、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は湿潤過程において出現する。これまでに得られた実験結果から、ヘドロについても生土から風乾土への移行において、かなりの試験項目の物理性に变化が現れたことを確認している。したがって、各種の土地造成時の盛土施工において乾燥・湿潤過程で現れるヒステリシスに伴う締固め特性を知ることが重要で

あると考えた。Fig. 3 に示した締固め曲線は乾燥過程と湿潤過程との間に明らかにヒステリシスが現れており、火山灰質粘性土と同様の性状をもつものと判断される。

摘 要

前報[4]では4種類のヘドロを対象として、基本的物理性の検討を行い、ヘドロが極めて細粒質の粘性土で、かつ超軟弱であることを明らかにした。本報では霞ヶ浦から採取した淡水ヘドロを加え、既報のデータとともに基本的物理性について比較検討した。続いて、東京湾羽田沖のヘドロについてはコンシステンシー特性、 pF -水分特性、透水特性並びに締固め特性等を対象として乾燥過程の違いによる変化状況を検討した。

物理性並びに乾燥特性の検討より得られた結果は以下に要約される。

1. 生土の霞ヶ浦(K)のLL・PLがともに異常に大きいことが注目される。特にLL値はKがHの3倍近い値を示している。これには淡水と海水の違いの他に強熱減量(有機物含有量)が関係しているものと考えられる。
2. 乾燥の進行に伴い乾燥密度(ρ_d)は増加し、透水係数(k)は大きく低下するが、脱水3($pF3.8$)を境に k が急激に増大している。これには少なくとも透水

性を左右する乾燥亀裂が発生したものと考えられる。

3. 締固め曲線は乾燥過程と湿潤過程との間に明らかにヒステリシスが現れており、火山灰質粘性土と同様の性状をもつものと判断される。
4. ヘドロは、土のコンシステンシー特性、水分特性、透水特性並びに締固め特性において、脱水・乾燥に伴う質的变化、すなわち不可逆性が認められる。

引用文献

- [1] 前田 隆・相馬克寸之・佐々木清一(1976):腐植が土の物理性に及ぼす影響,農土論集,61,9-17.
- [2] 多田 敦(1965):関東ロームの締固めと透水係数について,農土論集14,36-40.
- [3] 竹中 肇・江崎 要(1973):ヘドロの土壌工学的特性とその改良一主として八郎潟のヘドロについて一,土と基礎,21-6(184),67-74.
- [4] 矢橋晨吾・武藤ゆり・玉津智広・金 原台・高橋 悟・渡邊文雄(1997):ヘドロの利活用 I. 物理的性質,千葉大園学報,51,167-172.
- [5] 八幡敏雄(1975):土壌の物理,東京大学出版会,35-52.