

土壤水分の変動と物理・化学性の変化

前 田 要*

Effect of Changes in Soil Moisture Content on Soil Physical and Chemical Properties of Ill-drained Paddy Fields

Kaname MAEDA

Hokkaido Prefectural Central Agricultural Experiment Station

1. まえがき

土壌中における水の移動は、気象条件や地形、土壌構造などの環境要因によって変動するものであるが、一方では人為的な土壌管理法の差異によって規制される面が強い。

たとえば、基盤整備施工後の水田でみられる土壌の排水機能の低下、あるいは水田の高度利用に伴う還元田の代かき用水量の増加などはその良い例である。

従来から、湿田の乾田化対策として各種の排水法改善対策が講じられているが、北海道では全水田面積の約80%が半湿田あるいは湿田で占められており、水稻生産の良質・安定化を図るうえで排水性改善の意義はきわめて大きい。

湿田型土壌における排水機能の向上は、土壌水の円滑な移動を通じて土壌乾燥促進に寄与するが、その過程に

おける土壌の力学的挙動に興味もたれる。さらに、土壌含水比の変動が土壌の理工学性に及ぼす影響を的確にとらえることは、圃場での土壌管理あるいは施肥管理を適切に実施するための重要な指標となる。

したがって、ここでは湿田型土壌における土壌乾燥の意義を土壌水分の変動に伴う理工学性および化学性の変化の面から考えてみる。

2. 湿田型土壌での土壌水の移動

湿田型土壌は乾田型土壌に比べると融雪後および落水後の地表面水の消失が遅延するため、圃場の土壌分水状態は過湿気味の場合が多い。Fig. 1には湿田型土壌のグライ土およびグライ台地土圃場における耕起前の土水分pF値の推移を示した。

Fig. 1 からうかがえるように、両土壌とも地中深10 cmのpF値が5 cmに比べ終始低く推移しており、下層

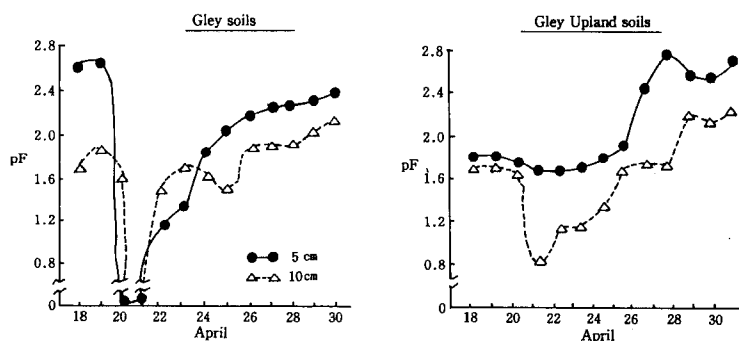


Fig. 1 Change of pF values in ill-drained paddy fields.

*北海道立中央農業試験場

Table 1 Comparison of soil physical and engineering properties between Well-drained and ill-drained paddy fields

Soil and sampling date	Horizon	Distribution of soil three phases (%)			Water content by weight (%)	pF	Ic	Shrinkage factors		Permeability coefficient (K_{20} , cm/sec)	
		Solid phase	Liquid phase	Air phase				Shrinkage limit (%)	Volumetric change (%)		
Before plowing (May 4)	Gley soils	Plowed soil	28.4	56.1	15.5	74.8	0	0.21	32.9	30.3	3.3×10^{-3}
		Subsurface soil	28.5	59.5	12.0	80.2	0	0.29	39.1	29.5	2.5×10^{-4}
	Gley Upland soils	Plowed soil	32.4	62.6	5.0	72.0	0	0.23	40.2	24.2	4.2×10^{-4}
		Subsurface soil	33.4	56.6	10.0	62.7	1.9	0.47	40.0	30.0	3.3×10^{-5}
After surface drainage (Sept 3)	Gley soils	Plowed soil	32.6	62.9	4.5	72.3	0	0.22	42.1	32.7	9.4×10^{-7}
		Subsurface soil	34.0	62.5	3.5	70.5	0.9	0.47	38.9	35.9	4.0×10^{-7}
	Gley Upland soils	Plowed soil	27.6	67.7	4.7	93.3	0	-0.32	46.3	57.3	4.7×10^{-6}
		Subsurface soil	35.8	62.6	1.6	65.4	1.7	0.41	40.6	28.5	6.1×10^{-7}
Before plowing (May 7)	Brown Lowland soils	Plowed soil	36.7	46.8	16.5	47.5	2.5	1.28	38.6	9.6	1.8×10^{-4}
After surface drainage (sept 17)		Plowed soil	35.9	54.7	9.4	63.0	2.1	1.08	40.9	10.2	2.5×10^{-4}

では大部分が pF 2.0 以下である。またグライ土では降雨（4月19～20日，16 mm）後には pF が 0 以下となり，圃場には表面停滞水がみられるほどである。

つぎに，両土壌の耕起前および落水後の土壌 3 相組成および Ic（コンシステンシー指数）を乾田型土壌の褐色低地土と対比してみると（Table. 1），湿田型土壌のグライ土およびグライ台地土の両土壌では土壌 3 相中に占める固相率の割合が 30～35% 前後で比較的小さいのに対し，液相率は 55～68% にも達している。また土壌含水比も 63～90%（pF 1.9 以下）の範囲内で，乾田型土壌の褐色低地土に比べると著しく高い。さらに大型機械走行上の指標となる Ic 値も常時 0.5 を下回る傾向にあり，地盤の軟弱な様子がうかがえる。

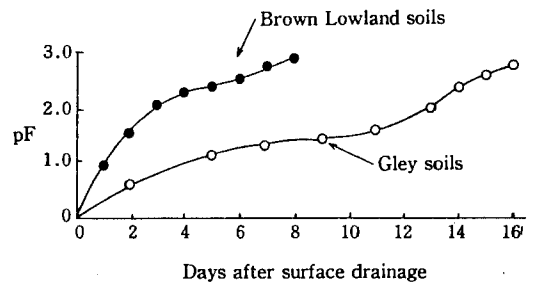


Fig. 2 Change of pF values after surface drainage (in 5 cm depth).

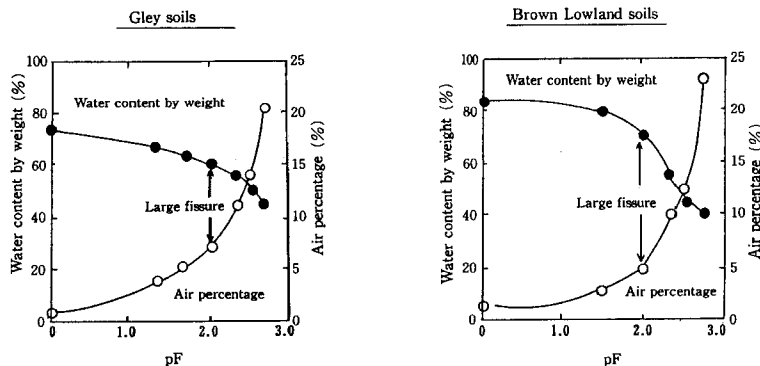


Fig. 3 Relationship between pF values and water content by weight and air percentage in well-drained and ill-drained paddy fields.

一方、落水後の地表面水の消失過程をグライ土と褐色低地土と比較すると (Fig. 2 および Fig. 3), 作土の大部分が泥土状化した厚い水膨潤層で占められている湿田型土壤のグライ土では地表面水の消失がきわめて緩慢であり、落水7日後によく地表面に初期キレッツの生成 (pF 1.5, 含水比67%) が認められる程度で、大キレッツの生成 (pF 2.0, 含水比61%) が開始されるまでには10日以上も要した。

それに対して、乾田型土壤の褐色低地土では落水後の地表水の消失が早く、落水3日後には pF 1.7, 含水比72%に達して初期キレッツの生成が開始され、4日後には大キレッツの生成 (pF 2.0, 含水比68%) が認められるな

ど土壤の乾燥が急速に行われる。

以上のように、湿田型土壤のグライ土やグライ台地土などにおいては耕起時の土壤水分状態が過湿状態にあり、かつ落水後の圃場乾燥化も乾田型土壤の褐色低地土などに比べると大幅に遅延するため、耕起時および収穫時の大型機械導入にあたっては排水法の改善による土壤の乾燥化対策が強く要求される。

3. 土壤水分の変動と理工学的変化

土壤の理工学的な挙動が土壤の水分状態によって変動することは、すでに多くの研究で明らかにされているが、湿田型土壤のグライ土とグライ台地土において、土壤水分の変動と物理・工学的の関係について自然構造の試料を供試して検討した結果を Fig. 4 以下に示した。

まず、Fig. 4 の液相率と容気度の関係を見ると、液相率が45~75% (含水比50~120%) の範囲内において、

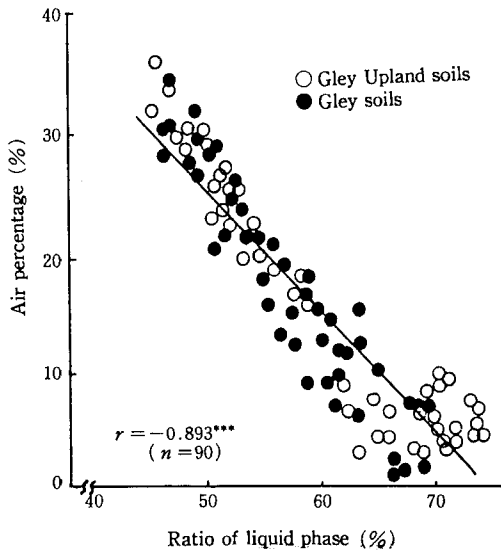


Fig. 4 Relationship between ratio of liquid phase and air percentage in heavy clayey ill-drained paddy fields.

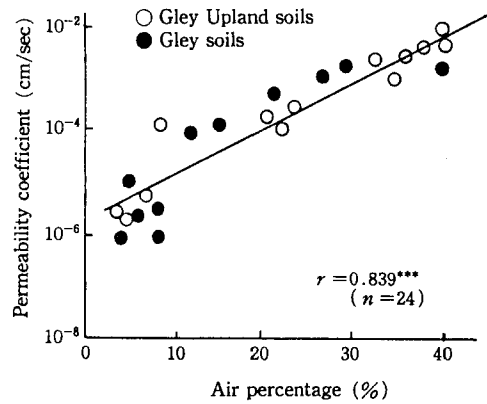


Fig. 5 Relationship between air percentage and permeability coefficient in heavy clayey ill-drained paddy fields.

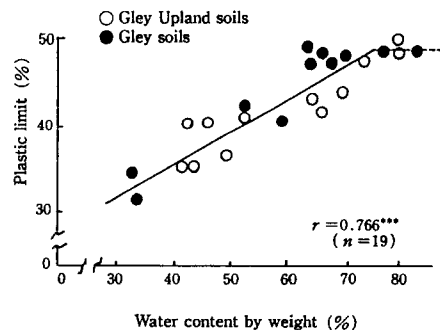
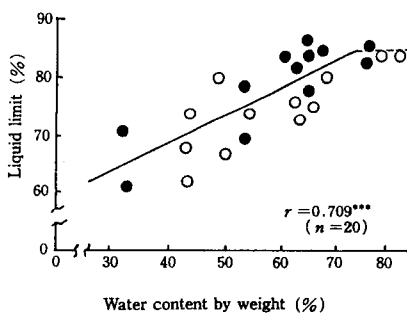


Fig. 6 Relationship between water content by weight and liquid limit and plastic limit in heavy clayey ill-drained paddy fields.

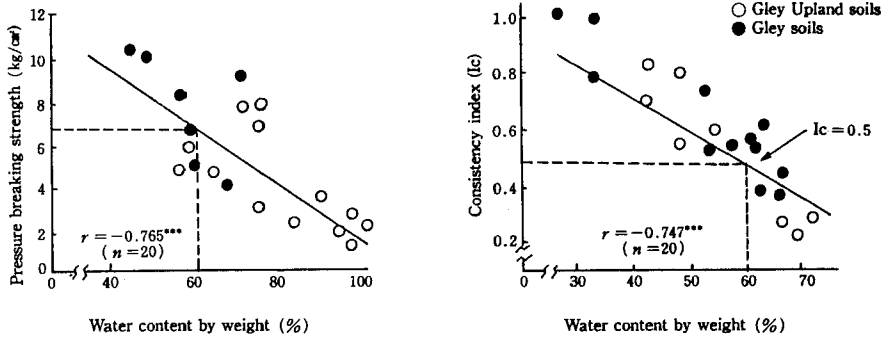


Fig. 7 Relationship between water percentage by dry weight and pressure breaking strength and consistency index in heavy clayey ill-drained paddy fields.

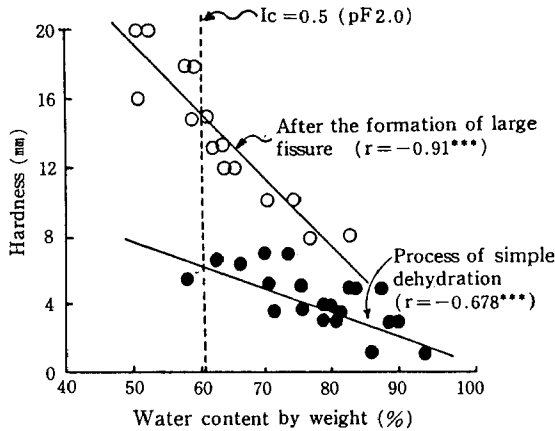


Fig. 8 Relationship between hardness of land surface and water content by weight in Gley soils.

液相率と容気度の間には負相関 ($\gamma = -0.893^{***}$) が認められ、土壌水分の飽和に伴って気相割合が明らかに低下している。さらに、容気度と透水係数の関係では (Fig. 5)、両者間に明瞭な正相関 ($\gamma = 0.839^{***}$) が得られ、このことは土壌乾燥に伴う気相割合の増加によって圃場の排水性の増大する様子を示している。

つぎに、土壌含水比と工学的特質面との関係をアッターベルグ常数でみると (Fig. 6)、両土壌とも土壌含水比が70%以下の範囲内では含水比の低下に伴って液性限界、塑性限界がいずれも低下する傾向にあり、それらの間には各々高い正の相関係数 ($\gamma = 0.709^{***}$, $\gamma = 0.766^{***}$) が得られている。

一方、Fig. 7 から明らかなように、土壌の地耐力、すなわち大型機械走行能力と密接に関連する土壌の圧碎強度および I_c と含水比の間にはいずれも負相関 ($\gamma = -$

0.765^{***} , $\gamma = -0.747^{***}$) が得られ、土壌含水比の低下に伴って圧碎強度、 I_c が顕著に増大する。

ちなみに、グライ土およびグライ台地土において大型機械走行可能な土壌のコンシステンシー指数 (I_c 値で0.5) を得るために必要な土壌含水比の値はほぼ61%以下であり、またこの時の土壌圧碎強度は 8 kg/cm^2 程度である。

なお、グライ土において土壌含水比と地耐力の指標となる地表面の垂直硬度 (山中式) との関係を検討した結果 (Fig. 8)、両者間には高い負相関が得られたが、同一含水比でも中干し処理を伴わない単純な脱水過程に比べ中干し処理 (pF 2.0 以上の強度) による大キレツ生成後の垂直硬度は高い値を示した。

すなわち、 I_c 値0.5における地表面の垂直硬度は無処理で6 mm、中干し処理で14 mmであった。

このように、圃場レベルにおける土壌含水比の変動が土壌の理工学性に及ぼす影響はきわめて大きく、とくに機械化作業を前提とした圃場の土壌条件確保のうえで、含水比の基準化は重要な指標となるものと判断される。

4. 地温および水稲生育に及ぼす土壌乾燥の影響

湿田型土壌は乾田型土壌に比べると排水性が劣り、根圏域の地温上昇が緩慢である。またそのことは湿田における水稲の初期生育不良要因の一つでもある。

隣接する細粒質な灰色低地土の転換畑と連作田において、土壌水分状態と理工学性の相違が湛水後の水田地温に及ぼす影響について検討した。

まず、耕起前に水田還元予定の転換畑と連作田の土壌物理性について検討した結果を Table 2 に示した。

それを見ると、転換畑は還元作田に比べ作土ならびに下層土とも土壌含水比が低く、かつ土壌構造の発達が良

土壌水分の変動と物理・化学性の変化

好であり、融雪後の土壌乾燥が急速に進行した様子を示している。

つぎに、湛水後の6月上旬から8月上旬までの地温(地中深10 cm)を低温年の1983年と高温年の1984年の2ケ年にわたり検討した結果(Table 3), 低温年では両土壌間での明瞭な差異は認められないが、高温年では連作田に比べ還元田の方が100°C(1.6°C/day)以上も上回っている(測定日数71日間, 日平均積算地温: 連作田……1,802°C, 還元田……1,614°C)。

また、水稻の初期生育および収量も全般に連作田より

還元田の方が勝る傾向があった。

さらに、別に行なったグライ土およびグライ台地土の排水性改善試験結果においても⁶⁾, 排水性改善処理(籾殻暗渠, 籾殻心土破碎)では無処理(従来の土管暗渠のみ)に比べ土壌の乾燥が良好で、水稻の初期生育並びに登熟・収量性がいずれも向上するなどの特徴がみられた。

これらの結果から、同一土壌型であっても土壌構造ならびに土壌乾燥来歴の違いによって土壌の温度環境に差異の生ずることが想定され、水稻根圏域の温度上昇を図

Table 2 Comparison of soil physical properties between conventional and converted paddy fields (April 26)

Soil	Horizon	Bulk density (g/100 cm ³)	Water content by weight (%)	Distribution of soil three phases (%)			Air percentage (%)	Permeability coefficient (K ₂₀ , cm/sec)
				Solid phase	Liquid phase	Air phase		
Conventional paddy fields	Plowed soil	94.1	67.8	31.1	63.7	5.2	7.6	6.7×10 ⁻⁷
	Subsurface soil	106.6	53.8	39.6	57.4	3.0	5.0	1.2×10 ⁻⁷
Converted paddy fields	Plowed soil	98.9	41.0	34.9	40.6	24.5	37.6	9.9×10 ⁻⁵
	Subsurface soil	117.3	45.0	42.8	52.7	4.5	7.9	3.3×10 ⁻⁷

Table 3 Comparison of soil temperatures between conventional and rotational paddy fields

Year	Soil	Soil temperature (in 10 cm depth, °C)							Accumulated temperature	
		June			July			Aug		
		Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early		
1983	Conventional paddy fields	Max	179.2	177.4	184.2	202.5	204.4	226.5	215.5	1,389.7
		Min	141.8	148.5	157.4	177.5	187.6	213.3	206.5	1,232.6
		Mean value	160.5	163.0	170.8	190.0	196.0	219.9	211.0	1,311.2
	Rotational paddy fields	Max	180.8	177.9	185.5	206.6	210.9	231.3	218.0	1,411.0
		Min	145.6	152.4	157.4	181.2	192.7	216.7	210.0	1,256.0
		Mean value	163.2	165.2	171.5	193.9	201.8	224.0	214.0	1,333.5
1984	Conventional paddy fields	Max	191.7	216.3	216.6	219.2	216.8	255.3	240.3	1,556.2
		Min	170.1	198.3	194.3	205.0	205.7	244.1	229.3	1,446.8
		Mean value	180.9	205.1	205.5	212.1	211.3	249.7	234.8	1,501.5
	Rotational paddy fields	Max	208.7	229.4	234.0	240.6	241.4	281.5	266.6	1,702.2
		Min	175.9	191.4	196.8	221.0	226.7	264.5	249.4	1,526.1
		Mean value	192.3	210.4	215.4	230.8	234.2	273.2	258.0	1,614.2

るうえで土壌の乾燥促進が有効に関与することが示唆された。

したがって、湿田型土壌において圃場の排水機能を高め土壌の乾燥を図ることは地温の上昇、有害物質の排除、さらには酸素供給による水稻根の活性を高めて水稻の生産性向上に寄与する面がきわめて大きいものと考えられる。

5. 土壌含水比と化学性の関係

土壌含水比の変動は、土粒子そのものの活性面に直接関与しているが、一方では土粒子と複雑に結合している他の有機・無機物質の形態変化にも影響を及ぼすものである。

従来から、湿田の乾田化に伴って土壌から供給される無機態窒素量の増加することが知られているが、これら

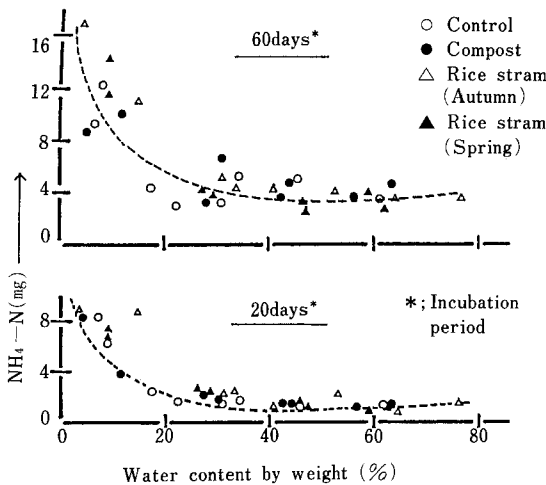


Fig. 9 Effect of water content of various soils on available nitrogen.

は一般に乾土効果、温度上昇効果といわれている。現地水田圃場の暗渠施工直上あるいは水田高度利用の還元田でみられる水稻のN吸収過剰による過繁茂現象などはその典型的な例である。

有機物処理の異なるグライ土水田において、湛水・静置培養（25℃、20.60日間）前の土壌含水比を80%から5%以下まで調整し、含水比とアンモニア態窒素生成量との関係について検討した。

結果は Fig. 9 に示すように、各土壌とも土壌含水比が10%以下に低下すると土壌から生成されるアンモニア態窒素量が急激に増加する傾向が認められる。この結果は、土壌含水比が10%以下の乾燥状態になると土壌に含まれている易分解性有機態Nが無機化し、作物に利用され易い形態に変化することを示している。

つぎに、半湿田および湿田（泥炭土、グライ土、灰色低地土、灰色台地土）タイプの転換畑および連作田の各土壌を乾・湿別に区分し、ポット試験により水稻の生育ならびに窒素吸収特性を検討した（Table 4）。

それを見ると、乾土処理（含水比3.5~5.0%）は原土（含水比22.9~62.2%）に比べ湛水初期からアンモニア態窒素生成量が著しく多く、水稻の初期生育および窒素吸収が旺盛な様子がうかがえる。

これらの結果から判断されるように、水田における土壌乾燥（含水比の低下）は、圃場レベルでの無機態窒素量放出パターンと密接に関係しており、とりわけ水稻初期生育の劣る湿田型土壌では地力窒素を有効に活用した生育促進化技術の一環として重要な役割をはたすものと考えられる。

6. むすび

湿田型土壌における排水性向上の意義は、地表面水の排除機能を高めることによって土壌のキレツ生成を早

Table 4 Effects of air-drying of soil on growth and absorbed nitrogen of rice plant

Soil	Ordinary paddy fields						Rotational paddy fields					
	Plant length (cm)		Number of tillers		Dry weight (g)		Plant length (cm)		Number of tillers		Dry weight (g)	
	June 9	July 19	June 9	July 19	July 9	July 30	June 9	July 19	June 9	July 19	July 9	July 30
Field-moist soil	22.7	45.3	4.4	10.4	2.00	8.50	23.9	46.5	4.1	8.8	1.83	7.10
Air-dry soil	26.8	50.0	5.2	15.6	3.51	13.08	27.2	49.7	5.4	16.1	3.09	14.42

Soil	Ordinary paddy fields						Rotational paddy fields					
	Nitrogen Percentage (%)		Absorbed nitrogen (mg)		NH ₄ -N (mg)		Nitrogen percentage (%)		Absorbed nitrogen (mg)		NH ₄ -N (mg)	
	July 9	July 30	July 9	July 30	Pot	Incubation*	July 9	July 30	July 9	July 30	Pot	Incubation*
Field-moist soil	2.00	1.60	38.2	134.2	1.58	5.13	1.85	1.64	33.5	117.3	1.40	5.31
Air-dry soil	2.38	1.72	84.0	226.7	5.40	13.75	2.45	1.68	75.6	242.2	5.09	12.62

Incubation *: Period.....28 days, temperature.....25°C

め、土壌乾燥と構造の発達を促進することにある。さらに、圃場乾燥の良化は地耐力を増強し、大型作業機械の走行能を高めることは勿論のこと、収穫残さ物（稲わら）の有効利用による地力培養、湛水期間中の土壌還元緩和、根圏土壌の地温上昇、窒素を中心とした養分供給様式の改善などの面にも寄与する。

現在、情報システム活用の中で土壌診断事業が活発に行なわれているが、今後その中に土壌水分変動に伴う水稻の養分吸収・生育パターンの変動予測を組入れた土壌環境要因の解析が必要になるものと思われる。

引用文献

- 1) 後藤定年：土壌の物理性， 8， 1～6 (1963)
- 2) 原田登五郎：農技研報告， B—9， 123～199 (1959)
- 3) 福士定雄：土肥誌， 40， 49～54 (1969)
- 4) 石原 邦：土壌の物理性， 16， 22～26 (1969)
- 5) 井 利一：土肥誌， 32， 342～350 (1961)
- 6) 前田 要：北海道立農試報告， 42， 1～87 (1983)
- 7) 前田 要：北農， 53， 23～40 (1986)
- 8) 前田 隆・相馬尅之：土壌の物理性， 30， 15～22 (1974)
- 9) 南 松雄・前田 要：道立農試集報， 29， 72～85 (1974)
- 10) 中川昭一郎：農土論集， 2， 19～85 (1964)
- 11) 齊藤万之助：土試報， 56， 1～49 (1971)
- 12) 相馬尅之：土壌の物理性， 38， 16～22 (1978)

Summary

A study was carried out to clarify the effect of changes in the soil moisture content on the soil physical and chemical properties of ill-drained paddy fields.

A high negative correlation was obtained between the liquid and air phase in terms of the soil three phases, and also a positive correlation was observed between the hydraulic conductivity and air capacity.

The liquid and plastic limit of wet soils decreased with the decrease of the moisture content.

On the other hand, the soil crushing strength and consistency index (Ic) remarkably increased when the moisture content decreased.

A high negative correlation was obtained between the soil hardness and soil moisture content. The soil compactness was higher in soils which had been subjected to midseason drainage.

In the Gray Lowland soils, the soil temperature was higher in converted paddy fields than in ordinary paddy fields.

Based on these facts, it was concluded that soil drying and the development of a structure affected considerably the increase of the soil temperature. Furthermore, both the amount of available nitrogen in soil and the amount of nitrogen absorbed by the rice plant increased with air-drying in ill-drained paddy soils.